

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Uso de sistemas de desalación para cultivos de
microalgas u otros microorganismos en regiones en
vías de desarrollo

Autor: Juan Salas Valverde-Fredet

Tutora: Lourdes García Rodríguez

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

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

**Uso de sistemas de desalación para cultivos de
microalgas u otros microorganismos en regiones en
vías de desarrollo**

Autor:

Juan Salas Valverde-Fredet

Tutora:

Lourdes García Rodríguez

Catedrática de Universidad

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Uso de sistemas de desalación para cultivos de microalgas u otros microorganismos en regiones en vías de desarrollo

Autor: Juan Salas Valverde-Fredet

Tutora: Lourdes García Rodríguez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mis padres.

A mis hermanos.

Agradecimientos

Agradecer a la profesora Doña Lourdes García Rodríguez por su inestimable ayuda, su apoyo y lo más importante, por su contagiosa motivación por el tema y la investigación. También agradecer a mis profesores de la carrera y compañeros de clase por enseñarme tanto estos años.

Resumen

En este trabajo se analiza el interés de acoplar sistemas de desalación con determinadas actividades productivas que podrían ser útiles para ofrecer desarrollo sostenible en lugares remotos o países en vías de desarrollo. Con tal objetivo se han buscado en la literatura opciones para dar utilidad a efluentes que normalmente no tiene utilidad posterior, o que incluso presentan un problema medioambiental.

Se ha identificado un caso de especial interés, cuyo concepto ha sido propuesto en la literatura para el caso específico de pozos de aguas salobres, dando utilidad al concentrado de los procesos de desalación, para el cultivo de microorganismos. Y a las aguas residuales de actividades ganaderas.

Se ha realizado una búsqueda bibliográfica a fin de seleccionar cultivos de microalgas u otros microorganismos de interés.

Se ha elegido un emplazamiento adecuado. En base al estudio de las condiciones propicias en las que se dan las algas y el cultivo de las especies seleccionadas, se ha elegido el emplazamiento, que a su vez es un lugar en vías de desarrollo al que se le quiere dotar de medios suficientes para poder ser autosuficientes e incluso generar excedentes para su comercio.

Se ha analizado una serie de supuestos casos prácticos en los que se simulaba la explotación de la planta de ósmosis inversa en cuestión para hacer estimaciones del consumo energético a los que tendría que enfrentarse la región para así valorar si era una opción viable o no, ya que la región para la que se ha realizado el trabajo no posee todos los recursos energéticos con los que cuenta el primer mundo.

Abstract

In this paper the interest of desalination systems coupled with certain productive activities that could be useful to provide sustainable development in remote locations or developing country is analyzed. To that end they have searched the literature options to use effluent normally not later usefulness, or even present an environmental problem.

Has identified a case of special interest, the concept has been proposed in the literature for the specific case of brackish water wells, giving utility to concentrate desalination processes for culturing microorganisms. And wastewater from livestock activities.

There has been a literature search to select microalgae cultures or other microorganisms of interest.

It has chosen a suitable location. Based on the study of the favorable conditions in which algae and cultivation of selected species occur, we have chosen the site, which in turn is a place in developing that you will want to provide sufficient means to to be self-sufficient and even generate a surplus for trade.

We analyzed a number of assumptions practical cases where the operation of the reverse osmosis plant in question was simulated to estimate energy consumption that would face the region in order to assess whether it was a viable option or not, and the region for which the work has been done does not have the energy resources are there in the first world.

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	11
Abstract	13
Índice	14
Índice de Tablas	16
Índice de Figuras	17
1 Objetivo	19
2 Introducción	20
2.1. Contexto histórico y situación actual de las microalgas	20
2.2. ¿Cómo se comportan?	20
2.2.1. Influencia del pH	21
2.2.2. Influencia de la salinidad	21
2.2.3. Influencia de la temperatura	21
2.3. Equipos e instalaciones para el cultivo	22
2.4. Producción de biocombustibles	22
3 Emplazamiento y selección de cultivo	24
3.1. Cabo Verde	24
3.2. <i>Chlorella</i>	25
3.2.1. En aguas municipales	25
3.2.2. En aguas procedentes de la agricultura	25
3.2.3. En aguas industriales	25
3.3. <i>Chlorella Zofingiensis</i>	25
3.4. <i>Spirulina</i>	25
3.5. Otros cultivos	26
3.6. Propuesta de cultivo	27
3.6.1. Cultivo de peces y riego	28
3.6.2. Cria de tilapia	29
3.6.3. Cultivo de forraje	29
4 Desalación por Ósmosis Inversa	31
4.1. Antecedentes históricos, presente y futuro de la OI	31
4.2. Instalación desaladora de agua mediante OI (IDAM)	32
4.2.1. Captación del agua de mar	32
4.2.2. Pretratamiento físico-químico	33
4.2.3 Tipos de ensuciamiento	34
4.2.3.1. Ensuciamiento por precipitaciones	34
4.2.3.2. Encuciamiento por depósitos	34
4.2.3.3. Ensuciamiento por circunstancias especiales	34
4.2.4. Equipos de alta presión y membranas de OI	35

4.2.5. Postratamiento de agua producida	36
5 Prediseño de un sistema de desalación por ósmosis inversa	37
5.1. <i>Parámetros de funcionamiento en una instalación de membranas de ósmosis inversa</i>	37
5.1.1. Factor de conversión	38
5.1.2. Caudal de agua producto	38
5.1.3. Paso de sales	39
6 Diseños propuestos para los sistemas de desalación	41
6.1. <i>Caso 1: Agua salobre de alta salinidad (BWRO)</i>	41
6.2. <i>Caso 2: Agua salobre de baja salinidad (BWRO)</i>	44
6.3. <i>Caso 3: Agua de mar (Océano Atlántico) (SWRO)</i>	46
7 Conclusión	48
Referencias	51
Anexo A	53

Índice de Tablas

Tabla 1. A. J. Areces y M. Araujd. Influencia de la salinidad y la temperatura sobre el crecimiento de *Bryothamnion triquetrum* (Rhodophyta: Rhodomelaceae)

Tabla 2, 3 y 4. A.S. Sánchez, I.B.R. Nogueira, R.A. Kalid. "Uses of the reject brine from inland desalination for fish farming, Spirulina cultivation, and irrigation of forage shrub and crops". *Desalination*, 364, 2015, pp 96-107.

