



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESALACIÓN DE AGUA DE MAR, EFECTOS DE  
LA TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN DEL  
AGUA DE ALIMENTACIÓN EN EL PROCESO DE  
DESALACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA.**

**T E S I S**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO MECÁNICO**

P R E S E N T A:

CARLOS ALBERTO PIÑA NÁJERA

DIRECTOR DE TESIS:  
Dr. GERARDO HIRIART LE BERT

*Ciudad Universitaria, México D.F, enero de 2010*



## ***Agradecimientos***

En lo que llevo de vida podría decir que tres cosas han sido las más importantes de mi vida, mi familia, la Universidad Nacional Autónoma de México y el futbol americano.

### *Mi familia*

Por ser el soporte que me ha ayudado a llegar a ser la persona que soy, en especial mi *padre* y *madre*, por estar siempre a mi lado, por haberme dado una educación de excelente calidad, por haberme involucrado en el maravilloso mundo del futbol americano, por darme su apoyo en los momentos difíciles de mi vida, por darme abrazos y lagrimas de alegría y por todos los momentos felices que hemos pasado.

A mis hermanos, que siempre han salido adelante, porque sus triunfos me han servido de ejemplo, a *Hugo*, por ser un excelente ingeniero y ahora también un excelente padre de familia, a *Mariana*, a quien quiero y admiro tanto, porque siempre ha enfrentado las dificultades de la vida y ha salido triunfante, a *Paco*, por el éxito que ha obtenido y por el inicio del que espero sea un gran negocio.

A mis sobrinas, Verónica y Valentina, que siempre me hacen pasar momentos llenos de felicidad.

A mis cuñadas *Pilar* y *Montse* y a mi cuñado *Mario*, que ahora ya forman parte de mi familia y de lo cual estoy muy feliz.

A mi tía *Mary* y *Miguelito*, por el apoyo que me brindaron cuando viví con ellos, pero en especial a mi tío *Miguel*, porque sus consejos tuvieron un impacto impresionante en mi vida, agradezco aquellas tardes en las que me hacía ver que yo ya era un hombre y que como tal ya tenía que pensar en que iba a ser de mi vida, muchas gracias tío por todos los consejos que me diste.

A mis abuelitos, que aunque mi abuelita ya no se encuentra conmigo, se que siempre está cuidando de mi como aquellas tardes en que era tan solo un bebé. A mi abuelito por estar siempre pendiente de mí.

A todos los demás integrantes de mi familia, con los que he pasado momentos especiales y llenos de felicidad, tía Sarita muchas gracias por todo tu apoyo.

A la *Universidad Nacional Autónoma de México*.

Que para mí fue un gran honor ser parte de sus aulas y laboratorios. A los excelentes profesores que conocí a lo largo de mi estancia como universitario.

Al proyecto *IMPULSA IV*, que me vio crecer profesionalmente, quiero agradecer principalmente al Dr. Hiriart, por sus conocimientos y consejos, pero principalmente por la confianza que tuvo en mí.

A Salvador, por ser más que un compañero de trabajo un excelente amigo, por los proyectos que hemos realizado juntos y por el apoyo que siempre me has brindado.

A los amigos que forme dentro de este proyecto, Isaias, Pablo, Héctor, Joel, René, Rodrigo y Cintia, gracias por todo.

#### *Al futbol americano*

Que fue de las mejores experiencias de mi vida, gracias a él obtuve a mis mejores amigos, Aarón (Drago), León, Mariano, Ángel (Titino), Alejandro (Chiapas), Arturo (Culiacán) y David (Capi), con quienes tuve la fortuna de disfrutar de más victorias que derrotas.

Todos estos agradecimientos no serian posibles de no ser por mi mamá y papá, quiero que sepan que todo lo que he logrado a sido gracias a ustedes dos, los quiero y los admiro porque siempre nos han dado lo mejor de la vida y porque siempre han estado a mi lado para apoyarme.

# Contenido

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1 .....	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
CAPITULO 2 .....	4
CARACTERISTICAS DEL AGUA A DESALAR .....	4
Salinidad del agua .....	4
Composición química .....	5
CAPITULO 3 .....	8
INTRODUCCIÓN A LA ÓSMOSIS INVERSA.....	8
Ósmosis .....	8
Ósmosis inversa.....	8
Presión osmótica.....	9
Recuperación.....	9
Presión neta de manejo .....	10
Paso de sal y rechazo de sal .....	10
Efectos de la temperatura del agua de alimentación en el proceso de desalación.....	11
Efectos de la concentración del agua de alimentación en el proceso de desalación .....	11
Efectos de la presión de alimentación en el proceso de desalación.....	12
Flujo promedio .....	13
CAPITULO 4 .....	15
DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA.....	15
Obra de toma .....	16
Obra de toma cerrada .....	16
Obra de toma abierta.....	18
Pre tratamientos .....	20
Dosificación de hipoclorito sódico .....	21
Dosificación de coagulante .....	21
Filtración sobre arena .....	21
Dosificación de ácido sulfúrico.....	22

Adición de dispersante .....	22
Dosificación de bisulfito sódico .....	22
Filtros cartucho .....	22
Proceso de desalación .....	24
Recuperadores de energía .....	25
Postratamiento .....	26
Conducción del agua producto .....	26
Descarga de salmuera .....	26
CAPITULO 5 .....	28
METODOLOGÍA DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	28
Costo Capital .....	28
Costos de operación y mantenimiento .....	28
Costo Nivelado .....	29
CAPITULO 6 .....	30
DESCRIPCION DE LOS ESCENARIOS A EVALUAR .....	30
Escenario 1 .....	35
Obra de toma .....	35
Proceso de desalación .....	37
Conducción del agua producto .....	41
Disposición de salmuera .....	42
Evaluación económica .....	43
Escenario 1.2 .....	45
Obra de toma .....	45
Proceso de desalación .....	45
Conducción del agua producto .....	47
Disposición de salmuera .....	47
Evaluación económica .....	47
Escenario 2 .....	49
Obra de toma .....	49
Proceso de desalación .....	51
Conducción del agua producto .....	54
Disposición de salmuera .....	55

Evaluación económica.....	56
CAPITULO 7 .....	59
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	59
Análisis de resultados.....	59
CONCLUSIONES .....	62
ANEXOS .....	63
ANEXO 1: Sistema Tarifario de CFE .....	64
ANEXO 2: Ecuaciones que gobiernan el software de desalación ROSA 6.1. ....	68
ANEXO 3: Ecuaciones que gobiernan las pérdidas en tuberías. ....	70
ANEXO 4: Esfuerzos presentes en una membrana de OI.....	76
ANEXO 5: Fotografías de visitas de campo. ....	78
BIBLIOGRAFÍA.....	82

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad se habla de manera común de la escasez del agua potable en ciertas partes del mundo, y de cómo en ciertos lugares que no presentaban este problema ahora lo ven como una posibilidad. Se toman acciones para revertir el proceso de agotamiento del agua potable, tal como el tratamiento de aguas residuales, el tandeo en ciertas zonas, así como la recuperación de acuíferos, algunas de estas soluciones pueden ser inmediatas, otras pueden tardar bastantes años para poder tener un resultado adecuado, además, para que estas soluciones puedan ser factibles, se debe empezar por una educación en el consumo responsable de este producto vital para la vida en el planeta.

Lo que es cierto es que se han generado nuevas tecnologías capaces de abastecer de agua potable a diferentes países y comunidades que en un pasado presentaban un gran déficit en el suministro de agua potable, estas fuentes de abastecimiento nos permiten generar agua para consumo humano de fuentes que anteriormente no se consideraban como una opción viable, tal es el caso del agua de mar y océanos, los cuales abarcan un 97% del total del agua de todo el planeta, y es ahora esa fuente a la que se están enfocando las tecnologías de desalación.

Actualmente existen sistemas de desalación de agua de mar para producir agua potable, los métodos más comunes son, la desalación térmica y desalación con membranas. Todas tienen ventajas y desventajas una sobre otra, tal es el caso de la desalación térmica y su bajo porcentaje de recuperación<sup>1</sup>, la ósmosis inversa y su alto consumo de energía para llevar a cabo el proceso.

De manera general, la desalación térmica es aplicada a los procesos de generación de energía mediante vapor, en la cual el objetivo general es producir agua con alta calidad, es decir, con muy poco contenido en sales, esto con el fin de evitar las incrustaciones en las tuberías de la caldera.

La desalación por ósmosis inversa se está aplicando principalmente para la producción de agua potable, ya que esta tecnología, a pesar de su alto consumo de energía, permite obtener agua potable en grandes cantidades, lo que le permite tener el costo por metro cúbico producido más barato en el mercado de desalación.

Actualmente se está aplicando la desalación por ósmosis inversa en algunas partes de México, tal es el caso de Los Cabos B.C.S., estado que cuenta con la desaladora más grande del país, la cual produce un caudal de agua potable de 200 lps (17,280 m<sup>3</sup>/d) capaces de suministrar agua potable a aproximadamente 86,000<sup>2</sup> habitantes.

---

<sup>1</sup> Recuperación: es el porcentaje de agua producto que se obtiene con respecto al total de agua que alimenta a la planta desaladora.

<sup>2</sup> Considerando un consumo promedio por persona de 200 l/día.



Figura 1: Planta desaladora de Los Cabos B.C.S. (Cortesía de INIMA Desalación)

Son estas tecnologías las que pueden llegar a abatir el problema de escases de agua potable en ciertas regiones del mundo, desafortunadamente el costo capital para la instalación de algunas de las tecnologías de desalación es demasiado elevado, limitando así su instalación a países con cierta solvencia económica.



## CAPITULO 1

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La desalación por ósmosis inversa se ve afectada por varios aspectos, tales como la temperatura y concentración en el agua de alimentación, una temperatura demasiado elevada ( $> 45^{\circ}\text{C}$ ) puede generar un daño irreversible en las membranas, disminuyendo así su vida útil, y una alta concentración en sales implicaría, como veremos más adelante, un consumo de energía mayor al que tuviéramos en un agua de alimentación con bajo contenido en sales.

Ambos aspectos no se pueden controlar, ya que la temperatura y concentración del agua de alimentación, dependen de la zona y lugar de donde se instale la obra de toma que alimentará a la planta desaladora. Por esta razón se analizará en la presente tesis, los efectos que puede llegar a tener la temperatura y la concentración en el agua de alimentación en el funcionamiento de una planta desaladora que funcione con el proceso de ósmosis inversa.

Para esto se han supuesto dos escenarios:

- Acoplar la obra de toma de la planta desaladora al canal de llamada<sup>1</sup> y descarga<sup>2</sup> de una planta termoeléctrica.
- Alimentar a la planta desaladora con agua salobre.

En estos dos escenarios se pretende simular los efectos que pueden llegar a tener la temperatura y la concentración en el agua de alimentación en el proceso de desalación. Para esto se simulará una planta desaladora con una capacidad de 200 lps de agua potable, dentro del proceso de simulación de la planta, se analizarán la obra de toma, pre y pos tratamientos químicos, operación y mantenimiento, intercambio de membranas, distribución del agua producto, así como la descarga de salmuera y su consumo total de energía en cada una de las plantas, para que al final obtengamos un costo nivelado por metro cúbico desalado y así poder comparar ambas plantas desaladoras.

Antes de abordar el problema planteado, conozcamos las características físicas y químicas del agua a desalar, el proceso de desalación por ósmosis inversa, así como los principales componentes de una planta desaladora y sus principales efectos en el costo nivelado por metro cúbico desalado.

---

<sup>1</sup> Canal de llamada, es un canal artificial por donde se suministra agua de mar a la termoeléctrica para el enfriamiento de condensadores.

<sup>2</sup> Canal de descarga, es un canal artificial por donde se descarga el agua que ha sido utilizada para el enfriamiento de condensadores, dicha descarga se realiza mar adentro.

## CAPITULO 2

### CARACTERISTICAS DEL AGUA A DESALAR

A continuación se dará una breve introducción a la desalación por ósmosis inversa, empezando desde el agua que alimentará a la planta desaladora.

Nuestro planeta, el planeta azul, esta cubierto en casi su totalidad por agua, presentando un 75% de la superficie terrestre, a pesar de esta abundancia actualmente nos presentamos a un problema de escases de agua. Del total del agua del planeta, el 97% es agua salada perteneciente a mares y océanos, solamente el 2.5% es agua fresca, de este 2.5% el 69% se encuentra congelado en capas de hielos y glaciares, dejando solamente un 0.75% de agua fresca que se obtiene de acuíferos.

Dado que el agua a tratar en una planta desaladora puede tener rangos variables de salinidad, suele caracterizarse el agua en cuatro puntos básicos.

- Conductividad eléctrica o salinidad
- Dureza
- pH
- Anhídrido carbónico libre

Aunque las cuatro características están relacionadas con la composición química del agua, la primera es una característica más general, mientras que las otra tres son más concretas, más sin embargo deben ser consideradas para el diseño y operación de una planta desaladora.

### Salinidad del agua

La salinidad de un agua es el contenido total de sales del mismo.

Es en base a este contenido de sales que se pueden clasificar las distintas aguas del planeta, ya que no es lo mismo un agua de mar con un contenido en sales promedio de 36,000 ppm, que un agua salobre con un contenido de 4,000 ppm.

Por esta razón se ha clasificado el agua en diferentes tipos según su salinidad, a continuación se muestra una tabla con los diferentes tipos de aguas y al rango de salinidad al que pertenecen.

<b>Salmuera</b>	300,000	ppm
<b>Agua de mar</b>	30,000	ppm
<b>Agua salobre</b>	3,000	ppm
<b>Agua potable</b>	300	ppm
<b>Agua industrial</b>	30	ppm
<b>Agua des ionizada</b>	3	ppm
<b>Agua pura de calderas</b>	0.3	ppm
<b>Agua ultrapura</b>	0.03	ppm

Tabla 1: Clasificación de los diferentes tipos de agua según su concentración en ppm

Como veremos más adelante, la salinidad en el agua de alimentación determinara las dimensiones, presión de alimentación así como el tipo de membranas a ocupar en una planta desaladora.

La salinidad se expresa en TDS (Sólidos Disueltos Totales) y se mide, comúnmente, en mg/l o ppm. En algunas ocasiones suele medirse en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (micro siemens por centímetro) y es que según la salinidad del agua, puede hacerse circular una corriente a través de esta, es esta corriente la que determina la salinidad del agua, la desventaja de este método es la temperatura y composición del agua, ya que algunos elementos son mejores conductores de la electricidad que otros, la conductividad puede variar en un 2% por cada grado centígrado, se reporta un valor correcto a 25°C (2).

Para poder realizar el análisis y diseño de una planta desaladora, es conveniente conocer a fondo la composición química de esta, ya que algunos de los elementos presentes pueden formar compuestos los cuales a su vez pueden formar precipitados, reduciendo así la capacidad de permeabilidad de la membrana. A continuación se presenta la composición química típica del agua.

### **Composición química**

El agua está compuesta por diferentes elementos, causantes de la salinidad, algunos en mayor proporción que otros, a continuación se muestran algunos de los elementos.

#### ***Sodio***

Es el metal alcalino más frecuente en la composición de las aguas y además el único presente en cantidades significantes en las aguas naturales. En el agua de mar es el ión metálico más abundante, con concentraciones de alrededor de 10,000 mg/l. Su efecto en las membranas es que no precipita. Los efectos sobre la salud humana se ven relacionados a los problemas cardiovasculares.

#### ***Calcio y Magnesio***

Se encuentra en todas las aguas y son especialmente abundantes en las aguas subterráneas, contribuyen conjuntamente al establecimiento de la dureza del agua, que es causada fundamentalmente por las sales que forman estos dos elementos con los bicarbonatos, sulfuros, cloruros y nitratos.

#### ***Cloro***

Es el elemento más abundante en el agua de mar, alcanzando concentraciones de hasta 20,000 mg/l, en aguas subterráneas, especialmente en regiones húmedas, las concentraciones pueden ser inferiores a 5 mg/l, a menos que las aguas hayan sido contaminadas con agua de mar. La reglamentación sanitaria permite no más de 250 mg/l.

#### ***Sulfatos***

Contribuyen a la salinidad del agua, en ocasiones suele alcanzar concentraciones de 2,000 mg/l, el contenido máximo permisible por la reglamentación sanitaria es de 250 mg/l. El problema de los sulfatos en el proceso de desalación por ósmosis inversa es que pueden formar precipitados de calcio y magnesio sobre las membranas.

### ***Carbonatos y Bicarbonatos***

Se encuentran en todas las aguas y en ocasiones en proporciones muy elevadas. Las membranas de osmosis inversa tienen un alto porcentaje de rechazo de estos iones, razón por la cual se concentran en el rechazo y pueden llegar a precipitar.

### ***Nitratos***

En concentraciones mayores a 45 mg/l en agua para consumo domestico pueden ser indeseables, especialmente para los niños, ya que puede ocasionar cianosis. Los nitratos no pueden ser eliminados por evaporación, se debe recurrir a la desmineralización o a la separación por membranas.

### ***Hierro***

Todas las aguas contienen hierro, en mayor o menor cantidad, el contenido de este puede ser problemático para ciertos usos, doméstico o industrial. Contenidos de 0.5 mg/l suelen ser perjudiciales, en la industria no se permiten contenidos mayores a 0.1 mg/l. Para alcanzar dicha concentración suele procederse a un proceso de aireación del agua.

### ***Manganeso***

Tiene un comportamiento similar al del hierro, incluso se presenta en las mismas condiciones que éste. Suele adicionarse antiincrustante para retardar la oxidación y en consecuencia la precipitación del hierro y manganeso.

### ***Sílice***

Es el elemento más abundante en la corteza terrestre, se puede encontrar en aguas subterráneas de cantidades de hasta 100 mg/l, contenidos de 20 mg/l son bastantes normales.

### ***Flúor***

Aparece solo en pequeñas concentraciones en el agua subterránea, el rechazo de éste por las membranas de ósmosis inversa está en función de la composición completa del agua. La reglamentación sanitaria permita como máximo 1.5 µg/l.

### ***Bario y Estroncio***

Principalmente se detecta en aguas subterráneas, como los otros sulfatos, estos también pueden llegar a precipitar en la membrana.

### ***Aluminio***

No se encuentra en aguas subterráneas ni de mar, a menos que se haya producido una contaminación industrial.

## CAPITULO 3

### INTRODUCCIÓN A LA ÓSMOSIS INVERSA

Una vez conocida la composición química del agua a desalar se procede al diseño de la planta de ósmosis inversa. Para comprender los aspectos que deben tomarse en cuenta en el diseño es necesario conocer de donde se deriva la desalación así como los parámetros que se deben tomar en cuenta en el diseño y operación de la desaladora.

#### Ósmosis

La ósmosis inversa se deriva del proceso natural de la ósmosis, por esta razón, antes de abordar el tema de la ósmosis inversa abordaremos primero el tema de la ósmosis.

La ósmosis es un proceso natural, en el cual un fluido pasa a través de una membrana semipermeable, de una zona de baja concentración a una de alta concentración hasta alcanzar el equilibrio, este fenómeno es debido al potencial químico de cada una de las sustancias, el cual está en función de la temperatura, presión y concentración de los sólidos disueltos, siendo menor para una solución con alto contenido en sales y mayor para una solución con poco contenido en sales, es esta diferencia en el potencial químico el que permite que el agua con baja concentración en sales fluya hacia la zona con alta concentración en sales, hasta que se alcance el equilibrio en el potencial químico o hasta que la presión hidráulica lo permita.

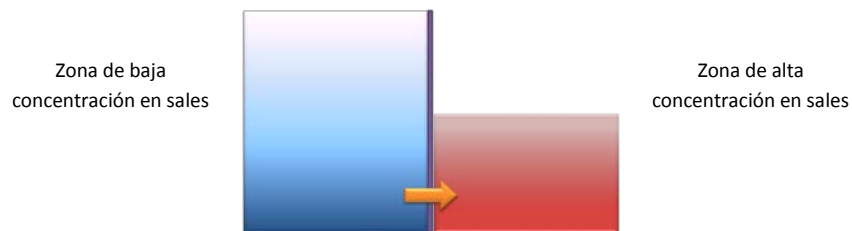


Figura 1: Proceso de ósmosis

#### Ósmosis inversa

Aplicar una presión externa del lado de la solución salada, la cual es igual a la presión osmótica<sup>1</sup>, ocasiona el equilibrio en ambas soluciones. Un incremento en la presión aplicada ocasionará que se eleve el potencial químico del agua salada, con lo cual se genera un flujo hacia el agua pura a través de la membrana semipermeable debido a que este tiene un menor potencial químico. A este fenómeno se le conoce como osmosis inversa.

---

<sup>1</sup> Este término se explicará más adelante.

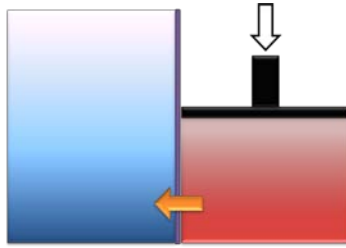


Figura 2: Proceso de ósmosis inversa

## Presión osmótica

Se habla del potencial químico y de la presión osmótica, pero el principal factor a vencer en la ósmosis inversa es la presión osmótica, ya que al vencerla estaremos asegurando que se comienza a desalar el agua a tratar.

