

Trabajo Fin de Máster  
Ingeniería de Medio Ambiente

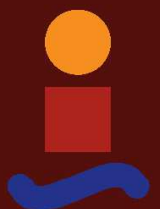
Análisis Técnico-Económico de una Instalación de  
Ósmosis Retardada por Presión (PRO)

Autor: Jesús David Ramos Pardal

Tutor: Fátima Arroyo Torralvo y Luis F. Vilches Arenas

Dpto. Ingeniería Química  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Máster

Ingeniería de Medio Ambiente

# **Análisis Técnico-Económico de una Instalación de Ósmosis Retardada por Presión (PRO)**

Autor:

Jesús David Ramos Parda

Tutor:

Fátima Arroyo Torralvo

Luis F. Vilches Arenas

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Química

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster: Análisis Técnico-Económico de una Instalación de Ósmosis Retardada por Presión (PRO)

Autor: Jesús David Ramos Pardal

Tutor: Fátima Arroyo Torral y Luis F. Vilches Arenas

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis maestros*





# Agradecimientos

---

*La realización de este documento ha sido posible gracias al apoyo recibido tanto por parte de mi familia, como de todas aquellas personas que forman parte de mi vida y creen en mí.*

*Creo necesario acordarme de los docentes que han marcado mi vida académica, sin ellos hoy no estaría presentando este trabajo, no sólo cultiváis a golpe de bien las mentes que aún están por madurar, sino que creáis senderos para encauzar caminos que aún son difíciles de encontrar.*

*Por último, gracias a Fátima Arroyo y Luis Vilches, mis tutores, por su tiempo, dedicación, paciencia, consejos y amabilidad a la hora de llevar a buen puerto este trabajo. Ha sido un placer.*

# Resumen

---

La generación de energía a través de la ósmosis retardada por presión, es una de las técnicas energéticas con menor impacto medioambiental en la actualidad. En este trabajo, se realiza un estudio técnico-económico para conocer los puntos críticos del sistema y determinar si actualmente esta técnica es viable a nivel industrial. Se selecciona el polígono industrial la Venta Nova, para ubicar una planta PRO ficticia a la que se le aplicarán todas las ecuaciones de diseño y comprobar su viabilidad. Este polígono se abastece de aguas del mar Mediterráneo y de aguas del río Ebro. La función objetivo es minimizar los costes de venta de cada kWh producido por la planta. Los resultados obtenidos muestran que actualmente no sería viable, puesto que el precio de venta no baja de los 0,70€/kWh, pero se puede comprobar cuales son los costes con mayor impacto en el proceso y donde se producen las mayores pérdidas de energía.

## Abstract

---

Pressure-Retarded Osmosis is one of the energy techniques with less environmental impact at present. In this work, a technical-economic study is made to know critical points of the system. Also, determine if this technique is viable at an industrial level. "La Venta Nova" is an industrial estate. The PRO plant is located in this industrial estate. Design equations are applied to this fictitious plant to verify its feasibility. This plant is supplied by Mediterranean Sea's water and Ebro River's water. The objective function is to minimize the sale costs of each kWh produced by the plant. The results obtained show that it would not be viable in this moment. The sale price is higher than 0,70 €/kWh. However, it is possible to know which are the highest costs and lost energy.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>x</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xii</b>
Índice de Tablas	<b>xiv</b>
<b>Índice de Ecuaciones</b>	<b>xv</b>
Índice de Figuras	<b>xviii</b>
<b>Glosario</b>	<b>xx</b>
<b>1 Objetivos</b>	<b>2</b>
<b>2 Introducción</b>	<b>3</b>
2.1 <i>Cronología de la Ósmosis</i>	3
2.2 <i>¿Qué es la osmosis?</i>	4
2.3 <i>Tipos de osmosis</i>	5
2.4 <i>Cronología de la PRO</i>	6
2.5 <i>Características de la PRO</i>	7
<b>3 Descripción de una Planta PRO</b>	<b>11</b>
3.1 <i>Sistema de captación y descarga</i>	11
3.2 <i>Pretratamiento</i>	16
3.3 <i>Sistema de membrana</i>	23
3.4 <i>Intercambiador de presión</i>	28
3.5 <i>Turbina hidroeléctrica</i>	30
3.6 <i>Evacuación de la salmuera</i>	31

3.7	<i>Mantenimiento</i>	32
3.8	<i>Integración entre una planta desaladora y PRO</i>	32
<b>4</b>	<b>Problemas Medioambientales</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>Ecuaciones para el diseño de una Planta de Generación de Energía por Ósmosis Retardada por Presión</b>	<b>38</b>
5.1	<i>Potencia de la Planta PRO.</i>	39
5.2	<i>Sistema de captación y descarga de agua.</i>	41
5.3	<i>Pretratamiento.</i>	44
5.4	<i>Sistema de membrana.</i>	46
5.5	<i>Sistemas de transmisión y generación de energía.</i>	47
5.6	<i>Costes del terreno, instalación eléctrica y conexión a la red eléctrica.</i>	49
5.7	<i>Coste total de la planta y energía total perdida o consumida por la planta.</i>	49
5.8	<i>Determinación de la función objetivo.</i>	50
<b>6</b>	<b>CASOS PRÁCTICOS</b>	<b>52</b>
6.1	<i>Planta PRO en función de la potencia instalada.</i>	53
6.2	<i>Planta PRO en función del caudal de agua del río.</i>	58
6.3	<i>Análisis de la planta PRO en función del sistema de captación y descarga.</i>	66
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>68</b>
<b>8</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>70</b>

# Índice de Tablas

---

<b>Tabla 3.1 Características y diferencias entre la captación cerrada y abierta</b>	<b>12</b>
<b>Tabla 3.2 Comparativa de los diferentes módulos de membrana (MSPS, 2009)</b>	<b>26</b>
<b>Tabla 6.1 Resultados para una planta PRO de 1MW de potencia instalada</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 6.2 Resultados para una planta PRO de 1MW de potencia instalada</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 6.3 Resultados para una planta PRO de 2MW de potencia instalada</b>	<b>55</b>
<b>Tabla 6.4 Resultados para una planta PRO de 1MW de potencia instalada</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 6.5 Caudales del río Ebro durante el año 2018 (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>59</b>
<b>Tabla 6.6 Resultados para una planta PRO trabajando al 20% del caudal mínimo</b>	<b>59</b>
<b>Tabla 6.7 Resultados para una planta PRO trabajando al 20% del caudal mínimo</b>	<b>60</b>
<b>Tabla 6.8 Resultados para una planta PRO trabajando al 20% del caudal medio</b>	<b>62</b>
<b>Tabla 6.9 Resultados para una planta PRO trabajando al 20% del caudal medio</b>	<b>62</b>
<b>Tabla 6.10 Resultados para una planta PRO trabajando al 20% del caudal máximo</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 6.11 Resultados para una planta PRO trabajando al 20% del caudal máximo</b>	<b>64</b>

# Índice de Ecuaciones

---

Ecuación 1	6
Ecuación 2	9
Ecuación 3	9
Ecuación 4	9
Ecuación 5	10
Ecuación 6	10
Ecuación 7	33
Ecuación 8	34
Ecuación 9	39
Ecuación 10	40
Ecuación 11	40
Ecuación 12	40
Ecuación 13	41
Ecuación 14	41
Ecuación 15	41
Ecuación 16	41
Ecuación 17	41
Ecuación 18	42
Ecuación 19	42
Ecuación 20	42
Ecuación 21	42
Ecuación 22	43
Ecuación 23	43

---

Ecuación 24	43
Ecuación 25	43
Ecuación 26	43
Ecuación 27	43
Ecuación 28	44
Ecuación 29	44
Ecuación 30	44
Ecuación 31	44
Ecuación 32	44
Ecuación 33	44
Ecuación 34	45
Ecuación 35	45
Ecuación 36	45
Ecuación 37	45
Ecuación 38	45
Ecuación 39	45
Ecuación 40	45
Ecuación 41	46
Ecuación 42	46
Ecuación 43	46
Ecuación 44	46
Ecuación 45	47
Ecuación 46	47
Ecuación 47	47
Ecuación 48	47
Ecuación 49	48
Ecuación 50	48
Ecuación 51	48



Ecuación 52	48
Ecuación 53	48
Ecuación 54	48
Ecuación 55	49
Ecuación 56	49
Ecuación 57	49
Ecuación 58	49
Ecuación 59	50
Ecuación 60	50
Ecuación 61	50
Ecuación 62	50
Ecuación 63	50
Ecuación 64	51

# Índice de Figuras

---

<b>Figura 2.1 Magnitud y dirección de <math>J_w</math> para FO, PRO y RO y magnitud</b> (Lee, et al., 1981)	5
<b>Figura 2.2 Diferencia entre los 3 tipos de ósmosis; Ósmosis directa (FO), inversa (RO) y retardada por presión (PRO)</b> (Achilli, et al., 2009)	5
<b>Figura 2.3 Esquema de la planta piloto de PRO, construida por Statkraft</b> (Sharif, et al., 2014)	7
<b>Figura 2.4 Esquema de una planta PRO</b> (Yip, et al., 2011)	8
<b>Figura 3.1 Diagrama simplificado del proceso PRO</b> (Skilhagen*, et al., 2008)	11
<b>Figura 3.2 Torre de toma con flujo de entrada de agua horizontal y vertical</b> (Sánchez-Barriga & Pita, 2016)	13
<b>Figura 3.3 Obstrucción de las rejillas por ensuciamiento</b> (Sánchez-Barriga & Pita, 2016)	14
<b>Figura 3.4 Equipo para la ejecución de hincas en microtúnel</b> ( <a href="https://www.interempresas.net">https://www.interempresas.net</a> , s.f.)	15
<b>Figura 3.5 Decantador estático de cuatro plantas</b> ( <a href="http://elaguapotable.com">elaguapotable.com</a> , s.f.)	18
<b>Figura 3.6 Flotación</b> (Nemerow, 1977)	18
<b>Figura 3.7 Filtro de arena en tanque cerrado</b> (Grundfos, 2002)	19
<b>Figura 3.8 Filtro de carbón activo</b> ( <a href="http://www.aguasistec.com">www.aguasistec.com</a> , s.f.)	20
<b>Figura 3.9 Espectros de filtración</b> (MSPS, 2009)	21
<b>Figura 3.10 Separación por membranas según las diferentes tecnologías</b> (MSPS, 2009)	21
<b>Figura 3.11 Presión de trabajo de las diferentes tecnologías de membrana</b> (Grundfos, 2002)	22
<b>Figura 3.12 Sistema de microfiltración</b> (Grundfos, 2002).	23
<b>Figura 3.13 Módulo de plato y marco</b> (Grundfos, 2002)	24
<b>Figura 3.14 Módulo tubular</b> (Grundfos, 2002)	24
<b>Figura 3.15 Hollow Fiber configuration</b> (Akafor, s.f.)	27
<b>Figura 3.16 Spiral membrane configuration</b> (Akafor, s.f.)	28
<b>Figura 3.17 Intercambiador de presión de ERI con su despiece</b> (Littrel, 2016)	29
<b>Figura 3.18 Diagrama de un Intercambiador de Presión</b> (MacHarg, 2007)	30

<b>Figura 3.19 Turbina Francis y turbina Pelton</b>	30
<b>Figura 3.20 Esquema de una turbina hidroeléctrica (School, s.f.)</b>	31
<b>Figura 3.21 Esquema de un sistema híbrido RO-PRO (He, et al., 2014)</b>	33
<b>Figura 5.1 Diagrama de flujo del proceso PRO (elaboración propia)</b>	38
<b>Figura 5.2 Balance de materia en el sistema de membrana</b>	40
<b>Figura 6.1 Ubicación de la Planta PRO</b>	52
<b>Figura 6.2 Comparación de los costes (€) para una planta de 1MW de potencia instalada</b>	55
<b>Figura 6.3 Comparación de la energía consumida (GWh/yr) por una planta de 1MW de potencia instalada</b>	55
<b>Figura 6.4 Comparación de los costes (€) para una planta de 2MW de potencia instalada</b>	57
<b>Figura 6.5 Comparación de la energía consumida (GWh/yr) por una planta de 2MW de potencia instalada</b>	57
<b>Figura 6.6 Comparación de los costes (€) para una planta PRO trabajando al 20% del caudal mínimo</b>	61
<b>Figura 6.7 Comparación de la energía consumida (GWh/yr) por una planta PRO trabajando al 20% del caudal mínimo</b>	61
<b>Figura 6.8 Comparación de los costes (€) para una planta PRO trabajando al 20% del caudal medio</b>	63
<b>Figura 6.9 Comparación de la energía consumida (GWh/yr) por una planta PRO trabajando al 20% del caudal medio</b>	63
<b>Figura 6.10 Comparación de los costes (€) para una planta PRO trabajando al 20% del caudal máximo</b>	65
<b>Figura 6.11 Comparación de la energía consumida (GWh/yr) por una planta PRO trabajando al 20% del caudal máximo</b>	65
<b>Figura 6.12 Precio del kWh en función de las propiedades del sistema de captación (diámetro hipotético)</b>	67

# Glosario

$\Delta\Pi_{osm}$	Diferencia de presión osmótica (bar)	$\Delta P$	Diferencia de presión osmótica práctica (MJ/m <sup>3</sup> )
$M_{NaCl}$	Masa molar NaCl 58,44 g/mol	R	Constante universal gases 8,314 J/molK
$T_d$	Temperatura del río Ebro (°K)	$T_c$	Temperatura del agua del mar (°K)
$S_{NaCl,d}$	Salinidad Río Ebro (g/L)	$S_{NaCl,c}$	Salinidad mar 40 g/L
$Q_{fm}$	Caudal agua fresca (dulce) que llega al sistema de membrana (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{fi}$	Caudal de agua dulce entrada (m <sup>3</sup> /s)
$Q_{sm}$	Caudal agua salada membrana (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{si}$	Caudal agua salada entrada (m <sup>3</sup> /s)
Q	Caudal agua del río (m <sup>3</sup> /s)	$Q_b$	Caudal descarga agua salobre (m <sup>3</sup> /s)
P	Capacidad energética de la planta (MW)	$E_p$	Producción de energía inicial (GWh/yr)
$t_{hrs/yr}$	Horas por año 365*24	$t_{secl/yr}$	Segundos por año 365*24*3600
$v_{max}$	Velocidad máxima agua captación 1,8 m/s	$\mu$	Viscosidad agua 0,001 kg/(m·s)
$A_{ocsf}$	Sección transversal tubería captación agua dulce (m <sup>2</sup> )	$D_{ocsf}$	Diámetro tubería captación agua dulce (m)
$A_{ocssi}$	Sección transversal tubería captación agua salada (m <sup>2</sup> )	$D_{ocssi}$	Diámetro tubería captación agua salada (m)
$A_{ocsb}$	Sección transversal tubería descarga (m <sup>2</sup> )	$D_{ocsb}$	Diámetro tubería descarga (m)
$Re_{ocsf}$	Nº Reynolds agua dulce	$f_{ocsf}$	Coefficiente de rozamiento (agua dulce)
$Re_{ocssi}$	Nº Reynolds agua salada	$f_{ocssi}$	Coefficiente de rozamiento (agua salada)
$Re_{ocsb}$	Nº Reynolds agua descarga	$f_{ocsb}$	Coefficiente de rozamiento (agua descarga)
$\Sigma F_{ocsf}$	Pérdida carga (agua dulce) (m)	$L_{ft}$	Longitud tubería captación agua dulce (m)
$\Sigma F_{ocssi}$	Pérdida carga (agua salada) (m)	$L_{st}$	Longitud tubería captación agua salada (m)

$\Sigma F_{ocsb}$	Pérdida carga (agua descarga) (m)	$L_{bt}$	Longitud tubería descarga (m)
$C_{ft}$	Coste capital tubería entrada agua dulce (€)	$C_{st}$	Coste capital tubería entrada agua salada (€)
$C_{bt}$	Coste capital tubería descarga agua salobre (€)	$C_{upt}$	Precio unidad tuberías entrada/descarga (€/m <sup>3</sup> )
$C_{ios}$	Coste capital total sistema entrada y descarga (€)	$E_{lios}$	Pérdida energía en sistema entrada/descarga (GWh/yr)
$A_{ff}$	Área filtro agua fresca (dulce) (m <sup>2</sup> )	$A_{sf}$	Área filtro agua salada (m <sup>2</sup> )
$J_{wf}$	Flujo agua microfiltración 0,0063 m/s	$A_{fd}$	Área filtro tambor 65,97 m <sup>2</sup>
$n_{fd}$	Número de tambores agua fresca (dulce)	$n_{sd}$	Número de tambores agua salada
$L_{fd}$	Longitud tambor agua dulce (m)	$L_{sd}$	Longitud tambor agua salada (m)
$C_{upmf}$	Precio unitario microfiltración 0,1 €/m <sup>3</sup>	$C_{upps}$	Precio unitario bomba sumidero 300 €/m <sup>3</sup>
$D_{drums}$	Diámetro de tambor 3,5 m	$\Delta P_{mf}$	Presión mínima microfiltración 0,3·10 <sup>5</sup> Pa
$A_{csps}$	Sección transversal bomba sumidero 140m <sup>2</sup>	$A_{csds}$	Sección transversal sumidero descarga 120m <sup>2</sup>
$C_{mf}$	Coste microfiltración agua dulce (€)	$C_{smf}$	Coste capital microfiltración agua salada (€)
$C_{tmf}$	Coste capital total microfiltración (€)	$C_{ps}$	Coste capital bombas de sumideros (€)
$C_{ds}$	Coste capital sumidero descarga (€)	$C_{ts}$	Coste capital total sumidero (€)
$C_{tpt}$	Coste capital total de Pretratamiento (€)	$E_{cpt}$	Energía consumida por Pretratamiento (GWh/yr)
$A_m$	Área membrana (m <sup>2</sup> )	$W$	Densidad energética membrana 2,4 W/m <sup>2</sup>
$C_{upm}$	Precio unitario membrana 5 €/m <sup>2</sup>	%bleed	Porcentaje de sangrado (Recirculación) 0,1
$C_{ms}$	Coste capital sistema membrana (€)	$E_{lb}$	Energía perdida debido al sangrado de agua dulce (GWh/yr)
$n_{modules}$	Número de módulos	$P \cdot d_{module}$	Densidad empaquetamiento módulos de membrana 775 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
$n_{pv}$	Número de recipientes a presión	$V_{module}$	Volumen módulo membrana 0,03142 m <sup>3</sup>
$n_{ms}$	Número de pilas de membrana	$n_{modules/PV}$	Nº módulo cada recipiente de presión 7

MWs	Electricidad producida por una pila (MW)	$\eta_{pv/stack}$	Nº recipientes presión en cada pila membrana 6120
$C_{ptpe}$	Coste capital de bombas, turbinas e intercambiadores de presión (€)	$f_{\epsilon}$	Conversión moneda 1,16
$C_{pipe}$	Coste capital de tuberías (€)	$C_{ttg}$	Coste capital total sistemas transmisión y generación (€)
$\rho$	Densidad agua 1000 kg/m <sup>3</sup>	g	Gravedad 9,8 m/s <sup>2</sup>
$\eta_{pump}$	Eficiencia Bombas 0,65	$\eta_{turbine}$	Eficiencia turbina 0,85
$\Delta H_{wt}$	Pérdida de cota total 10 m	$E_{wt}$	Pérdidas de energía debido transporte agua (GWh/yr)
$E_{it}$	Pérdida energía eficiencia turbina (GWh/yr)	$E_{tttg}$	Pérdida total energía sistemas transmisión/generación (GWh/yr)
$C_{land}$	Coste terreno (€)	$C_{upl}$	Coste unitario terreno 100 €/m <sup>2</sup>
$C_{egc}$	Coste de instalación y sistema de red eléctrica (€)	$C_{tpp}$	Coste capital total de planta energía (€)
$E_{it}$	Total de energía perdida y consumida (GWh/yr)	$E_{net}$	Producción de energía neta planta (GWh/yr)
n	Tiempo retorno inversión 20 años	i	Tasa de interés 0,12
CRF	Factor retorno inversión 0,134	$\varphi$	Factor de operación y mantenimiento 10%
$Z_C$	Costes de inversión (€/kWh)	$Z_{OM}$	Costes de operación y mantenimiento (€/kWh)
Z	Función objetivo (€/kWh)	k	Rugosidad material de tuberías (m)



# 1 OBJETIVOS

---

El objetivo del presente proyecto es el estudio técnico-económico de una planta de ósmosis retardada por presión, desarrollando todas las ecuaciones necesarias para el diseño de dicha planta. El fin último de dicho trabajo es obtener el precio al que se podría vender cada kWh producido por esta planta.

Para poder determinar la función objetivo, y comprobar cómo afectan los distintos parámetros que conforman la planta, se realizan distintos estudios, modificando ciertas variables y comparando los resultados. Se estudian y comparan los resultados obtenidos al trabajar con una planta con una potencia instalada de 1MW y 2MW, cómo afecta el caudal a los resultados, estudiando 3 caudales distintos de agua dulce (caudal mínimo del río, el caudal medio y el máximo), y se hace un estudio de cuál es el diámetro óptimo de tubería para la captación de agua y cuáles son los resultados obtenidos con dicho valor. Cada uno de estos supuestos prácticos llevará consigo un estudio comparativo de los costes económicos y energéticos de cada una de las distintas partes de la planta, para poder comprobar cuales tienen un mayor impacto económico-energético.



## 2 INTRODUCCIÓN

*Si hay magia en este planeta, está contenida en el  
agua  
- Loran Eisely -*

### 2.1 Cronología de la Ósmosis

Los primeros experimentos sobre ósmosis datan de 1748 (Castillo, 2003), y fueron realizados por Jean Antoine Nollet, que era profesor de física en la Universidad de Navarra. Nollet (Nollet, 1748) a través de experimentos con vejiga animal, de cerdo concretamente, comprobó que si colocaba alcohol en un lado de la vejiga y en el otro sólo agua, el agua atravesaba la vejiga hacia el alcohol pero nunca al contrario. Esto dio lugar al descubrimiento de las primeras membranas semipermeables (de origen orgánico).

Sin embargo, el descubrimiento de la ósmosis a través de membranas semipermeables se le atribuye a Henri Dutrochet, quien observó que la difusión de solvente se producía siempre de la solución de menor concentración hacia la de mayor concentración, siendo capaz de atravesar la membrana semipermeable sólo el solvente y nunca el soluto. Además, descubrió que el solvente que fluye a través de dicha membrana provoca una presión que él denominó *presión osmótica*, que es una propiedad coligativa relacionada con la concentración de sales en el interior de las soluciones, y es la fuerza que causa el movimiento a través de la membrana.

No fue hasta 50 años más tarde, 1877, cuando se realizaron las primeras medidas cuantitativas de la presión osmótica, de mano del botánico William Pfeffer. En sus experimentos utilizó una membrana semipermeable artificial fabricada precipitando ferrocianuro de cobre en el laboratorio, y usando agua como solvente y sacarosa como soluto. Gracias a estos experimentos consiguió determinar que la presión osmótica era directamente proporcional tanto a la concentración de soluto como a la temperatura.

En el año 1886, Jacobus Henricus Van't Hoff comparó la presión ejercida por las moléculas del soluto sobre la membrana con la que ejercían las partículas de un gas, la cual se puede resumir en la siguiente expresión: *“Toda materia disuelta ejerce sobre una pared semipermeable una presión osmótica igual a la presión que sería ejercida en el mismo volumen, para un número igual de moléculas en estado gaseoso.”* Gracias a sus estudios sobre las propiedades coligativas de las disoluciones fue capaz de formular una expresión para la presión osmótica,  $\pi = R \cdot T \cdot C$ , siendo R la constante de los gases universales, T la

temperatura y  $C$  la concentración de soluto. Esta teoría fue abandonada a principios del Siglo XX por considerarse errónea; se debe tener en cuenta la aparición de la fisicoquímica a final del S. XIX, y con ella la teoría de las soluciones en general, la relaciones en el equilibrio y las condiciones exteriores en un sistema termodinámico. Actualmente, la Ley de Van't Hoff se sigue usando, aunque su expresión se ha modificado añadiendo algunos términos:  $\pi = R \cdot T \cdot (\phi \cdot i \cdot C)$ , siendo  $\phi$  el coeficiente osmótico e  $i$  el número de iones formados por la disociación del soluto.

## 2.2 ¿Qué es la osmosis?

**S**e puede encontrar el origen etimológico de la palabra ósmosis, u ósmosis, en el griego. Dicha palabra se puede dividir en dos partes diferenciadas, por un lado tenemos el término *osmos*, cuyo significado es impulso, y por otro lado *sis*, que se usa como sufijo y se puede traducir como acción.

La ósmosis es un proceso físico-químico que se produce cuando dos disoluciones de distintas concentraciones se ponen en contacto, separadas únicamente por una membrana semipermeable, y el disolvente de la disolución más concentrada difunde a través de dicha membrana hacia la más concentrada, con el fin de igualar las concentraciones a ambos lados de la membrana.

Una membrana semipermeable es aquella que contiene un tamaño de poro molecular, de forma que pueda atravesar la membrana aquellas moléculas más pequeñas, no así las de mayor tamaño que los poros.

Según la concentración de solvente en las distintas soluciones se pueden distinguir 3 tipos de medios (Cath, et al., 2006): **Hipotónicos** (cuando la concentración del soluto es menor que la del medio), **Hipertónico** (cuando la concentración de soluto es mayor que la del medio) e **Isotónico** (cuando ambas soluciones tienen la misma concentración).

A continuación, se va a definir una serie de términos relacionados con la ósmosis que nos serán válidos tanto para entender el fenómeno de ósmosis como en la resolución del problema que se presenta en este trabajo.

El primero de ellos es el de **presión osmótica**, que se define, no como la presión que ejerce una de las disoluciones del sistema, sino como la presión ejercida por el exterior para evitar el flujo osmótico, esto es, el paso de solvente desde la disolución menos concentrada a la más concentrada. Van't Hoff definió la presión osmótica con la siguiente ecuación:  $\pi = iCRT$ ; donde  $\pi$  es la presión osmótica,  $C$  es la concentración (mol/l),  $R$  es la constante de gases ideales ( $8,314 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  $T$  es la temperatura (°K) y el factor  $i$  define las partículas osmóticamente activas de una molécula. El factor  $i$  depende tanto de la

naturaleza de la molécula como de su concentración (por ejemplo para el NaCl 1M, i tome un valor cercano a 1,86).