Índice de Figuras

Figura 1. Diario Financiero. <http://www.nuevamineria.com/revista/mineras-invertiran-mas-de-us-10-mil-millones-para-plantas-de-agua-de-mar-a-2022/>

Figura 2. http://www.lamolina.net/image/chlorella-pond_resize.jpg. Copyright © 2007 La Molina.com All rights reserved

Figura 3. <http://www.geographicguide.net/africa/images/cape-verde-map.jpg> —(última consulta, 12 de noviembre de 2015). Copyright © Geographic Guide - Travel and Tourist Guide and Maps.

Figura 4. <http://www.nudisa.com/beneficios-de-la-chlorella-y-sus-propiedades/> NUDISA – Nutrición, dietética y vida sana

Figura 5. A.S. Sánchez, I.B.R. Nogueira, R.A. Kalid. "Uses of the reject brine from inland desalination for fish farming, Spirulina cultivation, and irrigation of forage shrub and crops". *Desalination*, 364, 2015, pp 96-107.

Figura 6. A.S. Sánchez, I.B.R. Nogueira, R.A. Kalid. "Uses of the reject brine from inland desalination for fish farming, Spirulina cultivation, and irrigation of forage shrub and crops". *Desalination*, 364, 2015, pp 96-107.

Figura 7. <http://nscagua.com/tecnologia/osmosis-inversa/> -© 2014 Derechos Reservados NSC
Agua

Figura 8. http://static.wixstatic.com/media/441034_0f8505d9bc5449a2924c6b31632d78b0.gif

Figura 9. B. Peñatey L. García-Rodríguez. Energy-efficient Design of the Seawater Reverse Osmosis Desalination Technology. Springer. 2014.

Figura 10. B. Peñatey L. García-Rodríguez. Energy-efficient Design of the Seawater Reverse Osmosis Desalination Technology. Springer. 2014

Figura 11. <http://www.acsmedioambiente.com/cmembranas.html> -ACS Medio Ambiente®

Figura 22. bis Figura 5

1 OBJETIVO

El objetivo del trabajo es evaluar el cultivo de microalgas u otros microorganismos como aprovechamiento de la salmuera o el concentrado producido en sistemas de desalación en comunidades remotas o países en vías de desarrollo. Con este objetivo, debemos seleccionar un lugar del planeta que cumpla los requisitos necesarios para el cultivo de las microalgas, así como tener acceso al mar o a un pozo salobre para la planta de desalinización y que dicho lugar se halle en una zona poco tecnificada o un país en vías de desarrollo.

Para ello se va a proceder al estudio de un emplazamiento para instalar la planta desalinizadora que abastezca a una población en la que el agua dulce sea un bien escaso. Para una optimización de los recursos se van a reutilizar el residuo del proceso de desalinización (el concentrado) para cultivar microalgas que a su vez se conviertan en otro producto del que sacar un beneficio económico en lugar de desechar esta agua al mar o al pozo salobre.

Las microalgas necesitan una serie de macronutrientes, en especial Nitrógeno y Fósforo, que se encuentran en grandes cantidades en corrientes de aguas residuales. Por ello será menester emplazar la planta en un lugar con buena comunicación con una planta depuradora de agua residual urbana, una industria o una fábrica de procesos agrícolas, como por ejemplo una granja de cerdos u otros animales, una planta de tratamiento de soja o una fábrica de cerveza. Algunas de estas actividades son aplicables al caso de países en vías de desarrollo o comunidades remotas. De este modo contribuiremos a minimizar el impacto medioambiental que tendrían estos vertidos en el mar y en vez de eso, conseguir una planta casi auto-suficiente, si también nombramos que podría utilizarse la energía del Sol para el funcionamiento de la desaladora. El fin del agua dulce que se produce aún no se ha definido, pero bien podría utilizarse para el proceso del que se obtiene la corriente de agua residual, véase riego de cultivos o abastecer animales, no sólo para el consumo humano.

Con la instalación – véase fig. 1- de este proyecto se quiere conseguir darle una oportunidad para mejorar la calidad de vida a los habitantes del país seleccionado, por ello se pretende que los procesos sean lo mayor independiente posible en cuanto a consumo energético y que la inversión inicial sea mínima. Esto dotaría a la región donde se sitúe la planta desaladora de puestos de trabajos y de una fuente de ingresos gracias a la venta del producto final, ayudando al desarrollo del país y activando su economía. Cabe destacar a su vez el fin medioambiental del proyecto ya que estas corrientes de desperdicios que servirán para proveer de los nutrientes necesarios a las algas son altamente contaminantes y deben ser tratados antes de ser vertidos al entorno. Pero en vez de eso son aprovechados para producir un combustible o para desarrollar una actividad que respeta al ecosistema.

