

Ingeniería en tecnologías industriales
2016-2017

Trabajo Fin de Grado

“ESTUDIO OPERACIONAL Y DISEÑO DE UNA PLANTA OPR DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA”

Alejandro Rodríguez González

Tutor

Javier Villa Briongos

Leganés, Octubre de 2017



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 RESUMEN Y OBJETIVOS	9
1.2 MOTIVACIÓN	9
1.3 ENERGÍA AZUL	11
1.3.1 <i>TEORÍA OSMOSIS</i>	12
1.3.2 <i>PRINCIPALES PROCESOS INDUSTRIALES BASADOS EN LA OSMOSIS</i>	13
1.3.3 <i>PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA</i>	15
1.3.4 <i>VENTAJAS Y DESVENTAJAS</i>	17
1.4 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL DESARROLLO DE OPR	17
1.4.1 <i>PRIMERA CENTRAL OPR DE CICLO ABIERTO: STARKRAFT</i>	22
1.4.2 <i>MODELO DE CENTRAL DE CICLO CERRADO: MOTOR DE CALOR OSMÓTICO</i>	23
1.4.3 <i>OTRAS APLICACIONES DE OPR FUERA DE LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA</i>	24
2. ESTUDIO DE LA LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA	27
2.1 FACTORES NATURALES IMPLICADOS	27
2.1.1 <i>SALINIDAD DEL AGUA DEL MAR</i>	27
2.1.2 <i>CAUDAL DEL AGUA DEL RÍO</i>	30
2.1.3 <i>TEMPERATURA</i>	30
2.2 EMPLAZAMIENTO ELEGIDO: DESEMBOCADURA DEL RÍO EBRO	32
2.2.1 <i>CAUDAL DISPONIBLE EN LA ESTACIÓN EBRO-TORTOSA</i>	33
2.2.2 <i>SALINIDAD EN EL DELTA DEL EBRO</i>	34
2.2.3 <i>TEMPERATURA EN DELTEBRE</i>	35
2.3 MÁXIMA POTENCIA OBTENIBLE EN EL EMPLAZAMIENTO SELECCIONADO	35
3- ESTUDIO Y ADIMENSIONAMIENTO DE LA CENTRAL	37
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA	37
3.1.1 <i>ESQUEMA DE PRESIONES</i>	37
3.1.2 <i>ESQUEMA DE CAUDALES</i>	38
3.1.3 <i>POTENCIA GENERADA</i>	39
3.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES DE LA CENTRAL	40
3.2.1 <i>MEMBRANAS</i>	40
3.2.1.1 <i>TIPOS DE MEMBRANA</i>	40
3.2.1.2 <i>TIPOS DE MÓDULO DE MEMBRANA</i>	41
3.2.1.3 <i>MODOS DE FILTRACIÓN</i>	44
3.2.1.4 <i>ANÁLISIS DE LOS FACTORES DETERMINANTES DE LAS MEMBRANAS PARA APLICACIONES PRO</i>	44
3.2.1.5 <i>MEMBRANAS EN APLICACIONES PRO</i>	47
3.2.1.6 <i>MEMBRANAS ESCOGIDAS PARA NUESTRA CENTRAL</i>	48
3.2.1.7 <i>ENSUCIAMIENTO, FILTRADO Y LIMPIEZA DE MEMBRANAS</i>	50
3.2.2 <i>INTERCAMBIADOR DE PRESIÓN</i>	55
3.2.3 <i>BOMBA ELEVADORA DE PRESIÓN</i>	57

3.2.4 TURBINA	58
4- ESQUEMA Y PARÁMETROS DEFINITIVOS DE LA CENTRAL	63
5- IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIAL	67
5.1 IMPACTO AMBIENTAL.....	67
5.1.1 IMPACTO AMBIENTAL EN EL MAR	67
5.1.2 IMPACTO AMBIENTAL EN EL RÍO	69
5.2 IMPACTO SOCIAL	69
6- NORMATIVA RELACIONADA	71
7- ANÁLISIS ECONÓMICO	73
8- CONCLUSIONES	77
ANEXO 1: DESARROLLO REALIZADO POR LEE	79
ANEXO 2: CONTINUACIÓN DE ACHILLI DEL DESARROLLO DE LEE	81
ANEXO 3: HOJA DE CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA KSB	83
BIBLIOGRAFÍA.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 OBJETIVOS DE REDUCCIÓN DE CO ₂ A PARTIR DEL COP21 EN LOS DISTINTOS SECTORES DE CONSUMO ENERGÉTICO. ADAPTADO DE INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016 [1].	10
FIGURA 1.2 PORCENTAJE DE CONSUMO DE LAS DISTINTAS FORMAS DE OBTENCIÓN DE ENERGÍA PARA LA GENERACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EN LOS PAÍSES DE LA OECD ENTRE ENERO-FEBRERO DE 2017. MODIFICADO DE INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017 [2]	11
FIGURA 1.3 ESQUEMA DEL PROCESO DE OSMOSIS. ELABORACIÓN PROPIA.	12
FIGURA 1.4 ESQUEMA DEL PROCESO DE OSMOSIS DIRECTA. ELABORACIÓN PROPIA	13
FIGURA 1.5 ESQUEMA DEL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA. ELABORACIÓN PROPIA.	14
FIGURA 1.6 ESQUEMA DEL PROCESO DE PRESIÓN POR OSMOSIS RETARDADA. ELABORACIÓN PROPIA.	15
FIGURA 1.7 EFECTO DEL CICLO DEL AGUA PARA APLICACIONES OPR. ADAPTADO DE A.ACHILLI, 2010 [11].	16
FIGURA 1.8 COMPARACIÓN HISTÓRICA DEL NÚMERO DE PUBLICACIONES DE OPR RESPECTO AL PRECIO DE, PETRÓLEO. ADAPTADO DE [12].	18
FIGURA 1.9 PRIMER ESQUEMA DE OBTENCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE OPR BASADO EN UN SISTEMA WATERWHEEL. ADAPTADO DE A.ACHILLI, 2010 [11].	19
FIGURA 1.10 CONCENTRACIÓN DE SOLUTO A LO LARGO DE LA MEMBRANA DESTACANDO LOS EFECTOS DE POLARIZACIÓN INTERNA Y EXTERNA QUE OCURREN EN LA MISMA. ELABORACIÓN PROPIA.	20
FIGURA 1.11 ESQUEMA DE LA CENTRAL DE STARKRAFT Y PROPUESTO POR LOEB. MODIFICADO DE [12]	23
FIGURA 1.12 ESQUEMA DEL SISTEMA DE MOTOR OSMÓTICO. ADAPTADO DE [15].	24
FIGURA 1.13 ESQUEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA DE LA CENTRAL DE DESALINIZACIÓN DE FUKUOKA. MODIFICADO DE [12].	25
FIGURA 2.1 INFLUENCIA DE LA SALINIDAD EN LA DENSIDAD DE POTENCIA GENERADA. ELABORACIÓN PROPIA.	29
FIGURA 2.2 MAPA DE SALINIDAD EN LOS DISTINTOS MARES Y OCÉANOS DE LA TIERRA. ADAPTADO DE [24].	30
FIGURA 2.3 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA DENSIDAD DE POTENCIA GENERADA. ELABORACIÓN PROPIA.	31
FIGURA 2.4 MAPA DE SALINIDAD EN LA ZONA CERCANA AL MAR MEDITERRÁNEO [25].	34
FIGURA 3.1 ANÁLISIS ESQUEMATIZADO DE LAS PRESIONES EN LA CENTRAL DE GENERACIÓN OPR. ELABORACIÓN PROPIA.	38
FIGURA 3.2 ANÁLISIS ESQUEMATIZADO DE LOS CAUDALES EN LA CENTRAL DE GENERACIÓN OPR. ELABORACIÓN PROPIA.	39
FIGURA 3.3 MEMBRANA DE TIPO PLANO. ADAPTADO DE ECHNOLOGYREPORT.MECADI.COM.	42
FIGURA 3.4 MEMBRANA DE TIPO ESPIRAL. ADAPTADO DE ECHNOLOGYREPORT.MECADI.COM	42
FIGURA 3.5 MEMBRANA DE TIPO TUBULAR. ADAPTADO DE HTTP://SYNDERFILTRATION.COM	43
FIGURA 3.6 MEMBRANA DE TIPO CAPILAR/FIBRA HUECA. ADAPTADO DE HTTP://SYNDERFILTRATION.COM	44

FIGURA 3.7 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL FACTOR GEOMÉTRICO DE LA MEMBRANA EN LA DENSIDAD DE POTENCIA OBTENIDA. ELABORACIÓN PROPIA.....	46
FIGURA 3.8 CURVAS DE LA DENSIDAD DE POTENCIA IDEAL Y REAL OBTENIDA EN LA MEMBRANA SELECCIONADA EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN EXTERNA APLICADA. ELABORACIÓN PROPIA.	49
FIGURA 3.9 EFICACIA EN LA LIMPIEZA DE MEMBRANAS DE LOS DISTINTOS MÉTODOS HIDRODINÁMICOS. LIMPIEZA FÍSICA, RETROLAVADO OSMÓTICO, RETROLAVADO OSMÓTICO CON PRESIÓN ASISTIDA. ADAPTADO DE [9].	53
FIGURA 3.10 EFICACIA DEL USO DE ANTI-INCrustANTE GENESYS PHO PARA MANTENER EL FLUJO DE AGUA A TRAVÉS DE LA MEMBRANA CONSTANTE [9]	55
FIGURA 3.11 FUNCIONAMIENTO DE UN INTERCAMBIADOR DE PRESIÓN. FUENTE [26].	56
FIGURA 3.12 DISTINTOS MODELOS DE INTERCAMBIADOR DE PRESIÓN DE LA EMPRESA ENERGY RECOVERY.	57
FIGURA 3.13 MAPA PARA LA ELECCIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA SEGÚN EL CAUDAL Y SALTO DE ALTURA MANOMÉTRICO.	60
FIGURA 3.14 TURBINA PELTON HIDRÁULICA DE SIAPRO UTILIZADA EN UNA CENTRAL DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA DE 1 MW: FUENTE: HTTP://EN.HYDRO-ELECTRICITY.EU/	61
FIGURA 4.1 ESQUEMA DE LA CENTRAL CON LOS VALORES NUMÉRICOS DE PRESIÓN Y CAUDAL EN LOS PUNTOS CLAVE. ELABORACIÓN PROPIA.....	64
FIGURA 7.1 EVOLUCIÓN DE LOS BENEFICIOS DE LA CENTRAL EN LOS PRIMEROS CINCUENTA AÑOS DE OPERACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA.....	75
FIGURA A.1 EFECTO DE LA PRESIÓN APLICADA EN LA POTENCIA NETA OBTENIDA POR UNIDAD DE ÁREA	79

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS PRINCIPALES DEL USO DE LA ENERGÍA OSMÓTICA	17
TABLA 2.1 COMPONENTES PRINCIPALES DEL AGUA DE MAR	27
TABLA 2.2 PARÁMETROS ESCOGIDOS PARA ANALIZAR LA INFLUENCIA DE LA SALINIDAD EN LA DENSIDAD DE POTENCIA OBTENIDA.....	28
TABLA 2.3 PARÁMETROS ESCOGIDOS PARA ANALIZAR LA INFLUENCIA DE LA SALINIDAD EN LA DENSIDAD DE POTENCIA OBTENIDA.....	31
TABLA 2.4 CAUDALES MEDIOS EN LA ESTACIÓN DE EBRO-TORTOSA ENTE LOS AÑOS 2000-2013. DATOS OBTENIDOS DE [24].	33
TABLA 3.1 VALORES TÍPICOS DE LA PERMEABILIDAD HIDRÁULICA DE MEMBRANAS SEGÚN LA APLICACIÓN DE LAS MISMAS.	45
TABLA 3.2 MEJORES RESULTADOS OBTENIDOS A ESCALA DE LABORATORIO EN MEMBRANAS DE APLICACIÓN OPR	47
TABLA 3.3 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA MEMBRANA SELECCIONADA PARA NUESTRA CENTRAL OPR	48
TABLA 3.4 PARÁMETROS DE POLARIZACIÓN EXTERNA E INTERNA EN LAS MEMBRANAS SELECCIONADAS PARA NUESTRA CENTRAL OPR	49
TABLA 4.1 PRINCIPALES PARÁMETROS DE LA CENTRAL DE GENERACIÓN OPR DE 1MW UBICADA EN EL EBRO.	65
TABLA 5.1 INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE SALINIDAD EN DISTINTAS ESPECIES MARINAS. DATOS EXTRAÍDOS DE [28].	68
TABLA 7.1 CAPITAL INICIAL NECESARIO PARA LOS COMPONENTES PRINCIPALES DE LA CENTRAL.	74

NOMENCLATURA

Variables físicas:

A	Permeabilidad acuosa	[m/sKPa]
B	Permeabilidad salina	[m/s]
C_D	Concentración del lado de drenaje	[g/L]
C_F	Concentración del lado de alimentación	[g/L]
D	Coeficiente de difusión	[m ² /s]
d_h	Diámetro hidráulico	[m]
J_w	Velocidad de permeado	[m/s]
K	Resistividad del soluto para la difusión en la capa de soporte porosa	[s/m]
k	Coeficiente de transferencia de masa de la solución salada	[m/s]
P_a	Presión atmosférica	[Pa]
P_{dip}	Presión tras el intercambiador de presión	[Pa]
P_r	Presión requerida en la membrana	[Pa]
Q_d	Caudal disponible	[m ³ /s]
Q_{eco}	Caudal ecológico	[m ³ /s]
Q_{min}	Caudal mínimo del río	[m ³ /s]
Q_{memb}	Caudal que circula a través de la membrana	[m ³ /s]
Re	Número de Reynolds	[-]
S	Factor geométrico de la membrana	[m]
Sc	Número de Schmidt	[-]
Sh	Número de Sherwood	[-]
T	Temperatura del proceso	[°C]
t	Espesor de la capa porosa	[m]
ΔP_m	Incremento de presión necesario en la membrana	[Pa]
ε	Porosidad de la membrana	[-]
Π_{D,b}	Presión osmótica de la solución de drenaje en el lado del fluido	[Pa]
Π_{D,m}	Presión osmótica del lado de drenaje en contacto con la membrana	[Pa]
η_{bp}	Rendimiento de la bomba elevadora de presión	[-]
η_{central}	Rendimiento de la central	[-]
η_{ip}	Rendimiento del intercambiador de presión	[-]
η_{turbina}	Rendimiento de la turbina	[-]
τ	Tortuosidad de la membrana	[-]

Abreviaturas:

CHEbro	Confederación hidrográfica del Ebro
CMNUCCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
IEA	Internacional Energy Agency
OD/ FO	Osmosis Directa/ Forward Osmosis
OECD	Organización para la cooperación y desarrollo económico
OI/ RO	Osmosis Inversa/ Reverse Osmosis
OPR/PRO	Osmosis por presión retardada/ Pressure retarded osmosis

1. INTRODUCCIÓN

1.1 RESUMEN Y OBJETIVOS

En este proyecto se ha diseñado una central de producción de energía eléctrica de 1 MW utilizando el método OPR. Esta tecnología aprovecha la energía osmótica para producir energía eléctrica a través del uso de membranas semipermeables. A esta forma de obtención de energía se le ha atribuido el nombre de energía osmótica o energía azul, debido a que su funcionamiento se ha limitado al uso del agua en distintas concentraciones como fluido de trabajo.

En el inicio del proyecto se dará una visión general sobre la energía azul, sus aplicaciones y se describirá el avance de la tecnología OPR a lo largo de la historia.

Posteriormente se analizará cómo influyen los distintos factores naturales como son la salinidad y la temperatura a dicha tecnología. En función de los resultados obtenidos se escogerá un emplazamiento adecuado para la planta de producción.

En el diseño de la central se explicará el funcionamiento de los distintos equipos y sus parámetros principales de operación. Se realizará un estudio más exhaustivo de las membranas semipermeables por ser el elemento de mayor importancia.

Tras ello, se analizará el posible impacto medioambiental de dicha planta en la localización escogida y la aceptación social, planteando soluciones cuando estas sean negativas.

En la última parte del proyecto se estimará el capital necesario de inversión inicial de la planta.

1.2 MOTIVACIÓN

En las últimas décadas el ser humano está padeciendo grandes problemas con el sector energético. El aumento global de la demanda de energía combinada con el mapa energético actual está provocando un aumento notable de la emisión de gases de efecto invernadero.

Por este motivo, desde 1995, se han realizado diversas convenciones de las Naciones Unidas para intentar frenar el cambio climático, las cuales reciben el nombre de Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). En la penúltima convención celebrada en París en 2015 se propusieron unos objetivos con el fin de reducir la emisión de gases relacionados con el efecto invernadero que supondrán un cambio en el mapa energético futuro sin precedentes.

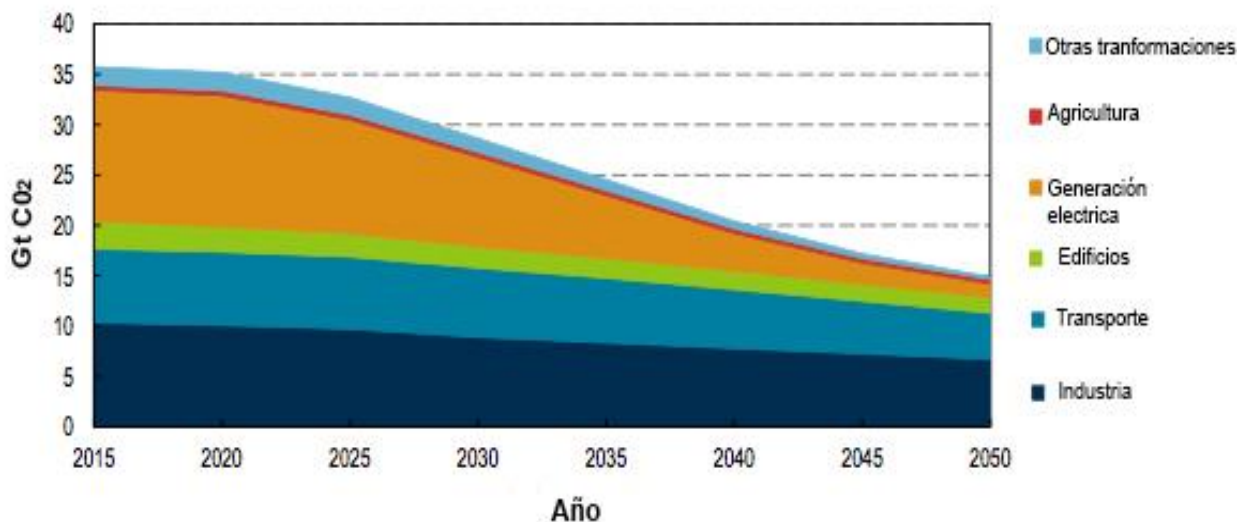


Figura 1.1 Objetivos de reducción de CO₂ a partir del COP21 en los distintos sectores de consumo energético. Adaptado de International Energy Agency, 2016 [1].

Como se puede apreciar en la figura 1.1, entre los años 2015 y 2050 se debe reducir en torno a un 45% las emisiones de CO₂ relacionadas con la producción de energía eléctrica. Para conseguir dicho objetivo, además de los distintos sistemas de captura de CO₂ que se están investigando, serán determinantes la implantación y desarrollo de las distintas fuentes de energías renovables.

El desarrollo de las fuentes de energías renovables está creciendo de manera trascendental en los países desarrollados. Su progreso en estos territorios es de vital importancia, debido a que no solo contribuyen a frenar la contaminación y cumplir con los objetivos de las distintas convenciones comentadas anteriormente, sino que también permiten disminuir la dependencia energética de los productos derivados del petróleo y por tanto un camino de estas naciones hacia el autoabastecimiento energético.

Aunque es cierto que el uso de las energías renovables se ha incrementado en las dos últimas décadas, este sigue siendo insuficiente para cumplir los objetivos de la convención de París. En la figura 1.2, se puede ver como la mayor parte de la electricidad producida en el mundo sigue obteniéndose a partir de combustibles fósiles, por lo que sigue siendo necesario el desarrollo e instalación de plantas producción de energía renovables ya implantadas como pueden ser la eólica,

fotovoltaica e hidráulica, pero también la investigación de otras formas de obtener energía como la que se va a tratar en este trabajo, la energía osmótica, o comúnmente conocida como energía azul.

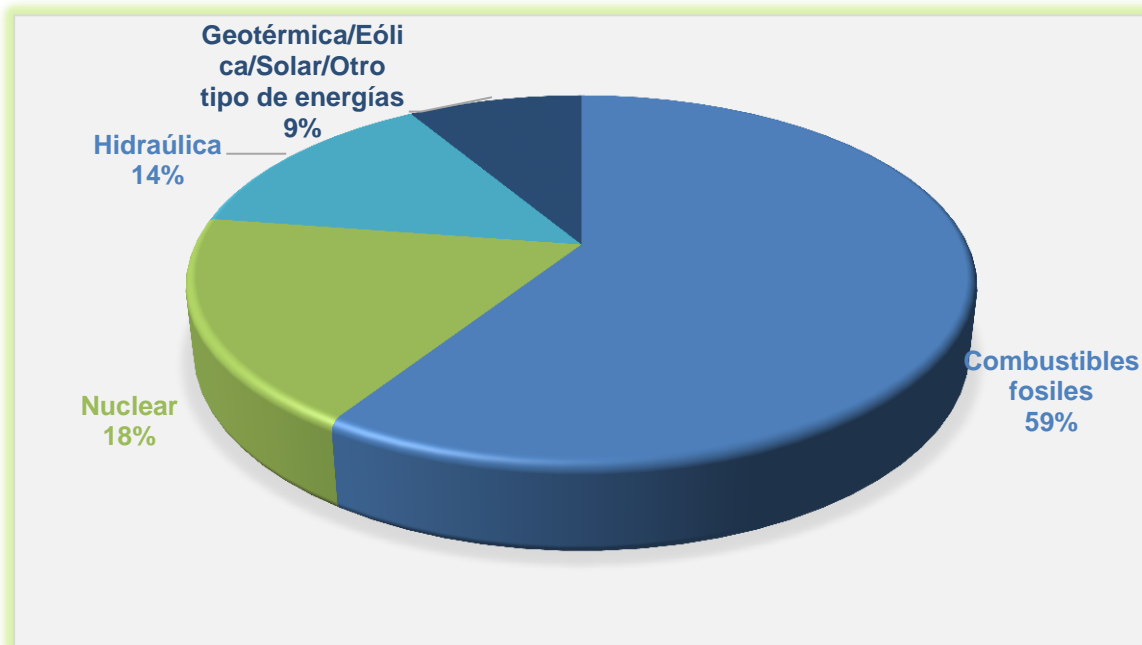


Figura 1.2 Porcentaje de consumo de las distintas formas de obtención de energía para la generación de potencia eléctrica en los países de la OECD entre Enero-Febrero de 2017. Modificado de International Energy Agency, 2017 [2]

1.3 ENERGÍA AZUL

La energía azul principalmente se fundamenta en el principio de la osmosis, un fenómeno físico-químico en el cual se produce un movimiento de moléculas a través de una membrana semipermeable. Dicha membrana separa generalmente dos líquidos con diferentes concentraciones de solutos, los cuales tienen una diferencia de potencial electroquímico entre ellos. Las soluciones para entrar en equilibrio buscarán tener la misma concentración, es decir, ser isotónicas. El disolvente del fluido de menor concentración circulará hacia el de mayor concentración, mientras que las moléculas de soluto intentarán realizar el flujo inverso, de la solución de mayor concentración a la de menor concentración. Estas últimas serán retenidas por la membrana semipermeable que está diseñada para no dejarlas pasar. Este suceso podemos apreciarlo de manera más clara observando la figura 1.3.

Para lograr esta finalidad, este tipo de membrana tiene unos poros lo suficientemente pequeños para permitir que las moléculas de disolvente puedan

circular a través de ella, mientras que impide el paso de las moléculas de soluto. De esta forma se produce el fenómeno consiguiendo el mayor flujo de solvente posible.

