



PX Q400: Dispositivo de recuperación de energía de alta eficiencia

TABLA DE CONTENIDO

Sección 1: Introducción	2
Sección 2: Descripción general.....	2
2.1 Proceso de ósmosis inversa de agua de mar	2
2.2 Rendimiento del PX.....	3
2.2A Eficiencia.....	3
2.2B Mezclando	4
Sección 3: Métodos de prueba	4
Sección 4: Resultados de la prueba de rendimiento de PX	6
4.1 Eficiencia.....	6
4.2 Mezcla volumétrica	7
Sección 5: Beneficios económicos de las mejoras de PX.....	8
5.1 Mezclando	10
5.2 Eficiencia.....	10
5.3 Comparación con la SEC	10
5.4 Beneficios adicionales.....	10
5.5 Beneficios económicos durante la vida útil de la planta, 25 años	11
Sección 6: Conclusión	11

SECCIÓN 1: INTRODUCCIÓN

Energy Recovery es líder en tecnología de ahorro energético en la industria de la desalinización por ósmosis inversa de agua de mar (SWRO). Su tecnología estrella es el Intercambiador de Presión PX®, un dispositivo isobárico de recuperación de energía (ERD) que reduce el consumo energético hasta en un 60 % en aplicaciones de desalinización. Los productos y servicios de Energy Recovery gozan de reconocimiento en la industria como soluciones fiables, confiables, de alto rendimiento y de ahorro energético, como lo demuestran los siguientes resultados:

- Se han instalado más de 35 000 ERD PX en plantas de desalinización por ósmosis inversa de agua de mar en todo el mundo, produciendo un total estimado de 36 millones de metros cúbicos de agua dulce al día;
- Los propietarios de las plantas ahorran anualmente más de 6 000 millones de dólares en costes energéticos; y
- Las emisiones totales de CO₂ de las plantas de desalinización se reducen en más de 19 millones de toneladas al año.

En la última década, el PX Q300 se ha convertido en el ERD de referencia en plantas de desalinización por ósmosis inversa de agua de mar. Gracias a su diseño innovador y simple, combinado con una fabricación de alta calidad y precisión, el PX Q300 demuestra un rendimiento consistente, lo que lo hace extremadamente confiable y duradero, con un bajo mantenimiento y, por lo tanto, ofrece un tiempo de actividad máximo. Con estas excepcionales ventajas y una vida útil de hasta 30 años, el PX Q300 ofrece un bajo costo de propiedad para el usuario final y el propietario de la planta.

A raíz de su éxito, Energy Recovery lanzó su nuevo producto estrella, el PX Q400, a finales de 2022. El PX Q400 ofrece un 33 % más de capacidad unitaria y un rendimiento mejorado en comparación con el PX Q300, lo que proporciona aún más ahorros a los clientes de Energy Recovery.

Este documento describe cómo se aplican los ERD en los procesos de ósmosis inversa de agua de mar (SWRO). Se documentan las métricas clave utilizadas para cuantificar y evaluar el rendimiento de los dispositivos de recuperación de energía en aplicaciones de desalinización. Utilizando estas métricas, se compara el rendimiento del PX Q300 y el Q400, demostrando los beneficios económicos para la industria.

SECCIÓN 2: DESCRIPCIÓN GENERAL

2.1 Proceso de ósmosis inversa de agua de mar

En la desalinización por ósmosis inversa de agua de mar, el agua de mar se presuriza y se aplica a una membrana semipermeable. Esta membrana actúa como un filtro de sal, permitiendo el paso de agua dulce o permeado, mientras que el agua salada concentrada o salmuera es rechazada. Normalmente, solo se extrae entre el 40 % y el 50 % del contenido de agua dulce del agua de mar. El rechazo de salmuera resultante sale de las membranas a alta presión.

El dispositivo PX ERD captura la energía residual del rechazo de salmuera y la recicla en el proceso de ósmosis inversa con una eficiencia de hasta el 98 %. Esto se logra transfiriendo la energía hidráulica del rechazo a la corriente de agua de alimentación a baja presión, poniéndolas en contacto directo y momentáneo en los conductos

de un rotor que gira dentro del dispositivo PX. El rotor está alojado en una camisa cerámica y encerrado entre dos tapas cerámicas con holgura precisa, que, al llenarse con agua a alta presión, crean un cojinete hidrodinámico prácticamente sin fricción. El rotor es la única pieza móvil del dispositivo; no hay motores, válvulas ni instrumentos que requieran mantenimiento.