La presión osmótica de una solución puede ser determinada indirectamente midiendo la concentración de las sales disueltas en la solución:

$$P_s = C * R * (T + 273.15) \quad [bar]$$

Siendo C la concentración total de los iones disueltos, R la constante universal de los gases (0.082 [lt\*bar/mol\*K]) y T la temperatura expresada en °C. Una aproximación de la presión osmótica puede ser que por cada 1,000 ppm de concentración de TDS es igual 0.77 [bar] de presión osmótica.

La presión osmótica es un valor estático, es decir que el valor de presión osmótica cambiara al momento en que pase un poco de agua a través de la membrana, en el sentido del agua salada al agua pura, ya que tendremos un incremento en la concentración en el agua salada, lo que ocasionará que se incremente la presión osmótica, razón por la cual será necesario incrementar la presión en el agua a desalar. Una forma de calcular la presión máxima a aplicar se puede obtener conociendo las características de la membrana, es decir, conocer el porcentaje de rechazo de sales de la membrana, así como el porcentaje de recuperación máximo que permite la membrana sin sufrir daño alguno, por lo general las membranas rechazan un 99.7% de sales y pueden recuperar hasta un 14% del agua de alimentación, variando según el agua de alimentación.

## Recuperación

La recuperación o tasa de conversión de agua de alimentación a producto está definida por la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{Q_P}{Q_F} * 100\%$$

$$\alpha = \frac{Q_P}{Q_P + Q_C} * 100\%$$

$Q_p \rightarrow$  Flujo permeado [V/t]  
 $Q_f \rightarrow$  Flujo de alimentación  
 $Q_c \rightarrow$  Flujo concentrado

La recuperación también puede expresarse en función de las concentraciones, es decir:

$$\alpha = \frac{C_C - C_F}{C_C + C_P} * 100\%$$

$C_c \rightarrow$  Concentración del concentrado  
 $C_f \rightarrow$  Concentración de alimentación  
 $C_p \rightarrow$  Concentración en el permeado

### **Presión neta de manejo**

O mejor conocida como el Net Driving Pressure (NDP), se define como la fracción de presión que se aplica en exceso a la presión osmótica a la entrada y a cualquier caída de presión dentro del sistema. El valor de este decrece a lo largo de la unidad de osmosis inversa.

$$NDP = P_f - P_s - P_p - 0.5 * P_d + P_{sp}$$

$P_f \rightarrow$  Presión de alimentación  
 $P_{os} \rightarrow$  Presión osmótica  
 $P_p \rightarrow$  Presión de permeado  
 $P_d \rightarrow$  Caída de presión a lo largo de la unidad de osmosis inversa  
 $P_{osp} \rightarrow$  Presión osmótica del permeado

El NDP está en función del porcentaje de recuperación, así como del arreglo de membranas en el sistema de ósmosis inversa y de la presión de alimentación.

### **Paso de sal y rechazo de sal**

El paso de sal se define como el porcentaje de sal que se encuentra en el permeado relativo al porcentaje de sal que se encuentra en el agua de alimentación, esto es:

$$SP = \frac{C_P}{C_{fm}} * 100\%$$

$C_p \rightarrow$  Concentración en el permeado  
 $C_{fm} \rightarrow$  Concentración media en el agua de alimentación

El rechazo de sal es lo opuesto al paso de sal y está definido por la siguiente ecuación:

$$SR = 100\% - SP$$



## Efectos de la temperatura del agua de alimentación en el proceso de desalación

Al elevarse la temperatura se produce una especie de dilatación de los poros de la membrana y una variación en la viscosidad del agua a desalar, por lo que no solo el caudal de permeado aumenta sino que pasan más iones a través de la membrana, es decir, disminuye el rechazo y en consecuencia la calidad del permeado es inferior. A su vez el aumento de la temperatura puede contrarrestarse con una bajada de la presión de alimentación.

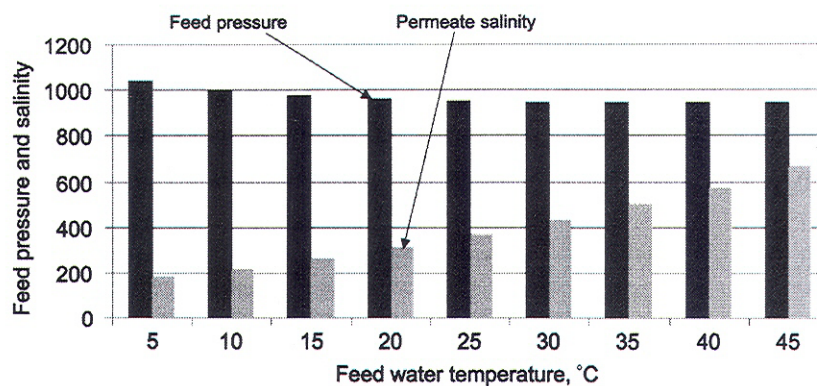
Para tomar en cuenta los efectos de la temperatura en el proceso de ósmosis inversa, se utiliza un factor de corrección por el efecto de la temperatura, el cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$TCF = \frac{1}{\exp\left(C\left(\frac{1}{273+t} - \frac{1}{298}\right)\right)}$$

C → Es una constante característica del material de la membrana, tomando valores de 2500 a 3000 para una membrana de poliamida.

T → Temperatura en °C

El efecto de incrementar la temperatura en el agua de alimentación, implica una bajada en la presión de alimentación, ya que al tener una planta que produzca un caudal constante de agua producto, será necesario modificar el NDP conforme se varíe la temperatura y en consecuencia la presión de alimentación, es decir, si se incrementa la temperatura el NDP decrece y considerando que las caídas de presión no varían con la temperatura implicara bajar la presión de alimentación.



Gráfica 1: Efectos de la temperatura en la presión de alimentación y en la salinidad del permeado en una planta de ósmosis inversa

## Efectos de la concentración del agua de alimentación en el proceso de desalación

La variación de la concentración en el agua de alimentación puede incurrir en errores si no ha sido advertido previamente, pues se produce no solo una disminución importante del permeado, que puede compensarse con una subida de presión, sino una subida de la salinidad del producto que

no tiene otra solución que recurrir a la instalación de otras membranas que tengan un mayor rechazo de sales.

Un agua a desalar con bajo contenido en sales, es decir con baja concentración, permitirá llevar a cabo el proceso de desalación con una menor presión de alimentación que en el caso en que la concentración de alimentación sea elevada, esto se puede demostrar de la siguiente ecuación.

$$NDP = P_f - P_s - P_p - 0.5 * P_d + P_{sp}$$

De esta ecuación se puede observar que los únicos términos que están en función de la concentración en el agua de alimentación son  $P_s$  y la  $P_{sp}$ , razón por la cual podemos igualar a cero los valores de  $P_p$  y  $P_d$ , ya que estos no tendrán ningún efecto si se varía la concentración en el agua de alimentación, ahora, como el valor de la concentración de sales en el permeado es muy pequeño, podemos considerar cero el valor de  $P_{sp}$ , quedando la ecuación de la siguiente forma.

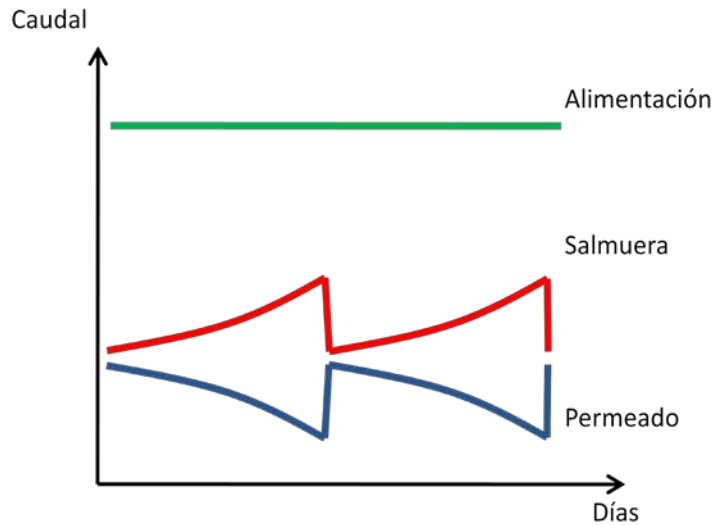
$$NDP = P_f - P_s$$

Si queremos mantener un NDP constante, y variar la concentración en el agua de alimentación, tendremos entonces que:

- Para un agua con una concentración elevada la  $P_s$  se incrementará, razón por la cual la presión de alimentación  $P_f$  también se tendrá que incrementar para poder mantener constante el valor del NDP.
- Y para un agua con menor concentración, implicará una presión osmótica menor, razón por la cual la presión de alimentación deberá ser menor.

### **Efectos de la presión de alimentación en el proceso de desalación**

Desde el momento en que la instalación se ha puesto en marcha y ha quedado estabilizada, la pérdida de carga o presión diferencial a través de las membranas empieza a aumentar, por ensuciamiento de las membranas, desgaste, entre otros. En consecuencia la presión neta, diferencia entre la de alimentación y la pérdida de carga, que inicialmente da el caudal nominal previsto, empieza a disminuir y consiguientemente el caudal de permeado empieza a descender, para recuperar las condiciones iniciales de operación, es necesario aplicar un retrolavado a las membranas cada determinado tiempo.



Gráfica 2: Flujo volumétrico de alimentación, permeado y rechazo a lo largo de varias semanas de operación de una planta desaladora de ósmosis inversa

Dependiendo del tipo de membrana de que se trate, existe una presión máxima de operación que no puede rebasarse, en caso de superarse esta presión podríamos permear una mayor cantidad a la diseñada, pero también tendremos una compactación de la membrana que a la larga nos reducirá el porcentaje de recuperación y en consecuencia la vida útil de la membrana, en algunos casos se puede llegar a la destrucción de la membrana por este exceso de presión.



Figura 3: Daño en membranas debido a un exceso de presión en la alimentación del sistema de desalación

### Flujo promedio

Es una combinación del flujo permeado dividido entre el área total de las membranas instaladas en la unidad de osmosis inversa.

$$APF = \frac{Q_p}{EN * MA} \left[ \frac{l}{m^2 * h} \right]$$

$Q_p \rightarrow$  Flujo permeado

$EN \rightarrow$  Número de elementos en el sistema

$MA \rightarrow$  Área de la membrana por elemento

Este valor de APF, es uno de los más importantes a considerar en el diseño de una planta desaladora que funcione con el proceso de ósmosis inversa, ya que dependiendo del tipo de agua de alimentación, será el valor o rango de valores que puede tomar el APF, si se exceden estos rangos, la operación de la planta no será la adecuada pudiendo dañar las membranas, y en el caso contrario, en que se esté por debajo del rango permisible, podríamos estar realizando una inversión mayor a la necesaria, ya que se tendrán más membranas de las necesarias para poder llevar a cabo el proceso de desalación.

A continuación se muestra una tabla con los rangos de valores que puede tomar el APF según el tipo de agua de alimentación.

Feed source	RO Permeate	Well Water	Surface Supply		Wastewater (Filtered Municipal Effluent)		Seawater	
					MF <sup>1</sup>	Conventional	Well or MF <sup>1</sup>	Open intake
Feed silt density index	SDI < 1	SDI < 3	SDI < 3	SDI < 5	SDI < 3	SDI < 5	SDI < 3	SDI < 5
Average								
system flux	21-25	16-20	13-17	12-16	10-14	8-12	8-12	7-10
	36-43	27-34	22-29	20-27	17-24	14-20	13-20	11-17
Maximum element recovery	30	19	17	15	14	12	15	13
%								

Tabla 1: Valores de APF según el tipo de agua de alimentación

## Permeabilidad específica

La permeabilidad específica o flujo específico, caracteriza el material de la membrana en términos de la cantidad de agua que produce dividido entre el gradiente de la presión neta de transporte, es decir:

$$SF = \frac{APF}{NDP} \left[ \frac{l}{m^2 * h * bar} \right]$$

La permeabilidad específica depende de la resistencia que presenta la membrana al flujo de agua.

Las ecuaciones anteriormente mencionadas, son las ecuaciones típicas para el diseño de un sistema de desalación de ósmosis inversa, a lo largo de la experiencia laboral se puede llegar a determinar ciertos valores, que según el agua de alimentación o la membrana pueden darnos una idea de si se está operando bien o no la planta desaladora. En un principio es necesario, además de considerar estas ecuaciones, simular la planta desaladora a futuro, ya que las membranas a lo largo de la operación de la planta, sufrirán un decremento en su porcentaje de rechazo de sales así como también del porcentaje de recuperación.

## **CAPITULO 4**

### **DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA**

Una vez conocidas las ecuaciones que gobiernan el proceso de desalación por ósmosis inversa, es necesario conocer los aspectos físicos y químicos que se deben tomar en cuenta para el diseño de una planta desaladora de ósmosis inversa.

El proceso de ósmosis inversa consiste principalmente en hacer pasar a través de una membrana parte del agua que alimenta a la planta desaladora. Esta agua de alimentación tiene una alta concentración en sal, puede ser de origen salobre o marino. El agua que pasa a través de la membrana es prácticamente pura, y recibe el nombre de permeado. Por otro lado, la parte de la corriente de alimentación que no ha pasado a través de la membrana incrementa su concentración en sal, y recibe el nombre de salmuera o concentrado (3).

Para hacer pasar el agua a través de la membrana se requiere una presión elevada capaz de superar la presión osmótica (presión que está en función de la concentración y temperatura del agua de alimentación) y las caídas de presión en el sistema de desalación.

A continuación se da una descripción de los aspectos que se deben de tomar en cuenta para el funcionamiento de una planta desaladora de ósmosis inversa:

- Obra de toma
- Pretratamiento
- Proceso de desalación
- Recuperadores de energía
- Postratamiento
- Conducción del agua producto
- Descarga de salmuera

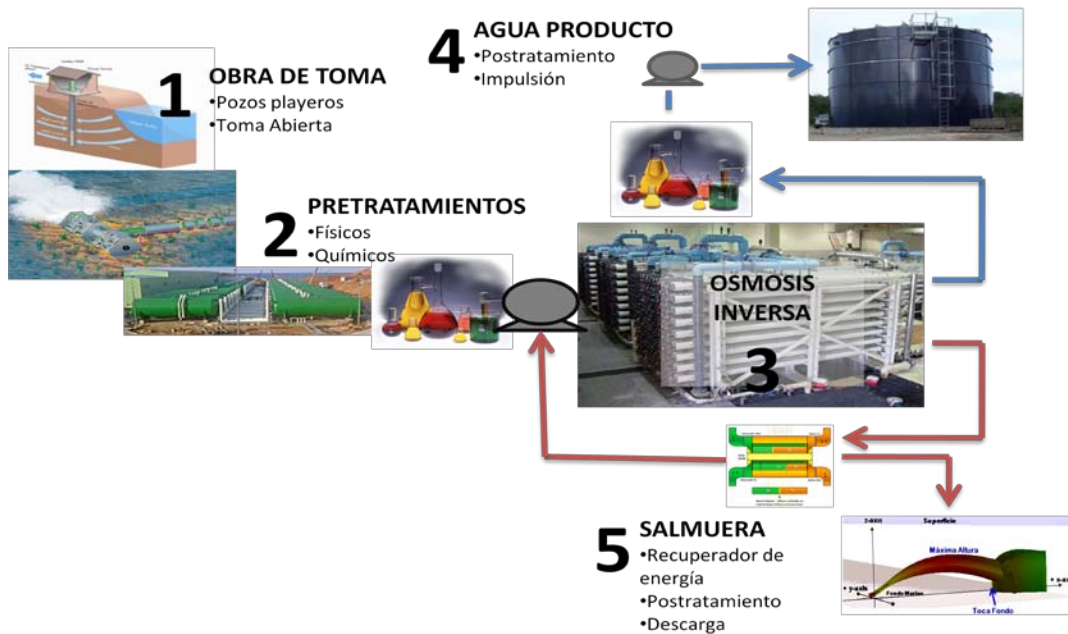


Figura 1: Diagrama de desalación

### Obra de toma

Existen diferentes formas de captar el agua de alimentación para una planta desaladora, principalmente se dividen en dos, captación abierta y captación mediante pozos.

Cualquiera de las dos obras de toma, puede suministrar, ya sea agua de mar o agua salobre.

### Obra de toma cerrada

Este tipo de obra puede ser mediante el uso de pozos cercanos a la costa, como pozos playeros, o lejanos a esta, pozos salobres, los cuales pueden tener o no ramificaciones.

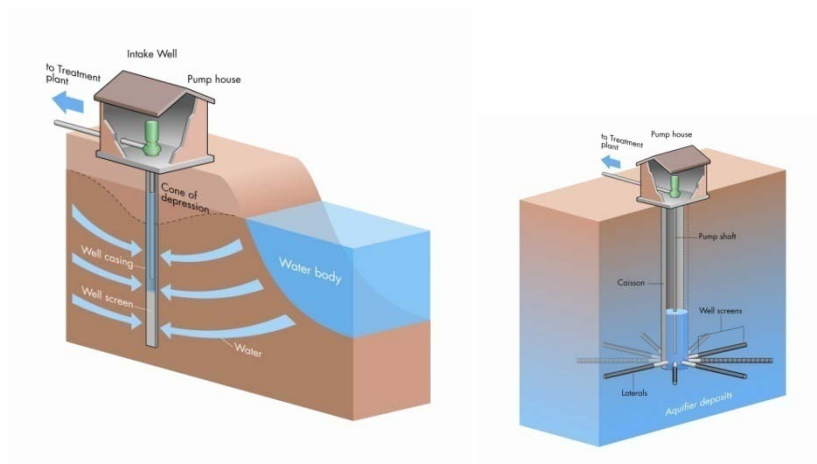


Figura 2: Pozos playeros para obra de toma de una planta desaladora

Cuando la alimentación se realiza mediante este tipo de obra de captación, se tiene la limitante del espacio de perforación, ya que se deben realizar estudios geofísicos e hidrológicos para determinar si es factible perforar en la zona, la cantidad de pozos a perforar, la distancia que debe separar a cada uno de los pozos para que no se interfieran entre ellos y el flujo de extracción de cada uno de los pozos.

Este tipo de obra de toma tiene las siguientes ventajas para el proceso de desalación (1):

- La cantidad de sólidos suspendidos en el agua es casi nula, debido a su filtración a través del terreno.
- Ausencia de actividad orgánica y biológica.
- Bajo contenido de oxígeno disuelto.
- Temperaturas estables.
- No se afecta la carga con la marea

Algunas desventajas que presenta este proceso de captación de agua son:

- Contenidos importantes de hierro, aluminio, sílice, flúor, entre otros elementos que requieren la instalación de un proceso de pretratamiento más conservador.
- Posible contaminación por nitratos y pesticidas.
- Variaciones en su composición química a través del tiempo.
- Puede presentar altas concentraciones de sílice. Cuando las concentraciones de sílice superan las 100 ppm pueden producirse precipitados, normalmente silicatos de calcio y magnesio, que no son fácilmente disueltos por los ácidos por lo que presenta problemas insolubles. No conviene superar concentraciones en el rechazo superiores a 150 mg/l.



Figura 3: Pozo playero, planta desaladora Los Cabos, cortesía Grupo INIMA Desalación

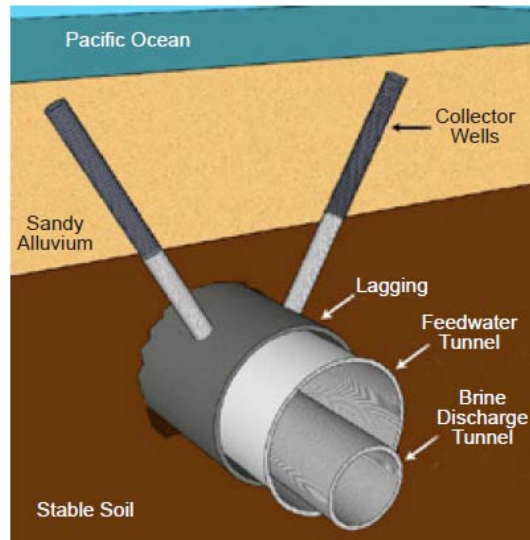


Figura 4: Galería de infiltración profunda. Arreglo para obra de toma y descarga

También se puede presentar otra forma de captación que aproveche la filtración natural del arena, tal es el caso de una galería de infiltración profunda ubicada mar adentro (4), la cual consiste en un tubo subterráneo al lecho marino del cual salen ramificaciones (pozos colectores) que captarán el agua filtrada a través del arena mediante la acción de la gravedad. Como se muestra en la ilustración 4 este tipo de obra de toma se puede ocupar también como medio para la instalación de la tubería de descarga de salmuera.

#### **Obra de toma abierta**

Las obras de tomas abiertas, son aquellas que están en contacto directo con el agua de alimentación, es decir la tubería de alimentación de la planta desaladora se encuentra en contacto directo con el cuerpo de agua.