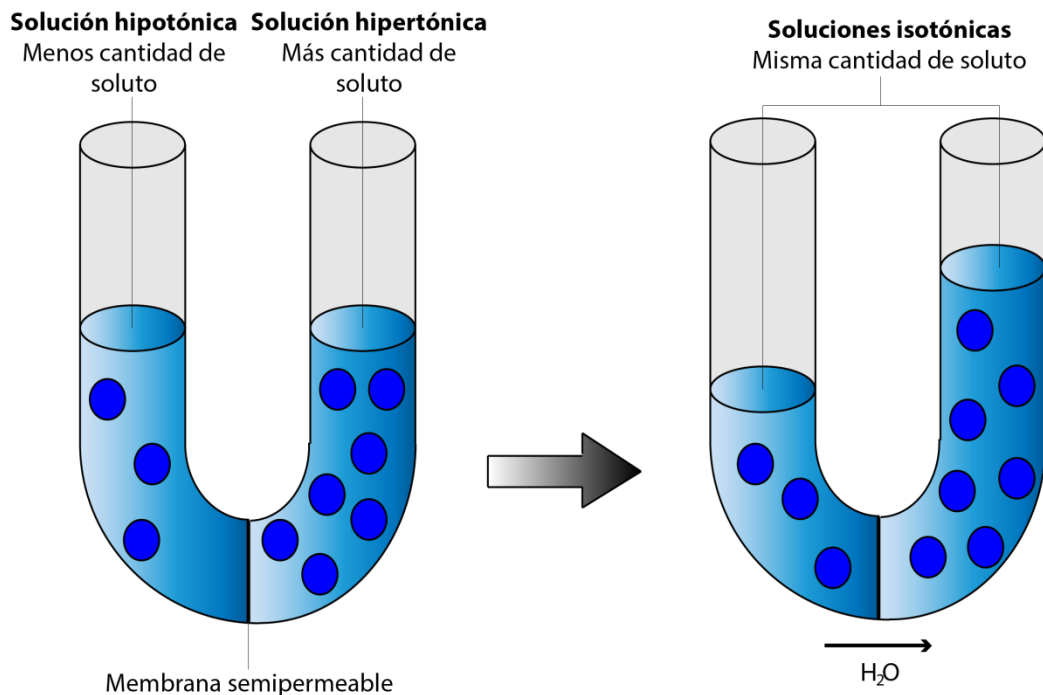


Figura 1.3 Esquema del proceso de osmosis. Elaboración propia

1.3.1 TEORÍA OSMOSIS

La primera teoría sobre la osmosis fue la desarrollada por el químico de origen holandés, Jacobus van't Hoff. Esta teoría parte de la ecuación de los gases ideales y defiende que la presión que habría que ejercer sobre el fluido de alta concentración para parar el flujo de fluido de la zona de baja concentración hacia la zona de alta concentración, conocida como presión osmótica, solo depende de la presión que ejercen las moléculas del soluto, despreciando el efecto de las moléculas de disolvente. Con esta definición se podría decir que la presión osmótica sería la misma que ejercería un gas ideal, el cual ocupara el mismo volumen, y es por lo que se utiliza la ecuación de los gases ideales para el proceso de osmosis:

$$PV = nRT \quad [1]$$

considerando la presión osmótica π y que $c = \frac{n}{V}$ se llega a la siguiente ecuación:

$$\pi = cRT \quad [2]$$

La presión osmótica generada entre dos fluidos de distintas disoluciones sería la diferencia de presiones osmóticas resultantes entre el fluido hipertónico y el hipotónico:

$$\Delta\pi = \pi_{hipertónico} - \pi_{hipotónico} \quad [3]$$

1.3.2 PRINCIPALES PROCESOS INDUSTRIALES BASADOS EN LA OSMOSIS

Los tres principales procesos operacionales que se han desarrollado en torno a la osmosis son:

- Osmosis directa (OD): En inglés conocida como *Forward Osmosis (FO)* consiste en dejar actuar al proceso de la osmosis libremente, no se ejerce ninguna fuerza externa, y por tanto el fluido hipotónico fluye hacia el fluido hipertónico debido a la diferencia de potencial electroquímico entre ambas disoluciones. Se puede observar el proceso en la figura 1.4.

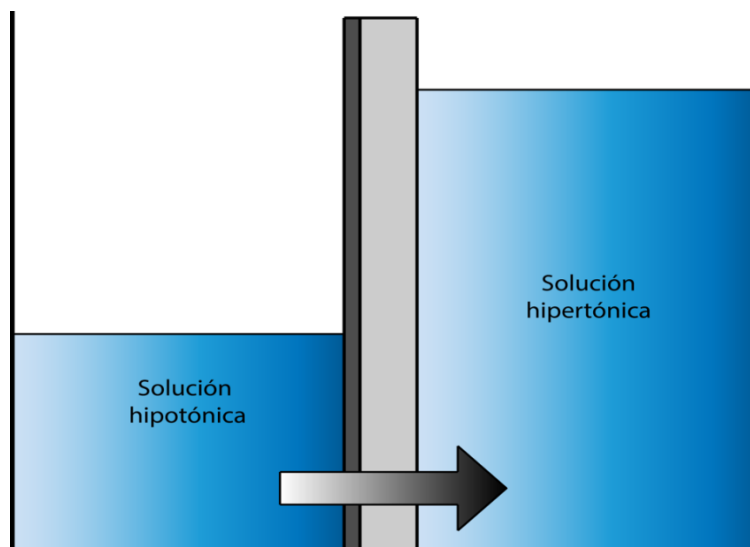


Figura 1.4 Esquema del proceso de osmosis directa. Elaboración propia

- Osmosis inversa (OI): En inglés denominada *Reverse Osmosis (RO)*. Este proceso invierte el flujo que se produciría naturalmente en la ósmosis. Se obtendría un movimiento del fluido que transcurriría desde la disolución hipertónica hacia la hipotónica. Para que este proceso sea físicamente posible, se debe aportar una presión en el lado del fluido hipertónico y esta debe de ser mayor a la diferencia de presión osmótica. Este proceso es comúnmente utilizado para la desalinización de agua, ya que se consigue filtrar el agua salada haciéndola pasar por la membrana semipermeable las cuales atrapan las moléculas de soluto procedentes del agua marina. Se puede observar el proceso en la figura 1.5.

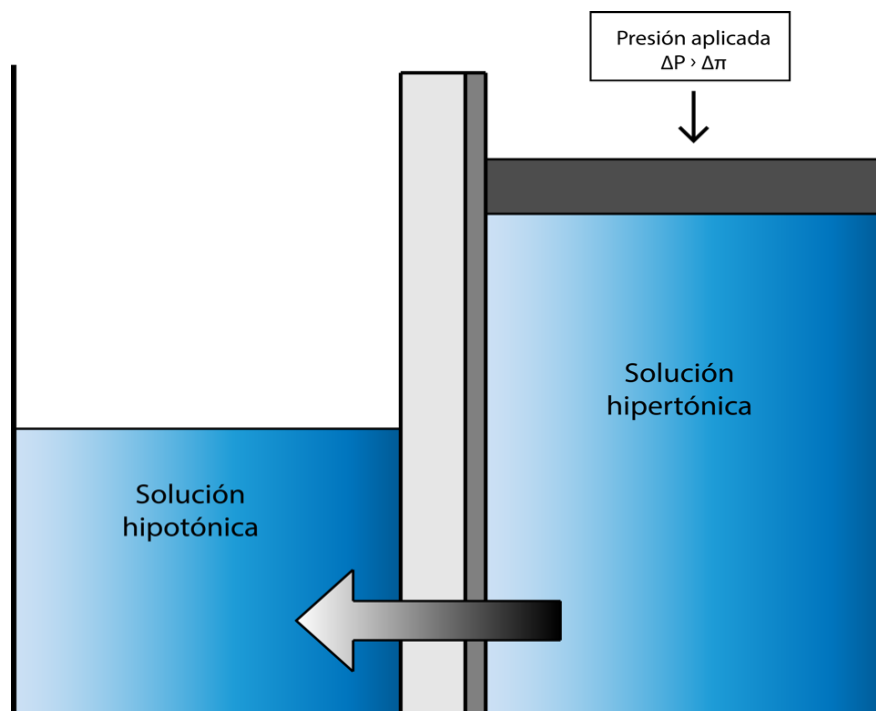


Figura 1.5 Esquema del proceso de osmosis inversa. Elaboración propia.

- Osmosis por presión retardada (OPR): En inglés conocido como *Pressure Retarded Osmosis (PRO)*. Comparando el proceso OPR con los enumerados anteriormente se considera que este proceso está en un intervalo intermedio entre los otros dos anteriores, ya que no llega a invertir el flujo natural de las osmosis, pero sí se aplica presión al fluido hipertónico, la cual tiene que ser menor que la presión osmótica, ya que si no invertiríamos el flujo. Se puede observar el proceso de osmosis por presión retardada en la figura 1.6.

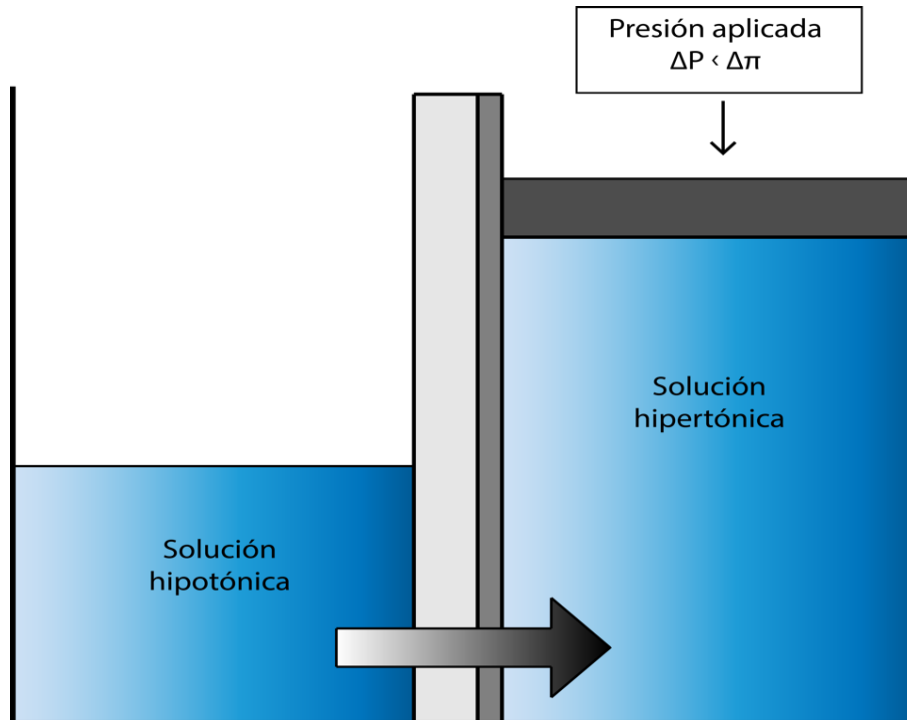


Figura 1.6 Esquema del proceso de presión por osmosis retardada. Elaboración propia

1.3.3 PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA

La obtención de energía a partir de la osmosis se realiza generalmente mediante el proceso de OPR. El método OPR aprovecha el aumento de presión del fluido que permea por la membrana para producir la energía eléctrica y ha sido el elegido en este proyecto.

Aunque el diseño del ciclo de la energía azul se puede desarrollar en bucle cerrado, lo más lógico y factible económicamente es realizarlo en bucle abierto aprovechando los factores externos que nos proporciona la naturaleza. Para realizar dicho proceso en bucle abierto, se necesitarán dos grandes volúmenes de soluciones que tengan distintos niveles de concentración. Esto ocurre en la naturaleza en las desembocaduras de los ríos en los mares, que serán el emplazamiento adecuado para este tipo de centrales.

La energía que producen las centrales de OPR de ciclo abierto se obtiene de la recuperación de parte de la energía que gasta el Sol en evaporar el agua del mar en el ciclo natural de esta, aprovechando cuando la misma vuelve a desembocar en los ríos. Nos beneficiamos de la diferencia de concentraciones de ambas disoluciones para producir energía. Este es el motivo por el que se dice que esta energía parte de la energía solar. El proceso de cómo influye el ciclo del agua en la energía azul queda representado en la figura 1.7.



Figura 1.7 Efecto del ciclo del agua para aplicaciones OPR. Adaptado de A.Achilli, 2010 [11]

El futuro de producir energía mediante este concepto es bastante amplio y se calcula que se podrían generar 2000 TWh al año, esto supondría que el 20 % de la producción mundial mediante fuentes renovables podría realizarse en un futuro a partir de energía azul.

1.3.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Las ventajas y desventajas de la utilización de este tipo de energía se resumen en la tabla 1.1.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de energía renovable. • No lleva asociado la emisión de ningún contaminante de efecto invernadero. • Produce la energía de una fuente estable y predecible, lo que es una gran ventaja respecto a la mayoría de fuentes de energías renovables. • El espacio requerido es inferior al de la mayoría de energías renovables convencionales. • La instalación de las plantas de producción de potencia pueden realizarse bajo tierra, por lo que el impacto visual es bastante reducido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Su factibilidad económica depende del precio y eficiencia de las membranas utilizadas, las cuales están en fase de desarrollo aún. • En la actualidad por unidad de energía producida no son competitivos. • Un mal dimensionamiento de la central podría acabar con el ecosistema del río del cual se obtiene el agua dulce. A la hora de dimensionar se tiene que tener en cuenta el caudal mínimo vital de dicho río para no secarlo en ningún momento. • Aunque en menor medida que otras operaciones similares como la desalinización de agua, puede llegar a contaminar el ecosistema del lugar donde se expulsa el fluido residual.

Tabla 1.1 Ventajas y desventajas principales del uso de la energía osmótica

1.4 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL DESARROLLO DE OPR

Los primeros estudios relacionados con la producción de energía a partir de la osmosis datan en torno a la década de los 50, en concreto en el año 1954, cuando R.E Pattle publicó un artículo relacionado con este tema. Este autor introdujo que

cuando un volumen de un disolvente puro se mezcla con un volumen mucho mayor de una solución de presión osmótica π , la energía liberada es igual a esa misma presión osmótica multiplicada por el volumen, es decir, πV .

Sin embargo, dicho documento, no generó demasiado interés en el panorama científico de la época, ya que la forma de obtener energía a partir de combustibles fósiles estaba en auge, y los precios de los mismos no eran muy elevados.

No es hasta el año 1973, con la crisis de la subida del precio del petróleo cuando se recupera el interés sobre esta forma obtener energía. Se puede observar en la figura 1.8 que existe una importante relación histórica entre el aumento del desarrollo de la tecnología de OPR, en general de todas las formas de obtener energía renovable, y la subida del precio del petróleo.

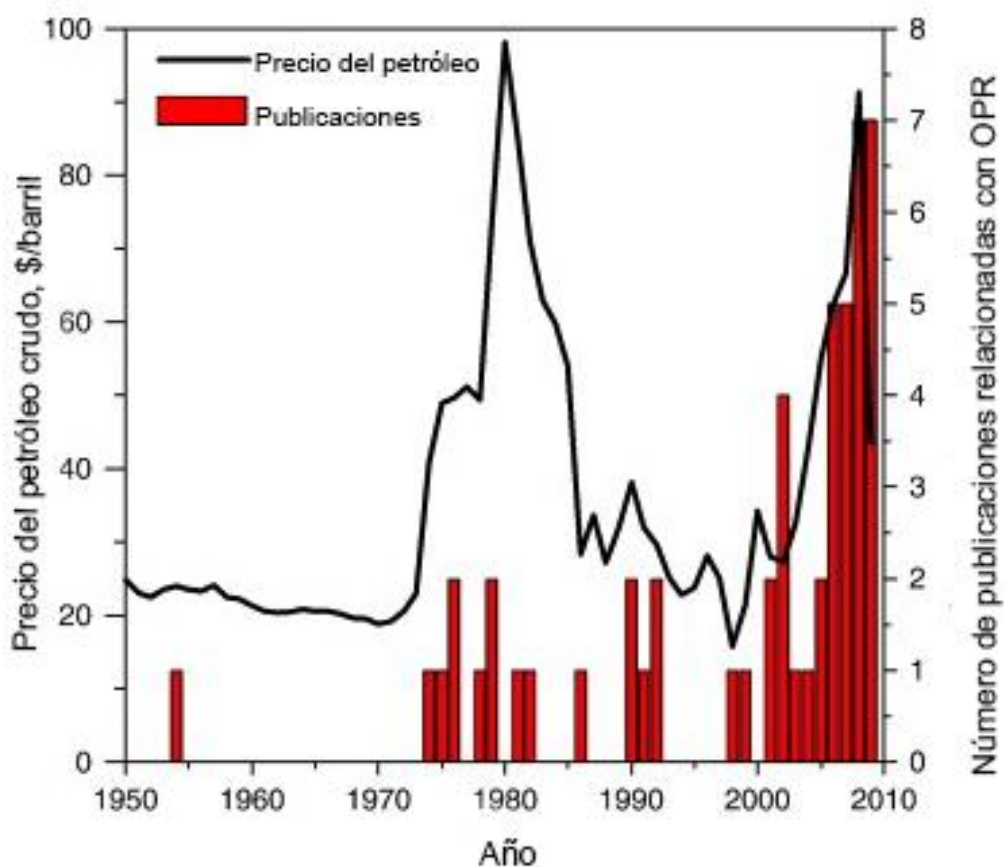


Figura 1.8 Comparación histórica del número de publicaciones de OPR respecto al precio de, petróleo. Adaptado de [12].

En 1974, se propone un primer modelo para conseguir obtener energía a partir de la osmosis, convirtiendo la energía potencial electroquímica en energía hidrostática. Este esquema es obra de R.S Norman y se ve representado en la figura 1.9.

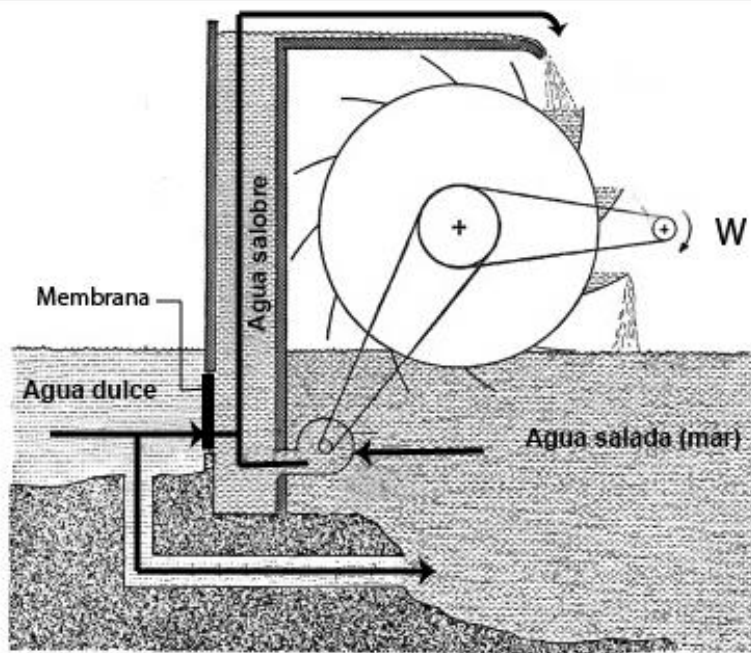


Figura 1.9 Primer esquema de obtención e energía a partir de OPR basado en un sistema *waterwheel*. Adaptado de A.Achilli, 2010 [11].

Norman se basó en un sistema *waterwheel* para intentar aprovechar la energía osmótica a partir del método OPR. El flujo de agua producido por la diferencia de potencial electroquímico haría levantar la columna de agua presurizada, la cual movería una rueda que activaría un generador eléctrico. La presurización del fluido la realizaría la propia columna de agua, por lo que en el modelo propuesto por Norman no sería necesaria la aplicación de potencias externas artificiales. Este modelo propuesto por Norman funcionaría correctamente, pero tiene el inconveniente de que para generar la presión requerida en el fluido de drenaje haría falta una columna de agua de dimensiones abultadas.

Asimismo, en 1976, S.Loeb, uno de los científicos que más avances ha aportado a la tecnología PRO, desarrolló el primer prototipo a pequeña escala utilizando membranas típicas de un proceso de OI para desalinizar agua de mar.

En su experimento, demostró que como se había supuesto teóricamente, se podía obtener electricidad a partir de este método, sin embargo los resultados que obtuvo no fueron los esperados, obteniendo una potencia que oscilaba entre 1.56W/m^2 y 3.27W/m^2 usando aguas hipersalinas, es decir, con concentraciones más elevadas que el propio agua de mar como fluido hipertónico. Los resultados obtenidos estaban muy por debajo de los resultados teóricos esperados por lo que se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Las membranas de OI no funcionaban adecuadamente en aplicaciones de OPR.
- Los niveles de concentración de soluto no se mantenían constantes en ambos fluidos y sufrían modificaciones en las zonas limítrofes a la membrana. A estos sucesos se les denominó polarizaciones en la concentración. En concreto, disminuía la concentración en el fluido hipertónico cuando más cerca estaba de la membrana y aumentaba en el hipotónico como se puede observar en la figura 1.10. Este acontecimiento bajaba de forma considerable la eficiencia de la membrana, provocando que una central con estas características no fuera rentable económicamente.

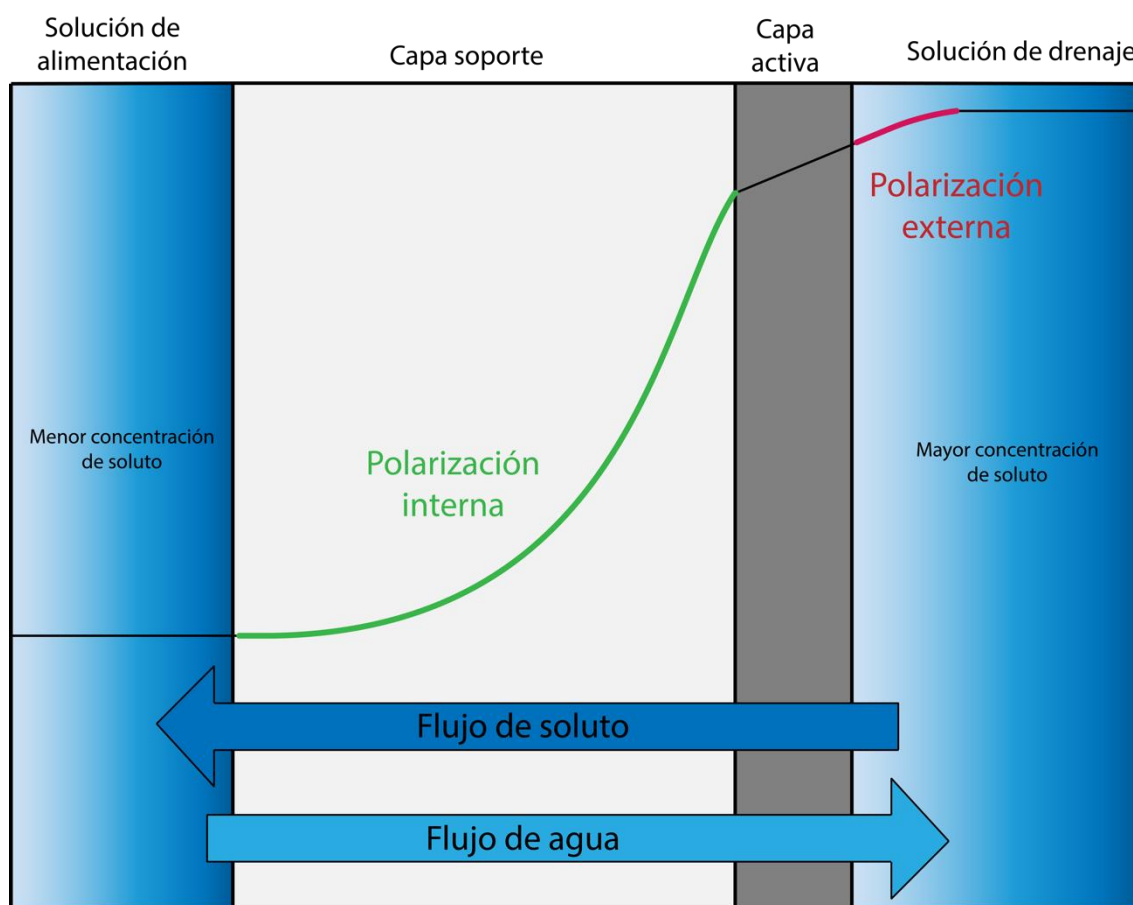


Figura 1.10 Concentración de soluto a lo largo de la membrana destacando los efectos de polarización interna y externa que ocurren en la misma. *Elaboración propia.*

En el año 1981 K.L Lee publicó un modelo analítico que calculaba cual era la velocidad de permeado del agua que atravesaba una membrana semipermeable para aplicaciones de osmosis de OI y OD, posteriormente se demostraría que este modelo también era válido para aplicaciones de OPR.

El desarrollo realizado por Lee está incluido en el anexo del trabajo.

Después del modelo de Lee, varios científicos como Loeb se preocuparon de mejorar los ciclos propuestos y las distintas configuraciones de los mismos para conseguir que el proceso sea lo más factible posible en términos energéticos.

En los años 2000, con la llegada de los intercambiadores de presión, el sistema OPR da uno de sus mayores pasos adelante en cuanto al diseño de la central. Estos sistemas permiten eliminar consumos innecesarios de energía a la par que simplifican bastante el ciclo. Su funcionamiento que será explicado más detalladamente en el capítulo 3 permite presurizar de forma directa el fluido de trabajo utilizando un fluido presurizado de residuo sin la intervención externa de bombas y su consiguiente pérdida mecánica, aumentando el rendimiento de nuestra planta.

Loeb, utilizando dichos intercambiadores realiza una planta de producción de potencia que es una de las mejoras alternativas en la actualidad. El esquema de dicha planta se puede ver en la figura 1.11.

En el año 2009, Andrea Achilli es capaz de demostrar experimentalmente que el modelo propuesto por Lee en el año 1981 es correcto para modelos PRO. Además Achilli en esta publicación es capaz de mejorar el modelo de Lee obteniendo una ecuación para explicar la polarización de concentración que se produce en el lado del fluido hipertónico, también denominada polarización externa por ocurrir fuera de la membrana.

El desarrollo de la mejora del modelo de Lee realizada por Achilli también se encuentra en el anexo.

Dicho modelo descrito por Achilli en 2009 es el mejor modelo analítico en la actualidad del proceso OPR, y por tanto el que utilizaremos en este trabajo para calcular la densidad de potencia de nuestra planta de generación de potencia.

De estos dos modelos se obtienen las siguientes conclusiones que nos servirán de gran utilidad a la hora de realizar el diseño de nuestra central:

- El punto de máximo rendimiento, es decir, cuando el trabajo extraído por unidad de membrana es más alto se corresponde cuando se aplica una presión externa similar a la mitad de la diferencia de presión osmótica que existe entre ambas disoluciones.
- La velocidad de permeado queda descrita por la siguiente ecuación:

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

- La potencia extraída por unidad de área de membrana se representa por la siguiente ecuación:

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

1.4.1 PRIMERA CENTRAL OPR DE CICLO ABIERTO: STARKRAFT

A pesar de que la posibilidad de obtener energía se conoce desde los años 1950, no es hasta el año 2009 cuando se puede ver una planta prototipo que utiliza este tipo de tecnología. El mérito de construir esta central primera es de la empresa noruega Statkraft, especialista en centrales de energía renovable y en concreto, de energía hidroeléctrica.