La Figura 1 ilustra un esquema de flujo típico para un sistema de ósmosis inversa de agua de mar (SWRO) equipado con un dispositivo PX. La corriente de salmuera rechazada de las membranas de ósmosis inversa pasa a través del dispositivo PX o de un conjunto de dispositivos PX que operan en paralelo. La presión de la corriente de concentrado se transfiere directamente al agua de alimentación con una eficiencia de hasta el 98 %. La corriente de agua de alimentación presurizada pasa por una bomba de circulación y se fusiona con el flujo de la bomba de alta presión para alimentar las membranas. Al reducir el rendimiento de la bomba de alta presión hasta en un 60 % en comparación con la operación sin recuperación de energía, la tecnología PX reduce drásticamente el consumo de energía del proceso de desalinización. Además, permite que la bomba de alta presión sea operada y controlada independientemente del dispositivo o dispositivos PX, lo que proporciona a los operadores de plantas de desalinización flexibilidad para adaptarse a las condiciones cambiantes y optimizar el rendimiento de la planta.

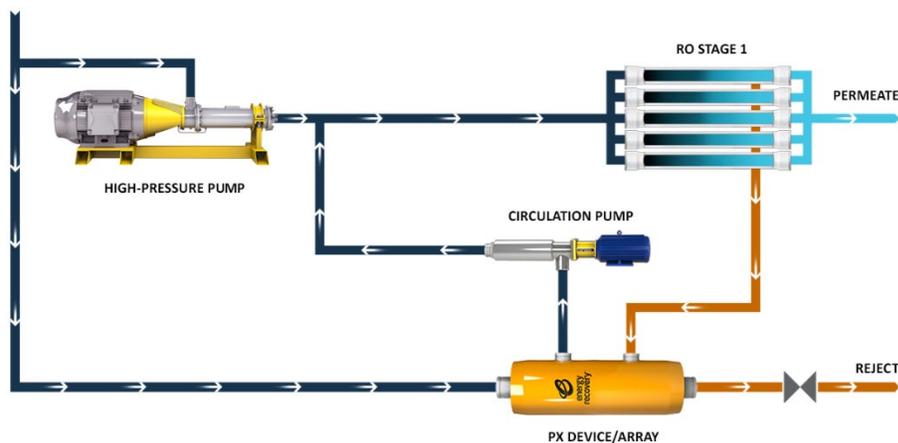


Figura 1: Diagrama de flujo del proceso SWRO con PX ERD

2.2 Rendimiento del PX

2.2A Eficiencia

La eficiencia del ERD mide la eficacia con la que este recupera la energía disponible (o desperdiciada) en un sistema de ósmosis inversa. Por lo tanto, si la eficiencia del ERD se estima en un 50 %, significa que solo puede reciclar el 50 % de la energía disponible, mientras que el 50 % restante se pierde.

La eficiencia del ERD se calcula con la siguiente ecuación:

$$Eficiencia = \frac{\sum(Presión \times Caudal)_{SALIDA}}{\sum(Presión \times Caudal)_{ENTRADA}} \times 100 \% \quad (1)$$

El PX es conocido por su alta eficiencia, que supera el 98%. Las pérdidas de eficiencia relativamente bajas en el PX se atribuyen a: 1) la reducción del caudal debido a la compresión del agua, 2) la reducción de la presión debido a la

fricción viscosa del fluido, y 3) la pérdida de volumen debido a la lubricación del cojinete hidrodinámico. Estos cambios reducen los términos en el numerador y aumentan los términos en el denominador de la Ecuación 1.

La alta eficiencia del PX se debe a la transferencia de energía mediante el contacto directo de las dos corrientes: agua de alimentación a baja presión y rechazo de concentrado a alta presión. Su eficiencia es prácticamente constante en su rango de operación de caudal y presión. Otros ERD, como los turbochargers y las turbinas Pelton, tienen eficiencias que varían con el caudal y la presión, alcanzando un máximo cercano al 80%. En estos dispositivos, la energía de la presión hidráulica se convierte en energía mecánica de un eje giratorio y luego se transfiere de nuevo a energía hidráulica, perdiendo entre un 10% y un 30% en cada conversión.

