



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

ANÁLISIS, DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN RECUPERADOR DE ENERGÍA PARA UN SISTEMA DE DESALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA DE CARÁCTER PORTÁTIL

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

Autor: Alberto Pérez Escolar
Director: Antonio Viedma Robles

Cartagena, 22 de marzo de 2021

Índice general

1	Introducción	7
2	Características generales de procesos de desalinización	9
2.1	El proceso de ósmosis. La ósmosis inversa	9
2.2	Tipos de sistemas de desalinización	10
2.3	Características generales de las instalaciones de desalación	14
2.4	Influencia de parámetros en el proceso de ósmosis inversa	19
3	Clasificación y elección del caso de estudio	25
3.1	Clasificación de plantas de desalinización	25
3.2	Selección de la planta de estudio	27
3.3	Características de la planta de desalinización	29
3.3.1	Pretratamiento	30
3.3.2	Microfiltración	30
3.3.3	Bombeo de alta presión	30
3.3.4	Membranas de ósmosis inversa	31
4	Modelo fluidodinámico de funcionamiento	35
4.1	Introducción y selección de puntos	35
4.2	Ecuaciones de interés y elaboración del modelo fluidodinámico del sistema	37
4.2.1	Cálculo de pérdidas generalizadas y locales	37
4.2.2	Cálculo de la altura manométrica comunicada por la bomba de alta presión	40
4.2.3	Cálculo de la pérdida de carga en membranas	43
4.2.4	Desarrollo del modelo	45
5	Estudio de sistemas de recuperación	53
5.1	Introducción	53
5.2	Tipos de sistemas de recuperación	53
5.2.1	Recuperación mediante turbomáquinas	54
5.2.2	Recuperación por intercambio de presión	55
5.3	Comparativa y selección del sistema de recuperación	58
5.4	Análisis del sistema con un <i>ERD</i>	62
5.4.1	Análisis del sistema con el recuperador PX30	63

5.4.2	Análisis del sistema con el recuperador XPR-309SS	66
5.5	Evaluación económica	67
5.5.1	Inversión	67
5.5.2	Ahorro	67
5.5.3	Resultados	68
6	Conclusiones	75
	Bibliografía	77
A	Diagrama P&ID de la planta de ósmosis inversa de estudio	79
B	Tablas de datos para la pérdida de carga	81

Índice de figuras

2.1	Flujo de líquido durante la ósmosis y la ósmosis inversa	9
2.2	Proceso de ósmosis inversa	10
2.3	Instalación EDAR para el tratamiento de aguas residuales	12
2.4	Tomas de agua en plantas desalinizadoras	15
2.5	Instalación con turbina Pelton	16
2.6	Instalación con turbocharger	17
2.7	Instalación con intercambiador isobárico	18
2.8	Relación de la retención con parámetros del sistema [9]	22
3.1	ETAP <i>HidroPURE SPOX15</i> , Lubrín	28
3.2	Fases del proceso de desalinización	29
3.3	Gráficas de funcionamiento	30
3.4	Curvas características de la bomba seleccionada	31
3.5	Composición de una membrana de poliamida	32
3.6	Configuración <i>SWM</i>	32
3.7	Esquema de las membranas en el proceso de desalinización	33
4.1	Sistema de estudio	36
4.2	Diagrama de Moody	38
4.3	Modificación de la curva característica debido al variador de frecuencia	43
4.4	Puntos de interés para el desarrollo del modelo fluidodinámico	45
5.1	Esquema de funcionamiento de una turbina Pelton	54
5.2	Esquema de funcionamiento de una turbina Francis	54
5.3	Sección de un turbocharger	55
5.4	Cámara de intercambio DWEER	56
5.5	Cámara de intercambio de presión por rotación	57
5.6	Esquema de funcionamiento de la Bomba Clark	58
5.7	Configuración del sistema con un <i>ERD</i>	63
5.8	Modificación del punto de funcionamiento al cambiar el caudal	65
5.9	Análisis de la inversión y ahorro	69
5.10	Recta de regresión para datos de consumo	72
5.11	Comparativa entre los modos de operación y su tiempo de amortización	73

Índice de tablas

2.1	Equivalencia entre grados hidrotimétricos	11
2.2	Clasificación de aguas en grados franceses	11
2.3	Tabla comparativa de procesos de desalinización	13
2.4	Ejemplo de características de plantas de desalinización de aguas comunes	23
3.1	Tabla de características	29
3.2	Valores límite para el agua de entrada	33
5.1	Tabla de eficiencia y rango de caudales de operación. Fuente: Fabricante <i>Energy Recovery</i>	59
5.2	Tabla de caudales para el diseño <i>XPR</i> . Fuente: Fabricante <i>ISOBARIX</i>	60

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad, la problemática de la escasez de agua es cada vez más evidente. El aumento de la población mundial ¹ y el creciente desarrollo industrial se traduce en una demanda del recurso hídrico cada vez más pronunciada [1]. Para resolver este problema, es crucial encontrar formas sostenibles y económicas para producir y tratar el agua para el consumo humano e industrial, tal y como promulga la ONU en sus Objetivos de Desarrollo Sostenible, en concreto, en el ODS número 6.

En este camino, la humanidad ha sido capaz de desarrollar diversos métodos para purificar el agua, entre los que destaca la ósmosis inversa, que cada vez toma más protagonismo en la escena del tratamiento de aguas. Sin embargo, esta técnica requiere de cantidades de energía muy grandes, especialmente, cuando el agua a tratar tiene un alto contenido en sales. En consecuencia, reducir el consumo energético de las plantas que emplean este método de purificación es de importancia primordial para hacer que esta tecnología esté cada vez más implementada.

En el contexto del ahorro de energía en la ósmosis inversa es donde surge este trabajo, que nace de un acuerdo de colaboración, entre la empresa de la Región de Murcia *Ecohidro* y la Universidad Politécnica de Cartagena, para desarrollar un dispositivo de recuperación de energía (*ERD*) de tamaño y precio reducido con el fin de ser empleado en plantas de desalinización por ósmosis inversa de tamaño pequeño-mediano.

Si bien este acuerdo entre *Ecohidro* y la UPCT no ha quedado totalmente afianzado a largo plazo, sí ha permitido realizar un estudio preliminar de la cuestión planteada y desarrollada en este trabajo (desarrollar un *ERD* para plantas de tamaño pequeño-mediano). En este sentido, se ha decidido dividir el trabajo en 4 actividades:

1. Estudiar el funcionamiento de sistemas de desalinización, con especial énfasis en aquellos que emplean ósmosis inversa.

¹Según la ONU, se espera que para 2050 la población mundial aumente en 2500 millones de personas

2. Desarrollar el modelo fluidodinámico de funcionamiento de la instalación. Se ha elegido una planta real de la empresa *Ecohidro* para llevar a cabo la modelización y comprensión del proceso de ósmosis inversa, así como la evaluación de las necesidades energéticas.
3. Analizar los diversos sistemas de recuperación de energía existentes. En este apartado se ha llevado a cabo un estudio de los diversos *ERD* disponibles en el mercado, así como su posible aplicación a la planta de estudio.
4. Dimensionar y optimizar el recuperador elegido. Una vez escogido el tipo de recuperador a utilizar, es necesario optimizar y analizar su funcionamiento para determinar si es rentable su utilización.

Estas 4 tareas se desarrollan a lo largo de los capítulos que componen este trabajo. Una vez se hayan desarrollado todos los capítulos, será posible estudiar los resultados y conclusiones obtenidas y determinar si la propuesta de un *ERD* es adecuada para una planta de desalinización de tamaño modesto.

Capítulo 2

Características generales de procesos de desalinización

2.1 El proceso de ósmosis. La ósmosis inversa

La ósmosis es un mecanismo de difusión que se produce cuando un líquido se mueve a través de una membrana semipermeable. Este fenómeno se genera como consecuencia de la diferencia de potencial químico que existe entre dos fluidos de distinta concentración [2]. El sentido del flujo es siempre el mismo: del fluido de menor concentración al fluido de mayor concentración hasta que se consiguen igualar ambas concentraciones, tal y como se muestra en la siguiente figura:

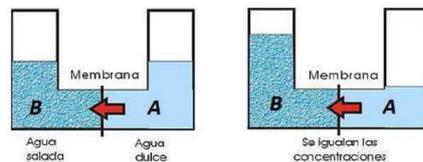


Figura 2.1.: Flujo de líquido durante la ósmosis y la ósmosis inversa

Como se puede observar, en la Figura 2.1, la difusión del fluido de un lado a otro de la membrana provoca un aumento en la altura de la columna de líquido. De esta forma, se genera una presión denominada *presión osmótica*. Si se aplica una presión superior a la presión osmótica sobre la mezcla, se puede invertir la circulación y purificar la zona de menor concentración. Este proceso se denomina *ósmosis inversa* o *reverse osmosis (RO)* en inglés. Dependiendo de la presión ejercida y la dirección, es posible clasificar los procesos de ósmosis en (ver Figura 2.2):

- Ósmosis asistida por presión
- Ósmosis directa
- Ósmosis retardada por presión
- Ósmosis inversa

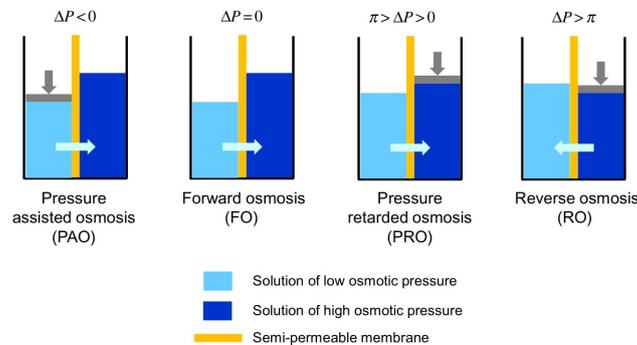


Figura 2.2.: Proceso de ósmosis inversa

Con base en lo expuesto anteriormente, el presente trabajo se centrará, únicamente, en el estudio de un sistema de recuperación de energía a partir de procesos de ósmosis inversa, ya que es uno de los métodos más eficaces para conseguir la purificación de diversos tipos de agua, tal y como se verá en el capítulo siguiente.

2.2 Tipos de sistemas de desalinización

La escasez de agua es un problema global de gran importancia. Según las cifras disponibles, en 2019, se constató que más de 2000 millones de personas carecen de acceso a agua potable [1]. Por tanto, dada la coyuntura actual, resulta fundamental conocer el tipo de aguas que existen y los sistemas necesarios para potabilizarla. Atendiendo a su origen, las aguas pueden ser[3]:

- **Saladas:** provienen de océanos y mares con alta concentración en sales (entre 30 y 50 g/L), como $NaCl$.
- **Salobres:** poseen una cantidad de sales intermedia entre aguas dulces y saladas, entre 0,5-30 g/L.
- **Dulces:** proceden de ríos, manglares, lagunas o campos de hielo y tienen una menor cantidad de sales minerales (concentración inferior a 0,5 g/L) y compuestos químicos sólidos.
- **Negras:** circulan por las tuberías de saneamiento y contienen heces, orinas y otros desechos.
- **Grisas:** están conformadas por aguas ya usadas que han sufrido algún tratamiento para ser reutilizadas.

- **Residuales:** han sido empleadas de cualquier forma por el ser humano.
- **Muertas:** han sufrido algún proceso que las hace inutilizables para cualquier otra función; son producto del ser humano.

Sin embargo, el contenido en sales y elementos químicos del agua es también un factor de estudio muy importante, que permite clasificar las aguas en:

- **Duras:** contienen grandes cantidades de carbonatos y bicarbonatos que pueden formar precipitados insolubles y colapsar tuberías. Es un agua característica, por ejemplo, de la Región de Murcia.
- **Blandas:** al contrario que las aguas duras, las aguas blandas poseen menos cantidades de minerales.

Para medir la dureza de un agua se emplea la hidrotimetría, que permite asignar un valor de la dureza empleando grados hidrotimétricos (H). Existen diversos tipos de estos grados, tal y como se muestra en la tabla 2.1.

	Grado F (Francés)	Grado ING (Inglés)	Grado AL (Alemán)	Grado AM (Americano)	Miliequivalentes de Ca
Grado F	1	0,7	0,56	0,58	0,2
Grado ING	1,43	1	0,8	0,83	0,286
Grado AL	1,79	1,25	1	1,04	0,358
Grado AM	1,72	1,2	0,96	1	0,34
Miliequiv.	5	3,5	2,8	2,9	1

Tabla 2.1.: Equivalencia entre grados hidrotimétricos

Estos grados representan la concentración de carbonatos o bicarbonatos cálcicos presentes en el agua. Una vez obtenidos estos grados, es posible clasificar las aguas y determinar su dureza empleando la tabla 2.2.

	Muy blanda	Blanda	Dura	Muy dura
Valor en grados franceses	0-5 °HF	5-15 °HF	15-50 °HF	50-90 °HF

Tabla 2.2.: Clasificación de aguas en grados franceses

- **Corrosivas:** poseen un elevado número de cloruros y sulfatos. Esto hace que disminuya el pH y que el agua adquiera un carácter ácido. Estas aguas pueden ocasionar problemas de corrosión en juntas y elementos metálicos. Las aguas duras y corrosivas se distinguen empleando el índice de Langelier [4]. Este índice se calcula como $IL = pH - pH_s$, siendo pH el pH del agua de análisis y pH_s el de un agua saturada de carbonato de calcio. Si IL es positivo y superior a 0,5, el agua se considera incrustante. De lo contrario, si es negativa e inferior a $-0,5$, se considera corrosiva. Un valor intermedio de este índice no da información suficiente para clasificar un agua u otra.

Naturalmente, el diseño de un sistema de purificación de agua ha de tener en cuenta las características químicas de ese agua, la cantidad de sólidos disueltos, su pH, carga orgánica, etc. Por tanto, es esencial conocer el origen del agua y sus parámetros.

Para realizar el tratamiento de purificación de agua, es posible emplear multitud de métodos, que varían según la procedencia y propiedades del agua. Entre estos procesos se encuentran la desalinización con ósmosis inversa, los procesos de coagulación-floculación, la clarificación, diversos tipos de filtración (carbón activado, multimedia, biológica, ultrafiltración, etc.), el ablandamiento de aguas mediante resinas de intercambio iónico, los procesos de desinfección mediante ozonización y la cloruración, entre otros.

Para el tratamiento de aguas con alta carga orgánica o contaminante, se lleva a cabo una combinación de los diversos métodos citados anteriormente y otros auxiliares, que se desarrollan en estaciones de tratamiento de aguas residuales (*EDAR*), como se puede ver en la Figura 2.3, o de aguas potables (*ETAP*), en función de la procedencia y uso de las aguas.



Figura 2.3.: Instalación EDAR para el tratamiento de aguas residuales

Como se puede comprobar, el tratamiento de aguas es un área de conocimiento extensa, compleja y de alta especialización. Por ello, en el presente trabajo se hace especial hincapié en el tratamiento de aguas mediante desalinización. Tal y como su nombre indica, este método consiste, básicamente, en eliminar las sales presentes en el agua y puede llevarse a cabo empleando diversos métodos[5]:

- **Procesos de filtración.** Aunque los procesos que se exponen, a continuación, son muy similares, se ha considerado pertinente separar la ósmosis inversa con el fin de resaltar la importancia que este proceso tiene para este trabajo.
 - **Filtración multicapa, filtración de cartuchos, microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración:** emplean filtros de distintos tamaños de poro para obtener la separación completa de las sales presentes en el agua. Estos procesos se enumeran, en orden descendente, en función del tamaño del poro. De esta forma se consigue una filtración más fina.

- **Ósmosis inversa:** purifica el agua utilizando, para ello, el método que se ha explicado en el apartado anterior: el fluido pasa a través de una membrana semipermeable por la acción de una presión superior a la presión osmótica. Esto permite un grado de separación inferior a 0,04 micras.
- **Desalinización térmica:** se realizan, de forma sucesiva, varios procesos de evaporación y condensación manteniendo las sales precipitadas en el fondo.
- **Destilación:** el agua salada se evapora y condensa en agua dulce en etapas sucesivas. Para ello, se reduce su temperatura y presión.
- **Congelación:** se forman cristales a partir de la pulverización de agua en una cámara refrigerada. Posteriormente, estos cristales se lavan y se obtiene agua dulce.
- **Evaporación relámpago:** el agua se atomiza en una cámara a baja presión, por debajo de la presión de vapor del agua, y provoca la vaporización de las gotas. La posterior condensación de las gotas permite la purificación del agua.
- **Electrodiálisis:** el agua dulce se consigue sumergiendo un par de electrodos que crean una corriente que separa los iones presentes en el agua.
- **Formación de hidratos:** se emplean hidrocarburos que provocan la cristalización de la sal. Estos cristales se separan, posteriormente, y se obtiene agua dulce. No es una técnica empleada a gran escala.

De entre todos estos métodos, los más usados son aquellos basados en la filtración y la evaporación o destilación. Por ser métodos con un fundamento distinto, resulta significativo analizarlos en profundidad para estudiar sus principales diferencias y características intrínsecas. La Tabla 2.3 resume algunas de estas propiedades.

	Destilación	Ósmosis inversa (O.I)	Electrodiálisis
Consumo energético	Elevado	Elevado, pero inferior a la destilación	Medio
Precio	Elevado	Depende del agua a tratar	Intermedio
Eficiencia	Baja	Depende del agua a tratar	Similar a la O.I
Producto	Alta pureza	Alta pureza. Agua desinfectada	Menor calidad

Tabla 2.3.: Tabla comparativa de procesos de desalinización

Además de la información que se resume en la Tabla 2.3 , resulta pertinente mencionar que la destilación no depende de la salinidad del agua, pero su instalación ocupa mucho terreno.

No obstante, la ósmosis inversa precisa un pretratamiento físico-químico y un postratamiento para adecuar las condiciones del agua a la aplicación en la que se va a utilizar. Además, la ósmosis inversa consume grandes cantidades de energía, principalmente, para conseguir las presiones necesarias. Es por esto que el estudio de un sistema de recuperación de energía, como el que se propone en este trabajo, resulta pertinente.

2.3 Características generales de las instalaciones de desalación

En este apartado, se desglosan las características generales de una planta desalinizadora, desde la toma de agua del medio hasta su almacenamiento y distribución. En este sentido, cabe subrayar que, dado que el presente trabajo se centra, principalmente, en la utilización de la ósmosis inversa para la desalinización de agua, la descripción que se realiza, a continuación, está enfocada, precisamente, a ese tipo de plantas. En línea generales, toda planta de desalinización se divide en las siguientes áreas [6]:

- **Captación de agua:** como se puede observar en la Figura 2.4, la captación de agua es la parte de la instalación que suministra agua a la planta, que puede proceder de ríos, mares, lagos o cualquier fuente de agua. La captación de agua puede ser una toma abierta o cerrada. Un ejemplo representativo de toma cerrada es la adquisición de agua mediante pozos; aunque, para que este hecho se pueda desarrollar correctamente, es necesario que el agua pueda penetrar los estratos del terreno y suministrar así caudal a una cavidad interior.

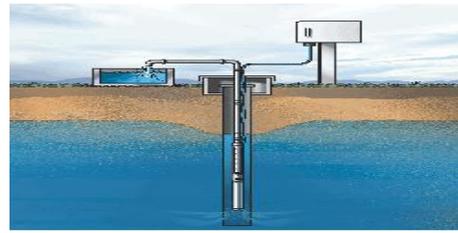
El proceso de permeación del agua, a través de las capas de la superficie, altera las propiedades del agua y puede originar una lixiviación de compuestos presentes en la tierra, así como de pesticidas y otras sustancias. Sin embargo, el agua que desemboca en las tomas cerradas tiene menos sólidos disueltos, carga orgánica y contaminación.

Por otra parte, las tomas abiertas son aquellas que se realizan en contacto directo con la fuente de agua y presentan mayor variación de temperatura, presencia de sólidos y contaminación que aquellas que afloran en tomas cerradas. Esta es la opción a tomar cuando el terreno no permite tomas cerradas o no es capaz de abastecer el caudal necesario.

- **Pretratamiento físico-químico:** en esta etapa, el agua se somete a diversos tratamientos para proteger los sistemas venideros de la instalación. En una primera fase, el agua sufre una corrección de pH para volverla ácida. Este tratamiento se realiza para evitar la precipitación de sales, en las membranas de ósmosis inversa, y para aumentar la eficacia del siguiente proceso: la desinfección por hipoclorito sódico que elimina la carga orgánica presente en el agua.



(a) Toma abierta



(b) Toma cerrada

Figura 2.4.: Tomas de agua en plantas desalinizadoras

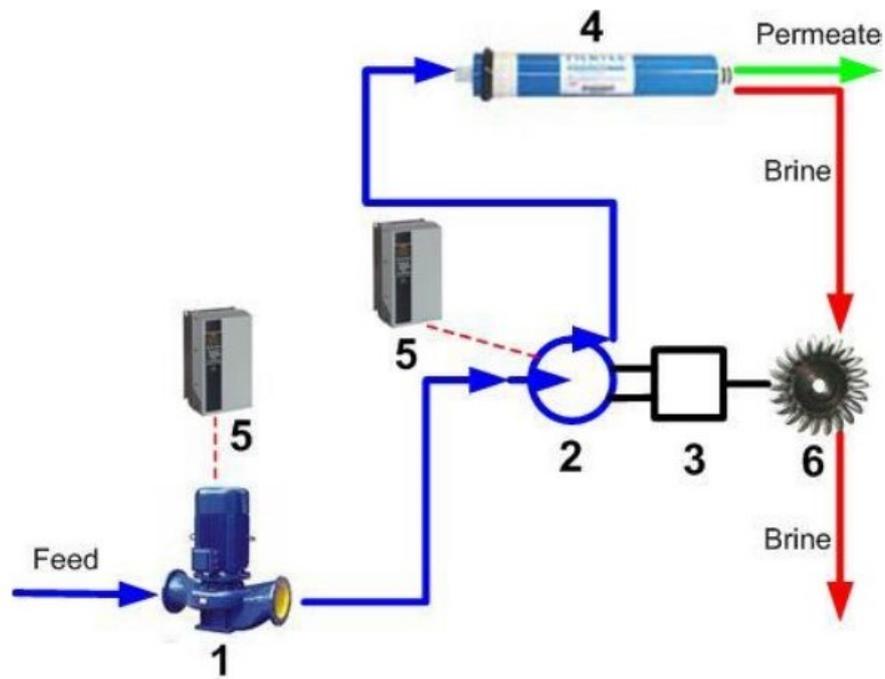
Posteriormente, el agua se somete a tres procesos para eliminar los sólidos en suspensión y los sólidos coloidales. Para ello, se recurre primero a un desbaste, que elimina sólidos de gran tamaño. En segundo lugar, y mediante la adición de un floculante, se procede a la eliminación de los flóculos de partículas coloidales mediante filtros de arena. Finalmente, si las partículas resultantes siguieran siendo excesivas, se realizaría un último tratamiento de afino mediante filtros de cartucho.

- **Desalación y recuperación de energía:** en esta etapa, el agua ha sido tratada para mantener y controlar ciertos parámetros cruciales para el mantenimiento de las membranas (en el caso de emplear sistemas de ósmosis inversa, ampliamente implementados en multitud de plantas), como el total de sólidos disueltos, el pH, cantidad de cloro disuelto, etc.

Para realizar el proceso de ósmosis inversa, el agua ha de llegar a las membranas con una presión muy alta, entre 50 y 80 bar, dependiendo del tamaño de la instalación. Con este objetivo, se instalan bombas centrífugas de alta presión a la entrada de los cartuchos donde van introducidas las membranas. A la salida de las membranas, se obtiene el **permeado**, es decir, el agua purificada, y el **rechazo**, que es el agua sobrante con alto contenido en sales (salmuera).

Debido a que esta salmuera abandona las membranas a alta presión, es posible instalar un dispositivo de recuperación de energía para aprovechar la presión residual que posee el rechazo. Existen diversos tipos de recuperadores de energía que varían en tamaños, rendimientos, caudales admitidos y precio [7]. Estos sistemas de recuperación pueden ser:

- **Turbina Pelton:** adecuada para instalaciones de gran tamaño. Como se puede observar, en la Figura 2.5, la turbina proporciona la potencia necesaria para hacer funcionar la bomba mediante un motor.



1. Feed Pump 2. High Pressure Pump 3. Motor
4. RO Membrane 5. VFD 6. Pelton Wheel

Figura 2.5.: Instalación con turbina Pelton

- **Turbocharger:** este dispositivo está compuesto por una turbina y una bomba que se acoplan a un mismo eje (ver Figura 2.6). El rechazo a alta presión intercambia energía con la turbina, que comunica potencia a la bomba y aumenta la presión de agua bruta. De esta forma, se reducen las necesidades de la bomba de alta presión y aumenta el rendimiento.