Figura 5: Obra de toma abierta, cortesía IDA Desalination Yearbook 08-09

Contraria a la toma cerrada, esta contiene (1):

- Gran cantidad de sólidos suspendidos, debido a la presencia de organismos.
- Gran actividad orgánica y biológica.
- Alto contenido de oxígeno disuelto.
- Temperaturas fluctuantes.

Se recurre a este tipo de obra de toma, cuando no es posible instalar la obra de toma cerrada debido a la impermeabilidad del terreno o cuando se debe alimentar a la planta desaladora con grandes volúmenes y es económicamente mejor opción que la obra de toma cerrada. En ocasiones puede acoplarse la toma abierta a los canales de llamada y descarga de las plantas termoeléctricas.

En ocasiones suele acoplarse la obra de toma de la planta desaladora al canal de llamada de una planta termoeléctrica. El canal de llamada de una planta termoeléctrica es aquel en que se hace fluir un caudal de agua a través de los condensadores de la planta, permitiendo así que los condensadores mantengan una temperatura constante y no se calienten por el paso del vapor a través de ellos.



Figura 6: Canal de llamada en planta termoeléctrica

En ocasiones suele acoplarse la obra de toma al canal de descarga de la planta termoeléctrica, aprovechando el incremento de temperatura en el agua para reducir el consumo de energía debido a la presión de alimentación.



Figura 7: Canal de llamada de planta termoeléctrica

### **Pre tratamientos**

La función del pretratamiento del agua de mar y salobre es la de garantizar, tanto desde el punto de vista de sus propiedades físicas como químicas, las condiciones óptimas del agua de alimentación a los bastidores de ósmosis inversa. Es común que en la mayoría de las plantas desaladoras se apliquen las siguientes etapas de pretratamiento:

- Dosificación de hipoclorito sódico
- Dosificación de coagulante
- Filtración sobre arena
- Dosificación de ácido sulfúrico
- Adición de dispersante

- Dosificación de bisulfito sódico
- Filtros cartucho

### Dosificación de hipoclorito sódico

Se realiza la dosificación de este químico para la eliminación de la contaminación bacteriológica, ya que es común encontrar materia orgánica y en consecuencia bacterias en cualquier tipo de obras de toma, en algunas más que en otras, que si no se eliminan pueden ocasionar el ensuciamiento de las membranas y en consecuencia disminuir su rendimiento, a este tipo de ensuciamiento se le conoce como biofouling.

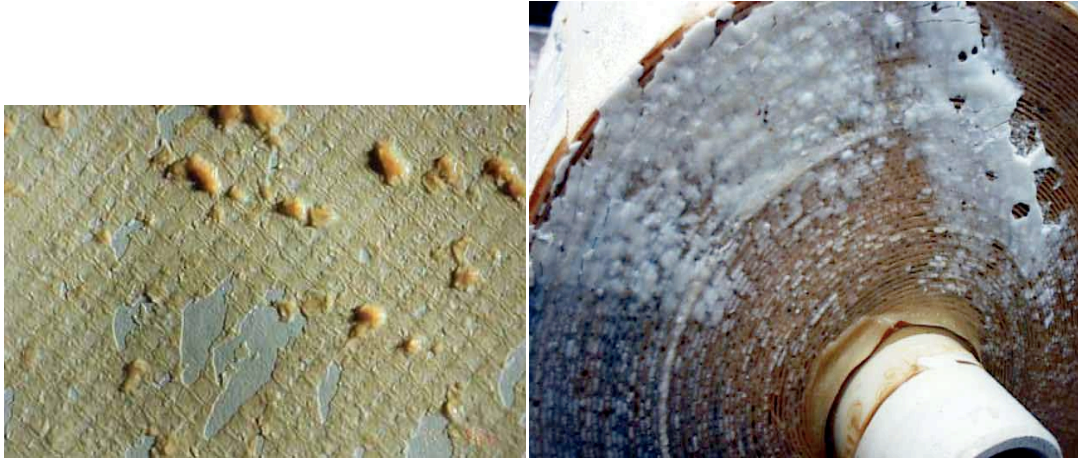


Figura 8: Imagen de ensuciamiento biológico en la superficie de la membrana

### Dosificación de coagulante

Se agrega este químico para que las partículas se aglomeren cuando establezcan contacto entre sí y sea más fácil eliminarlas en el proceso de filtración.

### Filtración sobre arena

Este proceso permite la eliminación de los sólidos suspendidos presentes en el agua de alimentación. En ellos se introduce el agua por la parte superior y va precolando lentamente a través de las distintas capas, para recoger el agua filtrada por la parte inferior. La velocidad de la filtración depende de factores como presión aplicada, granulometría y profundidad de la capa o capaz de material.



Figura 9: Filtro arena exterior (der) e interior (Izq).

### **Dosificación de ácido sulfúrico**

Debido a que el agua de mar tiene un pH variable, es necesario estabilizar el pH a cierto valor que no dañen las membranas de ósmosis inversa, razón por la cual suele dosificarse ácido sulfúrico en distintas cantidades, según el agua de alimentación, hasta alcanzar el valor requerido por las membranas de desalación.

### **Adición de dispersante**

La función de los antiincrustantes o dispersantes es la de mejorar la solubilidad de algunas sales y prevenir su precipitación sobre la superficie de la membrana, ya que esta puede limitar o reducir la recuperación de la planta desaladora.

### **Dosificación de bisulfito sódico**

Debido a que en una etapa previa se añadió hipoclorito sódico para la prevención del ensuciamiento por biofiling, es posible que quede cloro residual, el cual si no es removido antes de la etapa de desalación puede causar un daño irremediable en las membranas, lo cual implica una reducción en su vida útil, es por esto que se debe añadir el bisulfito sódico para reducir en su totalidad el cloro libre.

### **Filtros cartucho**

Una vez completado el tratamiento químico, se aplica una última etapa de filtración antes del proceso de ósmosis inversa con filtros cartucho, los cuales puede remover partículas de hasta 1 micra, partículas que obviamente no fueron removidas por el filtro arena.



**Figura 10: Filtro cartucho horizontal**



Figura 11: Daño a filtros cartucho debido a la falta del filtro arena en el pretratamiento

En algunas plantas del mundo se han instalado, además de estos pretratamientos, algunos más, principalmente pretratamientos que funcionen con el proceso de filtración, para esto se han desarrollado membranas con gran capacidad de retención de sólidos suspendidos así como también de microorganismos, bacterias e incluso virus, esta capacidad de retención está determinada por el tamaño de poro de la membrana. A continuación se muestra una tabla con los rangos de separación de cada una de las membranas existentes:

<b>ESPECTRO DE FILTRACION</b>							
<b>0.45 <math>\mu\text{m}</math></b>							
$\mu\text{m}$	Sólidos Disueltos			Sólidos Suspendidos			
	0.001	0.01	0.1	1.0	10	100	1000
Å	10	100	1000	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$
PESO MOLECULAR	100	200	5,000	20,000	100,000	500,000	
TAMAÑO RELATIVO DE MATERIAL COMUN	Sales Acuosas		Finos de Carbón		Pigmentos		
		Pirógenos				Levadura	Arena de mar
	Iones Metálicos		Virus		Bacteria		
		Sílice Coloidal				Polen	
	Azúcares		Albúmina			Harina molida	
TECNOLOGIA DE FILTRACION	Osmosis Inversa		Microfiltración		Filtración convencional		
		Ultrafiltración					

Tabla 1: Rangos de retención según el tipo de membrana

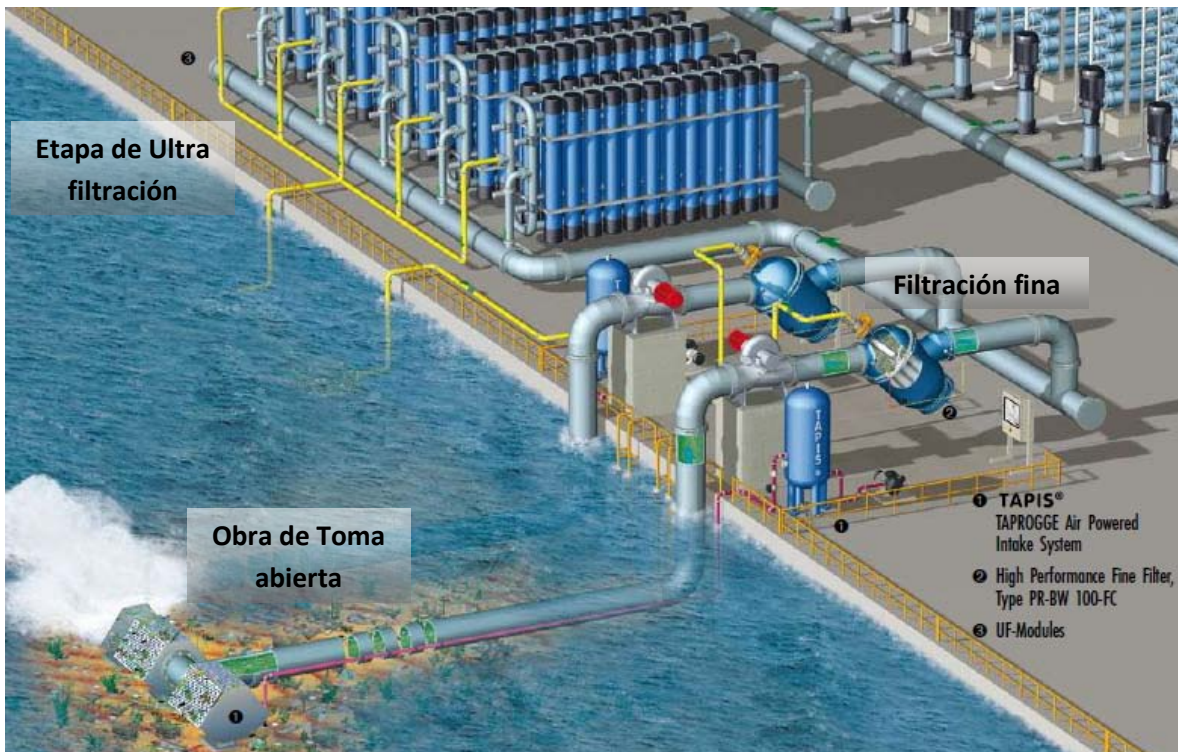


Figura 12: Etapa de ultrafiltración anterior al proceso de desalación

## Proceso de desalación

En esta etapa el agua de alimentación obtenida de los filtros cartucho, se hace pasar a través de la bomba de alta presión, la cual eleva la presión del agua de alimentación a la presión necesaria para poder llevar a cabo el proceso de desalación.

Es en esta parte donde se obtienen dos caudales productos, uno conocido como permeado, que es el agua separada de las sales y el segundo caudal conocido como salmuera o rechazo, que es el agua rechazada y que tendrá un alto contenido en sales, por lo general este caudal es descargado al mar mediante el uso de difusores.

Dentro del proceso de ósmosis inversa los principales factores a evaluar para el diseño del sistema son:

- Tipo de agua de alimentación: Determinará el tipo y tamaño de pretratamiento a aplicar, así como el tipo de membranas a utilizar.
- Salinidad del agua de alimentación: Necesaria para determinar la presión de alimentación y en consecuencia el porcentaje de recuperación de la desaladora.
- Recuperación del sistema: Es la cantidad de agua producto obtenida con respecto a la cantidad de agua de alimentación.
- Total de agua producto: Junto con la recuperación, nos determina la cantidad de agua de alimentación que necesita el sistema de ósmosis inversa, así como el tamaño de la planta.

## Recuperadores de energía

Los recuperadores de energía, ocupan la energía que adquiere la salmuera en el proceso de desalación, la cual tiene una presión de 2 a 3 bares menor que la presión de alimentación, es decir, si la presión de alimentación en la planta de ósmosis inversa es de 60 bar, la salmuera tendrá una presión de 58 o 57 bares, los cuales pueden ser ocupados para impulsar una bomba o para ceder esa presión a otro cuerpo de agua, este es el principio de funcionamiento de los recuperadores de energía y los hay de diferentes tipos, a continuación se mencionan algunos de ellos.

Recuperador de energía por intercambio de presión: su principio de funcionamiento es ceder la presión de la salmuera a algún otro cuerpo de agua. Este dispositivo funciona como un pistón, primero de un lado entra agua de alimentación a baja presión, al momento de llenar el pistón, comienza a entrar del otro lado salmuera a alta presión, cediendo su alta presión al agua de mar con baja presión, la cual es enviada a una bomba booster que elevará la presión hasta el mismo valor que la presión de alimentación del sistema. Este dispositivo es el de mayor eficiencia comparado con los demás recuperadores de energía.



Figura 13: Recuperadores de energía (Cortesía Planta Askelon)

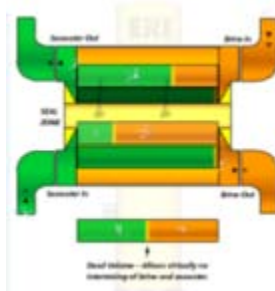


Figura 14: Diagrama del recuperador de energía por intercambio de presión

Recuperador de energía con turbocompresor: tiene el mismo funcionamiento que el turbocompresor de un automóvil, de un lado cuenta con una turbina y del otro lado con un compresor, la salmuera pasa por la turbina, activando así el compresor y por este pasa el agua de mar incrementando su presión hasta el valor necesario.

Recuperador de energía con turbina Pelton: se conecta la turbina Pelton al eje de la bomba de alimentación, al momento de pasar la salmuera por la turbina activa la bomba la cual comienza a elevar la presión del agua de alimentación hasta el valor necesario.

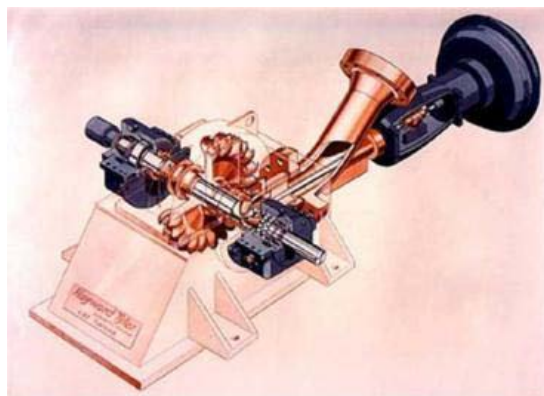


Figura 15: Recuperador de energía con turbina Pelton

### **Postratamiento**

El postratamiento aplicado en el proceso de desalación se ocupa principalmente para eliminar componentes no deseados en el agua producto, así como para también agregar compuestos necesarios.

También se pueden aplicar a la salmuera obtenida en el proceso de desalación, con el fin de reducir el impacto que pueda tener en el medio ambiente o en la zona de descarga.

### **Conducción del agua producto**

Una vez obtenida el agua producto esta puede ser enviada a algún tanque de almacenamiento o a la red de distribución de agua potable de manera directa, para esto es necesario determinar las condiciones geográficas del entorno, con las cuales se decidirá por donde es conveniente enviar la tubería de agua producto, y así determinar la potencia de bombeo necesaria.

### **Descarga de salmuera**

En esta parte se tiene como principal objetivo reducir el impacto ambiental que pueda tener la salmuera sobre el medio ambiente, se pretende que la dilución de la salmuera con el agua de mar sea lo más rápida posible, la salmuera por lo general presenta una concentración del doble de la concentración de su agua de alimentación (para sistemas de desalación de agua de mar), razón por la cual se deben hacer estudios de dilución de la descarga de salmuera en el medio receptor.

En ocasiones se ocupan varios difusores, para acelerar la mezcla del chorro de salmuera con el agua circundante, otra forma de acelerarla es mediante una dilución previa, es decir, en la tubería de descarga mezclar previamente la salmuera con agua del entorno al que entrará en contacto, dicha mezcla puede ser de 1:1, es decir, cada litro de salmuera se prediluirá con un litro de agua del medio receptor, a esta dilución se le conoce como dilución 1x, cuando por cada litro de salmuera lo mezclamos con dos litros de agua circundante se le conoce como dilución 2x, la salmuera se puede prediluir con grandes volúmenes de agua de mar o salobre, según el caso, la limitante es que sea económicamente viable.

La pluma de descarga debe ser tal que no toque la superficie del agua, ya que puede llegar a matar los organismos bentónicos esenciales para la vida marina, tales como el plancton, y tampoco que



toque demasiado pronto el subsuelo, ya que también puede ocasionar daño en organismos planctónicos. Por estas razones de debe simular la descarga de salmuera en software especializado que simule tanto las corrientes como las mareas para saber así que tipo de difusor es el adecuado.

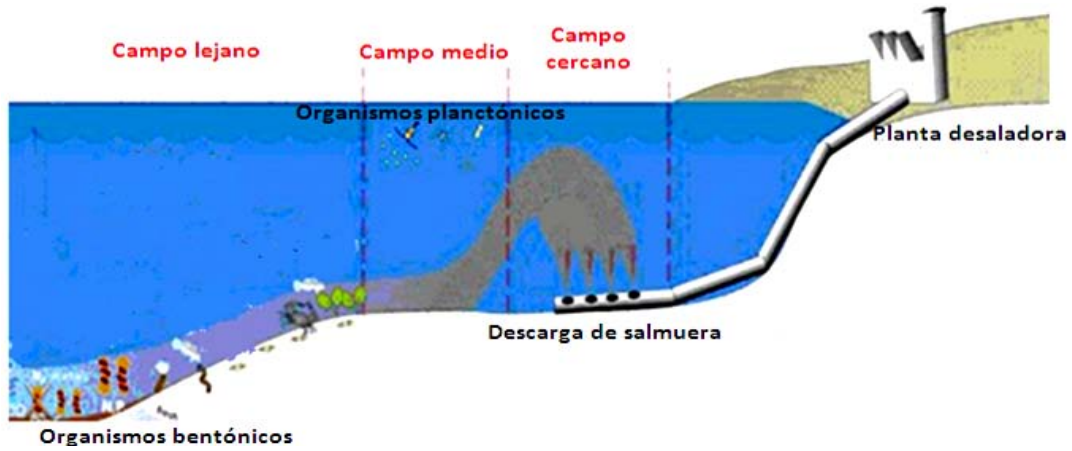


Figura 16: Descarga de salmuera de una planta desaladora al mar

## **CAPITULO 5**

### **METODOLOGÍA DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA**

Tener un proyecto de instalación de una planta desaladora en cierta región del mundo debe ser principalmente económicamente viable, para esto se deba hacer un estudio de inversión, así como también un programa de costos y recuperación de la inversión, así como también se debe calcular el costo final que tendrá el metro cúbico desalado, ya que estos valores determinarán la viabilidad de instalar una planta desaladora.

La viabilidad de una instalación de desalación depende en primera instancia del precio final al que se pueda obtener el agua producto, teniendo en cuenta las necesidades que se van a cubrir y el sector económico al que se dedique.

De las distintas partes económicas en que se compone el costo de desalación hay dos, que en general, tienen mayor influencia en el coste del agua desalada: la inversión y la energía, aunque en algunas instalaciones pequeñas la repercusión del coste de la mano de obra puede ser elevada.

Los parámetros económicos claves para un proyecto de desalación son:

- Costo capital (Capital Cost)
- Costo de operación y mantenimiento (O&M cost)
- Costo del agua (Costo nivelado)

#### **Costo Capital**

Incluye todos los gastos asociados con la implementación de algún proyecto de desalación, desde el momento de su creación, diseño, permisos, financiamiento, construcción, puesta en marcha y pruebas de aceptación para el funcionamiento normal. El mayor componente del costo capital es el gasto por la construcción del proyecto, abarcando de un 50-85% del costo capital.

La porción restante 50-15% del costo capital está compuesto por los costos indirectos. Estos costos están asociados con la ingeniería, administración y la financiación para llevar a cabo el proyecto.

El costo capital se expresa en unidades monetarias ya sea para el año de inicio de construcción del proyecto o a mediados del periodo de construcción.

#### **Costos de operación y mantenimiento**

Son todos aquellos costos asociados con la operación de la planta desaladora (energía, químicos, mano de obra y reemplazo de consumibles).

Los costos de operación se dividen en dos categorías: fijos y variables.

Los costos fijos de O&M son aquellos en que se incurre independientemente de la producción de agua producto de la planta desaladora. Los costos fijos incluyen: costos de mano de obra, mantenimiento de equipo, costos administrativos y algunos otros costos misceláneos.

Los costos variables son proporcionales al volumen de agua producto obtenida en el proceso de desalación e incluye gastos por energía, químicos y reemplazo de membranas.

Típicamente los costos variables abarcan del 50-85% del costo por O&M, mientras que el 50-15% de los gastos son debidos a los gastos fijos de O&M.

### **Costo Nivelado**

Es el parámetro económico que incorpora todos los gastos capitales y de O&M asociados a la producción de agua fresca, suele expresarse como unidades monetarias por volumen de agua producida, es decir USD\$/m<sup>3</sup> ó USD\$/kgal. Se calcula dividiendo la suma de la amortización del costo capital y los costos anuales de O&M entre el promedio de agua producto producida cada año (2).