2.2B Mezcla

Cuando las corrientes de salmuera y agua de mar entran en contacto dentro de un ERD, se produce una ligera mezcla. En un dispositivo PX, el contacto entre los fluidos es directo, sin barreras ni pistones intermedios. Como resultado, la corriente de agua de mar a alta presión producida por el dispositivo presenta una salinidad ligeramente mayor en comparación con la fuente de agua de mar.

El volumen de salmuera que se mezcla con el agua de mar, denominado mezcla volumétrica, es una característica de rendimiento de los ERD. Se define mediante la siguiente ecuación, donde TDS son los sólidos disueltos totales, una medida de la salinidad, y HP y LP se refieren a las corrientes de alta y baja presión que entran y salen del ERD.

$$\text{Mezcla volumétrica} = \frac{(HP_{inTDS} - HP_{outTDS})}{(HP_{inTDS} - LP_{inTDS})} \times 100 \quad (2)$$

La mezcla en el ERD se diluye cuando la corriente de agua de mar presurizada del dispositivo se une con la descarga de la bomba de alta presión. El porcentaje de aumento de salinidad en la corriente de alimentación de la membrana se define como sigue:

$$\text{Aumento de la salinidad} = \frac{(\text{salinidad de la alimentación de membrana} - \text{salinidad del agua de alimentación del sistema})}{\text{salinidad del agua de alimentación del sistema}} \times 100 \quad (3)$$

SECCIÓN 3: MÉTODOS DE PRUEBA

Para evaluar la eficiencia de un ERD, no es necesario instalarlo ni operarlo en un sistema de ósmosis inversa. Las vías de flujo de entrada y salida del ERD en un sistema de ósmosis inversa pueden replicarse sin membranas mediante bombas configuradas, como se ilustra en la Figura 2.

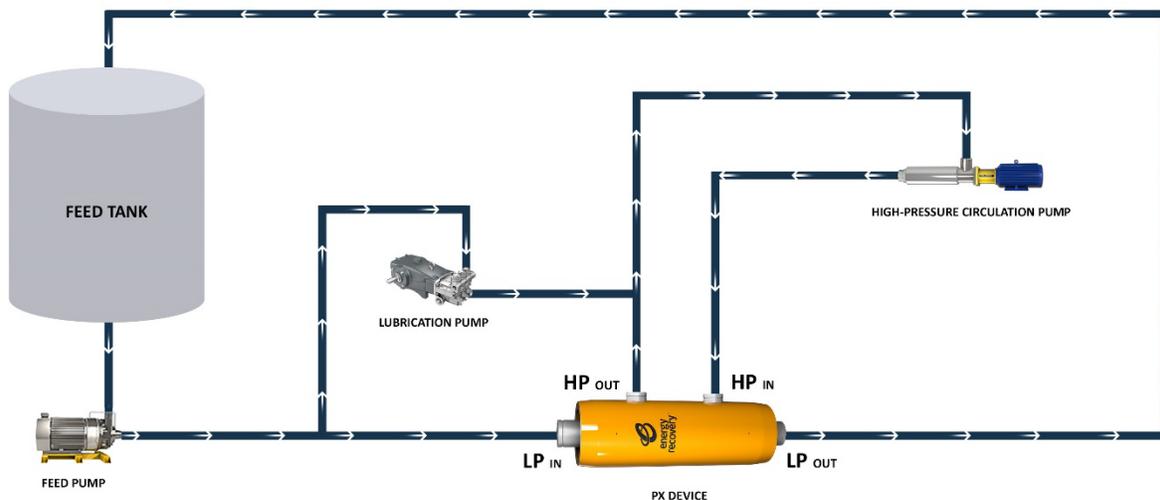


Figura 2: Diagrama de flujo del proceso de configuración de la prueba de eficiencia del ERD

Se requieren tres bombas para la configuración de prueba:

1. La bomba de alimentación suministra agua a la entrada de baja presión de la misma manera que en un proceso típico de ósmosis inversa.
2. La bomba de circulación de alta presión impulsa el agua a través de las regiones de alta presión del ERD en un circuito cerrado hasta su propia succión. En un sistema de ósmosis inversa, las membranas estarían ubicadas aguas abajo de la bomba de circulación.
3. La bomba de lubricación mantiene la presión en el circuito cerrado de alta presión reponiendo el fluido lubricante que ha pasado por el ERD al lado de baja presión.