## 2.3 Tipos de ósmosis

A través de una membrana semipermeable el agua es capaz de fluir desde una solución de menor salinidad hasta otra de mayor concentración salina por difusión y sin gasto de energía, por el efecto de un gradiente. Atendiendo a la dirección del flujo de solvente, la presión osmótica y la presión, ejercida o no, desde el exterior, se pueden encontrar con 3 tipos distintos de ósmosis: Ósmosis directa (forward ósmosis), ósmosis inversa (reverse ósmosis) o PRO (Pressure-retarded ósmosis). En las figuras 2.1 y 2.2 se muestran las diferencias entre los 3 tipos de ósmosis:

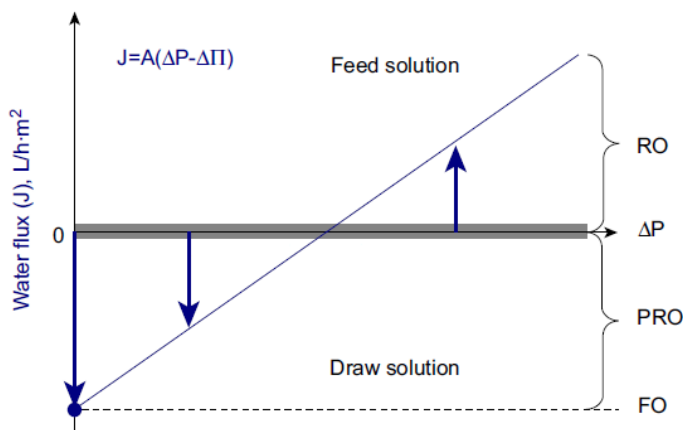


Figura 2.1 Magnitud y dirección de  $J_w$  para FO, PRO y ROy magnitud (Lee, et al., 1981)

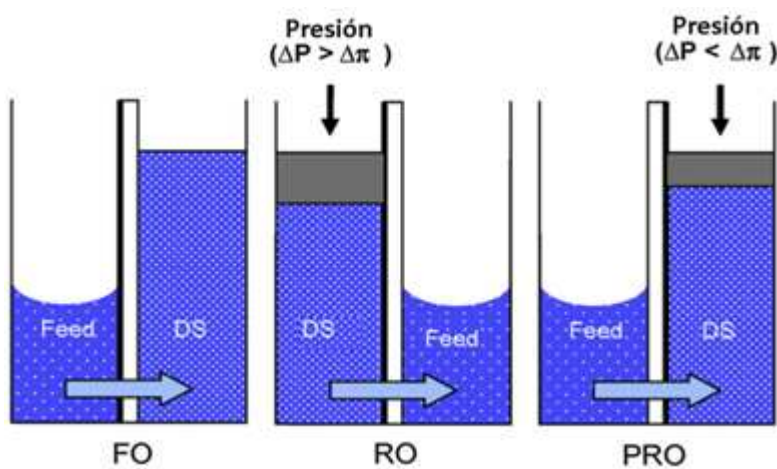


Figura 2.2 Diferencia entre los 3 tipos de ósmosis; Ósmosis directa (FO), inversa (RO) y retardada por presión (PRO) (Achilli, et al., 2009)

La ósmosis directa se produce cuando el flujo de solvente de la disolución más concentrada a la disolución menos concentrada se produce de forma espontánea, sin que ninguna fuerza exterior fuerce dicho paso de solvente. Cuando la presión hidrostática tiene los siguientes valores  $0 < \Delta P < \Delta \pi$ , el solvente pasa de la más solución más concentrada a la de menor concentración, y se produce el fenómeno de la PRO, que se producirá siempre que se mantenga constante el flujo a través de la membrana y, en el lado de la más concentrada, la presión y la concentración constantes. El fenómeno de ósmosis inversa, esto es, el paso de solvente de la solución menos concentrada a la de mayor concentración, se producirá cuando se aplique una fuerza a la disolución menos concentrada de forma que se cumpla lo siguiente  $\Delta P > \Delta \pi$ .

Otro de los términos es el **flujo** de solvente, que define la cantidad de solvente que atraviesa la membrana semipermeable en un determinado tiempo. Se suele representar por **J** y sus unidades son  $\text{l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  y en cualquiera de los tipos de ósmosis el flujo de agua que permea la membrana puede calcularse como:

$$J = A(\Delta\pi - \Delta P) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde A es el coeficiente de permeabilidad de la membrana ( $\text{l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$ ) y  $\Delta P$  es la presión hidrostática (bar).

## 2.4 Cronología de la PRO

**E**l concepto de la obtención de energía a través de la mezcla de aguas de diferentes salinidades fue expuesto por primera vez por R. E. Pattle (Achilli & Childress, 2010) (Pattle, 1954), en la década de los 50, a través de sus investigaciones de la producción de energía mediante la mezcla de agua dulce y salada en una pila hidroeléctrica, formulando que la energía libre perdida al mezclarse dichas aguas se puede comparar con la que se obtiene de la caída de una cascada.

A mediados de la década de los 70, debido a la crisis energética, se impulsó nuevamente la investigación sobre alternativas de suministro de energía, esta vez por Sidney Loeb (Loeb, et al., 1976) (Loeb & Mehta, 1979) (Loeb, 1998) (Mehta & Loeb, 1978) (Mehta & Loeb, 1979) (Loeb, 1976) (Loeb & Norman, 1975), quien realizó varias publicaciones teóricas y experimentales sobre el tema, e informó que la energía osmótica podía ser aprovechada. Sin embargo, la investigación sobre PRO de nuevo se ralentizó en los años 80 y 90 debido a los altos costes de las membranas, lo que suponía por aquel entonces, un método inviable para obtener energía de forma competitiva.

En 1997, Statkraft (Skilhagen, 2010) (Sharif, et al., 2014), uno de los proveedores de energía líder de Noruega, comenzó nuevos estudios sobre la PRO. En 2001, Statkraft invitó a GKSS Forschungszentrum a participar como socio para el desarrollo de nuevas membranas que hagan posible la viabilidad económica de este proyecto. Alentado por los nuevos descubrimientos a finales de los años 2000, Statkraft abrió en

noviembre del año 2009 el prototipo de la primera planta de energía PRO en Tofte, Noruega, demostrando que el concepto PRO se puede usar para generar electricidad. La planta se ha utilizado para probar diferentes tipos de membranas y configuraciones de planta, de forma que se pueda avanzar en el estudio del poder osmótico. La figura 2.3 muestra un esquema de la planta piloto de PRO construida por Statkraft.

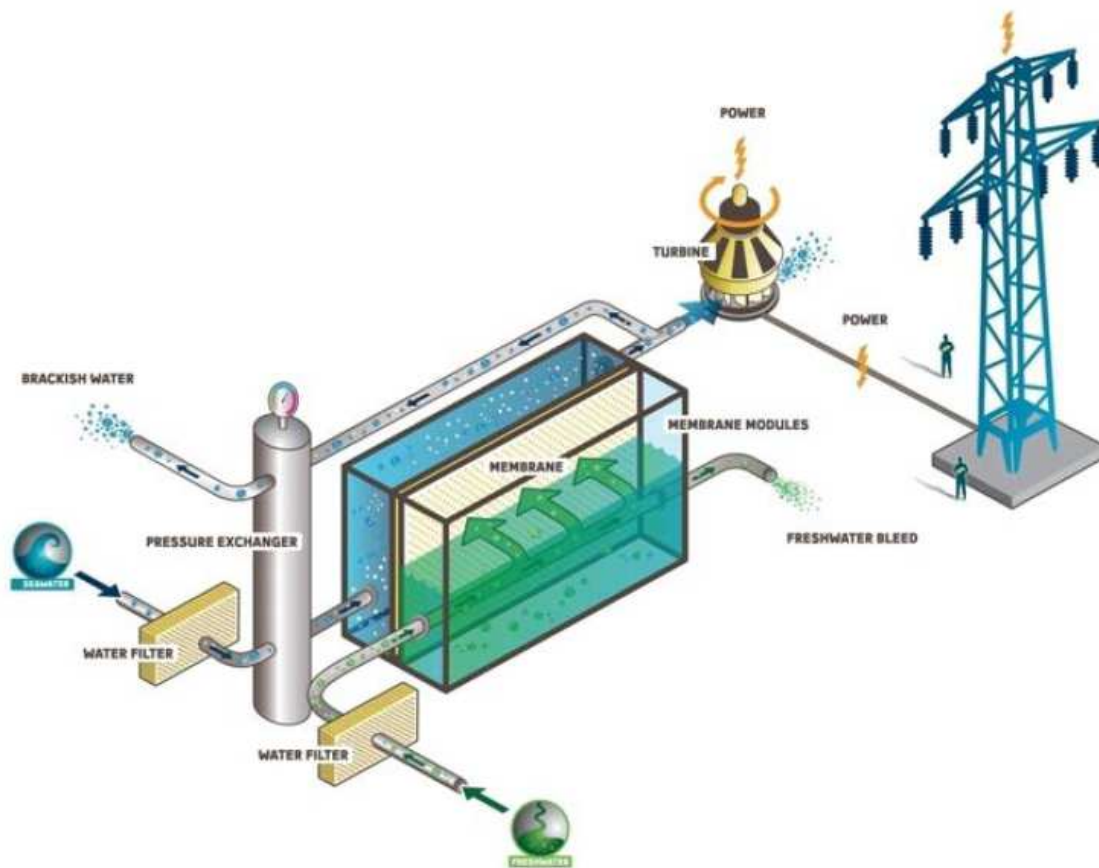


Figura 2.3 Esquema de la planta piloto de PRO, construida por Statkraft (Sharif, et al., 2014)

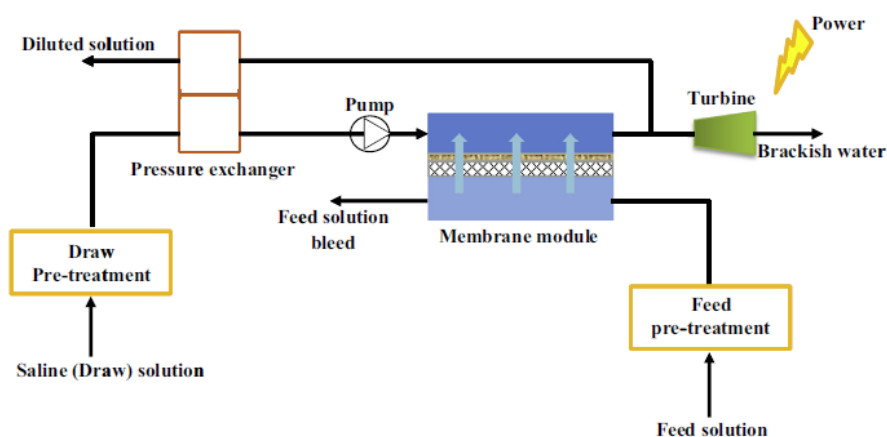
## 2.5 Características de la PRO

La Ósmosis Retardada por Presión (PRO) (Loeb, 1976) (Touati & Tadeo, 2016) (Skilhagen\*, et al., 2008) se puede considerar como un proceso intermedio entre la ósmosis directa e inversa, donde el gradiente de presión hidráulica se aplica en la dirección opuesta al gradiente de presión osmótica, igual que ocurre en la ósmosis inversa, pero en el caso de la PRO el flujo de solvente sigue el sentido contrario al de la RO como ocurre en la ósmosis directa. En resumen, aplicamos una presión hidráulica en el lado de la disolución más concentrada, pero el solvente sigue fluyendo desde la menos concentrada a la más concentrada.

La PRO es un proceso de membrana para la obtención de energía, basado en la diferencia de salinidad entre dos corrientes de agua. Cuando la solución concentrada se encuentra con la más diluida, con una membrana semipermeable entre ambas soluciones, se produce una difusión a través de dicha membrana del agua de la solución más diluida hacia la más concentrada, que llega al sistema de membrana presurizada. Luego, el agua salobre presurizada se dividirá en dos corrientes: la primera pasará por una turbina hidroeléctrica que producirá energía, mientras que la otra corriente irá a parar a un intercambiador de presión, para presurizar la entrada de la solución concentrada.

El esquema del proceso, en general, sigue el esquema que se muestra en la figura 2.4 y se puede dividir en varias etapas:

1. Sistemas de captación y descarga de efluentes.
2. Pretratamiento.
3. Intercambiador de presión.
4. Módulo de membrana.
5. Hidroturbina.



**Figura 2.4** Esquema de una planta PRO (Yip, et al., 2011)

Actualmente, la PRO está siendo estudiada ampliamente, probando distintas configuraciones, de forma que se pueda comprender su funcionamiento, estimar sus costes, el alcance y los impactos ambientales que supone. Los principales modelos estudiados son los de Loeb, Lee, Achilli, Yip y Touati.

- ✚ Loeb (Loeb, 1976) consideró una membrana de fibra hueca asimétrica, y que el flujo de agua que atraviesa la membrana es función de las concentraciones de ambas soluciones. Supone, además, que el flujo de sal es despreciable, el flujo de agua se produce por difusión, y la concentración es proporcional a la presión osmótica; lo que lo lleva hasta la siguiente expresión (ecuación 2):

$$J_w = A(\pi_{Draw} - \pi_{Feed} \exp\left(\frac{\Delta X}{D_{sp}}\right) - \Delta P) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $\Delta X$  es el grosor de la membrana y  $D_{SP}$  es el coeficiente de difusión del soluto.

- Lee (Lee, et al., 1981) fue el primero que consideró la polarización de la concentración en su modelo para explicar el flujo de agua en la PRO. Supuso que existía la polarización de la concentración interna, mientras que la externa, con suficiente agitación, se podía despreciar, y que las concentraciones de las soluciones eran proporcionales a las presiones osmóticas de las soluciones. La expresión resultante, teniendo en cuenta la ICP, fue la siguiente:

$$J_w = A \left[ \pi_{D,m} \frac{1 - \frac{C_{F,b}}{C_{D,m}} \exp(J_w K)}{1 + \frac{B}{J_w} [\exp(J_w K - 1)]} - \Delta P \right] \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde,  $\pi_{D,m}$  es la presión osmótica en la capa activa del lado de la solución concentrada,  $C_{F, D}$ , hace referencia a las concentraciones de las soluciones diluida (Feed) y concentrada (Draw) respectivamente,  $C_{F,b}$  es la concentración en el seno de la alimentación (bulk),  $C_{F,m}$  la concentración de la alimentación en la capa adyacente a la capa activa (membrane),  $B$  es el coeficiente de permeabilidad de un soluto para una membrana semipermeable y  $K$  la resistividad del soluto. El efecto de la polarización de la concentración interna IPC se expresa en el término  $\exp(J_w K)$ .

- Achilli (Achilli, et al., 2009) amplió el modelo desarrollado por Lee, considerando el efecto producido por la polarización de la concentración externa (ECP), asumiendo que  $C_{F,b}/C_{D,m} = \pi_{F,b}/\pi_{D,m}$ . Achilli considera que el efecto de ECP se produce en el lado de la solución concentrada, de forma que los solutos se diluyen en la superficie a medida que se difunde el agua, lo que produce una ECP diluida que tiene la siguiente expresión:  $\pi_{F,b}/\pi_{D,m} = \exp(-J_w/k)$ . La expresión matemática del modelo desarrollado por Achilli resulta:

$$J_w = A \left[ \pi_{D,b} \exp\left(-\frac{J_w}{k}\right) \frac{1 - \frac{\pi_{F,b}}{\pi_{D,m}} \exp(J_w K) \exp\left(\frac{J_w}{k}\right)}{1 + \frac{B}{J_w} [\exp(J_w K - 1)]} - \Delta P \right] \quad \text{Ecuación 4}$$

Siendo  $k$  el coeficiente de transferencia de masa.

- En los modelos que hemos visto hasta el momento no se tenía en cuenta el flujo inverso (retroflujo) de sal, por ello, Yip (Yip, et al., 2011) modificó el modelo de Lee para incorporar los efectos de ECP y la penetración inversa de la sal, consiguiendo llegar hasta la siguiente expresión:

$$J_w = \left[ \frac{\pi_{D,b} \exp\left(-\frac{J_w}{k}\right) - \pi_{F,b} \exp(J_w K)}{1 + \frac{B}{J_w} [\exp(J_w K) - \exp\left(-\frac{J_w}{k}\right)]} - \Delta P \right] \quad \text{Ecuación 5}$$

El efecto ECP se suma por el término  $\exp(-J_w/k)$ , y el efecto del retroflujo de sal en el denominador.

- Touati (Touati, et al., 2015) introdujo un modelo general de transporte de masa, que describe todo el proceso de transporte que ocurre en la PRO sin ninguna simplificación, teniendo en cuenta los límites externos, capas activas y las membranas de soporte asimétrico. Su teoría se basó en la teoría de la difusión por convección, y su expresión matemática del modelo es:

$$J_w = A \left[ \left( \pi_{D,b} + \frac{B}{A} \left( 1 + \frac{A \Delta P}{J_w} \right) \right) \exp\left(-\frac{J_w}{k_D}\right) - \left[ \pi_{F,b} + \frac{B}{A} \left( 1 + \frac{A \Delta P}{J_w} \right) \right] \exp(J_w K) \exp\left(\frac{J_w}{k_F}\right) - \Delta P \right] \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde  $k_{D,F}$  son los coeficientes de transferencia de masa de las capas límites en las soluciones diluidas y concentradas.



## 3 DESCRIPCIÓN DE UNA PLANTA PRO

Una planta de obtención de energía mediante la tecnología de tipo PRO se puede dividir en varias etapas o zonas de trabajo. Como esquema general se puede dividir en: Sistemas de captación y descarga de efluentes, zona de pretratamiento, intercambiador de presión, módulo de membranas y turbina hidroeléctrica.

Gran parte de la tecnología usada por las industrias hidroeléctricas y de desalinización hoy en día se puede transferir a plantas de energía PRO con pequeñas modificaciones, por eso, al explicar las distintas partes de la planta PRO se recurrirá a estas tecnologías. En la figura 3.1 se muestra un ejemplo simplificado de la planta de Statkraft (Skråmestø\*, et al., s.f.):

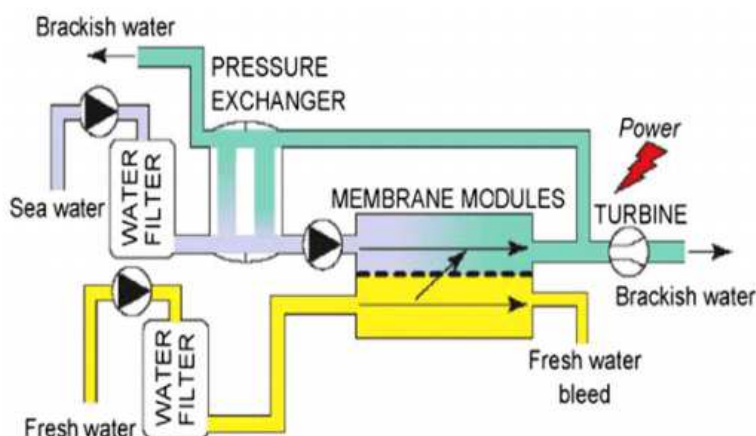


Figura 3.1 Diagrama simplificado del proceso PRO (Skilhagen\*, et al., 2008)

### 3.1 Sistema de captación y descarga

Tanto la captación como la descarga de agua suponen una elevada carga medioambiental, ya que se suelen efectuar cerca de ecosistemas marinos con un alto nivel de protección ambiental.

Actualmente, hay 3 opciones para la captación de agua: Toma abierta, toma cerrada y toma mixta. La toma abierta capta agua directamente del mar, por tanto, presenta una mayor vulnerabilidad frente a cualquier tipo de vertido contaminante, así como una alta variabilidad en la calidad de las aguas captadas. La toma cerrada, toma el agua de pozos, por lo que posee mejor calidad pero su capacidad es bastante reducida, ya que no son fuentes infinitas como el mar, y, además, son susceptibles de colmatación por arrastre de partículas de pequeño tamaño. En lo que respecta a este trabajo, cuyo interés se centra en trabajar con caudales altos, la toma abierta presenta una ventaja evidente, aunque supone mayor complejidad de ejecución e inversión, sobre todo en la etapa de pretratamiento. Las características de ambos tipos de toma se resumen en la tabla 3.1.

Toma Cerrada	Toma Abierta
<p>Agua limpia por la acción filtrante del terreno.</p> <p>Mínima actividad biológica u orgánica.</p> <p>Baja concentración de O<sub>2</sub> disuelto.</p> <p>Temperatura estable.</p> <p>Importantes concentraciones de Fe, Mn, Si y Al.</p> <p>Posible contaminación de nitratos y plaguicidas.</p> <p>Composición química estable.</p>	<p>Contenido importante y variable de sólidos en suspensión.</p> <p>Importante actividad biológica y presencia de materia orgánica.</p> <p>Mayor exposición a la contaminación.</p> <p>Importante concentración de O<sub>2</sub> disuelto.</p> <p>Composición química variable.</p> <p>Temperatura variable.</p>

**Tabla 3.1 Características y diferencias entre la captación cerrada y abierta**

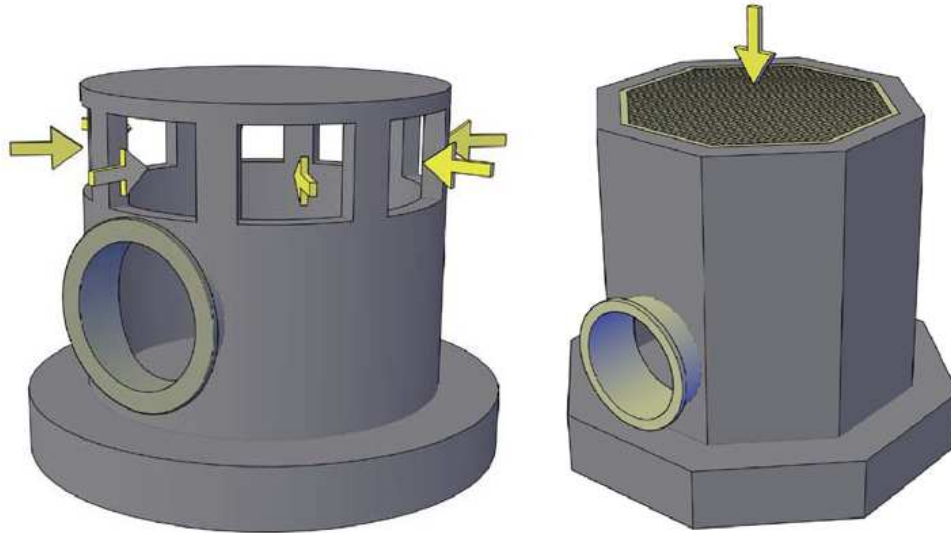
Para plantas que requieren mucho caudal, como es este caso, se prefiere trabajar con captación de tomas abiertas. Este tipo de captación presenta dos ventajas: Capacidad de proporcionar tanto agua de mar como se necesite, y requiere poco mantenimiento, se reduce básicamente a la limpieza de las rejillas filtrantes. Por otro lado, presentan ciertos inconvenientes: Necesidad de realizar obras marinas, que conllevan un incremento en el presupuesto y condicionales legales y medioambientales, y una menor calidad del agua, debido a alteraciones en la temperatura, vertidos, etc. Lo que implica una mayor inversión en la etapa de pretratamiento.

Las tomas abiertas están formada por una estructura de captación situada en el fondo del mar en un lugar conveniente. El agua captada entra en las conducciones submarinas y se transporta hasta tierra, hasta una estación de bombeo que la conduce a la planta. Por lo tanto, suele tener los tres elementos siguientes: una torre de toma de agua, un inmisario submarino y una estación de bombeo.

Para determinar la mejor ubicación se toman muestras a distintas profundidades y en diferentes condiciones, para conocer distintos parámetros físico-químicos, estudios de geología y geotecnia a través de sondeos, y un estudio de la dinámica litoral (velocidad y dirección del viento u oleaje).

La torre de toma es un cajón de hormigón con unas ventanas para la captación del agua, protegidas por una serie de rejillas de acero inoxidable o plástico que evitan la entrada de peces o grandes sólidos. Las ventanas se ubican en la parte superior de los laterales, con el fin de evitar la entrada de arenas. Se prefiere un flujo de entrada de agua horizontal, ya que se reduce la succión de organismos, en comparación con la entrada en dirección vertical descendente. Para completar su diseño, se realizan

modelos hidrodinámicos, con el fin de reducir las succiones, fijando velocidades que garanticen que no se producirá la entrada de sedimentos y no habrá acumulación de material alrededor de la torre que puedan llegar al nivel de las ventanas.



**Figura 3.2 Torre de toma con flujo de entrada de agua horizontal y vertical** (Sánchez-Barriga & Pita, 2016)

Las ventanas de la torre de toma suelen tener forma circular o rectangular. La forma circular presenta la ventaja de permitir el cierre con simples bridas ciegas, consiguiendo buena estanqueidad. Para calcular el tamaño y número de ventanas, se debe tener en cuenta el máximo caudal necesario, el atascamiento que se puede producir en las rejillas y las pérdidas de carga. Además, se suele buscar la mayor distancia posible a la superficie del mar, con el fin de evitar recoger agua con partículas flotantes, evitar la entrada de medusas, que haya menos cantidad de luz (más profundidad, menos luz, menos cantidad de organismos) y menor oleaje. Todo esto supone un aumento de los costes.

La torre se suele tratar con pinturas antiincrustantes, para evitar que se adhieran organismos marinos a la estructura. Estas pinturas tienen una vida útil reducida, por lo que se deben realizar labores de mantenimiento periódicas.



**Figura 3.3 Obstrucción de las rejas por ensuciamiento** (Sánchez-Barriga & Pita, 2016)

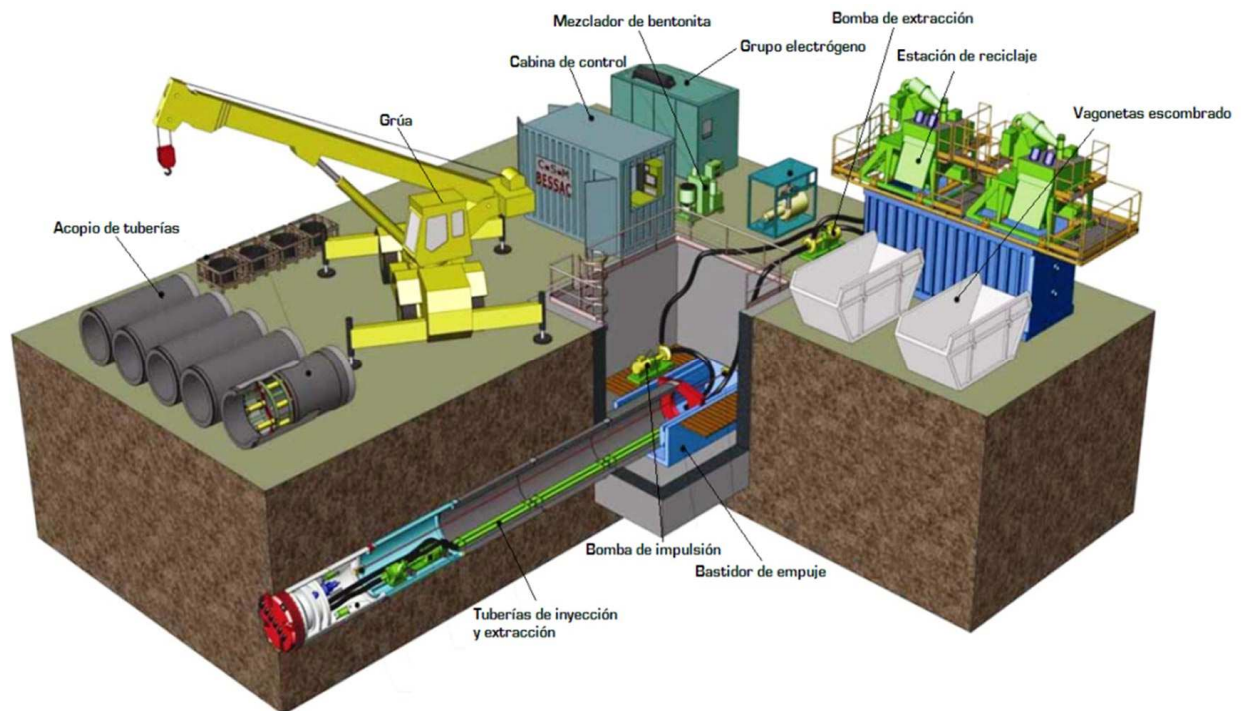
Si las condiciones marinas son especialmente agresivas en la zona del emplazamiento definitivo de la torre de toma, se puede proteger con escollera o muertos de hormigón, señalizándola con boyas y balizamientos (Ley de Costas, 22/1988 de 28 de julio).