El prototipo de StarKraft sigue el diseño propuesto por Loeb en esta misma década, basado en el acoplamiento de un intercambiador de presión. El esquema de la planta sería el que se puede visualizar en la figura 1.11.

El objetivo para esta planta prototipo era de generar 10 KW de energía eléctrica y obtener una densidad de potencia de $5W/m^2$, para lo que se instalarían $2000 m^2$ de superficie de membrana. Lamentablemente, los resultados no fueron los esperados, y de los $5W/m^2$ estimados inicialmente, solo se consiguieron obtener $3W/m^2$. La presión hidráulica aplicada en dicha central osciló entre los 10-15 bares.

Hasta la fecha la planta de StarKraft es la única planta existente de producción de energía eléctrica mediante OPR.

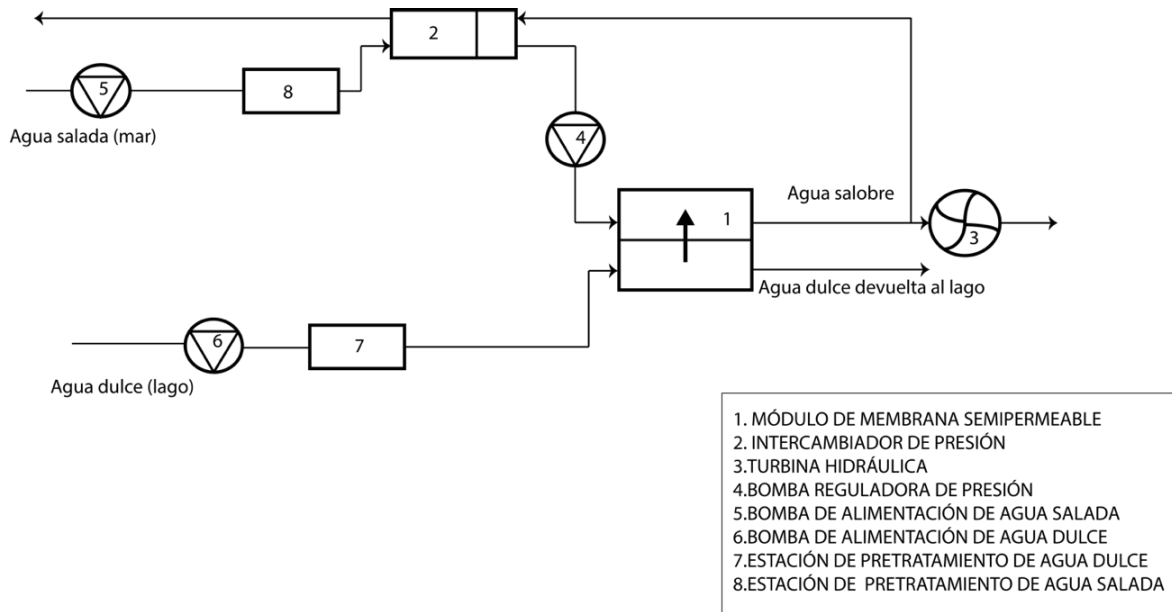


Figura 1.11 Esquema de la central de Starkraft y propuesto por Loeb. Modificado de [12]

1.4.2 MODELO DE CENTRAL DE CICLO CERRADO: MOTOR DE CALOR OSMÓTICO

Este modelo fue desarrollado por McGinnis en 2005. En él propone realizar un ciclo cerrado. Para ello utiliza como solución de drenaje una que tenga como solutos amoníaco y dióxido de carbono, aumentando la concentración de esta de tal forma que las presiones osmóticas generadas fueran bastante superiores a las generadas por el proyecto de Starkraft. En este artículo se estimó que se podrían generar densidades de potencia de 200 W/m^2 , obteniendo un rendimiento de Carnot máximo del 16%. El fluido de alimentación en este modelo es agua completamente desionizada, reduciendo lo máximo posible los problemas de polarización interna. Se puede ver el funcionamiento de este sistema en la figura 1.12.

Debido a que el agua con altas concentraciones de amoníaco no está presente en la naturaleza hay que realizar este circuito en ciclo cerrado para lo que se requiere la utilización de un motor térmico cuya función es volver a separar ambos fluidos una vez que se les extrae la energía tras su paso por la turbina. Este motor separa ambos fluidos mediante destilación.

Las razones por las que se utiliza como solución una mezcla de NH_3 y CO_2 como soluto son las siguientes:

- Tiene una alta solubilidad y es completamente desprendible, lo que hace que pueda ser incorporado y separado del agua con facilidad.
- Tiene una alta difusividad por lo que se consigue transferencias de masa elevadas.
- Requiere menos calor para la eliminación del soluto que el requerido para la vaporización del agua, lo que hace que la energía térmica necesaria para extraer y reciclar los solutos no sea muy elevada.

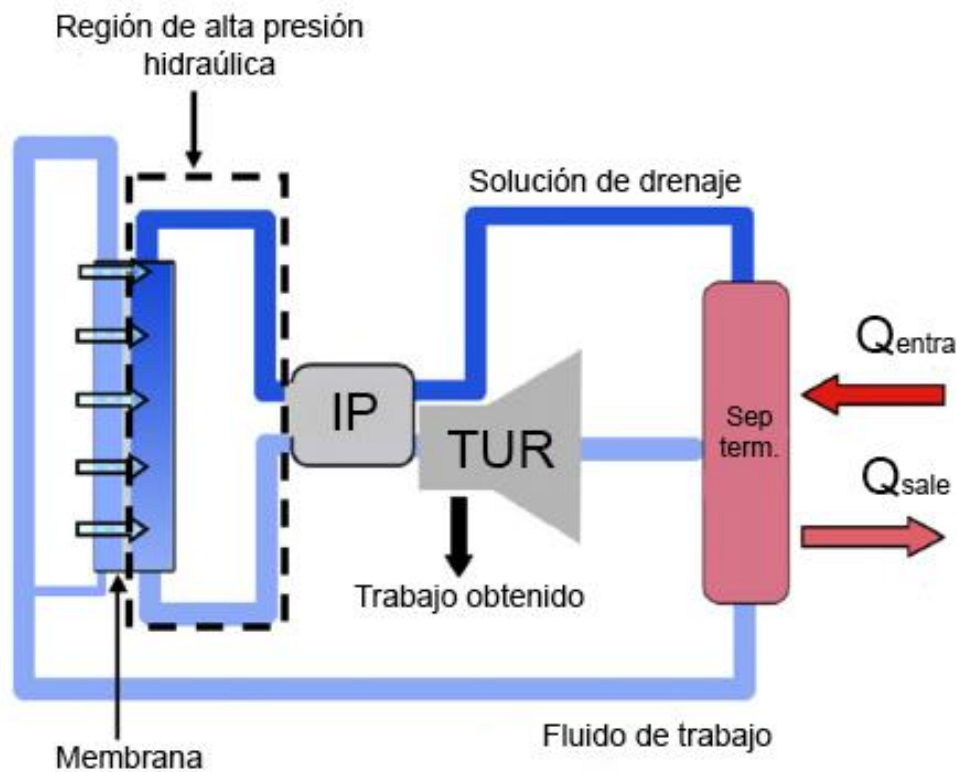


Figura 1.12 Esquema del sistema de motor osmótico. Adaptado de [15].

Como se puede ver en la imagen, en el ciclo al igual que en el modelo de Starkraft se utiliza un intercambiador de presión (PEX) para mantener la presión del lado de extracción en estacionario y conseguir un mayor rendimiento que si utilizamos una bomba.

Este diseño eleva notablemente la densidad de potencia generada, sin embargo, consume energía en el proceso de separación de ambos fluidos en el motor térmico, lo cual en el ciclo abierto ocurre por la propia irradiación del sol. Otro inconveniente es que la inversión inicial es más elevada, debido a que los equipos son más especializados que en ciclo abierto, puesto que trabajar con fluidos menos comunes como el amoniaco, sumado a la necesidad de la incorporación del motor térmico eleva el coste.

1.4.3 OTRAS APLICACIONES DE OPR FUERA DE LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA

El método OPR se ha utilizado también como complemento a otras aplicaciones cuyo principal cometido no es la generación eléctrica. Por ejemplo, en la planta de desalinización de OI en Fukuoka (Japón), se utiliza con el objetivo de recuperar la energía gastada en el proceso de desalinización de agua aprovechando las

soluciones de residuos generadas por esta. Dicha planta forma parte del proyecto nacional de Japón que tiene como objetivo encontrar formas de abaratar los procesos de obtención de agua potable de alta calidad, puesto que la desalinización de agua es un proceso bastante costoso.

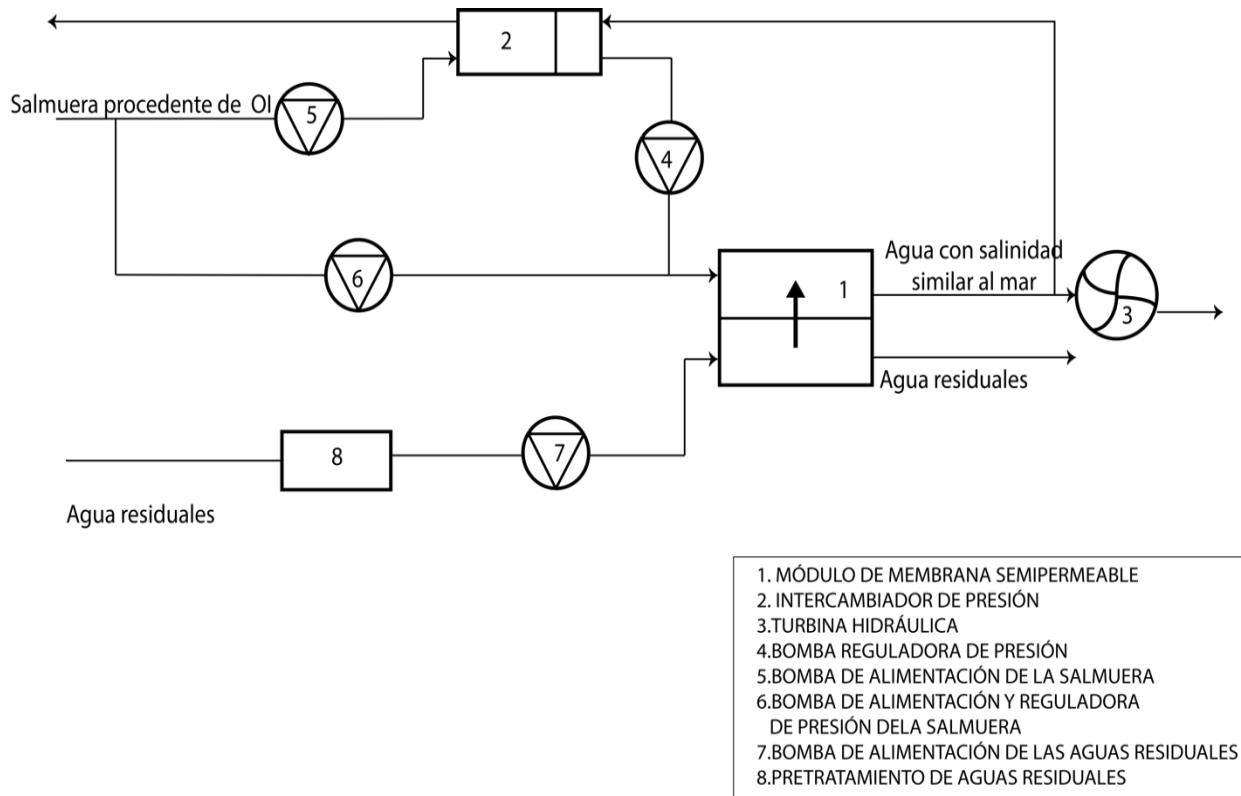


Figura 1.13 Esquema de recuperación de energía de la central de desalinización de Fukuoka. Modificado de [12].

La utilización de OPR en una planta de desalinización de agua tiene dos ventajas fundamentales:

- Se consigue recuperar parte de la potencia invertida en el proceso de OI. En concreto en la planta de Fukuoka se habla de una recuperación $4,4 \text{ W/m}^2$.
- Al utilizar OPR, la salmuera resultante se diluirá más eficazmente, y por tanto el fluido residual que es vertido al mar provocará un menor grado de impacto ambiental que si el sistema OPR no estuviera. Esto solucionaría uno de los principales problemas de las plantas de desalinización que es la contaminación por el vertido de salmuera al mar, la cual tiene un impacto muy negativo en sus ecosistemas.

2. ESTUDIO DE LA LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA

Como en la mayoría de las energías que utilizan fuentes de energía naturales elegir una localización correcta de la planta puede aumentar significativamente la potencia generada por la misma. La elección de dicho emplazamiento se realizará teniendo en cuenta los factores naturales que repercuten en el proceso.

2.1 FACTORES NATURALES IMPLICADOS

2.1.1 SALINIDAD DEL AGUA DEL MAR

El agua considerada como agua de mar, es el agua que compone los mares y océanos.

Su composición mayoritaria es H₂O, pero también contiene un conjunto de sales minerales que la hacen válida para la aplicación de este trabajo.

Para este proyecto la característica más importante del agua de mar es su salinidad, es decir, el contenido de dichas sales en el propio agua. La salinidad se suele medir en partes por millón, y la media de la salinidad del agua de mar gira en torno a 35000 ppm, o lo que es lo mismo, 35 gramos de sal por cada litro de agua. A su vez, aunque la cantidad de sales por cada litro de agua va variando a lo largo de los mares y océanos de la Tierra, la proporción de dichas sales si se pueden considerar como constante, y son las mostradas en la tabla 2.1.

Sales disueltas	Porcentaje de solutos en el agua de mar
Cloruro de Sodio	77.8
Cloruro de Magnesio	10.9
Sulfato de Magnesio	4.7
Sulfato de Calcio	3.6
Sulfato de Potasio	2.5
Carbonato de Calcio	0.5

Tabla 2.1 Componentes principales del agua de mar

Como se puede ver en la tabla casi el 80% de los solutos que se encuentran en el agua de mar corresponden a cloruro de sodio, por ello en este trabajo se tomará la hipótesis que el 100% de los solutos son de cloruro de sodio, simplificando de esta manera los cálculos.

Analizando la ecuación de Van't Hoff se puede observar que interesa localizar nuestra planta en la desembocadura de un río a un mar lo más salado posible, de tal manera que la concentración de ambos cuerpos disten lo máximo posible y se obtenga la mayor diferencia de presión osmótica posible.

Para analizar la importancia de la salinidad del agua del mar a la hora de producir energía eléctrica se ha obtenido la relación entre la densidad de potencia obtenida por metro cuadrado de membrana ideal, es decir, sin tener en cuenta las pérdidas en la membrana ocasionadas por el efecto de polarización en las concentraciones. La figura 2.1 está acotada entre 30000 ppm y 40000 ppm debido a que la gran mayoría de mares de la Tierra oscilan entre estos valores. El resto de parámetros para realizar este análisis se han mantenido constantes y son los mostrados en la tabla 2.2.

Parámetro	Valor
Permeabilidad del agua en la membrana	$2 \cdot 10^{-12}$ (m/sPa)
Temperatura	25 (°C)
Concentración agua del río	0.5 (g/L)

Tabla 2.2 Parámetros escogidos para analizar la influencia de la salinidad en la densidad de potencia obtenida

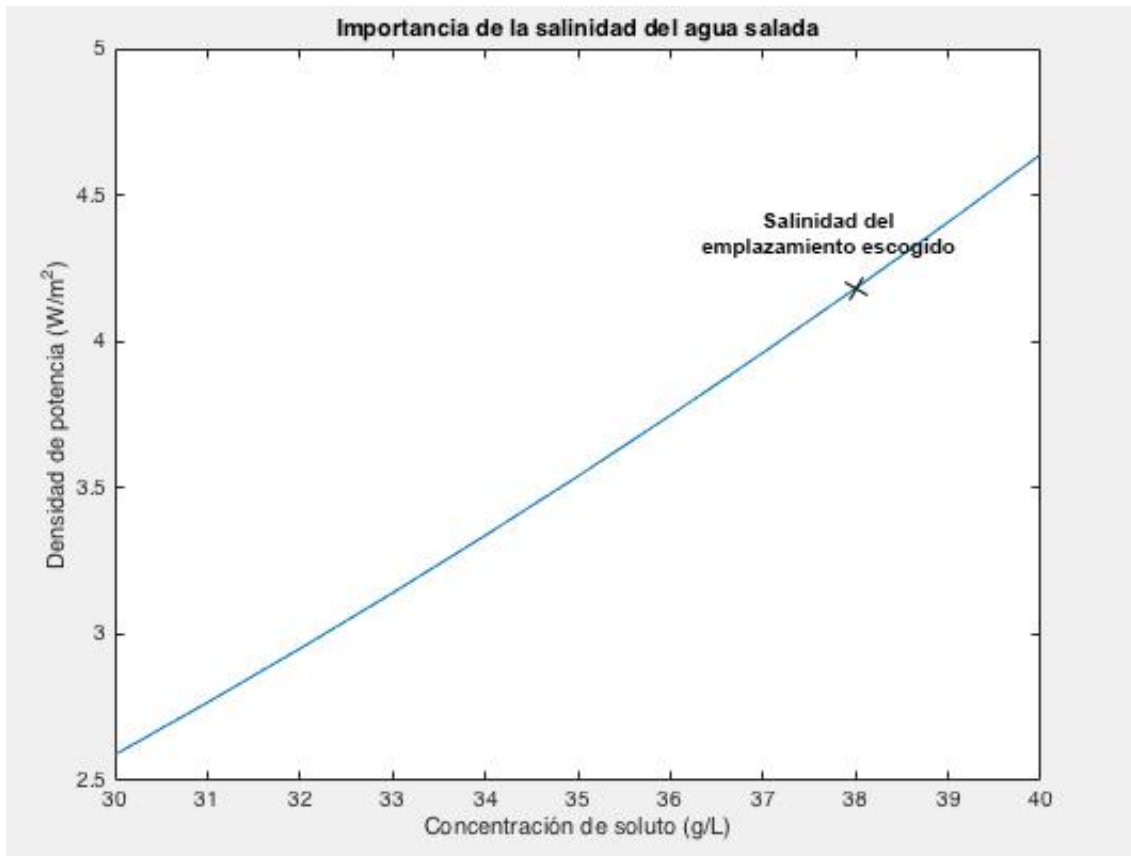
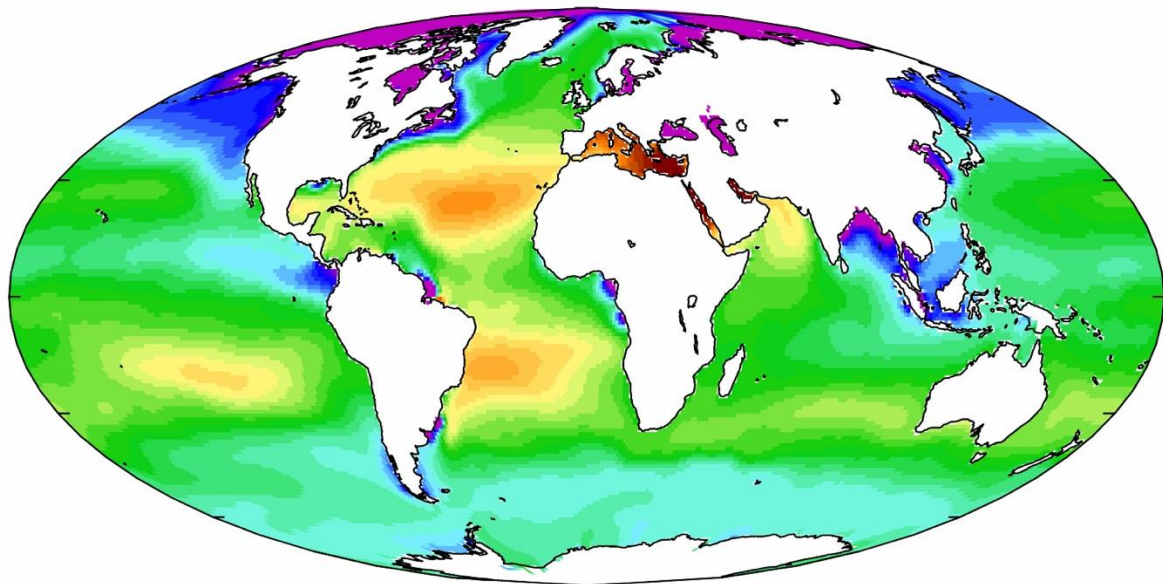


Figura 2.1 Influencia de la salinidad en la densidad de potencia generada. Elaboración propia.

En la figura 2.1 se puede observar que la densidad de potencia entre elegir un mar de 40 g/L o un mar de 30 g/L puede significar generar el doble de potencia por metro cuadrado de membrana, por lo que elegir la localización adecuada es vital para nuestro proyecto. El agua de 31 g/L de concentración, que puede pertenecer al Mar de Beaufort, al norte de Canadá, es de aproximadamente 2.73 W/m^2 , mientras que un mar con una concentración de sales de 38 g/L como el Mediterráneo tendrá una capacidad de producción en torno a 4.182 W/m^2 para una permeabilidad acuosa de $2 \cdot 10^{-12} \text{ m/sPa}$.

En la figura 2.2 se puede observar la salinidad de las distintas masas acuáticas de la Tierra.



Salinidad marítima superficial (g/L)

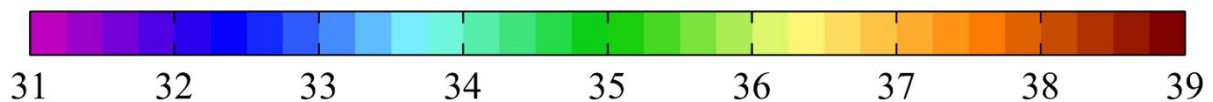


Figura 2.2 Mapa de salinidad en los distintos mares y océanos de la Tierra. Adaptado de [24].

2.1.2 CAUDAL DEL AGUA DEL RÍO

El agua del río, a primera vista, no es tan determinante en el proyecto como el agua de mar, ya que casi todos los ríos son considerados de agua dulce, por lo que tienen una salinidad inferior a 500 ppm. Al tener tan poco margen de operabilidad con la salinidad del río la elección del mismo no nos produce grandes variaciones en la producción de energía osmótica por unidad de membrana.

A pesar de que no nos produzca grandes cambios en torno a la densidad de potencia generada, sí que su elección puede ser determinante para la viabilidad del proyecto. El río que se elija debe tener el caudal necesario para garantizar la generación de potencia que se propone en el proyecto. Asimismo, a pesar de no tener una gran cantidad de sales minerales, estas aguas sí que suelen contener una gran cantidad de impurezas que deben ser tratadas antes de introducirlas en el ciclo para que no afecten de forma significativa al rendimiento del ciclo.

2.1.3 TEMPERATURA

La temperatura es un parámetro que también aparece en la ecuación de Van't Hoff y para determinar su importancia al igual que en el caso de la salinidad se hará una comparativa entre la temperatura y la densidad de potencia de membrana para los

posibles valores de temperatura en la Tierra. Los resultados del análisis son los reflejados en la figura 2.3. Para dicho análisis se han tomado como temperatura mínima para el proceso 0°C y temperatura máxima 45°C, manteniendo el resto de parámetros constantes, los cuales podemos ver en la tabla 2.3

Parámetro	Valor
Permeabilidad del agua en la membrana	$2 \cdot 10^{-12}$ (m/sPa)
Concentración agua del mar	35 (g/L)
Concentración agua del río	0.5 (g/L)

Tabla 2.3 Parámetros escogidos para analizar la influencia de la salinidad en la densidad de potencia obtenida.

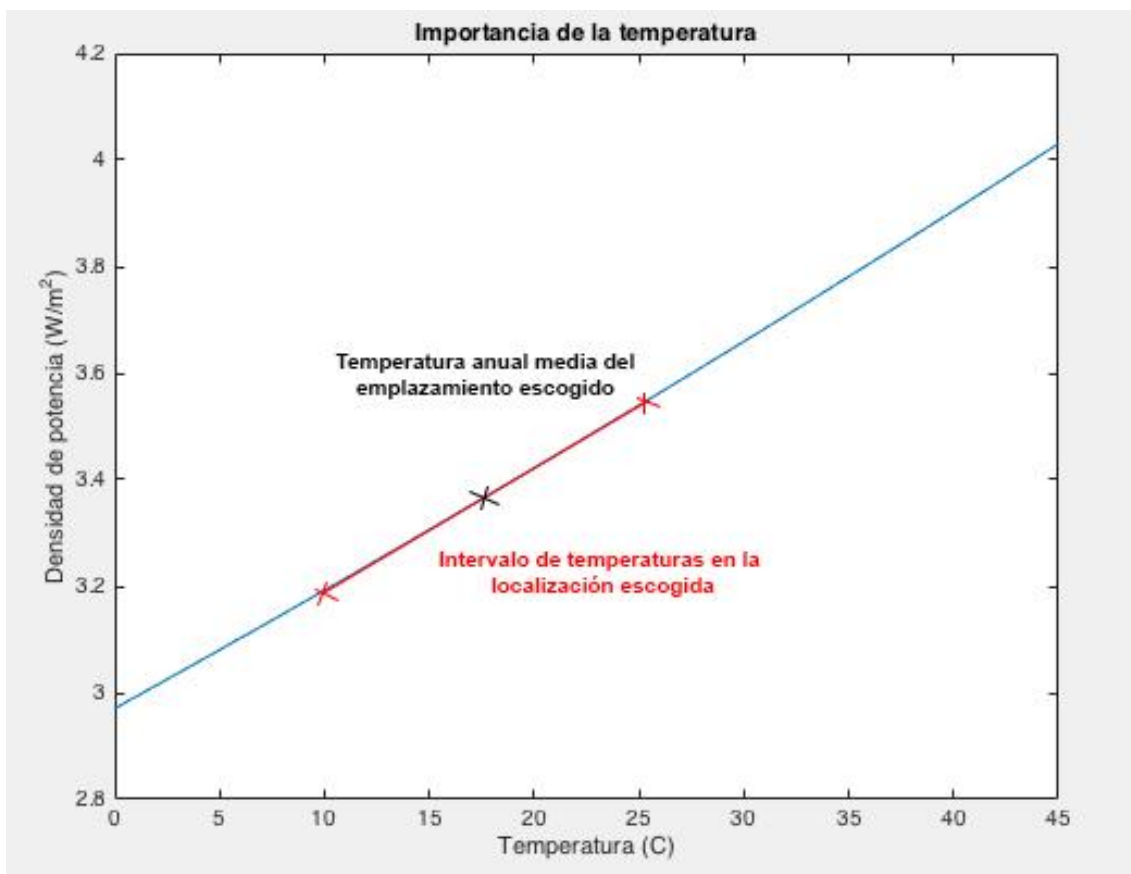


Figura 2.3 Influencia de la temperatura en la densidad de potencia generada. Elaboración propia.