## **CAPITULO 6**

### **DESCRIPCION DE LOS ESCENARIOS A EVALUAR**

Una vez analizados los parámetros de diseño de una planta desaladora, así como de los aspectos económicos que se deben tomar en cuenta para calcular el costo nivelado del metro cúbico desalado, se han planteado dos escenarios de desalación para una planta desaladora de 200 lps de agua producto. En el diseño de la planta se considerarán los efectos de la temperatura en el agua de alimentación así como también la concentración del agua de alimentación.

La planta desaladora estará compuesta por obra de toma, sistema de desalación, impulsión de agua producto y descarga de salmuera, además de contar con recuperadores de energía, de un pretratamiento físico compuesto por filtro arena y filtro cartucho, así como de un pretratamiento químico típico en la desalación por ósmosis inversa, que consta de cloración, coagulación, regulación de pH, dispersantes y decloración.

Para ver los efectos de la temperatura y concentración en el proceso de desalación por ósmosis inversa, se han generado dos escenarios.

1. Acoplar la obra de toma de una planta desaladora al canal de llamada y descarga de una planta termoeléctrica.
2. Alimentar a la planta desaladora con agua salobre.

Para el caso 1, se analizará a la planta desaladora bajo dos condiciones del agua de alimentación, como primer escenario, se analiza alimentar a la planta mediante el canal de llamada de la planta termoeléctrica, la cual se supondrá tendrá una temperatura de 23.4 °C (7) y 36,000 ppm de concentración. En un sub caso, se analizará alimentar a la planta desaladora con el agua del canal de descarga de la planta termoeléctrica, se analiza este caso debido a que al paso del agua del canal de llamada por los condensadores, esta sufre un incremento en su temperatura de aproximadamente 8 °C, los cuales pueden llegar a favorecer en el consumo de energía de la planta desaladora.

En el caso 2, se analiza alimentar a la planta desaladora con agua salobre, dicha agua se extraerá de la cuña salina que a avanzado a través de cierto acuífero, con el fin de ver si esta puede llegar a funcionar como una barrera al avance de la cuña salina, además de poder simular el incremento de salinidad a través del tiempo, ya que al extraer agua de la cuña salina, estaremos metiendo, al menos hasta el punto donde se encuentran los pozos de alimentación, la cuña salina, incrementando así la concentración del agua de alimentación en esta parte.

En ambos casos se analizará tanto la parte técnica como la parte económica del proyecto.

La metodología para el análisis técnico se dividirá en:

- Obra de toma

- Planta desaladora
- Impulsión del agua producto
- Descarga de salmuera

En cada uno de los puntos anteriores, en los que se tenga que hacer circular agua, a excepción de la planta desaladora, se supondrá una velocidad promedio del flujo de 1.5 m/s, en base a esto se determinarán los diámetros para conducir el líquido.

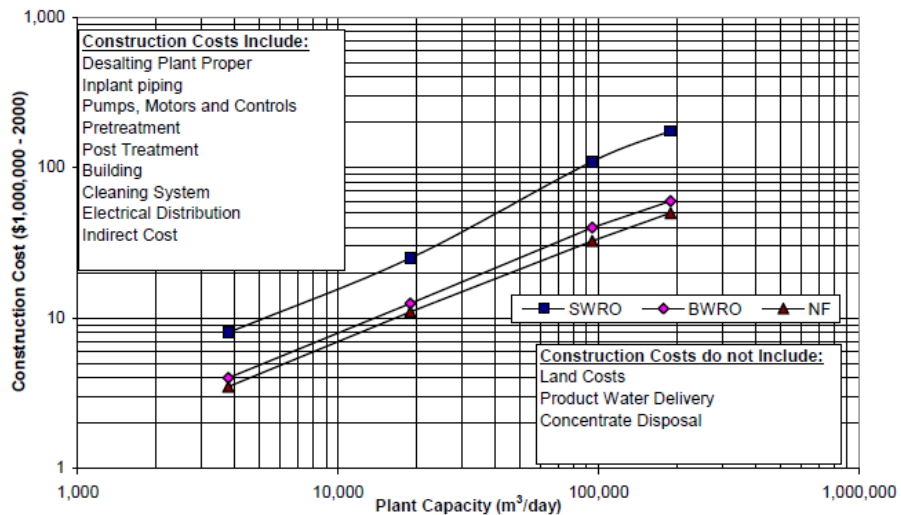
En la obra de toma, impulsión de agua producto y descarga de salmuera se analiza la presión a vencer debida a la fricción y a la carga estática, en base a la presión obtenida se calculará la potencia de bombeo y su costo en el sistema tarifario de CFE.

La planta desaladora, se simulara en base a los parámetros de diseño propuestos por los fabricantes de membranas, los cuales están sujetos al tipo de agua de alimentación.

La metodología para la evaluación económica del proyecto de desalación, se ha desarrollado de la siguiente manera:

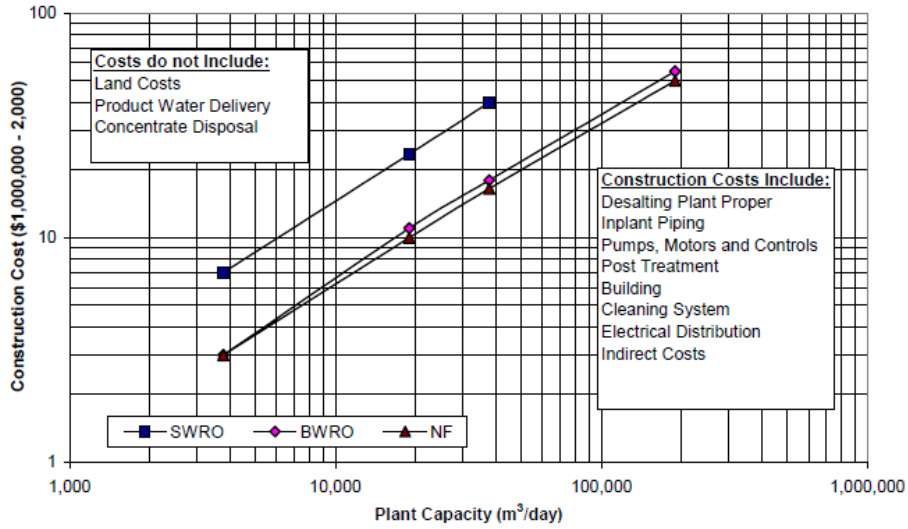
Costo capital, el cual, según la capacidad de la planta desaladora, tipo y captación del agua de alimentación variará. Dicho costo se obtendrá de las siguientes gráficas (5):

Figure 9-7 Total construction cost—SWRO, BWRO, and NF plants with surface water feed



Gráfica 1: Costo capital para SWRO, BWRO, y NF con toma superficial del agua de alimentación

Figure 9-8 Total construction cost—SWRO, BWRO, and NF plants with well water feed

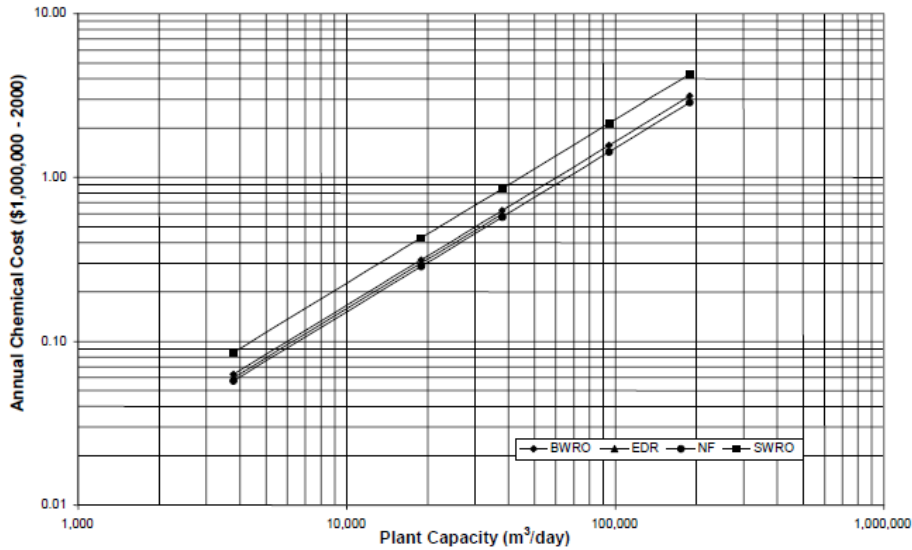


Gráfica 2: Costo capital para SWRO, BWRO, y NF con toma de pozos del agua de alimentación

Costos variables de O&M: comprenden la energía, dosificación de químicos y reemplazo de membranas.

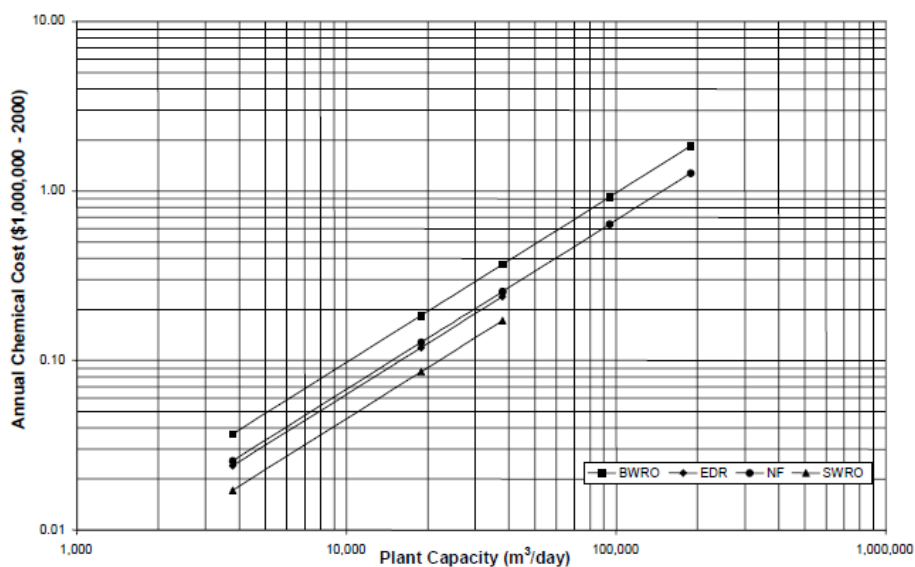
Para el costo por dosificación de químicos, se han consultado la siguiente gráfica:

Figure 9-41 Annual cost—chemicals for surface water membrane processes



Gráfica 3: Costo anual de químicos para el proceso de membrana con toma superficial

Figure 9-42 Annual cost—chemicals for ground water membrane processes



Gráfica 4: Costo anual de químicos para el proceso de membrana con toma subterránea

Costo por reemplazo de membranas: Se ha supuesto un costo por membranas [USD/membrana] y un porcentaje de intercambio al año, dicho porcentaje varía según el agua de alimentación.

Costo por energía: Se toma en cuenta el consumo de energía de la red por la potencia de bombeo necesaria en el sistema de alimentación, sistema de alta presión, impulsión de agua producto y descarga de salmuera. Según el consumo de energía y región en cada uno de los sistemas, se aplicará la tarifa correspondiente que dicta el sistema tarifario de la Comisión Federal de Electricidad (CFE<sup>1</sup>), de esta forma se determinará el costo anual que se deberá pagar por el suministro de la energía en cada uno de los sistemas.

Para el estudio económico de la planta desaladora, se toman en cuenta los gastos en lo que se incurrirá, tanto por inversión como por consumo de energía, que son los más grandes, en cada uno de los sistemas que comprenden a la planta desaladora que son: obra de toma, planta desaladora, impulsión de agua producto y descarga de salmuera.

Para el cálculo del costo nivelado por metro cúbico desalado, se ha creado una hoja de cálculo, "Desalacost", la cual se divide en el cálculo de la amortización de la inversión y en el cálculo de los costos de operación y mantenimiento (fijos y variables) a lo largo de la vida útil de la planta desaladora, los cuales se pasan a valor presente para poder calcular al final el costo nivelado del metro cúbico desalado.

Dentro de la hoja de cálculo se considera la energía necesaria de la red, el tiempo de fabricación e instalación de la planta, vida útil, inversión, producción bruta al año, factor de planta, porcentaje de reposición de membranas al año, tasa de descuento, costo de químicos, costo por consumo de energía y los costos por operación y mantenimiento, para al final calcular un costo nivelado del

<sup>1</sup> En el Anexo 1: Sistema Tarifario de CFE, se explica cómo se realiza el cálculo del costo por la energía

metro cúbico desalado, parámetro que nos servirá de comparación en cada uno de los escenarios propuestos.



## Escenario 1

### ASOCIAR UNA PLANTA DESALADORA DE ÓSMOSIS INVERSA A UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA

En este escenario se analiza la posibilidad de instalar una planta desaladora de ósmosis inversa al canal de llamada de una planta termoeléctrica, en dicho escenario se pretende observar los efectos del agua de alimentación en el proceso de ósmosis inversa, aunque en este escenario se tiene una temperatura y concentración constante, nos servirá como punto de comparación para cuando se alimente a la planta desaladora con el canal de descarga de la termoeléctrica, en el cual el agua sufre un incremento en su temperatura debido al paso por los condensadores.

Se analiza este escenario, así como todos los demás desde la obra de toma, pasando por el proceso de desalación, conducción de agua producto y descarga de salmuera, para al final hacer un análisis económico de cada uno de los escenarios.

### Obra de toma

La obra de toma de la planta termoeléctrica consume diariamente un caudal de agua de mar para enfriamiento de sus condensadores y secundarios de 518,400 [m<sup>3</sup>/día] (6[m<sup>3</sup>/s]), con una salinidad y temperatura promedio de 36,000 [ppm] y 23.4 °C.

La obra de toma de la planta termoeléctrica consiste en una tubería de concreto reforzado de 2.44 metros de diámetro y de aproximadamente 430 metros de longitud (medidos desde el cárcamo de bombeo) a una profundidad de 10 metros (6).



Figura 1: Obra de toma y descarga de planta termoeléctrica para enfriamiento de condensadores

Ocupar la obra de toma de la planta termoeléctrica, implica un alto contenido de organismos vivos (peces y rayas), además de la presencia de químicos utilizados por la planta termoeléctrica para evitar incrustaciones en los condensadores (desinfección por cloración y choque térmico), factores que afectan en el rendimiento de la planta desaladora o que pueden disparar el funcionamiento

de la misma por variaciones significativas o picos en los pre tratamientos químicos del agua de alimentación.

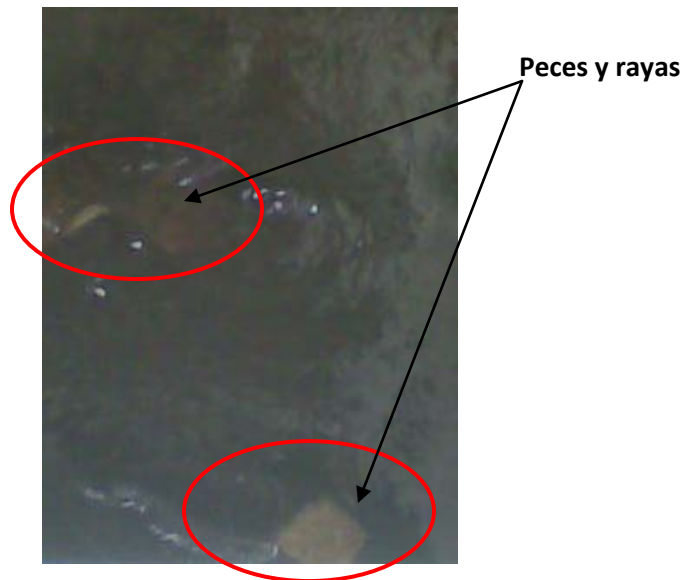


Figura 2: Presencia de peces y rayas en la obra de toma de CFE

Para el cálculo de la potencia de bombeo de la obra de toma de CFE a la desaladora se considera una distancia de 125 metros y un desnivel de 20 metros, se bombearán 500 lps en una tubería de 18" de diámetro, además se considera una caída de presión en el filtro arena y cartucho de 2 y 1 bar respectivamente, el cálculo de la potencia de bombeo se efectúa de la siguiente forma:

$$Re = \frac{4Q}{\pi Dv} = 1.38E^6$$

Ocupando la ecuación de Darcy para encontrar el coeficiente de fricción, en función del número de Reynolds, la rugosidad absoluta y el diámetro de la tubería.

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left\{ \left( \frac{\varepsilon}{3.7065 * D} \right) - \frac{5.0425}{Re} * \log \left( \frac{1}{2.8257 * \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{1.1098}} + \frac{5.8506}{Re^{0.8991}} \right) \right\} \right]^2} = 1.47E^{-2}$$

Una vez obtenido el factor de fricción, se calcula la pérdida de carga debida a la fricción con la siguiente ecuación:

$$hf = \frac{8fLQ^2}{g\pi^2D^5} = 1.9 [m]$$

Como la pérdida de carga está en función de la carga estática, de la carga debida a la fricción y a la caída de presión debida al filtro arena y al filtro cartucho<sup>2</sup>, se obtiene una carga total:

<sup>2</sup> Se considera una caída de presión, para todos los casos, en el filtro arena y filtro cartucho de 1 y 2 bar respectivamente

$$hT = h_e + h_f = 51.9 \text{ [m]}$$

Que se refiere a la carga que debe vencer la bomba para transportar los 500 lps a lo largo de todo el acueducto. Considerando un peso específico del agua producto de 1,025 [kg/m<sup>3</sup>], se obtiene una potencia de bombeo con la siguiente ecuación:

$$Pot = \frac{\rho g Q h T}{\eta_s * 1000} = 310 \text{ [kW]}$$

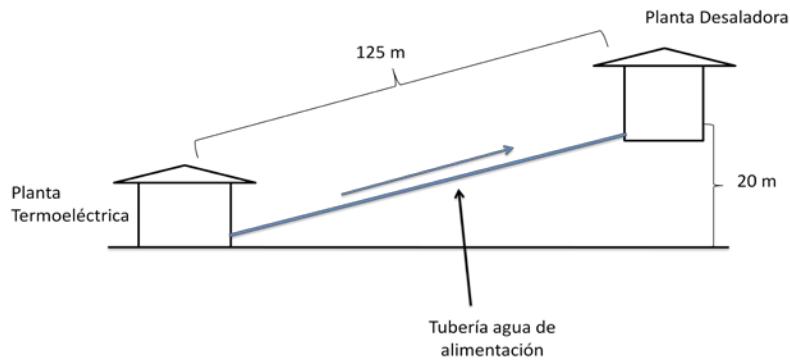


Figura 3: Diagrama de bombeo de agua de alimentación a la planta desaladora

Al final de la tesis, en la sección de anexos se da una breve explicación del porque se usan estas ecuaciones para determinar la potencia de bombeo en el acueducto.

### Proceso de desalación

Debido a que la obra de toma para la planta desaladora es del tipo abierta, ésta estará sujeta a los cambios de temperatura en el agua de alimentación, razón por la cual se analizan los efectos de la desaladora en el consumo de energía del sistema de alta presión del proceso de desalación.

Se ha revisado entonces la variación de la temperatura a lo largo del año y en cada una de sus estaciones para el periodo 2003 al 2005 (7) y se ha encontrado la siguiente gráfica.

b)

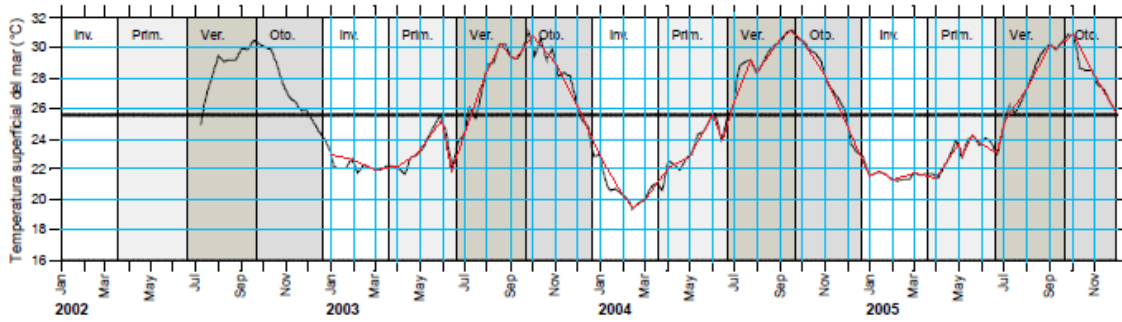


Figura 14. Temperatura (promedio diario) a 10 m de profundidad frente a I. La Partida (a) y temperatura superficial (promedio semanal) registrada sobre Cuenca Alfonso mediante satélite. Datos proporcionados por Ocean. Lucio Godínez O. (a) y M.C. Eduardo González R. (b). La línea horizontal indica el promedio.

Gráfica 5: Temperatura en cada uno de los meses en la bahía de La Paz

De la gráfica se obtuvieron las siguientes temperaturas para cada uno de los meses en los tres años.