Para transportar el agua desde el fondo del mar hasta la orilla se requiere la instalación de inmisarios. Dicha obra está condicionada por cuestiones medioambientales que puedan afectar al ecosistema marino. Las opciones de inmisarios son: Captación en zanja, perforación horizontal dirigida, microtúnel con hinca y lastrado al fondo marino.

La ejecución en zanja no se usa debido al importante impacto generado en el fondo marino. Para la zona de transición mar-tierra se usa el túnel y la perforación, y si es necesario aumentar la distancia o la profundidad se utiliza el sistema de lastrado. El material del inmisario varía en función del sistema de ejecución, en zanja y perforación dirigida se usan tuberías de polietileno, mientras que en micro-túnel se usa hormigón armado. Para realizar el cálculo hidráulico del inmisario se debe tener en cuenta el caudal máximo de trabajo de la planta. Para inmisarios de gran diámetro se recurre a la utilización de tuneladoras de frente presurizado.

Hinca en microtúnel es la técnica más usada cuando se quiere conseguir grandes diámetros y longitudes con respecto a la costa. El uso de microtuneladoras permite la creación de túneles de más de 2 km y de hasta 3 m de diámetro, para aumentar dichos diámetros y distancias, se debe recurrir a tuneladores mayores.

Mientras la tuneladora perfora y abre el túnel, se van hincando las secciones del tubo, que suelen ser de hormigón armado y están dotados de juntas de estanqueidad especiales para sellar las uniones y evitar la entrada de agua.



**Figura 3.4** Equipo para la ejecución de hincas en microtúnel (<https://www.interempresas.net>, s.f.)

Los materiales arenosos de la excavación se fluidifican con bentonita, y se bombean a una estación que la recicla y la reinyecta al túnel para continuar la excavación. Cuando el inmisario es de gran longitud, se necesitan estaciones de bombeo intermedias.

Tomando las bombas usadas en la desaladora de Marbella (Acosol, s.f.) (Acosol, s.f.), las bombas de alta presión proporcionan un caudal de 652 m<sup>3</sup>/h y una presión de descarga de 70 kg/cm<sup>2</sup>. Están construidas en acero inoxidable calidad AISI 904 L, son del tipo centrífugas horizontales multietápicas y de cámara partida.

Debido a los grandes caudales que se manejan en las plantas PRO deberíamos buscar bombas con mayor capacidad de impulsión de caudal o aumentar el número de bombas necesarias para trabajar fácilmente con caudales que pueden llegar a alcanzar los 100m<sup>3</sup>/s. Para ello debería quedar fijado el caudal de trabajo, pero este, como se verá más adelante en las ecuaciones de diseño, dependen directamente del caudal del río del que se extraiga el agua dulce, de forma que se debe conocer la ubicación exacta para poder determinar el caudal exacto, lo que quiere decir que el caudal de trabajo es función de la localización.

## 3.2 Pretratamiento

**E**l agua de alimentación es sometida a un pretratamiento físico y químico con el objetivo de eliminar sus impurezas y clarificar el agua para garantizar unas condiciones óptimas y evitar un ensuciamiento innecesario en las membranas PRO (Acosol, s.f.) (Acosol, s.f.).

Este proceso, puede ser más o menos complejo y, en consecuencia, más o menos costoso en función de la carga contaminante del agua con la que se trabaje. Es necesario conocer bien la composición del agua a utilizar para poder aplicar los tratamientos necesarios antes del proceso PRO. En general, se requiere pretratamiento por tres motivos principales: incrustación (“scaling”), ensuciamiento (“fouling”) y ataque a las membranas. Cuando ocurre alguno de los dos primeros se produce una disminución del rendimiento de la planta debido a las pérdidas por la obstrucción ocasionada, o bien debido al aumento de la presión de trabajo para contrarrestar el efecto de obstrucción. Sin embargo, si se sufre un ataque químico o bacteriano, puede ocasionar daños irreversibles en la capa de rechazo de sales de la membrana, y esto haría que la membrana fuera inservible.

El pretratamiento busca eliminar una serie de contaminantes específicos, tales como: sólidos en suspensión, actividad biológica, óxidos metálicos, sales minerales y materia orgánica. A continuación, se comentan todos ellos.

Los sólidos en suspensión son material particulado constituido por coloides y suspensiones que provocan el atasco de las membranas debido a su acumulación sobre la superficie de la misma. Para determinar el atascamiento que provocan estas sustancias se utiliza el SDI<sub>15</sub> (Silt Density Index) o índice de Fouling (ASTM, 2002).

Los óxidos metálicos que se encuentran con más frecuencia son los de aluminio, hierro y manganeso. El hierro se puede encontrar en sus formas férrica ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y ferrosa ( $\text{FeO}$ ), que coexisten. El manganeso aparece en forma de óxido manganoso ( $\text{MnO}$ ), soluble en agua y se elimina fácilmente, y anhídrido manganoso ( $\text{MnO}_2$ ), insoluble en agua y causa problemas de acumulación y colmatación de membranas. El aluminio es un metal anfótero y su presencia en el agua se puede deber al uso de coagulantes de este metal en el pretratamiento de la propia planta, o bien disuelto en el agua de forma natural. La combinación del aluminio con el silicio da lugar a aluminosilicatos, los cuales forman una capa impermeable sobre la membrana que también produce su obturación.

La precipitación de sales se produce cuando su concentración supera el producto de solubilidad, y las que más problemas causan son: Sulfato de estroncio ( $\text{SrSO}_4$ ), sulfato de bario ( $\text{BaSO}_4$ ), sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ), carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y el fluoruro de calcio ( $\text{CaF}_2$ ). Para conocer el riesgo de precipitación es necesario conocer su concentración en el agua, el producto de solubilidad y la conversión que se puede producir en la misma planta (Grundfos, 2002).

La actividad biológica en el agua de la planta se debe a que es la misma agua de trabajo la que contiene microorganismos (microalgas, virus o bacterias) y los nutrientes que se necesitan para permitir un acelerado desarrollo sobre la superficie de las membranas. Si dichas membranas no son biodegradables producen efectos similares a los del atascamiento, mientras que si las membranas son biodegradables pueden destruir la capa activa de las mismas (Grundfos, 2002).

La materia orgánica que suele provocar atascamientos en las membranas puede tener su origen de forma natural, debido al humus vegetal, o antropogénica, contaminación por aceites, grasas u otros contaminantes debido a un vertido inapropiado. En ambos casos dañan las membranas debido a su pH ácido.

La presencia de gases disueltos en el agua son menos frecuentes pero pueden producir la formación de sulfuros metálicos y azufre en las membranas (Grundfos, 2002).

Las técnicas físico-químicas más usadas son: acidificación, dosificación de inhibidores de la incrustación, oxidación, coagulación-floculación, decantación, flotación, filtración por lecho filtrantes o cartuchos, adsorción y desgasificación.

Acidificar el agua previene la precipitación del carbonato cálcico.

La dosificación de antiincrustantes limita la formación de cristales debido a que mantienen los iones en sobresaturación sin permitir su precipitado, previene otro tipo de incrustaciones debido al sulfato cálcico, sulfato de estroncio, sulfato de bario y sílice, y evita la formación y acumulación de óxidos metálicos en la superficie de las membranas (Anon., s.f.).

La coagulación-floculación se utiliza, conjuntamente con la decantación y la filtración, para eliminar coloides y partículas en suspensión, tanto orgánicas como inorgánicas, que pueden provocar atascamiento. Se basa en la separación de coloides en su fase fluida dispersa, formada por partículas (coagulación) y después aglomerar este material particulado en suspensión no disuelto (floculación) mediante la adición de una sal metálica en el agua para facilitar su posterior filtrado o decantación. Los coagulantes más usados con sales de hierro o de aluminio, y como floculantes polímeros sintéticos de alto peso molecular (Anon., s.f.).

Cuando tras el proceso anterior el agua contiene una concentración de materia floculada superior a 30-50 mg/L se procede a decantar. Para ello, se deje reposar la mezcla con el fin de que el material en flotación se hunda y sea posible su extracción por acción de la gravedad. Esta etapa se suele omitir porque ocupada mucho espacio, y se opta por filtrar directamente (elaguapotable.com, s.f.).



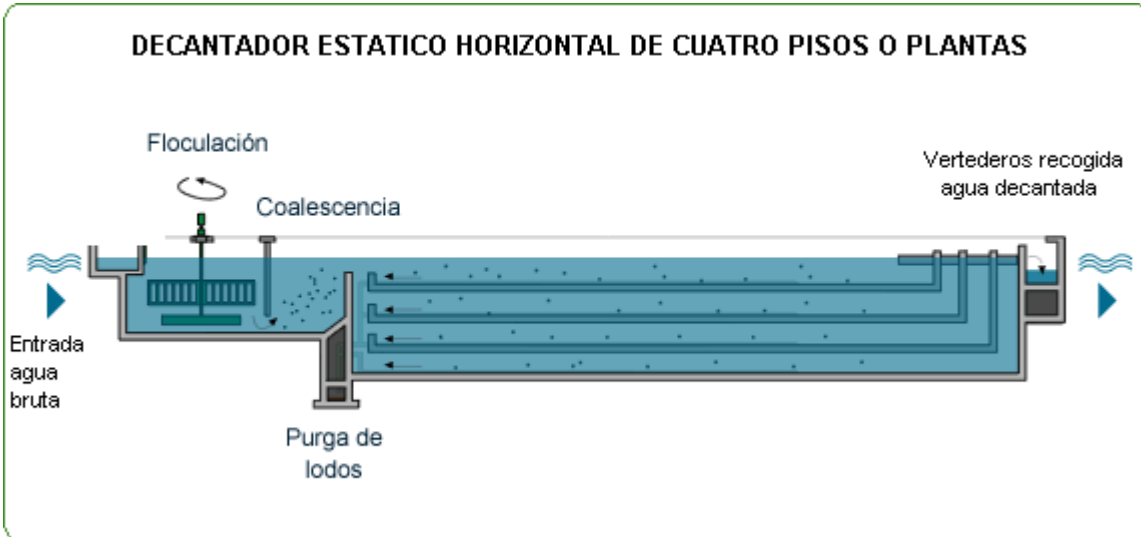


Figura 3.5 Decantador estático de cuatro plantas (elaguapotable.com, s.f.)

La flotación se basa en la diferencia de densidades sólido-líquido, con el fin de eliminar los sólidos capaces de flotar debido a la inyección de burbujas de aire de tamaño microscópico. La diferencia con el método anterior radica en que estas partículas no se dejan reposar ni se recogen en el fondo por gravedad, sino que se elevan y recogen en la superficie. Se emplea siempre antes de la filtración (Nemerow, 1977).

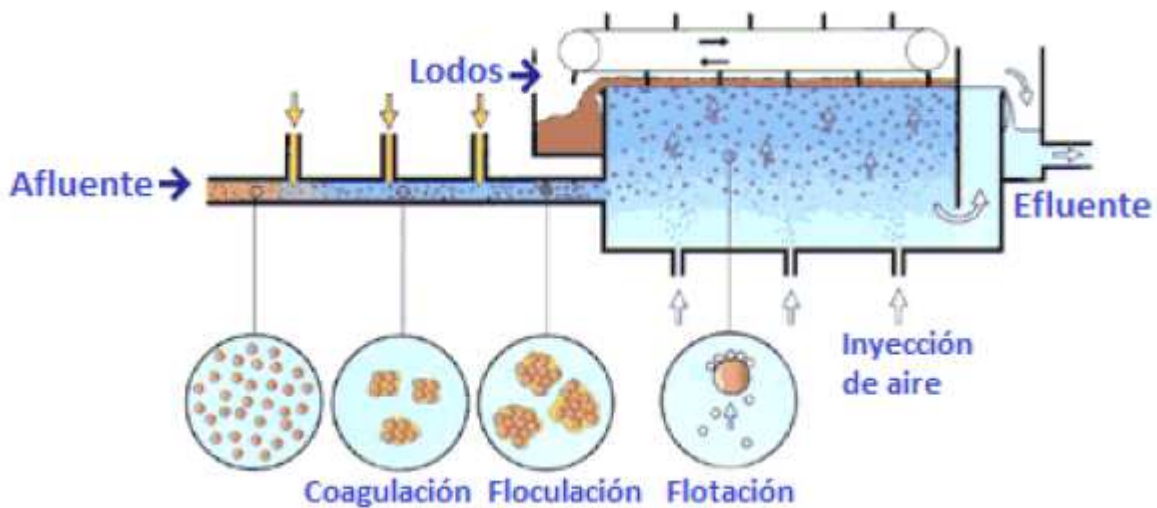


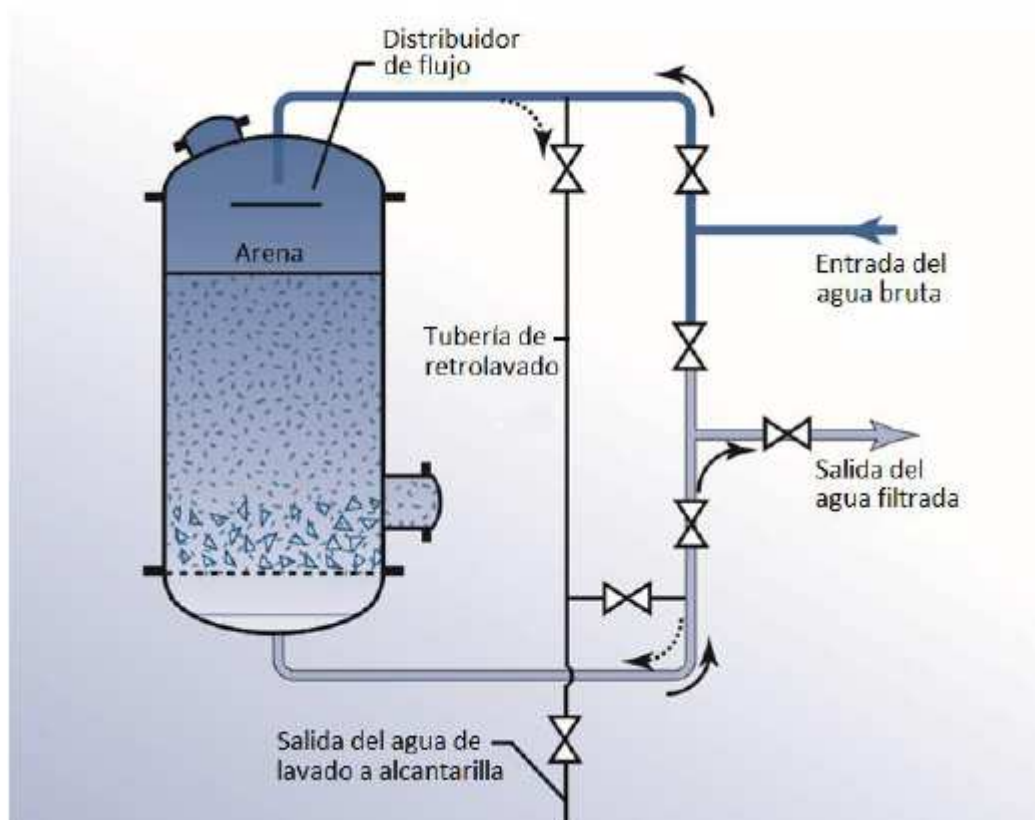
Figura 3.6 Flotación (Nemerow, 1977)

En el proceso de filtración se utiliza el paso del agua a través de un medio poroso que retiene y elimina los sólidos en suspensión y deja pasar el agua, siendo obligatoria esta etapa cuando se trabaja con agua bruta. Existen dos tipos fundamentales de filtración: los filtros con desbaste, encargados de realizar una



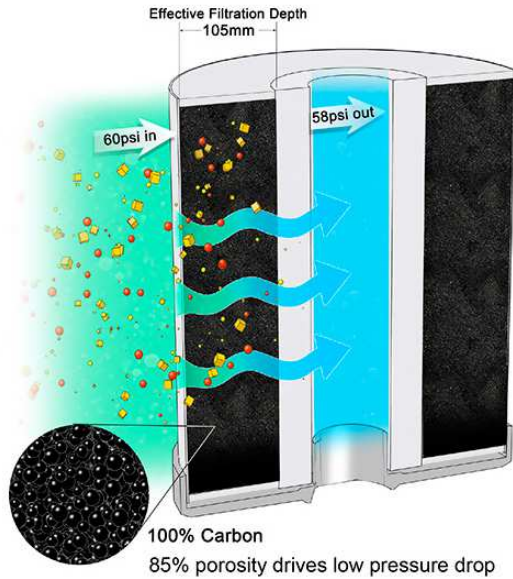
eliminación sistemática de partículas y poseen tamaños de poros superiores a  $5\ \mu\text{m}$ , y los filtros de seguridad, cuya misión es proteger a las membranas cuyos poros tienen un valor nominal de  $1$  y  $5\ \mu\text{m}$ . Los filtros de seguridad reciben el nombre de filtros de cartucho y están constituidos por láminas de papel especial, algodón, polipropileno o nylon, y su capacidad de filtración es más fina pero posee menos durabilidad, pues se atascan fácilmente y hay que cambiarlos con frecuencia.

Los filtros de arena de desbaste funcionan de la siguiente forma: El tanque tiene un fondo poroso cubierto de grava y arena. El agua bruta se introduce por la parte superior y el agua filtrada se extrae por la parte inferior. Durante el retrolavado, se introduce agua purificada por el fondo del tanque que circula en el sentido inverso al de la filtración, y arrastra todas las partículas acumuladas. El agua sucia se recoge por la parte superior. En una planta, se suelen disponer varios depósitos de este tipo operando en paralelo, permitiendo la limpieza de alguno de estos mientras el resto siguen operando.



**Figura 3.7 Filtro de arena en tanque cerrado** (Grundfos, 2002)

En caso de que el agua contenga una gran concentración de materia orgánica, se puede reducir usando adsorción con filtros de carbón activo.



**Figura 3.8 Filtro de carbón activo** (www.aguasistec.com, s.f.)

Para la desgasificación se usan desgasificadores térmicos, que puede ser atmosférica (con arrastre por aire) o en vacío (con arrastre por vapor). Su eficacia alcanza el 98% (Moreno, 2011).

Cuando las aguas tienen un SDI15 muy elevado, se requiere un tratamiento previo más avanzado capaz de limpiar las aguas y prepararlas para el posterior proceso de ósmosis retardada por presión. Este proceso recibe el nombre de filtración por membrana y consiste en la separación física de una sustancia por medio de una membrana semipermeable con poros de tamaño molecular. La presencia de un gradiente, o fuerza propulsora, a través de la membrana impulsa el proceso, y dicha fuerza puede ser eléctrica, química o por presión. Dicho gradiente impulsa las moléculas más pequeñas a través de la membrana y retiene las moléculas de mayor tamaño. Existen varias tecnologías de membrana: microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF), similares a la filtración estándar pero con poros de 1-0,1  $\mu\text{m}$ , y nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI), que dependen de la presión osmótica del líquido pues filtran tamaños menos a 1 nm. En las figuras 3.9 y 3.10 se puede observar las posibilidades de las distintas tecnologías de membrana.

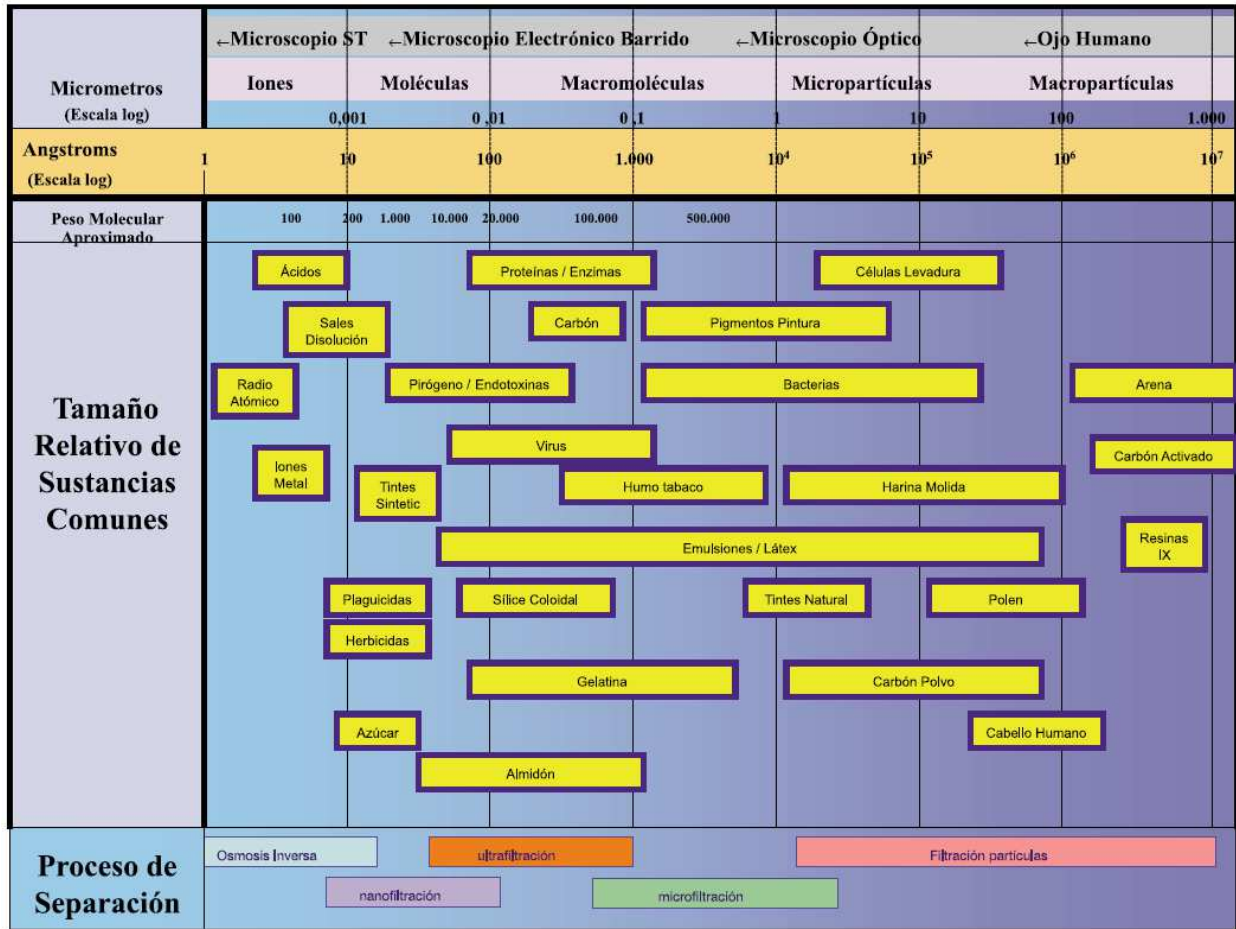


Figura 3.9 Espectros de filtración (MSPS, 2009)

SEPARACIÓN POR MEMBRANAS

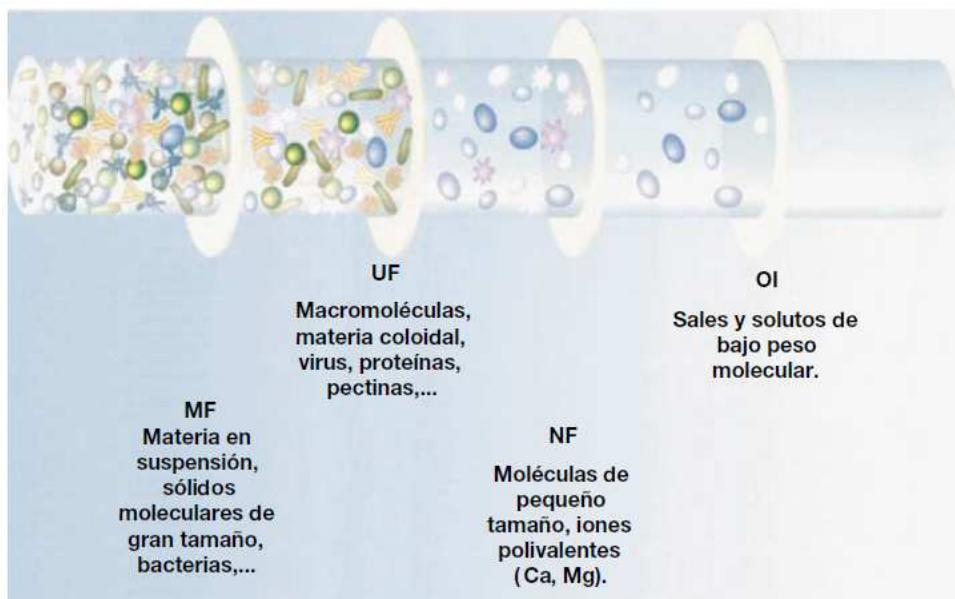


Figura 3.10 Separación por membranas según las diferentes tecnologías (MSPS, 2009)

Otro parámetro que diferencia estos 4 tipos de tecnologías de membrana es la presión a la que se opera. En el caso de MF y UF la presión óptima de funcionamiento es de 1 y 4-5 bar respectivamente, mientras que para la NF y OI las presiones óptimas de trabajo son de 20-40 bar para NF y 40-100 bar para OI. Por encima de la presión óptima se produce la obstrucción de los poros y la membrana se compacta. Todo esto se puede comprobar en la figura 3.11.

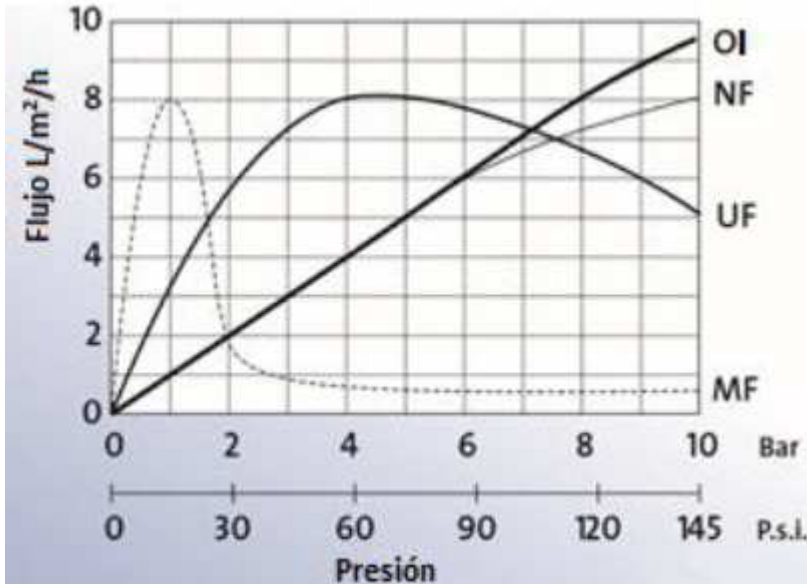


Figura 3.11 Presión de trabajo de las diferentes tecnologías de membrana (Grundfos, 2002)

En este trabajo se usará la microfiltración en el pretratamiento, por lo que se va a comentar las características de esta. Fue la primera tecnología de membrana usada en pretratamientos, y reduce o elimina protozoos, bacterias, algas, ciertos virus, olor y turbidez. Se suelen emplear membranas orgánicas con tamaños de poro entre 0,05-5  $\mu\text{m}$ . Están construidos en materiales poliméricos como propileno, polipropileno o polímero fluorado, o membranas tubulares de tipo cerámicos con capa activa de alúmina. El uso de la MF permite reducir en gran medida el atascamiento de las membranas. La instalación de pretratamiento por MF suele tener la estructura que se muestra en la figura 3.12.