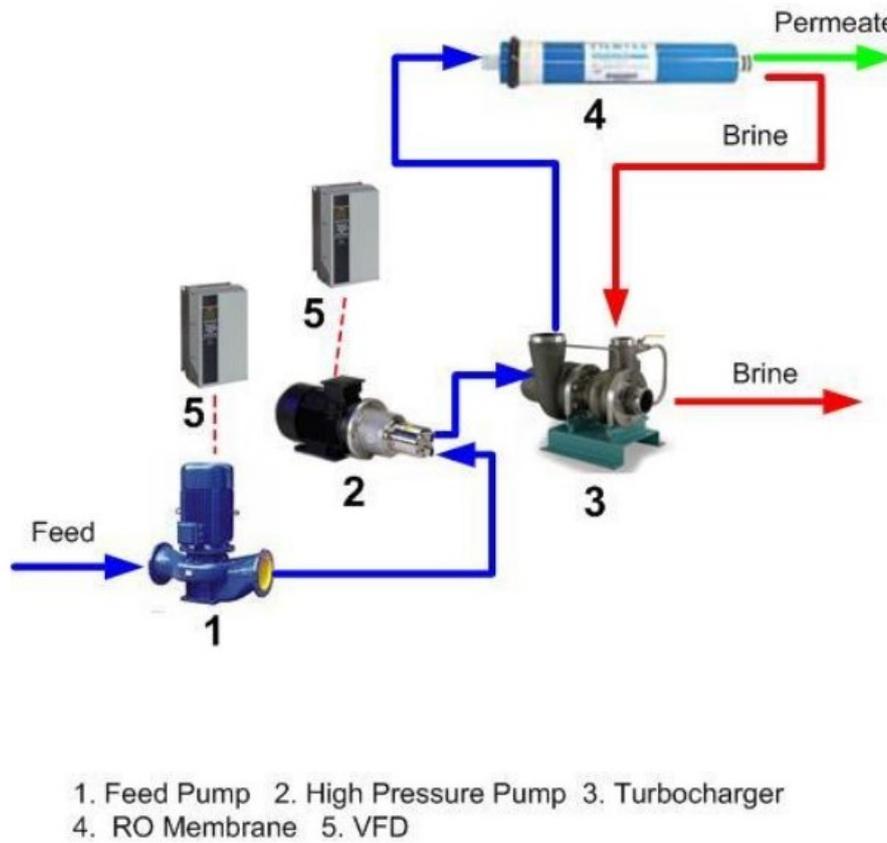


Figura 2.6.: Instalación con turbocharger

- **Recuperador isobárico:** este dispositivo es una máquina de desplazamiento positivo en donde el rechazo intercambia presión con el agua bruta. Esta agua se incorpora en forma de caudal adicional y aumenta el rendimiento de la instalación, como se puede apreciar en la Figura 2.7

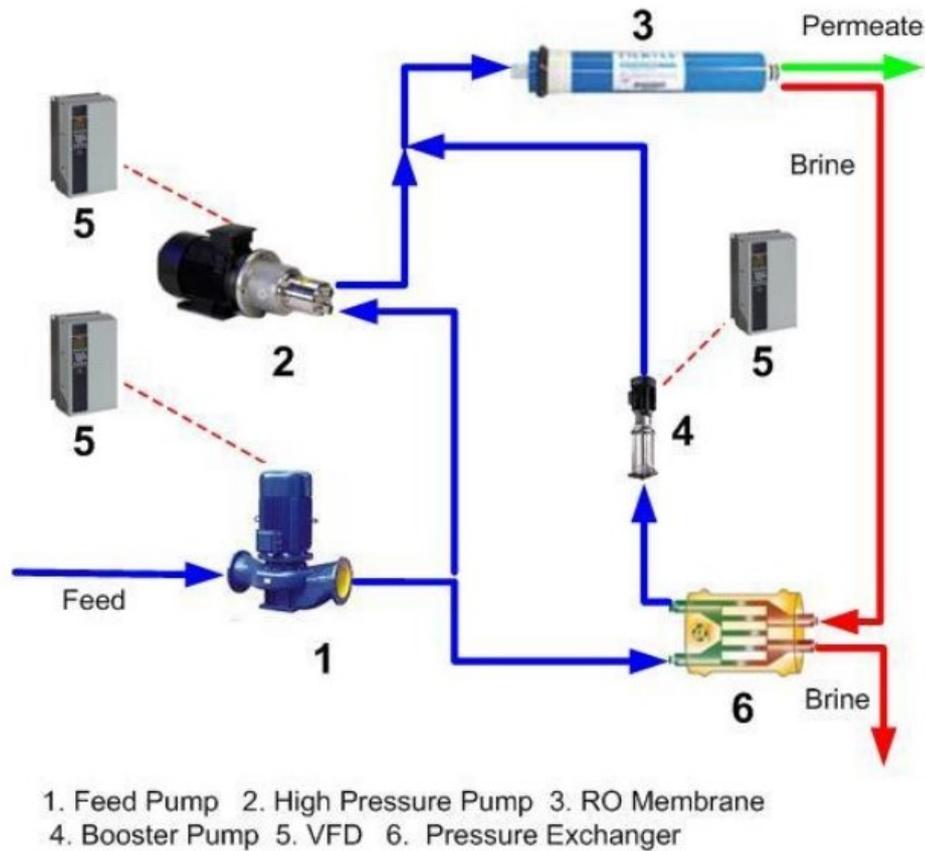


Figura 2.7.: Instalación con intercambiador isobárico

- **Postratamiento:** durante esta fase, se dota al agua de las características esenciales y necesarias para poder ser utilizada como agua potable. Esto es debido a la filtración tan fina que se produce durante la ósmosis inversa. Este proceso consiste en una remineralización, donde se emplea dióxido de carbono y calcita, además de hipoclorito para una desinfección adicional.
- **Almacenamiento:** en esta etapa, el agua desalada y remineralizada se almacena en depósitos para ser distribuida a las líneas de abastecimiento necesarias.
- **Dilución y vertido de salmuera:** después de realizar el intercambio energético, mediante alguno de los métodos expuesto anteriormente, se vierte de nuevo la salmuera sobrante al medio y se diluye con agua para reducir la concentración de sales y provocar un impacto menor en el entorno marino.

2.4 Influencia de parámetros en el proceso de ósmosis inversa

Como se ha explicado en capítulos anteriores, el proceso de ósmosis inversa se produce gracias a una membrana semipermeable, que actúa como medio de separación entre dos sustancias de distintas concentraciones para dividir la alimentación en permeado y rechazo. Este proceso queda representado en el modelo de difusión-solución, que se explica de forma detallada en el libro *Basic Principles of membrane Technology* [8]. En líneas generales, la membrana semipermeable permite el paso de distintas sustancias debido a las diferencias físico-químicas que existen entre ellas.

Desde el punto de vista termodinámico, existen expresiones para predecir el trabajo teórico necesario para producir la separación en una membrana semipermeable. Sin embargo, el trabajo real que ha de aplicarse, para producir la separación, es muy superior al expresado de forma teórica. Esto es debido a que, en la realidad, se pretende conseguir, a través de la membrana, un flujo suficiente como para que el proceso de separación pueda resultar rentable.

El flujo que logra atravesar la membrana y formar el permeado varía en los distintos procesos de filtración, así como en el tipo de membrana utilizada, en el origen del trabajo empleado o en la selectividad requerida (grado de filtración). Este flujo se regula empleando la *retención* (R), que se define como la cantidad de soluto que retiene la membrana, en relación con el total de alimentación. Este proceso queda definido en la siguiente ecuación, siendo c_f y c_p las concentraciones de alimentación (*feed*) y permeado (*permeate*) respectivamente.

$$R = \frac{c_f - c_p}{c_f} \quad (2.1)$$

El parámetro R se utiliza, generalmente, para separar sustancias en un medio acuoso. Si se desea realizar la separación de sustancias gaseosas, se empleará, entonces, el factor de separación α para referirse al mismo concepto.

Cabe mencionar que el parámetro expuesto corresponde a la retención *aparente*, medida de forma experimental. Existe, sin embargo, una retención teórica, llamada retención *intrínseca* y caracterizada por la ecuación 2.2.

$$R_{int} = 1 - \frac{c_p}{c_m} \quad (2.2)$$

Siendo c_p la concentración en el permeado y c_m la concentración en la interfaz entre la alimentación y la superficie de la membrana. Este parámetro se puede determinar de forma experimental de la forma:

$$R_{int} = \left(1 + \frac{B}{A(\Delta P - \Delta\pi)}\right)^{-1} \quad (2.3)$$

Siendo A y B constantes del proceso, ΔP la presión aplicada y $\Delta\pi$ la presión osmótica requerida en la separación. La retención intrínseca suele proporcionar valores superiores a la retención aparente, ya que esta última se ve afectada por el fenómeno de la polarización de la concentración; que se ha explicado anteriormente.

Se puede observar que, si se mantiene constante la concentración de sales en la alimentación (c_f) y se disminuye la concentración en el permeado (c_p), la retención (R) aumenta. Esto indica que, cuanto menor sea c_p , mayor es la separación de sales que se produce en la membrana, produciendo un permeado más puro, indicando que la membrana trabaja correctamente. Por tanto, la retención proporciona una medida de la cantidad de sales, que consigue separar una membrana (en tanto por 1), y permite detectar problemas de ensuciamiento, perforación, etc.

Para estudiar el flujo que atraviesa la membrana, en forma de permeado, se emplea la siguiente expresión:

$$J = A \frac{dX}{dx} \quad (2.4)$$

Donde J hace referencia al flujo que atraviesa la membrana, $\frac{dX}{dx}$ la fuerza que provoca dicho flujo y A la constante fenomenológica.

Se puede observar que esta expresión modeliza distintas leyes físicas, en función del flujo al que se haga referencia y a la constante fenomenológica que se emplee; por ejemplo, si se utiliza el flujo másico y la constante A pasa a ser el coeficiente de difusión, se obtiene la ley de Fick:

$$J_m = D \frac{dC}{dx} \quad (2.5)$$

O si se pretende hablar de flujo de calor, utilizando la difusividad térmica λ y el gradiente térmico, se obtiene la ley de Fourier:

$$J_h = \lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.6)$$

En definitiva, es evidente que el elemento primordial, en el proceso de separación por ósmosis inversa, así como en cualquier proceso de separación por filtración de membranas, es la propia membrana. Por tanto, las restricciones del proceso de ósmosis están estrechamente ligadas a aquellos parámetros que repercutan directamente en el rendimiento de la membrana:

1. **Temperatura del agua de alimentación y la temperatura de operación de las membranas.** La temperatura máxima a la que suelen operar las membranas de ósmosis inversa suele ser de 45°C, ya que si aumenta la temperatura de la membrana, puede producirse una compactación excesiva, reduciendo el tamaño de poro y estrangulando el caudal que atraviesa las membranas.

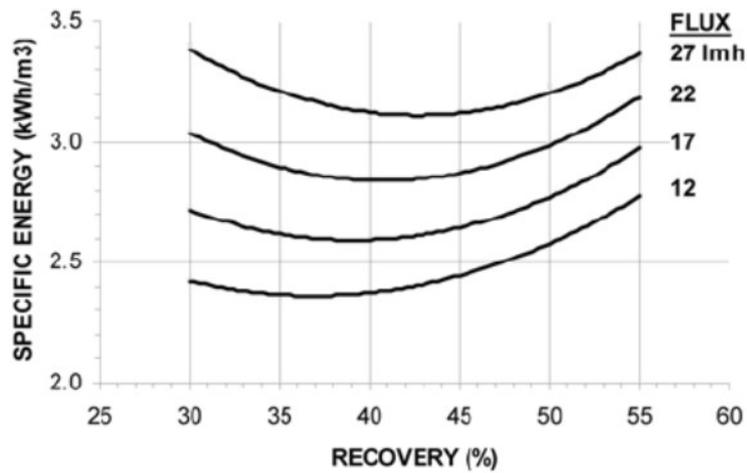
2. **Cantidad de sólidos disueltos (TDS).** Conocer la composición química del agua que se pretende tratar resulta de vital importancia en el proceso de ósmosis inversa, ya que va a determinar diversos parámetros de diseño, como el tipo de membrana a utilizar y, por tanto, las presiones requeridas.

Por ejemplo, si se pretende tratar agua de mar, que posee alta concentración en sales, se empleará una membrana de ósmosis de poro muy fino para obtener una retención de cerca del 99% de sales. No obstante, la alta retención de iones se traduce en una baja permeabilidad y, por tanto, en un flujo de permeado reducido. En estos casos, será necesaria gran energía (por encima de 60 bares en la bomba centrífuga de alta presión) para subsanar este inconveniente. Este tipo de membranas se denominan *SWRO* (*Sea Water Reverse Osmosis*).

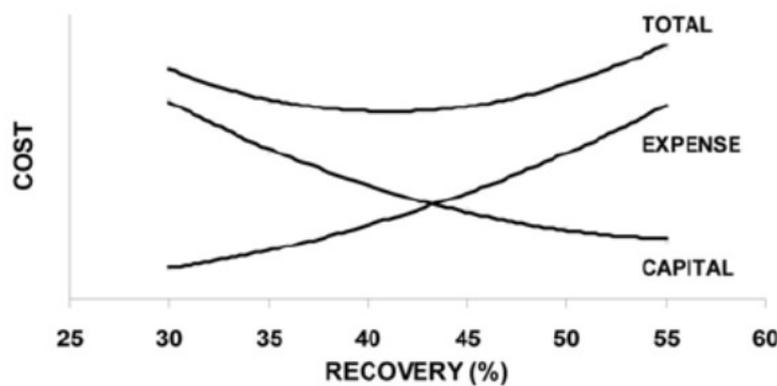
Al tratar agua salobre, que tiene menor cantidad de sales disueltas, se emplean membranas de tipo *BWRO* (*Brackish Water Reverse Osmosis*) y, por tanto, se puede emplear una retención menor con un menor impacto de energía.

En particular, se deberá prestar especial atención a aquellos elementos de difícil separación, como iones monovalentes o el flúor y sílice, que pueden provocar problemas de rendimiento en la membrana. Este parámetro está estrechamente relacionado con el siguiente punto.

3. **Requisitos en la calidad del permeado y retención.** La calidad que se pretende obtener del agua, a la salida de la ósmosis inversa, afecta también a la carga que soportan las membranas. En concreto, dependiendo del grado de retención (Ecuación 2.1), existe una variación de la energía demandada por el sistema de desalinización, tal y como se muestra en la figura 2.8a. En esta figura, se puede observar que existe un valor de retención para el cual la energía específica requerida es mínima. Sin embargo, a partir de dicho valor, aumentan las necesidades energéticas, debido a que la concentración en el permeado es menor, y, por tanto, la cantidad de iones que es necesaria eliminar en el proceso de ósmosis aumenta considerablemente. Del mismo modo, existe un punto óptimo de retención para el cual el coste total de la instalación es mínimo, relacionado con la dificultad para conseguir la calidad de permeado a la salida, ya que es necesario emplear equipos de grandes potencias para una retención cada vez mayor.



(a) Retención-Energía específica



(b) Retención-Coste

Figura 2.8.: Relación de la retención con parámetros del sistema [9]

4. **Salinidad e índices de Boro.** Como se ha mencionado en apartados anteriores, la salinidad del agua de entrada está directamente relacionada con la elección de la membrana de ósmosis, ya que cuanto mayor sea la salinidad, mayor cantidad de sales tendrá que ser capaz de rechazar para obtener un agua permeada de calidad, aumentando el coste de la instalación y las necesidades energéticas, como se ha visto en la figura 2.8.

Por otro lado, el boro es un compuesto que condiciona de forma directa la membrana [10], pues su eliminación es muy complicada debido a su alta reactividad y su facilidad para combinarse con otros elementos. Por tanto, es necesario emplear membranas especiales e, incluso, añadir sosa cáustica al agua de alimentación, lo que provoca el aumento del pH y permite disociar el ácido bórico presente en el agua en ión borato, de fácil eliminación. El boro se puede corregir también empleando resinas de intercambio iónico.

5. **Ph.** El último parámetro significativo que influye en la eficiencia del proceso de ósmosis inversa es el pH. Todas las membranas tienen un pH máximo que son capaces de soportar

antes de que sufran un proceso de hidrólisis ¹. Cuanto mayor es el pH, mayor es la tendencia de las membranas a sufrir hidrólisis, especialmente, en membranas de acetato de celulosa. Este efecto se puede mitigar empleando membranas de poliamida.

	Agua de red	Agua de pozo	Agua de mar
Salinidad	< 1500 ppm	< 8000 ppm	35000-45000 ppm
Recuperación	80 %	65-80 %	35-45 %
Presión de trabajo	< 15 bar	15-25 bar	50-75 bar
Flujo	30-35 l/h m ²	25-30 l/h m ²	15-20 l/h m ²
Consumo energético a 25°C	< 0,75 kWh/m ³	1,5 kWh/m ³	5 kWh/m ³

Tabla 2.4.: Ejemplo de características de plantas de desalinización de aguas comunes

La importancia de todos estos elementos se puede resumir en la Tabla 2.4, donde se presentan las características de distintos tipos de aguas, así como las condiciones que han de cumplir las plantas de desalinización correspondientes. Como se puede observar, en la Tabla 2.4, se verifica lo explicado en el punto anterior: un aumento en la salinidad del agua de entrada provoca mayores necesidades energéticas debido a las presiones requeridas, así como una reducción en la recuperación ² y en el flujo de permeado obtenido.

Merece la pena destacar que esta tabla se ha realizado empleando datos de la empresa *Lenn-tech*, acorde al tamaño de plantas que dicha empresa pone en marcha y produce. Por tanto, es posible que la clasificación y datos obtenidos en otra empresa difiera de la mostrada en la Tabla 2.4. Sin embargo, la relación entre salinidad, recuperación, presión, flujo y consumo energético, explicada en el párrafo anterior, es válida para cualquier planta, ya que está fundamentada en la física detrás de los procesos de separación por membrana.

Por otro lado, también cabe destacar que, además de la influencia de las características del agua de entrada, puede existir un ensuciamiento, fruto del crecimiento de microorganismos que se encuentran en la carga orgánica del agua y que cubran la superficie de la membrana, entorpeciendo así el filtrado.

Otra causa del déficit de filtrado es la *polarización de la concentración*, que ocurre cuando la calidad del permeado se empobrece debido a la acumulación de suciedad en la superficie de las membranas. Este proceso hace que aumente la concentración de suciedad, gradualmente, y que las partículas se conviertan en no solubles y puedan pasar a través del filtro. Para reducir el ensuciamiento, se toman principalmente tres medidas:

- Pretratamiento: como se ha explicado, eliminar con anterioridad sustancias perjudiciales, mediante un filtrado, reduce el ensuciamiento de las membranas.
- Diseño: el diseño de la membrana, así como la dirección del flujo de alimentación, rechazo

¹La hidrólisis es un proceso por el que el agua se disocia en sus átomos componentes y forma uniones con otra sustancia, degradando los componentes de la membrana.

²La recuperación se define como $r = \frac{\text{Caudal de permeado}}{\text{Caudal de alimentación}} \cdot 100$

y permeado es crucial para mantener el sistema libre de acumulaciones. Esto se consigue forzando un flujo turbulento, que circule de forma permanente en la membrana, para evitar zonas de remanso donde se puedan concentrar sustancias perjudiciales. Este tipo de diseño se conoce como de flujo *cruzado o tangencial*.

- Limpieza: el correcto mantenimiento y limpieza del sistema es esencial para que el proceso de filtración se lleve a cabo de la forma más eficiente posible.

Llegados a este punto, se concluye que la ósmosis inversa emplea distintos tipos de membrana, que se adecúan a las características del agua que se va a tratar, y hace que esta tecnología sea versátil, capaz de producir aguas de alta pureza.

Capítulo 3

Clasificación y elección del caso de estudio

3.1 Clasificación de plantas de desalinización

En el presente capítulo se va a realizar una clasificación de las distintas plantas de desalinización existentes. Posteriormente se seleccionará una de ellas para estudiarla detenidamente en los siguientes apartados de este trabajo.

Como se ha mencionado anteriormente, el proceso de desalinización por ósmosis inversa es un proceso ampliamente conocido e implementado en multitud de poblaciones y entornos, especialmente, en aquellos que no disponen de una fuente abundante de agua. Por este motivo, existen multitud de métodos de desalinización, así como diversos tamaños de plantas para abastecer desde barcos de recreo a poblaciones enteras, pasando por industrias y hogares. Como cabe esperar, la cantidad de agua que es capaz de producir una planta de desalinización provoca variaciones en la topología de la planta, así como en los requerimientos energéticos y geométricos de los elementos involucrados en el proceso. Por ejemplo, al aumentar la cantidad de agua que se pretende producir, se ha de aumentar el flujo de permeado y, por tanto, aumentan las necesidades de presión y la potencia que se requiere de la bomba de alta presión. Si se necesita producir gran cantidad de agua, se deberá aumentar también el número de membranas de ósmosis presentes e implementar un sistema de pretratamiento capaz de admitir mayores caudales. En definitiva, es posible realizar una clasificación de las plantas de desalinización en función del caudal de agua que son capaces de producir.

Sin embargo, realizar esta clasificación con exactitud puede resultar complicado, ya que existen discrepancias respecto a lo que se consideran plantas de gran, mediano o pequeño tamaño. Esto es debido a que, generalmente, el tamaño de una planta de desalinización depende de lo que el cliente solicita, ajustándose a las necesidades de producción de agua, así como a las características del agua de entrada. En virtud de este razonamiento, se puede llevar a cabo

una clasificación ¹ basándose en el tipo de agua que trata la planta:

1. Aguas de Pozo

- a) Tamaño compacto: producción menor de $0,5 \text{ m}^3/h$
- b) Tamaño pequeño: producción menor de $1,5 \text{ m}^3/h$
- c) Tamaño intermedio: producción menor de $3,5 \text{ m}^3/h$
- d) Tamaño grande: producción menor de $70 \text{ m}^3/h$
- e) Tamaño muy grande: producción mayor de $70 \text{ m}^3/h$

2. Aguas de mar

- a) Tamaño pequeño: producción menor de $2 \text{ m}^3/h$
- b) Tamaño intermedio: producción menor de $100 \text{ m}^3/h$
- c) Tamaño grande: producción mayor de $100 \text{ m}^3/h$

Además de la clasificación realizada, se puede elaborar otra distinta atendiendo a la forma en la que las plantas son desarrolladas:

1. **Plantas portátiles.** Son aquellas cuyo montaje y fase de pruebas se realiza en un lugar distinto a donde dicha planta va a funcionar. Estas plantas tienen como objetivo proporcionar una solución portátil a las necesidades de agua potable, de riego o de industria de un cliente. Debido a que estos sistemas de desalinización no se construyen *in situ*, no se ven perjudicados por las desventajas logísticas (transporte de material, terreno de difícil acceso, desplazamiento de mano de obra, etc.) que pueda acarrear la puesta en marcha de una planta en el sitio donde se pretende usar. Generalmente, este tipo de sistemas cuentan con un armazón exterior de metal sobre el cual se van añadiendo las distintas partes que componen el sistema de desalinización y toda la instrumentación necesaria. La planta se prueba y verifica, tras lo cual es enviado al lugar donde se ha comisionado. Este modo de venta se conoce coloquialmente como *llave en mano*, ya que el resultado es una planta de desalinización lista para funcionar sin que el cliente deba realizar ninguna tarea.

Este tipo de plantas están ampliamente extendidas en poblaciones con un número de habitantes bajo, que precisan soluciones de poco tamaño para abastecer a sus ciudadanos. También son empleadas en situaciones de emergencia o en lugares remotos donde la red de agua no es accesible.

¹Esta clasificación ha sido realizada con base en los criterios establecidos por la empresa *LennTech*, dedicada al tratamiento de aguas. Sin embargo, pueden existir otras clasificaciones por otras empresas con criterios distintos

Las plantas de desalinización portátiles son comunes en caudales de hasta $20 \text{ m}^3/\text{h}$, correspondientes a un tamaño intermedio-grande en aguas de pozo y un tamaño pequeño-grande en aguas de mar.

2. **Plantas *in situ*.** Al contrario que las plantas mencionadas en el apartado anterior, este tipo de plantas son montadas y puestas en marcha en el lugar final donde van a funcionar. Generalmente, esto es debido a que las dimensiones de dicha planta son demasiado grandes para ser transportada. Este tipo de plantas se emplean para abastecer poblaciones o industrias mucho más grandes que las portátiles. En concreto, son ampliamente usadas cuando se pretende desalinizar agua de mar, ya que los equipos necesarios para esta tarea son de gran tamaño y requieren de más potencia que aquellos destinados al tratamiento de otro tipo de agua. Por este motivo, las plantas que se desarrollan para su montaje *in situ* son para caudales grandes.

Debido al gran tamaño de las máquinas, las potencias que manejan y el caudal que mueven, las plantas de este tipo son también susceptibles de emplear dispositivos de recuperación de energía, o *ERD* por sus siglas en inglés. Los *ERD* son dispositivos cuya función es aprovechar la presión disponible en el caudal de rechazo a la salida de las membranas de ósmosis inversa, con el objetivo de reducir las necesidades energéticas del sistema, tal y como se explicará en el Capítulo 5 de este trabajo. Existen diversos tipos de *ERDs*, que operan bajo distintos principios físicos, pero que, de forma general, tienen en común que su punto de funcionamiento está optimizado para caudales grandes. Por otro lado, estos dispositivos son construidos empleando materiales de gran resistencia a la oxidación, que han de ser capaces de aguantar las altas presiones a las que son sometidos. Por tanto, los *ERDs* están generalmente mecanizados en aceros austenoferríticos o dúplex, lo que implica un coste significativo en el presupuesto de una instalación de pequeño tamaño.