	Temp °C								
	2003		2004		2005		Promedio		
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Gral.
Ene	23	22	23	20	21.8	21.6	22.6	21.2	21.9
Feb	22.25	21.75	20	19	21.7	21.6	21.3	20.8	21.1
Mar	22	22	22	20	21.7	21.7	21.9	21.2	21.6
Abr	23	21.75	23	22	24	21.7	23.3	21.8	22.6
May	25.7	23	25.7	23	24.2	23	25.2	23.0	24.1
Jun	25	22	26	24	25	23	25.3	23.0	24.2
Jul	28	24.2	29	26	27.5	25	28.2	25.1	26.6
Ago	30	28	28.5	30.5	30	27.5	29.5	28.7	29.1
Sep	31	29	31	30.5	28	27.5	30.0	29.0	29.5
Oct	31	29	30.5	28	31	28	30.8	28.3	29.6
Nov	29	26	28	25	31	28	29.3	26.3	27.8
Dic	26	23	25	21.7	28	25.7	26.3	23.5	24.9

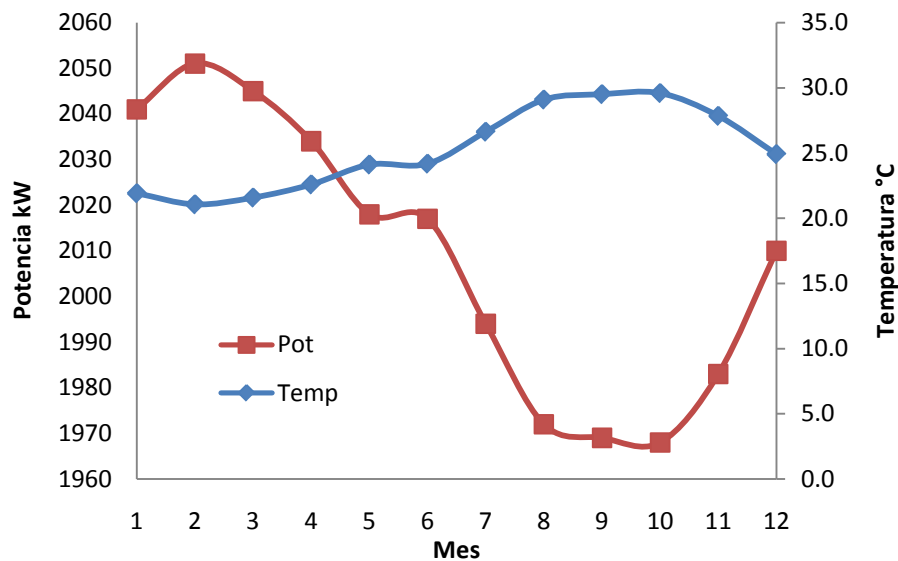
Tabla 1: Tabla de temperaturas para el periodo 2003-2005 en la bahía de La Paz

En donde se tomaron la temperatura máxima y mínima para cada uno de los meses, para sacar un promedio de máximos y mínimos y al final sacar un promedio general, el cual es el valor de temperatura que ocuparemos para el cálculo de la potencia de bombeo en el sistema de alta presión del proceso de desalación.

El hecho de alimentar a la planta desaladora con una obra de toma abierta, implica un índice de ensuciamiento mayor al que se presenta cuando se ocupan pozos de alimentación, razón por la cual se propone una recuperación del 40%.

Ocupando el software de desalación ROSA 6.1. y la hoja de cálculo PX Power Model Selector, se calcula la presión y potencia de bombeo en el sistema de alta presión con recuperadores de

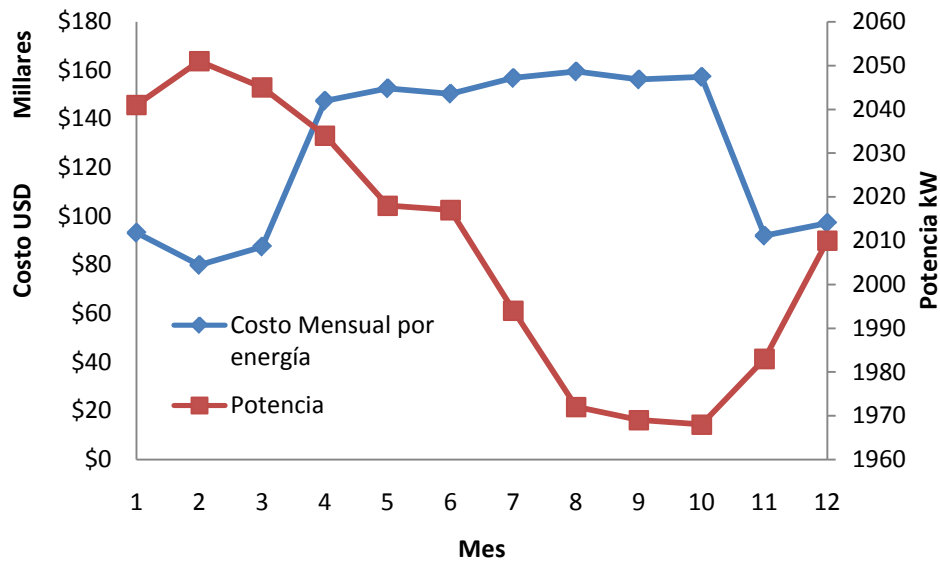
energía por intercambio de presión para cada una de las temperaturas de alimentación, obteniéndose la siguiente gráfica de potencias y temperaturas en cada uno de los meses.



**Gráfica 6: Potencia contra temperatura en el sistema de bombeo de alta presión en el proceso de desalación**

En la gráfica anterior se puede observar que la potencia en el sistema de bombeo de alta presión disminuye conforme se incrementa la temperatura. La presión de alimentación para poder llevar a cabo el proceso de desalación, va desde los 58.5 hasta los 61 bares de presión, en realidad no se presenta una gran diferencia tanto en la presión de alimentación como en la potencia de bombeo en el sistema de alta presión cuando se varía la temperatura de alimentación, al menos para este caso en el que la diferencia de temperaturas no es muy elevada.

Debido a que la potencia varía mes con mes, implica que el costo por consumo de energía variará mes con mes, a continuación se muestra una tabla con su gráfica del costo de energía que se debería pagar cada mes.



Gráfica 7: Costo por energía contra potencia en el sistema tarifario de CFE con tarifa H-M en la zona de B.C.S.

El comportamiento de la gráfica es curioso, ya que conforme disminuye la potencia el costo por energía se incrementa, uno esperaría que conforme disminuye la potencia se disminuyera el costo, el caso es el siguiente, el sistema tarifario de CFE maneja en su tarifa H-M (Horaria Media Tensión) tres tipos de tarifas, tarifa base, intermedia y punta, siendo la tarifa base el costo por kW más bajo, mientras que en la tarifa punta el costo por kW el más caro. Además CFE considera la demanda facturable, que dependiendo de la región se aplicarán factores de ajuste, y se define de la siguiente forma:

$$DF = DP + FRI + \max(DI - DP, 0) + FRB * \max(DB - DPI, 0)$$

Donde:

DP es la demanda máxima medida en el periodo de punta

DI es la demanda máxima medida en el periodo intermedio

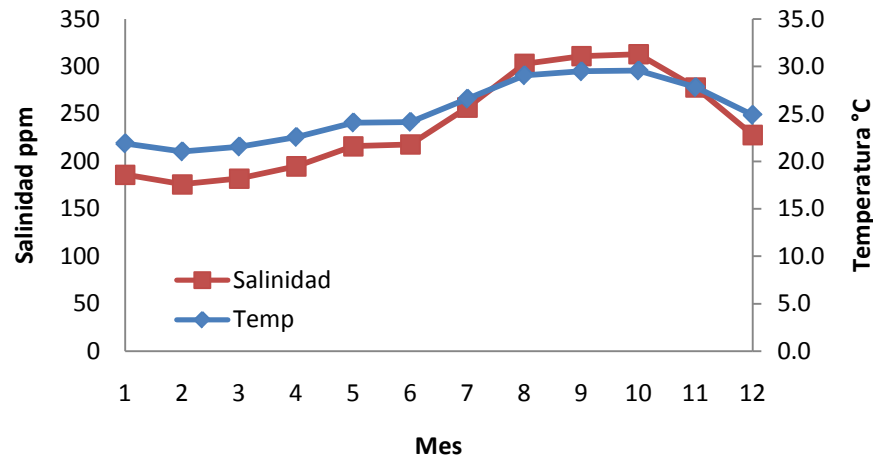
DB es la demanda máxima medida en el periodo de base

DPI es la demanda máxima medida en los periodos de punta e intermedio

FRI y FRB son factores de reducción que varían según la región tarifaria

Es este valor de demanda facturable el que ocasiona que el costo por energía en los meses de abril a octubre (en la gráfica, del mes 4 al mes 10) se incremente aunque el consumo de energía sea menor que en los meses anteriores a abril y posteriores a octubre, ya que el valor de DP (Demanda Máxima medida en el periodo punta) es diferente de cero y es igual al máximo valor registrado en el periodo punta.

Otro aspecto que se debe considerar al tener variaciones de temperatura en el agua de alimentación de la planta desaladora, es la variación de la calidad del agua producto y es que cuando se incrementa la temperatura, la calidad del agua producto disminuye, es decir pasan más sales a través de la membrana y en consecuencia mayor será la salinidad del agua producto, a continuación se muestra la gráfica que muestra la salinidad en el agua producto y la temperatura en cada uno de los meses.



Gráfica 8: Salinidad en el agua producto contra temperatura

De la gráfica se observa que la diferencia de salinidades en el agua producto no es mucha, teniéndose una diferencia máxima de 137 ppm, y una concentración máxima de 313 ppm que es un valor aceptable para considerar el agua producto como agua potable.

### Conducción del agua producto

Se considera una longitud total de 14 km y un desnivel de 70 metros, con una tubería de 18", y repitiendo el mismo procedimiento que en el caso en que se calculo la potencia de bombeo en el sistema de alimentación, se tienen los siguientes resultados:

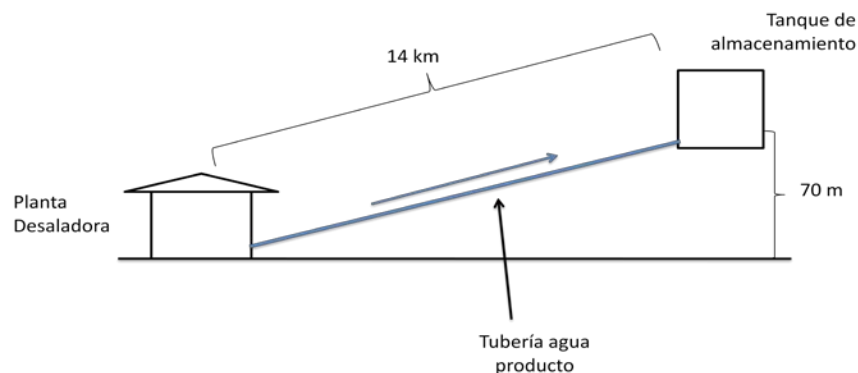


Figura 4: Diagrama de impulsión del agua producto

$$Re = \frac{4Q}{\pi Dv} = 5.53E^5$$

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left\{ \left( \frac{\varepsilon}{3.7065 * D} \right) - \frac{5.0425}{Re} * \log \left( \frac{1}{2.8257} * \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{1.1098} + \frac{5.8506}{Re^{0.8991}} \right) \right\} \right]^2} = 1.55E^{-2}$$

$$hf = \frac{8fLQ^2}{g\pi^2 D^5} = 35.94 [m]$$

$$hT = h_e + hf = 105.94 [m]$$

$$Pot = \frac{\rho g Q h T}{\eta_s * 1000} = 245 [kW]$$



Figura 5: Acueducto para el transporte del agua producto de Planta Termoeléctrica a La Paz

### Disposición de salmuera

La concentración de la salmuera al final del proceso de desalación por ósmosis inversa es aproximadamente de 60,000 ppm en un caudal de 0.3 [m<sup>3</sup>/s]. Como la descarga se realiza en la obra de descarga de la planta termoeléctrica con un caudal de 5.5 [m<sup>3</sup>/s] y una concentración de 36,000 ppm, implica una concentración al momento de mezclarse ambos caudales de 37,240 ppm y un caudal total de 5.8 [m<sup>3</sup>/s], el cual se descargará a su vez en mar abierto mediante la tubería de descarga de la planta termoeléctrica de CFE.



Como la planta desaladora se encuentra a mayor altura que la descarga de CFE y considerando además que la presión de salida de la salmuera es de 1 bar, entonces no es necesario implementar un equipo de bombeo para la impulsión de la salmuera debido a que se tiene un exceso de carga de 20.53 metros, por lo que la salmuera puede ser descargada directamente en la obra de descarga por gravedad.

Es necesario, para realizar la descarga en la obra de descarga de CFE, una tubería de 18" de diámetro que cubra una distancia de separación de la desaladora a la termoeléctrica de 125 metros aproximadamente.

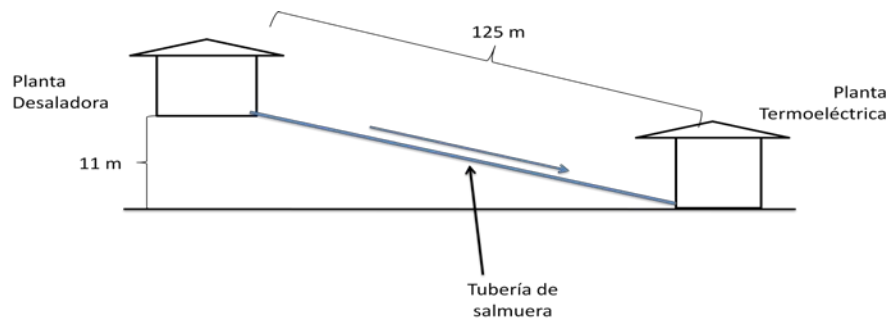


Figura 6: Descarga de salmuera en obra de descarga de planta termoeléctrica

## Evaluación económica

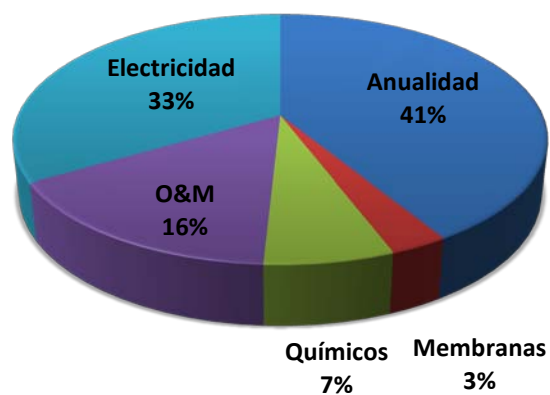
Para el cálculo del costo nivelado por metro cúbico desalado, se han utilizado los siguientes datos:

Tiempo de fabricación e instalación	2	Años
Vida útil	20	Años
Inversión	\$22,954,000.00 (5)	USD
Tiempo de amortización	15	Años
Factor de planta	100%	
Reposición de membranas	20%	%/año
Tasa de descuento	12%	
Tarifa eléctrica	H-M	
Costo nivelado de O&M	0.15	USD/m <sup>3</sup>
Costo nivelado de químicos	0.114	USD/m <sup>3</sup>
Costo nivelado de cambio de membranas	0.0285	USD/m <sup>3</sup>
Costo por membrana	710	USD

Además se han considerado los gastos incurridos por tubería, tanto para la alimentación, impulsión de agua producto y descarga de salmuera. Se ha supuesto un costo nivelado por metro de tubería instalado de 112.7 [USD/m]. A continuación se muestra una tabla resumen, en la que se muestra la potencia necesaria, para bombeo del agua de alimentación, sistema de alta presión,

impulsión y descarga de salmuera, así como los gastos incurridos para cada uno de los casos anteriores, ya sea por tubería o por inversión de la planta desaladora.

	Toma Desaladora Descarga Desaladora	OT CFE <sup>3</sup> OD CFE
ALIMENTACIÓN	POTENCIA [kW]	310
	ENERGÍA [\$]	\$236,424.00
	INVERSIÓN [USD]	\$14,091.00
DESALADORA	POTENCIA [kW]	2008*
	ENERGÍA [\$]	\$1,530,586.00
	INVERSIÓN [USD]	\$22,954,000.00
IMPULSIÓN	POTENCIA [kW]	245
	ENERGÍA [\$]	\$186,851.00
	INVERSIÓN [USD]	\$1,578,136.00
SALMUERA	POTENCIA [kW]	---
	ENERGÍA [\$]	---
	INVERSIÓN [USD]	\$14,091.00
TOTAL	POTENCIA [kW]	2563
	ENERGÍA [\$]	\$1,953,861.00
	INVERSIÓN [USD]	\$24,560,318.00
COSTO NIVELADO [USD/m <sup>3</sup> ]		<b>1.17</b>



Gráfica 9: Composición del costo nivelado

<sup>3</sup> OT CFE – Obra de Toma de CFE  
OD CFE – Obra de Descarga de CFE

## Escenario 1.2

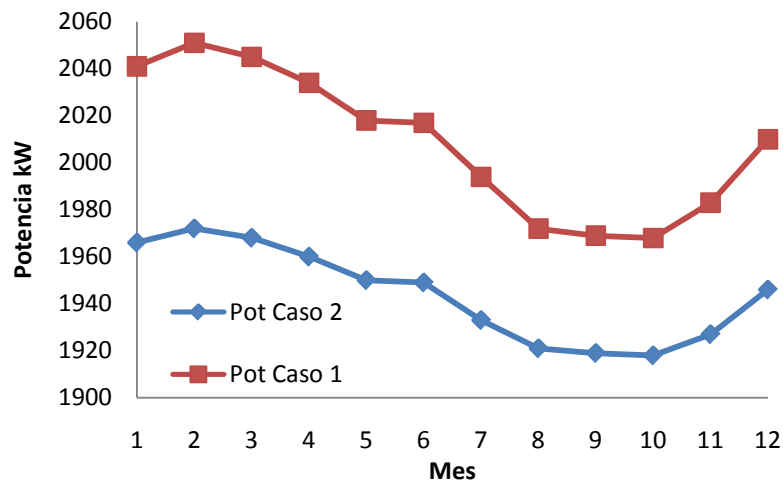
En este escenario se pretende aprovechar el incremento de temperatura del agua de enfriamiento de condensadores, para alimentar a la planta desaladora, y así disminuir la potencia de bombeo necesaria para llevar a cabo el proceso de desalación. En este escenario se podrán observar los efectos de la temperatura del agua de alimentación en el proceso de desalación.

### Obra de toma

Se desprecia el posible cambio de densidad que pueda tener el agua de mar con el incremento de temperatura, y se mantienen constantes las condiciones de diseño propuestas en el escenario anterior, razón por la cual la potencia de bombeo en el sistema de alimentación de la planta desaladora es de 310 kW.

### Proceso de desalación

Se considera un incremento en la temperatura del agua de alimentación de la planta desaladora de 8°C, debido a su paso a través de los condensadores de la planta termoeléctrica, se calcula el consumo de energía en el sistema de alta presión de la misma forma que en el caso anterior (caso en que se alimenta a la planta desaladora con la obra de toma de la planta termoeléctrica), ya que los efectos de la temperatura serán los mismos que en el caso anterior, mayor temperatura menor potencia y menor temperatura mayor potencia, solamente se comparará, mediante la siguiente gráfica, la diferencia en la potencia de bombeo en el sistema de alta presión para este y el caso anterior.



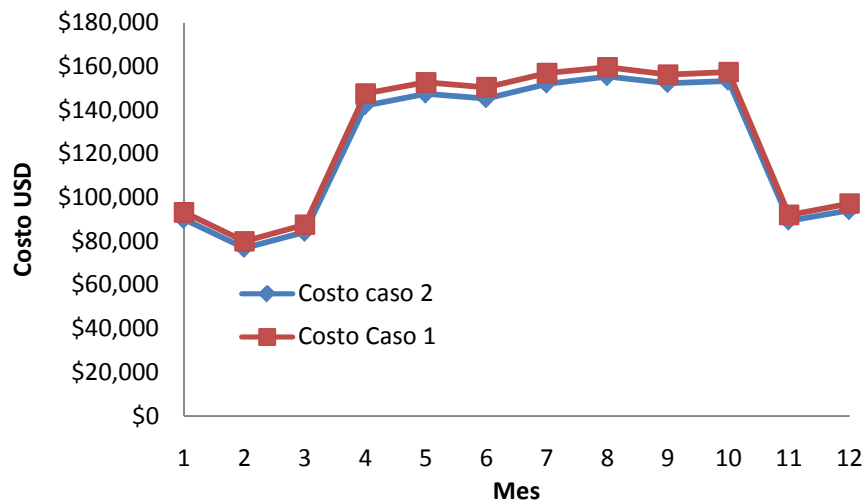
Gráfica 10: Potencia de bombeo en sistema de alta presión con incremento de temperatura en el agua de alimentación

Caso 1: Temperatura ambiente en obra de toma de desaladora

Caso 2: Temperatura Ambiente + 8°C por paso por condensadores en toma de la desaladora

Como era de esperarse la potencia de bombeo para este caso es menor a la necesaria en el caso anterior, ya que se le está incrementando la temperatura al agua de alimentación en 8 °C, que implica una reducción en la potencia de 50 a 79 kW según el mes del año que se considere.