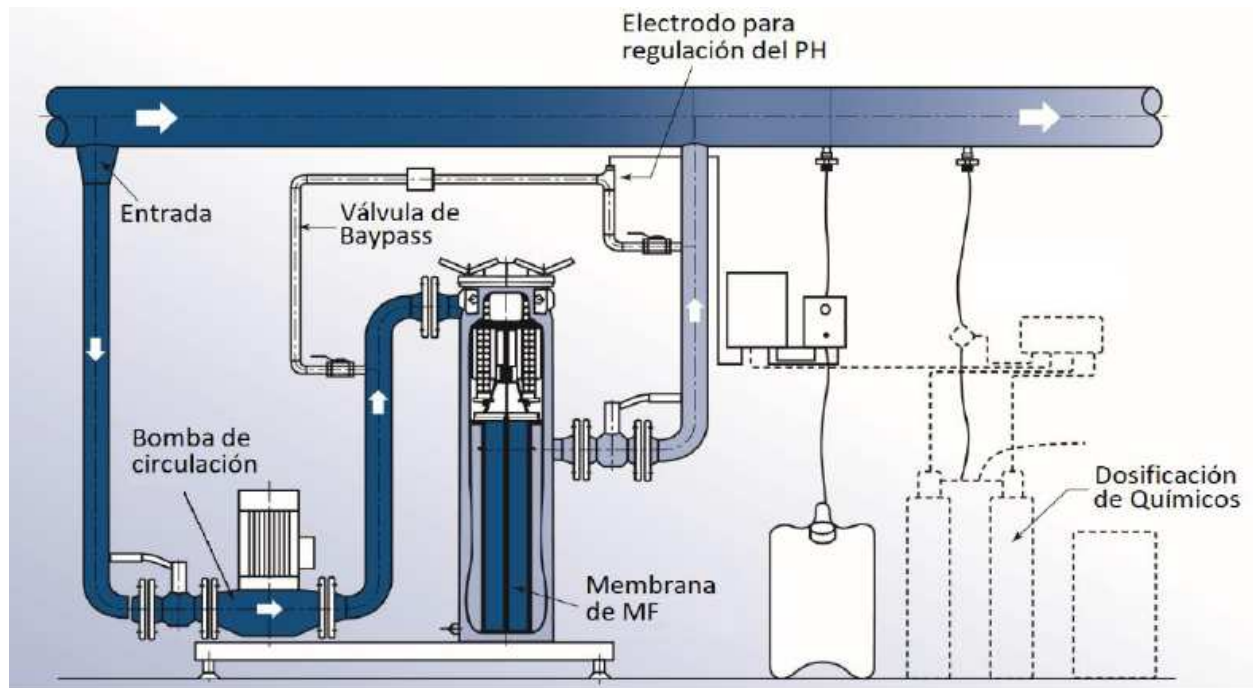


Figura 3.12 Sistema de microfiltración (Grundfos, 2002).

### 3.3 Sistema de membrana

El módulo de membrana es la parte clave del proceso PRO. Los requisitos que debe cumplir una membrana que se emplee en una planta del tipo PRO deben ser: Permitir un alto flujo de agua, que está relacionado con el coeficiente de permeabilidad de la membrana y las presiones osmóticas e hidroestáticas, y presentar una baja permeabilidad a la sal, que es proporcional a su coeficiente de permeabilidad. Sin embargo, para que la PRO sea viable debe superar dos objetivos primordiales, el primero es su densidad energética debe estar por encima de los  $5 \text{ W/m}^2$  y, además, tener un bajo coste.

Como ya se ha mencionado anteriormente, las membranas más usadas en este momento son las membranas asimétricas de acetato de celulosa (AC) (Bui & McCutcheon, 2014) (Kim & Elimelech, 2013) (McCutcheon & Elimelech, 2008) (Cath, et al., 2005) (Schiestel, et al., 2012) y las Thin-film composite membranes (TFC) (Bui & McCutcheon, 2014) (Han, et al., 2013) (Song, et al., 2013) (Straub, et al., 2014) (Widjojo, et al., 2011) (Han & Chung, 2014). Para mejorar la densidad energética de este tipo de membranas se están estudiando distintos tipos de soporte, para el caso de las TFC, o distintos tipos de polímeros para crear membranas de AC. Las membranas de poliamidas se caracterizan por un flujo específico de agua más elevado y una mayor retención de sales respecto a las membranas de acetato de celulosa, luego son de mayor calidad. Las poliamidas son más estables a un rango más amplio de pH pero son más susceptibles a la degradación oxidativa que provoca el cloro libre.

La capacidad de producción de una planta PRO se alcanza instalando varias unidades elementales de producción, o módulos, en paralelo. Un módulo es un conjunto de membranas con una configuración determinada que forman la unidad elemental de producción de agua permeada.

Se pueden usar distintos tipos de configuraciones en el módulo de membrana, como el spiral-wound membranes o el hollow fiber membranes (HFM). Existen otros diseños menos utilizados como son los módulos tubulares (tubular module) y los de plato y marco (plate and frame module).

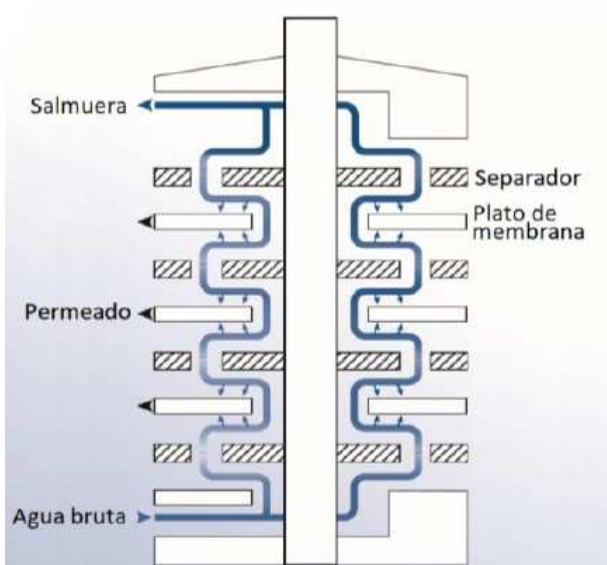


Figura 3.13 Módulo de plato y marco (Grundfos, 2002)

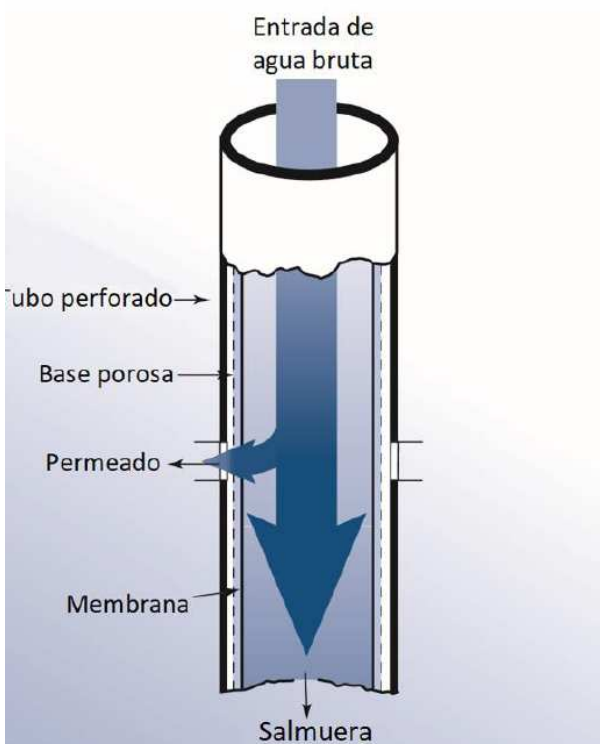


Figura 3.14 Módulo tubular (Grundfos, 2002)



Característica		Plato y marco	Tubular	Espiral	Fibra Hueca
Superficie de membrana por módulo (m <sup>2</sup> )		10-50	1.5-7	30-34	370-575
Volumen de cada módulo (m <sup>3</sup> )		0.3-0.4	0.03-0.1	0.03	0.04-0.08
Caudal por módulo (m <sup>3</sup> /día)		9-50	0.9-7	30-38	40-70
Grado de compactación (m <sup>2</sup> de membrana por m <sup>3</sup> )		50-125	50-70	1000-1100	5000-14000
Productividad por unidad de volumen (m <sup>3</sup> /día·m <sup>2</sup> )		0.6-1	0.06-1	1-1.1	0.1-0.15
Productividad por unidad de volumen (m <sup>3</sup> /día·m <sup>3</sup> )		30-125	30-70	1000-1125	900-1500
Conversión de trabajo por módulo (%)		10	10	10-50	30-50
Pérdida de carga por tubo de presión (Bar)		2-4	2-3	1-2	1-2
Intercambiabilidad entre diferentes fabricantes		Nula	Nula	Total	Nula
Tolerancia frente a las sustancias coloidales		Mala	Buena	Mala	Mala
Tolerancia frente a las partículas en suspensión		Mala	Buena	Mala	Muy mala
Comportamiento frente a la limpieza	Mecánica	Regular	Bueno	No aplicable	No aplicable
	Química	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
	Agua a presión	Excelente	Bueno	Bueno	Bueno

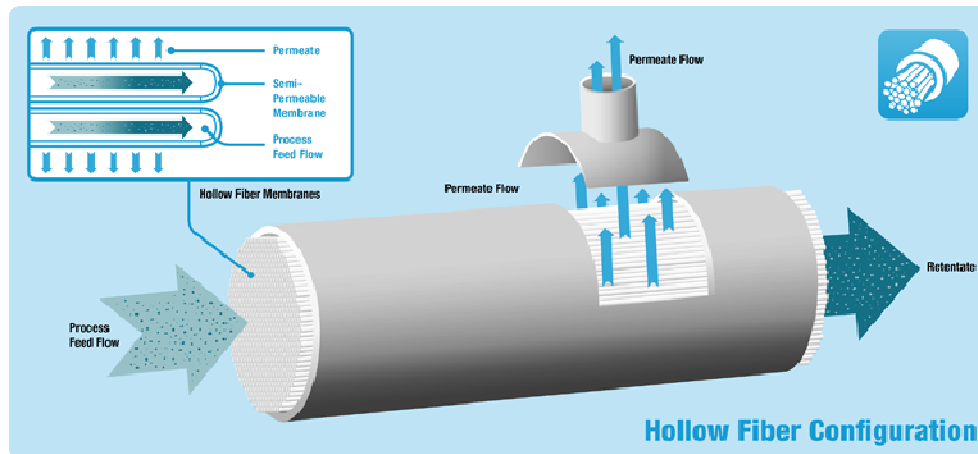
Característica	Plato y marco	Tubular	Espiral	Fibra Hueca
<b>Pretratamiento necesario</b>	Coagulación y filtración a 5 $\mu\text{m}$	Filtración	Coagulación y filtración a 5 $\mu\text{m}$	Coagulación y filtración a 1 $\mu\text{m}$
<b>Aplicaciones</b>	Alimentación	Alimentación	Desalación de aguas salobres y de mar	Desalación de aguas salobres y de mar
	Líquidos poco contaminados	Aguas residuales y líquidos muy contaminados	Obtención de agua de alta pureza	Obtención de agua de alta pureza
	Recuperación de sustancias	Recuperación de sustancias	Aguas residuales y líquidos poco contaminados, concentración y recuperación de sustancias	Concentración y recuperación de sustancias

**Tabla 3.2 Comparativa de los diferentes módulos de membrana (MSPS, 2009)**

Las membranas de los módulos de fibra hueca (Hollow fiber configuration) se fabrican con varios centenares de miles de fibras poliméricas huecas de tamaño de un cabello humano (84  $\mu\text{m}$ ) que son dobladas en forma de U y colocadas sobre un tubo central. Los extremos abiertos son fijados con una resina epoxi para dar estabilidad al haz formado. El flujo de agua bruta se distribuye forma radial y el permeado circula a través de las paredes de las fibras y transportándose por su hueco hasta que es recogido en el extremo opuesto del recipiente. El agua bruta que no ha penetrado en las fibras arrastra las sales y es recogida en el extremo en forma de salmuera. Este módulo ofrece la mayor densidad de empaquetamiento que existe actualmente en el mercado, pero se produce un alto nivel de ensuciamiento



que hacen disminuir su rendimiento. Además, el flujo de agua por unidad de área de membrana resulta bastante bajo debido a la alta relación superficie/volumen que presenta el conducto interior de las fibras. De esta forma, la turbulencia se pierde y el flujo puede resultar de tipo laminar.



**Figura 3.15 Hollow Fiber configuration** (Akafor, s.f.)

El módulo de arrollamiento en espiral (Spiral membrane configuration) es el más utilizado en general. Se obtiene a partir de una hoja de tres capas formada por dos láminas de membrana, normalmente de tipo TFC (Thin Film Composite) separadas por un colector de permeado que actúa como canal para recoger el agua filtrada a través de las membranas. Ambos lados y uno de los extremos de la membrana se sellan al colector de permeado utilizando un cordón o línea adhesiva para formar una hoja de tres capas a modo de sobre. El extremo no pegado se conecta a un tubo hueco perforado encargado de desalojar el permeado del módulo. Para terminar la hoja multicapa se coloca sobre el anterior conjunto una red de malla abierta que actúa como espaciador y, además, permitirá mantener el espacio libre para la circulación del flujo de agua bruta. Hay que repetir varias veces el proceso explicado anteriormente para obtener un módulo de este tipo. Todas estas hojas se enrollan sobre el tubo perforado al que están pegadas y se colocan dos piezas plásticas en los extremos para aportar rigidez e impedir un efecto telescópico. Por último, se cubre el conjunto exteriormente con un recubrimiento de fibra de vidrio epoxi que asegure el módulo y se mete en una caja a presión.

El agua bruta entra por un extremo de la caja de presión, que fluye de forma paralela a la dirección del tubo central que recoge el permeado. Parte del agua penetra por las membranas y circula por el colector de permeado con un camino espiral hasta llegar al centro y pasar por el tubo de recogida, el cual puede desalojar el agua pura por ambos lados indistintamente. El agua de rechazo recorre todos los módulos longitudinalmente arrastrando las sales hacia la salida, situada en el extremo opuesto de la caja de presión.

Este módulo puede formar agrupaciones, es decir, las membranas se colocan en serie para aprovechar mejor el caudal de trabajo de la planta.

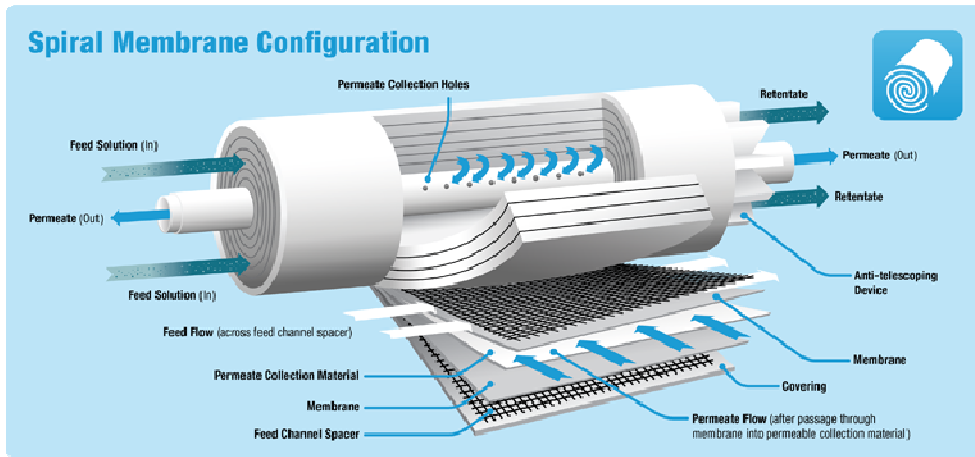


Figura 3.16 Spiral membrane configuration (Akafor, s.f.)

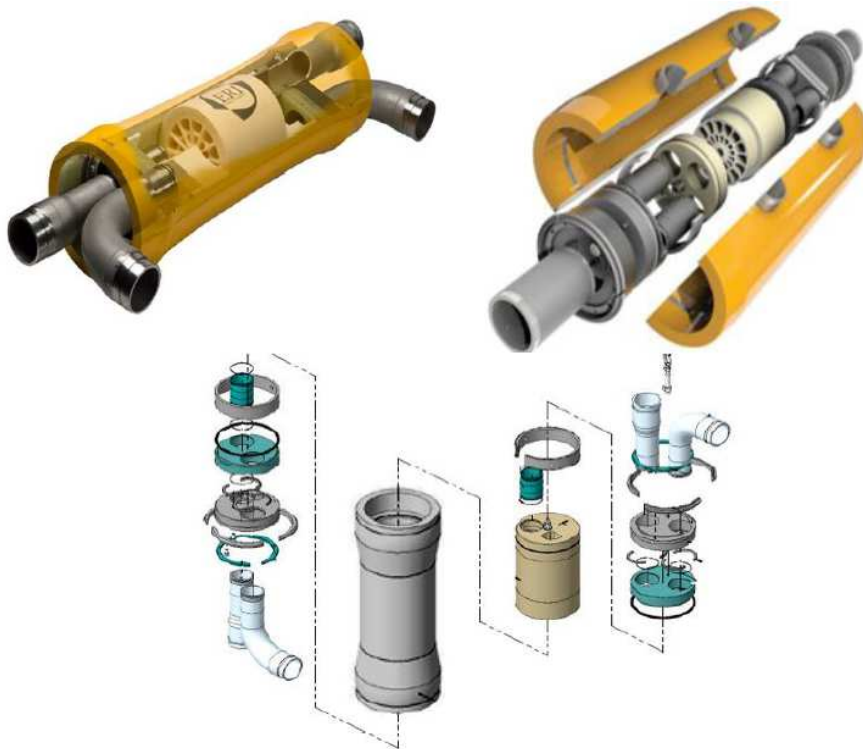
### 3.4 Intercambiador de presión

Algunos procesos industriales operan a presiones muy elevadas, produciendo una corriente residual a alta presión. Una forma de aprovechar el fluido a alta presión es transmitir esta presión a una corriente de alimentación. Para ello se usa un intercambiador de presión, realizan una conversión de energía hidráulica-hidráulica directamente, sin ningún tipo de eje mecánico de por medio, es decir, gracias a este equipo se transfiere energía en forma de presión de un fluido a alta presión a otro con baja presión. Un intercambiador de presión es una cámara de intercambio de presión por rotación.

El agua presurizada que sale del sistema de membrana pasa a la unidad del intercambiador de presión, donde su presión es transferida directamente al agua de alimentación salina, con un rendimiento que puede alcanzar el 95%. Este caudal de alimentación, pasará por una bomba booster para compensar las pérdidas hidráulicas en tuberías, en el recuperador y las membranas. Ya que el intercambiador de presión no necesita energía externa, el ahorro de energía de una planta típica, comparado con una planta sin recuperador de energía, es de un 57%. (Littrel, 2016).

Constructivamente, el intercambiador de presión posee dos tapas sellantes con forma de disco y holguras precisas a los extremos, con dos orificios cada una. Uno para el paso de flujo a alta presión y otro para el paso del flujo a baja presión. Sólo posee una parte móvil, un rotor cerámico sin eje de ningún tipo, encajado en una camisa cerámica y con múltiples conductos pasantes, que se asemeja al tambor de un

revolver con recámaras. Al girar, el rotor permite la conexión entre las respectivas aperturas de las tapas y se efectúa entonces el intercambio de presión entre los fluidos en contacto directo.



**Figura 3.17 Intercambiador de presión de ERI con su despiece (Littrel, 2016)**

El intercambiador de presión funciona en cuatro fases. En la primera, el agua de alimentación llega al recuperador a baja presión desde el pretratamiento y llena una cámara del rotor. Como esa cámara no se encontraba vacía sino con el agua de rechazo del sistema de membrana (ya sin presión) en su interior, el agua de alimentación la desplaza y la desplaza y sale al exterior. En la segunda fase, al girar el rotor, la cámara queda totalmente sellada, permaneciendo así el agua de alimentación en su interior a la presión a la que entró (baja presión). En la tercera fase, el agua que sale del sistema de membrana a alta presión entra en el rotor e impulsa el agua de alimentación que se encontraba llenando la cámara. Por último, la cámara queda sellada atrapando el agua de rechazo que ha transmitido toda su presión en el paso anterior.

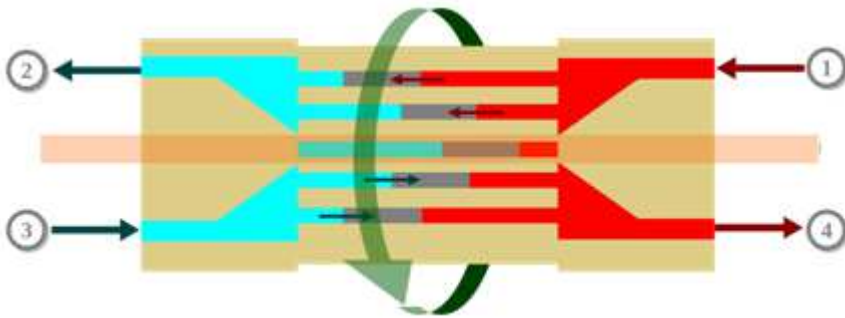


Figura 3.18 Diagrama de un Intercambiador de Presión (MacHarg, 2007)

### 3.5 Turbina hidroeléctrica

Una turbina hidroeléctrica es una máquina rotatoria capaz de convertir la energía cinética y potencial de un fluido, en este caso agua, en energía mecánica, es decir, produce una conversión de energía hidráulica-mecánica-hidráulica. Es la base de la generación de energía de cualquier central hidroeléctrica.

La turbina Francis, turbomáquina motora a reacción y de flujo mixto desarrollada en el siglo XIX por James B. Francis, tiene como desventaja el estrecho rango de flujo y presión requerido para lograr la máxima eficiencia de operación.

Las anteriores fueron reemplazadas por las turbinas Pelton, 1980, que poseen mayor eficiencia. Lester A. Pelton inventó una turbomáquina de acción, de flujo tangencial y admisión parcial con un diseño que deflectaba el flujo impulsor a casi 180° permitiendo un intercambio de energía muy elevado debido a la gran cantidad de movimiento aportado.

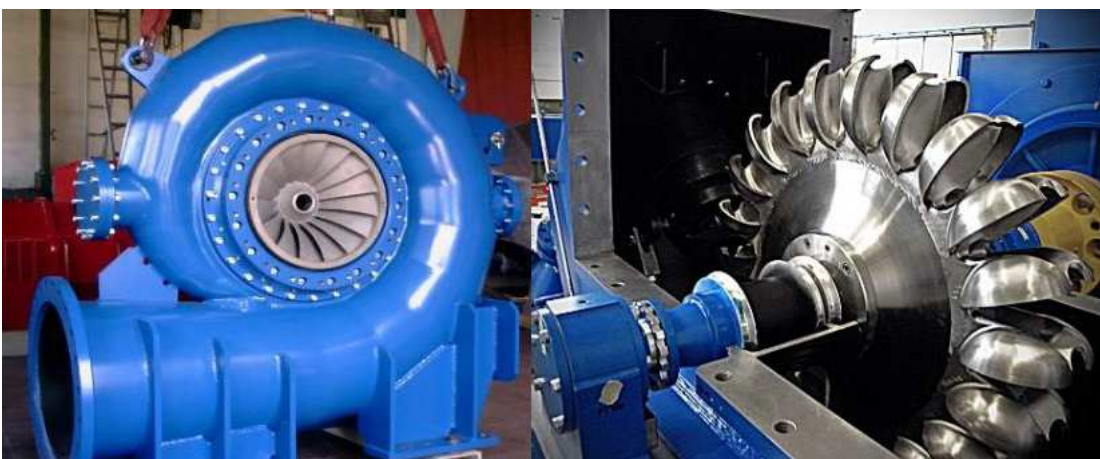


Figura 3.19 Turbina Francis y turbina Pelton

Su funcionamiento es sencillo: el fluido de rechazo que sale del sistema de membrana a alta presión, entra y empuja unas hélices que van unidas a un generador, donde se genera la energía eléctrica.

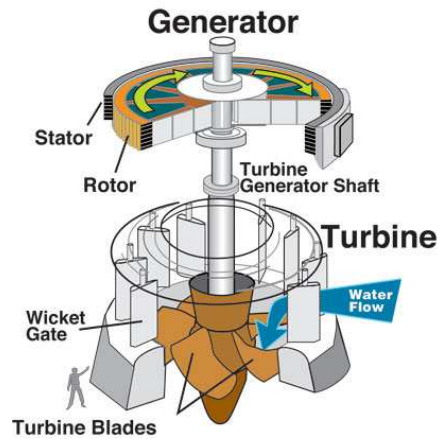


Figura 3.20 Esquema de una turbina hidroeléctrica (School, s.f.)

### 3.6 Evacuación de la salmuera

El agua de rechazo que se devuelve al mar, no sólo tiene concentraciones salinas, sino que lleva consigo todos los compuestos químicos que se utilizaron como aditivos en el pretratamiento. Por ello, se debe hacer un estudio de impacto ambiental para ver cómo afecta el vertido al ecosistema marino. Se pueden adoptar tres soluciones para verter dicha agua al mar.

La primera, vertido directo a través de ramblas o cauces superficiales, adecuada en zonas de vientos y corrientes considerables, ya que las temperaturas y el oleaje favorecen una rápida dispersión.

La segunda, construcción de emisarios submarinos que sobrepasen la zona de flora marina; aunque no queda claro si el efecto de la obra necesaria para construir este emisario resulta más perjudicial que el propio vertido.

La tercera, aprovechar los emisarios ya existentes de aguas residuales, ya que resulta un mal menor verter dicho rechazo a colectores residuales, en zonas ya degradadas por el efectos de las aguas residuales urbanas.

### 3.7 Mantenimiento

**C**onjunto de operaciones orientadas a asegurar un funcionamiento y duración óptimos de la planta. Se deben realizar tareas de mantenimiento en todas las etapas unitarias de la planta. Sin embargo, la etapa más importante y que requiere un mantenimiento especialmente cuidadoso es el sistema de membranas.

Los síntomas de ensuciamiento de las membranas no siempre son fáciles de detectar. Se manifiestan debido a la disminución del caudal de permeado o debido al aumento de las presiones de trabajo. Si no se realiza el mantenimiento una vez detectados los síntomas, pueden alcanzarse niveles de ensuciamiento irreversibles, que pueden incluso dañar el material estructural de la membrana.

Las operaciones de limpieza de las membranas se realizan siempre con la planta en parada, de acuerdo a las siguientes fases: primero, se prepara la solución de limpieza añadiendo los productos químicos a un tanque de agua de buena calidad y sin cloro, para no dañar las membranas. El bombeo hasta el sistema de membranas se debe realizar a baja presión y sin exceder el flujo los márgenes establecidos por los fabricantes de membranas. Esta solución de limpieza puede atacar a las juntas de las bombas del circuito, por lo que se suele conectar directamente una manguera desde el tanque a la entrada de las membranas para que las bombas no se vean dañadas. Se intercalan períodos de limpieza y de reposo. Si el nivel de ensuciamiento es muy alto, la solución de limpieza puede adquirir un intenso cambio de color o apreciarse precipitaciones. Una vez concluida la limpieza, deben aclararse las membranas y el circuito con agua limpia. Finalmente, se pone de nuevo la planta en marcha. El agua de limpieza no se tira directamente al mar, sino que se lleva hasta una estación de tratamiento de aguas residuales externa, donde se eliminan estos agentes químicos y se decantan los sólidos.