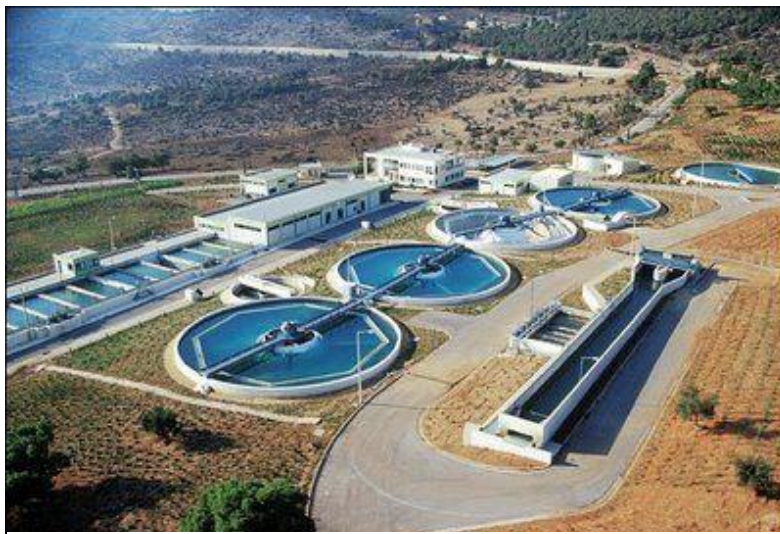


Figura 1. Ejemplo de instalación desaladora.

2 INTRODUCCIÓN

Son de interés en este trabajo los cultivos de microalgas u otros microorganismos que permitan generar actividades económicas que den un valor añadido a la instalación de la planta de desalación que se necesite para el consumo humano. Las microalgas pueden ser de especial interés económico. Cuando hablamos de microalgas nos referimos a aquellos microorganismos que contienen clorofila y otros pigmentos fotosintéticos capaces de realizar la fotosíntesis. Los tiempos de reproducción suelen ser de una hora o menos. Se consideran productores primarios de energía química a partir de energía luminosa.

2.1 Contexto histórico y situación actual de las microalgas

El cultivo de las microalgas se está extendiendo a lo largo de los últimos 50 años debido a su amplio abanico de posibles aplicaciones. Desde combustibles y productos para la industria química hasta cosméticos y complementos alimenticios tanto para la dieta humana como para la animal. Así como su uso para limpiar efluentes de metales y nutrientes, como por ejemplo en plantas depuradoras de grandes ciudades. Otro motivo de la proliferación de las microalgas es la reciente y creciente preocupación por reducir las emisiones de CO_2 y dar prioridad a que la energía que consumimos tenga una procedencia renovable. La creciente demanda de biodiesel, debido a que el sector transporte es el segundo en cuanto a consumo de combustibles fósiles y ya que estos son limitados necesitamos otras fuentes de energía alternativas. Otro motivo de gran peso es ayudar a frenar la deforestación que reduce la biodiversidad del planeta y que al destinar terrenos para el cultivo de soja y otras semillas usadas para el biodiesel se restan para el consumo humano, lo que encarece el precio de los alimentos y aumenta las emisiones de CO_2 y N_2O . Además, las algas pueden ser cultivadas en zonas desérticas, costas o alta mar. Pueden adaptarse a los diferentes climas que hay en el planeta y así aumentar el número de lugares donde poder producir microalgas. El proceso de cultivo se está aun perfeccionando, como por ejemplo el uso de invernaderos para alcanzar la temperatura óptima de crecimiento en zonas de clima templado. En la actualidad la producción anual de microalgas está estimada en 5000 toneladas en peso seco por un valor en el mercado de 500 millones de dólares americanos [1].

2.2 ¿Cómo se comportan?

La biomasa de las microalgas está compuesta por grasas, carbohidratos, proteínas, cenizas e hidrocarburos. Otro factor importante es la penetración de la luz en el cultivo; en los cultivos masivos la profundidad es tan grande que la intensidad de la luz incidente no es suficiente para la fotosíntesis, hasta el fondo del tanque. En los cultivos masivos a la intemperie la penetración de la luz es más efectiva, pero se debe reducir la intensidad de la luz excesiva, cubriendo estos estanques con una malla. En cultivos a gran escala es recomendable la inyección de CO_2 (0.5%) para contribuir al proceso fotosintético [2].

En teoría el cultivo de microalgas podría ser muy atractivo para una producción sostenible de biocombustibles. Estas son además ricas en betacarotenos, antioxidantes y grasas poliinsaturadas. Ambos productos son muy demandados en el mercado actual. La producción de microalgas puede superar a la de otros cultivos terrestres usados en energías renovables y biorrefinerías. Pero todavía no es capaz de hacer frente al mercado de los combustibles fósiles.

El *fotoperíodo* es un factor que regula la división celular, la reproducción asexual (división) ocurre durante el período de luz y éste es acelerado bajo iluminación continua. En contraste, las células del mismo tamaño sólo se producen en el período de oscuridad. Por lo tanto, el período de iluminación puede ajustarse de acuerdo a los objetivos del cultivo: el fotoperíodo continuo (horas de iluminación prolongada) produce crecimientos rápidos, un fotoperíodo con horas de luz y oscuridad semejante al fotoperíodo solar mantiene un crecimiento normal y saludable [3].

Se han desarrollado diferentes medios para el cultivo de microalgas que van desde las fórmulas para enriquecer

el agua de mar natural, hasta el uso de medios artificiales que permitan resultados constantes en contraste con los resultados tan variables que brinda el uso del agua de mar natural que entre otros factores depende del lugar donde se colecta ésta, y el tiempo de almacenamiento de la misma. En términos generales son los macronutrientes o factores limitantes del crecimiento el Carbono, Nitrógeno, Fósforo, Silicio, Magnesio, Potasio y Calcio, que se requieren en cantidades relativamente grandes, mientras que los llamados micronutrientes (Hierro, Manganeso, Cobre, Zinc, Sodio, Molibdeno, Cloro y Cobalto) se necesitan en menores cantidades [2].