El costo por energía se muestra a continuación mediante la siguiente tabla, también se muestra una gráfica comparativa entre el costo por energía cuando se incrementa la temperatura en 8°C y cuando se alimenta a la planta desaladora con agua de mar a temperatura ambiente.



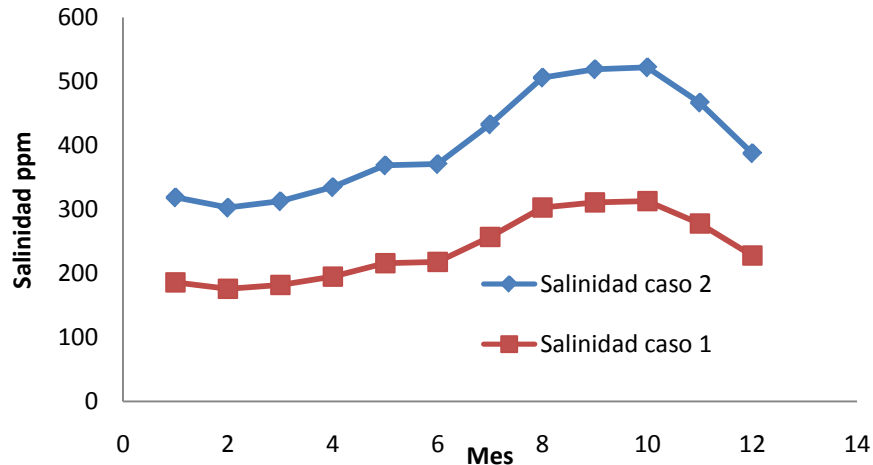
**Gráfica 11: Comparación en costo por energía en sistema de alta presión con temperatura ambiente y con incremento de temperatura**

Caso 1: Temperatura ambiente en obra de toma de desaladora

Caso 2: Temperatura Ambiente + 8°C por paso por condensadores en toma de la desaladora

La gráfica nos muestra un comportamiento similar al del caso anterior, con la ventaja de que esta se encuentra un nivel más abajo, esto se debe a que la potencia de bombeo es menor en el sistema de alta presión y en consecuencia el costo también. Para este caso se obtiene un ahorro anual por consumo de energía de aproximadamente \$47,655 USD/año (APROX \$700,000.00 Pesos).

Comparando la calidad del agua producto de este caso contra el caso anterior, se tiene, como se muestra en la siguiente gráfica una disminución en la calidad del agua producto debido al incremento de la temperatura en el agua de alimentación a su paso por los condensadores.



**Gráfica 12: Variación de la salinidad en el agua producto con temperatura ambiente y con incremento de temperatura**

Caso 1: Temperatura ambiente en obra de toma de desaladora

Caso 2: Temperatura Ambiente + 8°C por paso por condensadores en toma de la desaladora

### Conducción del agua producto

A pesar de existir una diferencia en la concentración del agua producto, no representa un cambio importante en la densidad, por lo tanto la ruta del acueducto se mantienen bajo las mismas condiciones que en el caso anterior, razón por la cual la potencia de bombeo no varía y mantiene el valor de 245 kW.

### Disposición de salmuera

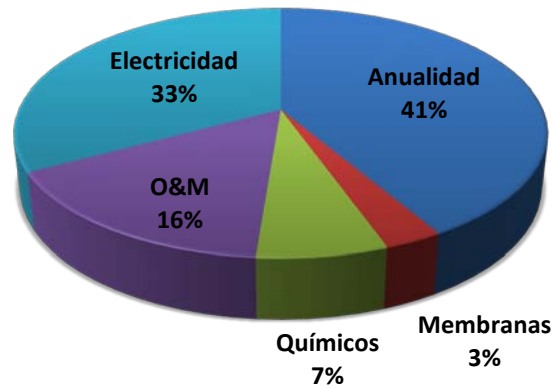
Se mantienen las mismas condiciones de diseño que en el caso anterior, razón por la cual la salmuera al mezclarse con el caudal de la planta termoeléctrica, formara un caudal de 5.8 m<sup>3</sup>/s con una concentración aproximada de 37,200 ppm. Como la salmuera sale a un bar de presión y se tiene un desnivel de 11 metros, no es necesario instalar alguna bomba de impulsión, ya que se puede realizar la descarga únicamente por efecto de la gravedad.

### Evaluación económica

En este caso se analizará el impacto en el costo nivelado debido a la reducción en la potencia de bombeo del sistema de alta presión, ya que la alimentación, impulsión y descarga de salmuera guarda las mismas condiciones de potencia e inversión que en el caso anterior.

Se muestra a continuación una tabla resumen de la potencia, costo por energía e inversión para cada uno de los puntos a evaluar, es decir, alimentación, planta desaladora, impulsión y descarga de salmuera.

	Toma Desaladora Descarga Desaladora	OD CFE OD CFE
ALIMENTACIÓN	POTENCIA [kW]	310
	ENERGÍA [\$]	\$236,424.00
	INVERSIÓN [USD]	\$14,091.00
DESALADORA	POTENCIA [kW]	1944*
	ENERGÍA [\$]	\$1,482,931.00
	INVERSIÓN [USD]	\$22,954,000.00
IMPULSIÓN	POTENCIA [kW]	245
	ENERGÍA [\$]	\$186,851.00
	INVERSIÓN [USD]	\$1,578,136.00
SALMUERA	POTENCIA [kW]	---
	ENERGÍA [\$]	---
	INVERSIÓN [USD]	\$14,091.00
TOTAL	POTENCIA [kW]	2499
	ENERGÍA [\$]	\$1,906,206.00
	INVERSIÓN [USD]	\$24,560,318.00
COSTO NIVELADO [USD/m3]		<b>1.16</b>



Gráfica 13: Composición del costo nivelado

## Escenario 2

### ALIMENTAR A LA PLANTA DESALADORA MEDIANTE EL USO DE POZOS SALOBRES

En este escenario se observarán los efectos de la concentración del agua de alimentación en el proceso de ósmosis inversa, para esto se ha simulado una batería de pozos que se alimente con agua de la cuña salina de cierto acuífero, el cual al estar extrayendo agua de este incrementaremos su concentración, ya que hacemos que avance la cuña hasta la zona de pozos pero no permitiendo el paso de esta hacia el acuífero, razón por la cual se podría pensar como una posible solución a la remediación del acuífero.

### Obra de toma

Se alimentará a la planta desaladora con una batería de pozos ubicados en la zona de Chametla, en La Paz, colocados a 1.7 km tierra adentro medidos desde la costa, los cuales captarán agua salobre de la cuña salina.

Se espera que al momento de extraer agua salobre de la cuña salina, esta avance hacia la batería de pozos, incrementando así la concentración en los pozos de alimentación de la planta desaladora a lo largo de su operación.

Se ha simulado el incremento de la salinidad en los pozos de alimentación a lo largo de los 20 años de operación de la planta desaladora, teniéndose la siguiente tabla:

Año	Concentración ppm
0	9500
1	10330
2	11500
3	12500
4	13500
5	14700
6	15200
7	15700
8	16100
9	16700
10	17300

Año	Concentración ppm
10	17300
11	17800
12	18300
13	18800
14	19300
15	19900
16	20300
17	20700
18	21120
19	21500
20	22000

Tabla 2: Variación de la concentración en el agua salobre a lo largo de la operación de la planta desaladora

En dicha tabla se muestra la salinidad del agua de alimentación en el año cero, de 9,500 ppm, la cual se incrementa hasta las 22,000 ppm a los 20 años de operación de la planta desaladora.

Como se verá en el siguiente punto, la recuperación en el sistema de desalación variará, y es que como la salinidad varía, la presión de alimentación también, y será necesario en algunas ocasiones reducir el porcentaje de recuperación para no ocasionar algún daño en las membranas.

Si se reduce la recuperación, sin alterar la capacidad de la desaladora, 200 lps de agua producto, es necesario entonces alimentar al sistema con una mayor cantidad de agua salobre, razón por la cual la potencia de bombeo en la bomba de alimentación variará conforme se varíe la recuperación, a continuación se muestra una tabla con los resultados. El cálculo de la potencia de bombeo se realiza de la misma forma que en el escenario 1.

ALIMENTACIÓN					
año	Concentración	Flujo alim/pozo	Densidad	Presión	Pot total
	ppm	m3/s	kg/m3	bar	kW
0	9500	0.0250	1004.20	13.61	400
1	10330	0.0267	1004.80	13.64	428
2	11500	0.0267	1005.70	13.65	428
3	12500	0.0267	1006.20	13.65	428
4	13500	0.0286	1007.20	13.69	460
5	14700	0.0286	1008.00	13.70	460
6	15200	0.0286	1008.50	13.70	460
7	15700	0.0286	1008.80	13.70	461
8	16100	0.0308	1009.00	13.74	497
9	16700	0.0308	1009.60	13.74	497
10	17300	0.0308	1010.00	13.75	497
11	17800	0.0308	1010.40	13.75	498
12	18300	0.0308	1010.80	13.75	498
13	18800	0.0308	1011.20	13.76	498
14	19300	0.0308	1011.50	13.76	498
15	19900	0.0333	1012.00	13.80	541
16	20300	0.0333	1012.30	13.80	541
17	20700	0.0333	1012.60	13.81	541
18	21120	0.0333	1012.90	13.81	542
19	21500	0.0333	1013.20	13.81	542
20	22000	0.0333	1013.50	13.82	542

Tabla 3: Potencia en la bomba de alimentación de los pozos salobres a lo largo de la operación de la planta desaladora



El arreglo para ubicar los pozos de alimentación es el siguiente.

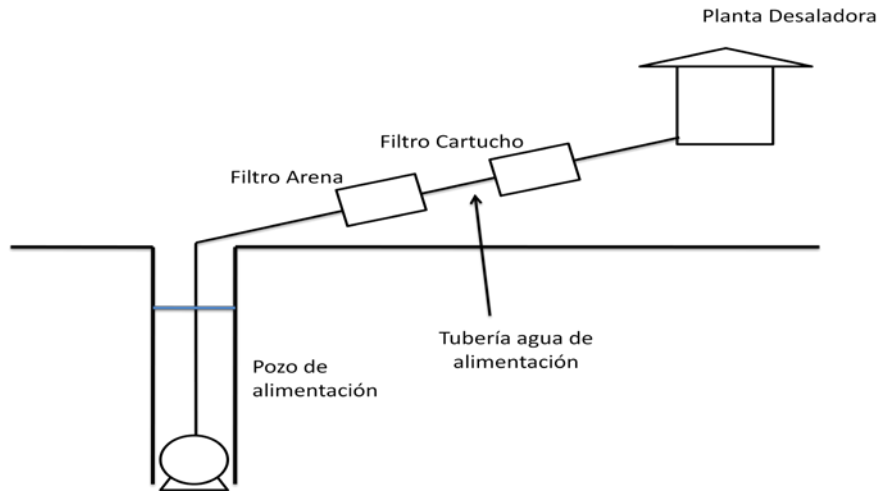


Figura 7: Diagrama de bombeo de agua de alimentación a la planta desaladora mediante pozos salobres

### Proceso de desalación

Debido al incremento de la salinidad a lo largo del tiempo, se espera que la presión de alimentación en el sistema de alta presión varíe, es decir, mientras la salinidad del agua de alimentación se incrementa, se incrementará la presión en la bomba de alta presión para seguir manteniendo un caudal de agua producto de 200 lps en el sistema de desalación por ósmosis inversa.

Como la calidad del agua de alimentación, es tal que se puede considerar como agua salobre, se ha propuesto un sistema de desalación de dos estados, es decir en el primer estado se recupera una parte de los 200 lps, el rechazo (salmuera) de este primer estado, se envía a un segundo estado en la cual se recuperará el restante caudal para obtener los 200 lps de agua producto, a continuación se muestra un diagrama.



Figura 8: Diagrama en el proceso de desalación de dos estados

HP → Alta Presión  
LP → Baja Presión

La ventaja en este tipo de sistemas de desalación, es que se puede recuperar hasta un 80%.

Se debe entender por estado, a un arreglo de tubos de presión, con cierto número de membranas en su interior. El estado uno tiene más tubos de presión y mas membranas que el estado 2. En algunas ocasiones, se pone una turbina booster entre el estado 1 y el estado 2, en este caso no se esté considerando.

Se realiza la corrida en el software de desalación ROSA 6.1, para simular el proceso de desalación, se han ocupado membranas de desalación para agua de mar, ya que la presión de trabajo necesaria en el sistema, es demasiado grande como para ocupar membranas de agua salobre. El sistema de dos estados se construyo de la siguiente forma:

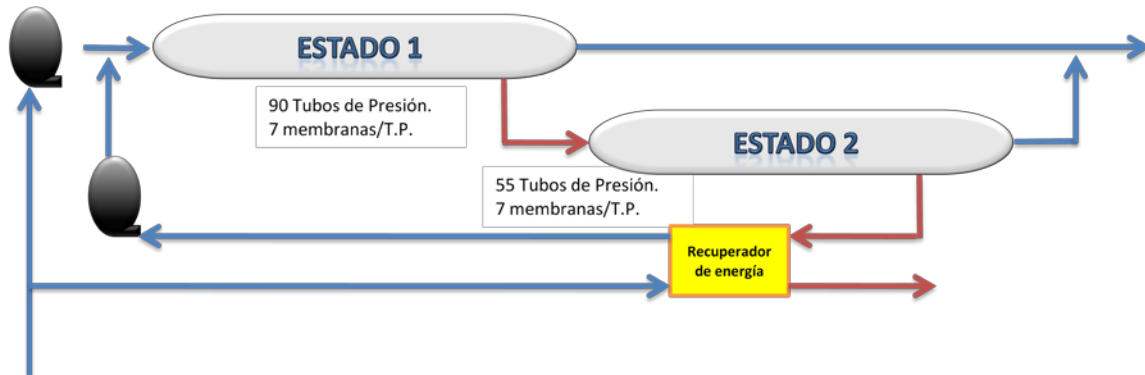


Figura 9: Arreglo de membranas en cada una de los estados

Se realizaron 20 corridas en el software de desalación, para simular el incremento de salinidad año con año, a continuación se muestran los resultados obtenidos.

PLANTA DESALADORA							
Año	Concentración	Flujo alim	Recuperación	Permeado	Presión Alim	Potencia	Potencia C/Recuperador
	ppm	m3/d	%	m3/d	Bar	kW	kW
0	9500	21600	80%	17280	42	1321	1310
1	10330	23040	75%	17280	40	1326	1261
2	11500	23040	75%	17280	43	1431	1356
3	12500	23040	75%	17280	46	1523	1451
4	13500	24686	70%	17280	44	1570	1407
5	14700	24686	70%	17280	47	1672	1503
6	15200	24686	70%	17280	48	1715	1534
7	15700	24686	70%	17280	49	1758	1566
8	16100	26585	65%	17280	46	1783	1506
9	16700	26585	65%	17280	48	1831	1571
10	17300	26585	65%	17280	49	1880	1603
11	17800	26585	65%	17280	50	1921	1635
12	18300	26585	65%	17280	51	1962	1667
13	18800	26585	65%	17280	52	2003	1699
14	19300	26585	65%	17280	53	2045	1731
15	19900	28800	60%	17280	51	2119	1696
16	20300	28800	60%	17280	52	2151	1729
17	20700	28800	60%	17280	52	2183	1729
18	21120	28800	60%	17280	53	2217	1761
19	21500	28800	60%	17280	54	2247	1794
20	22000	28800	60%	17280	55	2288	1826

Figura 10: Potencia de bombeo en el sistema de alta presión con el uso de recuperadores de energía por intercambio de presión

Se puede observar que el porcentaje de recuperación varía de un 80% a un 60%, y es que con el arreglo propuesto, conforme se va incrementando la salinidad en el agua de alimentación, se tiene que ir disminuyendo la recuperación, ya que la presión de alimentación se incrementa de tal forma que es necesario reducir la recuperación para no ocasionar algún daño a las membranas.

Se ocupa el recuperador de energía por intercambio de presiones en la salida de la segunda etapa de desalación, la reducción en la potencia de bombeo se muestra también en la tabla anterior.

A pesar de que la recuperación varía, el caudal de agua producto se mantiene constante en 200 lps, lo único que se varía es el caudal de alimentación al sistema de ósmosis inversa.

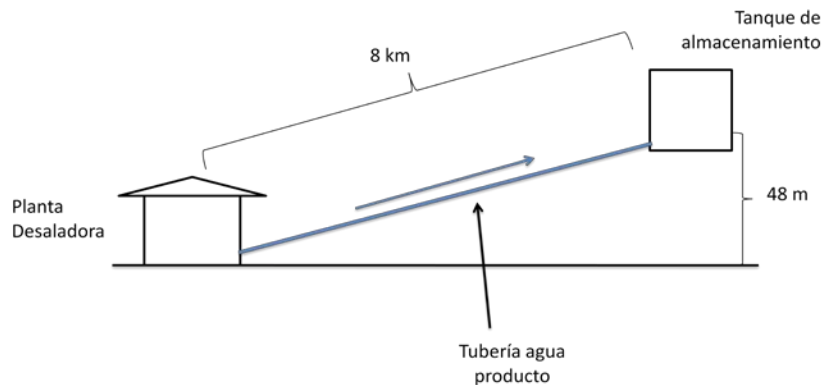
## Conducción del agua producto

Los 200 lps obtenidos del proceso de desalación se enviarán por el acueducto mostrado en al siguiente imagen.



Figura 11: Acueducto de impulsión del agua producto

Dicho acueducto tiene una longitud de 8.8 km y un desnivel de 48 metros, se propone una tubería de 18" de diámetro, y como el caudal será constante y como la salinidad en el agua producto no presenta grandes variaciones, se propone una bomba de impulsión que entregue 163 kW de potencia, potencia que se calcula de la siguiente forma:



El número de Reynolds calculado es de:

$$Re = \frac{4Q}{\pi Dv} = 5.53E^5$$

Ocupando la ecuación de Darcy para encontrar el coeficiente de fricción, en función del número de Reynolds, la rugosidad absoluta y el diámetro de la tubería.

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left\{ \left( \frac{\varepsilon}{3.7065 * D} \right) - \frac{5.0425}{Re} * \log \left( \frac{1}{2.8257 * \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{1.1098}} + \frac{5.8506}{Re^{0.8991}} \right) \right\} \right]^2} = 1.55E^{-2}$$

Una vez obtenido el factor de fricción, se calcula la pérdida de carga debida a la fricción con la siguiente ecuación:

$$hf = \frac{8fLQ^2}{g\pi^2D^5} = 22.59 [m]$$

Como la pérdida de carga está en función de la carga estática y de la carga debida a la fricción, se obtiene una carga total:

$$hT = he + hf = 70.59 [m]$$

Que se refiere a la carga que debe vencer la bomba para transportar los 200 lps a lo largo de toda la tubería. Considerando un peso específico del agua producto de 1000 [kg/m<sup>3</sup>], se obtiene una potencia de bombeo con la siguiente ecuación:

$$Pot = \frac{\rho g Q h T}{\eta_s * 1000} = 163 [kW]$$

### Disposición de salmuera

Se realizará, para este caso, la descarga de salmuera en la ensenada de La Paz.

Como la recuperación esta variando y el caudal de agua producto se mantiene constante, implica entonces que el caudal de salmuera descargado variará con el porcentaje de recuperación. A continuación se muestra una tabla con la caída de presión a lo largo de toda la tubería de descarga.

DESCARGA DE SALMUERA EN LA ENSENADA DE LA PAZ				
Salmuera	Densidad	Q salmuera	hfa-b	Exceso Presión
ppm	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /s	m	m
47084	1032	0.05	4.05	36
41038	1028	0.067	7.03	33
45685	1031	0.067	7.03	33
49632	1034	0.067	7.03	33
44730	1031	0.086	11.31	28.7
48732	1034	0.086	11.31	28.7
50390	1035	0.086	11.31	28.7
52031	1036	0.086	11.31	28.7
45787	1032	0.108	17.5	22.5
47485	1033	0.108	17.5	22.5
49208	1034	0.108	17.5	22.5
50611	1035	0.108	17.5	22.5
52027	1036	0.108	17.5	22.5
53456	1037	0.108	17.5	22.5
54883	1038	0.108	17.5	22.5
49547	1034	0.133	26.12	13.9
50551	1035	0.133	26.12	13.9
51545	1036	0.133	26.12	13.9
52588	1037	0.133	26.12	13.9
53534	1037	0.133	26.12	13.9
54777	1038	0.133	26.12	13.9

Tabla 4: Caída de presión en la tubería de descarga

Se marca el exceso de presión, debido a que la caída de presión por efecto de la fricción no es suficiente como para frenar el flujo de salmuera a través de la tubería, razón por la cual no es necesario instalar una bomba que impulse la salmuera al mar

### Evaluación económica

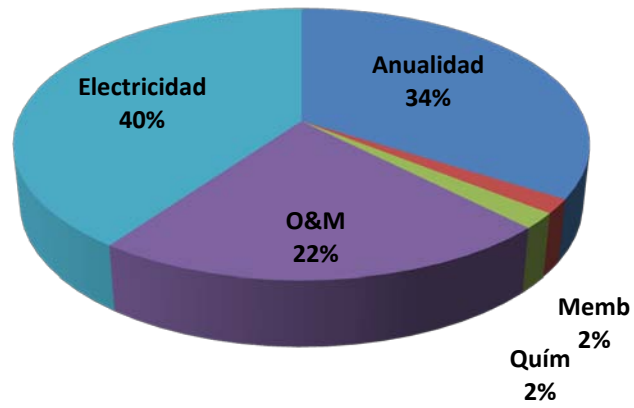
Para este caso se ha ocupado una inversión de la planta desaladora de \$11, 976,000.00<sup>4</sup>, y se ha variado también el costo anual por químicos a 0.0126 USD/m<sup>3</sup>.