Además, se puede utilizar una bomba de retorno opcional para devolver el agua desde la salida de baja presión al tanque de alimentación. Los sensores de presión y los caudalímetros en las cuatro corrientes de entrada y salida, así como un caudalímetro en la entrada de la bomba de lubricación, proporcionan datos suficientes para calcular la eficiencia del ERD mediante la Ecuación 1. Las pruebas de campo han demostrado una excelente correlación entre la eficiencia medida en los sistemas de ósmosis inversa (RO) y la eficiencia medida en la configuración de prueba.

Para evaluar el rendimiento de la mezcla, se modificó la configuración de prueba para que exista una diferencia de salinidad entre LPin y HPin. Los principales cambios en la configuración, que se muestran en la Figura 3, son: 1) la adición de un tanque de salmuera que alimenta el circuito de alta presión a través de la bomba de lubricación y 2) la desviación de la corriente de LPout hacia el drenaje en lugar de recircularla de vuelta al tanque de alimentación.

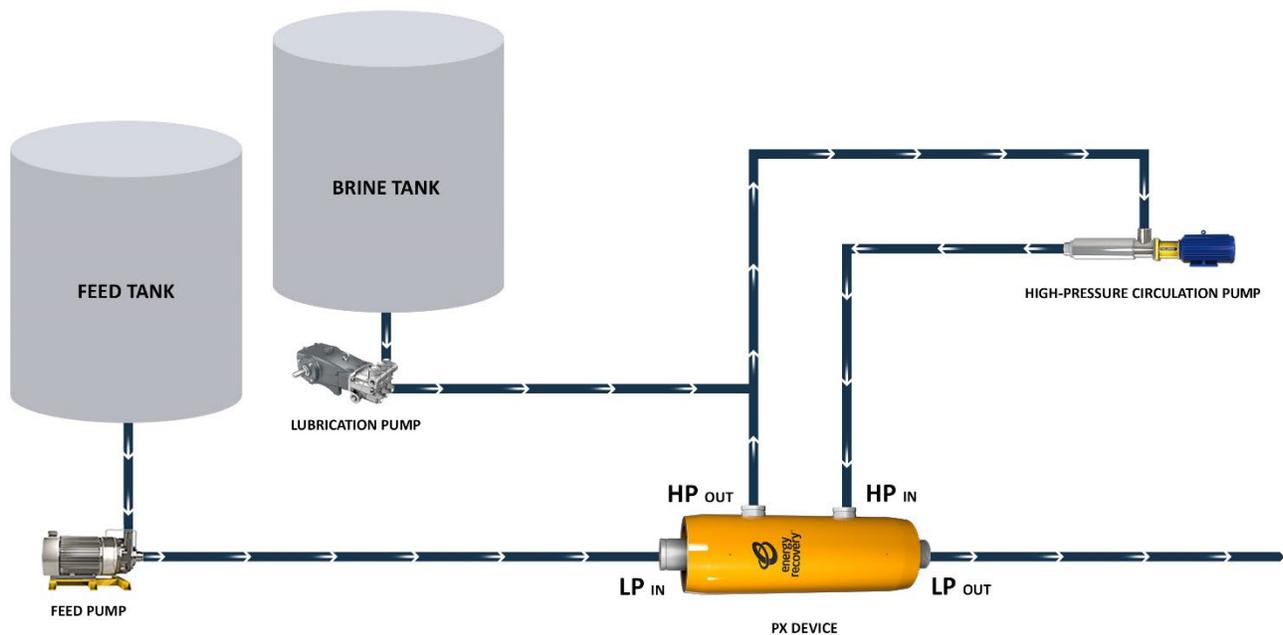


Figura 3: Diagrama de flujo del proceso de configuración de la prueba de mezcla PX

Las salinidades en los cuatro puertos del PX se miden y se introducen en la Ecuación 2 para calcular el porcentaje de mezcla volumétrica. Las pruebas de campo han demostrado una excelente correlación entre la mezcla medida en los sistemas de ósmosis inversa (OI) y la mezcla medida en la configuración de prueba.

SECCIÓN 4: RESULTADOS DE LA PRUEBA DE RENDIMIENTO DE PX

Los dispositivos PX Q300 y Q400 se prueban internamente utilizando los métodos descritos en la Sección 3. Los resultados de eficiencia y mezcla se presentan y analizan a continuación.