Observando la figura 2.3 se puede ver como la temperatura tiene un papel bastante representativo en la densidad de potencia, aunque no tan representativo como la salinidad del agua. Se aprecia como es preferible realizar el proceso en localizaciones cálidas que en localizaciones frías, en climas con una temperatura en torno a los 0°C, con los parámetros fijados en la tabla 2.3 obtendríamos una

densidad de potencia en torno a 2.97 W/m^2 y con una temperatura de 45°C obtendríamos 4.03 W/m^2 .

2.2 EMPLAZAMIENTO ELEGIDO: DESEMBOCADURA DEL RÍO EBRO

A partir de los análisis siguientes se llega a la conclusión de que una localización óptima para implementar una planta de producción de potencia mediante el proceso de OPR debería tener las siguientes condiciones:

- El agua de mar utilizada como solución salada, debe tener la salinidad lo más alta posible.
- La temperatura media de la localización donde se instale la planta debe de ser lo más alta posible, aunque se dará prioridad a la salinidad.
- Es indispensable que el caudal del río disponible para el proceso nos garantice generar la potencia que se define el proyecto. El caudal disponible no es igual al caudal del río, puesto que se tiene que garantizar que el río permanece con el caudal mínimo para mantener su ecosistema.

Partiendo de estas premisas se ha considerado que la zona del mar Mediterráneo podría ser una buena zona para implementar este tipo de central por su clima cálido y debido a que la salinidad en dicho mar es bastante elevada.

Cuando sea posible se intentará ubicar la planta en las cercanías de la desembocadura de un río con un caudal relativamente alto. Es cierto que para la producción inicial de 1 MW, prácticamente casi cualquier río aportaría el caudal necesario para producir dicha energía, pero al ser esta una tecnología en fase de desarrollo y que ofrece un diseño modular es posible que cuando se realice la primera sustitución de membranas, las cuales tienen una duración aproximada de 7 a 10 años en la actualidad, estas hayan incrementado su eficiencia y en el mismo espacio se podría aumentar considerablemente la energía producida, lo que vendría ligado a un mayor consumo de caudal del río.

Por lo anteriormente expuesto, la localización de la planta elegida sería en torno a la desembocadura del río Ebro, que se ubica entre los municipios de Deltebre y San Jaime de Enveija en la provincia de Tarragona, España.

El río Ebro es uno de los ríos más representativos de España, siendo el más caudaloso de los ríos que desembocan en territorio español y uno de los más caudalosos que desembocan en el Mar Mediterraneo. La mayoría de datos relacionados con este río se pueden encontrar en la Conferencia Hidrográfica del río Ebro (CHEbro), perteneciente al ministerio español de agricultura, pesca, alimentación y medio ambiente. En concreto en CHEbro se pueden obtener datos de diversos puntos de control. Con respecto al interés de nuestro proyecto nos interesa

obtener los datos del punto de control más cercano al Delta del Ebro, que es A027 EBRO-TORTOSA.

2.2.1 CAUDAL DISPONIBLE EN LA ESTACIÓN EBRO-TORTOSA

El caudal disponible como se ha visto puede delimitar de cierta manera el proyecto. Se considerará caudal disponible aquel caudal que se puede utilizar para la generación de energía eléctrica en nuestra planta sin poner en peligro la vida del ecosistema del propio río. Para determinar este caudal disponible se ha partido de datos históricos de caudales del río Ebro desde el año 2000 hasta el 2013 y se ha realizado una media para realizar una estimación.

DATOS DE LOS CAUDALES ESTACIÓN EBRO-TORTOSA (2000-2013)			
AÑO	Caudal medio anual	Caudal medio máximo diario	Caudal medio mínimo diario
2000	401.482	2368.8	76.3
2001	130.683	466	74
2002	385.618	2376.4	86
2003	444.323	1194.6	105.4
2004	212.429	661	93.7
2005	190.623	1256.1	77.3
2006	250.338	1705.76	83.4
2007	224.84	1737.613	91.23
2008	325.514	1172.817	95.57
2009	302.52	1330.765	107.7
2010	195.332	779.44	98.37
2011	123.481	380	106
2012	493.17	1509	92
2013	325.589	1313	90
Media	286.13	1303.67	91.21

Tabla 2.4 Caudales medios en la estación de Ebro-Tortosa ente los años 2000-2013. Datos obtenidos de [24].

Como se puede observar el caudal del río varía con el tiempo, dependiendo de la época del año y del año en sí. Para asegurar que en ninguna situación se va a poner en peligro la seguridad vital del río, se desestimarán tanto el caudal máximo y el medio como valores razonables, tomando como valor de referencia la media de los valores medios mínimos diarios.

Por otro lado, el caudal ambiental o ecológico, es decir de caudal necesario para mantener los valores ecológicos de dicho río según la CHEbro tiene una media del 21 % del valor de caudal medio anual.

Partiendo de esta información se puede obtener el caudal disponible a partir de la siguiente expresión:

$$Q_{disp} = Q_{min} - Q_{eco} = Q_{min} - 0.21Q_{med} \quad [6]$$

Aplicando la ecuación se obtiene que nuestro caudal disponible es de 31.12 m³/s.

$$Q_{disp} = 91.21 - 0.21 \cdot 286.13 = 31.12 \frac{m^3}{s}$$

Este valor de caudal es el valor límite a utilizar por lo que una vez calculado el valor necesario para generar la potencia de la central se debe comprobar que el caudal necesario sea inferior a este.

2.2.2 SALINIDAD EN EL DELTA DEL EBRO

El delta del Ebro se encuentra en el Mar Mediterráneo, cuya salinidad oscila entre los 36 g/L y los 39 g/L. En concreto, en la desembocadura del río Ebro, observando la figura 2.4, que representa un mapa salinidad de dicha zona obtenido de la European Space Agency [25] se puede apreciar que dicho emplazamiento tendría una salinidad en torno a los 38 g/L.

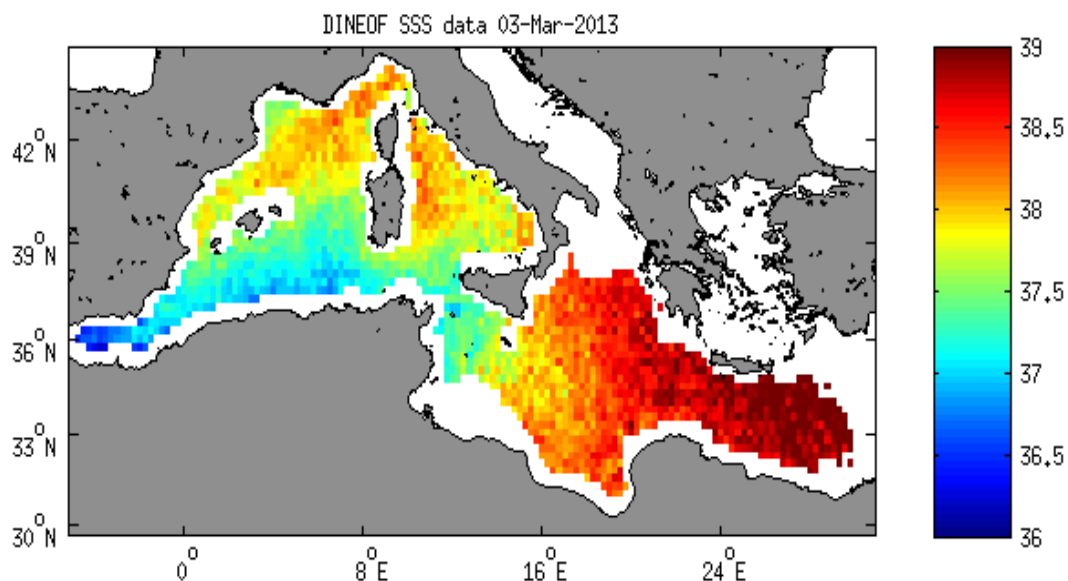


Figura 2.4 Mapa de salinidad en la zona cercana al Mar Mediterráneo [25].

2.2.3 TEMPERATURA EN DELTEBRE

Para obtener el valor de temperatura medio, se obtienen los datos históricos del último año 2016 representados en la figura 2.5. Al ser la temperatura el único valor que influye en la generación de potencia que cambia temporalmente. Con la elección de una temperatura media anual como temperatura del proceso se asegura una generación media alrededor del año de 1 MW ya que como se observa en la figura 2.3 la densidad de potencia y la temperatura mantienen una relación prácticamente lineal. Se producirá más energía los meses en los que haga más calor y menos en los meses fríos.

Tomando como datos validos las temperaturas obtenidas en la estación Ebro-Tortosa del año 2016 se puede intuir que la temperatura media a lo largo de cada año estará en torno a los 18°C [26].

2.3 MÁXIMA POTENCIA OBTENIBLE EN EL EMPLAZAMIENTO SELECCIONADO

Una vez obtenidos, en la localización geográfica escogida, el caudal disponible y la salinidad tanto en el mar escogido como en el río se obtiene un valor aproximado la máxima potencia que puede aportar esta central. Para calcular esta máxima potencia aproximada se supone un rendimiento ideal de todos los elementos de la central.

En un rendimiento ideal de las membranas está demostrado en el anexo 1 que la condición que maximiza la potencia es:

$$\Delta P = \frac{\Delta \pi}{2} = \frac{\pi_{mar} - \pi_{rio}}{2} = \frac{2.91 \cdot 10^6 - 1.83 \cdot 10^4}{2} = 1.44 \cdot 10^6 Pa$$

$$W_{max} = Q_{disp} \Delta P = 31.12 \cdot 1.44 \cdot 10^6 = 44.81 MW$$

Por lo que en esta localización por mucha eficiencia que tengan las membranas nunca se podrá colocar una central que funcione durante todo el año a más de 44.81 MW sin poner en peligro el ecosistema del río. Es cierto que en la mayoría de las ocasiones se tendrá un caudal disponible superior al considerado, pero si se quiere que todas las membranas colocadas funcionen durante todo el año debemos dimensionar para el caudal mínimo disponible. La potencia generada podría ser mayor en caso de que no todas las membranas funcionen durante todo el año y ajustando su uso al caudal instantáneo disponible en cada momento, pero con el precio y eficiencia actual de las membranas sería un despropósito económico.

3- ESTUDIO Y ADIMENSIONAMIENTO DE LA CENTRAL

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

El tipo de planta escogido para generación de energía eléctrica mediante sistema OPR es el propuesto por Loeb que tiene la característica de utilizar un intercambiador de presión (PEX), el fundamento del esquema es el mismo que el utilizado en la central de Starkraft.

Al ser una tecnología reciente y no muy desarrollada, la planta de generación no tendrá una potencia muy elevada. La potencia generada como se ha comentado anteriormente será de 1 MW.

Una de las principales ventajas de estas plantas de generación es su diseño modular. La potencia generada depende de las unidades de membrana, por lo que si en un futuro se quiere ampliar la central, únicamente se tendrían que añadir un mayor número de componentes, siempre y cuando el caudal del río del cual se obtiene el flujo de agua dulce sea suficiente para generar dicha potencia.

3.1.1 ESQUEMA DE PRESIONES

La generación de potencia eléctrica en la planta se obtiene de utilizar la diferencia de presiones osmótica que se aprovecha en la membrana semipermeable, por lo que se empezará el estudio de la central evaluando las presiones en cada uno de los diferentes puntos de dicha central.

Tanto el agua de mar como el que se obtiene del río inicialmente tienen presiones ambiente, P_a . El agua de mar pasará por el intercambiador de presión elevando la misma hasta lo considerado en el estudio local de la membrana, que se realizará posteriormente, P_r . Sin embargo el intercambiador de presión no tiene un rendimiento ideal, por lo que la presión después de su paso, P_{dip} , será menor que la presión requerida por la membrana. Esta diferencia de presión ocasionada por el rendimiento del intercambiador de presión será compensada utilizando una bomba hidráulica, que aportará una presión P_b . Dicho flujo de agua salada con una presión P_r se introducirá en la membrana.

Por otro lado, el agua de río entrará a presión ambiente en la membrana, y mediante difusión osmótica fluirá hacia el lado en el que se encuentra el agua salada, que se encontraba a la presión requerida por la membrana, P_r , obteniendo un flujo de agua salobre. De esta agua salobre que sale de la membrana, una parte impactará en la turbina para generar electricidad y otra parte será utilizada para elevar la presión que

viene del agua de mar.

En la figura 3.1 podemos apreciar un esquema básico de las presiones a lo largo de la central.

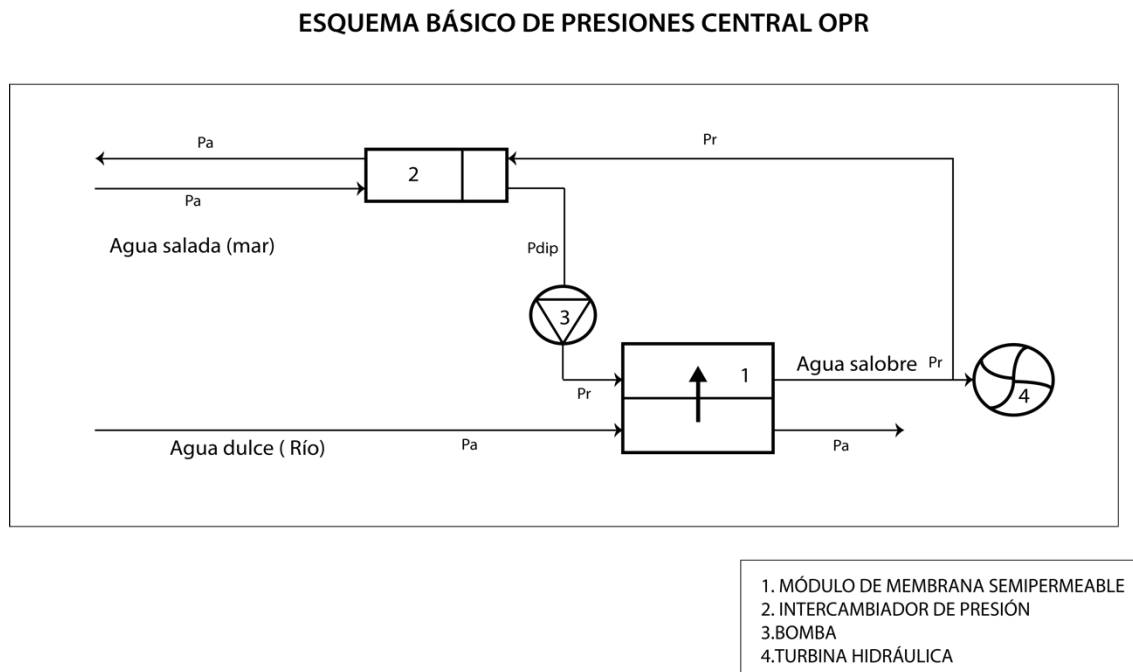


Figura 3.1 Análisis esquematizado de las presiones en la central de generación OPR. Elaboración propia.

3.1.2 ESQUEMA DE CAUDALES

Para cumplir con el esquema de presiones y funcionamiento de la central descrito anteriormente es clave la distribución de caudales en las diferentes zonas de la central.

El caudal que aporta la potencia, y por tanto el más importante de nuestra central, es el de transferencia a través de la membrana Q que tomaremos como caudal de referencia.

Teóricamente, como se puede observar en las ecuaciones [4] y [5] descritas por Achilli, la densidad de potencia generada solo depende de las concentraciones de las dos disoluciones y de las propias características de la membrana. Esta afirmación experimentalmente no se cumple, ya que el caudal tanto del agua dulce como del agua salada influye en el rendimiento de nuestra membrana y por tanto en el rendimiento global de la central.

Loeb demostró que el caudal óptimo de entrada de agua salada tendría que ser mayor que Q y menor que $2Q$ [8], para este trabajo hemos optado por tomar como caudal de entrada de agua salada $1.5Q$.

Por otro lado, para que la membrana tenga un mejor funcionamiento es

recomendable que la filtración del fluido que la atraviesa se realice de forma tangencial, para lo que es necesario que el caudal del agua dulce sea mayor que el caudal que fluye a través de la membrana, por lo que al igual que en el caso del agua salada para simplificar los cálculos se ha supuesto un caudal de agua dulce de $1.5Q$. Ambas corrientes, tanto la de agua dulce como la de agua salada entran en la membrana, donde un caudal Q de agua dulce pasa al agua salada, produciendo como producto el agua salobre. El agua dulce que se utiliza será devuelta al río. Del caudal de agua salobre que obtenemos, el $1.5Q$ se utiliza para incrementar la presión del agua procedente del mar en el intercambiador de presión, mientras que Q se hace pasar por la turbina para producir la energía eléctrica.

Se puede ver el esquema básico de caudales en la figura 3.2.

ESQUEMA BÁSICO DE CAUDALES CENTRAL OPR

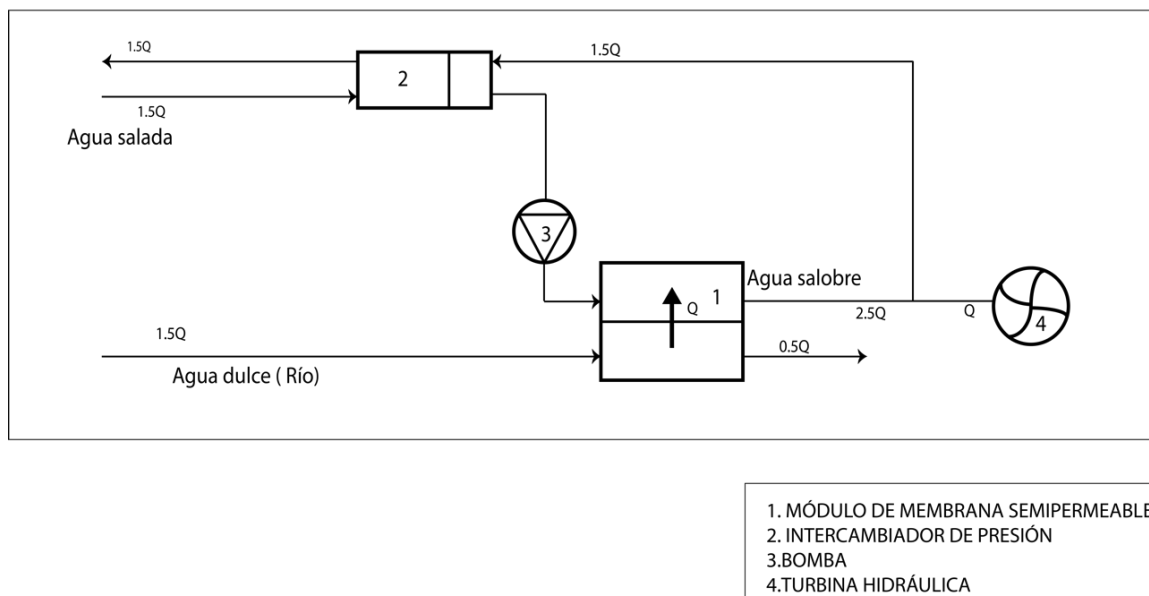


Figura 3.2 Análisis esquematizado de los caudales en la central de generación OPR. Elaboración propia.

3.1.3 POTENCIA GENERADA

En este tipo de central la potencia generada se debe a la activación de la turbina mediante el fluido presurizado que obtenemos de la salida. Teniendo en cuenta que impactamos sobre la turbina un caudal Q que sale de las membranas, la ecuación de la cual se obtiene la potencia neta generada de nuestra central será la siguiente:

$$W_{generado} = Q\Delta P$$

Sin embargo, esta potencia no será la potencia neta generada por nuestra planta debido a que los componentes de la misma no tienen un rendimiento ideal. Por tanto

la potencia generada por la planta será la siguiente:

$$W_{neto} = Q\Delta P\eta_{central} \quad [7]$$

El rendimiento de la central incluye tanto el rendimiento del intercambiador de presión, de la bomba y de la turbina. A partir del esquema de presiones obtenemos que el rendimiento de la central quedaría delimitado por la siguiente ecuación:

$$\eta_{central} = \eta_{turbina} - \frac{Q_{ag.salada}}{Q_{memb}} \cdot \frac{\Delta P_{memb} \cdot (1 - \eta_{ip})}{\eta_{bp}} \quad [8]$$

3.2 ANALISIS DE COMPONENTES DE LA CENTRAL

Ya una vez acotadas las pautas generales para analizar el ciclo y la localización del mismo, se deben analizar los componentes uno a uno para obtener resultados numéricos reales sobre la planta.

3.2.1 MEMBRANAS

La membrana es el elemento primordial de la planta de producción y es el elemento que decide prácticamente todos los valores y el funcionamiento de dicha planta. De ella dependen directamente los valores del caudal de todas las ramas del circuito y la presión aplicada, por lo que indirectamente también determina el número de intercambiadores de presión.

Como se ha citado anteriormente, las membranas utilizadas en estos procesos son membranas semipermeables. La función de una membrana semipermeable es separar dos fluidos permitiendo el paso a través de ella de una determinada sustancia, en el caso descrito agua, pero no permitiendo el paso de otras moléculas o iones como pueden ser los de la sal.

3.2.1.1 TIPOS DE MEMBRANA

Según el material de construcción las membranas se pueden clasificar en:

- Membranas orgánicas: Las membranas orgánicas se generan a partir de materiales poliméricos y fueron el primer tipo de membranas artificiales en ser desarrolladas. Dentro de este grupo, según su composición polimérica, se distinguen tres subgrupos.

- Membranas heterogéneas: Destacan por ser membranas porosas. Son frecuentemente utilizadas para procesos de oxigenación, por su carácter hidrófobo.
- Membranas homogéneas: Son membranas densas que generalmente son utilizadas para procesos como la separación de gases o la osmosis inversa.
- Membranas compuestas: Las membranas compuestas o también conocidas como membranas asimétricas se caracterizan porque están formadas por varios polímeros de estructura y composición diferentes. Estas membranas han supuesto un avance al aportar a la membrana valores unidireccionales muy valiosos, es decir forzar el paso de la molécula a través de ella en la dirección requerida. Normalmente para conseguir esto dichas membranas se componen de una capa macroporosa, seguida de una capa densa que se conoce como capa activa.
- Membranas inorgánicas: Son membranas preparadas a partir de materiales cerámicos, vidrio, metal entre otros. Las membranas cerámicas son las más utilizadas y desarrolladas de este tipo. Este tipo de membranas tienen mejores características mecánicas y térmicas que las membranas orgánicas. Generalmente se fabrican con estructura del tipo compuesto y asimétrico combinando varias capas porosas, las cuales se colocan encima de un material macroporoso. Se utilizan en casos de microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración.

3.2.1.2 TIPOS DE MÓDULO DE MEMBRANA

Las membranas para ser utilizadas en distintas aplicaciones se agrupan e instalan en lo que se conoce como módulo de membrana. Estos módulos son unos dispositivos que deben permitir fácil acceso para el mantenimiento y limpieza de las mismas. Según la aplicación industrial para la que han sido diseñados presentan una cierta geometría de unión, pudiéndolos clasificar en cuatro tipos:

- Modulo tipo plano: El funcionamiento de este tipo de módulo se basa en introducir el fluido de alimentación entre dos membranas a través de una rejilla. El fluido permeado a través de ambas membranas será recogido a través de otras dos rejillas. Las membranas que forman este módulo también tienen geometría plana.

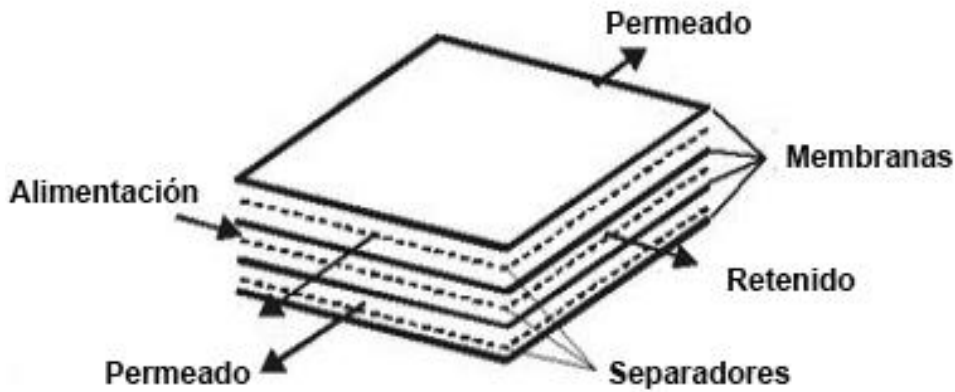


Figura 3.3 Membrana de tipo plano. Adaptado de echnologyreport.mecadi.com

- **Módulo tipo espiral:** Su funcionamiento es bastante parecido al módulo plano, pero aprovecha mejor el espacio y la relación superficie/volumen. Constan de un tubo central sobre el que se van apilando capas de membrana y rejillas consecutivamente. El fluido de alimentación transportado por las rejillas va permeando a través de las membranas hasta llegar al tubo central donde será extraído. Este tipo de módulo es bastante utilizado en procesos de ósmosis inversa y nanofiltración. Al igual que en el caso de módulo plano, el módulo de configuración en espiral también utiliza membranas de geometría plana.