<sup>4</sup> Valor obtenido de gráficas del Desalting Handbook for Planners

Tiempo de fabricación e instalación	2	Años
Vida útil	20	Años
Inversión	\$11,976,000.00	USD
Tiempo de amortización	15	Años
Factor de planta	100%	
Reposición de membranas	10%	%/año
Tasa de descuento	12%	
Tarifa eléctrica	H-M	
Costo nivelado de O&M	0.15	USD/m3
Costo nivelado de químicos	0.0126 (5)	USD/m3
Costo nivelado de cambio de membranas	0.0114 <sup>5</sup>	USD/m3
Costo por membrana	710	USD

	Toma desaladora	Pozo salobre
	Descarga desaladora	Ensenada La Paz
ALIMENTACIÓN	POTENCIA [kW]	400/542
	ENERGÍA [\$]	\$305,063.00/\$413,360.00
	INVERSIÓN [USD]	\$373,116.44
DESALADORA	POTENCIA [kW]	1310/1826
	ENERGÍA [\$]	\$999,080.00/\$1,392,612.00
	INVERSIÓN [USD]	\$11,976,000.00
IMPULSIÓN	POTENCIA [kW]	163
	ENERGÍA [\$]	\$124,313.00
	INVERSIÓN [USD]	\$991,971.20
SALMUERA	POTENCIA [kW]	---
	ENERGÍA [\$]	---
	INVERSIÓN [USD]	\$484,713.00
TOTAL	POTENCIA [kW]	
	ENERGÍA [\$]	
	INVERSIÓN [USD]	\$13,825,800.64
COSTO NIVELADO [USD/m3]		<b>0.67</b>

<sup>5</sup>Presenta un valor diferente a los demás casos analizados, debido a que el total de membranas en el sistema es menor.



Gráfica 14: Composición del costo nivelado



## **CAPITULO 7**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

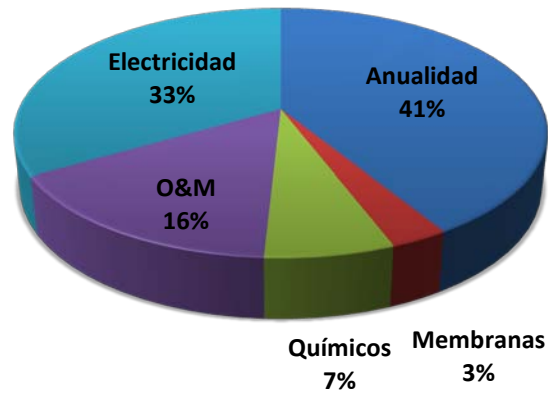
#### **Análisis de resultados**

Haciendo una breve recapitulación, se han estudiado a lo largo de esta tesis dos escenarios para la instalación de una planta desaladora que produzca 200 lps de agua producto, teniéndose como primer escenario el acoplar la obra de toma de una planta desaladora al canal de llamada de una planta termoeléctrica, y en un subescenario, acoplar la obra de toma de la desaladora al canal de descarga de la termoeléctrica, con el objetivo de aprovechar el incremento en la temperatura del agua de enfriamiento de condensadores. También se estudio en un escenario 2, la posibilidad de alimentar a la planta desaladora con la cuña salina de cierto acuífero y ver su efectos en las desalación debida al cambio de concentración a lo largo de la operación de la planta desaladora.

En el escenario 1, se obtuvo una potencia de bombeo promedio en el sistema de alta presión de 2,008 kW, además, este escenario presenta un consumo de energía en el sistema de alimentación y de impulsión del agua producto de 310 y 245 kW respectivamente, no se tiene un consumo de energía en el sistema de descarga de salmuera, ya que la planta desaladora se encuentra a una mayor altura que la obra de descarga de CFE. Entonces en este escenario se tiene un consumo total de energía de 2,563 kW que implican un costo por el consumo de energía en el sistema tarifario de CFE de \$ 1,953,861.00 USD/año.

El costo por la inversión de la planta desaladora, para este escenario sería de aproximadamente de \$24,560,318.00 USD, valor que se pretende amortizar a los 15 años de operación de la planta.

En base a estos datos, podemos ver de la gráfica del costo nivelado del metro cúbico desalado que el mayor porcentaje se ve reflejado por la anualidad que se tendría que pagar para poder amortizar el costo de la planta en 15 años, el segundo porcentaje con mayor presencia es el del consumo de energía con un 33%, seguidos de la operación y mantenimiento con un 16% y finalmente por los químicos y membranas con un 7% y 3% respectivamente, dando un total del costo por metro cúbico desalado de 1.17 [USD/m<sup>3</sup>].

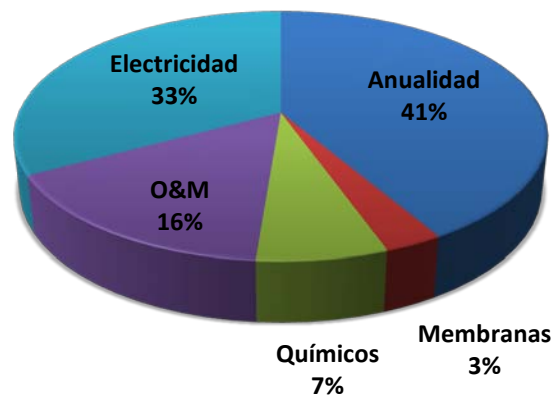


Gráfica 1: Gráfica del costo nivelado del escenario 1

En el escenario 1.2, la potencia de bombeo en el sistema de alta presión es en promedio de 1,944 kW, el consumo de energía en el sistema de alimentación y de impulsión del agua producto se mantiene constante en 310 y 245 kW respectivamente, como en el escenario 1 no se tiene un consumo de energía en el sistema de descarga de salmuera, ya que la planta desaladora se encuentra a una mayor altura que la obra de descarga de CFE, en este caso tampoco se considera una bomba de impulsión de salmuera. Entonces en este escenario se tiene un consumo total de energía de 2,499 kW que implican un costo por el consumo de energía en el sistema tarifario de CFE de \$ 1,906,206.00 USD/año.

El costo por la inversión de la planta desaladora es el mismo que en el escenario 1 y se pretende amortizar también a los 15 años de operación de la planta.

De la gráfica del costo nivelado del metro cúbico desalado vemos que no presento algún cambio en el porcentaje de los componentes de la gráfica, pero al final si presenta un cambio en el costo nivelado, bajando a 1.16 USD/m<sup>3</sup>, es decir presenta un ahorro de un centavo de dólar cada m<sup>3</sup> desalado.

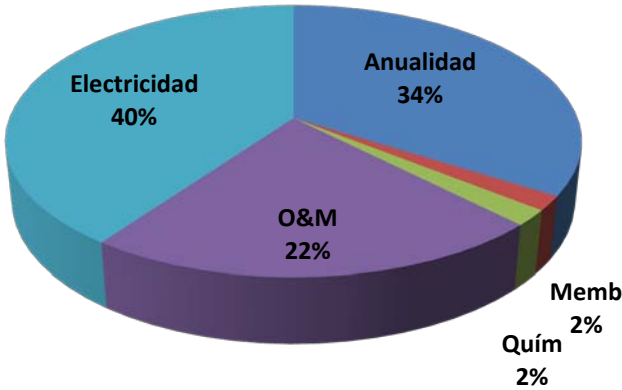


Gráfica 2: Gráfica del costo nivelado del escenario 1.2

En el escenario 2, la potencia de bombeo en el sistema de alta presión es variable de 1,310 kW a 1,826 kW, el consumo de energía en el sistema de alimentación de 400 a 542 kW y de impulsión del agua producto de 163 kW respectivamente, para la descarga de salmuera no se tiene consumo alguno, ya que la salmuera sale a 1 bar de presión del sistema de desalación de la planta desaladora y las caídas de presión no son suficientes como para tener una caída de presión de 1 bar.

El costo por la inversión de la planta desaladora es \$13,825,800.64 USD y se pretende amortizar también a los 15 años de operación de la planta, el hecho de que la inversión sea menor a la presentada en los escenarios anteriores se debe a que una planta para tratar agua salobre, requiere menor complejidad así como menor número de membranas para producir el mismo caudal de agua producto.

De la gráfica del costo nivelado del metro cúbico desalado vemos que presento cambios en la anualidad, bajando hasta un 34% y subiendo como porcentaje mayor, para este caso, el de electricidad a un 40%, la operación y mantenimiento subió a un 22% debido a que se mantuvo constante el costo nivelado de O&M para el caso de agua salobre como para el caso de agua de mar, los químicos y membranas bajaron a un 2%, debido a que en el agua salobre, la cantidad de químicos a dosificar puede disminuir, así como el intercambio de membranas al año.



Gráfica 3: Gráfica del costo nivelado del escenario 2

## Conclusiones

Se puede observar que en el escenario 1 y 1.2, no se obtiene gran diferencia en el costo nivelado por metro cúbico desalado, dicha diferencia es de tan solo un centavo de dólar, y dicho ahorro se debió a un incremento en la temperatura del agua de alimentación en 8°C, entonces el incremento de temperatura en el agua de alimentación no presento gran ahorro en el costo nivelado del escenario 1 y 1.2.

En el escenario 2, al contrario que en el escenario 1 y 1.2, si se presento un gran ahorro en el costo nivelado, ya que bajo hasta los 0.67 USD/m<sup>3</sup>, esto se debe principalmente a que la concentración del agua de alimentación, al principio de operación de la planta es de 9,500 ppm, tan solo una tercera parte de la concentración de alimentación que en el escenario 1 y 1.2, y se incrementa hasta 22,000 ppm, más de la mitad que en los escenarios 1 y 1.2, que a diferencia de estos escenarios, la planta permite recuperar de un 80% a un 60%, lo que implica un menor caudal de alimentación a la planta desaladora.

Por lo tanto el mejor escenario de desalación, al menos para este trabajo es el escenario en que se alimenta a la planta desaladora con agua salobre, ya que presenta el menor costo nivelado, así como la menor inversión. Este escenario, a pesar de ser el más económico, puede llegar a presentar los siguientes inconvenientes, debido a que la concentración en el agua de alimentación varia bastante, puede llegar a ser necesario cambiar las bombas cada determinado tiempo, más bien cuando la bomba no sea capaz de producir la presión necesaria cuando se cambie la concentración en el agua de alimentación. Pero a pesar de esto el costo en la inversión no se incrementara lo suficiente como para acercarse a los costos nivelados obtenidos en el escenario 1 y 1.2.

El hecho de que en este caso, haya sido el mejor escenario alimentar a la planta desaladora con agua salobre, no implica que así será siempre, ya que se debe tener en cuenta la ubicación de la planta desaladora, y la infraestructura a la que se tenga que recurrir para ubicar la planta desaladora.

El caso 2, presenta un inconveniente, al momento de extraer agua salobre de la cuña salina, se ocasiona que la cuña avance, al menos hasta la zona de la batería de pozos, esto implica que la zona de los pozos a la costa incrementa su salinidad, dicho incremento puede ocasionar una salinización del suelo, inutilizándolo para fines agrícolas. La ventaja que presentará este escenario es que de la zona de pozos a tierra adentro, se cree una barrera al avance de la cuña salina, permitiendo así que en esta zona se recupere el acuífero.

# **ANEXOS**

## ANEXO 1: Sistema Tarifario de CFE

### TARIFA ELÉCTRICA H-M

La Comisión Federal de Electricidad es la empresa encargada de la generación y suministro de energía eléctrica en el país, a su vez tiene la capacidad de realizar los cobros por la energía entregada a los consumidores, para esto la Secretaría de Hacienda en conjunto con la Secretaría de Energía se dan a la tarea de formular tarifas según el tipo de usuario y la región en la que se consume.

En los proyectos de desalación por Ósmosis Inversa (OI), la demanda de los equipos en cuanto a nivel de tensión de la red y potencias solicitadas, hacen que la tarifa H-M sea aplicada a este tipo de consumidor.

La tarifa H-M se aplica a los usuarios que soliciten el servicio eléctrico a nivel de media tensión, con periodos horarios durante el día y con dos temporadas en el año.

Al ser una tarifa horaria se distinguen tres periodos durante el día, esto dependiendo de la temporada anual, estos periodos son:

- Base
- Intermedia
- Punta

Siendo la punta la que tiene mayor costo, ya que se aplica en los horarios de mayor demanda en la red.

La República Mexicana se encuentra dividida en 8 regiones tarifarias, siendo de nuestro interés la región 1 Baja California, comprendida por el estado de Baja California y municipios del estado de Sonora, y la región 2 Baja California Sur, compuesta por dicho estado.



Figura 1: División del sistema tarifario de CFE México

Ambas regiones se diferencian por el periodo horario en las 24 horas del día durante el año, donde además se puede observar una variación según la temporada anual.

A continuación se dan los horarios para los diferentes periodos de base, intermedia y punta, donde el gráfico da un esquema que muestra la distribución de dichos periodos en el año.

### Región Baja California

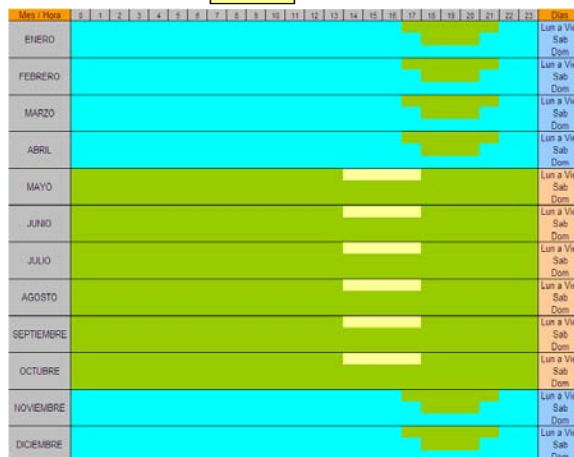
Del 1º de mayo al sábado anterior al último domingo de octubre

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes		0:00 - 14:00 18:00 - 24:00	14:00 - 18:00
sábado		0:00 - 24:00	
domingo y festivo		0:00 - 24:00	

Del último domingo de octubre al 30 de abril

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 17:00 22:00 - 24:00	17:00 - 22:00	
sábado	0:00 - 18:00 21:00 - 24:00	18:00 - 21:00	
domingo y festivo	0:00 - 24:00		

**B** BASE  
**I** INTERMEDIA  
**P** PUNTA



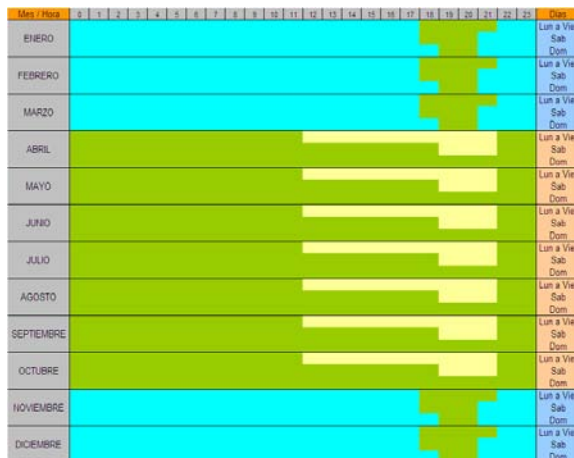
### Región Baja California Sur

Del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes		0:00 - 12:00 22:00 - 24:00	12:00 - 22:00
sábado		0:00 - 19:00 22:00 - 24:00	19:00 - 22:00
domingo y festivo		0:00 - 24:00	

Del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 18:00 22:00 - 24:00	18:00 - 22:00	
sábado	0:00 - 18:00 21:00 - 24:00	18:00 - 21:00	
domingo y festivo	0:00 - 19:00 21:00 - 24:00	19:00 - 21:00	



Sistema tarifario HM de CFE en B.C. y en B.C.S.

### CARGOS TARIFA H-M

Para esta tarifa H-M se aplican diferentes costos integrados dentro de la facturación:

- Consumo de Energía
- Demanda Facturable
- Bonificación ó recargo por Factor de Potencia
- 2% debido a medición de baja tensión
- IVA 10%

### **Cargo por Consumo de Energía**

Es el resultado de aplicar las cuotas mensuales por cada [kWh] de energía activa consumida dentro de un período de facturación. Dichas cuotas se publican mes a mes en el sitio web de la CFE para cada respectivo horario.

### **Cargo por Demanda Facturable**

Es el resultado de aplicar las cuotas mensuales de demanda publicadas por la CFE a la demanda facturable [kW] calculada mediante la siguiente fórmula:

$$DF = DP + FRI + \max(DI - DP, 0) + FRB * \max(DB - DPI, 0)$$

Donde:

DP es la demanda máxima medida en el periodo de punta

DI es la demanda máxima medida en el periodo intermedio

DB es la demanda máxima medida en el periodo de base

DPI es la demanda máxima medida en los periodos de punta e intermedio

FRI y FRB son factores de reducción que tendrán los siguientes valores, dependiendo de la región tarifaria:

Región	FRI	FRB
Baja California	0.141	0.070
Baja California Sur	0.195	0.097

### **Cargo/bonificación por medición de baja tensión (2%)**

La disposición de las tarifas eléctricas en vigor, establece que debido a pérdidas inherentes en el equipo de transformación, a la facturación se agregará un cargo o una bonificación de acuerdo al lugar en que se realicen las mediciones; ya sea en el lado primario o secundario de los transformadores.

### **Cargo/bonificación por Factor de Potencia (FP)**

El usuario deberá mantener un F.P. tan aproximado al 100% como le sea posible; cuando esté por debajo del 90%, la CFE tendrá derecho a cobrar el siguiente cargo:

$$\% Recargo = \frac{3}{5} * \left( \left( \frac{90}{F.P.} \right) - 1 \right) * 100$$

Cuando el F.P. tenga un valor igual o superior al 90%, la CFE bonificará lo siguiente:



$$\% \text{ Bonificación} = \frac{1}{4} * \left( 1 - \left( \frac{90}{F.P.} \right) \right) * 100$$

Es evidente que al hacer una evaluación seria del costo del agua desalada en México, no es válido estimar un valor constante del precio de la energía, ya que esta es función del tamaño de la desaladora (potencia instalada), el horario y meses en los que se consume la energía, región en que se instalará la desaladora y la aplicación del agua desalada. Existen casos especiales como el riego agrícola donde la energía consumida desde la extracción del agua de alimentación hasta el riego del agua producto es subvencionada a costos muy inferiores a los que pagaría un consumidor privado. Por lo tanto el estudio de las tarifas en proyectos de desalación tiene un alto impacto para el costo final del agua producto y merece un estudio detallado.

## ANEXO 2: Ecuaciones que gobiernan el software de desalación ROSA 6.1.

Las ecuaciones que gobiernan al software de desalación ROSA 6.1, se han obtenido del manual técnico del Filmtec, empresa especializada en la fabricación de membranas de ósmosis inversa, la cual ha creado el software ROSA 6.1.

Existen dos formas para poder simular una planta desaladora, la primera y más complicada es analizando a cada uno de los elementos en el tubo de presión, y la segunda, mas fácil, considerando a las membranas contenidas en el tubo de presión como un solo elemento.

Para este trabajo de tesis se ha simulado a la planta con el software ROSA 6.1, el cual analiza el comportamiento de cada una de las membranas, a continuación se muestran las ecuaciones que rigen al software ROSA 6.1.