La combinación de factores como la optimización para un caudal elevado y el alto coste, así como el gran tamaño que presentan estos dispositivos, hace que la instalación de un *ERD* se presente comúnmente en plantas *in situ* de gran tamaño. Es aquí donde el propósito de este trabajo se ve reflejado: estudiar si existe un sistema de recuperación de energía apto para instalaciones portátiles de tamaño no excesivamente grande.

3.2 Selección de la planta de estudio

En el presente apartado, se selecciona una instalación de desalinización por ósmosis ya existente, con el fin de realizar un análisis fluidodinámico. Para obtener información veraz y fiable sobre la ósmosis inversa, analizar las necesidades energéticas requeridas y diseñar un sistema de recuperación de energía (*ERD*) portátil, se ha decidido recabar datos de una instalación ya existente; en concreto, se ha decidido analizar la planta ETAP (*Estación de Tratamiento de*

Agua Potable) ubicada en Lubrín, municipio de la provincia de Almería (Andalucía).



Figura 3.1.: ETAP *HidroPURE SPOX15*, Lubrín

El razonamiento detrás de la elección de esta planta radica en el caudal que maneja y el tipo de agua que trata. Esta planta (*HidroPURE SPOX15*) ha sido desarrollada por la empresa *Ecohidro*, dedicada al tratamiento de agua de diversos orígenes y con diversas funcionalidades. En concreto, se ha diseñado con el objetivo de tratar agua salobre de baja salinidad (TDS -*Total de Sólidos Disueltos*- $< 3000 \text{ mg/l}$) procedente de agua de pozo.

En relación con su capacidad de producción, la planta *HidroPURE SPOX15* está pensada para el abastecimiento de pequeñas poblaciones, industrias, hoteles y hospitales. Por tanto, tiene el tamaño² adecuado para el propósito de este trabajo: el desarrollo de un sistema de recuperación de energía (*ERD*) portátil y de bajo costo adecuado para instalaciones de bajo caudal de producción. Dentro de la clasificación realizada en el apartado 3.1, se puede observar que esta planta sería de tamaño medio-grande. Esto es debido a que, tal y como se ha explicado anteriormente, el objetivo de este trabajo es estudiar la propuesta de un *ERD* portátil, por lo que la elección de una planta con un caudal demasiado pequeño presentaría retos lo-

²En este contexto, el tamaño de la planta hace referencia a la cantidad de agua potable que es capaz de producir.

gísticos insalvables debido a la imposibilidad de introducir un sistema adicional en un tamaño excesivamente compacto.

Características principales modelo SPOX15

Caudal de entrada	21,4 m ³ /h
Presión de entrada	2 bar
Caudal de agua potable	15 m ³ /h
Presión máxima	12,7 bar
Número de etapas en la ósmosis	2
Número de membranas	3
Caudal de rechazo	6,9 m ³ /h
Dimensiones (m):	
Longitud	5,5
Anchura	2
Altura	2

Tabla 3.1.: Tabla de características

3.3 Características de la planta de desalinización

Con el objetivo de conocer a fondo las características energéticas y fluidodinámicas del sistema es necesario entender las partes que lo componen. Tal y como se puede observar en la figura 3.2, la potabilización del agua se consigue empleando diversas etapas, que se tratarán con mayor detalle a continuación.

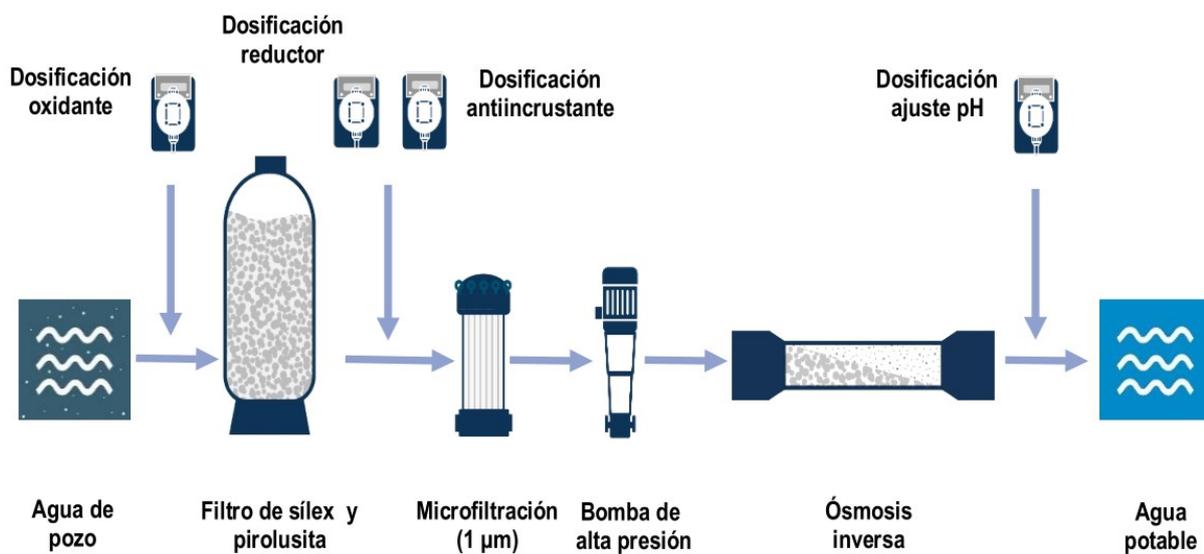


Figura 3.2.: Fases del proceso de desalinización

3.3.1 Pretratamiento

El objetivo de esta fase consiste en eliminar las impurezas presentes en el agua de entrada que puedan dañar los elementos que componen las fases posteriores del proceso de desalinización. Se realiza empleando un filtro de sílex y pirolusita, que es capaz de eliminar mediante catálisis el hierro y el manganeso disueltos en el agua.

3.3.2 Microfiltración

En esta etapa se emplea un filtro de cartucho, con un tamaño de poro de $1 \mu m$, con las siguientes características de eficiencia y presión máxima soportada:

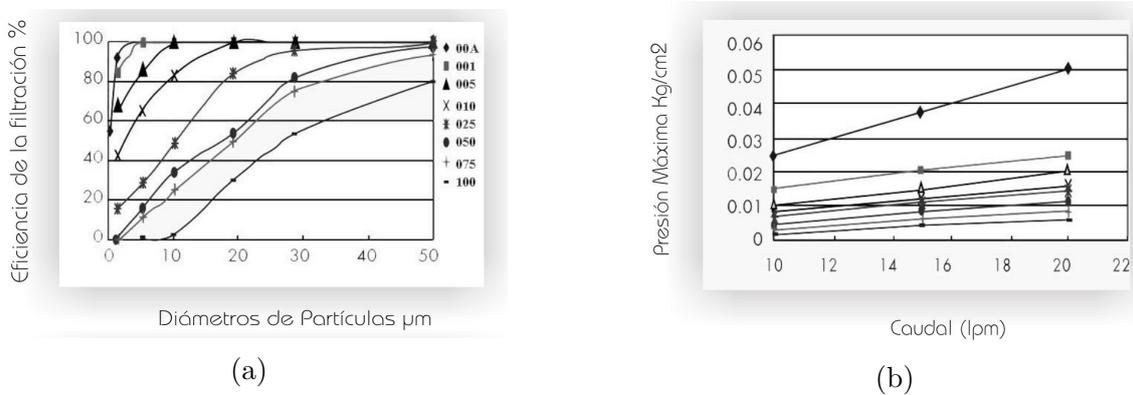


Figura 3.3.: Gráficas de funcionamiento

3.3.3 Bombeo de alta presión

Tal y como se ha explicado en apartados anteriores, para realizar el proceso de ósmosis inversa y conseguir un caudal de agua aceptable es necesario emplear grandes presiones. Dado el tamaño de la planta de estudio, la presión que es necesario conseguir en las membranas es muy inferior a la que normalmente se requiere para realizar el proceso de ósmosis inversa en instalaciones dedicadas a la producción de agua para grandes poblaciones o industrias (llegando a alcanzar los 60 bares de presión en las membranas). Por este motivo, en la planta de Lubrín se ha empleado una bomba capaz de alcanzar 18,3 bares de presión y producir un caudal máximo de $29 m^3/h$.

A continuación, se proporcionan también las curvas de altura de impulsión, eficiencia y NPSH (*Net Positive Suction Head*), respecto al caudal que es capaz de manejar la bomba, para un agua limpia 100% a $4^\circ C$ con $\rho = 1 kg/dm^3$ y $\nu = 1,57 mm^2/s$.

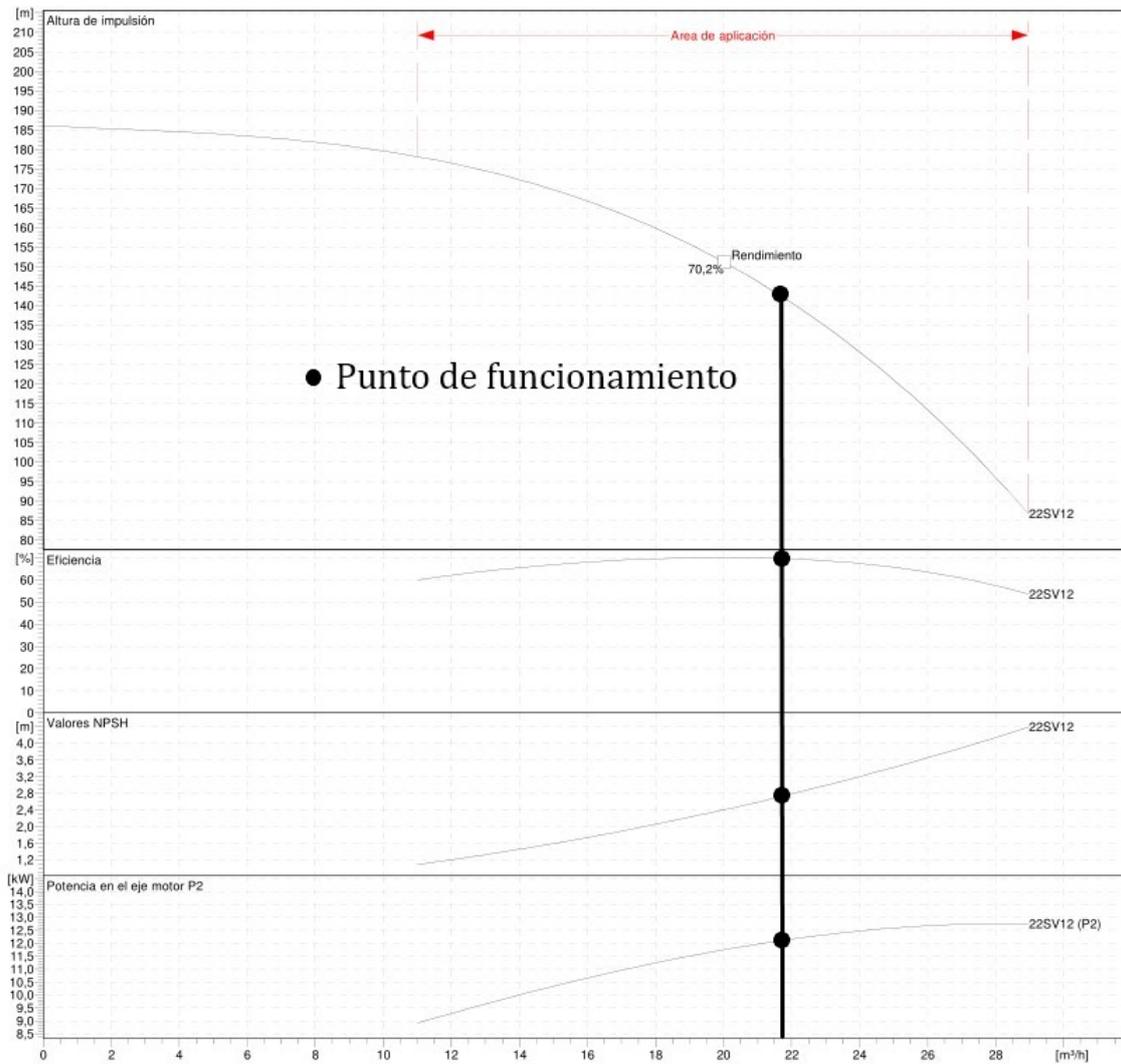


Figura 3.4.: Curvas características de la bomba seleccionada

3.3.4 Membranas de ósmosis inversa

Las membranas de ósmosis seleccionadas, que tienen como objetivo realizar la purificación del agua que se pretende tratar, están hechas de poliamida compuesta, y contiene una capa selectiva de menos de $200 nm$, un soporte microporoso y una tela de respaldo, tal y como se muestra en la Figura 3.5.

Además, la membrana posee una superficie activa de $40,8 m^2$, conformada en una configuración en espiral, conocida en inglés como *SWM (Spiral Wound Module)*, de amplia utilización en sistemas de ósmosis para el tratamiento de aguas. La configuración de las membranas, así como las estructuras que soportan a dichos elementos y el esquema de flujo del agua se ven representadas en la Figura 3.6.

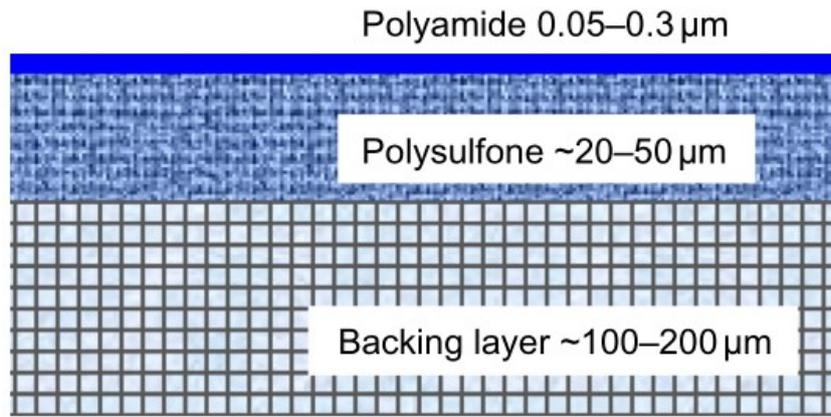


Figura 3.5.: Composición de una membrana de poliamida

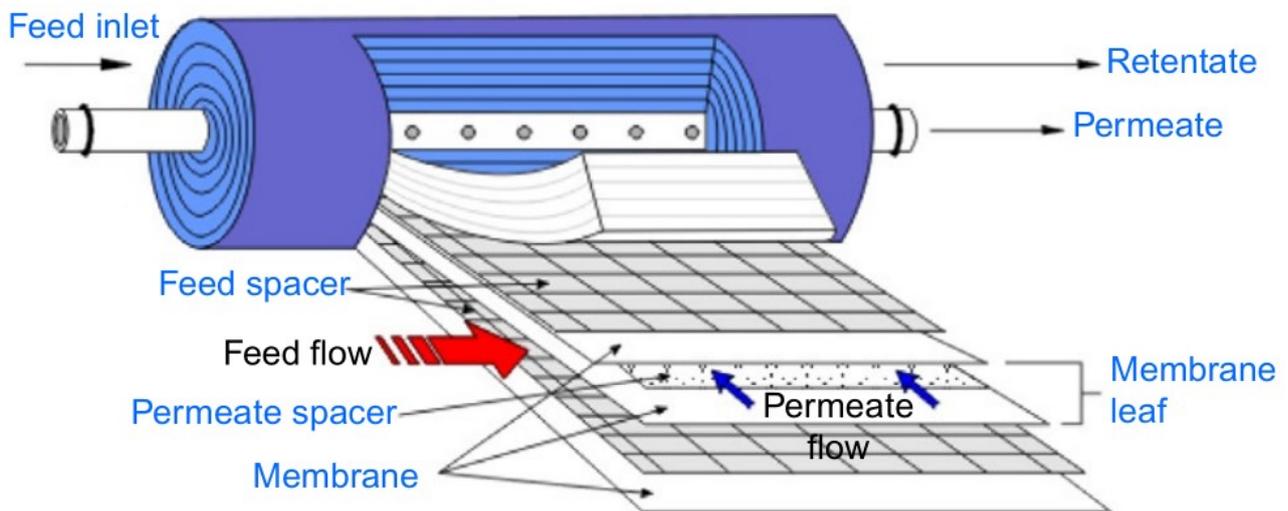


Figura 3.6.: Configuración *SWM*

Asimismo, estas membranas permiten un rechazo de sales del 99,6% y pueden operar a una temperatura máxima de 45°C. Con el objetivo de proteger la integridad, tanto de las membranas de ultrafiltración como las de ósmosis inversa, se han establecido valores máximos para el agua de entrada de la planta, recogidos en la Tabla 3.2.

Parámetro	Valor límite
Turbidez	< 15NTU
Aceite y grasa	< 0,1 mg/l
Cloro	< 0,1 mg/l
DQO	< 10 mg/l
TOC	< 3 mg/l
pH	6,5-8,5
Fe+Mn	< 0,5 mg/l
Boro	< 0.5 mg/l
T ^a Ambiente	0-40°C
T ^a Agua	5-30°C

Tabla 3.2.: Valores límite para el agua de entrada

Estas membranas están dispuestas en cascada, siguiendo una configuración multietapa que permite aprovechar el rechazo a alta presión que produce una membrana, como alimentación de una membrana sucesiva, aumentando así la capacidad de producción del permeado. Se puede observar que a la entrada de la primera etapa se han dispuesto 2 membranas en paralelo, por donde entra el mismo agua de alimentación, aumentando el caudal de rechazo que es suministrado como entrada en la segunda etapa. Este ejemplo se puede visualizar en la Figura 3.7.

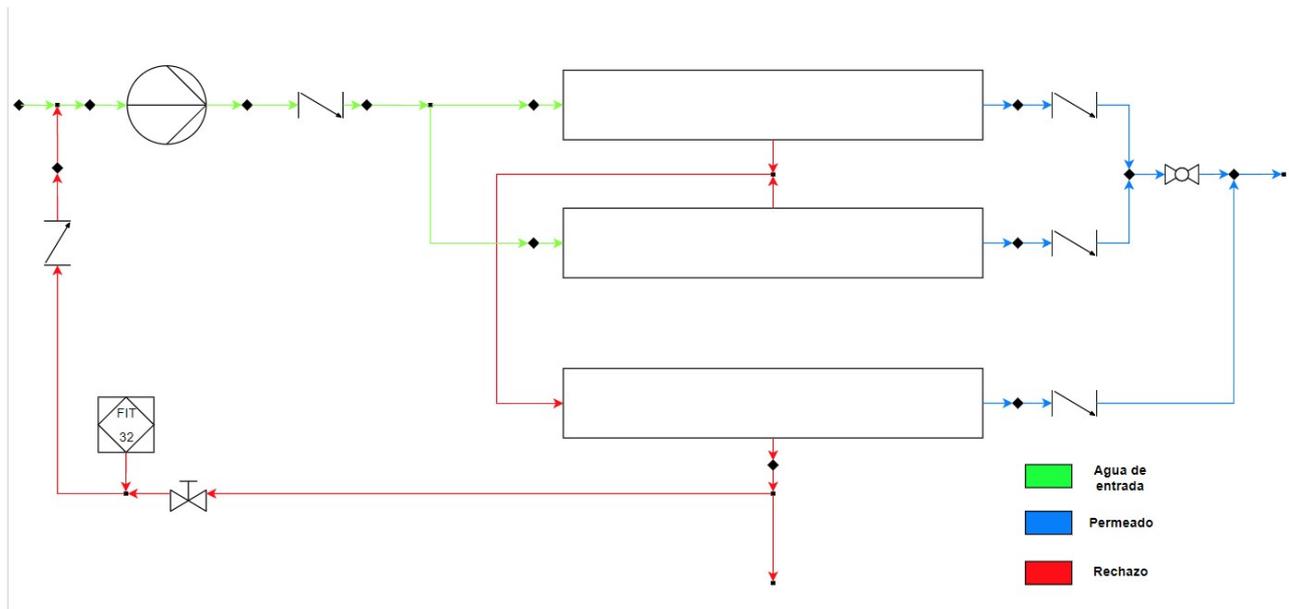


Figura 3.7.: Esquema de las membranas en el proceso de desalinización

En la planta de estudio, esta configuración se ha elaborado empleando 3 etapas, tal y como se observa en el diagrama P&ID de la planta [ver Apéndice A].

Capítulo 4

Modelo fluidodinámico de funcionamiento

4.1 Introducción y selección de puntos

En el presente capítulo, se va a elaborar un modelo fluidodinámico que permita obtener los valores de presión y caudal en determinados puntos de interés de la instalación. El modelo desarrollado aquí será de gran importancia para poder analizar el efecto que tiene la inserción de un sistema de recuperación de energía en la instalación.

La instalación que se va a modelar engloba la bomba de alta presión, las membranas de ósmosis inversa y las tuberías, codos y válvulas que permiten el paso del fluido a través del sistema, tal y como se puede ver en la Figura 4.1. Los elementos que engloban el sistema se han considerado de interés debido a que son los que afectan, principalmente, al proceso de ósmosis inversa y sus requerimientos energéticos; es decir, son los elementos que se verán más afectados por la introducción de un elemento recuperador de energía.

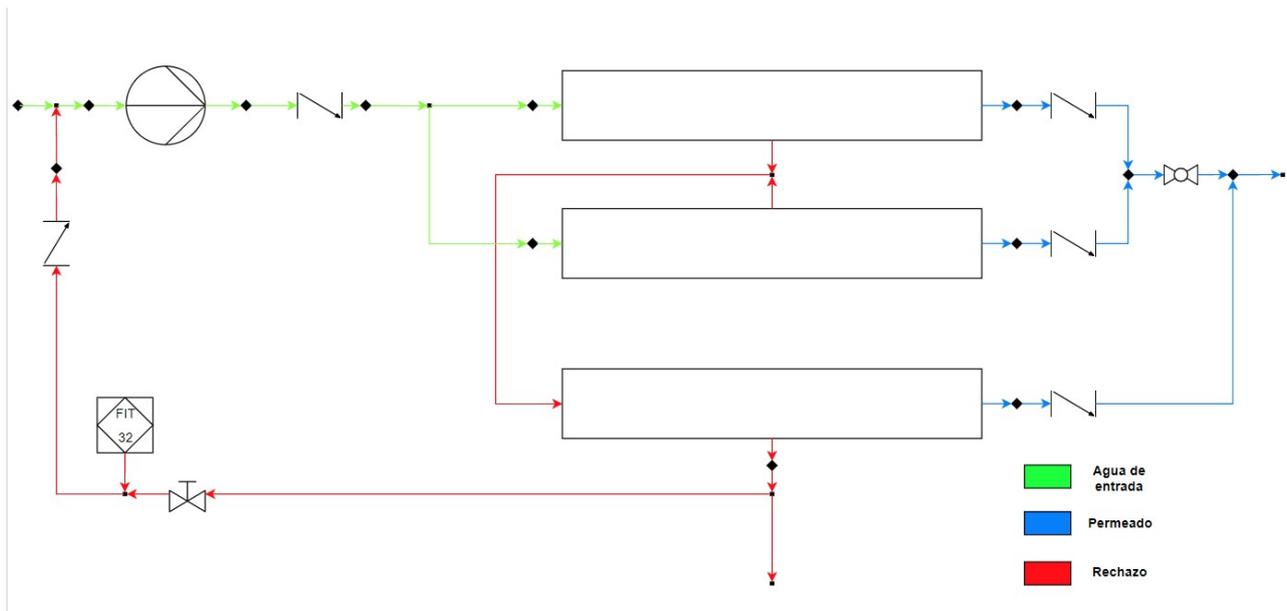


Figura 4.1.: Sistema de estudio

El recorrido que realiza el fluido en el circuito de la Figura 4.1 parte de la entrada de agua de alimentación al sistema. A continuación, este fluido se junta con el rechazo de la segunda etapa de la ósmosis inversa y llega a la entrada de la bomba de alta presión. Aquí, se eleva la presión del agua hasta valores que permitan realizar el proceso de separación por ósmosis inversa. El caudal de agua a alta presión se divide en 2 partes para alimentar 2 membranas en paralelo que conforman la primera etapa de la ósmosis inversa. Tras esta etapa, se consigue un rechazo, que sirve de alimentación a la membrana de la segunda etapa del proceso, y un permeado, que constituye la salida de agua purificada del sistema.