### 3.8 Integración entre una planta desaladora y PRO

**E**l proceso PRO no se limita sólo a la utilización de agua de mar frente a agua de río, sino que se pueden usar distintas soluciones de alimentación, sobre todo teniendo en cuenta el origen de las soluciones, como por ejemplo, agua dulce frente a agua de mar, agua de mar frente a salmuera concentrada (proceso híbrido de PRO y desaladora) o efluentes y salmuera concentrada (proceso híbrido con tratamiento de aguas residuales).

Se ha llegado a la conclusión de que la hibridación entre una planta PRO y una desaladora (Palacin, et al., 2013) (Achilli, et al., 2014) tiene un futuro bastante prometedor, reduciendo no sólo los costes de trabajo de la desaladora sino también los impactos ambientales, ya que la salmuera obtenida no se descarga directamente al mar, sino que se utiliza en la planta PRO.

En 2010, se llegó a construir una planta piloto híbrida RO/PRO para probar la viabilidad de esta técnica. La planta se ubicó cerca del centro de desalinización de agua de mar Uminonakamichi Nata y se suministraba el agua pura de una planta de tratamiento de aguas residuales y la salmuera desde la planta desaladora. Se trató el agua que provenía de la planta de aguas residuales, con el fin de eliminar cualquier agente que pudiera provocar problemas en la membrana de la planta PRO, utilizando para ello una unidad de Ultra Filtración (UF). La membrana usada para esta prueba fueron módulos de fibra hueca fabricados por Toyobo Co., Ltd.

En otro estudio (Kim & Elimelech, 2013), el proceso híbrido RO/PRO opera con dos fines distintos (producir agua y energía) y se requiere un criterio adecuado para comparar ambos procesos. Por ello se introdujo un marcador denominado Tasa de Retorno de Agua y Energía (WERR), definido como se muestra en la ecuación 7:

$$WERR = Price_{Electricity}(W_{PRO} - W_{RO}) + Price_{water}Q_{p,RO} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde,  $W_{PRO}$  es la energía producida en la planta PRO,  $W_{RO}$  la energía consumida en la planta desaladora y  $Q_{p,RO}$  cantidad de agua obtenida en la desaladora.

Cuanto mayor sea el valor de WERR mayor beneficio se obtiene. En dicho estudio se llegó a la conclusión de que la salmuera proveniente de la planta desaladora era una buena opción en comparación con otras fuentes: primero porque es un residuo que se revaloriza, porque existe buena disponibilidad y prácticamente sin coste, y segundo porque la salmuera que ingresa en el sistema PRO ya ha pasado por un pretratamiento, por lo que llega sin materia que pueda ensuciar de más el sistema de membranas, y elimina el coste de pretratamiento en la planta PRO.

En la figura 3.21 (He, et al., 2014) se muestra una posible configuración de una planta híbrida desaladora (RO)/PRO, usando la salmuera concentrada originada por el proceso RO y agua residual como agua salobre de baja concentración.

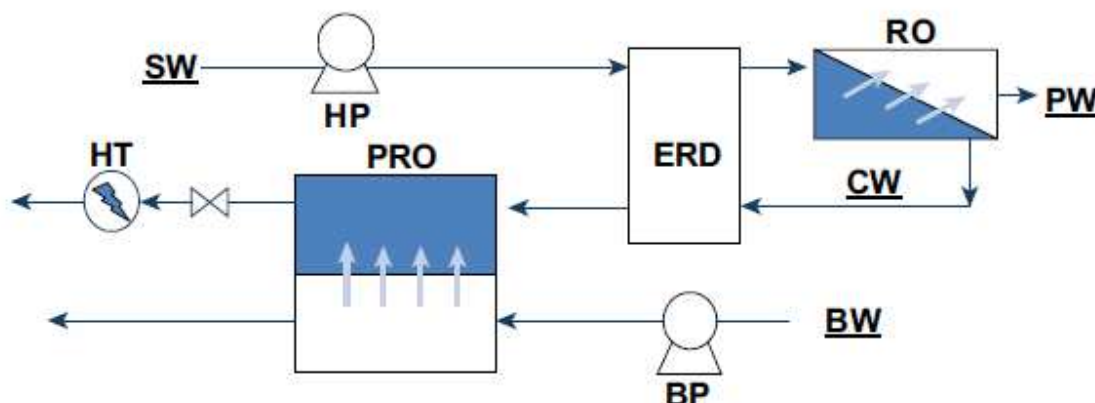


Figura 3.21 Esquema de un sistema híbrido RO-PRO (He, et al., 2014)

Siendo SW agua de mar, PW agua producto desalada, CW salmuera concentrada y BW agua de baja concentración.

Además, se propone un factor denominado FC (Feasible Condition), que determina la viabilidad de la planta híbrida, definido en la ecuación 8:

$$FC = \frac{\Delta P_{PRO} \left[ (1 - Y) \left( \eta_{HT} - \frac{\eta_{ERD}}{\eta_{HP}} \right) + Y_P \right]}{\Delta P_{PRO} \left[ \frac{1 - \eta_{ERD}(1 - Y)}{\eta_{HP}} \right]} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde  $\eta_{HT, ERD, HP}$ , hacen referencia al rendimiento de la turbina hidroeléctrica, del recuperador de energía y la bomba de alta presión respectivamente, Y es la cantidad de agua recuperada en la planta RO. Cuanto mayor sea el valor del factor FC mayor será la viabilidad del proyecto. Sin embargo, el estudio no tuvo en cuenta el efecto de la polarización de la concentración y el flujo inverso de la sal en el rendimiento del sistema RO/PRO.



## 4 PROBLEMAS MEDIOAMBIENTALES

---

*"Produce una inmensa tristeza pensar que la naturaleza habla mientras los hombres no escuchan"*

*- Víctor Hugo -*

**E**n un primer momento, cabría esperar que los impactos ambientales de la PRO fueran prácticamente nulos, ya que se considera una tecnología renovable sin emisiones de CO<sub>2</sub> y a que el agua salobre de la planta se descargaría como ocurre de forma natural en la descarga de un río en el mar. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la tecnología PRO es aún inmadura, lo que provoca una incógnita entre el impacto teórico y real que puede provocar en el medio ambiente. Por ello, para aplicar la PRO a gran escala se necesitaría un estudio realmente exhaustivo para cuantificar los impactos ambientales.

Se puede seguir el ejemplo de la planta piloto de Statkraft para suponer una serie de problemas ambientales que deberíamos estudiar. En el caso de esta planta, el agua del río se tomaría antes del punto de descarga natural, mientras que el agua salobre, o agua del mar, se tomaría de un punto distante a la costa y profundo. Una vez en la planta, el agua pasaría por el sistema de membranas mezclándose y produciendo un agua salobre, que se descargaría de nuevo en el mar. Todo esto puede producir diversos problemas ambientales a tener en cuenta.

Desde un punto de vista general, los problemas ambientales que afectarían a la zona del mar se dividen en 4 grandes grupos (Staalstrom & Gitmark, 2012) (Walday, et al., 2011): Salinidad, temperatura, nutrientes y productos químicos.

El cambio en la salinidad se puede producir en dos zonas, la zona donde se toma de agua de mar, zona profunda, en el caso de Statkraft a 35 metros de profundidad y la zona superficial de descarga del agua salobre de la planta. El reciente monitoreo de salinidad cerca del punto de descarga del prototipo noruego ha demostrado que la descarga de agua salobre es responsable del aumento de la salinidad superficial, debido a los altos niveles de salinidad del agua profunda que se desvía hacia la planta (Staalstrom & Gitmark, 2012). Esto no se puede generalizar para otras plantas y ubicaciones, ya que la salinidad de las aguas profundas del mar pueden verse muy afectadas por los vientos y las corrientes locales, produciendo fuertes reducciones. Si bien la variación en la salinidad se produce de forma natural, son las altas fluctuaciones, debido a la toma de agua y descarga de salmuera, las que pueden provocar cambios severos en las comunidades de animales y plantas, desequilibrando el ecosistema local.

Se podría comparar con las experiencias reales de una planta desaladora, teniendo en cuenta que el agua de descarga de estas plantas se consideran una salmuera y no agua salobre, lo que conlleva una menor cantidad de sales disueltas que en el caso de la desaladora, produciendo un menor impacto que estas. Sin embargo, dado el nivel de incertidumbre, se debería cuantificar el cambio de salinidad para cualquier nuevo establecimiento de una planta PRO, ya que cada ubicación presentará una sensibilidad distinta a este factor.

La temperatura del agua depende de su profundidad, siendo más estable en las zonas hondas que en las zonas más superficiales. Debido a este hecho, la descarga del agua salobre de la planta podría producir un cambio en la temperatura superficial del agua en la zona de descarga, ya que el agua procedente de la planta sería más cálida que la de la zona superficial del mar en invierno, y más fría en verano. Por lo tanto, habría que estudiar si estos cambios de temperatura podrían provocar cambios significativos en los ecosistemas acuáticos.

Como se ha comentado anteriormente, la planta prototipo de Statkraft toma agua salada de zonas profundas, exactamente a 35 metros de profundidad. Durante años se ha estudiado si esto puede producir algún tipo de anomalía y se ha observado que la profundidad es directamente proporcional con la concentración de nutrientes, especialmente con el fósforo. Dichos nutrientes recorrerán la planta PRO y serán descargados de nuevo al mar, pero esta vez a una zona de menor profundidad, lo que puede producir un aumento de nutrientes y la eutrofización de la zona de descarga.

Por último, hay que tener en cuenta la limpieza de las membranas, que se realizan con agentes químicos similares a los usados en las industrias de desalinización y tratamiento de agua. Está demostrado que estos productos químicos no se acumulan en el medio ambiente, pero habría que tener controlado que no se exceda en ningún momento los límites aceptables de concentración, lo que podría acarrear efectos tóxicos locales (Lattemann & Höpner, 2008). La planta Statkraft ha tenido esto en cuenta, y durante los años de funcionamiento las investigaciones biológicas han confirmado que no hay impactos en las comunidades bentónicas próximas a las zonas de descarga.

Otra preocupación es la toma de agua dulce de los ríos que, a gran escala, requiere de grandes caudales para que la planta pueda tener un funcionamiento eficiente. Se puede hacer aproximar la producción de energía a  $0,75\text{MW}/\text{m}^3/\text{s}$ , lo que quiere decir que se requieren caudales de  $10\text{m}^3/\text{s}$  para que la capacidad de la planta sea  $7,5\text{MW}$ . Esto se traduce en bombeos de agua dulce muy elevados, si se tienen en cuenta los caudales de los ríos españoles no suelen superar en casi ningún caso los  $100\text{m}^3/\text{s}$  de caudal. Bajo esta demanda de agua fluvial, se debe asegurar un flujo mínimo óptimo aguas debajo de la zona de desvío de agua a la planta PRO, siendo necesario incluso cambiar el sistema hidráulico y las reglas de gestión del agua.

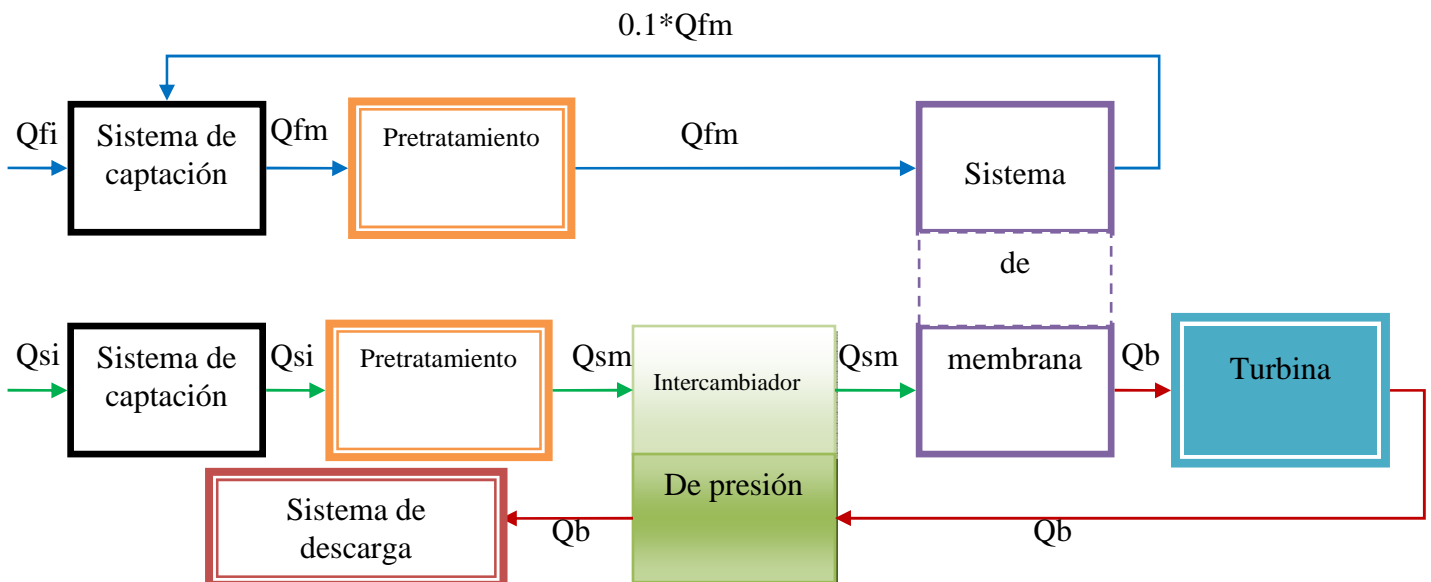
Otros impactos a tener en cuenta son los derivados de la construcción de la planta y todo lo que ello conlleva, es decir, accesos, conexiones eléctricas, canales para el transporte de agua, etc. (Skilhagen, 2010) Se están estudiando plantas enterradas o semienterradas por debajo del nivel del mar, lo que conllevaría un menor impacto visual y físico del entorno. Estas instalaciones contarían incluso con alguna ventaja, como la presurización del agua de mar debido a la gravedad, lo que aumentaría la eficiencia energética. En algunos otros casos, se ha llegado a estudiar la construcción de plantas PRO que aprovechen agua de mar y aguas salinas concentradas de lagos, lo que produciría un efecto negativo bastante más acusado, debido sobre todo a los sistemas de captación y descarga, que tendrían que recorrer grandes distancias, cientos de kilómetros en muchos casos, debido a la separación del mar y este tipo de lagos, que no siempre se encuentran cerca de los océanos.

## 5 ECUACIONES PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA POR ÓSMOSIS RETARDADA POR PRESIÓN

*El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza.  
- Leonardo da Vinci -*

Generalmente, una planta de ósmosis retardada por presión (PRO) consta de los siguientes elementos: sistemas de captación y descarga, zona de pretratamiento, sistema de membrana y sistema de generación y transmisión de energía, tal como puede apreciarse en la figura 5.1.

En este apartado se pretende a través de las ecuaciones que describen (Naghiloo, et al., 2015) conocer el coste de capital necesario para producir cada kWh en €/kWh (Z) en una instalación de PRO.



**Figura 5.1 Diagrama de flujo del proceso PRO**

Para el objetivo expuesto, se muestra en la figura 5.1 un diagrama de flujo de una instalación tipo de PRO, con el fin de facilitar la comprensión de las ecuaciones de diseño de la planta que se utilizarán en el modelo.

Qfi es el caudal de agua fresca (dulce) a la entrada de la planta PRO (m<sup>3</sup>/s), Qfm es el caudal de agua fresca (dulce) que llega al sistema de membrana (m<sup>3</sup>/s), Qsi es el caudal de agua salada a la entrada de la planta PRO (m<sup>3</sup>/s), Qsm es el caudal de agua salada que llega al sistema de membrana (m<sup>3</sup>/s) y Qb es el caudal de descarga de agua salobre (brackish) (m<sup>3</sup>/s).

## 5.1 Potencia de la Planta PRO.

Para conocer la capacidad energética de la planta, en primer lugar se debe determinar la ubicación de la misma. De esta forma se puede conocer las características del agua que se va a introducir en el sistema. Una vez conocida la ubicación, se necesitará conocer la salinidad y la temperatura de las corrientes de agua (agua dulce y salada).

Estos parámetros se pueden tratar como variables o bien como constantes, ya que modificar la salinidad o la temperatura de una corriente de agua supone un coste energético extra, que hará más difícil la viabilidad de la planta PRO. Si se consideran constantes la temperatura y la salinidad, sólo queda como variable del proceso el caudal, cuyo valor se puede modificar y controlar fácilmente con un sistema de bombeo adecuado.

Para hacer un análisis comparativo de los costes energéticos y económicos se debe conocer el caudal máximo del río, su caudal mínimo y el caudal medio anual. El caudal que se está definiendo en este párrafo es una variable y se denomina Q<sub>fm</sub> (m<sup>3</sup>/s), cuyo valor variará dependiendo si se trabaja con el caudal máximo, mínimo o medio.

En segundo lugar, se debe determinar la diferencia de presión osmótica a ambos lados de la membrana. Dicho factor se debe a la diferencia de salinidad y temperatura del agua salada y dulce, la cual se estima a través de la siguiente expresión:

$$\Delta\pi_{osm} = \frac{2R}{M_{NaCl}} * (T_c * S_{NaCl,c} - T_d * S_{NaCl,d}) * 10^{-2} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde T<sub>c</sub> es la temperatura del agua de mar (agua salada), T<sub>d</sub> la temperatura del río (agua fresca o dulce), S<sub>NaCl,c</sub> es la salinidad del agua de mar y S<sub>NaCl,d</sub> la salinidad del agua del río, M<sub>NaCl</sub> es la masa molar de NaCl (48,44 g/mol) y R es la constante universal de los gases ideales (8,314 J/molK).

Dado que el flujo de agua ( $J_w, \frac{m^3}{s} \cdot \frac{1}{m^2} = \frac{m}{s}$ ) se define como el volumen de agua que atraviesa una membrana semipermeable por unidad de tiempo y área, la densidad energética (W en W/m<sup>2</sup>) se puede definir como el trabajo extraíble producido por unidad de membrana. La relación entre el flujo de agua y la densidad energética se muestra en la siguiente expresión:

$$W = J_W * \Delta P = A * (\Delta\pi_{osm} - \Delta P) * \Delta P \quad \text{Ecuación 10}$$

donde A es el coeficiente de permeabilidad de la membrana ( $\text{l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$ ) y  $\Delta P$  es la presión hidrostática (bar).

Si se representa la densidad energética ( $W$ ,  $\text{W}/\text{m}^2$ ) frente a la diferencia de presión ( $\Delta P$ , bar),  $W$  alcanza un máximo cuando la presión es la mitad del valor de la presión osmótica. Para obtener unidades energéticas solo sería necesario multiplicar la expresión por  $10^{-1}$ , con lo que se pasaría de bar a  $\text{MJ}/\text{m}^3$ ; obteniéndose la ecuación 11:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \Delta\pi_{osm} \cdot 10^{-1} \quad \text{Ecuación 11}$$

La expresión para poder calcular la potencia de la planta PRO ( $P$ , MW) es:

$$P = Q_{fm} * E_{osm} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde  $Q_{fm}$  es el caudal de agua dulce que llega a la membrana ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) y  $E_{osm}$  es la energía osmótica en unidades de  $\text{MJ}/\text{m}^3$ .

Conocido  $Q_{fm}$  y  $P$  se puede calcular el caudal de entrada de agua fresca o dulce ( $Q_{fi}$ ,  $\text{m}^3/\text{s}$ ), el caudal de descarga de agua salobre ( $Q_b$ ,  $\text{m}^3/\text{s}$ ) y el caudal de agua salada a la entrada y el caudal de agua salada que llega al sistema de membrana ( $Q_{si}$ ,  $Q_{sm}$ ,  $\text{m}^3/\text{s}$ ). Según la experiencia práctica (Sharif, et al., 2014) (Naghiloo, et al., 2015), el valor del caudal de agua salada a la entrada de la planta ( $Q_{si}$ ) y en el sistema de membranas ( $Q_{sm}$ ) es el mismo, y dicho valor será el doble que el del caudal de agua dulce en la membrana ( $Q_{fm}$ ), según se aprecia en la ecuación 13.

La ecuación 14 hace referencia a un balance de materia en el sistema de membrana, como se puede apreciar en la figura 5.2:

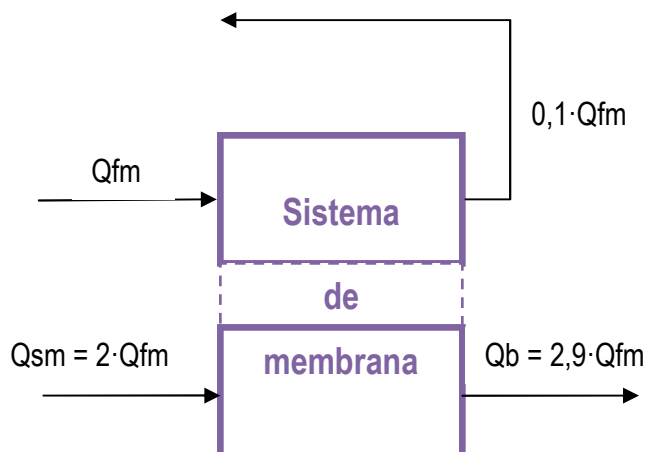


Figura 5.2 Balance de materia en el sistema de membrana

De acuerdo con los autores referenciados, el 90% del agua fresca atraviesa la membrana, el restante 10%, que se denomina sangrado de agua dulce (freshwater bleed o agua recirculada), regresa a la entrada del agua dulce. Por lo tanto, el caudal requerido de agua dulce a la entrada se reducirá en un 10%, según la ecuación 15:

$$Q_{sm} = Q_{si} = 2 * Q_{fm} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$Q_b = Q_{fi} + Q_{si} = 2.9 * Q_{fm} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$Q_{fi} = 0.9 * Q_{fm} \quad \text{Ecuación 15}$$

Por último, se puede calcular la producción de energía bruta anual ( $E_p$ , GWh/yr), que es aquella que la planta es capaz de producir, sin tener en cuenta todas las pérdidas y gastos de energía (ecuación 16):

$$E_p = P * t_{h/yr} * 10^{-3} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde  $t_{h/yr}$  es el número de horas que funciona la planta en un año.

## 5.2 Sistema de captación y descarga de agua.

La toma de agua se realiza mediante una captación por toma abierta, y la torre de toma de agua será una estructura de hormigón con una profundidad de 10 metros y situada a 600 metros como mínimo de la costa. Contendrá rejillas de captación en los laterales de la torre, separadas del fondo marino para evitar la entrada de algunas sustancias, y se prefiere la ubicación sobre un suelo rocoso antes que de arena fina. Para asegurar un flujo laminar y horizontal, y con ello evitar el arrastre de flora y fauna marina, se recomienda que la velocidad de aproximación a las rejillas de captación no supere los 0,15 m/s, y una distancia entre barrotes de aproximadamente 0,035 m, evitando además que grandes cuerpos puedan acceder al inmisario (Colomina, 2016) (Rodríguez, 2016).

Para transportar el agua desde la torre de captación hasta la planta, se usará un inmisario submarino, construido en polietileno de alta densidad (PEAD) ya que es un material poco corrosivo y poco propenso a la colonización de la fauna marina. Para poder conocer el diámetro de la tubería que se va a instalar se debe fijar la velocidad máxima de paso por la tubería en 1,8 m/s. El área o sección transversal de la tubería ( $A_{ocs}$ , m<sup>2</sup>), se calcula según la ecuación 17:

$$A_{ocs} = \frac{Q_{fi}}{v_{max}} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde  $Q_{fi}$  es el caudal de agua dulce o agua del río, m<sup>3</sup>/s, y la velocidad máxima,  $v_{max}$ , está fijada en 1,8 m/s.

Una vez conocida la sección transversal de la tubería se podrá calcular fácilmente el diámetro necesario para la tubería ( $D_{ocs}$ , m):

$$D_{ocs} = \sqrt{\frac{4 * A_{ocs}}{\pi}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Para comprobar si esta configuración es viable y a qué altura se deberá colocar la tubería se hace uso de la ecuación de Bernuilli (ecuación 19):

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + \sum F \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde  $\sum F$  hace referencia a la pérdida de carga (m),  $v_1$  y  $v_2$  (m/s) y  $P_1$  y  $P_2$  son la velocidad y la presión a la salida y la entrada de la tubería respectivamente,  $h_1$  (m) es la altura a la que se encuentra la salida de la tubería y  $h_2$  (m) es la altura a la que se encuentra la entrada de la tubería,  $g$  es la fuerza de la gravedad ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ) y  $\rho$  es la densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ ).

Si se supone que la velocidad y la presión son prácticamente constantes, y que  $h_1$  hace referencia al nivel del mar, o sea, 0 m, el resultado obtenido es el siguiente:  $h_2 = -\sum F$ .

Se observa que la cámara de captación deberá encontrarse por debajo del nivel del mar, y la altura vendrá dada por las pérdidas de carga que se produzcan en el inmisario. A continuación, se procederá a calcular dichas pérdidas de carga, a través de la ecuación de Fanning (ecuación 20):

$$\sum F = \frac{f * L * v_{max}^2}{2D_{ocs} * g} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde  $\sum F$  es la pérdida de carga en m,  $f$  es el coeficiente de rozamiento,  $L$  es la longitud desde la zona de captación hasta la planta PRO en m,  $v_{max}$  es la velocidad máxima de paso en m/s,  $D_{ocs}$  el diámetro de la tubería en m y  $g$  la gravedad en  $\text{m/s}^2$ .

El coeficiente de rozamiento ( $f$ ) se determina mediante la ecuación de Colebrook-White (ecuación 21):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left( \frac{k/D_{ocs}}{3.71} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde  $Re$  es el número de Reynolds,  $k$  es la rugosidad del material de la tubería en m, y  $D_{ocs}$  es el diámetro de la tubería en m.

Dado que dicha incógnita se encuentra a ambos lados de la ecuación, se ha necesitado el uso de un pequeño script en Excel para poder resolverlo.



El número de Reynolds (ecuación 22):

$$Re = \frac{\rho * v_{max} * D_{ocs}}{\mu} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde será necesario conocer la densidad ( $\rho$ , kg/m<sup>3</sup>), la velocidad máxima de paso del agua ( $v_{max}$ , m/s), el diámetro de la tubería ( $D_{ocs}$ , m) y la viscosidad del agua ( $\mu$ , kg/m·s).

Finalmente, se define la cántara de captación como el lugar donde se almacena el agua de mar para ser posteriormente bombeada a la planta. Esta cámara estará construida en hormigón y está compuesta por 2 secciones. La primera sección servirá para que la entrada del agua procedente del inmisario submarino no se produzca de forma brusca. En la siguiente sección se sitúan las bombas de captación, que serán las encargadas de bombear el agua hacia la planta desalinizadora. A modo de separación, se colocarán unas rejillas para evitar el paso de partículas más grandes (Colomina, 2016), (Rodríguez, 2016).