2.2.1 Influencia del pH

Para evaluar el comportamiento de las microalgas frente a diferentes niveles de pH se ha cogido como ejemplo un estudio realizado a la variedad *Chlorella vulgaris*, en el que el crecimiento de la microalga (densidad celular), se incrementó al incrementar el pH. Se obtuvieron los mayores valores a pH 8 y 9. Siendo el pH 1 y 3 letal para la microalga. Por el contrario, cuando el pH se incrementó a 5 comenzó el crecimiento de la microalga, pero aún con una inhibición del 81,79% respecto al control. Por lo general la densidad celular se optimiza en el rango alcalino, pero a diferencia de los cultivos no axénicos presentó tolerancia a pH 1 y 3, aunque el crecimiento se mantuvo inhibido a pH 1 la microalga fue capaz de crecer a partir de pH 3, en cultivos autotróficos, heterotróficos y mixotróficos con un incremento de 4; 77,5 y 169 veces respectivamente, en relación a la densidad celular con la que se inició el cultivo. Los cultivos mixotróficos y heterotróficos con un pH final de 7,8 produjeron los mayores valores de densidad celular. A diferencia de éste último, en los cultivos autotróficos se encontró el valor más elevado de crecimiento celular a pH final de 8,2 y 9,6. [5]

2.2.2 Influencia de la salinidad

La respuesta del crecimiento de las microalgas a los distintos niveles de salinidad varía dependiendo de la especie, hay especies que habitan en ríos o lagos de agua dulce y por otro lado están las de agua salada que van desde el agua salobre y agua de mar hasta las salmueras. Se centrará el trabajo en el residuo de las plantas desalinizadoras. A modo de visión general del comportamiento de las microalgas ante distintos niveles de salinidad se obtienen los siguientes datos. Las densidades celulares en fase estacionaria más elevadas se alcanzaron en medio no salino. Sin embargo, el incremento de la salinidad produjo un efecto inhibitorio sobre el crecimiento de la microalga. A 25 y 35 ppm, la densidad celular disminuyó en un 97,9% y en un 98,5% respectivamente, en cultivos no axénicos. En otros cultivos se obtuvo un descenso hasta del 61,8% cuando se cultivó a 40 ppm. [5].

2.2.3 Influencia de la temperatura

Para muchas especies la *temperatura óptima* oscila entre los 15 y 20°C, pocas especies de esta familia crecen a más de 28°C,-un ejemplo es el cultivo masivo a la intemperie de *Chlorella*, cuyas temperaturas oscilan entre 12.5 – 30°C. El crecimiento y la división celular son afectados por la intensidad de la luz y el fotoperíodo (horas de iluminación y oscuridad) en relación también a la temperatura, por ejemplo a 20°C y 1,000 lux se obtiene un crecimiento favorable. La mayoría de las especies de algas cultivadas habitualmente no pueden tolerar temperaturas por encima de los 26 °C durante períodos prolongados o temperaturas por debajo de los 12 °C. Las temperaturas idóneas se encuentran en el rango de 18 a 22 °C, en las que el valor del crecimiento diario (C.D.) será mayor. [6] Véase Figura 1.

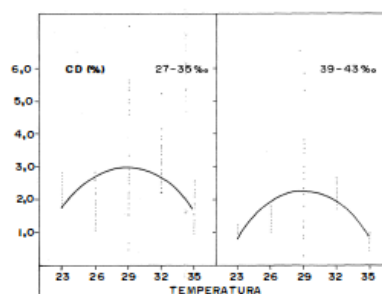


Figura 1. Ejemplo del nivel de crecimiento diario (C.D.) de las algas frente a la temperatura.

2.3 Equipos e instalaciones para el cultivo

Tenemos varios tipos de equipos e instalaciones para elegir donde cultivar las microalgas dependiendo de nuestros objetivos.

-*Sala o Laboratorio de Cultivo*: Se recomienda para fines de mantenimiento de cepas, transferencias sucesivas de cultivos, crecimiento de cultivos en pequeños y medianos volúmenes. Generalmente para fines de investigación las siguientes características:

- Laboratorio con temperatura controlada 18–20°C.
- Paredes y pisos de azulejo en color blanco.
- Instalaciones para el cepario y cultivo intermedios con lámparas de luz blanca fría fluorescente (20W–37W).
- Instalaciones tipo invernadero (ventanas de cristal o plástico con temperatura controlada).

- *Cuarto de Siembra*: Puede instalarse dentro del mismo laboratorio una cabina con campana de flujo laminar o bien una simple mesa de laboratorio con instalación de gas para dos mecheros para la inoculación en condiciones asépticas.

- *Sala de Producción*: Para volúmenes de 200 L o más, se requieren recipientes de materiales plásticos no tóxicos y de preferencia transparentes para el desarrollo a nivel masivo de las diferentes especies del plancton. En este tipo de instalación es recomendable el uso de la luz solar, pues el uso de la luz artificial es de muy alto costo y se requiere además, de equipo para mantener la temperatura a 18–20°C. En zonas de clima templado para cultivos masivos se pueden desarrollar éstos a la intemperie, cubriendo los recipientes en caso de lluvia. Véase figura 2.



Figura 2. Ejemplo de cultivo masivo al aire libre de microalgas.

2.4 Producción de biocombustibles

La biorrefinería de las microalgas debe combinar todas las tecnologías requeridas para su cultivo, fraccionamiento e hidrólisis de la biomasa. Por lo tanto permiten la conversión de las algas en un producto con valor, minimizando el gasto energético y maximizando la cantidad de producto obtenida.

Los pasos a seguir para la obtención del producto son:

- Acondicionar los efluentes.
- Cultivo
- Cosecha
- Secado

- Extracción
- Purificación
- Reciclaje

En la cosecha que es la parte del proceso que más peso tiene en cuanto a factor económico. Depende de la densidad y del tamaño de las microalgas. Este proceso puede ser llevado a cabo por diferentes vías; tenemos la floculación, la flotación y por último la sedimentación; que son seguidos de un tratamiento de deshidratación o espesamiento mediante centrifugado o filtración.