Respecto a la segunda etapa, la membrana produce un rechazo de gran concentración de sales y un permeado que se junta con el permeado de la primera etapa. Por otro lado, el rechazo de la segunda etapa se bifurca: la mayor parte es eliminado de la instalación y sufre un tratamiento para bajar el contenido en sales, pero la otra parte del rechazo se emplea como recirculación del sistema y es retornado a la entrada de la bomba de alta presión. Para desarrollar el dispositivo recuperador que se propone en este trabajo, se tomará como caudal disponible el total del caudal de rechazo que sale de la segunda etapa de la ósmosis inversa.

Por tanto, el objetivo de este capítulo es desarrollar un modelo capaz de explicar los datos de presión y caudal que han sido obtenidos de forma experimental y justificar los datos obtenidos de forma teórica, permitiendo así predecir la evolución del sistema cuando se modifican los parámetros del fluido.

4.2 Ecuaciones de interés y elaboración del modelo fluidodinámico del sistema

4.2.1 Cálculo de pérdidas generalizadas y locales

Como se ha expresado en el apartado anterior, es necesario obtener un modelo fluidodinámico que permita dar soporte a los resultados experimentales recogidos en la figura 4.1. Para ello, se va a recurrir a los apuntes de la asignatura de Ingeniería de Fluidos [11] de 3º de GITI (Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales), en concreto, al tema referido al movimiento turbulento en conductos.

El primer paso en el desarrollo del cálculo de pérdidas generalizadas y locales, es introducir diversas aclaraciones sobre los conceptos y ecuaciones en las que se va a basar la construcción del modelo fluidodinámico:

Debido al carácter turbulento del movimiento del fluido en el interior de las tuberías, así como de cada elemento del sistema, el análisis de la capa límite en las zonas próximas a la pared resulta de gran interés; en concreto, la pérdida de carga ¹ que experimenta el fluido, ya que es la responsable de que la presión varíe en los distintos puntos de referencia. Esta pérdida de carga se puede obtener empleando el *coeficiente de pérdida de presión* o de *Darcy-Weisbach*, que expresa el gradiente de presión adimensionalizado:

$$\lambda = \frac{-dp_0/dx}{\frac{1}{2}\rho U^2/D} = \frac{p_l}{\frac{1}{2}\rho U^2/D} \quad (4.1)$$

Si se relaciona este término adimensional con el perfil de velocidades en la sección del conducto en flujo turbulento y aplicando ciertas relaciones experimentales, tal y como se muestra en *Ingeniería de Fluidos* [11], se obtiene una ecuación que relaciona λ y el número de Reynolds (Re); es decir, relaciona el gradiente de presión adimensional con el caudal:

$$\frac{1}{\lambda^{1/2}} = 2 \cdot \log(Re_D \lambda^{1/2}) - 0,8 \quad (4.2)$$

Si se tiene en cuenta el efecto de la rugosidad del conducto, la expresión a utilizar es más complicada, ya que mediante análisis dimensional se puede deducir que la pérdida de presión depende de dicha rugosidad (k), además de otros diversos parámetros, tal y como se muestra en la ecuación 4.3.

¹Se ha denominado así, en este texto, para hacer referencia a toda pérdida de energía mecánica (presión, energía cinética o potencial gravitatoria) debida al efecto de la fricción con las paredes.

$$p_l = f(D, \mu, \rho, U, k, forma) \tag{4.3}$$

Por tanto, empleando la rugosidad relativa $\epsilon = k/D$, se obtiene que:

$$\lambda = \frac{p_l}{\frac{1}{2}\rho U^2/D} = f\left(\frac{UD}{\nu}, \frac{k}{D}\right) = f(Re, \epsilon) \tag{4.4}$$

Este hecho permite elaborar un diagrama que representa λ para diversos valores de Re y ϵ , denominado *Diagrama de Moody*. Este diagrama es ampliamente empleado en la literatura e industria, ya que permite obtener la pérdida de carga conocido el régimen al que está sometido el fluido (mediante el número de Reynolds) y la rugosidad de la tubería. Si este último dato no fuera conocido, es posible obtenerlo empleando el *Diagrama de Nikuradse*, midiendo la pérdida de carga de forma experimental y viendo qué rugosidad produce esa pérdida en el diagrama.

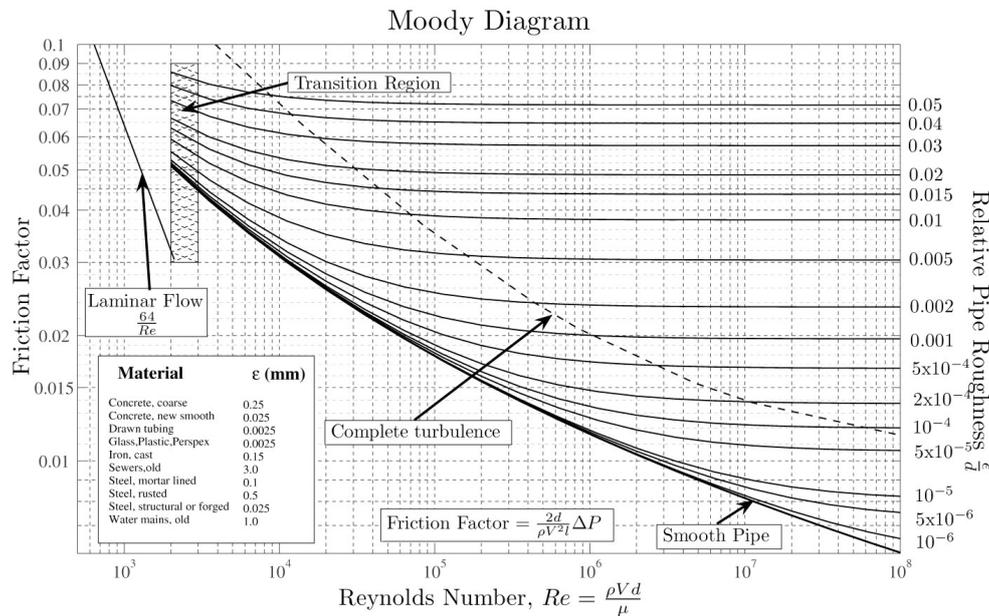


Figura 4.2.: Diagrama de Moody

Como se ha explicado anteriormente, el conocimiento del parámetro λ es empleado para determinar la pérdida de carga que se produce en los conductos de la instalación. Para conocer este resultado, es necesario obtener la ecuación de cantidad de movimiento para fluidos incompresibles.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2}U^2 + \frac{p}{\rho} + U_P \right) = -\frac{\lambda U|U|}{8 r_h} \tag{4.5}$$

Debido a las características del movimiento, se va a considerar que el flujo es estacionario, por lo que $\frac{\partial U}{\partial t} = 0$. A continuación, es necesario integrar dicha ecuación entre 0 y L , siendo L la longitud de la tubería en la que se pretende estudiar la pérdida de carga.

$$\left[\frac{1}{2}U^2 + \frac{p}{\rho} + U_p \right]_0^L = -\frac{Q|Q|}{8} \int_0^L \frac{\lambda(Re(x), \epsilon(x))}{r_h(x)A(x)^2} dx \quad (4.6)$$

Si el área a lo largo de la tubería es constante, también lo será la velocidad U . Si además la rugosidad del conducto ϵ es constante, λ será también constante, por lo que la ecuación anterior se puede transformar en:

$$\left[\frac{p}{\rho} + U_p \right]_0^L = -\frac{\lambda L Q |Q|}{8 r_h A^2} \quad (4.7)$$

En la mayoría de instalaciones, las tuberías son circulares y, por tanto, $A = \frac{\pi D^2}{4}$ y $D = 4r_h$. Además, considerando como única fuerza másica la gravedad, podemos obtener la diferencia de presiones motrices a través de un conducto.

$$(p + \rho g z)_{x=0} - (p + \rho g z)_{x=L} = \frac{8\lambda L \rho Q^2}{\pi^2 D^5} \quad (4.8)$$

Modificando esta ecuación, se puede lograr también la diferencia de alturas equivalentes o carga entre 0 y L , integrarla de forma adecuada y así conseguir relacionar la pérdida de presión motriz (o altura equivalente) con el caudal, el coeficiente de pérdida de presión λ y las características geométricas de la tubería. Si se define la carga o altura equivalente como:

$$gH = \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}U^2 + g z \quad (4.9)$$

Además, se asume que, dado que el caudal que atraviesa la tubería es constante, y la sección de paso no varía, tampoco lo hace la velocidad, por lo que $\Delta U|_0^L = 0$. En consecuencia, la diferencia entre alturas equivalentes o carga se puede expresar de la forma:

$$g\Delta H = \left(\frac{p}{\rho} + g z \right)_{x=0} - \left(\frac{p}{\rho} + g z \right)_{x=L} = \frac{8\lambda L Q^2}{\pi^2 D^5} \quad (4.10)$$

Como se puede observar, es posible expresar la pérdida de carga (en pascales) y la diferencia de alturas equivalentes (en metros) fácilmente, multiplicando o dividiendo por ρ .

Por tanto, la determinación del parámetro λ es de vital importancia, así como conocer con exactitud las características geométricas y fluidodinámicas de la instalación. Con este objetivo, es posible identificar el coeficiente de pérdida de carga con mayor exactitud que empleando el diagrama de Moody de forma gráfica. Esto se consigue utilizando la correlación de Churchill, introducida por Stuart W. Churchill [12] para obtener el parámetro λ en flujo laminar y turbulento de forma numérica, pudiendo elaborar así el diagrama de Moody. Para obtener λ empleando esta fórmula, es necesario calcular 2 parámetros, A y B , para luego introducirlos en el cálculo del coeficiente de pérdida de carga.

$$\begin{aligned}
\lambda &= 8 \left(\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-1,5} \right)^{\frac{1}{12}} \\
A &= \left(2,457 \ln \left(\left(\left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} + 0,27 \frac{k}{D} \right)^{-1} \right) \right)^{16} \\
B &= \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}
\end{aligned} \tag{4.11}$$

Estas correlaciones son de utilidad, ya que permiten determinar el factor λ directamente, únicamente conociendo Re y ϵ . Además, su cálculo es fácil de automatizar en una hoja de cálculo *Excel* [13].

Sin embargo, en cualquier sistema de transporte de fluidos es común encontrar otros elementos además de tuberías rectas. Entre estos elementos se encuentran las válvulas, los codos, los cambios bruscos de sección o las rejillas. Debido a que los elementos mencionados modifican la trayectoria y condiciones del fluido, introducen también una pérdida de carga, tal y como lo hacía el efecto de la fricción en las paredes de un conducto. Esta pérdida de carga se cuantifica empleando un coeficiente de pérdida local, K , único para cada elemento. El modo de obtención de este coeficiente varía de un elemento a otro y algunos ejemplos y tablas pueden encontrarse en [11].

Una vez obtenido el valor de K para un elemento concreto, basta con multiplicar dicho coeficiente por la presión dinámica del flujo para obtener la pérdida de carga localizada, tal y como se muestra en la ecuación 4.12.

$$\Delta \left(\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} U^2 + gz \right) = -K \frac{1}{2} U^2 \tag{4.12}$$

4.2.2 Cálculo de la altura manométrica comunicada por la bomba de alta presión

Tal y como se ha expresado en apartados anteriores, el empleo de la ósmosis inversa requiere de altas presiones para forzar el flujo de agua rica en iones a través de las membranas. Así se obtiene, por un lado, el agua purificada y, por otro, el rechazo de elevada concentración en sales. Para ello, se emplea una bomba de alta presión, cuyas características pueden encontrarse en el apartado 3.3.3 de este trabajo.

De forma teórica, la altura de impulsión o altura manométrica se define como:

$$gH_m = \left(\frac{p}{\rho} + \frac{\nu^2}{2} + gz \right)_e^s \quad (4.13)$$

Siendo $\frac{p}{\rho}|_e^s$ la variación de presión comunicada al fluido, $\frac{\nu^2}{2}|_e^s$ la variación de energía cinética y $gz|_e^s$ la variación de energía potencial. En el caso de la bomba que se presenta en la instalación, esta no posee diferencia de cotas entre la salida y la entrada; de la misma forma, el caudal tra-segado y el diámetro de entrada y salida es el mismo; por lo que no existirá variación de energía cinética o potencial. La energía comunicada al fluido por la bomba se traduce únicamente en un aumento de presión.

Para caracterizar una bomba, comúnmente se emplea su curva característica (Figura 3.4) que representa, para un régimen de giro determinado, diversos valores de caudal y altura manométrica comunicada. Esta curva se elabora a partir de principios de Semejanza Física [11] para bombas semejantes.

$$\Delta P = f(\rho, \mu, Q, \Omega, D, L, \alpha, k) \quad (4.14)$$

$$\frac{gH_m}{\Omega^2 D^2} = \varphi_1 \left(\frac{Q}{\Omega D^3} \right)$$

Por tanto, de forma teórica, obteniendo el caudal que se pretende bombear, es posible conocer la altura que se le va a comunicar al fluido. Sin embargo, en la práctica, este cálculo difiere de lo esperado, en muchas ocasiones, para los valores de la curva característica. Esto es debido a que la bomba es alimentada por un motor trifásico. Este motor consume energía de la red que se encuentra, normalmente, a 220V de tensión y con una frecuencia de 50Hz. Si la bomba se alimenta con esa tensión y frecuencia, se pondrá en funcionamiento con un régimen de giro determinado, representado en la figura 3.4.

Sin embargo, si se pretende variar el régimen de giro de la bomba y, por tanto, la altura que es capaz de comunicar, es necesario variar la frecuencia de alimentación de la misma. Esto se consigue con un variador de frecuencia: un dispositivo electrónico que es capaz de convertir una determinada tensión de entrada a una frecuencia dada, en una tensión con una frecuencia distinta en la salida. Esto se consigue mediante la implementación de transistores de potencia denominado tiristores, que regulan su apertura o cierre en función de un circuito de control, y que producen una onda cuadrada de valor medio variable, que depende del tiempo de apertura o cierre de los tiristores. El valor medio de la onda cuadrada de salida se asemeja a una señal sinusoidal, de frecuencia distinta a la de entrada, que es suministrada entonces al motor trifásico de la bomba.

Esta variación de frecuencia modifica el régimen de giro de la bomba, que se traduce en una variación de la curva característica; es decir, la modificación de la frecuencia de alimentación se traduce en un desplazamiento de la curva característica hacia abajo o hacia arriba, variando

la altura manométrica que se proporciona al fluido para un caudal de entrada.

Este mecanismo se utiliza para corregir las condiciones de entrada del agua a la bomba. En una instalación real que toma agua de un pozo, como es el caso del sistema analizado en Lubrín, es correcto asumir que las condiciones del agua en dicho pozo varían con el tiempo. La variación de las características del agua puede deberse principalmente a 3 motivos:

1. Aumento o disminución de la viscosidad del agua como consecuencia de la variación en la temperatura.
2. Variación de la concentración de sales y compuestos químicos en el pozo de admisión. Este efecto se ve potenciado en zonas agrícolas donde la lixiviación de productos de riego puede alterar las características del agua del pozo de donde se está extrayendo agua para su purificación mediante ósmosis inversa.
3. Disminución del nivel de agua en el pozo, variando las condiciones de admisión de la bomba y modificando, por tanto, el punto de funcionamiento.

Esta variación se traduce en una modificación de las necesidades de la planta para llevar a cabo la ósmosis inversa de un modo eficaz.

El variador de frecuencia permite asignar una presión consigna a la salida de la bomba y variar la frecuencia de alimentación del motor de la bomba para conseguir comunicar la energía necesaria al fluido con el fin de conseguir el salto de presiones deseado. Este hecho hace que la predicción de la altura manométrica que comunica la bomba, en función del caudal, no sea relevante, ya que la presión consigna a la salida de la bomba será constante siempre. Por ese motivo, existe una discrepancia entre las curvas características de la bomba dadas por el fabricante (a 50 Hz) y las curvas que se obtendrían en un instante determinado de operación de la planta. Esta diferenciación está motivada por el cambio en la frecuencia de alimentación de la bomba, que se traduce en una variación de la velocidad de giro del rodete. Este hecho se puede apreciar en la Figura 4.3, donde se modifica el punto de funcionamiento de la bomba debido al cambio en la velocidad proporcionado por el variador de frecuencia.

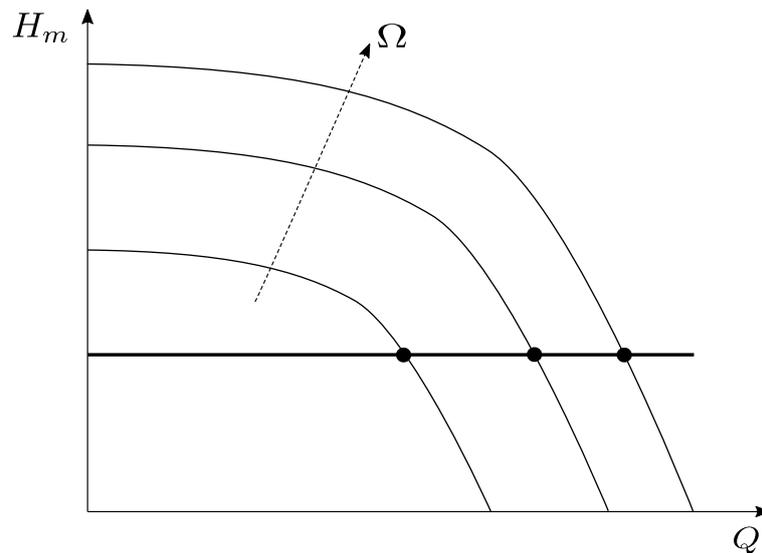


Figura 4.3.: Modificación de la curva característica debido al variador de frecuencia

4.2.3 Cálculo de la pérdida de carga en membranas

Al principio de este capítulo, se ha hablado de la pérdida de carga que experimenta un fluido en su paso a través de una conducción o de un elemento especial que suscite variaciones en el flujo. Como cabe esperar, el paso forzado a través de las membranas de ósmosis inversa implica una pérdida de carga importante. Por tanto, la entrada de agua a alta presión en las membranas se convierte en la salida del permeado a baja presión y un rechazo a presión ligeramente más baja que la entrada.

Sin embargo, cuantificar de forma teórica la caída de presión en las membranas es un procedimiento excesivamente complicado, debido a que depende de la temperatura en el instante de análisis, la concentración de sales en el agua, el área efectiva de intercambio de las membranas, el número de membranas y el ensuciamiento y envejecimiento de las mismas. Además, en configuraciones multietapa (como en el caso de la planta de ósmosis inversa seleccionada), las membranas de etapas sucesivas no están sometidas a la misma carga que las membranas iniciales, ya que el agua de alimentación a la entrada es el resultado del rechazo de membranas anteriores.

Adicionalmente, existe una invariabilidad en la pérdida de presión en el rango de presiones y caudales de diseño para los que ha sido creada la membrana. Debido a esto, resulta lógico considerar una pérdida constante entre la entrada y la salida del sistema de ósmosis inversa. Estos datos son proporcionados por el fabricante como parte de la ficha técnica de la membrana y están alrededor de 1 bar para las membranas de la primera etapa, y 1,5 bar para las membranas de la segunda etapa. Si se quisiera conocer la pérdida de carga por membrana, bastaría por dividir la pérdida total entre el número de membranas.

No obstante, los datos proporcionados por el fabricante son para membranas completamente nuevas y sin ningún deterioro ni desperfecto. Cuando las membranas se ensucian, debido a la polarización de la concentración (fenómeno explicado en el capítulo 2 de este trabajo), el valor de pérdida de carga aumenta significativamente debido a que se dificulta considerablemente el paso del agua a través de la membrana. De hecho, el aumento de esta caída de presión es síntoma del mal estado de una membrana.

De la misma forma, el envejecimiento de la membrana también repercute en la capacidad de filtración de la misma. En este caso, cuando se deteriora, pierde su capacidad de retención y, por tanto, la membrana es menos efectiva, produciendo agua de menor calidad. Debido a que el flujo del agua está menos impedido en este caso, la pérdida de carga que se puede observar a través de una membrana envejecida o dañada es muy baja o nula. Este parámetro, junto a la concentración de sales en el permeado, proporciona información acerca del estado de la membrana.

Por tanto, la pérdida de carga en una membrana se puede cuantificar mediante 2 factores: el factor de ensuciamiento (f_s) y el factor de envejecimiento (f_e). Debido al efecto que estos factores tienen sobre la pérdida de presión en las membranas, se puede realizar la siguiente distinción: $f_s \geq 1$ y $0 \leq f_e \leq 1$. Si una membrana se encuentra muy envejecida $f_e \approx 0$; en cambio, en una membrana nueva $f_e \approx 1$. En contraposición, en una membrana nueva $f_s \approx 1$, y en una membrana sucia $f_s > 1$. Es decir; cuanto más sucia está una membrana, mayor es f_s ; cuanto más envejecimiento presenta la membrana, menor será f_e .

En consecuencia, la pérdida de carga en membranas se puede modelizar en función de la presión base y de los 2 parámetros considerados anteriormente.

$$\Delta P_m = \Delta P_{nom} f_e f_s \quad (4.15)$$

Siendo ΔP_{nom} la pérdida de carga proporcionada por el fabricante para el rango de diseño y f_e y f_s los parámetros mencionados anteriormente.

Sin embargo, a pesar de que la ecuación 4.15 muestra la caída de presión global, es importante mencionar que el factor de ensuciamiento f_s no es el mismo para las membranas de etapas distintas. Esto es debido a que, como se ha comentado anteriormente, la entrada de una membrana en la etapa i es el rechazo de otra membrana de la etapa $i - 1$. Por tanto, la entrada en la etapa i contendrá una cantidad de sales disueltas considerablemente superior a la entrada en la etapa $i - 1$, por lo que el ensuciamiento será mucho mayor.

La evolución de los factores f_e y f_s , a lo largo del tiempo, lleva a una conclusión llamativa: debido a que f_e evoluciona de forma inversamente proporcional a la edad de la membrana y f_s lo hace de forma directamente proporcional, existe un equilibrio, a lo largo del tiempo, entre ambos factores; es decir, cuando aumenta f_s , disminuye f_e , compensando de forma global la caída de presión en la membrana y haciendo que para todo instante de tiempo $\Delta P_m \approx \Delta P_{nom}$.

Por tanto, en virtud de este hecho, considerar una caída de presión constante en las membranas es una suposición aceptable.

4.2.4 Desarrollo del modelo

Una vez se han determinado las ecuaciones que se van a utilizar para calcular la pérdida de carga generalizada y local, así como la altura comunicada por la bomba y la caída de presión en las membranas, es posible elaborar el modelo fluidodinámico en detalle que permita conocer la presión y el caudal del fluido en la instalación (ver Figura 4.4).

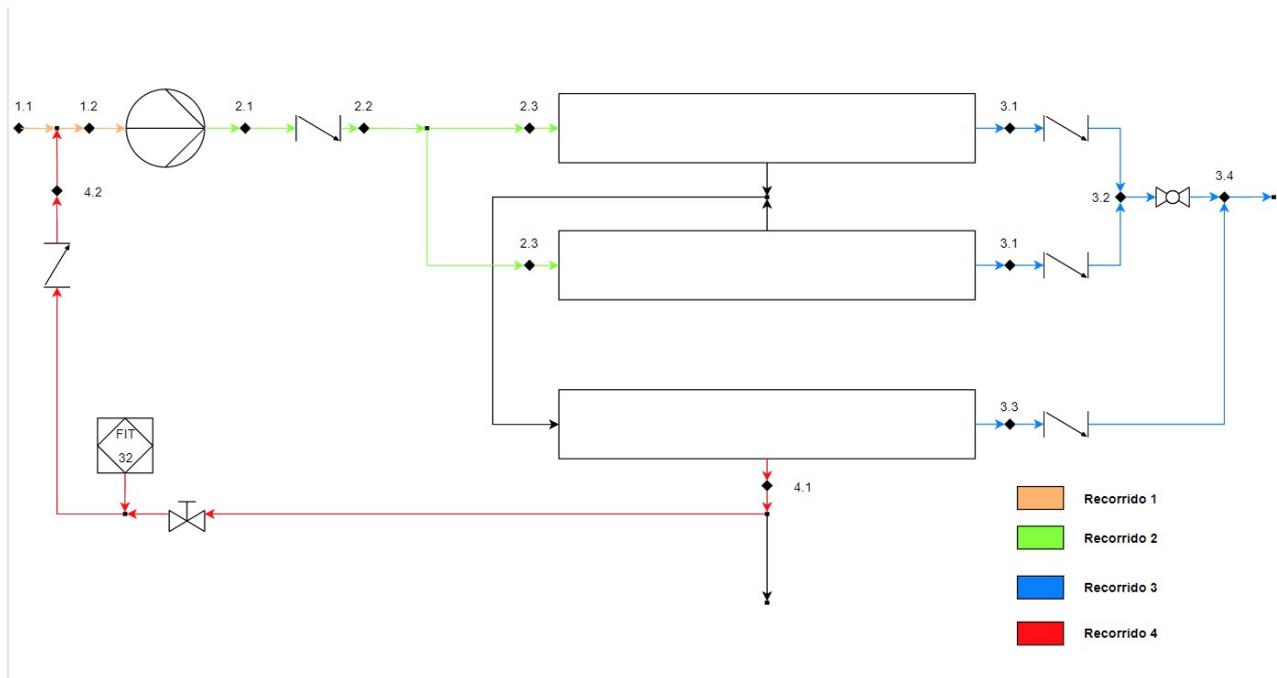


Figura 4.4.: Puntos de interés para el desarrollo del modelo fluidodinámico

Para entender la evolución del fluido en el sistema, es necesario dividir el modelo en distintas partes manejables. Con este objetivo, se han propuesto 4 recorridos que dividen la instalación: el recorrido desde la entrada al sistema hasta la entrada a la bomba (*Recorrido 1*), la salida de la bomba a la entrada de las membranas (*Recorrido 2*), la unión del permeado de la primera etapa con el permeado de la segunda etapa (*Recorrido 3*) y el acoplamiento de la salida del rechazo de la segunda etapa con la entrada de la bomba (*Recorrido 4*). Merece la pena destacar que no se ha considerado como recorrido la distancia desde la salida de la salmuera de la primera etapa hasta la entrada a la segunda etapa (tramo en color negro en la Figura 4.4). Esto se debe a que, en la instalación real, la distancia entre la primera etapa y la segunda es muy pequeña.