Figura 3.4 Membrana de tipo espiral. Adaptado de echnologyreport.mecadi.com

- **Módulo de tipo tubular:** Distinguiendo de los dos módulos anteriores, este tipo no utiliza membranas de geometría plana, si no que las membranas por las que está compuesto son membranas de geometría tubular. Su apariencia es similar a la del módulo de tipo espiral, pero en este caso el fluido de

alimentación circula por el interior del tubo de membrana y fluye a través de esta al exterior, una carcasa exterior recoge el fluido permeado para su posterior uso. Aunque este tipo de módulo de membrana se puede usar con membranas de tipo orgánicas, generalmente, se suele combinar con membranas cerámicas. Son bastante más caras que los dos módulos anteriores por usar membranas de geometría tubular, sin embargo, ofrecen una menor polarización de la concentración y controlan mejor la suciedad que se origina en la membrana. Es el tipo de módulo de membrana más caro.

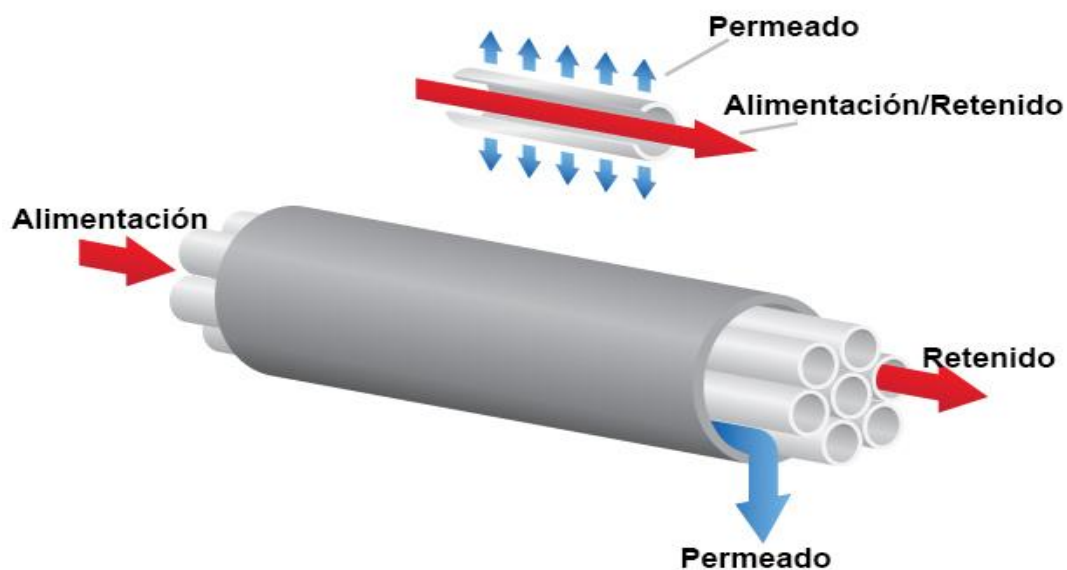


Figura 3.5 Membrana de tipo tubular. Adaptado de <http://synderfiltration.com>

- Módulo de tipo capilar y fibra hueca: Estos dos tipos de módulos aunque son clasificados de forma independiente utilizan la misma tecnología. Su estructura está basada en un gran número de membranas capilares dispuestas paralelamente, rodeadas por un recipiente tubular exterior que aguanta dichas membranas. Si el tamaño de su canal central supera el milímetro son consideradas capilares, mientras que si es inferior a dicho milímetro reciben el nombre de fibras huecas. El fluido de alimentación dependiendo de la configuración de este tipo de membranas puede circular por dentro de las fibras huecas o por el exterior de las mismas.

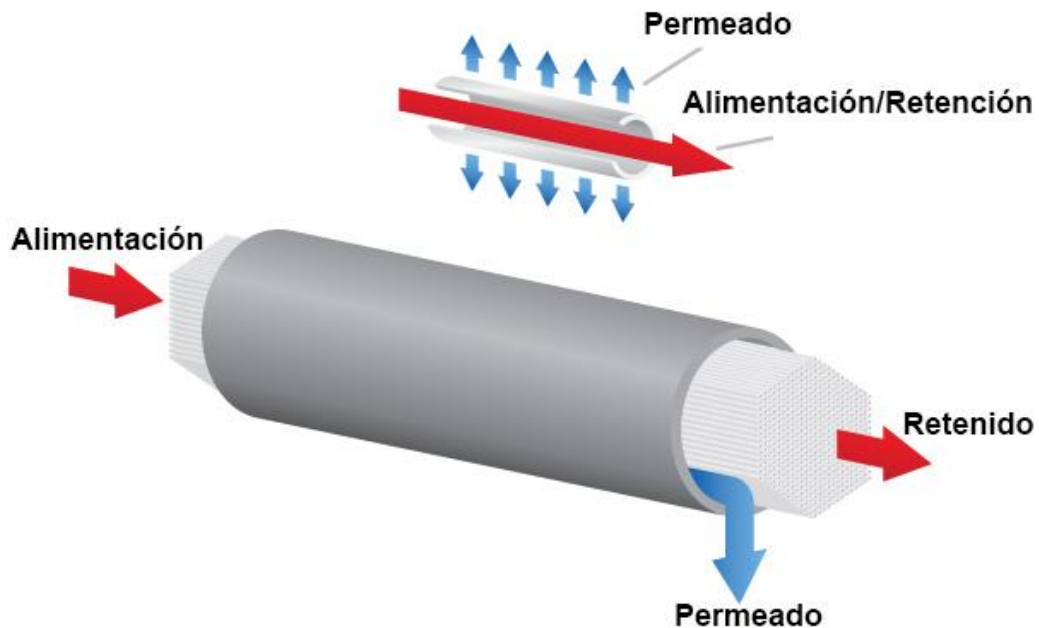


Figura 3.6 Membrana de tipo capilar/fibra hueca. Adaptado de <http://synderfiltration.com>

3.2.1.3 MODOS DE FILTRACIÓN

Los módulos de membranas dependiendo de su modo de filtración también se pueden dividir en dos grupos principales:

- Filtración frontal: En este tipo de filtración todo el fluido es obligado a pasar por la membrana. De los dos modos es el menos recomendable de utilizar ya que se producen acumulación del fluido y por tanto de las sustancias que tienen que pasar a través de la membrana ocasionando una mayor resistencia a pasar por la misma, debido al ensuciamiento de la membrana por acumulación.
- Filtración tangencial: En este tipo de filtración el líquido de alimentación circula libre y tangencialmente a la membrana por lo que no llega a permear la totalidad de este, por lo que necesario alimentar a la membrana con más fluido del que se quiere permear. Este modo de filtración es mucho más recomendable que el frontal puesto que no acumula sustancias durante mucho tiempo alrededor de la membrana disminuyendo de este modo la polarización de la concentración y el ensuciamiento de la misma.

3.2.1.4 ANÁLISIS DE LOS FACTORES DETERMINANTES DE LAS MEMBRANAS PARA APLICACIONES PRO

El objetivo de las membranas utilizadas para OPR es conseguir una gran difusión de agua, resistiendo la mayor presión posible en el lado de agua salada, con el objetivo

de maximizar la energía eléctrica producida.

Analizando el modelo y las ecuaciones que propuso Lee y que finalmente fue finalizado por Achilli se puede apreciar tres parámetros de las membranas que pueden modificar drásticamente la eficiencia de la membrana para nuestro objetivo:

PERMEABILIDAD HIDRAULICA (A)

Para las aplicaciones de OPR interesa conseguir que nuestra membrana tenga una gran permeabilidad del agua para que aumente todo lo que se pueda la transferencia de masa, es decir, la velocidad de permeado. A mayor transferencia de masa se obtendrá una mayor potencia eléctrica. En la tabla 3.1 se pueden apreciar los valores típicos de la permeabilidad acuosa o hidráulica obtenida para distintas membranas en distintas aplicaciones.

Aplicación	Membrana	Permeabilidad hidráulica (m/sPa)	Densidad de potencia (W/m ²)
Nanofiltración	NF90	$3.45 \cdot 10^{-11}$	60.27
Ósmosis Inversa	BW30	$1.16 \cdot 10^{-11}$	20.26
OPR	CTA-FO	$1.87 \cdot 10^{-12}$	3.26

Tabla 3.1 Valores típicos de la permeabilidad hidráulica de membranas según la aplicación de las mismas.

Como se puede ver en aplicaciones más desarrolladas tecnológicamente como la nanofiltración y la ósmosis inversa, la permeabilidad del agua tiene un valor en torno de diez veces obtenida en el proceso de OPR que realizó Achilli con membranas de CTA de aplicación OD. Actualmente se están desarrollando membranas específicas para procesos OPR, esperando conseguir valores de permeabilidad del agua similares a los obtenidos en nanofiltración. Si se consigue aumentar la permeabilidad acuática a dichos valores, la potencia generada sería en torno a diez veces mayor que la que obtuvo Achilli en su experimento, ya que como se puede ver en la ecuación [4] la permeabilidad acuosa es linealmente proporcional a la velocidad de permeado, y por tanto también a la densidad de potencia generada.

PERMEABILIDAD SALINA (B)

Al contrario que la permeabilidad acuosa, la permeabilidad salina interesa que sea lo más baja posible, ya que si se transfiere sal del agua salada al agua dulce, esto hará que la transferencia de agua del agua dulce a la salada sea menor porque se llegará

antes al equilibrio entre ambas disoluciones.

Tener un coeficiente de salinidad bajo supondrá mejorar la eficiencia de la membrana.

Los valores actuales de permeabilidad salina son del orden de $1 \cdot 10^{-7}$ m/s, y se espera conseguir llegar a permeabilidades salinas de $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Dicha mejora supondría un aumento del orden del 10 % de la densidad de potencia.

FACTOR GEOMÉTRICO (S)

Este factor geométrico de la membrana representa los parámetros característicos de la capa porosa de la membrana encargada de soportar la carga mecánica. Concretamente este factor geométrico (S) depende de la tortuosidad, grosor y porosidad de dicha capa y tiene una relación muy significativa con el efecto de la polarización interna de la membrana. Si se consigue disminuir el valor de S, ya sea aumentando la porosidad, o disminuyendo el grosor o tortuosidad, la polarización interna se verá disminuida, mejorando el rendimiento de nuestra membrana como apreciamos en la figura 3.7. Algunas membranas experimentales se han logrado acercar a valores de S cercanos a $350 \mu\text{m}$, pero el objetivo a largo plazo es acercarse a los $100\text{-}150 \mu\text{m}$ consiguiendo la resistencia mecánica suficiente para soportar las presiones que sufre la membrana.

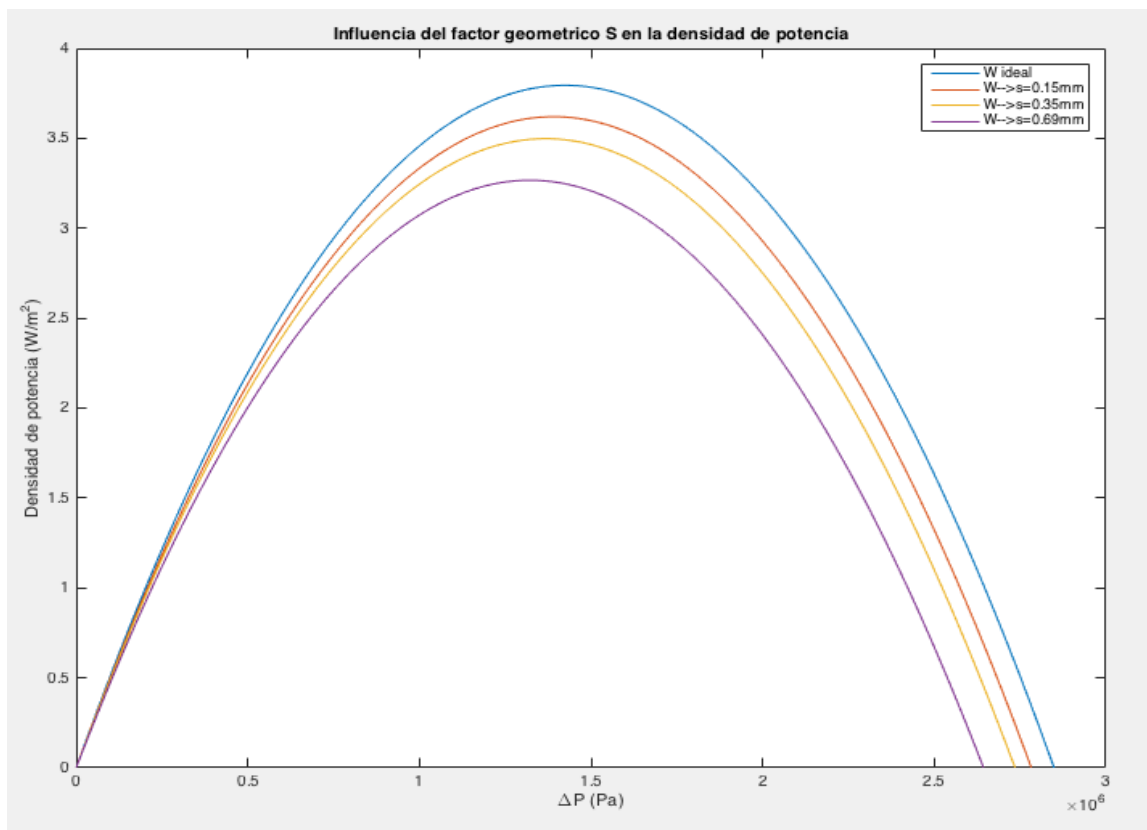


Figura 3.7 Análisis de la influencia del factor geométrico de la membrana en la densidad de potencia obtenida. *Elaboración propia*

3.2.1.5 MEMBRANAS EN APLICACIONES PRO

Las membranas desarrolladas para aplicaciones de OPR son generalmente asimétricas. Están compuestas por una capa de material poroso, la cual deja fluir a través de ella tanto el soluto como el disolvente y sirve para resistir las cargas mecánicas a las que es sometida la membrana, y una capa densa o activa, que es la encargada de realizar la difusión. Esta capa densa es la que permite el proceso de osmosis y de sus características dependen parámetros tan importantes como la permeabilidad del agua y la permeabilidad de la sal, por lo que es la parte más importante de la membrana y de la que se puede obtener mayor progresión en términos de rendimiento. Como es lógico, esta capa debe tener una alta permeabilidad acuosa y una baja permeabilidad salina, para conseguir este último objetivo los materiales utilizados de menor a mayor eficacia han sido: acetato de celulosa (CA), triacetato de celulosa (CTA) y por último un compuesto de película fina de poliamida (TFC). Recientemente se está estudiando cómo aumentar la permeabilidad de agua de esta capa de poliamida con tratamientos superficiales. Por otro lado los materiales más típicos usados en la capa porosa son el poliacrilonitrilo (PAN), el yoduro de propidio (PI), y la polietersulfona (PES).

Asimismo, la filtración en este tipo de membranas se realiza generalmente de forma tangencial, evitando lo máximo posible problemas de suciedad en un futuro, aunque este modo de filtración implique tener menos caudal disponible.

Respecto la configuración de las membranas se han utilizado tanto membranas de módulo tipo plano, como recientemente, membranas de fibra hueca, obteniendo mejores resultados en estas últimas.

En la tabla 3.2 se puede apreciar los mejores resultados obtenidos en laboratorio por membranas en términos de densidades de potencia

Tipo de membrana	Nombre de membrana	Material capa activa/capa soporte	Solución hipertónica (M NaCl)	Solución hipotónica (M NaCl)	Presión aplicada (bar)	Densidad de potencia (W)
Plana	TNC-PRO	PA / PAN	1.06	0.0009	15.2	21.3
Fibra hueca	PES-TFC	PA/PES	1	0	20	24.3

Tabla 3.2 Mejores resultados obtenidos a escala de laboratorio en membranas de aplicación OPR

3.2.1.6 MEMBRANAS ESCOGIDAS PARA NUESTRA CENTRAL

Para el diseño de la central se han escogido membranas planas de triacetato de celulosa (CTA), con configuración de tipo plana que tiene la ventaja de un mantenimiento más sencillo que el resto de configuraciones y un precio no excesivamente elevado. La filtración de la membrana será tangencial.

Aunque es cierto que hemos observado que de otros tipos de membranas se han obtenido resultados mucho más notables que con las membranas de CTA, puesto que esta membrana está optimizada para procesos de OD y no especialmente para OPR, se ha tenido que seleccionar dicha membrana por carencia de datos del resto de membranas especializadas, lo cual imposibilitaba realizar el análisis matemático y el cálculo de la densidad de potencia en distintas condiciones de salinidad y temperatura.

Para aplicar las ecuaciones [4] y [5] de Lee y Achilli, se deben conocer parámetros como pueden ser la permeabilidad acuosa y salina en la membrana. Para obtener estos datos característicos de la membrana hay que realizar diversos ensayos en el laboratorio, Achilli realizó estos ensayos para dichas membranas de CTA y calculó los parámetros necesarios para implementar dichas ecuaciones. Estos datos que se han utilizado para la realización de los cálculos de la central son los expresados en la tabla 3.4.

Símbolo	Parámetro	Valor
A	Permeabilidad del agua	$1.87 \cdot 10^{-9}$ m/sKPa
B	Permeabilidad de la sal	$1.11 \cdot 10^{-7}$ m/s
D	Coeficiente de difusión del NaCl	$1.5 \cdot 10^{-9}$ m ² /s
dh	Diámetro del canal hidráulico	$9.46 \cdot 10^{-4}$ m
Sh	Número de Sherwood	53
S	Factor geométrico	$6.9 \cdot 10^{-4}$
T	Temperatura del proceso	18°C
C_d	Concentración del agua dulce	38 g/L
C_s	Concentración del agua salada	0.01 g/L

Tabla 3.3 Parámetros característicos de la membrana seleccionada para nuestra central OPR

Utilizando las ecuaciones de Achilli, que podemos ver en el Anexo, obtenemos las

constantes características tanto del efecto de la polarización interna como de la polarización externa.

Símbolo	Parámetro	Valor
K	Resistividad del soluto para la difusión en la capa de soporte porosa	$4.6 \cdot 10^5 \text{s/m}$
k	Coefficiente de transferencia de masa en la solución salada	$8.403 \cdot 10^{-5} \text{m/s}$

Tabla 3.4 Parámetros de polarización externa e interna en las membranas seleccionadas para nuestra central OPR

La velocidad de permeado solo lo podemos obtener analíticamente o utilizando un cálculo iterativo utilizando la ecuación [4] de Achilli. Implementando dicha ecuación en Matlab obtenemos la densidad de potencia obtenida en función de la presión externa aplicada, cuyos resultados vemos en la figura 3.8.

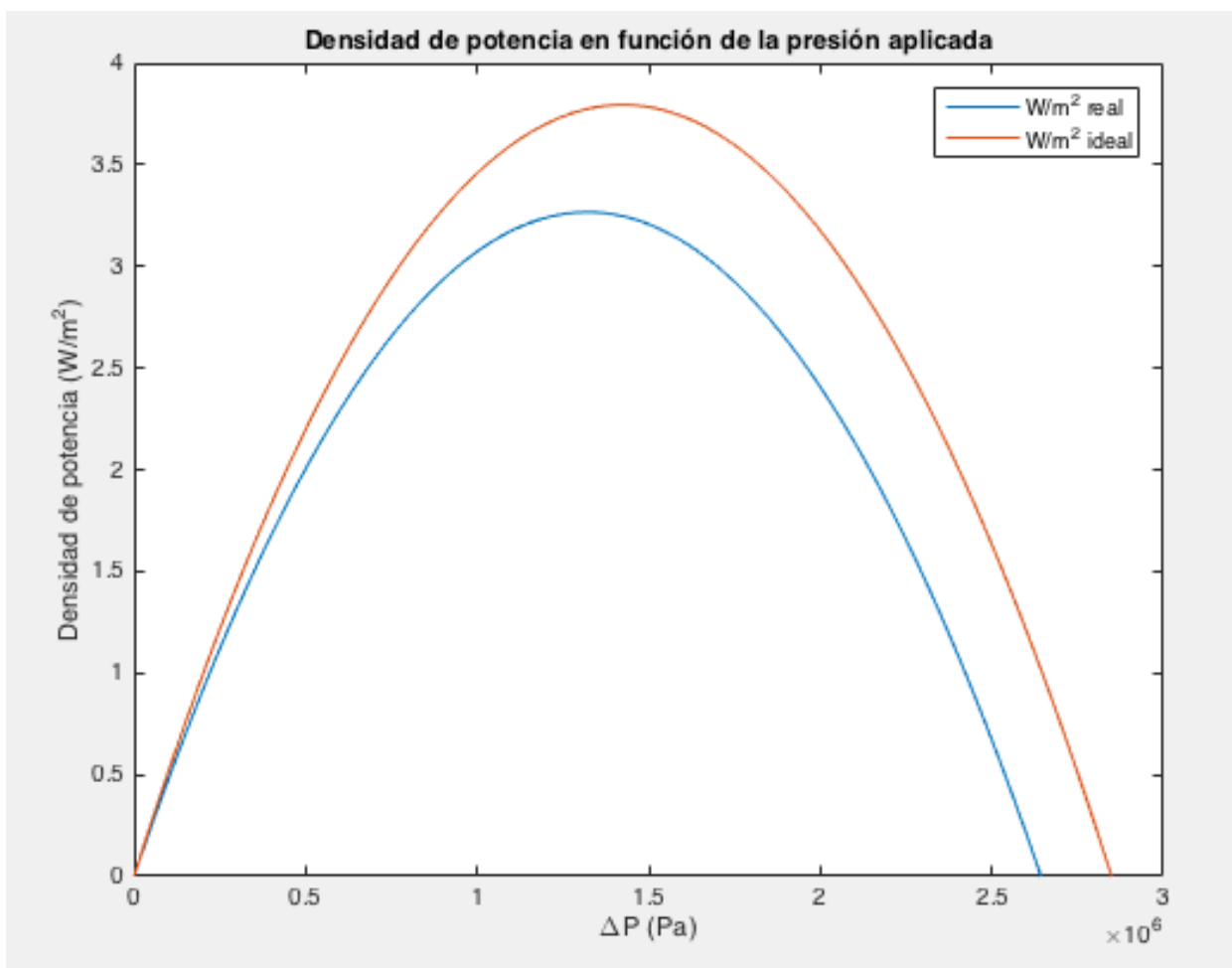


Figura 3.8 Curvas de la densidad de potencia ideal y real obtenida en la membrana seleccionada en función de

En la gráfica se puede observar que se logra en torno a una densidad de potencia neta un poco superior a 3 W/m^2 . Concretamente aplicando una presión externa de 1320.4 KPa se obtiene una densidad de potencia de 3.2668 W/m^2 y se consigue una velocidad de permeado de $2.47 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$. Por tanto, despreciando la pérdida de las dos bombas y del intercambiador de presión que se calculará posteriormente, los m^2 necesarios de membrana para generar 1 MW serán 306109.95 m^2 .

$$\text{Área de membrana} = \frac{W}{J_w \cdot \Delta P} = \frac{1 \text{ MW}}{2.47 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1320.4 \text{ kPa}} = 306109.95 \text{ m}^2$$

Esto significaría que se necesita que circule un caudal Q de $0.756 \text{ m}^3/\text{s}$ en condiciones ideales, ya que en condiciones reales se tendría aumentar el mismo para compensar las pérdidas por el rendimiento de los distintos equipos. El caudal definitivo se calculará posteriormente.

$$Q = J_w \cdot \text{Área de membrana} = 2.47 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 306109.95 \text{ m}^2 = 0.756 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

El precio aproximado de cada m^2 de membrana se encuentra entre $20\text{-}40 \text{ €}$ según Achilli [11], al ser este análisis del año 2009 y con la evolución realizada en las membranas para esta aplicación de los últimos años se supone un precio de dichas membranas de 20€/m^2 .

3.2.1.7 ENSUCIAMIENTO, FILTRADO Y LIMPIEZA DE MEMBRANAS

Un motivo común que puede suponer la pérdida de eficacia de las membranas semipermeables y que se debe tener en cuenta a la hora de diseñar es el ensuciamiento de las membranas. Una membrana en condiciones de suciedad puede tener incluso un 80% menos de rendimiento que una membrana en perfectas condiciones.

ENSUCIAMIENTO

Kim estudió el efecto de los contaminantes en las membranas semipermeables de aplicación OPR y mediante distintos casos experimentales obtuvo las siguientes conclusiones [7]:

- La contaminación por incrustación inorgánica era la más representativa y la que reducía en mayor grado el flujo a través de la membrana. Tenía una

- presencia superior a la contaminación de tipo orgánica.
- Los contaminantes se acumulan mayoritariamente en la estructura porosa y en la capa en contacto con la alimentación. Esto se debe a que el fluido permea desde el lado de alimentación hacia el de drenaje.
 - El contaminante que más negativo y que mayor influencia tenía era el sulfato de calcio.
 - La presencia de contaminantes en la membrana puede reducir el rendimiento de la membrana a un rendimiento del 70% del habitual, por lo que serán necesarios pretratamientos del agua y limpiezas periódicas de la misma, estos serán más necesarios en la solución de alimentación debido a lo descrito en el punto 2.