El proceso de sedimentación se basa en ayudarse de la fuerza de la gravedad para separar las algas del medio donde se cultivan. La velocidad media suele rondar el 0'1m/día. Los costes de operación son bajos, pero requieren de grandes superficies y tanques con grandes áreas para llevarse a cabo. Se ha demostrado que si la temperatura ambiente es alta puede dañar el proceso de cosechado de las microalgas. Los sistemas convencionales de sedimentación no suponen un riesgo de contaminación por la utilización de químicos, gran ahorro de energía (menos de 0,1kW/m³) así como la ausencia de corrientes turbulentas o de altas presiones que dañarían la integridad de la estructura de la microalga. Por contrapartida tenemos unos tiempos altos de trabajo y bajas concentraciones de sólidos.

La coagulación-floculación consiste en jugar con el pH de las algas añadiendo sustancias químicas para que al formarse aglomerados sea más fácil de separar. Dentro de este proceso podemos encontrar varias formas de llevarlo a cabo; química, biológica ó física. tenemos unos tiempos de trabajo menores que los de sedimentación, pero como desventaja se produce un incremento no deseado de la temperatura de trabajo y cambios en el pH.

En la segunda parte del proceso tenemos los procesos para espesar y secar las algas. En primer lugar tenemos el centrifugado. Que se utiliza para aumentar el ratio de sedimentación gracias a las fuerzas centrífugas. El proceso de deshidratación de las algas supone cerca de un 85% de la energía consumida. Después del proceso el agua contenida debe ser menor del 10% del peso.

Para obtener las microalgas tenemos que recurrir a un proceso de filtrado basado en una separación del líquido y el sólido mediante un filtro semipermeable. Estos filtros contienen pequeños poros menores que el radio de célula deseado, siendo selectiva con las algas a retener y dejando pasar partículas de sal agua y otras sustancias solubles.

3 SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTO Y CULTIVO

Para la elección del lugar de interés para emplazar la planta de desalinización hay que tener en cuenta los objetivos descritos en el punto anterior. Por ello se ha seleccionado Cabo Verde como el mejor candidato, de una larga lista de puntos del planeta en el que la lluvia es un fenómeno cada vez más escaso y que va a más debido al cambio climático. Cabe destacar de la lista de lugares analizados como posibles emplazamientos la región sur de Namibia, Guatemala, el estado de Sao Paulo en Brasil y Colombia. Siendo descartados por la idoneidad del país insular.

3.1 Cabo Verde

Es un país formado por islas frente a las costas senegalesas, en la franja entre el desierto del Sahara y la zona tropical— véase fig.3 -.

Tiene un clima seco-tropical, con lluvias muy limitadas y donde no siempre llegan los monzones. No es extraño que en algunas islas no llueva durante años. “La estación de lluvias” generalmente suele ser entre agosto y octubre, si es que llega. Estas lluvias van acompañadas de temperaturas altas y humedad asfixiante. La otra estación es entre diciembre y junio cuando los vientos alisios son frecuentes. La mitad del agua de lluvia de todo un año puede a menudo caer en una sola tormenta. Las temperaturas del agua del mar varían en un rango de 21°C y 26°C entre febrero y septiembre respectivamente. Con unas temperaturas máximas en la superficie de 24°C-30°C y unas mínimas de 19°C-24°C [7].

Analizando los datos podemos llegar a la conclusión de que es un emplazamiento de interés porque se dan todos los factores que necesitamos; un país con acceso al mar, con escasez de agua dulce (ya que las islas son bastante áridas, no hay ríos ni lagos) y en vías de desarrollo. Además de tener una temperatura media del agua del mar más que favorable para el cultivo de microalgas.



Figura 3. Localización geográfica del emplazamiento seleccionado: Cabo Verde.

3.2 Chlorella

Es el vegetal con más cantidad de clorofila que existe y tiene un ratio de conversión en fotosíntesis de los más altos. Es una de las microalgas más extendidas a lo largo del planeta. Una de las razones para ser la especie seleccionada es su potencial para eliminar nutrientes de corrientes de aguas residuales con una alta eficiencia, y para diferentes condiciones, es muy versátil. Según el tipo de efluente que se utilice para nutrir a las microalgas se seleccionará una u otra. Hay 3 posibles fuentes de nutrientes a partir de aguas residuales, que se describen en los siguientes subapartados.

3.2.1. Aguas Municipales

Una de las principales razones para utilizar estas aguas es la facilidad con la que se encuentra en los países desarrollados. Uno de los contras es su concentración de químicos y metales pesados debido a las industrias que suele haber en las urbes y estos perjudican al crecimiento de las algas. Se ha estudiado que la más indicada para este tipo de aguas es la *Chlorella vulgaris* presentando una eficiencia del 86% y 78% para eliminar el nitrógeno y el fósforo respectivamente, con un rendimiento que pasaba de 39 a 195 mg/(Ldia) [8].

En el caso este trabajo, las aguas residuales de zonas remotas no tendrían los problemas de las grandes ciudades.

3.2.2. Aguas procedentes de la Agricultura

En comparación con las aguas residuales municipales, en estas puede haber grandes acumulaciones de nitrógeno, fósforo y materia orgánica tanto en forma soluble como en partículas sólidas. A pesar de las altas concentraciones de nutrientes, los estudios demuestran que las microalgas pueden ser unas buenas candidatas para crecer en este medio. Todo esto junto a unas condiciones favorables de temperatura y radiación solar hacen que la productividad de las microalgas sea muy alta. En contra tenemos que las altas concentraciones de amoníaco en estos efluentes de aguas residuales pueden reducir los ratios de crecimiento. Estas aguas no son tan utilizadas como las municipales teniendo como principal causa que son menos numerosas. La especie más indicada para este medio se ha demostrado que es la *Chlorella zofingiensis* con unos ratios de 2,9 g/L en 10 días de cultivo [8].