En estos 4 recorridos, se han identificado diferentes puntos de interés, que representan la entrada o salida de elementos característicos, como bombas o membranas, o que sirven como medida para la estimación de las características del flujo en un tramo de tubería. Estos puntos han sido codificados como *Punto Recorrido.Numero* (por ejemplo, *Punto 1.1*) y pueden ser teó-

ricos (elaborados a partir de las ecuaciones expresadas en secciones anteriores) o experimentales (obtenidos a partir de la sensorización de la planta de estudio).

Una vez realizada esta codificación, es conveniente estudiar qué elementos conforman cada uno de los recorridos: la longitud de las tuberías por las que circula el fluido, la presencia de codos, ensanchamientos o válvulas, la rugosidad del material empleado en el transporte, el diámetro de los conductos, entre otros parámetros (ver Apéndice B). Todos estos datos, junto con las ecuaciones expuestas en apartados anteriores, permiten conocer los caudales y presiones en cada punto del circuito. Para esta labor, se van a identificar los elementos del circuito entre los puntos de estudio, denominados como *Tramo Punto 1-Punto 2* (por ejemplo *Tramo 1.1-1.2*).

Con el objetivo de determinar las pérdidas que se dan en cada tramo, es necesario obtener tanto el parámetro λ para las pérdidas en tuberías, como las K para cada elemento que produzca pérdidas localizadas. Para explicar el procedimiento realizado y cómo se han obtenido los datos de presiones teóricas, se va a proceder a desarrollar el cálculo para las pérdidas de carga en el *Tramo 1.1-1.2*, que pertenece al *Recorrido 1: Entrada a la bomba*.

En primer lugar, gracias a los sensores situados en la planta, es posible conocer que el caudal que circula a través de este tramo es de $21,4 m^3/h$. Por otro lado, este tramo está compuesto por tuberías de PVC, con una rugosidad absoluta de $0,02 mm$ [11]. El tramo se inicia con un diámetro de tubería de $60 mm$, que posteriormente se ensancha hasta los $75 mm$. Este valor se mantiene constante en el resto del tramo. Estos datos han sido obtenidos a partir del diagrama *P&ID* de la instalación (Apéndice A). Para completar los datos que se conocen del tramo, es necesario apuntar que, como cabría esperar, se han medido las longitudes de las tuberías rectas, así como la posición de los diversos elementos de medida presentes y las características del agua ($\rho = 1000 kg/m^3$, $\mu = 0,947 * 10^{-3} Ns/m^2$ y $T = 20^\circ C$).

Pérdidas en el Recorrido 1			
Tramo 1.1-1.2		$Q = 21,4 m^3/h$	
Elemento	λ	K	$\Delta P (Pa)$
Cambio de sección		0,18	397,81
T		1,2	1086,3
Válvula Bola			0,00
Codo		1,12	1013,88
Longitud de codo	0,019		34,23
Tubería recta	0,019		19,49
Antirretorno			600,00
Tubería recta	0,019		19,49
Codo		1,12	1013,88
Longitud de codo	0,019		34,23
Tubería recta	0,019		29,81
T		1,2	1086,3
Tubería recta	0,019		20,64
Manómetro			
TOTAL			5356,065

Como se puede observar, en el *Tramo 1.1-1.2* existen tuberías rectas y elementos que producen pérdidas locales, como codos, T's, diversos tipos de válvulas o cambios de sección.

Por otro lado, para conocer a fondo los elementos que introducen pérdidas localizadas, como codos o válvulas antirretorno, es necesario recurrir a los catálogos que proporcionan los fabricantes. En concreto, en este tramo, se emplean tuberías de PVC, proporcionadas por el fabricante *CEPEX* [14]. En las fichas técnicas de las piezas se proporcionan las medidas de cada una de las partes de los codos y T's, en función de su diámetro nominal. Del mismo modo, el fabricante aporta las constantes K de cada elemento en función de su diámetro. Este dato es el que se empleará para obtener la pérdida de carga en cada uno de estos elementos.

El único dato restante para poder completar el modelo fluidodinámico es el parámetro λ , que servirá para conocer las pérdidas en una longitud de tubería. Como se ha comentado en apartados anteriores, la obtención de λ se realiza a partir del diagrama de Moody. Este diagrama tiene como entradas la rugosidad relativa ϵ y el número de Reynolds, Re .

Para dar a conocer el método de cálculo realizado y la utilización de los datos disponibles, se va a desarrollar, de forma detallada, el cálculo para obtener la pérdida de presión en el primer codo del tramo, así como en la primera tubería recta del mismo:

1. **Tubería recta.** Para la primera tubería recta que nos encontramos en el *Tramo 1.1-1.2*, que produce una pérdida de $19,4930 Pa$, es necesario obtener el parámetro λ . Como se ha explicado, para conocer este valor es necesario obtener el número de Reynolds (Re) y la rugosidad relativa (ϵ). Con los datos proporcionados en los párrafos anteriores, se pueden desarrollar las expresiones y sustituir los datos para llegar a los resultados:

$$\begin{aligned}
 Re &= \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{4\rho Q}{\pi D \mu} = \\
 &= \frac{4 * 1000[kg/m^3] * 21,4[m^3/h]}{3600 * \pi * 75[mm] * 0,001 * 0,947[Ns/m^2 * 10^3] * 0,001} = 106563,91
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

$$\epsilon = \frac{R[mm]}{D[mm]} = \frac{0,02}{0,075} = 0,000267$$

Con estos valores y observando el diagrama de Moody (Figura 4.2), se puede concretar que $\lambda = 0,019$. Para corroborar este resultado, se puede emplear la correlación de Churchill (Ecuación 4.11) con el número de Reynolds y la rugosidad relativa obtenida, de donde se obtiene que $\lambda = 0,019$.

Obtenido el parámetro λ , así como los datos geométricos de la instalación y las condiciones del fluido, es posible calcular las pérdidas que se dan en la tubería. Para ello, se hace uso de la Ecuación 4.8.

$$\begin{aligned}\Delta P &= \frac{\lambda * L[cm] * 0,01 * 8 * \rho[kg/m^3] * Q^2[m^3/h]}{(D[mm] * 0,001)^5 * \pi^2 * 3600^2} \\ &= \frac{0,019 * 8,5 * 0,01 * 8 * 1000 * 21,4^2}{(75 * 0,001)^5 * \pi^2 * 3600^2} = 19,4930 Pa\end{aligned}$$

Como se puede observar, el valor calculado coincide con el expresado en la tabla de Pérdidas en el *Recorrido 1*.

2. **Codo.** Para obtener las pérdidas en el codo es necesario hacer uso de la Ecuación 4.12. En esta ecuación se requiere de los datos de la velocidad del fluido (o, en su defecto, del caudal y del área de paso) y del parámetro K . Según la bibliografía ² escogida [11], para un codo de PVC de diámetro nominal 75mm, le corresponde una $K = 1,12$.

Con este parámetro y el caudal y diámetro de la tubería es posible aplicar la ecuación descrita anteriormente y obtener:

$$\Delta P = K \frac{1}{2} U^2 = \frac{K * 8 * \rho[kg/m^3] * Q[m^3/h]^2}{(D[mm] * 0,001)^4 * \pi^2 * 3600^2} = \frac{1,12 * 8 * 1000 * 21,4^2}{(75 * 0,001)^4 * \pi^2 * 3600^2} = 1013,8781 Pa$$

Como se puede observar, obteniendo los datos geométricos de las tuberías, así como su caudal y los parámetros λ y K propios de cada elemento, es posible calcular todas las pérdidas del sistema y obtener la presión en todos los puntos.

Para los demás tramos de los recorridos del sistema, se puede proceder de forma similar: obteniendo las pérdidas de carga que permiten calcular la presión en cada punto. Este procedimiento se enuncia en las tablas siguientes, indicando el recorrido al que pertenece el tramo, los puntos que forman cada tramo y los elementos que componen dicho tramo, así como la pérdida de carga que producen.

Pérdidas en el Recorrido 2 $Q = 21,9 m^3/h$							
Tramo 2.1-2.2				Tramo 2.2-2.3			
Elemento	λ	K	$\Delta P (Pa)$	Elemento	λ	K	$\Delta P (Pa)$
Tubería recta	0,023		204,07	Tubería recta	0,023		11,99
Ensanchamiento		0,45	1041,55	T		1,2	245,86
Codo		0,24	49,17	Longitud de T	0,023		6,66
Longitud de codo	0,023		12,25	Tubería recta	0,023		21,42
Tubería recta	0,023		19,28				
Manómetro							
TOTAL							1612,256

Como se puede observar, en este tramo existen bifurcaciones (T 's) que producen pérdidas

²Se ha hecho uso de datos bibliográficos en lugar de datos del fabricante debido a que este último proporciona solo datos geométricos y presiones máximas de operación.

locales de carga. Se puede observar que se ha tenido en cuenta la longitud de dichos codos como pérdidas producidas por una tubería, con un parámetro λ propio.

Pérdidas en el Recorrido 3			
Tramo 3.1-3.2		$Q = 10, 2 m^3/h$	
Elemento	λ	K	$\Delta P (Pa)$
Tubería recta	0,022		119,11
T		1,2	1249,36
Longitud de T	0,022		104,45
Antirretorno			800
Tubería recta	0,022		137,43
Tubería recta	0,022		251,95
T		1,2	1249,36
TOTAL			3911,650

Es conveniente mencionar que, en este tramo, al igual que en el *Tramo 1.1-1.2*, existe una válvula antirretorno que produce una pérdida de presión importante respecto a las pérdidas por tramos de tuberías. Para obtener la K de este elemento, se ha recurrido de nuevo a los parámetros que proporciona el fabricante [14].

Pérdidas en el Recorrido 4			
Tramo 4.1-4.2		$Q = 0, 5 m^3/h$ ¹²³	
Elemento	λ	K	$\Delta P (Pa)$
Tubería recta	0,024		6,51
T		1,2	226,83
Longitud de T	0,024		14,79
Tubería recta	0,024		56,74
Codo		0,27	51,04
Longitud de codo	0,024		15,85
Tubería recta	0,024		112,54
T		1,2	226,83
Tubería recta	0,035		3,92
Codo		0,22	8,80
Longitud de codo	0,035		4,69
Tubería recta	0,035		17,93
Válvula Aguja		2289,79	91656
Tubería recta	0,035		58,28
Codo		1,12	44,83
Longitud de codo	0,035		3,7
Tubería recta	0,035		7,00
Codo		1,12	44,83

Continúa en la siguiente página

<i>Continuación de la página anterior</i>			
Elemento	λ	K	ΔP (Pa)
Longitud de codo	0,035		3,7
Tubería recta	0,035		9,81
Codo		1,12	44,83
Longitud de codo	0,035		3,7
Tubería recta	0,035		7,00
Codo		1,12	44,83
Longitud de codo	0,035		3,7
Cambio sección		0,18	17,59
Tubería recta	0,033		158,31
Caudalímetro			
Tubería recta	0,033		19,93
Codo		1,12	109,45
Longitud de codo	0,033		14,37
Cambio sección		0,18	17,59
Tubería recta	0,035		6,16
Codo		1,12	44,83
Longitud de codo	0,035		3,7
Tubería recta	0,035		20,73
Antirretorno			100,00
Tubería recta	0,035		43,43
Codo		1,12	44,83
Longitud de codo	0,035		3,7
Codo		1,12	44,83
Longitud de codo	0,035		3,7
T		1,2	48,03
Tubería recta	0,035		7,56
TOTAL			93387,476

El último recorrido, *Recorrido 4*, es el que posee la mayor cantidad de elementos de pérdida de presión. Por tanto, cabría esperar que se produjera una gran pérdida de presión debido al elevado número de tuberías, codos y T's presentes. Sin embargo, gracias al bajo caudal que circula a través de este recorrido, las pérdidas de carga son insignificantes, a excepción de la caída producida por la válvula de aguja. Como se puede observar, la válvula de aguja produce

¹²³ $Q = 6,9 \text{ m}^3/\text{h}$ en los 8 primeros elementos del *Recorrido 4*, ya que se encuentran antes de la bifurcación.

una caída de 9 bar, la mayor parte de la caída total del tramo. Esta caída se realiza para que se adapte la presión del rechazo de la segunda etapa con la entrada a la bomba de alta presión. Nótese que, mientras que en otros recorridos se han empleado válvulas de bola, este es el único tramo en el que se utiliza una válvula de aguja, ya que este tipo de elementos están diseñados específicamente para la regulación de carga.

Una vez conocidas las pérdidas que provocan, en cada tramo, los distintos elementos, se puede realizar una tabla resumen indicando los puntos característicos del sistema, el tipo de dato y los valores de presiones y caudal:

Recorrido 1: Entrada a la bomba				
Punto	Descripción	Tipo de dato	Presión (bar)	Caudal (m^3/h)
1.1	Manómetro	Experimental	2	21,4
1.2	Entrada a la bomba	Calculado	1,4	21,9

Recorrido 2: Salida de la bomba-Entrada a las membranas				
Punto	Descripción	Tipo de dato	Presión (bar)	Caudal (m^3/h)
2.1	Salida de la bomba	Fijado por el sistema	13	21,9
2.2	Manómetro	Experimental	12,7	21,9
2.2	Manómetro	Calculado	12,9	21,9
2.3	Entrada a las membranas	Calculado	12,8	21,9

Recorrido 3: Unión del permeado de la primera etapa y la segunda				
Punto	Descripción	Tipo de dato	Presión (bar)	Caudal (m^3/h)
3.1	Permeado de la primera fase	Experimental	1,5	10,2
3.2	Unión de los permeados etapa 1	Calculado	1,1	10,2
3.3	Permeado de la segunda fase	Experimental	1	4,8
3.4	Unión de los permeados etapa 1 y 2	Experimental	1	15
3.4	Unión de los permeados etapa 1 y 2	Calculado	1,1	15

Recorrido 4: Salida del rechazo de la segunda etapa-Entrada de la bomba				
Punto	Descripción	Tipo de dato	Presión (bar)	Caudal (m^3/h)
4.1	Rechazo de la segunda etapa	Experimental	10	6,9
4.1	Rechazo de la segunda etapa	Calculado	10,3	6,9
4.2	Entrada a la bomba	Experimental	1	0,5

Puede observarse que existen 2 tipos de valores para varios puntos: un valor experimental, que arrojan los sensores de la planta, y un valor calculado, que ha sido obtenido mediante el cálculo de pérdidas expuesto en este apartado. En estos casos, como en el punto 2.2 o 3.4, puede verse que el método elaborado es correcto, ya que proporciona resultados muy parecidos a los experimentales. El conjunto de puntos donde se ha podido comparar el modelo analítico con el teórico se ha representado en azul. Es conveniente mencionar que la similitud entre puntos calculados y experimentales no se limita solo a un tramo en específico, sino que permanece a través de los diferentes tramos en los que se ha dividido la instalación. Esto indica que el

modelo desarrollado es consistente para todas las partes de la instalación, independientemente del número de elementos o la geometría de los mismos. Por tanto, se asume que el método de cálculo que se ha llevado a cabo es correcto debido a la similitud en los datos y la consistencia de los mismos.

Por otro lado, existen otros tipos de puntos, como el 1.2, donde no se disponen de datos experimentales, pero es necesario obtener la presión en este punto. En contraposición, puntos como el 2.2 o el 1.1 son imposibles de conocer a priori de forma teórica, por lo que, para modelizar el sistema, solo es posible utilizar datos experimentales.

Capítulo 5

Estudio de sistemas de recuperación

5.1 Introducción

En este capítulo, se pretende analizar el propósito de los sistemas de recuperación de energía, así como los diversos tipos de sistemas que existen en la actualidad y que, comúnmente, se implantan en las plantas de desalinización por ósmosis inversa.

Un sistema de recuperación de energía, o *ERD* por sus siglas en inglés, es un dispositivo cuyo objetivo consiste en aprovechar la energía, en forma de presión, que posee el flujo de rechazo que abandona las membranas, tal y como se ha explicado en apartados anteriores. El aprovechamiento de la energía que posee la corriente de rechazo se emplea, generalmente, para reducir las necesidades energéticas de la instalación; en concreto, se destina la mayor parte de la energía recuperada a reducir las necesidades de la bomba de alta presión, que es el elemento de mayor consumo energético. Para conseguir esto, el recuperador de energía puede reducir la energía eléctrica que demanda la bomba, transformando la presión del rechazo en energía cinética y, posteriormente, en electricidad por medio de un generador; o bien el recuperador puede presurizar el caudal de entrada a las membranas de ósmosis inversa, reduciendo el salto de presiones requerido por la bomba de alta presión o aumentando el caudal de entrada y, por tanto, la eficiencia.

5.2 Tipos de sistemas de recuperación

En la actualidad, existen diversos tipos de sistemas de recuperación de energía debido, en parte, al avance tecnológico y al crecimiento progresivo del tamaño de las instalaciones de desalinización y del consumo energético de las mismas. Como se ha explicado anteriormente, el objetivo de un *ERD* es intercambiar la energía, en forma de presión, de la corriente de rechazo, en otro tipo de energía aprovechable. Por tanto, es posible realizar una clasificación en función de la transformación que se hace de la presión de la corriente de rechazo.

5.2.1 Recuperación mediante turbomáquinas

En este apartado se pueden distinguir 3 dispositivos que operan bajo el mismo principio: convertir la presión de la corriente de rechazo en energía cinética de rotación. Estos dispositivos se han mencionado, en el capítulo 2 de este trabajo, de forma introductoria.

- Turbina Pelton. Es un tipo de turbina de acción o impulso donde el fluido no experimenta variación de presión estática a través del rotor[15]. Es una turbina que consta de diversas cucharas sobre las que incide un chorro a alta velocidad, creando una fuerza tangencial en el rotor y un par que mueve el eje de la turbina. Este tipo de turbinas se emplean, generalmente, para saltos superiores a 400m.

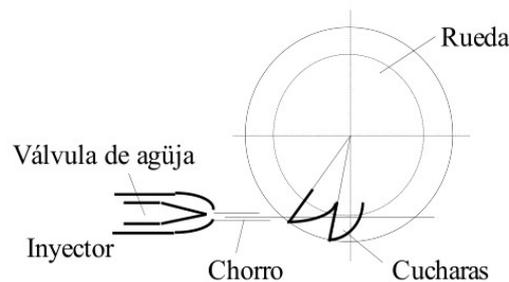


Figura 5.1.: Esquema de funcionamiento de una turbina Pelton

- Turbina Francis. Esta turbina es de tipo reacción, lo que significa que se produce un salto de presión estática en el rotor. Para ello, el fluido debe llenar todo el canal entre álabes. Estas turbinas son adecuadas para saltos entre 40m y 500m, por lo que son más versátiles que las turbinas Pelton.

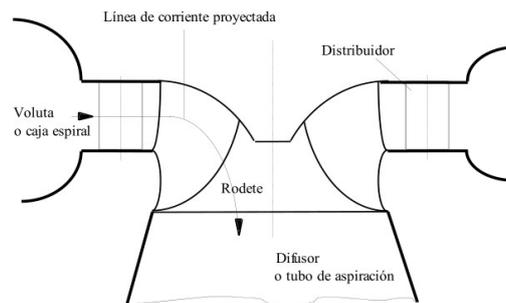


Figura 5.2.: Esquema de funcionamiento de una turbina Francis

- Turbocharger. El turbocharger o turbobomba es un dispositivo compuesto por una bomba y una turbina que comparten el mismo eje. El salto que se produce en la turbina por la variación de presión del fluido que la atraviesa se convierte en energía cinética rotatoria, que se comunica a través del eje a la bomba. Empleando esta energía cinética, la bomba es capaz de presurizar el fluido de entrada.

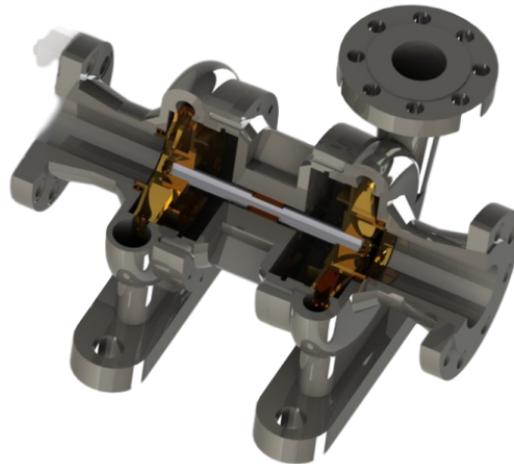


Figura 5.3.: Sección de un turbocharger

Como se puede observar, el funcionamiento de las turbinas Pelton y Francis permite obtener energía cinética en el eje del rotor que, posteriormente, puede ser convertida en electricidad empleando una dinamo. Esto permite reducir las necesidades de potencia eléctrica que demanda la bomba de alta presión de la red, reduciendo así el coste. Por el contrario, el funcionamiento del turbocharger permite obtener un fluido presurizado a la salida de la bomba, que puede servir como entrada a la bomba de alta presión, reduciendo el salto de presiones que es necesario comunicar al fluido. También es posible hacer pasar el fluido presurizado por una bomba *booster*, que eleva la presión todavía más y permite incorporar el fluido directamente a la entrada de las membranas, aumentando el caudal de alimentación de las mismas. En cualquier caso, todos los dispositivos mencionados permiten reducir la energía que se necesita en el proceso de desalinización, cumpliendo así su función como *ERD*.

5.2.2 Recuperación por intercambio de presión

Por otro lado, existen dispositivos de recuperación de energía que emplean la presión de la corriente de rechazo en presurizar agua de entrada, que puede emplearse como caudal adicional en las membranas o para reducir el salto de presiones en el bomba de alta presión. Estos dispositivos se conocen como cámaras de intercambio de presión [16] y existen 2 tipos:

- **Cámaras de intercambio de presión por deslizamiento.** Estos dispositivos están compuestos por cilindros con válvulas de control en los extremos. En el primer ciclo de funcionamiento, se abre una válvula, permitiendo que el agua a baja presión entre por un lado y llene el cilindro. Cuando se ha llenado por completo, se cierra la primera válvula y se abre la válvula del extremo contrario, dejando pasar el rechazo a alta presión. El rechazo comprime el agua, presurizándola hasta que llega a una presión consigna, cerrando la válvula del rechazo y abriendo la válvula contraria, permitiendo el escape de agua presurizada. Para realizar el intercambio de presión, en el cilindro puede existir

un pistón, que actúa como medio de transmisión de presión, siendo empujado por el rechazo y empujando, a su vez, al agua de entrada, comprimiéndola. Sin embargo, existen también cámaras de presión que prescinden de dicho pistón, confiando en la diferencia de densidad y viscosidad del rechazo para realizar la presurización. En otros casos, puede existir un pistón flotante, que mantiene el rechazo y el agua cuasi-separados [16]. Como se ha mencionado antes, estos dispositivos incorporan múltiples camisas, ya que en un cilindro se hace el primer ciclo, comentado anteriormente, y en otro cilindro se hace el ciclo contrario, garantizando un caudal de salida de agua lo más constante posible. Estos dispositivos son conocidos comercialmente como *DWEER*.



Figura 5.4.: Cámara de intercambio DWEER

- **Cámaras de intercambio de presión por rotación.** Este otro tipo de cámaras de intercambio de presión se caracterizan porque el elemento móvil no es un pistón, como ocurría en los *DWEER*, sino que es la propia cámara la que se mueve. Estos dispositivos constan de un rotor cerámico, sellado en ambos extremos por 2 cubiertas que permiten la entrada y salida de rechazo, por un lado, y agua de entrada por el otro. El rotor consta de diversos agujeros dispuestos de forma simétrica alrededor del eje geométrico del rotor. El agua a baja presión y el rechazo a alta presión entran al rotor de forma simultánea, intercambiando energía y haciendo girar el rotor. Esto es debido a la diferencia de densidad y viscosidad por lo que el rechazo puede intercambiar energía con el agua de entrada directamente, sin la necesidad de un pistón. El giro del rotor dentro de la cámara de intercambio permite que exista una entrada y salida constante de agua a alta presión, comprimida por el rechazo, sin la necesidad de emplear diversos cilindros, como ocurre en los *DWEER*. Este modelo está patentado y comercializado por la empresa *Energy Recovery*, bajo el nombre *PX Pressure Exchanger*.