En las membranas semipermeables se puede observar tres tipos de suciedad principalmente, de menor a mayor gravedad:

- Estrechamiento de los poros: Los contaminantes son absorbidos y adheridos a los poros de la membrana, pero sin llegar a taponar los mismos.
- Taponamientos de los poros: Los contaminantes se incrustan en los poros de la membrana, taponando totalmente los mismos.
- Formación de placa o costra: Este caso es el que produce mayor pérdida de eficiencia de la membrana. Se forma una capa de suciedad en la superficie membrana, taponando todos los poros que se encuentren en la misma.

Estos tipos de ensuciamiento se debe intentar subsanar, debido a que influyen en la capacidad de la membrana para permear agua a su paso y por tanto influye notablemente en la densidad de potencia generada.

Para remediar esta suciedad se realizan periódicamente varios procesos de limpieza y se instalan estaciones de tratamiento y filtrado, tanto para el agua procedente del mar como del río, eliminando la mayor parte de las impurezas posible y consiguiendo que las membranas se ensucien lo menos posible.

FILTRADO

El filtrado tanto de las aguas de río como de las aguas de mar será vital en el proceso. El objetivo de este filtrado es que el agua llegue en perfectas condiciones para realizar el proceso de osmosis en la membrana, por lo que no se necesitará tanta calidad de filtrado como en el tratamiento de aguas potables, aunque el tratamiento es bastante similar. Para un tratamiento mínimo, el agua debe pasar por los siguientes filtros tanto para agua de mar como para el agua del río.

- Filtros de sedimentos: Este tipo de filtro es el primero que se encuentra en un tratamiento de agua y se encarga de filtrar materiales en suspensión como pueden ser arena, barro, suciedad que se haya vertido al río y al mar, es decir cualquier partícula sólida que arrastre el agua. Este filtro, a parte de ser esencial en la eficiencia de la membrana protege a los diversos equipos de la central de posibles deterioros por erosión y abrasión. Pueden ser filtros de bolsa o de cartucho, siendo este último el utilizado para este tipo de aplicaciones por ser más efectivo a la hora de filtrar y poder realizarlo con partículas de menor tamaño.
- Filtros de arena: Son especiales para eliminar componentes orgánicos. Estos contaminantes son atrapados por un lecho filtrante de arena a su paso. Los contaminantes pueden ser capturados por diversos mecanismos como colisión directa, mediante fuerzas de atracción de Van der Waals, atracción de carga superficial o difusión. Según como fluye el fluido se clasifican en tres tipos, filtros de arena rápidos o de gravedad, filtros de flujo ascendente y flujo de arena lentos, siendo estos últimos los más indicados, ya que el resultado después de que el agua pase a través de ellos es de gran calidad y no necesita el uso de agentes químicos a diferencia del rápido y ascendente.

El filtro de arena será de distintas características para el agua de río que para el del agua de mar, debido a que en este último el filtro de arena no debe en ninguno de los casos filtrar las sales minerales del mar que provocan la osmosis.

- Filtración con carbón activado: Los filtros de carbón activado tiene un método de filtración similar al de arena, creando un lecho filtrante. Su funcionamiento se basa en el proceso de adsorción y son altamente recomendables para filtrar elementos como cloro o compuestos orgánicos volátiles. Su uso no es indispensable como el filtro de arena o de sedimentos, pero si es recomendable para determinados tipos de membrana.

LIMPIEZA

Aunque la etapa de filtrado evita que lleguen a la membrana una gran cantidad de contaminantes, es cierto, que no es capaz de evitar que algunos de estos lleguen a la misma, por lo que es necesario realizar limpiezas periódicas de estas para que tengan un correcto funcionamiento.

LIMPIEZA HIDRODINÁMICA

En primera instancia se probaron dos métodos de limpieza hidrodinámicos, la limpieza física y el retrolavado osmótico.

La limpieza física consiste en aumentar considerablemente la velocidad del flujo cruzado a la membrana de tal manera que este libere las partículas contaminantes del sistema, mientras que el retrolavado osmótico radica en hacer fluir agua desde el lado de drenaje hacia el de alimentación con el objetivo de limpiar las membranas.

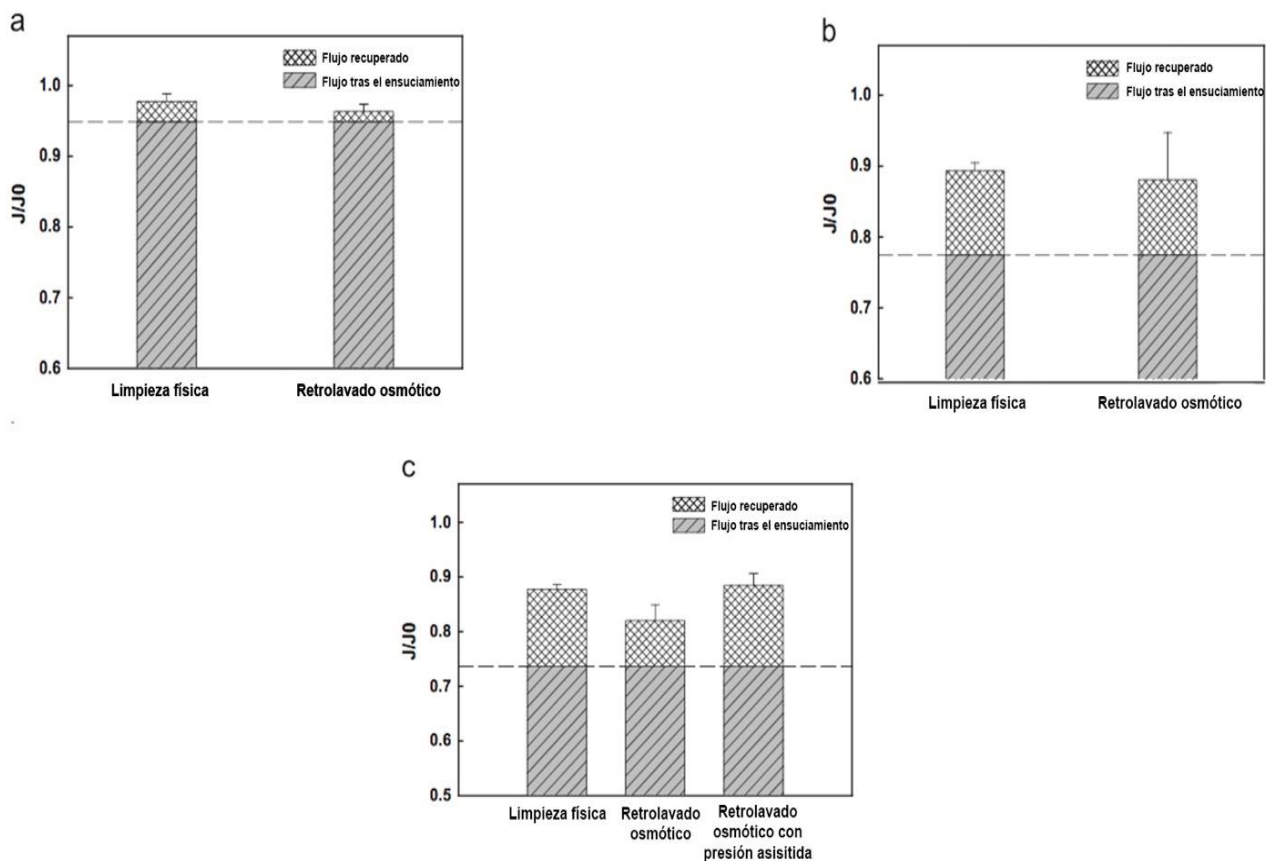


Figura 3.9 Eficacia en la limpieza de membranas de los distintos métodos hidrodinámicos. Limpieza física, retrolavado osmótico, retrolavado osmótico con presión asistida. Adaptado de [9].

En la figura 3.9 se puede ver la eficacia de los distintos sistemas de limpieza hidrodinámicos.

La gráfica A representa el efecto de contaminantes orgánicas, la B los contaminantes inorgánicos, mientras que la C ambos. Se observa cómo se había citado anteriormente que los contaminantes orgánicos reducen menos el flujo permeado que los contaminantes inorgánicos. Tras la aplicación de los sistemas de lavado, se puede percibir en la gráfica C, que se recupera parte del flujo perdido, siendo más eficaz el método de limpieza física que el retrolavado osmótico. Sin embargo, a pesar de que la limpieza física es la más eficaz, tras la limpieza no se llega a recuperar ni el 90% del flujo inicial permeado por lo que los tratamientos hidráulicos no son del todo eficaces para realizar la limpieza de la membrana. El motivo de que el retrolavado osmótico tuviera tan bajo rendimiento se debe a la estructura asimétrica de la membrana semipermeable en OPR, la cual está diseñada para que el fluido circule desde el lado de alimentación al de drenaje. Esto último se intentó subsanar aplicando para la limpieza una presión de 10 bar al fluido para intentar aumentar la velocidad de este atravesando la membrana, pero ni de este modo se consiguió obtener un rendimiento notablemente superior a la limpieza física.

PRETRATAMIENTO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ANTI-INCRUSTANTE

Debido a que las limpiezas de tipo hidrodinámica no son de todo eficaces, se optó por intentar aplicar un pretratamiento a las membranas de tal forma que evite el incrustamiento de contaminantes inorgánicos en dichas membranas. El anti-incrustante utilizado fue *Genesys PHO*. Añadiendo entre 1-5 mg/L se logra que la incrustación de dichos contaminantes no se produzca tan fácilmente y el flujo se mantenga relativamente constante con el paso del tiempo. El motivo de que este anti-incrustante sea eficaz en esta aplicación es que aumenta notablemente la solubilidad del fosfato de calcio. Un inconveniente del uso de *Genesys PHO* es su precio elevado, por lo que se debe aplicar la cantidad más baja posible que evite el decrecimiento del flujo permeado inicial. En la figura 3.10 podemos observar como a partir de aplicar un poco más de 1 mg/L de este anti-incrustante se consigue estabilizar el flujo permeado y por tanto la densidad de potencia obtenida.

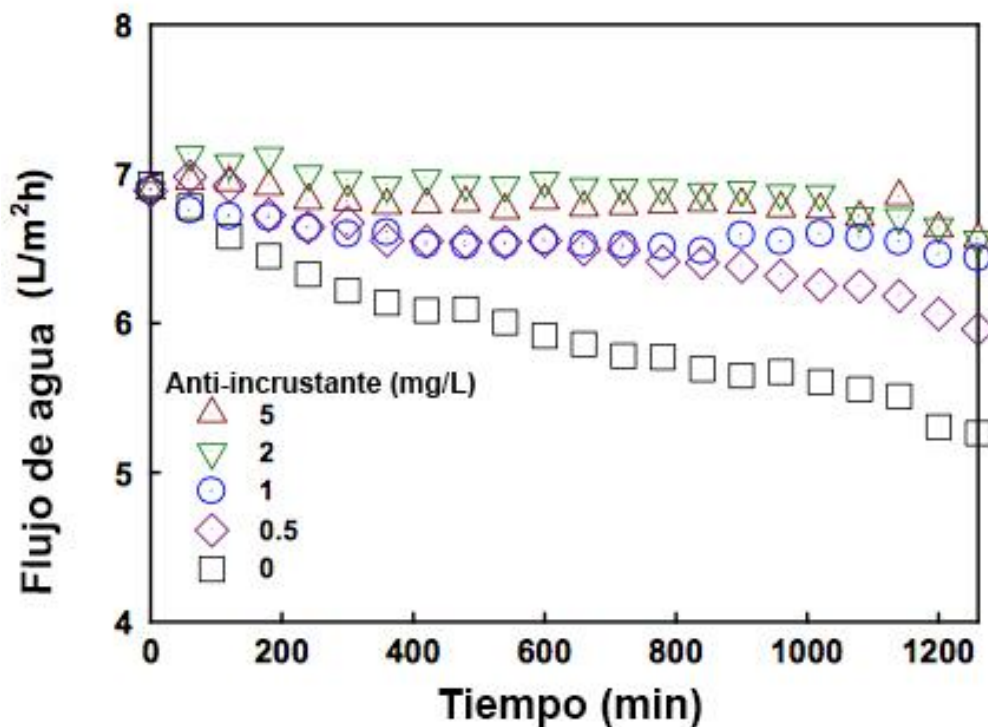


Figura 3.10 Eficacia del uso de anti-incrustante Genesys PHO para mantener el flujo de agua a través de la membrana constante [9]

3.2.2 INTERCAMBIADOR DE PRESIÓN

Un intercambiador de presión o más conocido como *Pressure Exchanger* es un elemento que permite traspasar presión de un fluido de elevada presión a otro de una presión más baja. Es de gran utilidad cuando hay flujos de residuo de una gran presión, ya que se recupera parte de la energía de estos, como puede suceder en OPR o casos de osmosis inversa.

El intercambiador de presión nos aporta una gran ventaja ya que permite presurizar de una forma directa el fluido de alimentación, de esta forma se evita transformar la energía del fluido presurizado en energía mecánica y posteriormente presurizar el fluido de alimentación con una bomba, por lo que se reduce notablemente las pérdidas y aumenta el rendimiento de la central.

Generalmente un intercambiador de presión se basa en un soporte de cerámica, un rotor, un manguito y dos entradas para la entrada y salida del fluido de alimentación y el fluido concentrado. El material utilizado es cerámico por su alta resistencia mecánica y hacia la corrosión.

El funcionamiento del intercambiador de presión pasa por 4 etapas que se puede apreciar en la imagen 3.11:

1. En la primera etapa el conducto está colocado en la posición en la que se encuentran la entrada del fluido de alimentación y la salida del fluido realimentado encargado de presurizar, al que se denomina fluido residual. En esta etapa conducto del rotor se llena totalmente de fluido de alimentación y descarga el fluido residual, que ya no estaba presurizado.
2. En la segunda etapa el conducto del rotor gira dentro del manguito a la vez que entra en una zona de sellado donde el fluido se detiene.
3. En la tercera etapa el rotor sigue girando hasta llegar a la zona donde se encuentra la zona de entrada del fluido residual y de salida del fluido de alimentación. En esta etapa el fluido residual comprime al fluido de alimentación, traspasándole su presión a este. Posteriormente se abre la tapadera de la salida del fluido de alimentación, el ya presurizado.
4. En la cuarta etapa el conducto del rotor se vuelve a sellar y vuelve a la posición inicial de la etapa 1, cerrando de esta manera el ciclo.

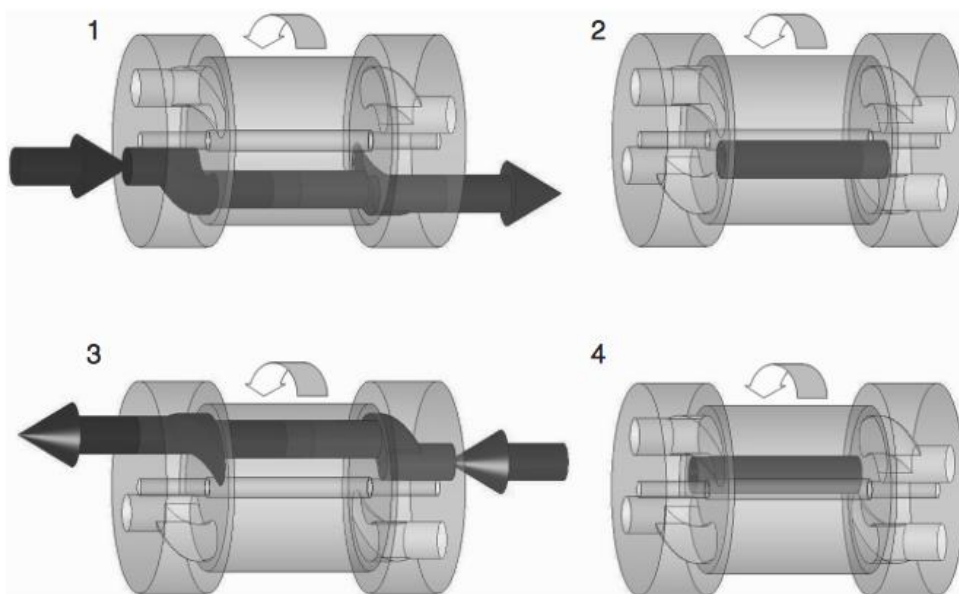


Figura 3.11 Funcionamiento de un intercambiador de presión. Fuente [26].

Hay que destacar que los dos líquidos no permanecen en contacto en ningún momento en el intercambiador de presión. Se separan o bien por otro líquido o bien una bola que actúa como separador físico.

Una de las pocas empresas que comercializa este tipo de productos es la empresa *Energy Recovery*. Esta empresa está especializada en la producción de intercambiadores de presión para aplicaciones de recuperación de energía en Osmosis Inversa, sin embargo serán igual de útil en aplicaciones OPR ya que el

funcionamiento dentro del intercambiador de presión es exactamente igual en ambos procesos.

Se puede ver su gama de productos, así como su eficiencia y caudal procesado en la figura 3.12.

PX Model	Minimum Guaranteed Efficiency*	Flow Range per Unit (brine flow)
PX-Q300	97.2%	45.4 - 68.1 m ³ /h
PX-Q260	96.8%	40.8 - 59 m ³ /h
PX-260	96.8%	40.8 - 59 m ³ /h
PX-220	96.8% (@45.4 m ³ /h)	31.7 - 49.9 m ³ /h
PX-180	96.7% (@36.3 m ³ /h)	22.7 - 40.8 m ³ /h
PX-140	94.8% (@22.7 m ³ /h)	20.4 - 31.7 m ³ /h
PX-90	96.0% (@15.8 m ³ /h)	13.6 - 20.4 m ³ /h
PX-70	95.3% (@11.3 m ³ /h)	9.08 - 15.8 m ³ /h
PX-45	94.0% (@7.9 m ³ /h)	6.81 - 10.2 m ³ /h
PX-30	93.4% (@5.6 m ³ /h)	4.54 - 6.81 m ³ /h

Figura 3.12 Distintos modelos de intercambiador de presión de la empresa Energy Recovery.

Elegimos el PX-Q300, el cual tiene un rendimiento garantizado del 97.2%.

Dicho modelo será el seleccionado ya que de todos los disponibles es el que mejor rendimiento tiene y se necesita una cantidad elevada de caudal, por lo que será necesario incluir una cantidad numerosa de intercambiadores de presión.

Posteriormente se calculará el número exacto de intercambiadores de presión necesarios y además se añadirán dos intercambiadores de presión auxiliares para que en caso de fallo de alguno de estos no se tenga que parar el funcionamiento de la central.

El precio aproximado por unidad de los intercambiadores de presión será de 28000€ [Fuente: <https://www.zauba.com>].

3.2.3 BOMBA ELEVADORA DE PRESIÓN

La bomba elevadora de presión en el sistema es indispensable para compensar las pérdidas que tiene el intercambiador de presión y mantener constante la presión del ciclo, si no se incluye está en el ciclo se perdería presión poco a poco hasta el punto

de entrar en un proceso de osmosis directa y no se produciría energía. La bomba es el elemento que mantiene la estabilidad de la presión en el ciclo.

El intercambiador de presión con el rendimiento de 97.2% recupera una presión de la corriente de realimentación de 1283.42 KPa, por lo que la bomba debe aportar 36.97 KPa a un caudal de 1.134 m³/s inicial que luego se verá incrementado para subsanar las pérdidas en los distintos equipos.

El caudal aproximado de la bomba será de unos 5000 m³/h y la altura manométrica es de 3.8 m.

Para la elección de la bomba se contactó con la empresa KSB, los cuales recomendaron utilizar su bomba Sewatec K 400-500G1 H en configuración de 3+1, debido a que se tiene mucho caudal para poco incremento de presión por lo que utilizar un sistema de tres bombas en paralelo es la mejor opción. También se incluirá una bomba auxiliar, que en caso de fallo de una de las bombas permita no tener que parar toda la central, al igual que los intercambiadores de presión de repuesto.

Las bombas operarán a 1670 m³/h y a 3.8 m de altura manométrica.

El rendimiento de la bomba es de un 75.7% como se puede ver en el ensayo de la bomba en las condiciones de operación, el cual se encuentra en el anexo, con otras características de dicha bomba.

El precio que aproximado que proporcionó KSB fue de 70.000 euros por bomba.

3.2.4 TURBINA

La turbina hidráulica es el elemento de la central del cual se extrae la potencia eléctrica generada por la central. La diferencia de presión entre el agua de salida resultante de la membrana se aprovechará en el eje de la turbina, transformando dicha energía en energía mecánica. Este eje tendrá acoplado un generador, el cual producirá la energía eléctrica.

Dentro de las turbinas hidráulicas se puede destacar tres tipos fundamentales, entre las que se tendrá que elegir el modelo más conveniente para la central:

Turbina Pelton: Es una turbina de acción, es decir, que el movimiento de la misma es debido a la propia incisión del chorro de agua. El agua fluye de forma tangencial.

Este tipo de turbina es utilizada cuando hay grandes saltos de altura manométrica, o lo que es lo mismo el agua incide a grandes velocidades, y hay pequeños caudales de agua.

Turbina Kaplan: Es una turbina de reacción, el giro de la turbina no coincide con el de entrada y salida del agua, la energía se cede a partir de la disminución de la presión del fluido que pasa por la turbina. El fluido entra a dicha turbina de forma axial y sale de igual forma. Típicamente, este tipo de turbinas se utilizan en aplicaciones en las que se tiene un gran caudal, y un salto de altura reducido.

Turbina Francis: Su funcionamiento y estructura es bastante similar a la turbina Kaplan, pero siendo bastante más versátil que esta. Es considerada una turbina de reacción, pero se diferencia de la Kaplan en que el fluido entra radialmente. Es utilizada en grandes rangos tanto de caudales como de saltos de altura.

Viendo la breve descripción de los tres modelos típicos de turbina hidráulicas se puede apreciar que la elección del tipo de turbina va a depender de dos parámetros fundamentales, el salto de altura manométrico y el caudal de agua que atraviesa la turbina.

La altura manométrica se obtiene fácilmente una vez conocida la diferencia de presión y la densidad a partir de la siguiente fórmula:

$$H = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad [9]$$

Por otro lado el caudal que incide en la turbina es el ΔQ producido en las membranas, que en un cálculo inicial será de $0.756 \text{ m}^3/\text{s}$ y el salto de altura producida en la misma será de 134.73 m

Para elegir el tipo de turbina se ha utilizado el software online *KFP Global Hydraulic Software* (<http://www.globalkfp.es>), en el cual introduciendo estos dos parámetros, se obtiene mediante la figura 3.14 el tipo de turbina hidráulica más conveniente a utilizar.

Este software también proporciona una potencia estimada que se obtendrá de la turbina, en este caso será de 897 KW , por lo que se puede obtener el rendimiento de la turbina que será del 90% aproximadamente.

Campo de funcionamiento C.H. Planta osmotica

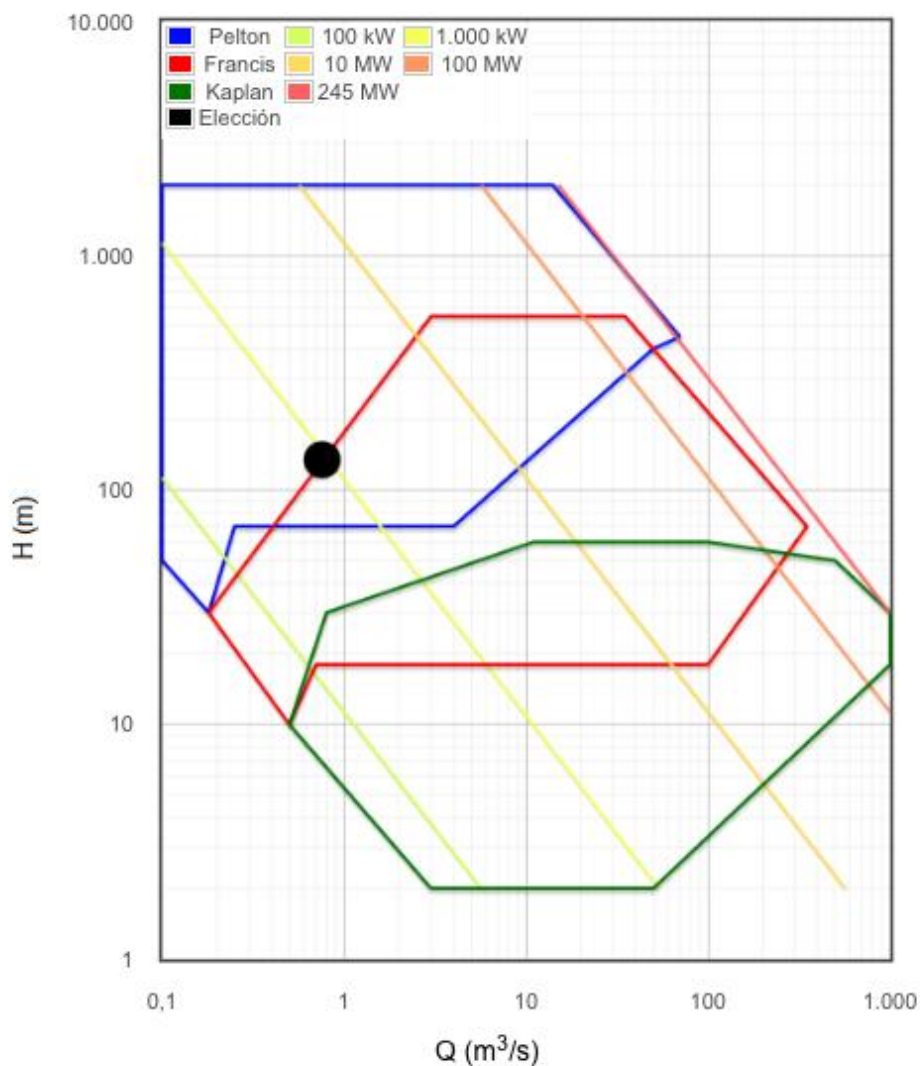


Figura 3.13 Mapa para la elección de la turbina hidráulica según el caudal y salto de altura manométrico.