4.1 Eficiencia

La Figura 4 muestra la eficiencia promedio de un PX Q400 y un PX Q300 en función del caudal en su rango de operación normal. También se añadió la curva de eficiencia del turbo para compararla con el PX y demostrar la estabilidad relativa y el alto nivel de eficiencia del PX. La eficiencia se determina con los caudales y presiones medidos como se describió anteriormente y calculados con la Ecuación 1.

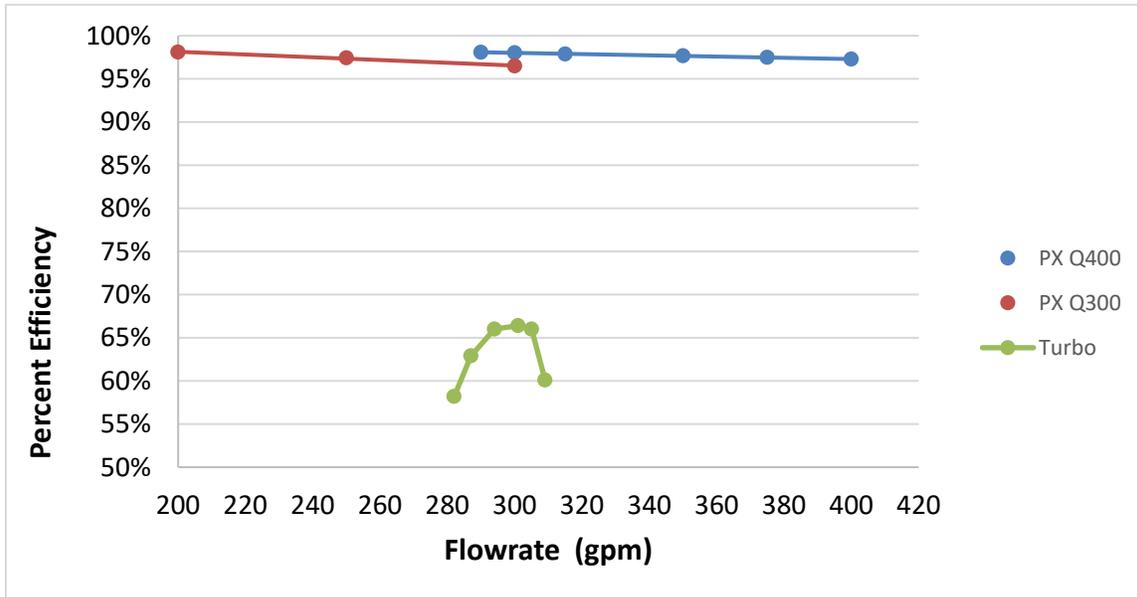


Figura 4: Eficiencia de PX

Aunque ambos PX alcanzan una eficiencia máxima del 98,1 % con su caudal mínimo, el PX Q400 presenta una curva de eficiencia más plana que el PX Q300. Como resultado, el PX Q400 alcanza una eficiencia mínima del 97,3 %, un 0,8 % superior a la del PX Q300, que alcanza el 96,5 % con sus respectivos caudales máximos. Dado que las plantas de desalinización suelen operar sus PX cerca de los caudales nominales máximos para maximizar su utilización y reducir la inversión inicial, esta mayor eficiencia reduce el consumo energético de un sistema equipado con PX Q400.

4.2 Mezcla volumétrica

La Figura 5 muestra la mezcla volumétrica promedio en un PX Q400 y un PX Q300 en función de la relación entre los caudales de alta y baja presión que atraviesan el dispositivo. La mezcla volumétrica se determina a partir de las salinidades medidas, como se describió anteriormente, y se calcula con la Ecuación 2.