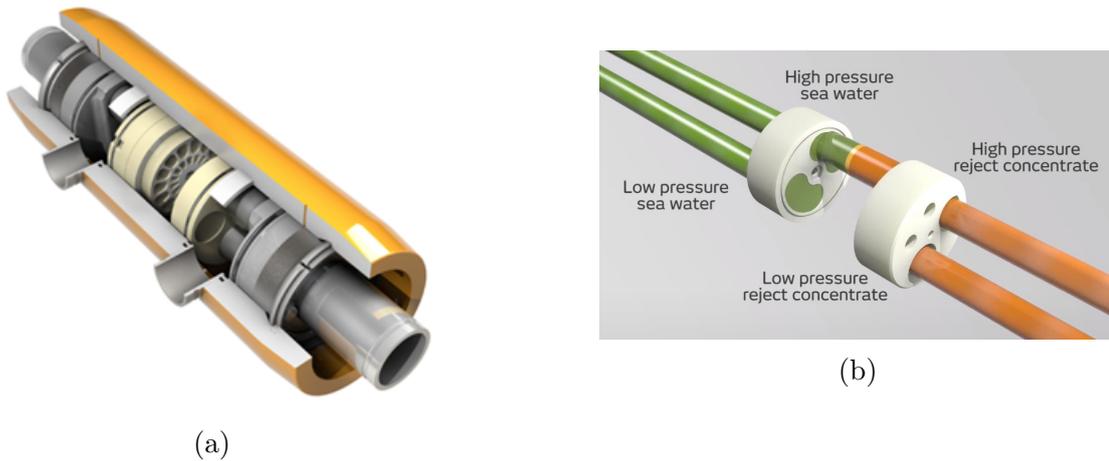


Figura 5.5.: Cámara de intercambio de presión por rotación

Debido a que el tratamiento de agua por ósmosis inversa es un proceso ampliamente extendido y que la energía demandada es alta, otras empresas han desarrollado variaciones de estos dispositivos de recuperación de energía; por ejemplo, la empresa *ISOBARIX* posee una patente para una cámara de intercambio de presión por rotación que emplea una tecnología distinta: *XPR (aXle Positioned Rotor)*. Esta tecnología se basa en que el rotor está formado por agujeros de mayor tamaño que los empleados en las cámaras de intercambio convencionales. Además, tiene una única fila de dichos agujeros, a diferencia de los diversos canales de distinto tamaño que existen en el *PX Pressure Exchanger*, como se puede observar en 5.5a. Esta configuración, según *ISOBARIX*, permite reducir las pérdidas hidráulicas con un mayor caudal y una menor deformación en los conductos y cubiertas.

- **Bomba Clark.** En el mundo de los recuperadores isobáricos o cámaras de intercambio de presión, los más extendidos son del tipo expresado anteriormente. Sin embargo, existen otros tipos menos conocidos, como la bomba Clark, que ha sido desarrollada por la empresa *Spectra Watermakers*, y es un dispositivo destinado a la recuperación de energía para embarcaciones, por lo que está pensado para caudales muy pequeños, hasta un máximo de $1,51 \text{ m}^3/\text{h}$. El principio de funcionamiento es similar a los otros intercambiadores isobáricos: el rechazo a alta presión comprime un pistón que presuriza agua de entrada. La entrada y salida de rechazo y agua es controlada por válvulas accionadas por el final de carrera del pistón. Estas válvulas controlan el flujo y permiten el funcionamiento simultáneo en 2 tiempos de 2 cilindros. Cuando un cilindro admite agua a baja presión, en el otro se está comprimiendo agua y viceversa. Es un dispositivo de funcionamiento sencillo, compuesto casi en su totalidad, por elementos mecánicos y de tamaño compacto.

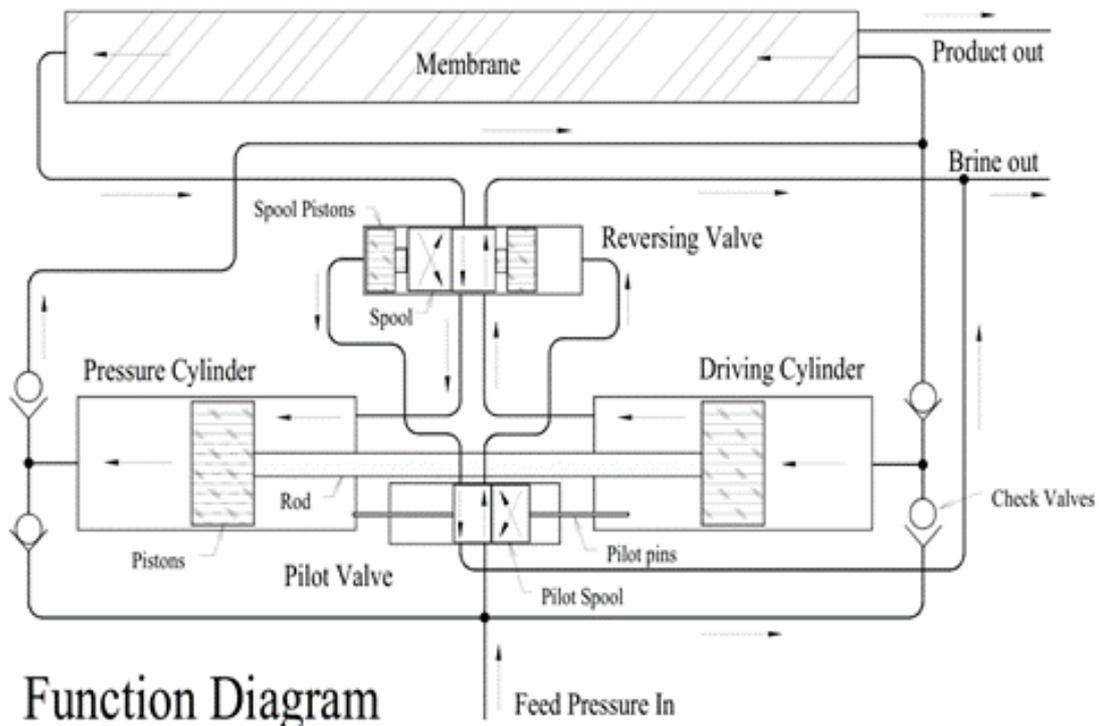


Figura 5.6.: Esquema de funcionamiento de la Bomba Clark

5.3 Comparativa y selección del sistema de recuperación

De entre todos los sistemas de recuperación o *ERD* mencionados, es necesario seleccionar aquel tipo que se ajuste más a los requerimientos buscados en este trabajo: un *ERD* de carácter portátil que pueda manejar caudales bajos (del orden de $6,9\text{ m}^3/\text{h}$, correspondientes al caudal que se maneja en el *Recorrido 4* de la instalación).

Respecto a los sistemas de recuperación mediante turbomáquinas, ninguno de los dispositivos mencionados son aptos para su uso en instalaciones portátiles de pequeño-mediano tamaño, que es el propósito de este trabajo. Este hecho es debido a 3 factores: en primer lugar, el tamaño de estos dispositivos es grande, ya que necesitan de diversos componentes para su correcto funcionamiento y monitorización. En segundo lugar, el precio de estos dispositivos puede resultar prohibitivo para el presupuesto de una instalación de bajo caudal, ya que los materiales en los que se construyen, así como las necesidades de mantenimiento, elevan, en gran medida, el precio de estos equipos. En tercer y último lugar, el empleo de cualquiera de los 3 *ERDs* mencionados para caudales bajos desplazaría a dichos dispositivos de su punto óptimo de funcionamiento, ya que han sido concebidos para ser utilizados en grandes caudales, lo que reduciría considerablemente el rendimiento.

Por tanto, parecería que los candidatos favorables para aplicarse en este trabajo son los recuperadores que funcionan bajo el principio de intercambio de presión. Sin embargo, es necesario realizar diversas consideraciones respecto a la adaptabilidad de estos *ERD*.

En primer lugar, las cámaras de intercambio de presión por deslizamiento o *DWEER* requieren de un espacio considerable para su instalación y operación, debido a que están diseñadas para operar con volúmenes de agua muy superior al que compete a este trabajo. Para ejemplificar este razonamiento, se puede hacer uso del catálogo de la empresa *Flowserve*, dedicada a la comercialización de este tipo de dispositivos [17] y que ofrece un *ERD* tipo *DWEER* para caudales comprendidos entre $160 - 350 \text{ m}^3/\text{h}$ (muy superiores a los caudales de diseño del dispositivo que se busca). Por tanto, pese a su elevada eficiencia (alrededor del 98%), no resultan viables como solución a la aplicación que se busca.

En segundo lugar, es necesario analizar las cámaras de intercambio de presión por rotación; en concreto, el modelo de funcionamiento bajo el cual operan estos *ERD* está patentado bajo el nombre *PX Pressure Exchanger*, de la empresa *Energy Recovery*. En los recursos online que ofrece el fabricante es posible obtener una tabla comparativa para diversos modelos del mismo *ERD*, donde se indica la eficiencia del dispositivo y el rango de caudales de rechazo en el que opera (Tabla 5.1).

PX Pressure Exchanger Performance Chart		
PX Model	Peak Efficiency(%)	Flow Range per Unit (Brine Flow) (m^3/h)
PX Q300	98	45,4-68,1
PX Q260	98	40,9-59,1
PX 260	98	40,9-59,1
PX Q220	97	31,8-50
PX Q180	97	22,7-40,9
PX 180	98	22,7-40,9
PX Q140	98	20,4-31,8
PX 140	96	20,4-31,8
PX 90	97	13,6-20,4
PX 70	96	9,1-15,9
PX 45	96	6,8-10,2
PX 30	96	4,5-6,8

Tabla 5.1.: Tabla de eficiencia y rango de caudales de operación. Fuente: Fabricante *Energy Recovery*

Como se aprecia en la Tabla 5.1, el modelo *PX 30* es adecuado para el caudal que se pretende aprovechar en la instalación, ya que el rango de caudales que maneja es muy similar al que se encuentra disponible en el *Recorrido 4*. Sin embargo, este tipo de *ERDs* emplean coberturas cerámicas y aceros dúplex, por lo que el precio puede presentar un problema para una planta de presupuesto reducido.

En el análisis de las cámaras de intercambio de presión por rotación, se ha hablado del *PX Pressure Exchanger*, aunque el análisis para el *ERD* que emplea la tecnología *XPR*, *aXle Positioned Rotor* sería análogo. Esto es debido a que ambos operan en rangos de caudales parecidos (Tabla 5.2), aunque el diseño *XPR* suponga una mejora respecto al *PX Pressure Exchanger*.

XPR SWRO MODELS		
XPR-Model	MaxFlow, <i>gpm</i>	MaxFlow, m^3/h
309SS	30	7
309SM	38	9
309SL	45	10
409SS	65	15
409SM	80	18
409SL	95	22
509SS	120	27
509SM	150	34
509SL	175	40
609SS	190	43
609SM	240	55
609SL	280	64
809SS	400	91
809SM	500	114
809SL	600	137

Tabla 5.2.: Tabla de caudales para el diseño *XPR*. Fuente: Fabricante *ISOBARIX*

Como se puede observar, también existe un modelo de recuperador válido para las cámaras de intercambio de presión por rotación que emplean la tecnología *XPR*; en concreto, el modelo *309SS* ha sido diseñado para un caudal muy similar al que se quiere aprovechar en este trabajo, por lo que puede ser un potencial candidato.

Por último, sería necesario discutir la viabilidad de un dispositivo como la Bomba Clark. Consultando el catálogo del fabricante, es posible comprobar que se comercializan dispositivos para un amplio rango de caudales: desde el *Ventura 150* para caudales de $0,02 m^3/h$, hasta el *Cabo 10000* para $1,51 m^3/h$. Se puede observar que estos caudales son significativamente más pequeños que los que emplean otros tipos de *ERDs*. Este hecho se debe a que la Bomba Clark ha sido pensada para el aprovechamiento de agua a bordo de una embarcación recreativa, por lo que los caudales que es capaz de tratar están ajustados al consumo de agua de un grupo reducido de personas. Por tanto, el caudal de diseño es muy inferior al que se quiere aprovechar en la planta de estudio, lo que permite descartar la Bomba Clark como candidato en una primera aproximación.

Es conveniente señalar que este análisis no ha tenido en cuenta un aspecto fundamental en la implementación de un *ERD*: ¿cómo va a contribuir el funcionamiento del dispositivo recuperador a reducir de forma global la energía empleada en el sistema?

En el apartado 5.2 de este trabajo, se ha mencionado que un *ERD* puede contribuir a la mejora del rendimiento de una instalación de 3 formas principales:

- Alivio para la bomba de alta presión. El *ERD* puede producir un fluido presurizado, a la entrada de la bomba de alta presión, para que dicha bomba realice el último salto de presión necesario y que el agua entre a las membranas con la presión adecuada. Esta configuración reduce la energía demandada por la bomba, ya que el salto de presiones que debe realizar es menor. Sin embargo, para implementar este tipo de esquema es necesario que el *ERD* pueda operar con un caudal igual al requerido a la entrada de la bomba, que será el mismo que el necesario a la entrada de las membranas. Este tipo de esquema es el que se implementa cuando se instala un *turbocharger*.
- Aumento del caudal de entrada a las membranas. En una instalación sin recuperador de energía, un aumento del caudal de entrada a las membranas exige un tamaño superior de bomba de alta presión, aumentando el precio y la energía que demanda debido a que el volumen con el que trabaja es mayor. Sin embargo, implementando un recuperador que comprima el agua hasta la presión de entrada de las membranas, se consigue un aumento del caudal sin incrementar el caudal que es necesario que circule por la bomba de alta presión. Esta configuración es típica cuando se emplean *ERDs* de tipo isobáricos. Suelen ir acompañados de una bomba *booster* para elevar la presión a la salida del recuperador, si las necesidades de presión a la entrada de las membranas son demasiado elevadas.
- Producción de energía eléctrica. Como se ha mencionado en apartados anteriores, el elemento que demanda mayor potencia de una instalación de desalación por ósmosis inversa es la bomba de alta presión; en concreto, requiere de grandes potencias eléctricas para alimentar el motor que mueve la bomba. Por tanto, la instalación de un *ERD*, capaz de convertir la presión del rechazo en electricidad, reduciría las necesidades del sistema, aumentando el rendimiento. Este es el caso de un recuperador basado en una turbina Francis o Pelton: la rotación del eje de la turbina alimenta un generador que produce electricidad para alimentar el motor de la bomba de alta presión.

En virtud de esta distinción, resulta palmario que la elección de un dispositivo, como recuperador para la instalación de referencia para este trabajo, no está únicamente ligada al caudal con el que es capaz de trabajar, sino que influye también la configuración del recuperador en la instalación.

Por tanto, se proponen 2 candidatos posibles para realizar el aprovechamiento de la presión del rechazo en la planta:

- Intercambio de presión por rotación: Modelo PX30
- Intercambio de presión por rotación: Modelo XPR-309SS

5.4 Análisis del sistema con un *ERD*

En virtud de los requerimientos de presión y caudal, los *ERDs* seleccionados emplean la tecnología de intercambio de presión; es decir, son intercambiadores isobáricos. Por tanto, la máxima presión a la que se podrá comprimir el agua de entrada en el intercambiador será la presión de entrada al dispositivo. Este hecho deriva en la existencia de diversas configuraciones en las que instalar uno o varios *ERDs*:

1. **Configuración 1.** Esta disposición pretende comprimir agua fresca de entrada al sistema empleando la presión del rechazo de la segunda etapa, aumentando la cantidad de agua de entrada a las membranas y, por tanto, la cantidad de permeado producida. En la instalación, la presión de salida del rechazo de la segunda etapa es de 10 bar , por lo que el recuperador podrá comprimir agua de entrada a, como máximo, 10 bar . Sin embargo, ningún intercambiador tiene una eficiencia del 100%, por lo que la presión que se podrá alcanzar nunca será de 10 bar . Debido a este hecho, será necesario incorporar una bomba *booster* que realice un salto de presión adicional de cerca de los 10 bar (nivel alcanzado a la salida del recuperador) a 13 bar (valor consigna de salida de la bomba de alta presión de la instalación), para poder incorporar el agua de entrada directamente a la membrana. Esta configuración puede verse en la Figura 5.7.
2. **Configuración 2.** Otra opción consiste en disponer diversos *ERDs* en paralelo para conseguir reducir el salto de presiones de la bomba de alta presión, reduciendo así las necesidades energéticas de la planta. Sin embargo, esta configuración queda descartada para su utilización en la planta de estudio. Esto es debido a que el máximo caudal de agua fresca presurizada que podrá proporcionar un *ERD* o un conjunto de los mismos es, como máximo, $6,9\text{ m}^3/\text{h}$ (el caudal de salida del rechazo de la segunda etapa de la ósmosis inversa). Por ello, sería imposible incorporar, directamente, el agua de salida del recuperador a la entrada o salida de la bomba de alta presión, ya que el caudal de agua a alta presión que llegaría a las membranas sería demasiado pequeño. Esta configuración es típica de instalaciones que emplean recuperadores basados en turbomáquinas, como *turbochargers*, ya que son capaces de trabajar con caudales altos, similares a los requeridos en la alimentación de las membranas.

Por tanto, la única opción viable es la configuración 1, en la que el *ERD* sirve de alivio para la bomba de alta presión. Esto se consigue mediante la derivación de un caudal de agua de entrada, que es comprimida por el *ERD* en vez de por la bomba de alta presión, reduciendo las necesidades energéticas de la planta.

Para comprender cómo afecta la introducción de un *ERD* en la planta, es necesario obtener la reducción de potencia que consume la bomba de alta presión, que es elemento de mayor demanda energética.

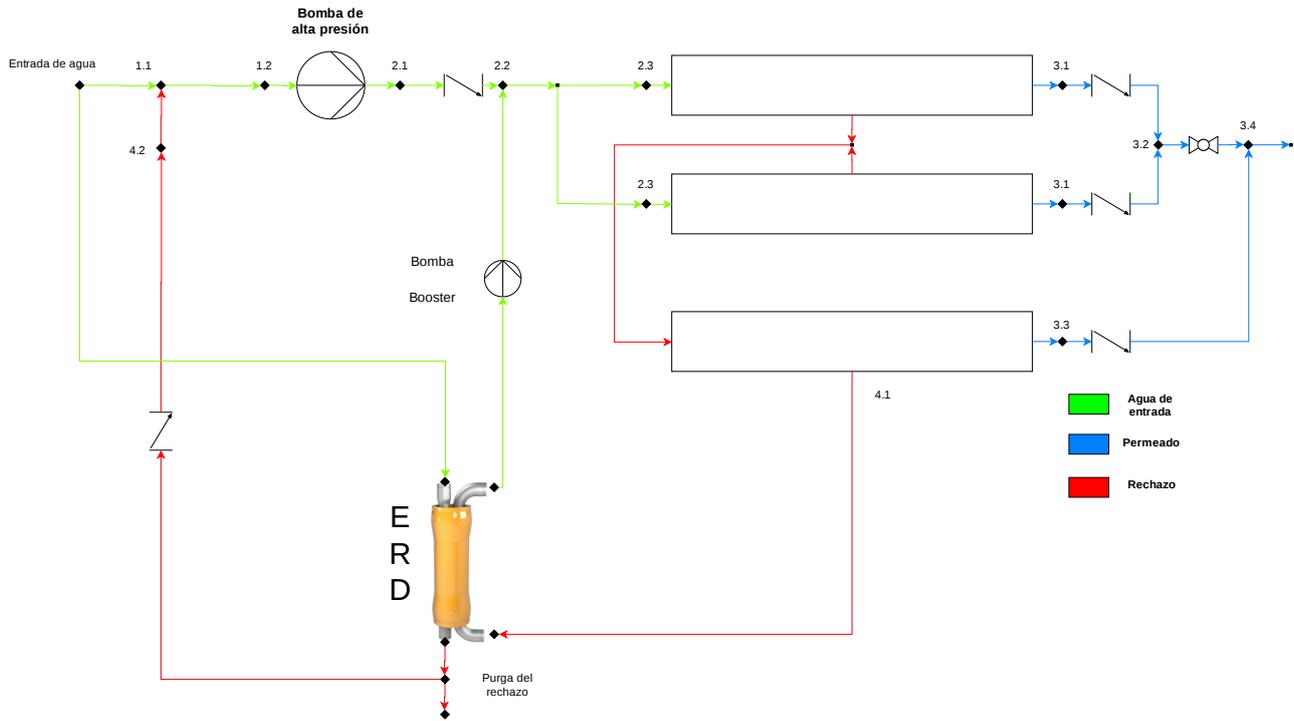


Figura 5.7.: Configuración del sistema con un *ERD*

Los candidatos para realizar la recuperación de la energía en el sistema son el modelo *PX30* y el *XPR-309SS*, ambos intercambiadores de presión isobáricos por rotación. La característica de este tipo de intercambiadores es que son capaces de presurizar un caudal de agua de, como máximo, el caudal de entrada de dichos intercambiadores. En la configuración propuesta, se ha tomado como entrada la salida del rechazo de la segunda etapa de la ósmosis inversa, que posee un caudal de $6,9\text{ m}^3/h$. Por tanto, en el *ERD* se podrá presurizar como máximo $6,9\text{ m}^3/h$ de agua. El caudal que presuriza el recuperador se le resta a la bomba de alta presión, reduciendo la cantidad de agua que tiene que comprimir, disminuyendo la energía que demanda el motor eléctrico de la bomba. Sin embargo, tal y como se ha explicado antes, nunca se va a poder elevar la presión del agua de entrada a la presión del rechazo, ni se podrá aprovechar todo el caudal de rechazo para comprimir el mismo caudal de agua de entrada. Esto es debido al rendimiento del recuperador, que varía según el recuperador escogido.

5.4.1 Análisis del sistema con el recuperador *PX30*

En primer lugar, es necesario obtener la disminución de potencia que se da en la bomba de alta presión. Se conoce que la potencia fluida que comunica la bomba al agua que circula por el rodete de la misma se calcula como: $W_f = \rho g Q H_m$, siendo Q el caudal que circula por la bomba, H_m la altura manométrica que se comunica al fluido y ρ y g la densidad del agua y la aceleración de la gravedad, respectivamente.

Antes de la introducción del *ERD*, circulaba por la bomba $21,9 \text{ m}^3/\text{h}$ y se elevaba la presión desde los $1,4 \text{ bar}$ hasta los 13 bar de referencia de la instalación. Debido a que el diámetro de salida y de entrada de la bomba es el mismo, y la diferencia de alturas entre la admisión e impulsión es despreciable, toda la altura manométrica que se comunica al fluido es en forma de intercambio de presión:

$$H_m = \left(\frac{p_s - p_e}{\rho g} + \frac{v_s^2 - v_e^2}{2g} + \Delta z \right) = \left(\frac{p_s - p_e}{\rho g} \right) \quad \text{m.c.a.} \quad (5.1)$$

Por tanto, la altura manométrica comunicada es $H_m = \frac{(13 - 1,4) \cdot 10^5}{\rho g} = 118,2467 \text{ m.c.a.}$

Con este dato, se puede obtener la potencia requerida por la bomba:

$$W_f = \rho g Q H_m = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 21,9 \cdot 118,2467}{3600} = 7,056 \text{ kW} \quad (5.2)$$

Sin embargo, la bomba de alta presión, al igual que el *ERD*, tampoco tiene un rendimiento del 100%; es decir, que para suministrar una potencia fluida, W_f , es necesario alimentar la bomba con una determinada potencia en el eje motor, W_b , que será siempre superior. Por tanto, puede definirse el rendimiento de la bomba como:

$$\eta_t = \frac{W_f}{W_b} \quad (5.3)$$

Tomando los datos proporcionados por el fabricante de la bomba de alta presión a 50 Hz (Figura 3.4), para $Q = 21,9 \text{ m}^3/\text{h}$, se obtiene $W_b \approx 12 \text{ kW}$. Por tanto, $\eta_t = 58,8\%$.

Como se ha comentado anteriormente, la introducción de un *ERD* reduce el caudal que circula por la bomba, que pasa a ser $21,9 - 6,9 = 15 \text{ m}^3/\text{h}$. La disminución de caudal se traduce en una disminución de potencia requerida por la bomba, pero también implica una reducción en las pérdidas de la instalación por efectos de fricción. Esto es debido a que las pérdidas de la instalación son proporcionales al cuadrado del caudal. Por tanto, cuando por la instalación circula $15 \text{ m}^3/\text{h}$, las pérdidas se reducen; en concreto, para el análisis de la potencia en la bomba de alta presión solo es de interés la reducción de las pérdidas a la entrada de dicha bomba; esto es, la entrada a la bomba ya no se produce a $1,4 \text{ bar}$, sino a $1,7 \text{ bar}$. Como se puede observar, al reducir el caudal, han disminuido las pérdidas, ya que el punto 1.2 es ahora más cercano al punto 1.1 (la entrada al sistema).