Item	Equation	Equation Number
Permeate flow	$Q_i = A_i \bar{\pi}_i S_E (TCF) (FF) \left( P_{fi} - \frac{\Delta P_{rci}}{2} - P_{pi} - \bar{\pi} + \pi_{pi} \right)$	10
Average concentrate-side osmotic pressure	$\bar{\pi}_i = \pi_{fi} \left( \frac{C_{rci}}{C_{fi}} \right) (pf_i)$	11
Average permeate-side osmotic pressure	$\bar{\pi}_{pi} = \pi_{fi} (1 - R_i)$	12
Ratio: arithmetic average concentrate-side to feed concentration for Element <i>i</i>	$\frac{C_{rci}}{C_{fi}} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{C_{ci}}{C_{fi}} \right)$	13
Ratio: concentrate to feed concentration for Element <i>i</i>	$\frac{C_{ci}}{C_{fi}} = \frac{1 - Y_i (1 - R_i)}{(1 - Y_i)}$	14
Feed water osmotic pressure	$\pi_f = 1.12(273 + T) \sum m_j$	15
Temperature correction factor for RO and NF membrane	$TCF = \text{EXP} \left[ 2640 \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{273 + T} \right) \right]; T \geq 25^\circ\text{C}$ $TCF = \text{EXP} \left[ 3020 \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{273 + T} \right) \right]; T \leq 25^\circ\text{C}$	16a,b
Concentration polarization factor for FILMTEC 8-inch elements	$pf_i = \text{EXP} [0.7 Y_i]$	17
System recovery	$Y = 1 - [(1 - Y_1)(1 - Y_2) \dots (1 - Y_n)] = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Y_i)$	18
Permeate concentration	$C_{pj} = B(C_{rcj})(pf_i)(TCF) \frac{S_E}{Q_i}$	19

Tabla 1: Ecuaciones de diseño para un sistema de desalación por O.I. analizando elemento por elemento

Item	Equation	Equation Number
Total permeate flow	$Q = N_E S_E \bar{A} \bar{\pi} (\text{TCF})(\text{FF}) P_f - \frac{\Delta P_{fc}}{2} P_p - \pi_f \left[ \frac{\bar{C}_{fc}}{C_f} P_f - (1 - \bar{R}) \right]$	20
Ratio: average concentrate-side to feed concentration for system	$\frac{C_{fc}}{C_f} = \frac{-\bar{R} \ln(1 - Y/Y_L)}{Y - (1 - Y_L) \ln(1 - Y/Y_L)} + (1 - \bar{R})$	21
Limiting system recovery	$Y_L = 1 - \frac{\pi_f (\bar{p}f)(\bar{R})}{P_f - \Delta P_{fc} - P_p}$	22
Approximate log-mean concentrate-side to feed concentration ratio for system	$\frac{C_{fc}}{C_f} \Big _{Y_L, \bar{R}-1} = -\frac{\ln(1 - Y)}{Y}$	23
Average element recovery	$Y_i = 1 - (1 - Y)^{1/n}$	24
Average polarization factor	$\bar{p}f = \text{EXP}[0.7 \bar{Y}_i]$	25
Average concentrate-side osmotic pressure for system	$\bar{\pi} = \pi_i \left( \frac{\bar{C}_{fc}}{C_f} \right) \bar{p}f$	26
Average concentrate-side system pressure drop for FILMTEC 8-inch elements; 2 stages	$\bar{\Delta P}_{fc} = 0.04 \bar{q}_{fc}^2$ $\Delta P_{fc} = \left[ \frac{0.1(Q/1440)}{Y N_{V2}} \right] \left( \frac{1}{N_{VR}} + 1 - Y \right)$	27a,b,c
Individual FILMTEC 8-inch element, or single-stage concentrate-side pressure drop	$\Delta P_{fc} = 0.01 n \bar{q}_{fc}^{1.7}$	
FILMTEC membrane permeability as a function of average concentrate-side osmotic pressure	$\bar{A}(\bar{\pi}) = 0.125; \bar{\pi} \leq 25$ $\bar{A}(\bar{\pi}) = 0.125 - 0.011 \left( \frac{\bar{\pi} - 25}{35} \right); 25 \leq \bar{\pi} \leq 200$ $\bar{A}(\bar{\pi}) = 0.070 - 0.0001(\bar{\pi} - 200); 200 \leq \bar{\pi} \leq 400$	28a,b,c
Permeate concentration	$C_p = B C_{fc} \bar{p}f (\text{TCF}) \left( \frac{N_E S_E}{Q} \right)$	29

Tabla 2: Ecuaciones de diseño para un sistema de desalación por O.I. analizándolo como un solo elemento

### ANEXO 3: Ecuaciones que gobiernan las pérdidas en tuberías.

Cuando se desea trasladar un fluido de un lugar a otro por medio de tuberías. En general se presenta el problema de qué potencia se debe suministrar para que el fluido pueda moverse hasta el sitio deseado. Este parámetro dependerá principalmente de la geometría de la tubería, su longitud, las propiedades del fluido y las condiciones que se desean a la salida de la tubería.

Para comprender las pérdidas en tuberías, es necesario comprender antes los parámetros de los que dependen estas.

La ecuación de la potencia necesaria para que el fluido llegue hasta cierto punto es:

$$W = \frac{\rho g Q h_T}{\eta_s}$$

Como se puede observar, la potencia necesaria considera las pérdidas totales en la tubería ( $h_T$ ), el flujo o caudal a transportar ( $Q$ ), una eficiencia del sistema ( $\eta_s$ ), así como la densidad del fluido ( $\rho$ ). Las pérdidas en tuberías se determinan de la siguiente manera:

$$h_T = h_e + h_f$$

Como se puede observar, la pérdida total es la suma de la carga estática ( $h_e$ ) y las pérdidas por fricción ( $h_f$ ).

La carga estática es la altura que debe vencer el flujo para moverse. Mientras que las pérdidas por fricción se deben (como su nombre lo indica) a la fricción del fluido con las paredes de la tubería.

$$h_f = \frac{8fLQ^2}{g\pi^2 D^5} \quad (1)$$

Como se puede observar, las pérdidas por fricción dependen del diámetro de la tubería ( $D$ ), de la longitud de la tubería ( $L$ ), del caudal ( $Q$ ) y de un factor "f" o factor de fricción.

La forma de obtener las pérdidas por fricción puede variar dependiendo de los parámetros necesarios, por ejemplo:

$$h_f = \frac{fLV^2}{2gD} \quad (2)$$

En este caso, las pérdidas de fricción dependen de la longitud de la tubería ( $L$ ), la velocidad del fluido ( $V$ ), del diámetro de la tubería ( $D$ ) y de un factor de fricción "f".

Las dos ecuaciones para obtener las pérdidas por fricción son equivalentes:

Conociendo que:  $Q = VA$ ;  $A = \frac{\pi D^2}{4}$

Sustituyendo en la primer ecuación (1)

$$h_f = \frac{8fLQ^2}{g\pi^2 D^5} = \frac{8fL \left( \frac{V^2 \pi^2 D^2}{16} \right)}{g\pi^2 D^5} \Rightarrow \frac{fLV^2 \pi^2 D^4}{2g\pi^2 D^5} = \frac{fLV^2}{2gD}$$

Por lo tanto:

$$h_f = \frac{fLV^2}{2gD} = \frac{8fLQ^2}{g\pi^2 D^5}$$

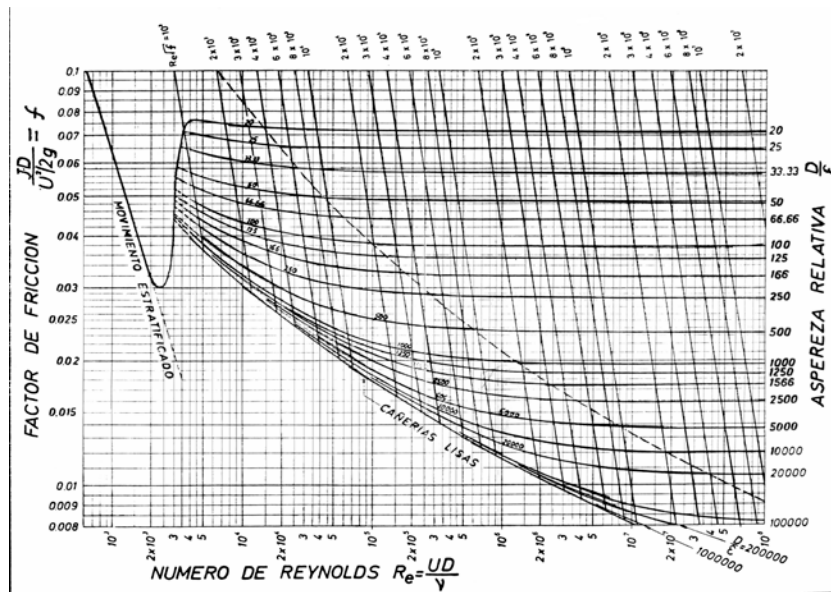
El factor de fricción se puede obtener de manera analítica o utilizando el diagrama de Moody.

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left\{ \frac{1}{3.7065 D} \frac{\epsilon}{D} \right\} - \frac{5.0452}{Re} \log \left( \frac{1}{2.8257} \left( \frac{\epsilon}{D} \right)^{1.1098} + \frac{5.8506}{Re^{0.8981}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{8\tau_w}{\rho V^2}$$

$$f = \begin{cases} 0.316 Re^{-\frac{1}{4}} & 4000 < Re < 10^5 \\ \left( 1.8 \log \frac{Re}{6.9} \right)^{-2} & \end{cases}$$

Existen distintas formas de calcular analíticamente el factor de fricción, estas formulas no arrojan resultados exactos, solo arrojan aproximaciones del factor de fricción, por lo que se deben realizar operaciones iterativas para poder obtener un resultado con un margen de error pequeño.



Gráfica 1: Diagrama de Moody

Como se puede observar tanto en la ecuación como en el diagrama de Moody, el factor de fricción depende del número de Reynolds (Re) y de la rugosidad o aspereza relativa. A su vez, la rugosidad

relativa depende de la rugosidad de la tubería  $\epsilon$  (la cual varía dependiendo del material y de su manufacturación) y del diámetro de la tubería (D).

El número de Reynolds se define como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas del fluido. Proporciona una indicación de la pérdida de energía causada por los efectos viscosos.

A partir del número de Reynolds podemos conocer las características principales del fluido, así como el régimen de flujo (laminar o turbulento).

Un flujo laminar se caracteriza por velocidades muy bajas, el comportamiento de este flujo, como su nombre lo dice asemeja "laminas" de fluido las cuales no interactúan entre sí. Las aplicaciones de flujos laminares son muy limitadas debido a las bajas velocidades necesarias para que se presente este régimen de flujo.

El flujo turbulento se caracteriza por no tener un comportamiento tan predecible, se presenta a velocidades medias altas y (por el contrario del flujo laminar) se presenta una mezcla transversal del fluido.



$0 < Re < 1$	Flujo laminar altamente viscoso
$1 < Re < 100$	Flujo laminar, alta dependencia al número de Reynolds
$100 < Re < 1000$	Flujo laminar
$1000 < Re < 10^4$	Transición a turbulencia
$10^4 < Re < 10^6$	Flujo turbulento, moderada dependencia al número de Reynolds
$10^6 < Re < \infty$	Flujo turbulento, baja dependencia al número de Reynolds

El número de Reynolds se calcula de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

Donde:  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

El número de Reynolds depende de la viscosidad ( $\mu$ ), de la densidad ( $\rho$ ) y de la velocidad del fluido (V), así como de una longitud que, para el caso de tuberías será igual al diámetro de la tubería (D). Al igual que las pérdidas por fricción, la forma de obtener el número de Reynolds puede variar dependiendo de los parámetros que se conozcan, se obtendrá una ecuación con distintos

parámetros, pero que en realidad, desarrollando cada uno de estos se llegara a la definición del número de Reynolds.

Como por ejemplo otra forma de obtener el número de Reynolds, conociendo el caudal (Q), la viscosidad cinemática ( $\nu$ ) (viscosidad entre densidad y el diámetro de tubería (D) es:

$$Re = \frac{4Q}{\pi D \nu}$$

Comprobando la ecuación anterior a partir de:

Conociendo que:  $Q = V * A$  donde V es la velocidad y que A es el área transversal

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Sustituyendo

$$Re = \frac{4 \left( \frac{\pi D^2}{4} V \right)}{\pi D \nu} = \frac{DV}{\nu}$$

Por lo tanto:

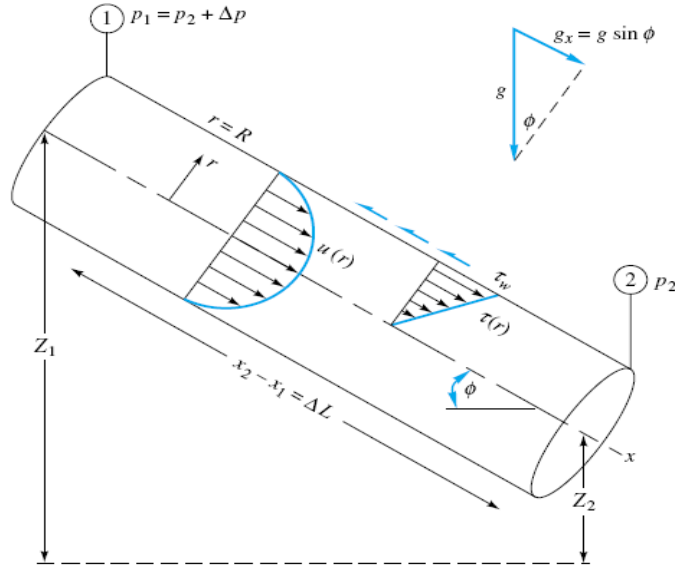
$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{4Q}{\pi D \nu}$$

En general, el número de Reynolds es un valor que caracteriza al fluido y facilita los cálculos de fluidos al generalizarlos utilizando una sola variable.

En conclusión, para poder realizar el cálculo de la potencia necesaria para un sistema de tuberías es necesario conocer parámetros como la rugosidad de la tubería, si existe una diferencia de altura dentro del largo de la tubería, características físicas del fluido que se va a transportar (densidad, viscosidad, etc.) y también es importante determinar valores como las condiciones a las que se desea el flujo de salida, la longitud y el diámetro de la tubería.

#### DEMOSTRACION DE LA ECUACION DE PERDIDAS POR FRICCIÓN

Se considera una tubería inclinada; En donde, como se observa, el fluido se mueve solo por la acción de la gravedad como la de a continuación:



La ecuación de continuidad (conservación de masa) se reduce a:

$$Q_1 = Q_2 \quad V_1 = \frac{Q_1}{A_1} = V_2 = \frac{Q_2}{A_2}$$

La ecuación de conservación de movimiento es:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} \alpha_1 V_1^2 + g z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} \alpha_2 V_2^2 + g z_2 + g h_f$$

Asumiendo que no existe transferencia de calor, ni trabajo sobre la tubería; podemos inferir que  $V_1=V_2$ , por lo que la ecuación anterior se reduce a:

$$h_f = \left( z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left( z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right) = \Delta \left( z + \frac{p}{\rho g} \right) = \Delta z + \frac{\Delta p}{\rho g}$$

Obteniendo del diagrama relación de momentos se obtiene:

$$\Delta p \pi R^2 + \rho g (\pi R^2) \Delta L \sin \phi - \tau_w (2\pi R) \Delta L = \dot{m} (V_2 - V_1) = 0$$

Obteniendo la ecuación que relaciona  $h_f$  con el esfuerzo cortante sobre la pared ( $\tau_w$ = esfuerzo cortante sobre la pared)

$$\Delta L \sin \phi + \frac{\Delta p}{\rho g} = h_f = \frac{2\tau_w \Delta L}{\rho g R} \quad (a)$$

Donde  $\Delta L \sin \phi$  es igual a  $\Delta z$  (a partir del diagrama)

Suponiendo la siguiente ecuación, debido a que no conocemos si tenemos flujo laminar o turbulento:



$$f = F\left(Re, \frac{\varepsilon}{D}\right) = \frac{8\tau_w}{\rho V^2}$$

Sustituyendo esta última ecuación en la ecuación en (a):

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

Ecuación de pérdidas por fricción o ecuación de Darcy

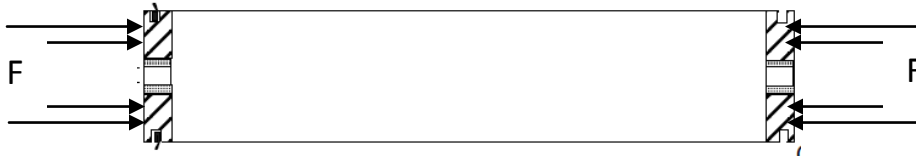
#### ANEXO 4: Esfuerzos presentes en una membrana de OI

Una membrana de ósmosis inversa está compuesta por varios elementos, tales como la membrana en sí, de una carcasa de fibra de vidrio, tubo de permeado, o-ring (sello de salmuera) y de sellos externos.

Una membrana se somete a una serie de esfuerzos debidos a su operación, tales como esfuerzos normales y esfuerzos cortantes principalmente.

La membrana sufrirá esfuerzos normales que pueden ocasionar los siguientes efectos en la operación de la membrana:

- Compactación de la membrana, que se puede deber principalmente a un exceso de presión aplicada, lo que ocasionaría que la membrana se deformara elásticamente, si la deformación no es suficiente como para superar el rango elástico de la membrana, al momento de dejar de aplicar presión la membrana regresaría a su estado inicial. Pero si se supera este rango de elasticidad, llegaremos a un punto, conocido como esfuerzo de cedencia, en el que la membrana comenzara a tener una deformación plástica, la cual, aun cuando se deje de aplicar presión, ocasionara que la membrana no regrese a su estado inicial.



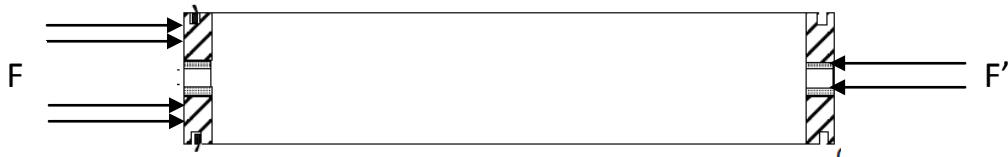
Para determinar el esfuerzo de cedencia de la membrana, sería necesario realizar pruebas de compactación en laboratorio, en las cuales además se determinaría el coeficiente de elasticidad de la membrana. Con dichos resultados sería posible calcular la presión máxima que permitiría.

Se debe señalar que la membrana esta compuesta por tres capas, de las cuales cada una tendrá un módulo de elasticidad, además una de estas capas es un material compuesto de tres hojas, una de poliéster, una segunda capa de polisulfona y una tercera capa de poliamida. El hecho de tener una combinación de capas y hojas en la membrana ocasionaría un sistema de ecuaciones bastante complejo, lo que podríamos hacer es determinar el límite de cedencia de cada una de estas capas y determinar el menor de estos esfuerzos, lo que nos determinaría el valor máximo de presión permisible por la membrana sin que sufra algún daño. Cabe mencionar que esta forma de cálculo sería bastante básico pero que nos puede acercar un poco a la realidad.

En el caso de los esfuerzos cortantes, la membrana puede sufrir los siguientes efectos:

- Puede sufrir un desprendimiento de los sellos externos debidos al desprendimiento de la junta de estos sellos con la carcasa de la membrana.
- Además de sufrir una compactación debida al exceso de presión sobre la membrana, puede ocurrir también el caso en que la membrana se desprenda del tubo de permeado,

lo que ocasionaría que ambos caudales, salmuera y permeado se mezclaran. Este desprendimiento se ocasionará cuando se exceda el esfuerzo límite de la junta de estos dos elementos.



Como en el caso en que la membrana se somete a esfuerzos normales, también sería necesario realizar pruebas en laboratorio para determinar el esfuerzo cortante que permite la membrana con el tubo de permeado sin que exista desprendimiento de estos elementos, también para el caso en que el sello exterior posterior sufra algún desprendimiento con la carcasa de la membrana.

**ANEXO 5: Fotografías de visitas de campo.**



**Figura 2: Planta Termoeléctrica Punta Prieta - Pichilingue**



Figura 3: Medición de temperatura y salinidad en la obra de toma de la planta termoeléctrica



Figura 4: Medición de temperatura y salinidad en la obra de descarga de planta termoeléctrica



Figura 5: Planta desaladora "Los Cabos B.C.S." del grupo INIMA



Figura 6: Operador de planta desaladora INIMA Los Cabos



Figura 7: Sistema de arranque de planta desaladora de Veolia Waters, en Los Cabos B.C.S.

## Bibliografía

1. **Juan, José Antonio Medina San.** Desalación de aguas salobres y de mar Osmosis Inversa. s.l. : Ediciones Mundi-Prensa, 2000.
2. **Wilf, Mark.** *The guidebook to membrane desalination technology Reverse Osmosis, Nanofiltration and Hybrid Systems, Process, Design, Applications and Economics.* s.l. : Balaban Desalination Publications, 2007.
3. **Luis Gómez Palacín, Fernando Tadeo Rico, César de Prada Moraga.** Ecosimpro. [En línea] [http://www.ecosimpro.com/download/articles/CEA\\_2008\\_29JA\\_paper269si\\_es.pdf](http://www.ecosimpro.com/download/articles/CEA_2008_29JA_paper269si_es.pdf).
4. *SoCal SWRO Study Presented. Report, Water Dsalination.* 19, s.l. : Global Water Intelligence, 2009, Vol. 45.
5. **Henthorne, Lisa.** *Desalting Handbook for Planners, Desalination and Water Purification Research and Development Program.* 2003.
6. **Bert, Gerardo Hiriart Le.** *Estudio de la obra de toma y de descarga para el enfriamiento de la P.T. Punta Prieta. II.* 1976.
7. **Bahena, Dr. Fernando Aguirre.** *Cambios temporales en los componentes y los flujos de la materia de hundimiento en la cuenca Alfonso, Bahía de La Paz, durante el periodo 2002 - 2005.*
8. **White, Frank.** Fluid Mechanics; McGraw-Hill; 4ª edición.
9. **Yunus, A Cengel.** Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones; Mc Graw Hill 2006