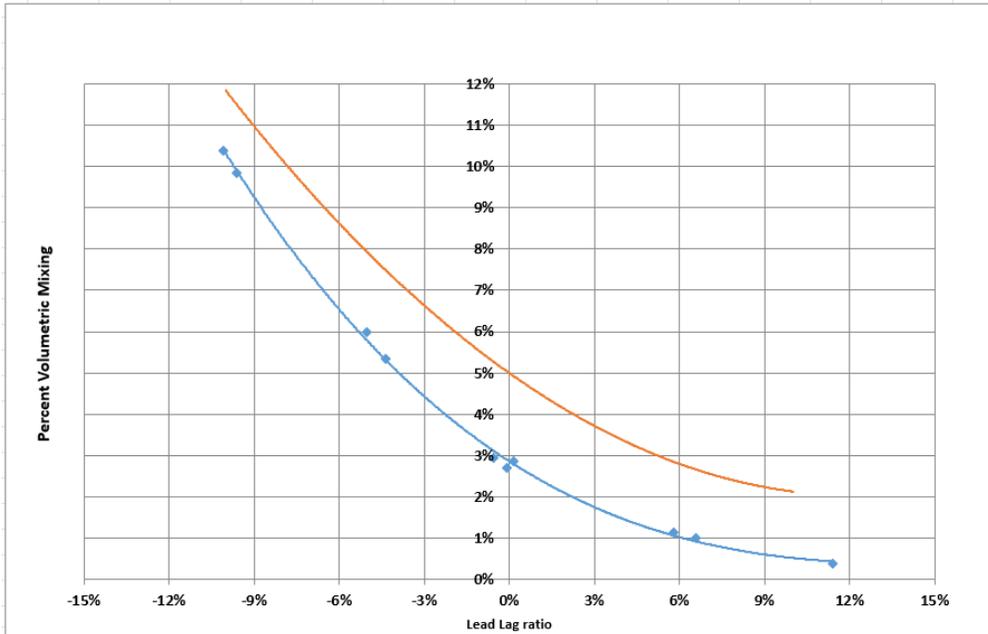


Figura 5: Mezcla volumétrica PX

Cuando el caudal de baja presión supera al de alta presión (desequilibrio positivo), el exceso de agua de mar de baja salinidad empuja la interfaz salmuera-agua de mar hacia la salida de salmuera de baja presión, lo que reduce la salinidad medida en la salida de agua de mar de alta presión. Por el contrario, cuando el caudal de alta presión supera al de baja presión (desequilibrio negativo), la interfaz salmuera-agua de mar es empujada hacia la salida de alta presión, lo que aumenta la salinidad medida en dicha salida. La relación de flujo afecta tanto al PX Q300 como al Q400 de manera similar, como lo demuestra la forma casi paralela de las curvas en la Figura 5.

La Figura 5 muestra que la mezcla volumétrica en el PX Q400 es inferior al 3 % con flujo equilibrado (0% desequilibrio), mientras que en el PX Q300, la mezcla volumétrica es de aproximadamente el 5 %, una reducción cercana al 2 %. Esta menor mezcla volumétrica reduce la salinidad de la alimentación de la membrana, lo que reduce la presión de alimentación de la membrana y el consumo de energía de la bomba de alta presión. Estos beneficios energéticos y económicos se cuantifican más adelante en este documento.

Los resultados promedio de las pruebas de eficiencia y mezcla volumétrica se incorporan a las hojas de datos de los productos y a los modelos de cálculo del rendimiento, incluyendo el software de selección de productos y proyección del rendimiento de Energy Recovery, denominado [Power Model Pro](#).

SECTION 5: BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LAS MEJORAS DE PX

En esta sección, comparamos el rendimiento del PX Q300 y el PX Q400 en una planta típica de ósmosis inversa de agua de mar (SWRO) de gran tamaño con un caudal de 250 millones de litros por día (MLD, 95 millones de galones por día [MGD]). El rendimiento de la desalinización se calculó mediante modelos de proyección de membrana, específicamente la plataforma de software Q+ de LG Water Solution. Estos modelos estiman la presión de la

membrana y la calidad del permeado en puntos de operación específicos de caudal, presión y salinidad. Estas estimaciones del rendimiento de la membrana se introducen posteriormente en el modelo PMP de Energy Recovery para estimar el rendimiento del PX y el consumo energético de la planta. El consumo energético se cuantifica como consumo energético específico (SEC), que es la suma de la energía consumida por las bombas de alta presión dividida entre el caudal de permeado. El SEC se utiliza ampliamente en la industria de la desalinización como medida del rendimiento de la planta y resulta útil para comparar diferentes opciones de membranas, bombas y ERD.