Con este nuevo dato de presión a la entrada de la bomba, es necesario recalcular la altura que esta comunica al fluido, que ahora resulta:

$$H_m = \frac{(13 - 1,7) \cdot 10^5}{\rho g} = 115,1885 \text{ m.c.a.} \quad (5.4)$$

Por tanto, la potencia comunicada es:

$$W_f = \rho g Q H_m = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 15 \cdot 115,1885}{3600} = 4,708 \text{ kW} \quad (5.5)$$

Puede observarse una reducción considerable de la potencia consumida (un 33,28%). Sin embargo, para un caudal de $15 \text{ m}^3/\text{h}$, la potencia en el eje, $W_b \approx 10,4 \text{ kW}$ por lo que $\eta_t = \frac{4,708}{10,4} \cdot 100 = 45,27\%$; es decir, la modificación del caudal que circula por la bomba desplaza el punto de funcionamiento de la misma, reduciendo el rendimiento cuando se opera con un caudal distinto al caudal nominal ($21,9 \text{ m}^3/\text{h}$) (Figura 5.8).

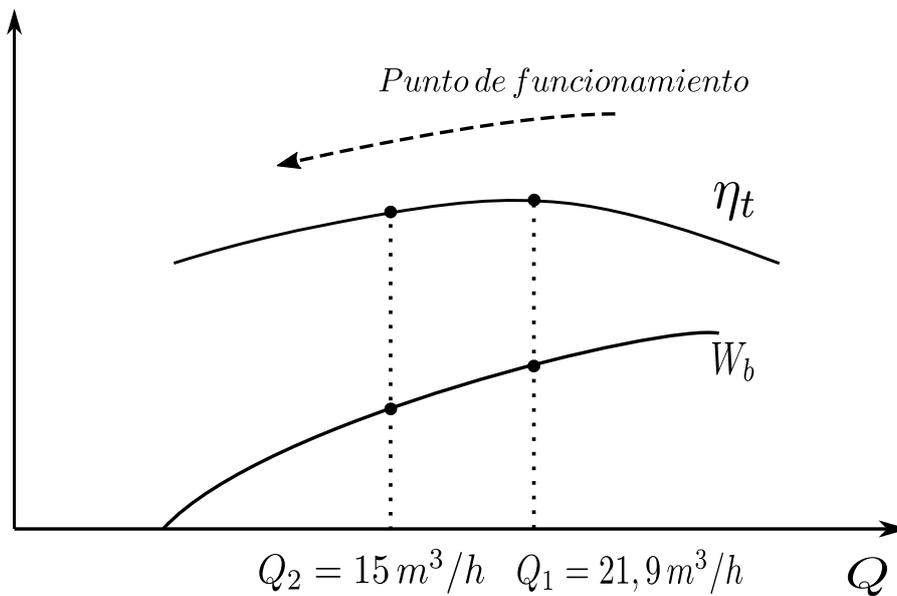


Figura 5.8.: Modificación del punto de funcionamiento al cambiar el caudal

Este análisis lleva a considerar que el ahorro de la instalación no se produce, únicamente, como consecuencia de la reducción de la potencia necesaria en la bomba, sino que, al hacer circular un caudal menor y desplazar el punto de funcionamiento, el rendimiento se reduce, por lo que se podría considerar la sustitución de una bomba de alta presión más pequeña, con un punto de funcionamiento más cercano a los $15 \text{ m}^3/\text{h}$ que circulan con la introducción del *ERD*. También resulta oportuno mencionar que los datos de potencia en el eje, W_b , han sido obtenidos del fabricante en un ensayo a 50 Hz . Sin embargo, la frecuencia real de la bomba de alta presión en la instalación de estudio es desconocida. Esto introduciría un desplazamiento en la curva $W_b - Q$, similar a lo que sucede en la Figura 4.3. Sin embargo, la variación en el régimen de giro que introduce el variador de frecuencia, para adaptar la presión de salida de la bomba a un valor consigna, es suficientemente pequeña como para despreciar este efecto en el cálculo.

Por otro lado, la introducción del recuperador, en el sistema, fuerza la inclusión de una bomba *booster*. La energía consumida por esta bomba adicional se puede calcular de la misma forma que se ha obtenido la potencia suministrada por la bomba de alta presión. Sin embargo, para

realizar este cálculo, primero es necesario obtener la presión a la que entra el agua en la bomba *booster*, es decir, la presión de salida del *ERD*.

De la Tabla 5.1 se puede apreciar que el recuperador elegido, el *PX30*, tiene un rendimiento máximo del 96%; es decir, la presión de salida del recuperador será, como máximo, el 96% de la presión de entrada. Por tanto, si la presión a la que entra el rechazo es de 10 *bar*, el agua que se comprime en el *ERD* saldrá a $p_e = 0,96 \cdot 10 = 9,6 \text{ bar}$. En consecuencia, la bomba *booster* deberá elevar la presión desde 9,6 *bar* a los 13 *bar* requeridos por la instalación. Para ello, deberá proporcionar la siguiente altura manométrica:

$$H_m = \frac{(13 - 9,6) \cdot 10^5}{\rho g} = 34,65 \text{ m.c.a} \quad (5.6)$$

Por tanto, la potencia que requiere la bomba *booster* es:

$$W_f = \rho g Q H_m = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 6,9 \cdot 34,65}{3600} = 651,5 \text{ W} \quad (5.7)$$

Es decir, al introducir el *ERD*, la bomba de alta presión consume $7,056 - 4,708 = 2,348 \text{ kW}$ menos. Por otro lado, la bomba *booster* consume 651,5 *W*. En definitiva, el ahorro energético global es $2348 - 651,5 = 1,696 \approx 1,7 \text{ kW}$.

5.4.2 Análisis del sistema con el recuperador XPR-309SS

En apartados anteriores, se ha comentado que un posible candidato era el recuperador *XPR-309SS*. Los datos técnicos del dispositivo, así como la tecnología que emplea, están disponibles en su página web [18]. No obstante, al intentar recabar más información acerca de este dispositivo, se ha encontrado que existían problemas legales con la distribución y venta del recuperador debido a la violación de una patente de la empresa *Energy Recovery*, la creadora del otro dispositivo recuperador estudiado, el *PX30*. Se ha intentado hablar con la empresa a través del *email* de contacto proporcionado en la página web, pero no se ha obtenido respuesta.

En cualquier caso, como se puede observar de la tabla 5.2, las características del *PX30* son muy parecidas a las del *XPR-309SS*, con la diferencia de que este último presenta un rendimiento superior. Sin embargo, dado que su precio es desconocido, no se pueden realizar estimaciones sobre cuál sería más conveniente instalar. Por tanto, el único dispositivo válido resulta el *PX30*.

5.5 Evaluación económica

5.5.1 Inversión

Tras implementar el *ERD* en la instalación, es necesario analizar el ahorro que se consigue, así como el coste en el que se incurre y determinar si es rentable la inclusión de un recuperador de energía en este tipo de plantas.

Por un lado, es necesario obtener el precio que tienen tanto el dispositivo recuperador de energía como la bomba *booster*; en concreto, para el recuperador *PX30*, el precio de venta ronda los 7000\$, en gran parte, debido a los materiales que emplea (aceros dúplex y coberturas cerámicas). Por otro lado, la bomba *booster* es un dispositivo ampliamente disponible, ya que se emplea en muchas instalaciones hidráulicas; por ejemplo, la bomba Flotec FP5732 ¹, capaz de elevar la presión hasta 190 *psi* (13,1 *bar*), tiene un precio de 429 \$, que es significativamente menor al del *PX30*, ya que es un dispositivo pensado para una aplicación muy específica.

En total, el precio es de 7429 \$ (6078,49 €). El precio aproximado de la planta de estudio es de 30000 €; es decir, instalar el sistema de recuperación supone un aumento de coste inicial del 20,26%.

Inversión	
Bomba <i>booster</i>	353 €
<i>ERD</i>	5768 €
Total	6078 €

5.5.2 Ahorro

Al instalar el *ERD PX30*, se ha reducido el consumo de potencia 1,7 *kW*, tal y como se comentaba anteriormente. El ahorro producido por esta potencia depende del precio de la energía, que se modifica en función de dónde esté instalada la planta:

1. Si la instalación recibe energía de una red de electricidad convencional, el coste por *kWh* es similar a lo que las compañías cobran a un usuario promedio. Sin embargo, hay que añadir también el coste de potencia contratada en el que se incurre de forma fija. Al reducir la potencia necesaria de la bomba, que es el elemento del sistema de mayor consumo, también se reduce la potencia máxima que se requiere en la entrada al sistema. Por tanto, el término de potencia contratada disminuye. Como es lógico, el precio por *kWh* varía entre países, por lo que la rentabilidad de la instalación depende, en gran medida, del lugar donde se vaya a destinar la planta.

¹Flotec FP5732 - 1 HP Cast Iron Multi-Stage High Pressure Booster Pump (190 PSI) <http://bit.ly/3ovU02a>

2. Si la planta se emplaza en un lugar de difícil acceso, como una zona desértica o de bajos recursos económicos, el suministro eléctrico, a través de una red de distribución, puede no estar garantizado. En estos casos, se suelen recurrir a elementos de generación adicionales, como grupos electrógenos (que constan de un motor de combustión interna cuyo eje es solidario a un generador) o placas fotovoltaicas. En consecuencia, el ahorro que resulta de disminuir la potencia en la bomba puede ser significativamente superior.

Al ahorro económico que se consigue por la disminución de la energía consumida, a la que denominaremos **ahorro directo**, se le ha de sumar un ahorro adicional llamado **ahorro indirecto**. Este último ahorro es consecuencia de reducir la potencia de la bomba y, por tanto, su tamaño. Al emplear una bomba de menor caudal, el coste de dicha bomba se reduce, pero también lo hace el tamaño de las tuberías y elementos auxiliares. No obstante, el ahorro que se produce, al reducir el diámetro de las conducciones, es compensado por el aumento de precio en el que se incurre al aumentar los metros de tubería necesarios para instalar el *ERD*. En cualquier caso, la diferencia de precio que supone las conducciones de *PVC* de la instalación son insignificantes en comparación con el ahorro que se produce en otros elementos; es decir, el ahorro global que se consigue es:

$$\text{Ahorro} = \underbrace{(W \cdot 24\text{h} \cdot f_p \cdot P_{op} + \Delta P_W)}_{\text{Ahorro directo}} \cdot T_a + \underbrace{\Delta P}_{\text{Ahorro indirecto}}$$

- W : Potencia que se ahorra al introducir el *ERD* en kW
- f_p : Factor de utilización
- P_{op} : Es el coste en €/kWh de la electricidad
- T_a : Es el tiempo de amortización
- ΔP : La reducción de precio al incluir una bomba de menor tamaño
- ΔP_W : El ahorro en la potencia contratada

Es importante destacar que el factor de utilización, f_p , es el cociente entre el tiempo que funciona la planta y las horas totales del día; es decir, si la planta funciona 24 horas al día, $f_p = 1$. Además, según los datos disponibles de la planta de estudio y los precios del mercado de bombas y accesorios, se puede concluir que $\Delta P = 3292 - 2720 = 572$ €. Por otro lado, al cambiar la potencia necesaria de la bomba, no se produce una reducción de potencia suficientemente significativa como para que el término de potencia se modifique, por lo que $\Delta P_W = 0$ €.

5.5.3 Resultados

Con el objetivo de proporcionar resultados tangibles acerca de la introducción del *ERD* en el sistema, se va a realizar un análisis del ahorro que se consigue con una determinada inversión con el objetivo de obtener el tiempo de amortización.

Como es lógico, la introducción del dispositivo recuperador está solo justificada cuando el ahorro que se consigue supera al precio de la inversión. Por un lado, el ahorro indirecto va a ser constante, ya que no es función del lugar donde trabaja la planta; es decir, el efecto determinante para la introducción o no del *ERD* será el ahorro directo (Figura 5.9).

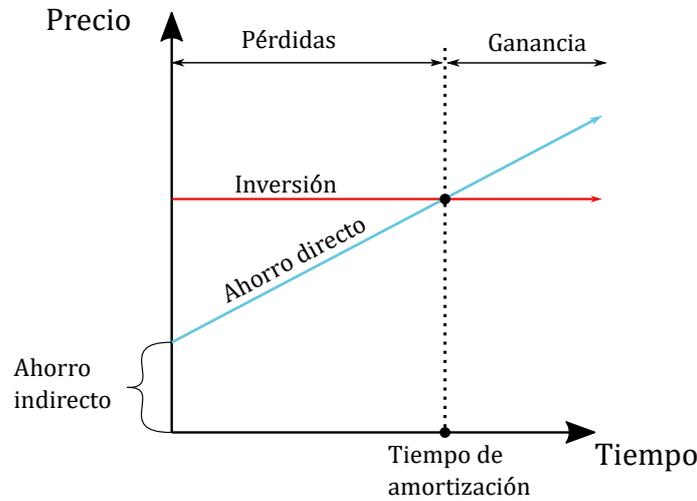


Figura 5.9.: Análisis de la inversión y ahorro

En concreto, el elemento clave para la rentabilidad del *ERD* será el precio de la electricidad, ya que depende de cómo se ha obtenido esa energía. Para analizar esto, se han propuesto 2 casos, donde se hacen determinadas suposiciones acerca de la inversión necesaria y el ahorro conseguido:

CASO 1: Tiempo de operación de 24 horas $f_p = 1$

En este apartado, se va a realizar un análisis suponiendo que la planta funciona durante 24 horas seguidas de forma ininterrumpida, como es el caso de la planta que se ha estudiado. El ahorro en potencia conseguido al instalar el *ERD* es $1,7 \text{ kW}$. Por tanto, en un día, funcionando 24 horas, se consigue un ahorro de $40,704 \text{ kWh/día}$. Además, al operar durante 24 horas ininterrumpidas, el factor de utilización, f_p , es la unidad.

- Si la planta obtiene energía de la red, será la localización de la planta y, por tanto, el país el que determine el periodo de amortización y la rentabilidad de la planta:

CASO 1: Energía eléctrica de la red

	Inversión	Ahorro	
<i>ERD</i>	5768,23 €	Indirecto	572 €
Bomba booster	353,51 €	Energía	40,704 kWh/día

- Si se instala en España, donde el precio de la electricidad es $0,188 \text{ €/kWh}$ [19], el periodo de amortización resulta:

$$6078,49 \text{ €} = \Delta P + 40,704 \text{ kWh/día} \cdot 0,188 \text{ €/kWh} \cdot T_a$$

En consecuencia, el tiempo de amortización (tiempo que funciona la planta para que se recupere la inversión del recuperador) es $T_a = 719,58$ días ≈ 2 años.

- Si se instala en Qatar, donde el precio de la electricidad es 0,026 € [19], el periodo de amortización resulta:

$$6078,49 \text{ €} = \Delta P + 40,704 \text{ kWh/día} \cdot 0,026 \text{ €/kWh} \cdot T_a$$

Por tanto, el tiempo de amortización (tiempo que funciona la planta para que se recupere la inversión del recuperador) es $T_a = 5.203,12$ días ≈ 14 años.

- Si se instala en Alemania, donde el precio de la electricidad es 0,319 € [19], el periodo de amortización resulta:

$$6078,49 \text{ €} = \Delta P + 40,704 \text{ kWh/día} \cdot 0,319 \text{ €/kWh} \cdot T_a$$

Así pues, el tiempo de amortización (tiempo que funciona la planta para que se recupere la inversión del recuperador) es $T_a = 400,71$ días ≈ 1 año.

- Si la planta obtiene electricidad a partir de otros medios, el análisis es distinto:
 - Cuando el medio de obtención de energía es a partir de **placas solares**, resulta conveniente mencionar que el precio de la electricidad es nulo, ya que el principal coste de la instalación es el precio de los paneles en sí. Con un ahorro de 1696 W en la instalación, la potencia que se requiere extraer de los paneles es significativamente menor. Por tanto, es posible reducir el número de paneles necesarios. Si el precio de dichos paneles ronda los 200 € [20] para paneles de 500 W, el ahorro que se produce es de unos 600 €. Este ahorro es insignificante en comparación con el precio del recuperador, por lo que es difícil justificar la inversión del ERD en este tipo de plantas. Esto es debido a que el ahorro del recuperador es importante en términos de energía (potencia a lo largo del tiempo), por lo que el efecto que el ERD tiene, en la planta, es significativo cuando el precio de la energía se ve afectado. En el caso de los paneles solares, estos producen una energía limpia y gratis, siendo el único coste el precio de dichos paneles. En consecuencia, la introducción del recuperador no es recomendada en estos casos. No obstante, los paneles fotovoltaicos acarrear un coste derivado del mantenimiento de los mismos, que puede llegar a ser significativo si están en lugares de difícil acceso. En este sentido, al reducir el número de paneles instalados también se reduce el tiempo que se tarda en limpiar y acondicionar la instalación.

CASO 1: Energía procedente de paneles fotovoltaicos

	Inversión		Ahorro
<i>ERD</i>	5768,23 €	Indirecto	572 €
Bomba booster	353,51 €	Paneles	600 €

- Por otro lado, si para obtener energía se emplea un **grupo electrógeno** formado por un motor de combustión y un generador, el precio del combustible consumido y la reducción en el tamaño del generador son los que determinan el periodo de amortización; por ejemplo, sin el *ERD* instalado, la potencia requerida por la bomba es de 7,056 *kW*, que requiere un grupo electrógeno de potencia superior, como el HYUNDAI Dhy12000Xse², con un precio de 4829 €. Al reducir la potencia requerida a 4,708 *kW*, se requiere un generador distinto³, con un precio de 2045 €. Además de esta reducción de 2784 € en el precio del equipo, se produce una disminución en la potencia consumida de 40,704 *kWh*/día. Para obtener el ahorro que conlleva esta merma de potencia es necesario conocer el consumo de combustible, en *l/h*, del grupo electrógeno. Sin embargo, esta tarea resulta compleja, ya que depende, en gran medida, de las condiciones en las que se realice la conexión del grupo, el lugar donde se instale, las características eléctricas, etc. Por tanto, se va a hacer uso de datos que proporciona un fabricante de grupos electrógenos para diversas potencias y regímenes de funcionamiento [21]:

TABLA DE TRABAJO CON GRUPOS ELECTRÓGENOS

kW	400 V trifásica		230 V trifásica		Consumo combustible <i>l/h</i>			
	Intensidad por fase	Intensidad por fase	Intensidad por fase	Intensidad por fase	25 %	50 %	75 %	100 %
24	44		80		2,4	4,3	6	7,9
48	88		160		3,5	7	10,2	13,7
80	144		265		5,5	11	16,2	22
100	180		314		7,3	14,6	23,2	28,8
120	216		381		9	18	29	36
160	289		503		11	20,5	33,8	42,5
200	361		629		15,7	30	41,9	52,5
240	433		755		18,9	34,1	49,2	66,3
280	505		880		19,9	35,8	52,7	70,6
320	577		1006		22	41	64	87,6
400	722		1257		27,3	50,3	74,4	100,7
480	866		1509		33,5	62,2	93,6	127,6
640	1155		2012		44	90,9	130	172
800	1444		2515		57	104	152	204

Dado que los generadores escogidos no están en la tabla, se va a realizar una recta de regresión para aproximar los datos de consumo del grupo electrógeno al 50% de trabajo. De este modo, el consumo en *l/h* para un generador de 8 *kW* es: Consumo = $0,1312 \cdot 8 + 0,9199 = 1,97 l/h$. Si la potencia del generador se reduce a 5 *kW*, el consumo pasa a ser: Consumo = $0,1312 \cdot 5 + 0,9199 = 1,57 l/h$; es decir, el ahorro en el consumo de combustible es $1,97 - 1,57 = 0,4 l/h$. Sabiendo que el precio del diésel es aproximadamente 0,99 €/l, se produce un ahorro de 0,4 €/h.

²Generador HYUNDAI Dhy12000Xse-T diésel de 9000 W <http://bit.ly/3jN31SH>

³Generador HYUNDAI diésel de 5000 W <http://bit.ly/3jKX3BO>

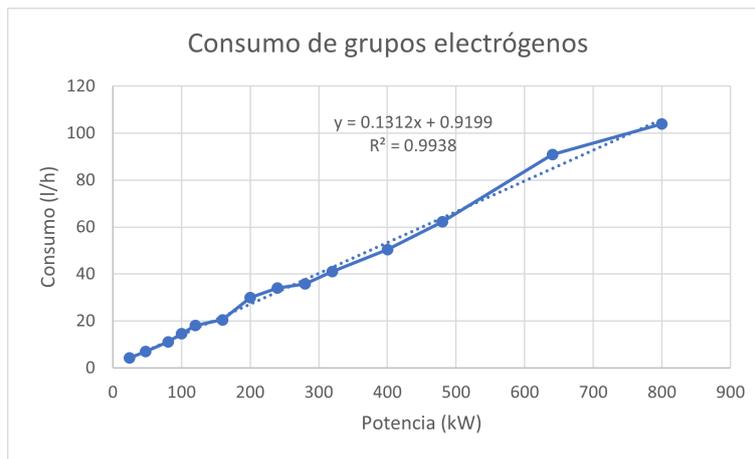


Figura 5.10.: Recta de regresión para datos de consumo

Por tanto, para amortizar el aumento de coste del *ERD* se necesita:

$$T_a = \frac{6078,49 - 2784}{0,4} = 8.236,22 h = 343,17 \text{ días}$$

CASO 1: Energía procedente de grupo electrógeno

Inversión		Ahorro	
<i>ERD</i>	5768,23 €	Indirecto	572 €
Bomba booster	353,51 €	Energía	40,704 kWh/día
Grupo electrógeno	2045 €	Potencia del grupo	2784 €
		Ahorro combustible	0,4 €/h

Caso 2: Tiempo de operación de 8 horas $f_p = 1/3$

En este segundo apartado, se ha supuesto que la planta funciona durante 8 horas diarias, por lo que el ahorro de energía será distinto al caso 1 expuesto anteriormente. Sin embargo, los razonamientos explicados en el apartado previo son análogos, por lo que, a continuación, se presentarán los cálculos de un modo más resumido; en concreto, respecto al ahorro de energía, hay que introducir que $f_p = 1/3$, que se traduce en $1,7 kW \cdot 24 h \cdot 1/3 = 13,568 kWh/día$. Esto afectará al tiempo de amortización, ya que, aunque el precio por *kWh* de la electricidad o los *l/h* consumidos por el grupo electrógeno sean los mismos, se tardará más en amortizar debido a que funciona menos horas seguidas.