En primera instancia el software nos indica que el tipo de turbina hidráulica más adecuado es el tipo de turbina Pelton, aunque el uso de una turbina Francis como se puede ver en la gráfica no es disparatado. Además el uso de una turbina Francis permite un mejor funcionamiento en caso de que en un futuro se quiera aumentar la potencia generada por la planta.

La altura manométrica al depender directa y únicamente de la presión osmótica se mantendrá constante y los posibles aumentos de la potencia de la central dependerán del caudal. Se puede apreciar en la figura 3.13 que la turbina Pelton funciona correctamente hasta los $10 \text{ m}^3/s$, por lo que escogemos este tipo de turbina, aunque también se podría escoger la turbina Francis en caso de que en un futuro se pretenda superar el caudal de $10 \text{ m}^3/s$ para generar en torno a los 10 MW.

Las turbinas hidráulicas en la gran mayoría de ocasiones se encargan a medida, sin embargo, la marca Siapro Hydro Turbine ya fabricó una turbina Pelton vertical de la cual se obtenía 1 MW, la cual se puede ver en la figura 3.15. A dicha turbina se le aportaban 122.5 m de altura hidrostática en una central de Albania, por lo que el uso de esta turbina para la planta sería correcto.



Figura 3.14 Turbina Pelton hidráulica de Siapro utilizada en una central de generación hidroeléctrica de 1 MW:
Fuente: <http://en.hydro-electricity.eu/>

El rendimiento de este tipo de turbinas gira en torno al 90% y será el utilizado para el resto del trabajo.

El precio de la turbina será de 450.000 €. Es un precio aproximado que se ha obtenido mediante el desglose del presupuesto de la inversión de una central hidroeléctrica [27], debido a que Siapro no nos proporcionó el precio exacto de dicha turbina.

4- ESQUEMA Y PARÁMETROS DEFINITIVOS DE LA CENTRAL

Una vez que se tienen seleccionados los distintos elementos de la central, con sus respectivos rendimientos, se puede redimensionar para que la central genere 1 MW neto de potencia teniendo en cuenta en el análisis las pérdidas por los rendimientos.

$$W_{generado} = \frac{W_{neto}}{\eta_{central}} = \frac{1MW}{0.9 - \frac{1.5(1 - 0.972)}{0.757}} = 1.184 MW$$

Utilizando la ecuación [7] y la ecuación [8] se obtiene que la potencia que tiene que obtener la turbina es de 1.184 MW, lo que lleva asociado un caudal a través de la membrana de 0.896 m³/s, y por tanto finalmente se necesitan 362754 m² de superficie de membrana.

Una vez conocidos todos los componentes y rendimientos de los mismos se puede conocer las presiones y caudales de la planta que quedarían representados en la figura 4.1.

ESQUEMA DE LA PLANTA DE GENERACIÓN ÓSMÓTICA

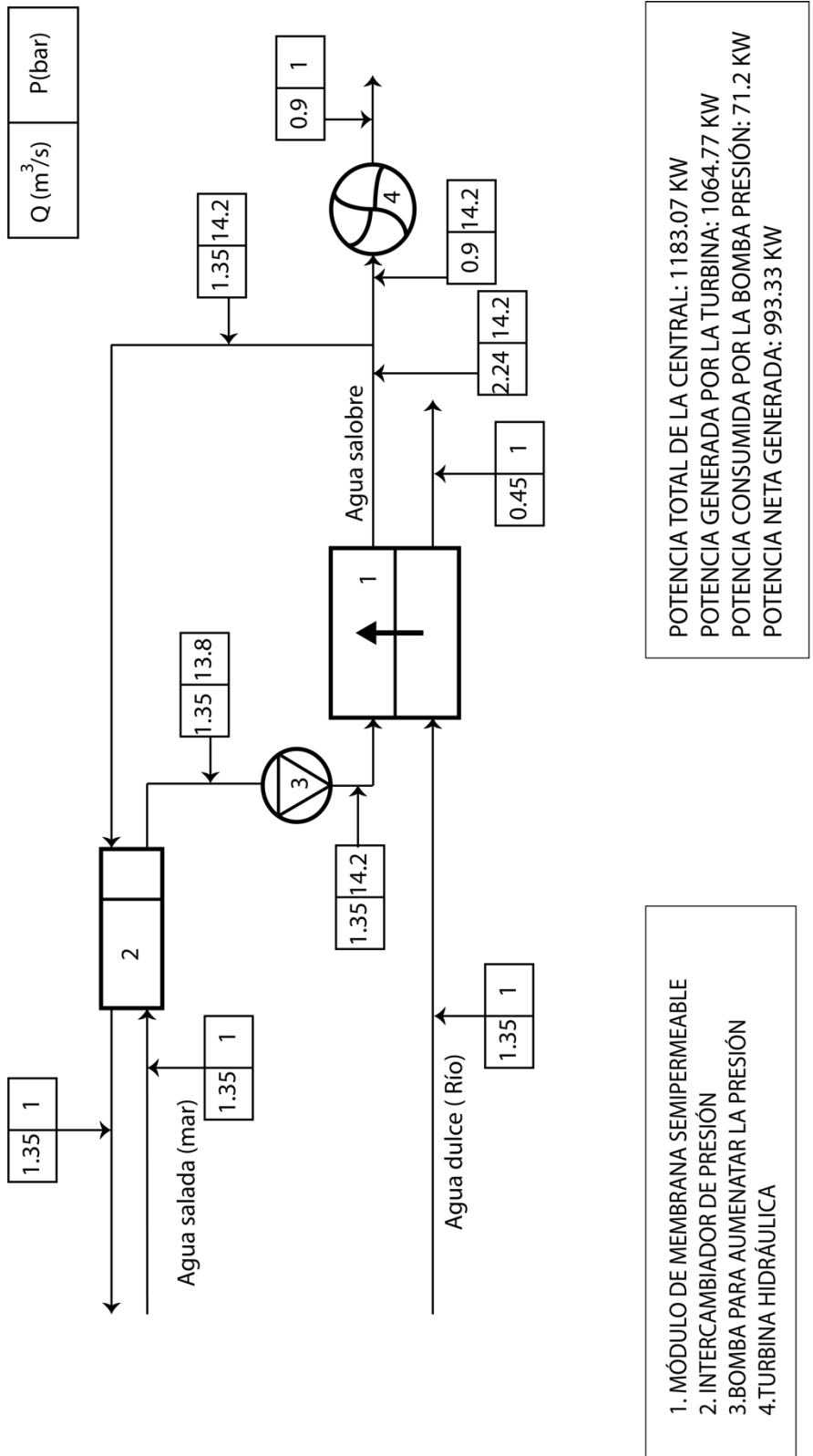


Figura 4.1 Esquema de la central con los valores numéricos de presión y caudal en los puntos clave. Elaboración propia.

Finalmente los componentes necesarios en la central y los parámetros más característicos de la central son los representados en la tabla 4.1.

PRINCIPALES PARAMETROS CENTRAL	
COMPONENTES NECESARIOS	
Superficie de membrana CTA plana requerida (m ²)	362754
Intercambiadores de presión PX-Q300 operando a 68 m ³ /h	71+2=73
Bomba KSB Sewatec K 400-500G1 H	3+1=4
Turbinas Pelton Siapro Hydro Turbine 1MW	1
PARÁMETROS NATURALES RELEVANTES	
Salinidad del agua del Delta del Ebro (g/L)	38
Salinidad del agua del río Ebro (g/L)	0.25
Caudal disponible (m ³ /s)	31.12
Temperatura media (°C)	18
PARAMETROS INTERNOS DE LA CENTRAL	
Presión osmótica (KPa)	2880
Presión aplicada a la solución salada (KPa)	1320.4
Caudal necesario agua dulce (m ³ /s)	1.345
Caudal necesario agua salada (m ³ /s)	1.345
Caudal permeado a través de la membrana (m ³ /s)	0.896
Velocidad de permeado(m/s)	2.47·10 ⁻⁶
Densidad de potencia generado por unidad de membrana (W/m ²)	3.266
Potencia media generada necesaria (KW)	1183.07
Potencia media eléctrica producida (KW)	1064.77
Potencia media consumida por la bomba (KW)	71.2
Potencia media neta generada (KW)	993.33

Tabla 4.1 Principales parámetros de la central de generación OPR de 1MW ubicada en el Ebro.

5- IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIAL

5.1 IMPACTO AMBIENTAL

Como es lógico, los entornos afectados ambientalmente serán el río y el mar que se utiliza para producir la energía. Sin embargo como se verá a continuación estos impactos son bastante leves, tomando ventaja en este aspecto con las tipos de energía convencionales que utilizan combustibles fósiles. Dicha contaminación puede ser comparable al resto de energías renovables en términos de impacto, pero con la ventaja de poder aportar una producción de energía bastante predecible.

5.1.1 IMPACTO AMBIENTAL EN EL MAR

En primera instancia observando el esquema de la central propuesta en la figura 4.1 se puede pensar que la utilización de esta energía no tiene asociado un impacto negativo al medioambiente más que el propio impacto estructural, debido a que únicamente se retiene temporalmente para producir energía parte de la desembocadura, en este caso del río Ebro, pero luego dicho cauce de agua sigue su curso natural y acaba desembocando en el mar. De hecho se podría llegar a la conclusión de que pudiera ser beneficioso, ya que al mezclar esta agua en nuestra central con agua procedente del mar se genera como residuo agua salobre que tiene una concentración de sales más próxima al agua del mar que la del propio río, por lo que aparentemente tendrá menor impacto que esta.

Sin embargo, lo anteriormente expuesto no es del todo cierto, ya que en la desembocadura del río se hace en un espacio bastante más abierto que la desembocadura que tendrá el agua salobre procedente de nuestra planta. Por tanto, existirá un pequeño impacto ambiental en dicho ecosistema, aunque no muy elevado. Sin ir más lejos el impacto ambiental de procesos como la desalinización de agua son mucho más problemáticos para el ecosistema del mar, ya que en este proceso se extrae agua del mar devolviendo al mismo las sales con una salmuera de concentración elevada. A pesar de que no afecte en gran medida al ecosistema es conveniente tomar algunas medidas para que la instalación afecte lo menos posible.

En la tabla 5.1 se puede ver cómo afectan los cambios de salinidad en las diversas especies marinas. Observando dicha tabla se puede llegar a la conclusión de que el punto de vertido del agua salobre de nuestra central, es recomendable que no esté cerca de ningún ecosistema de fanerógamas marinas y moluscos ya que son los

conjuntos de especies más vulnerables a variaciones salinas. Se tendrá que tener especial cuidado con las fanerógramas marinas

Espece	Variaciones de salinidad toleradas (psu o g/L)
Fanerógramas marinas	
Posidonia oceánica	1.5
Cymodocea nodosa	7
Otras fanerógrmas	20
Macroinvertebrados bentónicos	
Moluscos	2
Crustáceos	5
Equinodermos	6
Peces	10
Algas	10

Tabla 5.1 Influencia de la variación de salinidad en distintas especies marinas. Datos extraídos de [29].

En caso de que se necesite por motivos estructurales poner el punto de vertido al mar cerca del algún ecosistema que pueda verse afectado por dicha contaminación hay métodos para hacer que esta sea menos agresiva al medio.

- Emisario submarino: Este método es bastante sencillo y eficaz. Consiste en elevar la salida de la tubería del vertido una cierta altura por encima del nivel del mar, colocando en esta dicha misma difusores y dándole un ángulo de salida. Con este diseño se conseguirá que el agua salga de la tubería realizando una especie de parábola, logrando que abarque más área de salida y tenga una mejor adaptación en el medio.
- Elevar la salinidad del agua salobre previamente: Este método solo se utilizará cuando sea explícitamente necesario, ya que para llevarlo acabo se necesita incluir en el sistema un mayor caudal de agua de mar que elevará el consumo de nuestro sistema.

5.1.2 IMPACTO AMBIENTAL EN EL RÍO

En el río no se tiene ningún problema aparente ambiental salvo la desviación del caudal del río a la central. Respetando el caudal mínimo del río, a priori, no se modificará el ecosistema del mismo.

Sin embargo, el cauce del mismo va cambiando cada año, por lo que se tiene que asumir un posible riesgo, ya que en un año de sequía si el caudal baja a unos niveles históricos sin precedentes se tendría que inhabilitar la central para salvar el ecosistema de dicho río. La central al ser de tan solo 1 MW tiene bastante margen de operabilidad, unos 30 m³/s con el caudal vital y sería muy complicado llegar a este punto, pero en centrales que produzcan más energía si sería necesario tenerlo en cuenta.

Podría ser interesante desarrollar un sistema electrónico que según el caudal del río permite a la central obtener más o menos agua del mismo, aunque como se ha dicho ya anteriormente, con el precio actual de las membranas no se puede permitir que algunas no funcionen a tiempo completo.

5.2 IMPACTO SOCIAL

Sin tener en cuenta términos económicos puede ser que el impacto social en primera instancia sea el mayor inconveniente de esta forma de producir energía.

Hablando concretamente del emplazamiento escogido, la zona de la costa mediterránea es una zona muy turística por lo que el impacto visual de la misma es importante y no sería agradable para los turistas encontrarse en plena zona costera una central de producción de energía eléctrica con las dimensiones de la misma, a pesar de que las centrales OPR son más pequeñas que la mayoría del resto de centrales renovables.

La solución de este problema más recomendada, y prácticamente necesaria por el problema descrito, sería soterrar la central, se podría soterrar la misma una profundidad que rondara entre los 50-150 m sin que afecte al rendimiento de la misma [30]. Esto elevará el coste de operabilidad de la central, tanto por la mayor dificultad del mantenimiento de los equipos, como por la necesidad de añadir equipos de bombeo para transportar el agua hacia esa zona.

Solventando este problema, la aceptación social sería positiva, debido a que se trata de una fuente de generación de energía nueva y limpia. Además llevaría asociada numerosos puestos de trabajo para el mantenimiento de la misma.

6- NORMATIVA RELACIONADA

Las limitaciones legislativas que tenemos a la hora de implantar nuestra central de generación OPR están principalmente enfocadas a mantener la calidad de los ecosistemas acuáticos involucrados en proceso y son las siguientes.

Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas [32].

La ley de aguas tiene como objetivo principal establecer las normas generales del uso nacional del agua de nuestro país. Establece las normas básicas para proteger las tanto las aguas continentales como costeras. También recalca claramente que pertenece al Estado únicamente establecer el plan hidrográfico [27].

Capítulo 3 – Caudales ecológicos. Real Decreto 129/2014, de 28 de febrero, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Ebro [33].

En este capítulo se determinan los caudales ecológicos que hay que preservar en cada zona del río Ebro. En el anexo 7 de este decreto se encuentran los valores de este caudal ecológico en las distintas zonas del río Ebro. Estos caudales serán controlados por la cuenca hidrográfica periódicamente y se considerará que se cumple el objetivo cuando los caudales registrados son superiores al mínimo en un 90 % del tiempo.

En este capítulo, también se comenta que el motivo de preservar estos caudales se puede deber tanto a un interés ambiental como un interés social.

También puede resultar de interés lo que se comenta en el apartado 17 perteneciente a este capítulo, el cual describe que en condiciones de sequía estos límites podrán verse reducidos siempre y cuando se cumpla el artículo 38 que trata sobre la asignación y reservas de recursos.

Capítulo 4 – Usos y demandas. Prioridad y compatibilidad de usos. Real Decreto 129/2014, de 28 de febrero, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Ebro [33].

En este capítulo se trata principalmente la priorización de los recursos de la cuenca en caso de carencia de ellos.

El aspecto industrial de generación eléctrica queda representado en un tercer lugar tras el abastecimiento de la población y las actividades agropecuarias.

Dentro del grupo de producción de energía eléctrica, la producción de nuestra planta no estaría reflejada, pero al ser su fluido principal de trabajo el agua estimo que se incorporaría al primer grupo de prioridad en el cual se encuentra las centrales hidroeléctricas y de fuerza motriz.

Real Decreto 1327/1995, de 28 de julio, sobre las instalaciones de desalación de agua marina o salobre.[34]

Bien es cierto que nuestra centra como vimos en el impacto ambiental no es comparable a los niveles de contaminación de las plantas desalinizadoras, pero el mecanismo de contaminación es bastante similar a esta y al no haber un decreto sobre plantas OPR en este decreto podemos observar de una forma aproximada los planes de actuación que se podrían llevar en un futuro, llegando a coincidir algunos artículos.

Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas [35].

La ley de costas españolas tiene como objetivo garantizar la conservación de dichas costas tomando las medidas de protección y restauración necesarias, regulando el uso de las mismas y respetando el paisaje de las mismas así como el medio ambiente. También se encargará de asegurar la calidad del agua de las mismas.

Debido a esta ley y relacionado también con el impacto social es posible que nos viéramos obligados a soterrar nuestra planta.

7- ANÁLISIS ECONÓMICO

Como ya se citó en el apartado de desventajas el principal problema de esta tecnología es su rentabilidad económica, ya que al estar todavía en fase de desarrollo no es compatible con el resto de tecnologías renovables y mucho menos con las tecnologías de producción convencionales.

Achilli dedujo una expresión para analizar la rentabilidad de este tipo de centrales que es la siguiente [13]:

$$\frac{\text{Ingresos}}{\text{m}^2 \text{ de membrana} \cdot \text{año}} = \text{Densidad de potencia} \cdot \text{Precio de energía}$$

En España el precio medio de la energía suele rondar 0.115 €/KWh y la densidad de membrana obtenida en nuestro análisis fue de 3.2668 W/m², por lo que:

$$\frac{\text{Ingresos ideales}}{\text{m}^2 \text{ de membrana} \cdot \text{año}} = 3.2668 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0.115 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 3.29 \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \text{ de membrana} \cdot \text{año}}$$

Achilli limitó su estudio a las membranas y no tuvo en cuenta los rendimientos del resto de equipos de la central, el cual si se tendrá en cuenta en este proyecto:

$$\frac{\text{Ingresos}}{\text{m}^2 \cdot \text{año}} = \frac{\text{Ingresos ideales}}{\text{m}^2 \cdot \text{año}} \cdot \eta_{\text{central}} = 3.29 \cdot 0.844 = 2.776 \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \text{ de membrana} \cdot \text{año}}$$

Con este resultado se necesitarían 7.2 años para la recuperación del dinero invertido en las membranas por cada ciclo. Las membranas realizando el mantenimiento adecuado pueden llegar a tener una vida de unos 10 años aproximadamente. Por tanto por cada ciclo de membranas:

$$\frac{20}{2.766} = 7.2 \text{ años}$$

$$\frac{\text{Ingresos}}{\text{m}^2 \cdot \text{ciclo}} = 10 \cdot 2.776 = 27.76 \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \text{ de membrana} \cdot \text{ciclo}}$$

Al ser el precio de la membrana unos 20 €, el beneficio porcentual sobre la inversión en dichas membranas será de un 38.8%.

$$\frac{27.76 - 20}{20} = 0.388$$

El beneficio neto de cada ciclo sería de 2.81 millones de euros, o lo que es lo mismo un ingreso ficticio de 0.281 millones de euros al año.

$$\frac{\text{Ingresos}}{\text{ciclo}} = (27.76 - 20) \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \cdot \text{ciclo}} \cdot 362754 \text{ m}^2 = 2.81 \frac{\text{M€}}{\text{ciclo}} = 0.281 \frac{\text{M€}}{\text{año}}$$

La inversión inicial considerando únicamente los equipos principales, sin tener en cuenta costes de edificación, mano de obra y equipos secundarios sería 11.089 millones de euros como podemos observar en la tabla 7.1

Equipo	Cantidad	Precio/Ud (€)	Precio total (M€)
Membrana	362754 m ²	20	7.255
Bomba KSB Sewatec K 400-500G1 H	3+1	70000	0.28
Turbinas Pelton Siapro Hydro Turbine 1MW	1	450000	0.45
Intercambiadores de presión PX-Q300	71+2	28000	2.054
Total			10.039

Tabla 7.1 Capital inicial necesario para los componentes principales de la central.

En la figura 7.1 se puede observar la evolución de los beneficios de la central a lo largo del tiempo. Se partiría de una situación inicial de -10.039 millones de euros, debido al capital inicial que se debe aportar extraído de la tabla 7.1. Recuperando 0.281 millones de euros al año, no es hasta el año 35.72 cuando se recuperará la inversión inicial. En la figura 7.1 se puede observar la evolución de los beneficios de la planta de los primeros 50 años.

$$\frac{10.039}{0.281} = 35.72 \text{ años}$$

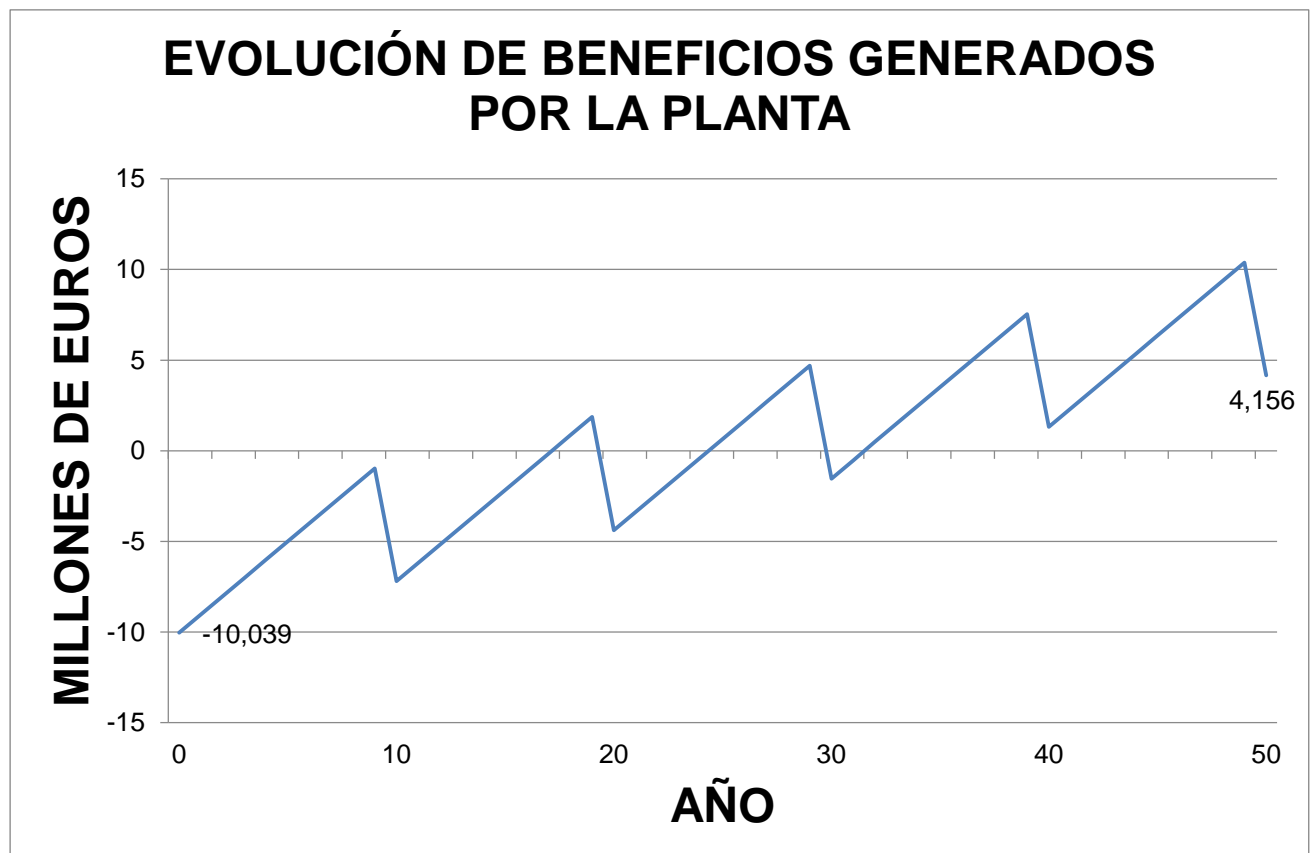


Figura 7.1 Evolución de los beneficios de la central en los primeros cincuenta años de operación. Elaboración propia.

Cabe destacar que en este estudio económico, al ser una tecnología tan reciente, no se han tenido en cuenta aspectos relevantes por falta de información, como pueden ser los costes de mantenimiento de la planta, y los costes iniciales de edificación, además de desestimar en nuestros cálculos la pérdida de carga y bombeo del agua inicial.

Achilli, en su estudio [11], dedujo que una planta de estas características sería rentable y competitiva con el resto de energías que se encuentran en el mercado a partir de los 5 W/m^2 y nuestra central opera en torno a los 3.27 W/m^2 . Sin embargo, el precio de la electricidad en España es bastante elevado, en torno a los 0.115 €/kWh , lo que equivaldría a unos $0.137 \text{ \$/kWh}$. Achilli escogió como precio de electricidad 0.1 €/kWh , por lo que se está obteniendo un beneficio de un 37% más que lo supuesto por Achilli por cada kWh. Esto sería equivalente a producir 4.42 W/m^2 en los cálculos de Achilli, por lo que la central, a priori, no estaría muy lejos de ser competitiva en el mercado.

8- CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado el diseño y operabilidad de una planta de producción OPR, la cual utiliza como fuente de energía principal la osmosis del agua.