Para calcular los costes de capital de las tuberías de captación de agua fresca ( $C_{ft}$ ), las tuberías de captación de agua salada ( $C_{st}$ ), las tuberías de descarga de agua ( $C_{bt}$ ), se emplean las siguientes ecuaciones (23, 24, y 25):

$$C_{ft} = A_{oscfi} * L_{ft} * C_{upt} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$C_{st} = A_{oscsl} * L_{st} * C_{upt} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$C_{bt} = A_{oscb} * L_{bt} * C_{upt} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde  $A_{oscfi}$  es la sección transversal de la tubería de captación de agua fresca (m<sup>2</sup>),  $A_{ocsl}$  es la sección transversal de la tubería de captación de agua salada (m<sup>2</sup>),  $A_{oscb}$  es la sección transversal de la tubería de descarga de agua (m<sup>2</sup>),  $L_{ft}$  es la longitud desde la zona de captación del agua dulce a la planta (m),  $L_{st}$  es la longitud desde la zona de captación del agua salada a la planta (m),  $L_{bt}$  es la longitud desde la planta a la zona de descarga (m) y  $C_{upt}$  el precio unitario de la tubería.

Sumando cada uno de estos costes se obtiene el coste de capital total de los sistemas de captación y descarga ( $C_{ios}$ , €) (ecuación 26):

$$C_{ios} = C_{ft} + C_{st} + C_{bt} \quad \text{Ecuación 26}$$

Por último, se calcula la energía empleada por el sistema de captación y descarga ( $E_{lios}$ , GWh/yr) (ecuación 27):

$$E_{lios} = \frac{\rho * g * Q_{si} * \sum F * t_{h/yr}}{10^9} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde  $Q_{si}$  es el caudal de agua salada a la entrada ( $m^3/s$ ) y  $\Sigma F$  es la pérdida de carga en m,  $t_{h/yr}$  es el número de horas que funciona la planta en un año,  $g$  es la fuerza de la gravedad ( $9,8 m/s^2$ ) y  $\rho$  es la densidad del agua ( $kg/m^3$ ).

### 5.3 Pretratamiento.

La microfiltración es la mejor opción para el pretratamiento de las aguas en una planta energética PRO (Naghiloo, et al., 2015).

Para determinar el área necesaria de membrana para realizar la microfiltración, se necesita conocer el caudal de agua dulce;  $Q_{fi}$ , el caudal de agua salada,  $Q_{si}$ ; y el flujo de agua,  $J_{wf}$ , a través de la membrana (característica de la membrana usada para realizar la microfiltración). Conocidos estos datos, se puede calcular el área de membrana necesaria para el agua dulce,  $A_{ff}$ , y para el agua salada,  $A_{sf}$ , a través de las siguientes expresiones (ecuaciones 28 y 29):

$$A_{ff} = \frac{Q_{fi}}{J_{wf}} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$A_{sf} = \frac{Q_{si}}{J_{wf}} \quad \text{Ecuación 29}$$

Para determinar el número de tambores de membrana se debe conocer el área de membrana necesaria para la microfiltración (calculado por las ecuaciones 31 y 31,  $A_{ff}$  y  $A_{sf}$ ) y el área de filtro que contiene cada tambor,  $A_{fd}$ , que es un dato de cada estructura de tambor. De esta forma, se puede calcular el número de tambores necesarios:

$$n_{fd} = \frac{A_{ff}}{A_{fd}} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$n_{sd} = \frac{A_{sf}}{A_{fd}} \quad \text{Ecuación 31}$$

Con las ecuaciones 32 y 33 se calculan la longitud que van a ocupar los tambores usados para la microfiltración, tanto del agua fresca,  $L_{fd}$ , como del agua salada,  $L_{sd}$ :

$$L_{fd} = [D_{drums} + (2 * 0.5)] * n_{fd} \quad \text{Ecuación 32}$$

$$L_{sd} = [D_{drums} + (2 * 0.5)] * n_{sd} \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde el número de tambores necesarios para la microfiltración de agua dulce y salada (calculados por las ecuaciones 30 y 31) son  $n_{fd}$  y  $n_{sd}$  respectivamente, y se debe suponer que entre tambor y tambor existe una separación de 0,5 metros, de forma que la configuración final de los tambores quedaría como un tambor separado por 0,5 metros de cada tambor que se ubique a su lado.

Por último, se calculan todos los costes derivados del pretratamiento, así como la energía consumida para realizar este proceso.

Aplicando las ecuaciones 34, 35 y 36 se obtiene el coste de capital para la microfiltración de agua dulce y salada,  $C_{fmf}$  y  $C_{smf}$ , y el coste total derivado de la microfiltración,  $C_{tmf}$ , como suma de las dos anteriores:

$$C_{fmf} = Q_{fi} * t_{sec/yr} * C_{upmf} \quad \text{Ecuación 34}$$

$$C_{smf} = Q_{si} * t_{sec/yr} * C_{upmf} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$C_{tmf} = C_{fmf} + C_{smf} \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde el caudal de agua dulce y salada que se va a filtrar son  $Q_{fi}$  y  $Q_{si}$  respectivamente,  $t_{s/yr}$  es el número de segundos que funciona la planta en un año y  $C_{upmf}$  es el coste unitario de la microfiltración.

Tras la microfiltración se producen tres corrientes, una de agua fresca microfiltrada, agua salada microfiltrada y, por último, una corriente que contiene los residuos que han sido eliminados en la microfiltración y que van a parar a un sumidero con ayuda de una bomba. Para calcular el coste de la bomba de sumidero, del sumidero de descarga y el coste total del sumidero, se usan las ecuaciones 37, 38 y 39:

$$C_{ps} = A_{csp} * (L_{fd} + L_{sd}) * C_{upps} \quad \text{Ecuación 37}$$

$$C_{ds} = A_{cnds} * L_{sd} * C_{upps} \quad \text{Ecuación 38}$$

$$C_{ts} = C_{ps} + C_{ds} \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde  $L_{fd}$  y  $L_{sd}$  son la longitud que ocupan los tambores de agua fresca y salada respectivamente,  $A_{csp}$  es la sección transversal de la bomba de sumidero,  $C_{upps}$  el coste unitario de la bomba de sumidero y  $A_{cnds}$  es la sección transversal del sumidero de descarga.

El coste total del pretratamiento,  $C_{tpt}$ , se determina sumando el coste total de la microfiltración,  $C_{tmf}$ , y el coste del sumidero,  $C_{ts}$  (ecuación 40):

$$C_{tpt} = C_{tmf} + C_{ts} \quad \text{Ecuación 40}$$

La expresión para el cálculo de la energía total consumida en el pretratamiento (GWh/yr) es:

$$E_{cpt} = \frac{\Delta P_{mf} * (Q_{fm} + Q_{sm}) * t_{hr/yr}}{10^9} \quad \text{Ecuación 41}$$

Donde  $Q_{fm}$  y  $Q_{sm}$  son el caudal de agua dulce y salada que llegará al sistema de membrana respectivamente, que será la misma que salga del sistema de pretratamiento,  $t_{hr/yr}$  es el número de horas que funciona la planta en un año y  $\Delta P_{mf}$  es la presión mínima necesaria para que se produzca la microfiltración.

#### 5.4 Sistema de membrana.

Se va a emplear un módulo de membrana en espiral, ya que actualmente resulta el más económico en comparación con los otros tipos existentes para este tipo de tratamientos (Naghiloo, et al., 2015). Para determinar el área total de membrana requerida,  $A_m$ , se debe dividir la capacidad energética total de la planta  $P$  entre la densidad energética de la membrana usada ( $W$ ), característica del tipo de membrana (ecuación 42):

$$A_m \geq \frac{P * 10^6}{W} \quad \text{Ecuación 42}$$

Para determinar el coste total del sistema de membrana,  $C_{ms}$ , sólo se tiene que multiplicar el área total necesaria de membrana,  $A_m$ , por su precio unitario,  $C_{upm}$ :

$$C_{ms} = A_m * C_{upm} \quad \text{Ecuación 43}$$

Para conocer la pérdida de energía hay que tener en cuenta que no todo el caudal de agua dulce ( $Q_{fm}$ ) va a atravesar la membrana y, por lo tanto, no se va a producir la energía teórica esperada ( $Q_{fm} + Q_{sm} = 3 \cdot Q_{fm}$ ), sino que parte del agua dulce se recirculará ( $\%bleed = 0,1 \cdot Q_{fm}$ ). La proporción entre los caudales por un balance de materia en el sistema de membrana queda como sigue:

$$\frac{1/3 * ((1 - \%bleed) * Q_{fm}) + Q_{sm}}{Q_{fm}} = \frac{Q_{fm} - \%bleed * Q_{fm} + 2Q_{fm}}{3Q_{fm}} = \frac{3Q_{fm} - \%bleed * Q_{fm}}{3Q_{fm}}$$

De esta forma, se puede determinar la pérdida total de energía debido a la recirculación o sangrado de agua dulce,  $E_{lb}$ , como una diferencia entre la energía total que se obtendría,  $E_p$ , y la que se obtiene realmente debido a la recirculación, como se observa en la ecuación 44:

$$E_{lb} = \left[ 1 - \frac{1/3 * ((1 - \%bleed) * Q_{fm}) + Q_{sm}}{Q_{fm}} \right] * E_p \quad \text{Ecuación 44}$$

## 5.5 Sistemas de transmisión y generación de energía.

Una pila de membrana está formada por varios recipientes de presión, y un recipiente de presión está compuesto por varios módulos.

Para calcular el número de módulos de volumen, se dividirá el área total de membrana necesaria,  $A_m$ , calculada anteriormente, entre la densidad de empaquetamiento de los módulos de membrana,  $p \cdot d_{module}$ , y el volumen del módulo de membrana,  $V_{module}$ , obteniéndose la siguiente expresión (ecuación 45):

$$n_{moduls} = \frac{A_m}{p \cdot d_{module} * V_{module}} \quad \text{Ecuación 45}$$

Para determinar el número de recipientes a presión,  $n_{pv}$ , sólo es necesario dividir el número de módulos de volumen,  $n_{moduls}$ , calculado anteriormente, entre el número de módulos en cada recipiente de presión,  $n_{moduls/PV}$  (ecuación 46):

$$n_{pv} = \frac{n_{moduls}}{n_{moduls/PV}} \quad \text{Ecuación 46}$$

Para determinar el número de pilas de membrana,  $n_{ms}$ , se divide el número de recipientes de presión,  $n_{pv}$ , entre el número de recipientes de presión que es capaz de albergar una pila de membrana,  $n_{pv/stack}$  (ecuación 47):

$$n_{ms} = \frac{n_{pv}}{n_{pv/stack}} \quad \text{Ecuación 47}$$

La energía que es capaz de generar cada pila de membrana,  $MW_s$ , se calcula como un cociente de la capacidad energética total de la planta,  $P$ , entre el número total de pilas de membrana,  $n_{ms}$ , obteniendo de ese modo la energía que produce cada unidad (ecuación 48):

$$MW_s \geq \frac{P}{n_{ms}} \quad \text{Ecuación 48}$$

Para realizar el cálculo de los costes de inversión en este apartado se hacen tres suposiciones:

1. La expresión que permite calcular los costes de una turbina tipo Kaplan (Aggidis G.A., 2010), para caudales comprendidos entre 0,5-5 m<sup>3</sup>/s, tiene la siguiente forma:  $C = 3500(kW)^{0,68}$  (calculado para £; 2008). Para corregir la unidad monetaria en la que está definido se aplica un factor de conversión,  $f$  (valor actual en abril 2019 1,16€=1£), y para corregir la ecuación de Kaplan y actualizarla a los valores de 2018, se buscan los valores actuales (2018=603,10) y del 2008 (575,40) del CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index) (<https://www.chemengonline.com>, s.f.).

2. Cada pila de membrana está formada por: 1 bomba para el agua fresca, 1 bomba para el agua salada, 1 intercambiador de presión y 1 turbina. Por ello, en la expresión del cálculo de los costes, el resultado está multiplicado por 4, suponiendo que los costes de estas 4 partes de la pila de membrana son equivalentes.

El coste de todos estos equipos se calcula usando la ecuación de Kaplan, añadiendo la energía que es capaz de producir cada pila de membrana,  $MW_s$ , el número de pilas de membranas obtenidas,  $n_{ms}$ , y multiplicada por el factor de conversión de la moneda,  $f_{\epsilon}$ , y por 4 (por los 4 equipos que se ha comentado anteriormente) (ecuación 49):

$$C_{ptpe} = 3500 * (MW_s * 10^3)^{0.68} * f * 4 * n_{ms} \quad \text{Ecuación 49}$$

3. El coste de las tuberías se supone un 2% del coste total de la planta (Naghiloo, et al., 2015) (ecuación 50):

$$C_{pipe} = 0.02 * C_{tpp} \quad \text{Ecuación 50}$$

El coste de capital total derivado de los sistemas de transmisión y generación,  $C_{ttg}$ , se obtiene como suma de los costes debido a los equipos,  $C_{ptpe}$ , y a las tuberías,  $C_{pipe}$  (ecuación 51):

$$C_{ttg} = C_{ptpe} + C_{pipe} \quad \text{Ecuación 51}$$

La energía consumida en el transporte de agua se calcula con la siguiente expresión:

$$E_{wt} = \frac{\rho * g * \Delta H_w (Q_{fm} + Q_{sm}) * t_{h/yr}}{\eta_{bomba} * 10^9} \quad \text{Ecuación 52}$$

Donde  $\rho$  densidad del agua en  $kg/m^3$ ,  $g$  es  $9,8 \text{ m/s}^2$ ,  $Q_{fm}$  y  $Q_{sm}$  son los caudales de agua dulce y salada que llegan al sistema de membrana ( $m^3/s$ ),  $t_{h/yr}$  el tiempo de funcionamiento de la planta en horas durante un año,  $\eta_{bomba}$  es la eficiencia de la bomba y  $\Delta H_w$  pérdida de carga (m) debido a la fricción con la tubería, que es un valor determinado y constante definido para distintos tipos de tuberías y materiales.

Hay que tener en cuenta la eficiencia real de la turbina. La energía real,  $E_{tl}$ , se calcula considerando la energía teórica total producida,  $E_p$ , y la pérdida por la eficiencia de la turbina,  $\eta_{turbine}$  (ecuación 53):

$$E_{tl} = E_p * (1 - \eta_{turbine}) \quad \text{Ecuación 53}$$

La energía consumida en este apartado procede del consumo de energía debido al transporte del agua ( $E_{wt}$ ) y a la pérdida de energía debido a la eficiencia de la turbina ( $E_{tl}$ ), con lo que la expresión matemática queda de la siguiente forma (ecuación 54):

$$E_{iltg} = E_{wt} + E_{tl} \quad \text{Ecuación 54}$$

## 5.6 Costes del terreno, instalación eléctrica y conexión a la red eléctrica.

Para determinar los costes del terreno se debe conocer la superficie que ocupa la planta. Para calcularlo se aproxima a una planta rectangular cuyos lados se suponen que tienen el mismo valor que la longitud que ocupan los tanques de agua dulce y agua salada,  $L_{fd}$  y  $L_{sd}$ . Conocida dicha superficie, sólo quedaría multiplicarla por el precio unitario del terreno,  $C_{upl}$  (ecuación 55):

$$C_{land} = (L_{fd} * L_{sd}) * C_{upl} \quad \text{Ecuación 55}$$

Para conocer los costes de la instalación y conexión a la red eléctrica, se considera que dicho coste supone un 1,5% del coste total de la planta energética PRO (Naghiloo, et al., 2015) (ecuación 56):

$$C_{egc} = 0.015 * C_{tpp} \quad \text{Ecuación 56}$$

## 5.7 Coste total de la planta y energía total perdida o consumida por la planta.

La energía total consumida o perdida durante todo el proceso PRO se determina como la suma de todas las energías consumidas que se han ido calculando en los pasos anteriores (debido al sistema de entrada/descarga,  $E_{lios}$ , consumida por el pretratamiento,  $E_{cpt}$ , debido a la recirculación,  $E_{lb}$ , y al sistema de transmisión/generación,  $E_{ttg}$ ) (ecuación 57):

$$E_{tl} = E_{lios} + E_{cpt} + E_{lb} + E_{ttg} \quad \text{Ecuación 57}$$

Una vez conocido el valor de la energía total que se ha consumido o perdido durante todo el proceso,  $E_{tl}$ , se puede determinar el valor de la energía neta producida por la planta PRO,  $E_{net}$ , que será aquella a la que se le pueda sacar una rentabilidad económica, a través de la siguiente expresión:

$$E_{net} = E_p - E_{tl} \quad \text{Ecuación 58}$$

Para conocer el coste total de la planta,  $C_{tpp}$ , se debe tener en cuenta que el coste de las tuberías y de la instalación y conexión a la red están en función del coste total de la planta (ya que se han supuesto como un porcentaje del mismo), por lo que la expresión matemática queda de la siguiente forma (siendo  $C_{lios}$  Coste del sistema de entrada/descarga,  $C_{cpt}$  pretratamiento,  $C_{ms}$  sistema de membranas,  $C_{ttg}$  sistema de transmisión/generación,  $C_{egc}$  instalación/sistema de red eléctrica,  $C_{land}$  terreno) (ecuación 59):

$$C_{tpp} = C_{ios} + C_{tpt} + C_{ms} + C_{ttg} + C_{egc} + C_{land}$$

$$C_{tpp} = C_{ios} + C_{tpt} + C_{ms} + (C_{ptpe} + C_{pipe}) + C_{egc} + C_{land}$$

Ecuación 59

$$C_{tpp} = C_{ios} + C_{tpt} + C_{ms} + (C_{ptpe} + 0.02C_{tpp}) + 0.015C_{tpp} + C_{land}$$

$$0.965C_{tpp} = C_{ios} + C_{tpt} + C_{ms} + C_{ptpe} + C_{land}$$

## 5.8 Determinación de la función objetivo.

La función objetivo es el coste de capital necesario para producir cada kWh. Para poder determinar este valor se necesitan conocer dos valores: el coste de inversión de capital,  $Z_C$ , y el coste de operación y mantenimiento,  $Z_{OM}$ . De esta forma, la expresión de la función objetivo queda (ecuación 60):

$$Z = Z_C + Z_{OM} = \frac{C_{tpp} * CRF * \varphi}{E_{net} * 10^6}$$

Ecuación 60

Para poder calcular el coste de inversión de capital,  $Z_C$ , es necesario conocer, entre otras cosas, el factor de retorno de la inversión, CRF (Christensen T.H., 2011), que se calcula a través de la siguiente expresión (ecuación 61):

$$CRF = \frac{i * (i + 1)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

Ecuación 61

Donde  $i$  es el interés y  $n$  es el horizonte en años. Además, es necesario determinar la energía neta producida por la planta,  $E_{net}$ , y el coste de capital total de la planta,  $C_{tpp}$  (ecuación 62):

$$Z_C = \frac{C_{tpp} * CRF}{E_{net}}$$

Ecuación 62

El coste de operación y mantenimiento de la planta se puede calcular como una función de  $Z_C$ . Por ello, en su expresión matemática aparece  $\varphi$  denominado factor de operación y mantenimiento, al que se le asigna un valor aproximado del 10%, lo que quiere decir que el coste de operación y mantenimiento supone aproximadamente un 10% del coste de inversión por kWh o  $Z_C$ . La expresión matemática queda de la siguiente forma (ecuación 63):

$$Z_{OM} = \varphi * Z_C$$

Ecuación 63

Con todo ello, el coste total gastado por kWh producido, se puede expresar como (ecuación 64):



$$Z = Z_C + Z_{OM} = \frac{(1 + \varphi) * C_{tpp} * CRF}{E_{net}}$$

Ecuación 64

## 6 CASOS PRÁCTICOS

*Al mar no se le añade sal, simplemente se le devuelve la misma cantidad de sal pero con menor cantidad de agua.*

Se van a plantear diferentes casos para estudiar la viabilidad de una planta de generación de energía mediante la técnica de ósmosis retardada por presión (PRO). La ubicación será la misma en todos los casos estudiados, habiéndose elegido el polígono industrial La Venta Nova, en la provincia de Tarragona. Dada dicha ubicación por la cercanía tanto del mar como del río Ebro, unos de los ríos más caudalosos de España. Este hecho, permite realizar comparaciones en cuanto a caudal de agua fresca. Más en concreto, la ubicación elegida se encuentra a 7 km de la costa, y a 10 km del río Ebro, tal como se muestra en las imágenes de la figura 6.1.

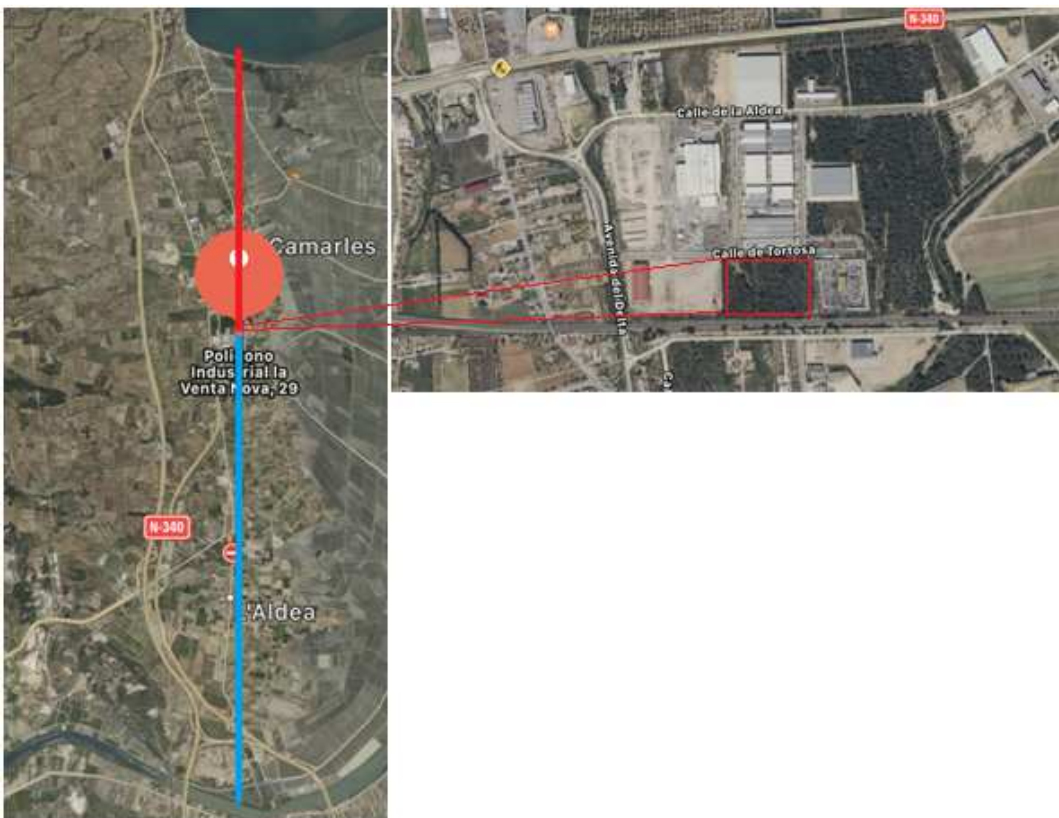


Figura 6.1 Ubicación de la Planta PRO

Los casos a estudiar son los siguientes: En primer lugar, una instalación con las características de la planta piloto PRO de Statkraft, para lo que se fijará la potencia instalada de la planta entre 1-2 MW; en segundo lugar, se estudiará el efecto del caudal de entrada a la planta, dependiente del caudal del río Ebro.

### 6.1 Planta PRO en función de la potencia instalada.

La planta piloto de Statkraft está diseñada para trabajar con una potencia instalada entre 1-2 MW (Skråmestø\*, et al., s.f.). En este apartado, se va a estudiar una planta PRO de la misma potencia en España, en la ubicación descrita en el apartado anterior. Los datos necesarios para estudiar el caso serán: la potencia instalada de la planta para (entre 1MW y 2MW), así como los valores de temperatura y salinidad del río Ebro (<http://www.saicaebro.com/redalerta/ficha.php?estacion=970>, 2019): La temperatura del río Ebro es de 17,9°C ( $T_d=290,9$  K) y la salinidad es de  $S_{NaCl,d}=1$ g/mol, mientras que la temperatura media del mar Mediterráneo en la zona de Tarragona es de 15°C ( $T_c=288$  K).