La figura 6 presenta las entradas del modelo PMP para el PX Q300 y el PX Q400 bajo los siguientes supuestos:

- Capacidad de 25.000 metros cúbicos por día (CMD) por tren, 10 trenes, capacidad total de la planta: 250 MLD
- Recuperación del 42 %
- 42.000 miligramos por litro (mg/l) de TDS en agua de alimentación a 28 °C
- 21 PX Q300 por tren o 16 PX Q400 por tren

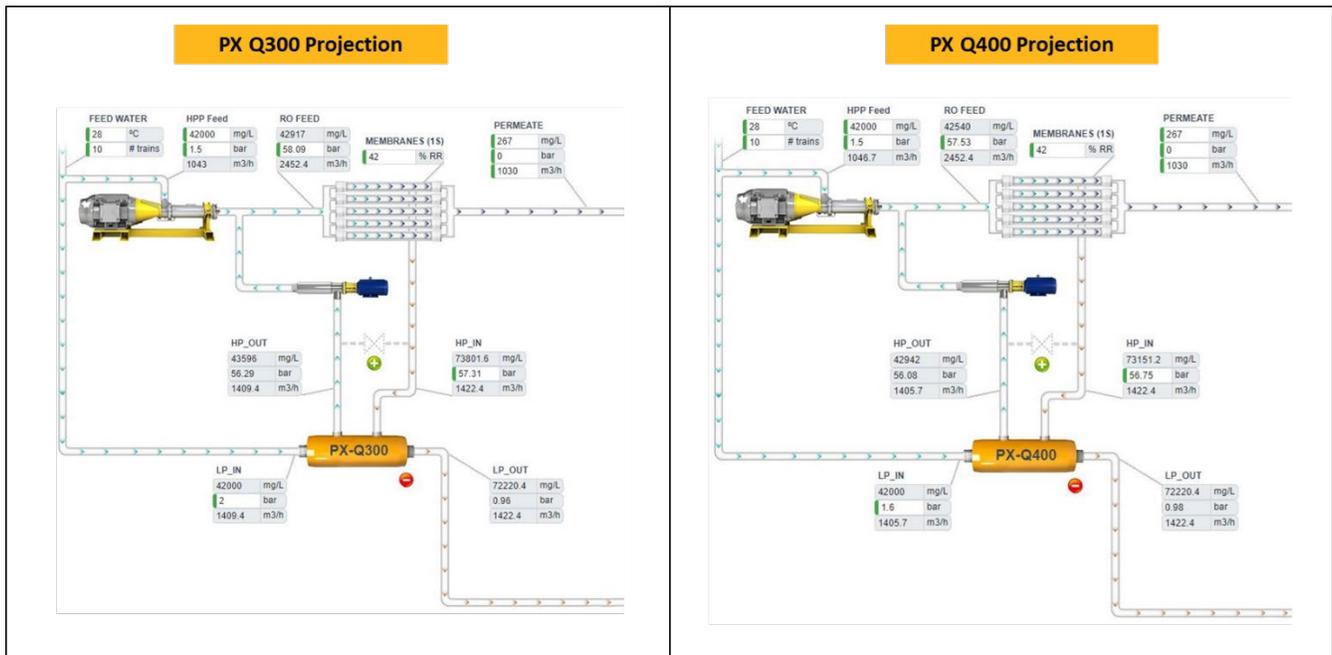


Figura 6: Comparación de la proyección PX con PX Q300 y PX Q400

La siguiente tabla resume los resultados de las proyecciones del PMP.

	PX Q300	PX Q400
Flujo unitario por PX	67.73 m ³ /h	88.9 m ³ /h
Aumento de la salinidad en la membrana	2.18%	1.29%
Mezcla volumétrica, VM	5.02%	3.02%
Flujo de lubricación (LF) total del conjunto de PX	12.99 m ³ /h	16.66
LF como % del flujo de concentrado	0.91%	1.17%
HP DP	1.02 bar	0.67 bar
LP DP	1.04 bar	0.62 bar
Consumo de energía específico de ósmosis inversa*	2.11 kWh/m ³	2.08 kWh/m ³
Eficiencia de recuperación de salmuera	97.32%	97.66%
Eficiencia general de PX	95.69%	96.70%

5.1 Mezcla

La menor mezcla volumétrica de los PX Q400 resulta en una salinidad de alimentación de membrana menor, de 42 540 mg/l, frente a los 40 917 mg/l del sistema equipado con PX Q300. Con una salinidad de alimentación menor, el diseño del PX Q400 requiere una presión de alimentación de membrana menor, de 57,53 bar, frente a los 58,09 bar del PX Q300. Esto repercute positivamente en el consumo energético del sistema.