- Si la planta **recibe energía de la red**, el ahorro, al igual que en el caso 1, dependerá de dónde se instale la planta:

CASO 2: Energía eléctrica de la red

	Inversión	Ahorro	
<i>ERD</i>	5768,23 €	Indirecto	572 €
Bomba booster	353,51 €	Energía	13,568 kWh/día

– Si se instala en España, el tiempo de amortización será:

$$6078,49 \text{ €} = \Delta P + 13,568 \text{ kWh/día} \cdot 0,188 \text{ €/kWh} \cdot T_a \rightarrow T_a = 2158,74 \approx 6 \text{ años}$$

– Si se instala en Qatar, el tiempo de amortización será:

$$6078,49 \text{ €} = \Delta P + 13,568 \text{ kWh/día} \cdot 0,026 \text{ €/kWh} \cdot T_a \rightarrow T_a = 15609,38 \approx 43 \text{ años}$$

– Si se instala en Alemania, el tiempo de amortización será:

$$6078,49 \text{ €} = \Delta P + 13,568 \text{ kWh/día} \cdot 0,319 \text{ €/kWh} \cdot T_a \rightarrow T_a = 1272,23 \approx 3,5 \text{ años}$$

Se puede observar un aumento significativo en el tiempo de amortización cuando la planta funciona 8 horas al día:

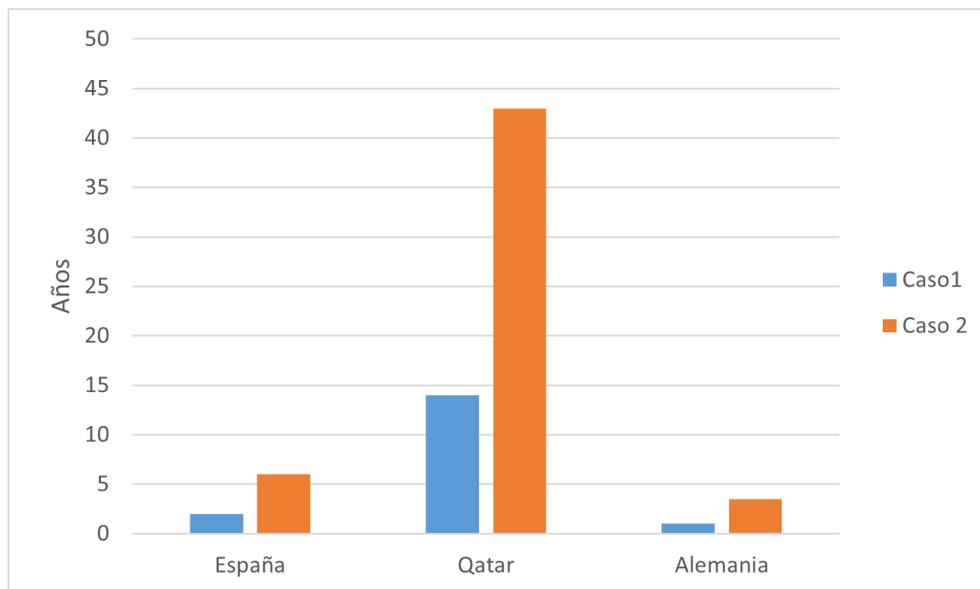


Figura 5.11.: Comparativa entre los modos de operación y su tiempo de amortización

- Por otro lado, si se emplean **paneles fotovoltaicos**, el ahorro conseguido no es suficiente como para justificar la introducción del *ERD*:

CASO 2: Energía procedente de paneles fotovoltaicos

Inversión		Ahorro	
<i>ERD</i>	5768,23 €	Indirecto	572 €
Bomba booster	353,51 €	Paneles	600 €

- Tal y como se ha explicado en el apartado anterior, el ahorro que se produce al emplear un **grupo electrógeno** de esas características es el mismo. Sin embargo, cuando el dispositivo opera durante 8 horas, el tiempo que se tarda en amortizar la inversión es:

$$T_a = \frac{6078,49 - 2784}{0,4} = 8.236,22 h = \frac{8.236,22}{8} = 1.029,52 \text{ días} \approx 3 \text{ años}$$

CASO 2: Energía procedente de grupo electrógeno

Inversión		Ahorro	
<i>ERD</i>	5768,23 €	Indirecto	572 €
Bomba booster	353,51 €	Energía	40,704 kWh/día

Una vez analizados todos los casos, se pueden resumir los resultados en la siguiente tabla:

	Tiempo de amortización (años)	
	CASO 1	CASO 2
Equipo conectado a la red		
España	2	6
Qatar	14	43
Alemania	1	3,5
Paneles fotovoltaicos	Inviabile	Inviabile
Grupo electrógeno	1	3

Puede observarse que el menor tiempo de amortización se consigue cuando la planta trabaja empleando un grupo electrógeno, ya que el precio de la energía ahorrada es muy elevado. Por otro lado, instalar un *ERD* cuando la planta se sirve de paneles solares no es recomendable, ya que el ahorro producido no es significativo. Sin embargo, en la mayoría de ocasiones, la planta funcionará mediante energía procedente de la red eléctrica, por lo que, en estos casos, será apropiado instalar un *ERD* cuando el precio por *kWh* sea elevado, como en Alemania.

Capítulo 6

Conclusiones

Este último apartado del trabajo tiene como propósito exponer las conclusiones que se han obtenido y comprobar si se ha cumplido el objetivo propuesto: estudiar la implementación de un *ERD* en instalaciones de desalinización por ósmosis inversa de carácter portátil.

Por un lado, se ha llegado a la conclusión de que hay dispositivos de recuperación de energía que, por su punto de funcionamiento o por la función que pretenden desempeñar, no son aptos para el objetivo de este estudio, tal y como son los *turbochargers* o las turbinas Pelton o Francis. En este sentido, los dispositivos adecuados son los que entran en el grupo de isobáricos; es decir, que intercambian energía con el fluido en forma de presión.

Sin embargo, no todos estos dispositivos han resultado ser adecuados, ya que el tamaño de los mismos y su caudal de funcionamiento hacen que solo un grupo particular de *ERD* sean aptos para una planta de desalinización como la estudiada. Este grupo es el de cámaras de intercambio de presión por deslizamiento, en concreto, el modelo *PX30*.

Por otro lado, la introducción de este dispositivo tiene que ser suficientemente beneficiosa como para justificar su coste. En relación con esta premisa, puede decirse que el coste de la electricidad es el principal factor que determina la rentabilidad de la inversión.

Si la planta donde se quiere instalar el *ERD* se conecta a la red en un país cuyo coste por *kWh* es elevado (como Alemania), el ahorro energético que produce el *ERD* es significativo y, por ende, justifica el coste del mismo. En contraposición, cuando la electricidad es barata, se desaconseja introducir este tipo de dispositivos, ya que tienen un coste excesivo para que sean amortizados en un tiempo razonable.

La rentabilidad del *ERD* aumenta cuando la energía con la que se alimenta la planta no procede de la red, sino que se crea de forma exclusiva para la instalación empleando un grupo electrógeno. Por el contrario, si se usan otros medios de energía, como pueden ser las renovables, en concreto, la energía solar fotovoltaica, producir esa energía sería muy barata en comparación con el precio global del recuperador.

En definitiva, se concluye que la introducción de un recuperador de energía es siempre beneficiosa desde un punto de vista de consumo, pero que no siempre resulta viable económicamente, especialmente, en instalaciones con un presupuesto reducido. Otra barrera que puede entorpecer la implementación de un *ERD* es que depende, en gran medida, del caudal disponible para ser empleado en el recuperador; es decir, el correcto funcionamiento del recuperador se ve afectado por la cantidad de agua que trasiegue y las condiciones a las que lo haga, lo que hace difícil adaptar el recuperador a una planta de bajo caudal y presión.

Por tanto, y como continuación de este trabajo, sería pertinente llevar a cabo el diseño de un recuperador que trabaje bajo el mismo principio de intercambio de presión, pero que esté compuesto por materiales plásticos, lo que reduciría significativamente su coste y aumentaría su flexibilidad para adaptarse a diversas condiciones.

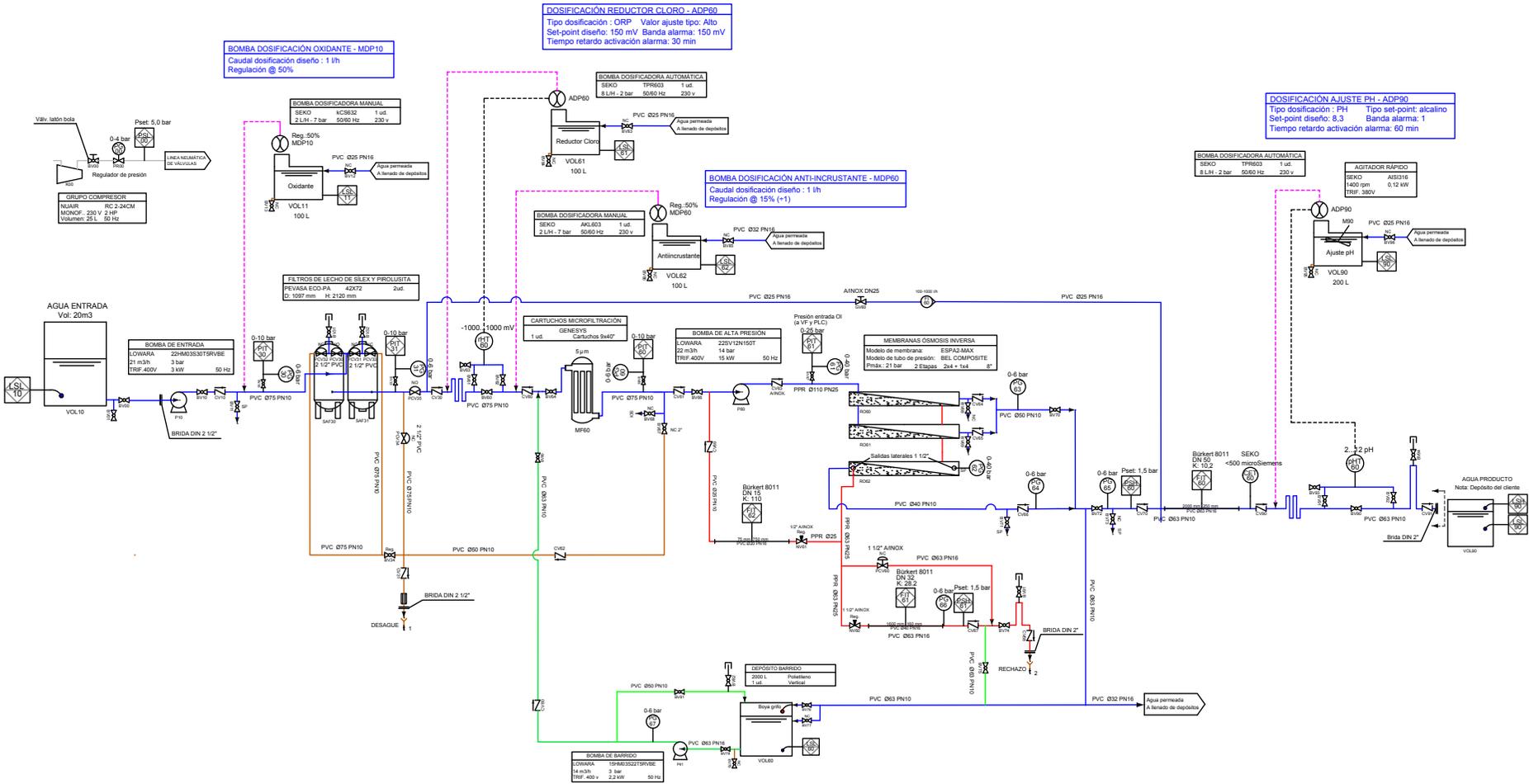
Bibliografía

- [1] La Vanguardia. *Día Mundial del agua en cifras*. <https://bit.ly/36pKE1P>. Consultado: 25-03-2020. 2019.
- [2] Rong Wang Yi-Ning Wang. «Membrane Separation Principles and Applications || Reverse Osmosis Membrane Separation Technology». En: *Elsevier* (2019).
- [3] *Tipos de aguas*. <https://bit.ly/3bZKb7b>. Consultado: 25-03-2020. 2018.
- [4] Labotec. *Aguas corrosivas o incrustantes. Índice de Langelier*. <https://bit.ly/2H3zi90>. Consultado: 25-03-2020.
- [5] Fundación Aquae. *Métodos de desalinización*. <https://bit.ly/35D4vKe>. Consultado: 25-03-2020.
- [6] Carmen María Hernández Jara. *Diseño de una desaladora de agua del mar por ósmosis inversa*. UPCT, 2015.
- [7] Joan Galtés Rafael Ramos. *Sistemas eficientes de desalación*. <https://bit.ly/35DXh8V>. Consultado: 5-03-2020. 2018.
- [8] Marcel Mulder. *Basic Principles of membrane Technology*. Kluwer Academic Publisher, 1996.
- [9] Richard L.Stover. «Seawater reverse osmosis with isobaric energy recovery devices». En: *Elsevier* (2007).
- [10] María Fernanda Chillón Arias. *Reducción de boro en aguas procedentes de la desalación*. Universidad de Alicante, 2009.
- [11] Antonio Viedma Robles. *Ingeniería de Fluidos*. UPCT, 2019.
- [12] H. H. S. Chu S. W. Churchill. «Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate». En: *International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 18, No. 11* (1975).
- [13] Radigan Engineering. *Friction factor calculation in Excel*. <http://bit.ly/3aItazG>. Consultado: 10-10-2020.
- [14] CEPEX. *Accesorios de presión de PVC*. <https://bit.ly/2U9WSnR>. Consultado: 16-10-2020.

- [15] Blas Zamora Parra Antonio Viedma Robles. *Máquinas Hidráulicas. Teoría y Problemas*. UPCT, 2016.
- [16] Claudia Viciano Forte. *Estudio de los Sistemas de Recuperación de Energía en Plantas Desaladoras por Ósmosis Inversa*. ETSI Universidad de Sevilla, 2015.
- [17] Flowserve. *Isobaric Technology DWEEER*. <https://bit.ly/3q03rb6>. Consultado: 2-04-2020.
- [18] ISOBARIX. *XPR-Pressure Exchanger Technology*. <https://bit.ly/3nZBXRW>. Consultado: 2-04-2020.
- [19] Global Petrol Prices. *Precios de la electricidad en todo el mundo*. <http://bit.ly/379wmlu>. Consultado: 13-2-2021.
- [20] Autosolar. *Paneles solares*. <http://bit.ly/3ahWmgs>. Consultado: 13-2-2021.
- [21] GCM Industrial. *Consumo de grupo electrógeno*. <http://bit.ly/3ajSdZ6>. Consultado: 13-2-2021.
- [22] J. Cabrera E. Estrela T. Lora. *Pasado, presente y futuro de la desalación en España*. Ingeniería del agua, 2019.
- [23] Fluence. *Soluciones para el tratamiento de aguas*. <https://bit.ly/33w6kpF>. Consultado: 25-03-2020.
- [24] ECONET. *Métodos de desalinización del agua de mar*. <https://bit.ly/33yIpGa>. Consultado: 25-03-2020.
- [25] PortalEducativo. *Energía libre de Gibbs*. <https://bit.ly/3mr4rTN>. Consultado: 3-04-2020.
- [26] Gabriel Bolívar. *Hidrólisis. en qué consiste y ejemplos de reacciones*. <https://bit.ly/2ZXaNkw>. Consultado: 19-09-2020.
- [27] Lenntech. *Plantas de Ósmosis Inversa*. <https://bit.ly/3ih6NRZ>. Consultado: 24-09-2020.
- [28] Energy Recovery. *PX Pressure Exchanger*. <https://bit.ly/31UjZ1m>. Consultado: 2-04-2020.
- [29] REPOLEN. *Accesorios Repolen PPR*. <https://bit.ly/35TLLWU>. Consultado: 16-10-2020.

Apéndice A

Diagrama P&ID de la planta de ósmosis inversa de estudio



BOMBA DOSIFICACIÓN OXIDANTE - MDP10
 Caudal dosificación diseño : 1 l/h
 Regulación @ 50%

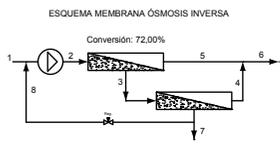
DOSIFICACIÓN REDUCTOR CLORO - ADP60
 Tipo dosificación : ORP Valor ajuste tipo: Alto
 Set-point diseño: 150 mV Banda alarma: 150 mV
 Tiempo retardo activación alarma: 30 min

BOMBA DOSIFICACIÓN ANTI-INCRUSTANTE - MDP60
 Caudal dosificación diseño : 1 l/h
 Regulación @ 15% (+1)

DOSIFICACIÓN A JUSTE PH - ADP90
 Tipo dosificación : PH Tipo setpoint: alcalino
 Set-point diseño: 8.3 Banda alarma: 1
 Tiempo retardo activación alarma: 60 min

Lineas de agua
 Línea principal (Azul)
 Rechazo (Rojo)
 Dosificación (Verde)
 Aire (Naranja)
 Limpieza (Lila)
 Dosificación (Magenta)
 Aire (Cyan)

- Valvulería, accesorios e instrumentación**
- Valvula de bola
 - Valvula antirretorno
 - Valvula de aguja
 - Valvula de compuerta
 - Valvula de membrana actuador hidráulico
 - Ventosa
 - Visualizador de líquidos
 - Rotámetro
 - Mandómetro
 - Sonda de ajuste par redox
 - Contacto de nivel, mínimo
 - Presostato, máxima
 - Sonda de membrana actuador hidráulico
 - Sonda de ajuste de CE
 - Sonda de ajuste par redox a PLC



Punto	Q (m3/h)	P (bar)
1	21,4	2,0
2	21,9	12,7
3	11,7	11,6
4	4,8	1,0
5	10,2	1,5
6	15,0	1,0
7	6,4	10,0
8	0,5	1,0

Proyecto: E.T.A.P. de LUBRÍN		Num. proyecto: 16.210
Cliente: LIROLA Ingeniería y Obras, S.L.		Escala: -
Plano de: P&ID HIDROPURE SPOX5	Formato: ISO A3	Nº plano: 01
Dibujado: GMM	Fecha: 15/06/17	Var: 03
Revisado: GMM	Fecha: 15/06/17	
Aprobado:		
Fecha:		

LOGOTIPO_ECOHIDRO.jpg

ECOHIDRO, Agua y Medio Ambiente
 Pol. Ind. El Arroyo 20170 Mado
 (Garrón) SPAIN
 Tel: +34 922 107 188
 Fax: +34 922 660 129

Apéndice B

Tablas de datos para la pérdida de carga

Recorrido 1				Caudal (m3/h)	21,4							
	Longitud (cm)	Radio(cm)	Tramo	Diámetro (mm)	Rugosidad relativa (ε)	Re	λ	λ Church.	K	Pérdida por tramo (Pa)	Pérdida localizada (Pa)	TOTAL
Cambio de sección	-	-	1.1-1.2	60	-	-	-	-	0,18	-	397,8142083	
T	-	-	1.1-1.2	75	0,000267	106563,91	-	-	1,2	-	1086,2980	
Válvula de Bola	-	-	1.1-1.2	75	0,000267	106563,91	-	-	-	-	-	
Codo	-	3,9	1.1-1.2	75	0,000267	106563,91	-	-	1,12	-	1013,8781	
Longitud de codo	14,9261	-	1.1-1.2	75	0,000267	106563,91	0,019	0,019	-	34,2300	-	
Tubería recta	8,5	-	1.1-1.2	75	0,000267	106563,91	0,019	0,019	-	19,4930	-	
Antirretorno	-	-	1.1-1.2	75	0,000267	106563,91	-	-	-	-	600	
Tubería recta	8,5	-	1.1-1.2	75	0,000267	106563,91	0,019	0,019	-	19,4930	-	
Codo	-	3,9	1.1-1.2	75	0,000267	106563,91	-	-	1,12	-	1013,8781	
Longitud de codo	14,9261	-	1.1-1.2	75	0,000267	106563,91	0,019	0,019	-	34,2300	-	
Tubería recta	13	-	1.1-1.2	75	0,000267	106563,91	0,019	0,019	-	29,8128	-	
T	-	-	1.1-1.2	75	0,000267	106563,91	-	-	1,2	-	1086,2980	
Tubería recta	9	-	1.1-1.2	75	0,000267	106563,91	0,019	0,019	-	20,6397	-	
Manómetro	-	-	1.1-1.2	75	0,000267	106563,91	-	-	-	-	-	
TOTAL										157,8984853	5198,1665	5356,065

Recorrido 2				Caudal (m3/h)	21,9							
	Longitud (cm)	Radio(cm)	Tramo	Diámetro (mm)	Rugosidad relativa (ε)	Re	λ	λ Church.	K	Pérdida por tramo (Pa)	Pérdida localizada (Pa)	TOTAL
Tubería recta	23	-	2.1-2.2	60	0,000116667	136317,152	0,023	0,019	-	204,0671	-	
Ensanchamiento	-	-	2.1-2.2	60	-	-	-	-	0,45	-	1041,5521	
Codo	-	13,5	2.1-2.2	110	6,36364E-05	74354,8101	-	-	0,24	-	49,1716	
Longitud de codo	28,6058	-	2.1-2.2	110	6,36364E-05	74354,8101	0,023	-	-	12,2544	-	
Tubería recta	45	-	2.1-2.2	110	6,36364E-05	74354,8101	0,023	-	-	19,2775	-	
Manómetro	-	-	2.1-2.2	110	6,36364E-05	74354,8101	-	-	-	-	-	
Tubería recta	28	-	2.2-2.3	110	6,36364E-05	74354,8101	0,023	-	-	11,9949	-	
T	-	-	2.2-2.3	110	6,36364E-05	74354,8101	-	-	1,2	-	245,8578	
Longitud de T	15,55	-	2.2-2.3	110	6,36364E-05	74354,8101	0,023	-	-	6,6614	-	
Tubería recta	50	-	2.2-2.3	110	6,36364E-05	74354,8101	0,023	-	-	21,4194	-	
TOTAL										275,6747	1336,5814	1612,2561

Recorrido 3				Caudal (m3/h)	10,2							
	Longitud (cm)	Radio(cm)	Tramo	Diámetro (mm)	Rugosidad relativa (ε)	Re	λ	λ Church.	K	Pérdida por tramo (Pa)	Pérdida localizada (Pa)	TOTAL
Tubería recta	13	-	3.1-3.2	50	0,0004	76188,2163	0,022	0,021	-	119,1054	-	
T	-	-	3.1-3.2	50	0,0004	76188,2163	-	-	1,2	-	1249,3577	
Longitud de T	11,4	-	3.1-3.2	50	0,0004	76188,2163	0,022	-	-	104,4463	-	
Antirretorno	-	-	3.1-3.2	50	0,0004	76188,2163	-	-	-	-	800	
Tubería recta	15	-	3.1-3.2	50	0,0004	76188,2163	0,022	-	-	137,4294	-	
Tubería recta	55	-	3.1-3.2	50	0,0004	76188,2163	0,022	-	-	251,9538	-	
T	-	-	3.1-3.2	50	0,0004	76188,2163	-	-	1,2	-	1249,3577	
TOTAL										612,9349	3298,7155	3911,6504

Recorrido 4				Caudal (m3/h)	0,5							
	Longitud (cm)	Radio(cm)	Tramo	Diámetro (mm)	Rugosidad relativa (ε)	Re	λ	λ Church.	K	Pérdida por tramo (Pa)	Pérdida localizada (Pa)	TOTAL
Tubería recta	7	-	4.1-4.2	63	0,000111	40904,0377	0,024	0,022	-	5,0407	-	
T	-	-	4.1-4.2	63	0,000111	40904,0377	0,024	0,022	1,2	-	226,8310	
Longitud T	15,9	-	4.1-4.2	63	0,000111	40904,0377	0,024	0,022	-	11,4496	-	
Tubería recta	61	-	4.1-4.2	63	0,000111	40904,0377	0,024	0,022	-	43,9260	-	
Codo	-	7,35	4.1-4.2	63	0,000111	40904,0377	0,024	0,022	0,27	-	51,0370	
Longitud de codo	17,0454	-	4.1-4.2	63	0,000111	40904,0377	0,024	0,022	-	12,2743	-	
Tubería recta	121	-	4.1-4.2	63	0,000111	40904,0377	0,024	0,022	-	87,1319	0,0000	
T	-	-	4.1-4.2	63	0,000111	40904,0377	0,024	0,022	1,2	-	226,8310	
Tubería recta	7	-	4.1-4.2	25	0,000280	7469,43297	0,03500	0,034	-	3,9228	-	
Codo	-	3,29	4.1-4.2	25	0,000280	7469,43297	0,03500	0,034	0,22	-	8,8062	
Longitud de codo	8,3679	-	4.1-4.2	25	0,000280	7469,43297	0,03500	0,034	-	4,6893	-	
Tubería recta	32	-	4.1-4.2	25	0,000280	7469,43297	0,03500	0,034	-	17,9326	-	
Válvula Aguja	-	-	4.1-4.2	25	0,000280	7469,43297	0,03500	0,034	2248,419253	-	90000	
Tubería recta	104	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	-	58,2809	-	
Codo	-	1,4	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	1,12	-	44,8315	
Longitud de codo	6,5991	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	-	3,6981	-	
Tubería recta	12,5	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	-	7,0049	-	
Codo	-	1,4	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	1,12	-	44,8315	
Longitud de codo	6,5991	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	-	3,6981	-	
Tubería recta	17,5	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	-	9,8069	-	
Codo	-	1,4	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	1,12	-	44,8315	
Longitud de codo	6,5991	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	-	3,6981	-	
Tubería recta	12,5	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	-	7,0049	-	

Codo		1,4	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	1,12		44,8315	
Longitud de codo	6,5991	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	-	3,6981	-	
Cambio sección	-	-	4.1-4.2	20	0,001000	9336,79122	0,033	0,033	0,18	-	17,59048327	
Tubería recta	67,5	-	4.1-4.2	20	0,001000	9336,79122	0,033	0,033	-	108,8411	-	
Caudalímetro	-	-	4.1-4.2	20	0,001000	9336,79122	0,033	0,033	-	-	-	
Tubería recta	8,5	-	4.1-4.2	20	0,001000	9336,79122	0,033	0,033	-	13,7059	-	
Codo	-	1,1	4.1-4.2	20	0,001000	9336,79122	0,033	0,033	1,12	-	109,4519	
Longitud de codo	6,1279	-	4.1-4.2	20	0,001000	9336,79122	0,033	0,033	-	9,8810	-	
Cambio sección	-	-	4.1-4.2	20	0,001000	9336,79122	0,033	0,033	0,18	-	17,59048327	
Tubería recta	11	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	-	6,1643	-	
Codo	-	1,4	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	1,12	-	44,8315	
Longitud de codo	6,5991	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	-	3,6981	-	
Tubería recta	37	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	-	20,7346	-	
Antirretorno	-	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	-	-	100	
Tubería recta	77,5	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	-	43,4305	-	
Codo	-	1,4	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	1,12	-	44,8315	
Longitud de codo	6,5991	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	-	3,6981	-	
Codo	-	1,4	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	1,12	-	44,8315	
Longitud de codo	6,5991	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	-	3,6981	-	
T	-	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	1,2	-	48,0337	
Tubería recta	13,5	-	4.1-4.2	25	0,000800	7469,43297	0,03500	0,034	-	7,5653	-	
TOTAL										611,4837	92775,9923	93387,4761