De acuerdo con las ecuaciones expuestas en el capítulo anterior, los resultados obtenidos para una potencia instalada en 1MW son los que se presentan en las tablas 6.1 y 6.2:

Potencia instalada P (MW)	Coste Capital PRO C <sub>tp</sub> (€)	Producción Energía Inicial E <sub>p</sub> (GWh/y)	Producción Energía Neta E <sub>net</sub> (GWh/y)	Z (€/kW·h)
1,00	$1,9 \cdot 10^7$	8,76	2,08	1,37

Tabla 6.1 Resultados para una planta PRO de 1MW de potencia instalada

$Q_{fi}$	0,56	$Re_{ocssi}$	1693885,02	$L_{fd}$	6,10	$E_{tttg}$	3,79	$C_{tp}$	7038307,07
$Q_{fm}$	1,25	$Re_{ocsb}$	2039707,67	$L_{sd}$	13,56	$E_{il}$	6,68	$C_{ms}$	2083333,33
$Q_{si}$	1,25	$f_{ocsf}$	0,0084	$A_m$	416666,67	$C_{ft}$	1564931,19	$C_{ptpe}$	1391437
$Q_{sm}$	1,82	$f_{ocssi}$	0,0079	$n_{moduls}$	17111,22	$C_{st}$	2434337,41	$C_{pipe}$	$3,7 \cdot 10^5$
$Q_b$	0,56	$f_{ocsb}$	0,0077	$n_{pv}$	2444,46	$C_{bt}$	3529789,24	$C_{ttg}$	1391437,02
$A_{ocsf}$	0,31	$\Sigma F_{ocsf}$	21,89	$n_{ms}$	0,40	$C_{ios}$	7529057,84	$C_{land}$	8268,64
$A_{ocssi}$	0,70	$\Sigma F_{ocssi}$	9,69	MWs	2,50	$C_{mf}$	1776660,12	$C_{egc}$	$2,8 \cdot 10^5$
$A_{ocsb}$	1,01	$\Sigma F_{ocsb}$	7,83	$E_{lios}$	2,10	$C_{smf}$	3948133,6	$C_{tp}$	$1,9 \cdot 10^7$
$D_{ocsf}$	0,63	$A_{ff}$	89,42	$E_{cpt}$	0,49	$C_{tmf}$	5724793,72	$Z_C$	$1,2 \cdot 10^6$
$D_{ocssi}$	0,94	$A_{fs}$	198,72	$E_{lb}$	0,29	$C_{ps}$	825520,77	$Z_{OM}$	$1,7 \cdot 10^5$
$D_{ocsb}$	1,13	$n_{fd}$	1,36	$E_{wt}$	2,48	$C_{ds}$	487992,58		
$Re_{ocsf}$	1136292,62	$n_{sd}$	3,01	$E_{lt}$	1,31	$C_{ts}$	1313513,35		

**Tabla 6.2 Resultados para una planta PRO de 1MW de potencia instalada**

En las figuras 6.2 y 6.3 se desglosan el impacto que tienen los distintos costes al proceso global, así como el gasto o pérdida energética, de acuerdo con la nomenclatura usada en el capítulo anterior:

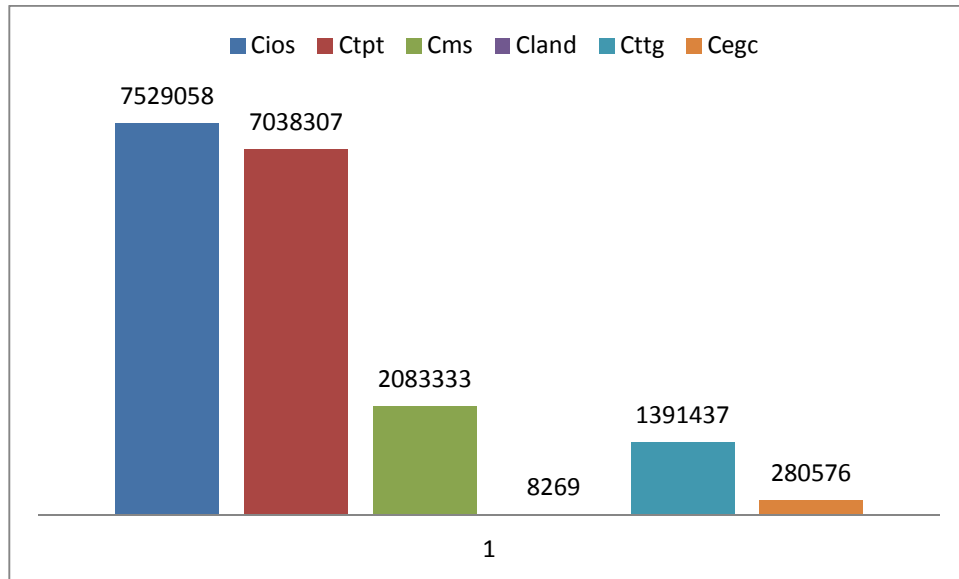


Figura 6.2 Comparación de los costes (€) para una planta de 1MW de potencia instalada

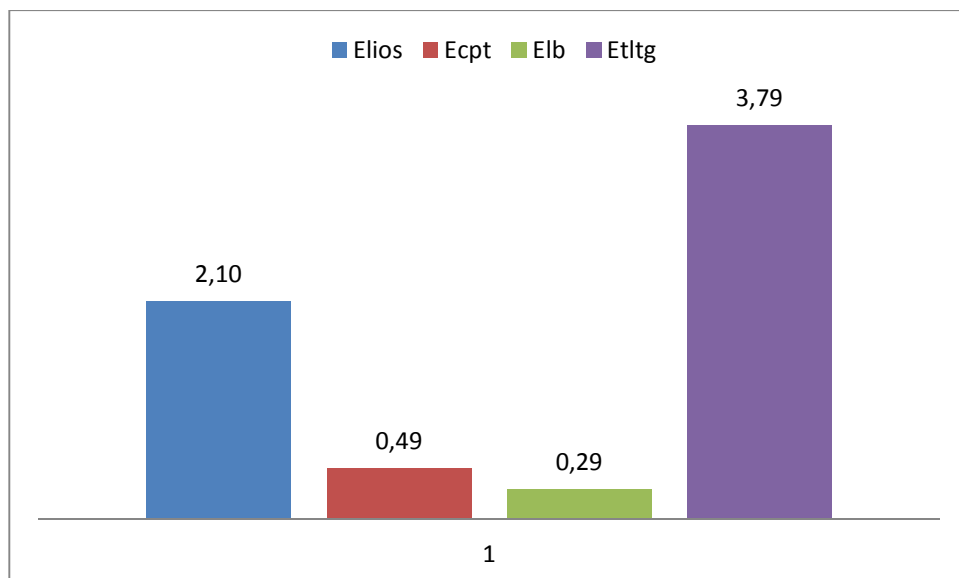


Figura 6.3 Comparación de la energía consumida (GWh/yr) por una planta de 1MW de potencia instalada

Los resultados para una potencia instalada de 2 MW se muestran en las tablas 6.3 y 6.4:

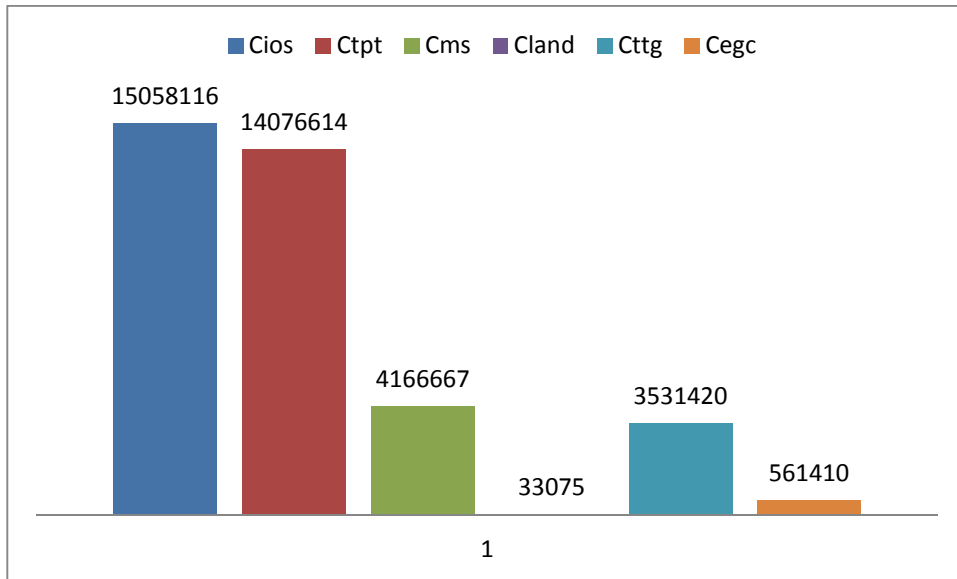
Potencia instalada P (MW)	Coste Capital total PRO Ctpp (€)	Producción Energía Inicial Ep (GWh/y)	Producción Energía Neta Enet (GWh/y)	Z (€/kW·h)
2,00	$3,7 \cdot 10^7$	17,52	5,39	1,06

Tabla 6.3 Resultados para una planta PRO de 2MW de potencia instalada

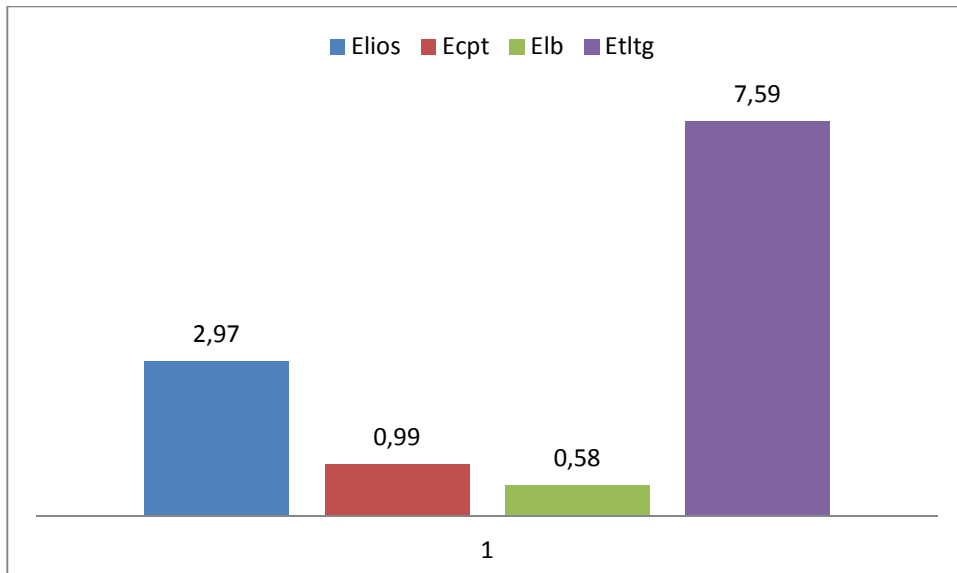
$Q_{fi}$	1,13	$Re_{ocssi}$	2395515,18	$L_{fd}$	12,20	$E_{tttg}$	7,59	$C_{tpt}$	14076614,14
$Q_{fm}$	2,50	$Re_{ocsb}$	2884582,25	$L_{sd}$	27,11	$E_{tl}$	12,13	$C_{ms}$	4166666,67
$Q_{si}$	2,50	$f_{ocsf}$	0,0084	$A_m$	833333,33	$C_{ft}$	3129862,38	$C_{ptpe}$	2782874
$Q_{sm}$	3,63	$f_{ocssi}$	0,0079	$n_{moduls}$	34222,43	$C_{st}$	4868674,81	$C_{pipe}$	$7,5 \cdot 10^5$
$Q_b$	1,13	$f_{ocsb}$	0,0077	$n_{pv}$	4888,92	$C_{bt}$	7059578,48	$C_{ttg}$	2782874,02
$A_{ocsf}$	0,63	$\Sigma F_{ocsf}$	15,48	$n_{ms}$	0,80	$C_{ios}$	15058115,7	$C_{land}$	33074,55
$A_{ocssi}$	1,39	$\Sigma F_{ocssi}$	6,85	$MWs$	2,50	$C_{fmf}$	3553320,24	$C_{egc}$	$5,6 \cdot 10^5$
$A_{ocsb}$	2,02	$\Sigma F_{ocsb}$	5,54	$E_{lios}$	2,97	$C_{smf}$	7896267,2	$C_{tpp}$	$3,7 \cdot 10^7$
$D_{ocsf}$	0,89	$A_{ff}$	178,85	$E_{cpt}$	0,99	$C_{tmf}$	11449587,44	$Z_C$	$9,3 \cdot 10^5$
$D_{ocssi}$	1,33	$A_{fs}$	397,44	$E_{lb}$	0,58	$C_{ps}$	1651041,55	$Z_{OM}$	$1,3 \cdot 10^5$
$D_{ocsb}$	1,60	$n_{fd}$	2,71	$E_{wt}$	4,96	$C_{ds}$	975985,15		
$Re_{ocsf}$	1606960,43	$n_{sd}$	6,02	$E_{lt}$	2,63	$C_{ts}$	2627026,70		

**Tabla 6.4 Resultados para una planta PRO de 1MW de potencia instalada**

Así mismo, en las figuras 6.4 y 6.5 se desglosan los costes de los distintos procesos de la planta PRO, así como la pérdida o energía consumida por la planta.



**Figura 6.4 Comparación de los costes (€) para una planta de 2MW de potencia instalada**



**Figura 6.5 Comparación de la energía consumida (GWh/yr) por una planta de 2MW de potencia instalada**

De los resultados obtenidos puede destacarse que al aumentar al doble la potencia instalada de la planta (de 1MW=8,76GWh/y a 2MW=17,52GWh/y), la energía neta obtenida en ambos casos no es lineal; es decir, para 2MW no es el doble que para 1MW.

Por otro lado, se puede observar que, evidentemente, el coste total de la planta aumenta al aumentar la potencia instalada pero. Sin embargo, el precio final de la energía en €/kWh, disminuye al aumentar la potencia instalada, por razones obvias del escalado de la planta, obteniéndose un precio de la energía más competitivo en el mercado energético.

Hay que destacar que los diámetros de las tuberías necesarias para la captación y descarga del agua no son excesivamente grandes y son fáciles de instalar (del orden de 1 m).

En cuanto a los costes de las distintas partes que conforman el proceso PRO, se observa que los costes que suponen un mayor impacto económico para el proceso son, en ambos casos, el coste del sistema de captación y descarga ( $C_{ios}$ ) y el coste del pretratamiento ( $C_{tp}$ ), siendo variables que deben ser estudiadas con profundidad para abaratar dichos costes.

En cuanto al mayor consumo de energía, se aprecia un mayor impacto en el consumo de energía debido al sistema de generación y transmisión de energía ( $E_{ltg}$ ), ya que supone casi el 25% del total de la energía consumida por el proceso.

Con todo ello, el coste de la energía está muy por encima del precio de mercado, ya que los valores obtenidos para una planta PRO de 1 y 2 MW son superiores a 1 €/kWh.

## 6.2 Planta PRO en función del caudal de agua del río.

**E**n este apartado se va a realizar el estudio técnico-económico de la planta PRO en función del caudal del río. Para esto, en primer lugar, se debe conocer cuál es el caudal del río Ebro durante el año (<http://portal.mapama.gob.es/BoleHWeb/>, 2019). Una vez conocido los valores de caudales para los distintos meses del año, se ha realizado un estudio para el caudal máximo (con el que operará la planta PRO durante un número menor de meses), el caudal medio (para el que la planta PRO operará un mayor número de meses que si se usa el caudal máximo) y el caudal mínimo (con el que la planta PRO podrá funcionar durante todo el año).

Es evidente que no puede operar la planta PRO con los valores máximos de caudal del río, ya que si se usa todo el caudal se dejaría el río sin agua. Por ello, se ha realizado el estudio usando un 20% de los valores de los caudales expuestos. Los valores de los caudales para el río Ebro en función de los meses del último año 2018 se muestran en la tabla 6.5:



Enero	Febrero	Marzo	Abril
406,20	514,29	711,66	1382,31
Mayo	Junio	Julio	Agosto
387,59	234,60	151,73	123,76
Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
145,71	157,48	389,51	327,22

**Tabla 6.5 Caudales del río Ebro durante el año 2018 (m<sup>3</sup>/s)**

El caudal máximo se presenta en el mes de abril (1382,31 m<sup>3</sup>/s), con el que solo podría trabajar la planta PRO durante ese mes. El caudal medio obtenido es de 411 m<sup>3</sup>/s, por lo que se podría considerar que con este caudal se operaría durante los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo y noviembre, es decir, durante 6 meses. Mientras que el caudal mínimo del río se presenta en el mes de agosto (123,76 m<sup>3</sup>/s), con el que se podría operar durante todo el año.

Los resultados obtenidos para el caudal mínimo (123,76 m<sup>3</sup>/s), con el que se puede operar durante todo el año, se muestran en las tablas 6.6 y 6.7:

Potencia instalada P (MW)	Coste Capital total PRO C <sub>tp</sub> (€)	Producción Energía Inicial E <sub>p</sub> (GWh/y)	Producción Energía Neta E <sub>net</sub> (GWh/y)	Z (€/kW·h)
39,54	7,5 · 10 <sup>8</sup>	346,39	152,08	0,76

**Tabla 6.6 Resultados para una planta PRO trabajando al 20% del caudal mínimo**

$Q_{fi}$	22,28	$Re_{ocssi}$	10651516,8	$L_{fd}$	241,20	$E_{lttg}$	150,03	$C_{tpt}$	278306448,39
$Q_{fm}$	24,75	$Re_{ocsb}$	12826124,7	$L_{sd}$	536,00	$E_{tl}$	194,30	$C_{ms}$	82378488,91
$Q_{si}$	49,50	$f_{ocsf}$	0,0084	$A_m$	16475697,78	$C_{ft}$	61880000	$C_{ptpe}$	55019749,23
$Q_{sm}$	49,50	$f_{ocssi}$	0,0079	$n_{moduls}$	676606,14	$C_{st}$	96257777,8	$C_{pipe}$	15053774,52
$Q_b$	71,78	$f_{ocsb}$	0,0077	$n_{pv}$	96658,02	$C_{bt}$	139573778	$C_{ttg}$	70073523,75
$A_{ocsf}$	12,38	$\Sigma F_{ocsf}$	3,48	$n_{ms}$	15,79	$C_{ios}$	297711556	$C_{land}$	12928378,5
$A_{ocssi}$	27,50	$\Sigma F_{ocssi}$	1,54	MWs	2,50	$C_{mf}$	70252116,48	$C_{egc}$	$1,1 \cdot 10^7$
$A_{ocsb}$	39,88	$\Sigma F_{ocsb}$	1,24	$E_{lios}$	13,21	$C_{smf}$	156115814,4	$C_{tpp}$	$7,5 \cdot 10^8$
$D_{ocsf}$	3,97	$A_{ff}$	3536,00	$E_{cpt}$	19,51	$C_{tmf}$	226367930,9	$Z_C$	$6,6 \cdot 10^5$
$D_{ocssi}$	5,92	$A_{fs}$	7857,78	$E_{lb}$	11,55	$C_{ps}$	32642473,85	$Z_{OM}$	$9,3 \cdot 10^4$
$D_{ocsb}$	7,13	$n_{fd}$	53,60	$E_{wt}$	98,07	$C_{ds}$	19296043,66		
$Re_{ocsf}$	7145254,71	$n_{sd}$	119,11	$E_{lt}$	51,96	$C_{ts}$	51938517,51		

**Tabla 6.7 Resultados para una planta PRO trabajando al 20% del caudal mínimo**

La comparación entre los costes y el consumo o pérdida de energía de la planta al operar con el caudal mínimo del río, se muestran en las figuras 6.6 y 6.7:

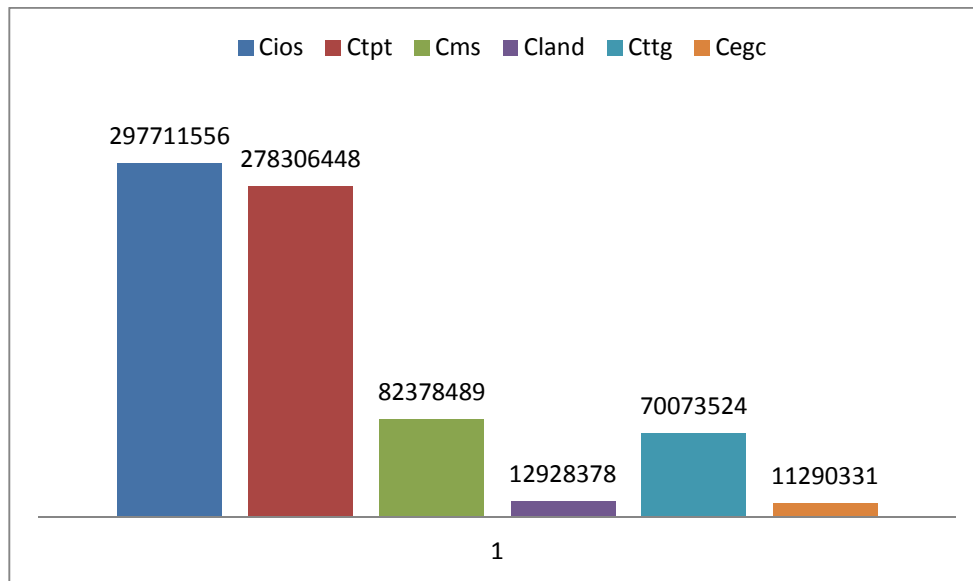


Figura 6.6 Comparación de los costes (€) para una planta PRO trabajando al 20% del caudal mínimo

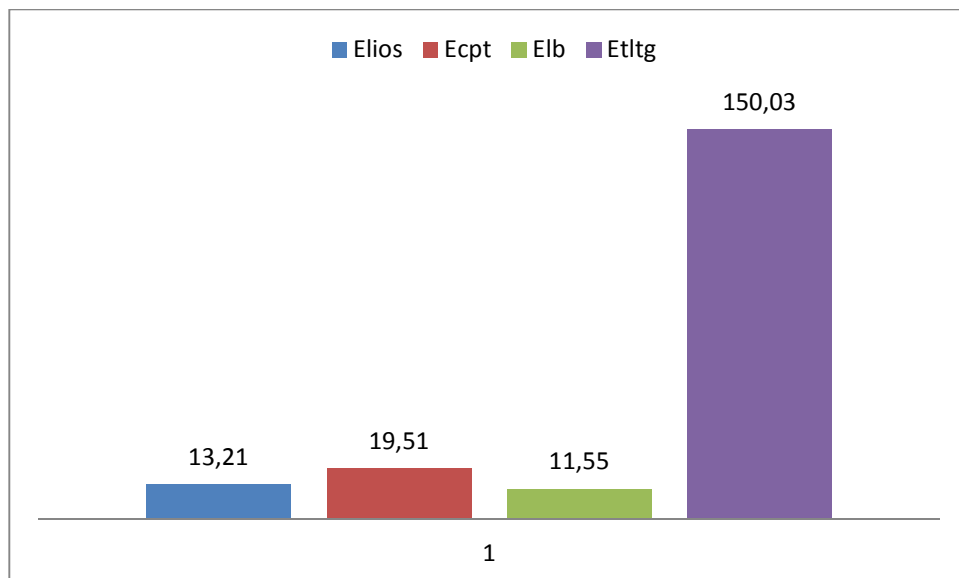


Figura 6.7 Comparación de la energía consumida (GWh/yr) por una planta PRO trabajando al 20% del caudal mínimo

Los resultados obtenidos para el caudal medio ( $411 \text{ m}^3/\text{s}$ ), teniendo en cuenta que en este caso sólo funciona la planta durante 6 meses (181 días), se exponen en las tablas 6.8 y 6.9:

Potencia instalada P (MW)	Coste Capital total PRO C <sub>tp</sub> (€)	Producción Energía Inicial Ep (GWh/y)	Producción Energía Neta Enet (GWh/y)	Z (€/kW·h)
131,32	2,2·10 <sup>9</sup>	570,44	260,27	1,30

**Tabla 6.8 Resultados para una planta PRO trabajando al 20% del caudal medio**

Q <sub>fi</sub>	73,98	Re <sub>ocssi</sub>	19410745,6	L <sub>fd</sub>	801,01	E <sub>ttg</sub>	247,07	C <sub>tp</sub>	545273074,93
Q <sub>fm</sub>	82,20	Re <sub>ocsb</sub>	23373632,9	L <sub>sd</sub>	1780,03	E <sub>tl</sub>	310,16	C <sub>ms</sub>	273574328,9
Q <sub>si</sub>	164,40	f <sub>ocsf</sub>	0,0084	A <sub>m</sub>	54714865,78	C <sub>ft</sub>	205500000	C <sub>ptpe</sub>	182717493,01
Q <sub>sm</sub>	164,40	f <sub>ocssi</sub>	0,0079	n <sub>moduls</sub>	2246970,94	C <sub>st</sub>	319666667	C <sub>pipe</sub>	44203751,66
Q <sub>b</sub>	238,38	f <sub>ocsb</sub>	0,0077	n <sub>pv</sub>	320995,85	C <sub>bt</sub>	463516667	C <sub>ttg</sub>	226921244,67
A <sub>ocsf</sub>	41,10	ΣF <sub>ocsf</sub>	1,91	n <sub>ms</sub>	52,45	C <sub>ios</sub>	988683333	C <sub>land</sub>	142582787,4
A <sub>ocssi</sub>	91,33	ΣF <sub>ocssi</sub>	0,85	MWs	2,50	C <sub>fmf</sub>	115692883,2	C <sub>egc</sub>	3,3·10 <sup>7</sup>
A <sub>ocsb</sub>	132,43	ΣF <sub>ocsb</sub>	0,68	E <sub>lios</sub>	11,94	C <sub>smf</sub>	257095296	C <sub>tp</sub>	2,2·10 <sup>9</sup>
D <sub>ocsf</sub>	7,23	A <sub>ff</sub>	11742,86	E <sub>cpt</sub>	32,14	C <sub>tmf</sub>	372788179,2	Z <sub>C</sub>	1,1·10 <sup>6</sup>
D <sub>ocssi</sub>	10,78	A <sub>fs</sub>	26095,24	E <sub>lb</sub>	19,01	C <sub>ps</sub>	108403819,92	Z <sub>OM</sub>	1,6·10 <sup>5</sup>
D <sub>ocsb</sub>	12,99	n <sub>fd</sub>	178,00	E <sub>wt</sub>	161,51	C <sub>ds</sub>	64081075,81		
Re <sub>ocsf</sub>	13021124,02	n <sub>sd</sub>	395,56	E <sub>lt</sub>	85,57	C <sub>ts</sub>	172484895,73		

**Tabla 6.9 Resultados para una planta PRO trabajando al 20% del caudal medio**

Los resultados comparativos de los costes y la energía perdida o consumida por la planta, al operar con el caudal medio anual del río, se muestran en las figuras 6.8 y 6.9:

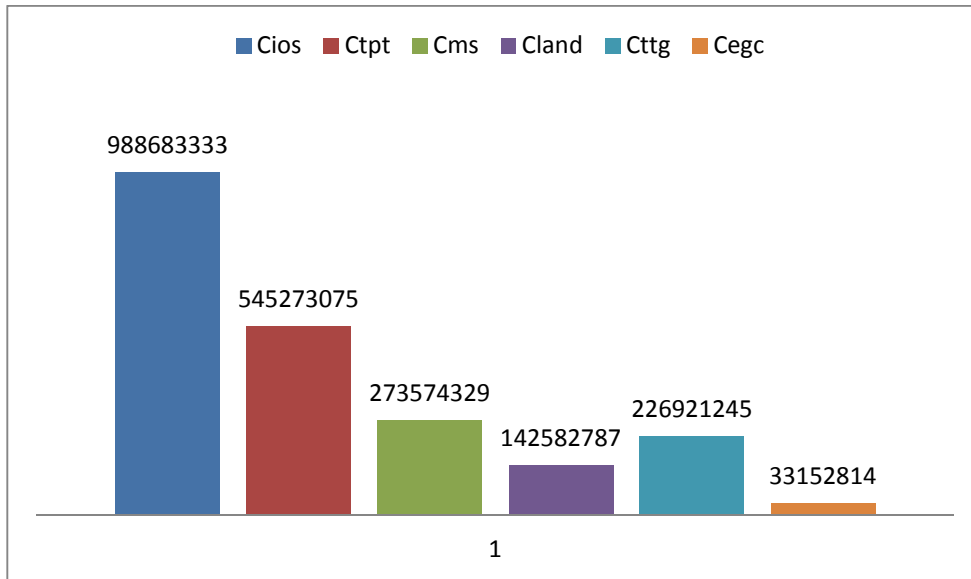


Figura 6.8 Comparación de los costes (€) para una planta PRO trabajando al 20% del caudal medio

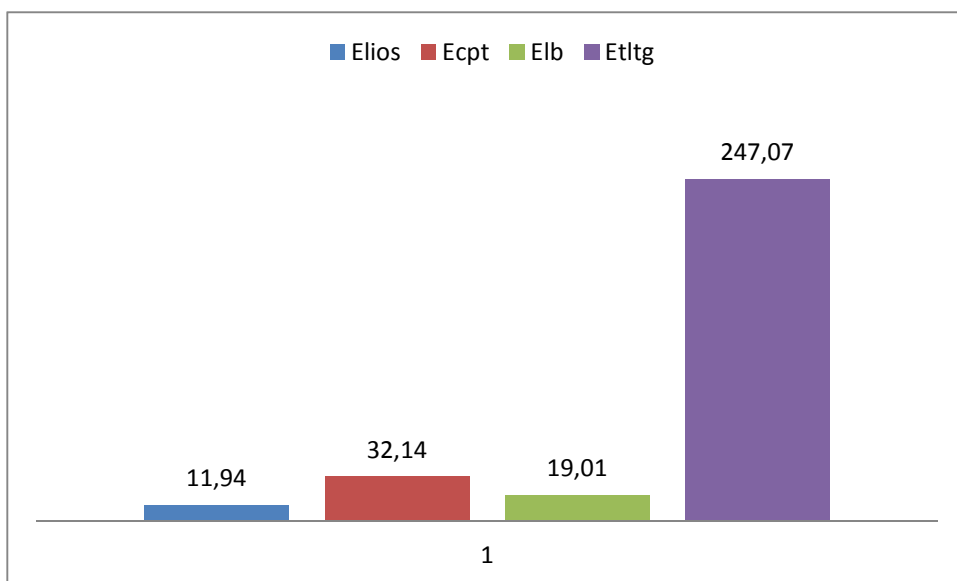


Figura 6.9 Comparación de la energía consumida (GWh/yr) por una planta PRO trabajando al 20% del caudal medio

Por último en este apartado, se exponen en las tablas 6.10 y 6.11, los resultados obtenidos al operar con el caudal máximo del río Ebro (1382,31 m<sup>3</sup>/s), pero sólo durante el mes de abril (30 días).