3.2.3. Aguas Industriales

Esta es la menos indicada y en la que menos estudios se han llevado a cabo debido a la complejidad de los componentes que se hallan en estos efluentes. Como por ejemplo metales pesados y sustancias químicas altamente tóxicas en lugar de nitrógeno y fósforo. Obviamente hay algunas industrias en las que sus aguas residuales podrían ser ideales para el cultivo de las microalgas pero estas son una minoría.

3.3. Chlorella zofingiensis

Se selecciona la subespecie *Chlorella Zofingiensis* del alga *Chlorella* debido a que por descarte nos quedamos con las aguas residuales de la agricultura. Como ya se ha comentado, las aguas industriales no tienen la composición adecuada y ya que se está hablando de reutilizar la salmuera de una planta depuradora no tiene mucho sentido ubicar una planta desaladora para producir agua dulce al lado de una planta depuradora de aguas urbanas, por motivos obvios de higiene y salud. Por todo ello se ha seleccionado la *Chlorella zofingiensis* – ver figura 4 - de la que se conoce gracias a varios estudios ya realizados sus ratios y condiciones de crecimiento.

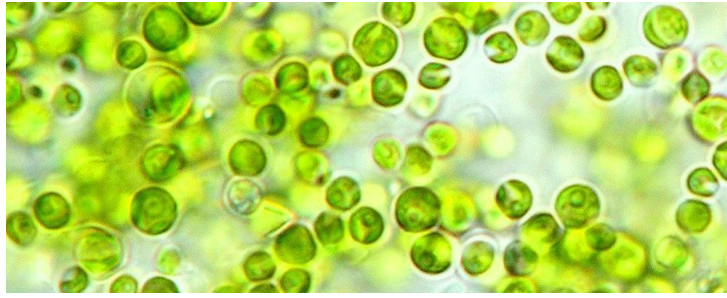


Figura 4. Microalga seleccionada: *Chlorella zofingiensis*.

3.4. Spirulina

El cultivo de la Spirulina se remonta al siglo XVI cuando ya los aztecas la consumían deshidratada como fuente de proteínas. Sus ventajas frente a la chlorella son que su proceso de cultivo, recolecta y secado es mucho más simple, aparte de poder ser cultivada tanto en el exterior como en reactores cerrados a temperatura y luminosidad constantes. Necesita de un pH >8.5 y una temperatura aproximada de 30°C. Es una especie bastante extendida en Sudamérica donde hay muchos puntos en los que se dan altas salinidades (2-270g de sal por litro de agua), bicarbonatados, con altos pH (mayores de 9), temperaturas cálidas (25-35°C) y mucha luz. Como es el caso de Argentina, Perú y Uruguay.

La Spirulina tiene varios usos, al igual que la Chlorella puede utilizarse para producir biodiesel debido a su alto contenido en aceites grasos. Es capaz de neutralizar metales pesados en efluentes tóxicos, al igual que el calcio y sales. Puede utilizarse como fertilizante para suelos de cultivo agrícola reemplazando los fertilizantes químicos. La Spirulina utiliza menos agua por kg de proteína que otros cultivos, esta proteína puede ser usada tanto para pienso animal como para el consumo humano ya que es de alto valor biológico. En su cultivo se utiliza un medio con un 30% como máximo de agua de mar y el resto agua de algún río costero cercano que se mezcla con bicarbonato sódico, amonía fosfato. Se estima que tiene un coste de producción de 11.4 dólares americanos por kg de Spirulina seca de los que cerca del 30% pertenece al coste de los nutrientes que se ahorraría reciclándolos de ganado o peces. En el mercado el precio final alcanza los 20 USD [9].

3.5. Otros cultivos

Según algunos estudios el flujo concentrado o salmuera que tenemos como excedente en la producción de agua dulce por medio de la ósmosis inversa puede tener otros usos de interés aparte del cultivo de algas. Entre ellos se encuentra la cría de una especie de peces (tilapia) que son capaces de adaptarse a niveles de salinidad altos. El fin de estos peces es servir de fuente de proteínas tanto para personas como para pienso de ganado, sus tripas para producir aceites y su piel para colágeno que se destinaría a las empresas cosméticas.

Otra alternativa es el cultivo de una serie de arbustos y plantas que además de tolerar altos niveles de salinidad presentes en el agua de riego provenientes del rechazo de la desaladora, limpian la sal presente en el suelo, lo cual es muy beneficioso tanto para futuros cultivos como para la propia absorción de nutrientes de las plantas del suelo. Estos arbustos se usan como forraje para la alimentación de ganado y en el riego se implementarían la falta de nutrientes presentes en el agua con los excrementos del propio ganado al que sirven de alimento o con los de los peces ya nombrados [9].

3.6. Propuesta de cultivo

El vertido del caudal de concentrado procedente de las plantas de desalación se presenta como un problema cuando se hace sobre acumulaciones de agua de interior como pueden ser lagos o pozos acuíferos. Esto puede conllevar una pequeña variación de los niveles de salinidad en el agua que a su vez provocaría serios problemas en el ecosistema. Además, este caudal de rechazo puede contener residuos del pretratamiento del agua, químicos de limpieza y sus productos de reacción. Tampoco es una opción el verterlo sobre suelos ya que supondría su degradación por salinización. Para retirar la sal del suelo, que es la culpable de que las plantas tengan más dificultades para absorber los nutrientes, es necesaria una adicional cantidad de agua lo que supondría desviar parte del agua dulce para consumo humano. No hay muchas alternativas sobre lo que hacer con este efluente de rechazo, se están desarrollando técnicas para tratarlo y volver a verterlo en el punto de partida o suelo, pero estas técnicas usan altas tecnologías muy costosas y con alta demanda de energía como por ejemplo la evaporación-cristalización que podría ser viable si se incluyese la energía solar en el proceso.