5.2 Eficiencia

En estas configuraciones de tren, tanto el PX Q300 como el PX Q400 operan a más del 95 % de su capacidad. El PX Q400 proyecta una eficiencia del dispositivo del 96,70 %, mientras que el PX Q300 alcanza el 95,69 %, lo que representa una mejora del 1 %.

5.3 Comparación con la SEC

El consumo de energía estimado (SEC) para los diseños PX Q300 y Q400 es de 2,11 kWh/m³ y 2,08 kWh/m³, respectivamente. Por lo tanto, la configuración PX Q400 ofrece una reducción del consumo de energía (SEC) del 1,4 % en comparación con el sistema equipado con PX Q300. Cabe destacar que el mismo sistema de ósmosis inversa de agua de mar (SWRO) equipado con un turbocompresor ERD tendría un consumo de energía estimado (SEC) de aproximadamente 2,72 kWh/m³, aproximadamente un 30 % superior al del sistema equipado con cualquiera de los modelos PX.

5.4 Beneficios adicionales

El SEC proyectado que se muestra en los informes de Power Model Pro corresponde únicamente a la sección de alta presión del sistema de ósmosis inversa de agua de mar (SWRO), que no incluye la bomba de alimentación de baja presión que transfiere la alimentación a la bomba de alta presión ni a los dispositivos PX. Dado que el PX Q400 presenta una menor caída de presión en los canales de baja presión del dispositivo (0,62 bar frente a 1,04 bar para el PX Q300), el sistema de ósmosis inversa de agua de mar puede alimentarse a una presión inferior, de 1,6 bar

frente a 2 bar. La reducción de 0,4 bar en la presión de alimentación que requiere el PX Q400 representa un ahorro de aproximadamente 21 kW por tren y una reducción adicional del SEC de 0,02 kWh/m³. El SEC combinado, incluyendo la bomba de alimentación, es de 2,27 kWh/m³ para la configuración PX Q300 y de 2,22 kWh/m³ para la configuración PX Q400. Como resultado, la reducción de SEC es del 2,2% con el PX Q400 cuando se incluye el consumo de energía de la bomba de suministro de alimentación.

5.5 Beneficios económicos durante la vida útil de la planta, 25 años

Los datos de la siguiente tabla muestran el beneficio económico del menor consumo energético que se puede conseguir con el PX Q400.

	PX Q300	PX Q400
SEC para 250 MLD (kWh/m ³)	2.27	2.22
Ahorro adicional de \$\$ durante 25 años (@\$0.1/kWh)	-	\$11,406,250

Una reducción de 0,05 kWh/m³ SEC con el PX Q400 puede generar un ahorro energético de 4,6 millones de kWh al año para una planta de 250 MLD. Con un coste energético de \$0,1 por kWh, esto se traduce en un ahorro de \$11 406 250 en 25 años.

SECCIÓN 6: CONCLUSIÓN

Este documento explica y cuantifica cómo el PX Q400 ahorra energía y costos operativos en un sistema de desalinización típico, en comparación con el PX Q300, un sistema estándar de alto rendimiento de la industria. Gracias a una mayor eficiencia y mezcla, el PX Q400 reduce el SEC de un sistema típico de ósmosis inversa de agua de mar (SWRO) en más de 0,05 kWh/m³ (un 2 %) en comparación con el mismo sistema equipado con PX Q300, y en 0,60 kWh/m³ (más del 30 %) en comparación con un turbocompresor. Además, el PX Q400 tiene una mayor capacidad unitaria, por lo que se requieren menos dispositivos PX para una capacidad determinada del tren de SWRO. Esto no solo reduce el costo de inversión, sino que también reduce el espacio ocupado por la planta.

Visite el sitio web de: www.energyrecovery.com para obtener una lista completa de los productos de Energy Recovery, estudios de casos e información adicional útil para el diseño y la optimización de plantas de ósmosis inversa.

**Descargo de responsabilidad: Los resultados reales pueden variar según varios factores, incluido el diseño del sistema, el modelo y las condiciones de la membrana de ósmosis inversa y las condiciones de funcionamiento.*