La energía osmótica, como se ha podido ver en este proyecto, es una energía en desarrollo que en un futuro panorama energético puede jugar un papel fundamental por varios motivos expuestos como ser capaz de generar energía limpia sin emisiones. Además es de las pocas energías renovables que es capaz de generar potencia durante todo el año y todas las fases del día, diferenciándose de otras energías como pueden ser la solar y la eólica. Otra ventaja respecto este tipo de formas de obtener energías es su posibilidad de ser soterrada y mantener su funcionamiento, con el único inconveniente de aumentar el coste de producción.

Su principal limitación es geográfica al deber estar situadas en zonas costeras, para poder aprovechar la desembocadura de los ríos y el ciclo del agua.

También se ha podido observar que la efectividad de este tipo de tecnología depende de la salinidad de los mares y de la temperatura del agua, ordenados por orden de importancia. Las zonas con una mayor salinidad y cálidas serán las más apropiadas para este tipo de centrales, convirtiendo al Mar Mediterráneo en el mejor lugar de grandes dimensiones para establecer plantas de producción de este tipo. España al tener una gran cantidad de costa Mediterránea podría ser uno de los países potenciales del desarrollo de este tipo de energía, por lo que el emplazamiento escogido fue la desembocadura del río Ebro.

La efectividad de este tipo de centrales está vinculada directamente a las membranas utilizadas. El principal objetivo actual para mejorar esta tecnología es la mejora de la membrana para lo que se están realizando estudios para mejorar la permeabilidad acuosa de la misma, disminuir la permeabilidad salina, además de reducir los problemas de polarización de las membranas reduciendo el factor geométrico de la misma.

Lamentablemente, en la actualidad no existe ninguna membrana específica de aplicación OPR que esté probada fuera de la escala de laboratorio, y la membrana escogida para el diseño de nuestra central está enfocada para una aplicación OD, por lo que los resultados obtenidos podrían haber sido mucho mejores y hay un gran margen de mejora respecto a los 3.26 W/m^2 obtenidos en el proyecto. De hecho, en este trabajo se han citado membranas que en laboratorio alcanzaron hasta los 24.3 W/m^2 , aunque es cierto que se utilizaron soluciones hipersalinas como fluido de alta concentración.

En un futuro es posible que si se consiguen llevar a escalas industriales estos resultados que han tenido algunas membranas en escala de laboratorio la energía osmótica sea un tipo de obtener energía renovable muy a tener en cuenta para abastecer energéticamente a las zonas costeras.

Asimismo se ha citado que la aceptación social de instalar una planta de esta tecnología, tendría una aceptación social positiva al no producir elementos contaminantes no contaminantes para el ser humano y no excesivamente dañinos para los ecosistemas acuáticos. En la mayoría de casos será necesario soterrar las plantas de este tipo, al ser las zonas costeras muy turísticas y donde un impacto visual negativo podría provocar un impacto visual negativo.

Concluyendo, del análisis económico, aunque de una forma muy aproximada ya que hemos despreciado bastantes costes como los del mantenimiento de la planta, equipos secundarios de pretratamiento entre otros, hemos obtenido que con el precio de la electricidad en España no se logrará recuperar la inversión inicial hasta después de 35 años aproximadamente de funcionamiento de la planta. Una vez recuperada la inversión de la planta se obtendrían 281.000 € de beneficio por año, que supondría un beneficio del 38% sobre lo invertido en las membranas.

ANEXO 1: DESARROLLO REALIZADO POR LEE

La ecuación general, despreciando las pérdidas por polarizaciones, que utilizó Lee para describir la velocidad de permeado del fluido que atravesaba la membrana fue la siguiente:

$$J_w = A(\Delta\pi - \Delta P)$$

De esta ecuación se puede destacar que es válida para los procesos de FO y de RO, lo único que el rango de valores que puede tomar ΔP varía. En RO ΔP debe de ser mayor que $\Delta\pi$, en FO, ΔP debe ser 0, y en PRO debe estar entre ambos valores.

Una vez conocida dicha velocidad de permeado se obtiene la ecuación de la potencia por unidad de superficie:

$$W = J_w \Delta P = A(\Delta\pi - \Delta P)\Delta P$$

Usando la ecuación anterior se puede ver el desarrollo de la potencia extraída en función del ΔP aplicado en el siguiente gráfico.

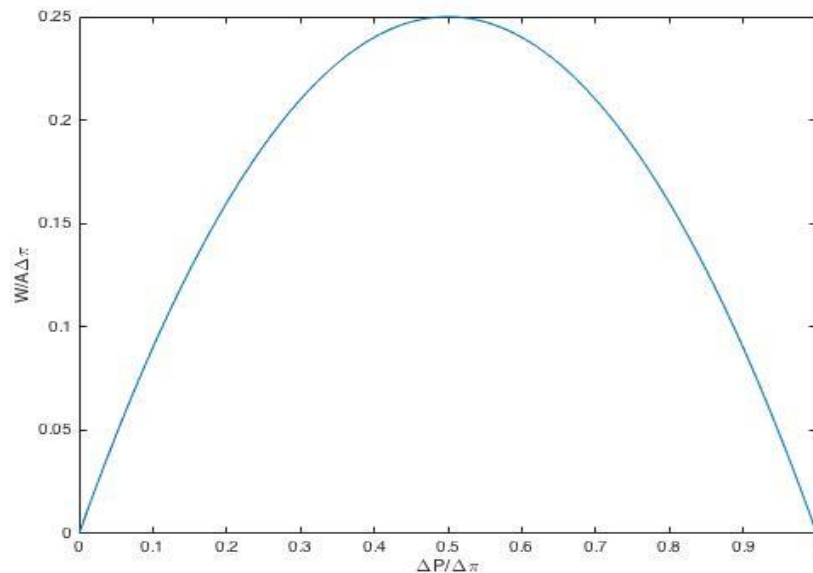


Figura A.1 Efecto de la presión aplicada en la potencia neta obtenida por unidad de área

Analizando el gráfico 2 podemos llegar a la conclusión de que el punto de máximo

rendimiento se corresponde con los siguientes resultados:

W	$A\Delta\pi/4$
ΔP	$\Delta\pi/2$

Lee mejoró su modelo considerando las pérdidas de eficiencia producidas por polarización de concentración que reducía la presión osmótica efectiva en el proceso. Específicamente estudió la polarización producida en el lado del fluido de menor concentración, también llamada polarización de concentración interna por producirse en el interior de la capa porosa de la propia membrana.

Teniendo en cuenta esta polarización, la velocidad de permeado se modificaba a la ecuación:

$$J_w = A \left[\pi_{D,m} \frac{1 - \frac{C_F}{C_D} \exp(J_w K)}{1 + \frac{B}{J_w} [\exp(J_w K)] - 1} - \Delta P \right]$$

dónde K, que expresa la resistividad del soluto dentro de la capa porosa se puede calcular como:

$$K = \frac{t\tau}{D\varepsilon}$$

Y la densidad de potencia según Lee sería la siguiente:

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

ANEXO 2: CONTINUACIÓN DE ACHILLI DEL DESARROLLO DE LEE

Achilli demostró que dicha polarización seguía una relación exponencial entre la velocidad de permeado y una constante:

$$\frac{\pi_{D,m}}{\pi_{D,b}} = \exp\left(-\frac{J_w}{k}\right)$$

siendo k el coeficiente de transferencia de masa:

$$k = \frac{ShD}{d_h}$$

dónde podemos obtener Sh de la siguiente correlación:

$$Sh = 0.2 Re^{0.57} Sc^{0.4}$$

Combinando la ecuación de Lee de la velocidad de permeado a la incorporación de la polarización externa de Achilli obtenemos que la velocidad de permeado resultante en un proceso PRO quedaría descrito por la siguiente ecuación:

$$J_w = A \left[\pi_{D,b} \exp\left(-\frac{J_w}{k}\right) \frac{1 - \frac{C_F}{C_D} \exp(J_w K)}{1 + \frac{B}{J_w} [\exp(J_w K) - 1]} - \Delta P \right]$$

Y por tanto la densidad de potencia obtenida sería la siguiente:

$$W = A \left[\pi_{D,b} \exp\left(-\frac{J_w}{k}\right) \frac{1 - \frac{C_F}{C_D} \exp(J_w K)}{1 + \frac{B}{J_w} [\exp(J_w K) - 1]} - \Delta P \right] \Delta P$$

ANEXO 3: HOJA DE CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA KSB

Hojas de datos



Nº de posición del cliente:
 Pedido fechado: 29/08/2017
 Doc. no.: Cotización rápida
 Cantidad: 1

Número: ES 5315992
 Nº de artículo: 100
 Desede: 29/08/2017
 Página: 1 / 6

Sewatec K 400-500G1 H

Versión nº.: 1

Datos de trabajo

Caudal bombeado requerido	1670,00 m ³ /h	Corriente volumétrica	1670,00 m ³ /h
Altura de bombeo requerida	3,80 m	Altura de bombeo	3,80 m
Medio bombeado	agua	Eficiencia	75,7 %
	Agua limpia	Absorción de potencia	22,77 kW
	No contiene sustancias químicas o mecánicas que afecten a los materiales	Velocidad de rotación de la bomba	582 rpm
Temperatura ambiente	20,0 °C	NPSH requerido	3,67 m
Temperatura del medio a bombear	20,0 °C	Presión permitida de trabajo	6,30 bar.r
Densidad del fluido	998 kg/m ³	Pres. descarga	0,47 bar.r
Viscosidad del medio a bombear	1,00 mm ² /s	Caudal mínimo admisible	589,29 m ³ /h
Máx presión de aspiración	0,10 bar.r	Caudal de masa mínimo admisible	163,36 kg/s
Presión mín. aspiración	0,10 bar.r	Altura de bombeo en el punto de caudal cero	7,31 m
NPSH disponible	11,00 m	Caudal de masa máximo admisible	572,90 kg/s
Rata de caudal de masa	462,81 kg/s	Diseño	Bomba individual 1 x 100% Ninguno;tolerancias s/ISO 9906 Clase 3B; por debajo de 10 kW de acuerdo con párrafo 4.4.2
Potencia máxima de curva	23,51 kW		

Ejecución

Bomba estándar	Grupo Motobomba KSB, ejecución internacional	Fabricante	KSB
Bomba sin accesorios grupo de arrastre		Type	MG
Diseño	Para montaje sobre la placa de base	Código de material	SIC/SIC/NBR
Orientación	Horizontal	Tipo de rodete	Rodete de flujo radial multi-álabes (K)
Diam. Nominal de aspiración	DN 400	Anillo rozante	Anillo partido
Presión nominal de aspiración	PN 10	Diámetro del rodete	436,0 mm
Posición de aspiración	axial	Tamaño paso libre	130,0 mm
Diám.nominal descarga	DN 400	Dirección de rotación del arrastre	Sentido agujas del reloj
Presión nominal de descarga	PN 10	Tamaño del soporte del cojinete	S06
Posición de la tubuladura de presión	arriba (0° / 360°)	Junta de cojinete	Junta de labios
Brida de descarga taladrada de acuerdo con la norma.	EN 1092-2	Tipo de cojinete	Rodamiento
Tobera de aspiración taladrada de acuerdo con DIN 2501, con orificios ciegos roscados		Tipo de lubricación	Grasa
Cierre del eje	2 cierres mecánicos en tándem con depósito de aceite.	Color	Azul ultramarino (RAL 5002) Azul KSB

Accionamiento, accesorios

Tipo de accionamiento	Motor eléctrico	Accionamiento suministrado por	sin motor
Accionamiento mecán. estándar	IEC	Nº de polos	10

Hojas de datos



Nº de posición del cliente:
Pedido fechado: 29/08/2017
Doc. no.: Cotización rápida
Cantidad: 1

Número: ES 5315992
Nº de artículo: 100
Desede: 29/08/2017
Página: 2 / 6

Sewatec K 400-500G1 H

Versión nº.: 1

Materiales G1

Indicaciones

Criterios generales para un análisis de agua: pH-valor ≥ 7 ;
contenido cloruro (Cl) ≤ 250 mg/kg. Cloro (Cl₂) ≤ 0.6 mg/kg.
Carcasa de bomba (101) Fundición gris EN-GJL-250
Tapa de presión (163) Fundición gris EN-GJL-250
Eje (210) Acero al cromo
1.4021+QT800

Rodete (230)

Junta tórica (412)
Anillo partido (502.1)
Tornillo tapón (903)
Tornillo cilíndrico con
hexágono interior (914)

GX2CRNIMOCUN25-6-3-3
1.4517
Caucho nitrílico NBR
Acero al CrNi VG434
Acero ST
Acero al cromo CrSt

Hoja de curvas

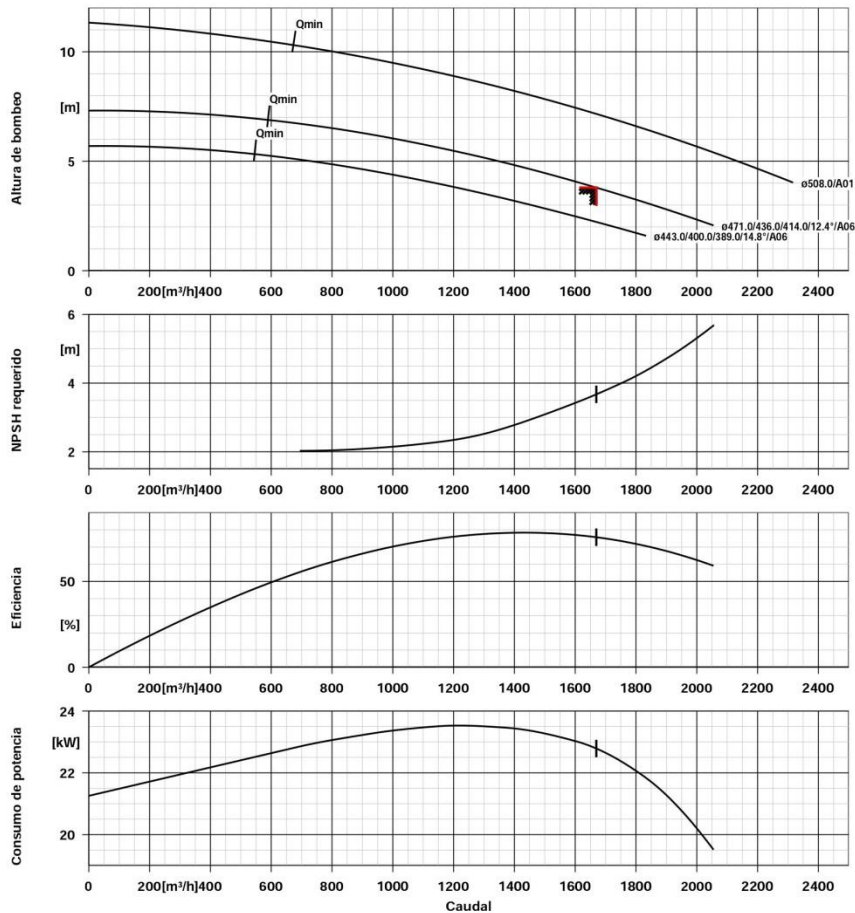


Nº de posición del cliente:
 Pedido fechado: 29/08/2017
 Doc. no.: Cotización rápida
 Cantidad: 1

Número: ES 5315992
 Nº de artículo:100
 Desede: 29/08/2017
 Página: 3 / 6

Sewatec K 400-500G1 H

Version nº.: 1



Datos de curvas

Velocidad de giro	582 rpm	Eficiencia	75,7 %
Densidad del fluido	998 kg/m ³	Absorción de potencia	22,77 kW
Viscosidad	1,00 mm ² /s	NPSH req. 3%	3,67 m
Corriente volumétrica	1670,00 m ³ /h	Número de curva	K42996
Caudal bombeado	1670,00 m ³ /h	Diámetro efectivo del rodete	436,0 mm
Altura de bombeo	3,80 m	Estándar de aceptación	Ninguno;tolerancias s/ISO
Altura de bombeo requerida	3,80 m		9906 Clase 3B; por debajo de 10 kW de acuerdo con párrafo 4.4.2

Plano de instalación

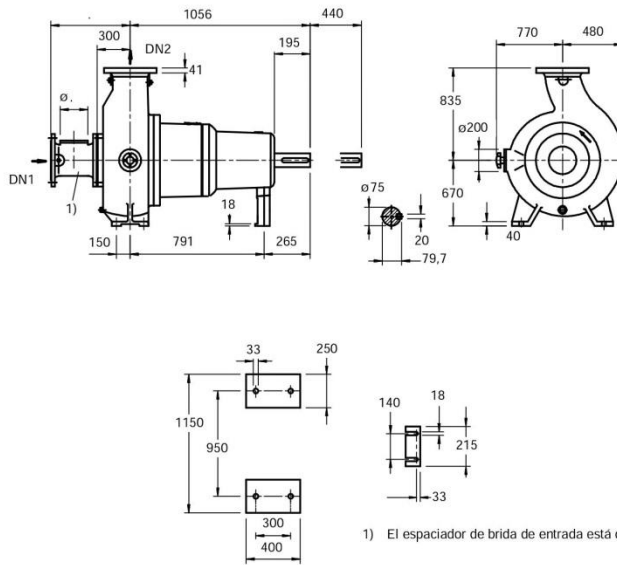


Nº de posición del cliente:
 Pedido fechado: 29/08/2017
 Doc. no.: Cotización rápida
 Cantidad: 1

Número: ES 5315992
 Nº de artículo: 100
 Desede: 29/08/2017
 Página: 4 / 6

Sewatec K 400-500G1 H

Versión nº.: 1



El plano no es para medir

Dimensiones en mm

Motor

No en ámbito de suministro
 Tamaño del motor
 Potencia de la bomba 22,77 kW
 Nº de polos 10

Conexiones

Diámetro nominal aspiración DN 400 / EN 1092-2
 DN1
 Tamaño descarga nominal DN 400 / EN 1092-2
 DN2
 Presión nominal de aspiración PN 10
 Régimen presión de descarga PN 10
 Tobera de aspiración taladrada de acuerdo con DIN 2501, con orificios ciegos roscados

Peso neto

Bomba 1400 kg
 Total 1400 kg

Ver plano extra para las conexiones auxiliares

Conectar tuberías sin tensión o resistencia

Tolerancias dimensionales para altura de eje : DIN 747
 Dimensiones sin tolerancias, tolerancias medias según :
 Dimensiones de conexión para bombas :

ISO 2768-m
 EN735

Esquema de conexiones

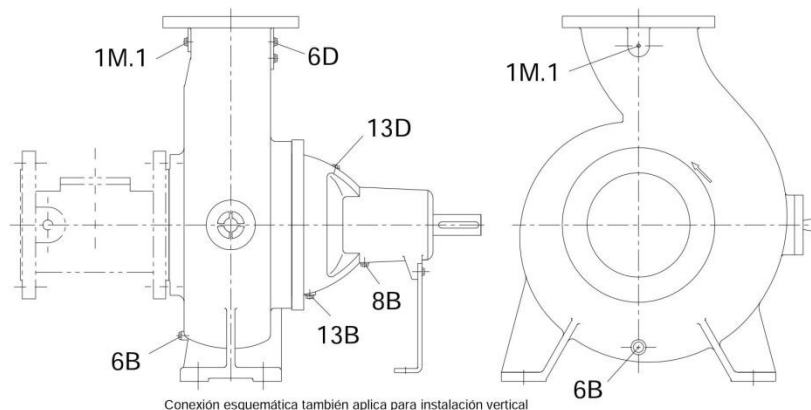


Nº de posición del cliente:
 Pedido fechado: 29/08/2017
 Doc. no.: Cotización rápida
 Cantidad: 1

Número: ES 5315992
 Nº de artículo:100
 Desede: 29/08/2017
 Página: 6 / 6

Sewatec K 400-500G1 H

Versión nº.: 1



Conexiones

1M.1 Conexión de aparato medidor de la presión	G 1/2	Taladrado y cerrado
6B Vaciado de líquido bombeado	G 1	Taladrado y cerrado
6D Líquido de bombeo - Llenar / purgar	G 1 1/4	Taladrado y cerrado
8B Vaciado de líquido de fugas	G 1/2	Taladrado y cerrado
13B Purgado del aceite	G 1/2	Taladrado y cerrado
13D Llenar / purgar	G 1/2	Taladrado y cerrado

BIBLIOGRAFÍA

1. Internacional Energy Agency (IEA), *Energy Climate Change & Environment*, 2016.
2. Internacional Energy Agency (IEA), *Monthly electricity statistics*, Feb 2017.
3. Font, F. X. S., Bonet, J. B., Llacuna, J. L., & Montaña, J. G. *Ósmosis directa: proceso y aplicaciones*.
4. M. Turek, B. Bandura, *Renewable energy by reverse electrodialysis, Desalination*, Volume 205, Issue 1, 2007, Pages 67-74
5. Masaru Kurihara, Masayuki Hanakawa, *Mega-ton Water System: Japanese national research and development project on seawater desalination and wastewater reclamation*, *Desalination*, Volume 308, 2013
6. Fernanda Helfer, Charles Lemckert, Yuri G. Anissimov, *Osmotic power with Pressure Retarded Osmosis: Theory, performance and trends – A review*, *Journal of Membrane Science*, Volume 453, 2014, Pages 337-358
7. S. Loeb, *One hundred and thirty benign and renewable megawatts from Great Salt Lake The possibilities of hydroelectric power by pressure-retarded osmosis*, *Desalination* 141 (2001) 85–91
8. S. Loeb, *Large-scale power production by pressure-retarded osmosis, using river water and sea water passing through spiral modules*, *Desalination* 143 (2002) 115–122
9. David Inhyuk Kim, Jungwon Kim, Ho Kyong Shon, Seungkwan Hong, *Pressure retarded osmosis (PRO) for integrating seawater desalination and wastewater reclamation: Energy consumption and fouling*, *Journal of Membrane Science*, Volume 483, 2015, Pages 34-41
10. Shyama Pankaj, N. Sajikumar, Roopesh Kaimal, *Simulation of Forward Osmosis Using CFD*, *Procedia Technology*, Volume 24, 2016, Pages 70-76
11. Andrea Achilli, Amy E. Childress, *Pressure retarded osmosis: From the vision of Sidney Loeb to the first prototype installation — Review*, *Desalination*, Volume 261, Issue 3, 2010, Pages 205-211
12. KIM, Jihye, et al. *Recent advances in osmotic energy generation via pressure-retarded osmosis (PRO): a review*. *Energies*, 2015, vol. 8, no 10, p. 11821-11845.
13. M.F. Gruber, C.J. Johnson, C.Y. Tang, M.H. Jensen, L. Yde, C. Hélix-Nielsen,

Computational fluid dynamics simulations of flow and concentration polarization in forward osmosis membrane systems, Journal of Membrane Science, Volume 379, Issue 1, 2011, Pages 488-495

14. Fernanda Helfer, Charles Lemckert, Yuri G. Anissimov, *Osmotic power with Pressure Retarded Osmosis: Theory, performance and trends – A review*, Journal of Membrane Science, Volume 453, 2014, Pages 337-358
15. R.L. McGinnis, J.R. McCutcheon, M. Elimelech, *A novel ammonia-carbon dioxide osmotic heat engine for power generation*, Journal of Membrane Science 305 (2007) 13–19.
16. Andrea Achilli, Tzahi Y. Cath, Amy E. Childress, *Power generation with pressure retarded osmosis: An experimental and theoretical investigation*, Journal of Membrane Science, Volume 343, Issue 1, 2009, Pages 42-52
17. Universidad de Los Andes. *Clasificación de las membranas y los procesos que las utilizan*. 1999
18. QIN, Jian-Jun; LIBERMAN, Boris; KEKRE, Kiran A. *Direct osmosis for reverse osmosis fouling control: principles, applications and recent developments*. The Open Chemical Engineering Journal, 2009, vol. 3, no 1, p. 8-16.
19. GILRON, Jack. *Water-energy nexus: matching sources and uses*. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2014, vol. 16, no 8, p. 1471-1479.
20. B. Liberman, G Greenberg, V. Levitin, Tal Oz-Ari, U. Tirosh, *Three Pressure Retarded Osmosis (PRO) processes*, *The International Desalination Association World Congress on Desalination and Water Reuse*, 2013.
21. BARTOLO, Abilia Soriano. *Investigación sobre el empleo de membranas en tratamientos terciarios de desinfección*. 2001. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
22. Confederación Hidrológica del Ebro, *Extracto del estudio sobre el régimen de caudales ecológicos en la desembocadura del río Ebro*. 2014
23. Confederación Hidrológica del Ebro, *Criterios para la implantación de caudales ecológicos, Plan hidrológico del Ebro*, 2007.
24. Wikipedia. *Salinidad*. URL: <https://es.wikipedia.org>
25. European Space Agency. *Smos brings Mediterranean salinity*. URL: <http://www.esa.int>
26. Energy Recovery. *Pressure Exchanger*. URL: <http://www.energyrecovery.com>
27. Ministerio de Industria, Turismo y comercio. Instituto para la diversificación y ahorro de energía. *Minicentrales hidroeléctricas*, .2006.

28. Confederación hidrográfica del Ebro, *Estación 027* URL: <http://www.saihebro.com>
29. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. *Umbrales de tolerancia al incremento de salinidad de diversas especies marinas*. 2012.
30. Thorsen, Thor y Holt, Torleif, *Uso de una membrana semipermeable en osmosis retardada por presión para proporcionar energía eléctrica*, Oficina española de patentes y marcas, 2355547, 2011.
31. Escuela de organización industrial. *Impacto ambiental de la salmuera de rechazo de las plantas desalinizadoras y su posible solución*. URL: <https://www.eoi.es/>.
32. Ministerio de Medio Ambiente. *Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas*. 2001
33. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. *Real Decreto 129/2014, de 28 de febrero, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Ebro*. 2014
34. Ministerio de la Presidencia. *Real Decreto 1327/1995, de 28 de julio, sobre las instalaciones de desalación de agua marina o salobre*. 1995.
35. Jefatura del Estado, *Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas*. 1988.