Hay un especial interés en el uso de esta corriente de concentrado de sales aprovechándolo lo máximo posible como sustento para la acuicultura y el riego de plantas que pueden ser una valiosa fuente de biodiesel o forraje para pienso junto con el cultivo de algas. El uso para la producción de microalgas de esta corriente mezclada con los nutrientes de aguas residuales como fuente de fósforo es de especial interés. Este proyecto tiene sentido en lugares semiáridos donde haya depósitos de agua salobre tierra adentro. La falta de agua afecta dramáticamente al desarrollo económico de un país, por lo tanto, el aprovechamiento de estos depósitos de agua bajo tierra puede mejorar la calidad de vida de estas comunidades remotas dramáticamente, donde la opción más viable es la desalación por ósmosis inversa. Como ya se ha comentado los criterios para la selección de estas comunidades remotas donde instalar y llevar a cabo el proyecto se basa en las bajas tasas de lluvias, alta mortalidad infantil y poca accesibilidad al agua potable, entre otros. Para medir la salinidad de estos pozos que suelen encontrarse –véase tabla 2-, según la zona, a una media de unos 40-80 metros de profundidad, se recurre a cuantificar la conductividad del agua para así poder clasificar el tipo de agua. Con el objeto de obtener el mínimo impacto ambiental se ha desarrollado el siguiente esquema de producción – véase figura 5- en el que intenta dar el máximo aprovechamiento posible al efluente de concentrado de sales a la vez que se protege el entorno [9].

Este esquema tiene como entrada la corriente de salmuera y produce junto con agua potable, pescado para el consumo humano y forraje para la ganadería local. También se puede obtener aceite procesando los desperdicios del pescado usado como fuente de proteína para el ganado, así como usar los excrementos de estos últimos como fertilizante mezclado con el agua de riego. El cultivo de peces puede ser sustituido por el del alga *Spirulina* como fuente de proteína o cultivarse a la par, complementándose el uno al otro. La primera etapa del uso de este rechazo de salmuera consiste en el cultivo de los peces y/o la microalga *Spirulina*. Seguidamente la salmuera entra en un depósito de mezcla donde se enriquece con materia orgánica procedente de los desechos de la agricultura local. Finalmente, la salmuera se utiliza para regar los cultivos de arbustos y forrajes que servirán para suplementar la alimentación del ganado local.

EC (mS·cm ⁻¹)	pH	(mmol·L ⁻¹)						SAR (mmol·L ⁻¹) ^{0.5}
		Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	Cl ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	
2.6	7.0	11.3	7.4	0.9	13.8	7.4	0.0	0.3
10.5	7.0	35.1	43.4	3.1	110.0	11.0	0.0	0.5
2.2	7.5	11.3	9.2	0.1	9.0	0.1	11.8	0.0
3.4	7.8	16.6	8.2	0.1	22.4	0.3	10.4	0.0
1.4	8.0	7.9	5.2	3.1	5.7	0.9	9.0	1.2
3.2	7.8	10.7	13.3	0.2	15.2	2.4	5.7	0.0
3.2	7.5	20.1	5.1	0.1	19.5	1.7	7.0	0.0
3.3	7.6	11.9	9.2	0.1	15.4	2.1	3.0	0.0
0.8	7.6	8.1	9.5	3.2	11.6	0.5	2.0	1.1
1.2	8.1	6.1	4.7	3.2	3.8	1.0	7.4	1.4

Tabla 2. Análisis químico de la salmuera que se obtiene como rechazo de desaladoras de ósmosis inversa.

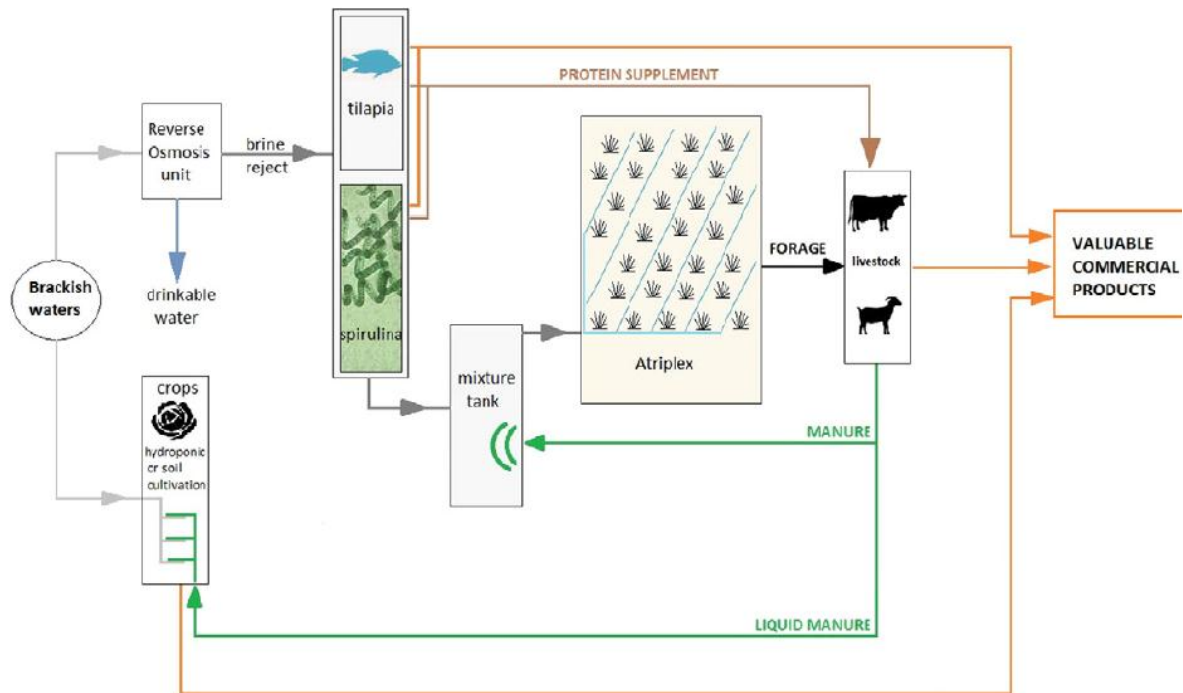


Figura 5. Esquema de la propuesta de cultivo.