Potencia instalada P (MW)	Coste Capital total PRO C <sub>tp</sub> (€)	Producción Energía Inicial Ep (GWh/y)	Producción Energía Neta Enet (GWh/y)	Z (€/kW·h)
441,65	7,5·10 <sup>9</sup>	317,99	148,11	7,75

**Tabla 6.10 Resultados para una planta PRO trabajando al 20% del caudal máximo**

Q <sub>fi</sub>	248,82	Re <sub>ocssi</sub>	35597871,6	L <sub>fd</sub>	2694,04	E <sub>ttg</sub>	137,73	C <sub>tp</sub>	787926762,05
Q <sub>fm</sub>	276,46	Re <sub>ocsb</sub>	42865513,8	L <sub>sd</sub>	5986,75	E <sub>tl</sub>	169,87	C <sub>ms</sub>	920108346,8
Q <sub>si</sub>	552,92	f <sub>ocfsi</sub>	0,0084	A <sub>m</sub>	184021669,4	C <sub>ft</sub>	691155000	C <sub>ptpe</sub>	614530943,46
Q <sub>sm</sub>	552,92	f <sub>ocssi</sub>	0,0079	n <sub>moduls</sub>	7557202,91	C <sub>st</sub>	1075130000	C <sub>pipe</sub>	150479605,31
Q <sub>b</sub>	801,74	f <sub>ocsb</sub>	0,0077	n <sub>pv</sub>	1079600,42	C <sub>bt</sub>	1558938500	C <sub>ttg</sub>	765010548,77
A <sub>ocfsi</sub>	138,23	ΣF <sub>ocfsi</sub>	1,04	n <sub>ms</sub>	176,41	C <sub>ios</sub>	3325223500	C <sub>land</sub>	1612851404
A <sub>ocssi</sub>	307,18	ΣF <sub>ocssi</sub>	0,46	MWs	2,50	C <sub>fmf</sub>	64493055,36	C <sub>egc</sub>	1,1·10 <sup>8</sup>
A <sub>ocsb</sub>	445,41	ΣF <sub>ocsb</sub>	0,37	E <sub>lios</sub>	3,62874952	C <sub>smf</sub>	143317900,8	C <sub>tp</sub>	7,5·10 <sup>9</sup>
D <sub>ocfsi</sub>	13,27	A <sub>ff</sub>	39494,57	E <sub>cpt</sub>	17,91	C <sub>tmf</sub>	207810956,2	Z <sub>C</sub>	6,8·10 <sup>6</sup>
D <sub>ocssi</sub>	19,78	A <sub>fs</sub>	87765,71	E <sub>lb</sub>	10,60	C <sub>ps</sub>	364592905,87	Z <sub>OM</sub>	9,5·10 <sup>5</sup>
D <sub>ocsb</sub>	23,81	n <sub>fd</sub>	598,67	E <sub>wt</sub>	90,03	C <sub>ds</sub>	215522900,02		
Re <sub>ocfsi</sub>	23879778,24	n <sub>sd</sub>	1330,39	E <sub>lt</sub>	47,70	C <sub>ts</sub>	580115805,89		

**Tabla 6.11 Resultados para una planta PRO trabajando al 20% del caudal máximo**

En las figuras 6.10 y 6.11 se puede observar el impacto que tienen los distintos costes de la planta, así como las pérdidas o consumo energético de la misma:

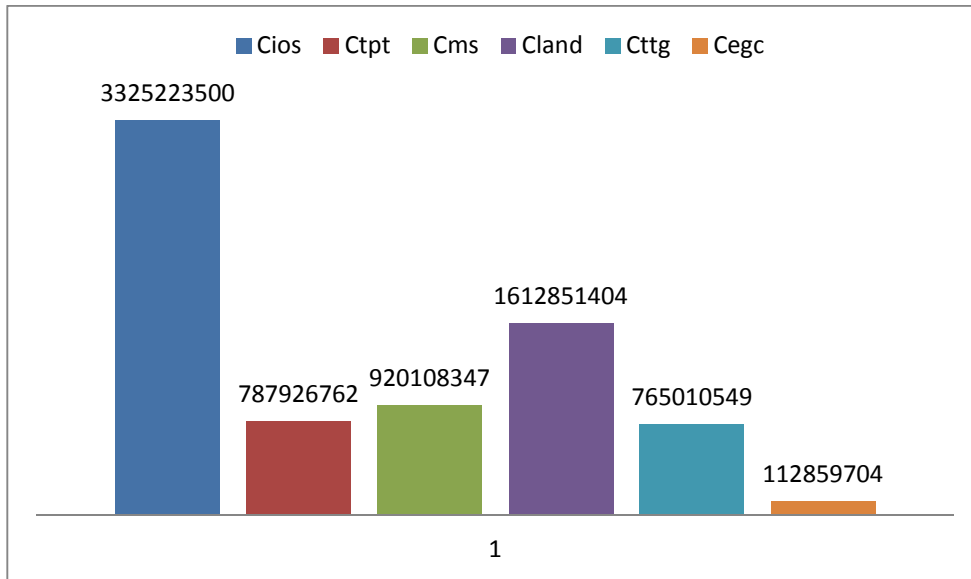


Figura 6.10 Comparación de los costes (€) para una planta PRO trabajando al 20% del caudal máximo

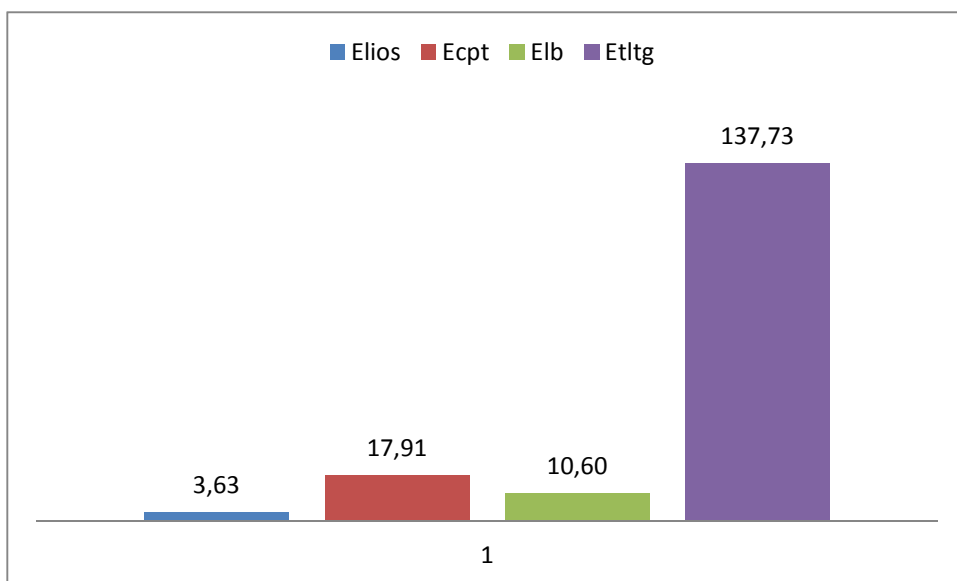


Figura 6.11 Comparación de la energía consumida (GWh/yr) por una planta PRO trabajando al 20% del caudal máximo

De los resultados obtenidos se puede comprobar que el hecho de aumentar el caudal de operación, al reducir las horas de funcionamiento de la planta PRO, eleva significativamente el precio del kWh si se compara con la operación a caudal mínimo durante todo el año, al trabajar con el caudal máximo sólo durante un mes. Aún así, el precio del kWh para el caudal mínimo sigue siendo muy elevado (0,76 €/kWh) en comparación con el precio de la energía en España.

Otro dato a resaltar es el aumento del diámetro de las tuberías que habría que usar para la captación y la descarga de agua, pasando de tuberías con diámetros de entre 3-7 metros para el caudal mínimo, a 13-24

metros para el caudal máximo, lo cual resulta inviable. Una solución que se podría encontrar es usar varias torres de captación en lugar de una sola, lo que dividiría el caudal y reduciría el diámetro de las tuberías, pero conllevaría la construcción de más de una torre en el río Ebro y en el mar Mediterráneo.

En cuanto a la obtención de energía neta, es interesante estudiar los resultados obtenidos, ya que los resultados de energía neta obtenidos para los caudales máximo y mínimo son casi iguales. Sin embargo, existe un máximo de energía neta si se opera con el caudal medio. Esto significa, que la relación entre el caudal de trabajo y la energía neta no es lineal.

En cuanto a la comparación de los costes, se puede observar que cuando se opera con el caudal mínimo y medio del río los costes  $C_{ios}$  (captación/descarga) y  $C_{tpt}$  (pretratamiento) suponen más del 70% del coste total. Asimismo, el consumo de energía debido a la transmisión y generación de energía ( $E_{ttg}$ ) supone el 80% del total, por lo que habría que estudiar qué variables se podrían modificar con el fin de disminuir dichos valores.

Cabe destacar el caso del coste del terreno en relación con la variación de los caudales, ya que se observa claramente que aumenta conforme se aumenta el caudal del río, que pasa de ocupar el quinto lugar respecto del coste total, al trabajar con el caudal mínimo y medio, a ocupar el segundo lugar al operar con el caudal máximo del río.

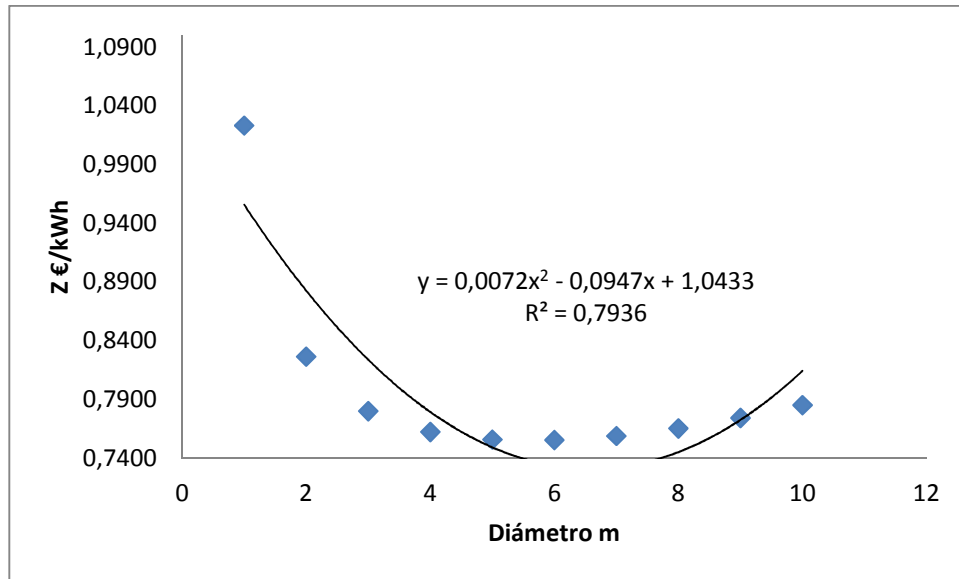
Por último, se puede resaltar que el coste total de la instalación de la planta PRO varía de un coste total de  $7,5 \cdot 10^8$  para el caudal mínimo a un coste total de  $7,5 \cdot 10^9$  para el caudal máximo.

### 6.3 Análisis de la planta PRO en función del sistema de captación y descarga.

Como se ha visto en los apartados anteriores, el coste del sistema de captación y descarga de la planta PRO es el que tiene mayor impacto frente al coste total de capital.

Este impacto puede verse en la figura 6.12, en la que se ha representado el precio del kWh en función de un hipotético diámetro de tubería, en la que se puede comprobar que existe un mínimo en el precio del kWh en función del mismo, en el entorno de 6,5 m con un precio muy elevado de la energía.





**Figura 6.12 Precio del kWh en función de las propiedades del sistema de captación (diámetro hipotético)**

Obviamente, las magnitudes de las tuberías que optimizan el sistema de captación y descarga hacen que el diseño de estos sistemas se considere un problema de Ingeniería Civil que queda fuera del alcance de este trabajo, al tenerse que considerar y estudiar alternativas de canalización de estas corrientes, para transportar y descargar el agua de la planta PRO.

Con todo, con las hipótesis planteadas, en esta ubicación el precio de la energía obtenida en la planta estaría muy por encima (del orden de 10 veces) del precio ideal de la energía en España (OMIP, s.f.).

## 7 CONCLUSIONES

*Un inventor es un hombre que pregunta "¿Por qué?"  
al Universo y no permite que nada se interponga entre  
la respuesta y su mente.  
- Ayn Rand -*

Se ha realizado un estudio técnico-económico de una planta PRO ubicada en el polígono industrial La Venta Nova, en la provincia de Tarragona. Se ha estimado que la instalación de dicha planta, en dicha ubicación y con los medios tecnológicos disponibles actualmente, no sería viable. El coste de venta de la energía es superior a 0,70 €/kWh, mientras que en España el coste está alrededor de 0,05 €/kWh (OMIP, s.f.).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el punto anterior, cabe resaltar que en cuanto al coste de capital total, los procesos de captación y descarga y el pretratamiento suman más del 70% del coste total, mientras que el sistema de membrana, que en un principio se podría entender como uno de los puntos clave del sistema económicamente hablando, no supone un fuerte impacto con respecto al total (aproximadamente un 10%). En lo que respecta al consumo de energía, se comprueba que existe un punto de mayor conflicto, el sistema de generación y transmisión de energía, ya que este proceso por si solo supone un coste energético del 80%.

De los supuestos prácticos realizados en el punto anterior, se desprenden las siguientes conclusiones particulares:

1. El coste del sistema de captación y descarga es el que supone un mayor impacto sobre el coste total de capital. Las posibles soluciones a este problema podrían ser: un nuevo sistema de captación, o bien, una nueva ubicación de la planta, reduciendo así las distancias tanto de carga como de descarga de los corrientes. Habría que analizar cuidadosamente este punto para intentar abaratar los costes totales de la planta.
2. La magnitud de las tuberías que optimizan el sistema de captación y descarga hacen que el diseño de estos sistemas se considere un problema de Ingeniería Civil que queda fuera del alcance de este trabajo, al tenerse que considerar y estudiar alternativas de canalización de estas corrientes, para transportar y descargar el agua de la planta PRO.
3. El pretratamiento supone un coste muy elevado. Además, se ha de tener en cuenta que este punto es el que crea un mayor impacto a nivel medio ambiental, ya que es en este paso donde se usan una mayor cantidad de productos químicos para adecuar la calidad de las corrientes de agua con las que se va a operar. Sería interesante estudiar las distintas opciones que existen y comprobar cuáles suponen un menor impacto tanto

económico como ambiental.

4. El sistema de generación y transmisión de energía supone un gran coste energético, el mayor de la planta (aproximadamente el 25% del consumo total de energía del proceso). Se debe principalmente a la eficiencia de la turbina y las bombas, por lo que la única solución con respecto a este punto sería comprobar si existen actualmente otras turbinas y bombas con mayor eficiencia que las expuestas en este trabajo.
5. El sistema de membranas, a pesar de ser uno de los puntos clave del sistema PRO, no tiene un gran impacto sobre el coste de la planta ni sobre el consumo energético. Aún así, se considera interesante realizar un estudio de los actuales sistemas de membrana, para comprobar si se ha mejorado la densidad energética y se ha abaratado los costes de venta de dichas membranas.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Achilli, A. & Childress, A., 2010. Pressure retarded osmosis: From the vision of Sidney Loeb to the first prototype installation. Review. *Desalination*, Issue 261, pp. 205-211.
- Achilli, A. y otros, 2014. Experimental results from RO-PRO: a next generation system for low-energy desalination. *Environmental Science & Technology*, Issue 48, pp. 6437-6443.
- Achilli, A., Tzahi, Y. & Childress, A., 2009. Power generation with pressure retarded osmosis: an experimental and theoretical investigation. *Journal of Membrane Science*, Issue 343, pp. 42-52.
- Acosol, s.f. *Descripción técnica de la desaladora de Marbella*. [En línea] Available at: <https://www.acosol.es/index.php/infraestructuras>
- Acosol, s.f. *Esquema de la Desaladora de Marbella – Costa del Sol occidental*. [En línea] Available at: <https://www.acosol.es/index.php/infraestructuras>
- Aggidis G.A., L. E. R. R. H. D., 2010. The costs of small-scale hydro power production: Impact on the development of existing potential. Issue 35.
- Akafor, s.f. *Configuración de membranas*. [En línea] Available at: <https://www.akafor.com/bilgimerkezi/membran-konfigurasyonu>
- Anon., s.f. <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/calsodaash8.pdf>. [En línea].
- Anon., s.f. [www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis\\_procesos/tema5.pdf](http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis_procesos/tema5.pdf). [En línea] Available at: [www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis\\_procesos/tema5.pdf](http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis_procesos/tema5.pdf)
- ASTM, 2002. *Standard test method for silt density index (SDI)*. EEUU: s.n.
- Bui, N.-N. & McCutcheon, J., 2014. Nanofiber supported thin-film composite membrane for pressure-retarded osmosis. *Environmental Science & Technology*, Issue 48, pp. 4129-4136.
- Castillo, L. D., 2003. *El fenómeno mágico de la ósmosis*. México D.F.: Fondos de Cultura Económica.
- Cath, T., Childress, A. & Elimelech, M., 2006. Forward osmosis: principles, applications, and recent developments. *Journal of Membrane Science*, Issue 281, pp. 70-87.
- Cath, T. y otros, 2005. Membrane contactor processes for wastewater reclamation in space. I. Direct osmotic concentration as pretreatment for reverse osmosis. *Journal of Membrane Science*, Issue 257, pp. 85-98.
- Christensen T.H., 2011. *Solid Waste Technology & Management*. s.l.:A John Wiley and Sons, Ltd., Publication.
- Colomina, J., 2016. *Diseño de una planta desalinizadora con sistema de osmosis inversa para producir 20000 m<sup>3</sup>/día*. Valencia: s.n.
- elaguapotable.com, s.f. [En línea] Available at: <http://www.elaguapotable.com/decantacion.htm>
- Grundfos, S., 2002. 8. Chemical treatment. Issue 74-75.
- Grundfos, S., 2002. *Pumps in water treatment*. Denmark: Grundfos Technical Documentation.
- Han, G. & Chung, T.-S., 2014. Robust and high performance pressure retarded osmosis hollow fiber membranes for osmotic power generation. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, Issue 60, pp. 1107-1119.
- Han, G., S. Zhang, X. L. & Chung, T.-S., 2013. High performance thin film composite pressure retarded osmosis (PRO) membranes for renewable salinity gradient energy generation. *Journal of Membrane Science*, Issue 440, pp. 108-121.
- He, W., Wang, Y., Sharif, A. & Shaheed, M. H., 2014. Thermodynamic analysis of a standalone reverse osmosis desalination system powered by pressure retarded osmosis. *Desalination*, Issue 352, pp. 27-37.

- <http://eportal.mapama.gob.es/BoleHWeb/>, 2019. <http://eportal.mapama.gob.es/BoleHWeb/>. [En línea].
- <http://www.saicaebro.com/redalerta/ficha.php?estacion=970>, 2019.  
<http://www.saicaebro.com/redalerta/ficha.php?estacion=970>. [En línea].
- <https://www.chemengonline.com>, s.f. [En línea].
- <https://www.interempresas.net>, s.f. <https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/148004-La-tecnologia-del-pipe-jacking-Ventajas-sobre-los-tuneles-de-dovelas-de-mediano-diametro.html>. [En línea]  
Available at: <https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/148004-La-tecnologia-del-pipe-jacking-Ventajas-sobre-los-tuneles-de-dovelas-de-mediano-diametro.html>
- Kim, J., Park, M., Snyder, S. & Kim, J.-H., 2013. Reverse osmosis (RO) and pressure retarded osmosis (PRO) hybrid processes: model-based scenario study. *Desalination*, Issue 322, pp. 121-130.
- Kim, Y. & Elimelech, M., 2013. Potential of osmotic power generation by pressure retarded osmosis using seawater as feed solution: analysis and experiments. *Journal of Membrane Science*, Issue 429, pp. 330-337.
- Lattemann, S. & Höpner, T., 2008. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, Issue 220, pp. 1-15.
- Lee, K., Baker, R. & Lonsdale, H., 1981. Membrane for power generation by pressure retarded osmosis. *Journal of Membrane Science*, Issue 8, pp. 141-171.
- Littrel, L., 2016. *Energy recovery in desalination: Returning alternative water supplies to consideration*, San Leandro: ERI INC..
- Loeb, S., 1976. Production of energy from concentrated brines by pressure-retarded osmosis, I. Preliminary technical and economic correlations. *Journal of Membrane Science*, Issue 1, pp. 49-63.
- Loeb, S., 1998. Energy production at the Dead Sea by pressure-retarded osmosis: challenge or chimera?. *Desalination*, Issue 120, pp. 247-262.
- Loeb, S., Hessen, F. V. & Shahaf, D., 1976. Production of energy from concentrated brines by pressure-retarded osmosis, II. Experimental results and projected energy costs. *Journal of Membrane Science*, Issue 1, pp. 249-269.
- Loeb, S. & Mehta, G., 1979. A two coefficient water transport equation for pressure-retarded osmosis. *Journal of Membrane Science*, Issue 4, pp. 351-362.
- Loeb, S. & Norman, R., 1975. Osmotic power plants. *Science*, Issue 189, pp. 654-655.
- MacHarg, J. P., 2007. *Axial piston-pressure exchanger development program*. Las Vegas, s.n.
- McCutcheon, J. & Elimelech, M., 2008. Influence of membrane support layer hydrophobicity on water flux in osmotically driven membrane processes. *Journal of Membrane Science*, Issue 318, pp. 458-466.
- Mehta, G. & Loeb, S., 1978. Internal polarization in the porous substructure of a semipermeable membrane under pressure-retarded osmosis. *Journal of Membrane Science*, Issue 4, pp. 261-265.
- Mehta, G. & Loeb, S., 1979. Performance of permasep B-9 and B-10 membranes in various osmotic regions and at high osmotic pressures. *Journal of Membrane Science*, Issue 4, pp. 335-349.
- Moreno, A., 2011. [www.mailxmail.com](http://www.mailxmail.com). [En línea]  
Available at: [www.mailxmail.com/curso-agua-desalacion-2-4/captacion-agua-1-2](http://www.mailxmail.com/curso-agua-desalacion-2-4/captacion-agua-1-2)
- MSPS, M. d. S. y. P. S., 2009. *Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano*, Madrid: s.n.
- Naghiloo, A., Abbaspour, M., Mohammadi-Ivatloo, B. & Bakhtari, K., 2015. GAMS based approach for optimal design and sizing of a pressure retarded osmosis power plant in Bahmanshir river of Iran. *Renewable and sustainable energy reviews*, Issue 52, pp. 1559-1565.
- Nemerow, N., 1977. *Aguas residuales industriales: Teorías, aplicaciones y tratamiento*. Madrid: H. Blume.
- Nollet, J., 1748. *Leçons de physique experimentale*. París: Hippolyte-Louis Guerin and LouisFrancios Delatour.
- OMIP, s.f. [omip.pt](http://omip.pt). [En línea]

Available at: [omip.pt](http://omip.pt)

Palacin, L., Tadeo, F., Prada, C. D. & Touati, K., 2013. Evaluation of the recovery of osmotic energy in desalination plants by using pressure retarded osmosis. *Desalination and Water Treatment*, Issue 51, pp. 360-365.

Pattle, R., 1954. Production of electric power by mixing fresh and salt water in the hydroelectric pile. *Nature*, Issue 174, p. 660.

Rodríguez, S., 2016. *Ingeniería básica de planta desaladora de agua de mar de 40.000 m<sup>3</sup> /día de capacidad*. Sevilla: s.n.

S.E. Skilhagen, J. D. R. A., 2008. Osmotic power-power production based on the osmotic pressure difference between waters with varying salt gradients. *Desalination*, Issue 220, pp. 476-482.

Sánchez-Barriga, M. & Pita, E., 2016. Estructuras de toma de agua.

Schiestel, T. y otros, 2012. *Cellulose acetate membranes with an optimized internal structure for pressure retarded osmosis*, in: *Proceedings of the 3rd Osmosis Membrane Summit*. Barcelona: Statkraft.

School, T. U. W. S., s.f. *Hydroelectric power: How it Works*. [En línea] Available at: <https://water.usgs.gov/edu/hyhowworks.html>

Sharif, A., Merdaw, A., Aryafar, M. & Nicoll, P., 2014. Theoretical and experimental investigations of the potential of osmotic energy for power production. *Membranes*, Issue 4, pp. 447-468.

Skilhagen\*, S. E., Dugstad, J. E. & Aaberg, R. J., 2008. Osmotic power — power production based on the osmotic pressure difference between waters with varying salt gradients. *Desalination*, Issue 220, pp. 476-482.

Skilhagen, S., 2010. Osmotic power a new, renewable energy source. *Desalination*, Issue 15, pp. 271-278.

Skråmestø\*, Ø. S., Skilhagen, S. E. & Nielsen, W. K., s.f. *Power Production based on Osmotic Pressure*. [En línea]

Available at: [https://www.statkraft.com/globalassets/old-contains-the-old-folder-structure/documents/waterpower\\_xvi - power production based on osmotic pressure tcm21-4795.pdf](https://www.statkraft.com/globalassets/old-contains-the-old-folder-structure/documents/waterpower_xvi - power production based on osmotic pressure tcm21-4795.pdf)

Song, X., Liu, Z. & Sun, D., 2013. Energy recovery from concentrated seawater brine by thin-film nanofiber composite pressure retarded osmosis membranes with high power density. *Energy & Environmental Science*, Issue 6, pp. 1199-1210.

Staalstrom, A. & Gitmark, J., 2012. *Environmental Impacts by Running an Osmotic Power Plant*, Oslo: Norwegian Institute for Water Research, Report no. 6307-2012, Prepared for Statkraft Development AS.

Starbard, N., 2009. *Beverage Industry Microfiltration*. Iowa: John Wiley & Sons.

Straub, A., Yip, N. & Elimelech, M., 2014. Raising the Bar: increased hydraulic pressure allows unprecedented high power densities in Pressure-Retarded Osmosis. *Environmental Science & Technology*, Issue 1, pp. 55-59.

Touati, K., Hänel, C., Tadeo, F. & Schiestel, T., 2015. Effect of the feed and draw solution temperatures on PRO performance: theoretical and experimental study. *Desalination*, Issue 365, pp. 182-195.

Touati, K. & Tadeo, F., 2016. Study of the Reverse Salt Diffusion in pressure retarded osmosis: influence on concentration polarization and effect of the operating conditions. *Desalination*, Issue 389, pp. 171-186.

Walday, M. y otros, 2011. *Monitoring of the Outer Oslofjord (in Norwegian)*, Oslo: Norwegian Institute for Water Research, Report no. 6184-2011, Prepared for Statkraft Development AS.

Widjojo, N. y otros, 2011. The role of sulphonated polymer and macrovoid-free structure in the support layer for thinfilm composite (TFC) forward osmosis (FO) membranes. *Journal of Membrane Science*, Issue 383, pp. 214-223.

www.aguasistec.com, s.f. <http://www.aguasistec.com/filtro-de-carbon-activado.php>. [En línea] Available at: <http://www.aguasistec.com/filtro-de-carbon-activado.php>

Yip, N. y otros, 2011. Thin-film composite pressure retarded osmosis membranes for sustainable power generation from salinity gradients. *Environmental Science & Technology*, Issue 45, pp. 4360-4369.