La mejora propuesta de este esquema ya planteado consiste en derivar parte de la salmuera para el cultivo de la microalga *Chlorella Zofingiensis*, también mezclada con los desperdicios del ganado para nutrir el medio, y utilizarla para la producción de biodiesel, lo que supondría otra fuente de ingresos que ayudará a la sostenibilidad económica del proyecto, a parte de la producción del ganado y piscifactoría.

3.6.1. Cultivo de peces y riego

Se basa en la cría de la especie Tilapia que se adaptan muy bien en los medios con alta concentración de sal. En una posterior etapa la salmuera que abandona el depósito es mezclada con el fertilizante orgánico (excrementos del ganado) y bombeado para el riego de los helechos y forraje, así como para los tanques de cultivo de *Chlorella*. El ganado está formado mayormente por cabras, que es alimentado por este forraje de la especie *Atriplex* seleccionada por su alto valor nutricional. Así se consigue volver productivo y sacar provecho durante todo el año de algo que inicialmente carecía de valor, además de tratar el problema de la sequía, así como beneficiar al medio ambiente con este esquema de producción sostenible. Normalmente está propuesto para ocupar unas dos hectáreas de terreno que se sitúan en las proximidades de la planta desaladora (etapa 1) - véase figura 6 [9] - compuesto por dos depósitos para la cría de tilapia (etapa 2) seguido de otro tanque donde se enriquece la salmuera con la materia orgánica, sumando en total 1ha, más la plantación de los arbustos *Atriplex* (etapa 3), otra hectárea. Y una pequeña área adicional para la manufacturación y tratamientos auxiliares (etapa 4). Los rendimientos suelen rondar entre los 10 y 15 toneladas en peso seco por hectárea y año, contando en el peso el forraje, la cantidad de tilapia y las algas.

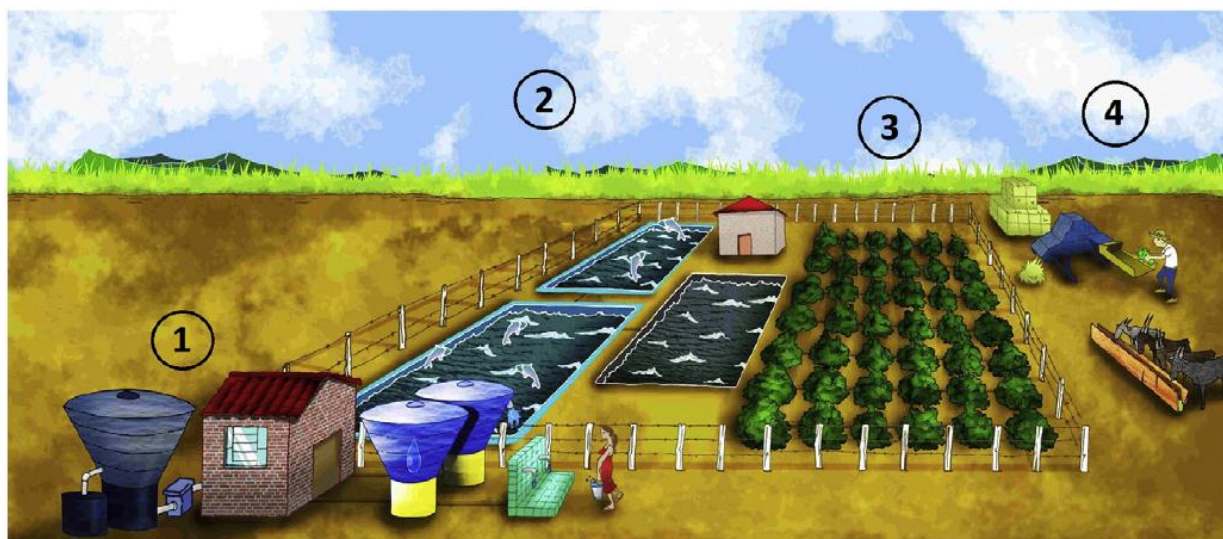


Figura 6. Esquema de la producción integrada para el uso de la salmuera de una desaladora en tierra.

La ganancia de peso del ganado aumentaba cuando en la alimentación se añadía una cantidad de tilapia que rondaba el 38,3% hasta el 64,6%, llegando a ganar 138 gramos al día cada cabra –véase tabla 3-. Todo esto siempre depende de los niveles de salinidad que tenga la salmuera, así como las precipitaciones locales, calidad del suelo, dieta de los animales entre otros factores, por ello esto es una guía de valores aproximados en un caso estándar.

3.6.2. Producción de Tilapia

Es un pez originario de África y aunque son peces de agua dulce se adaptan muy bien a las aguas saladas. Esta especie se encuentra en tercer lugar en cuanto a producción de peces en piscifactorías por detrás de la carpa y el salmón. Tienen una dieta vegetariana y su idoneidad para el cultivo se debe a su total aprovechamiento, su alto nivel proteico, gran tamaño y rápido crecimiento (de 6 a 7 meses hasta su recogida). La cría de esta especie se realiza en tanque o canales y es considerada segura para el medio ambiente ya que se aprovecha el pescado en su totalidad incluyendo sus excrementos. Los tanques suelen tener una capacidad media de 330 metros cúbicos y pueden contener grandes concentraciones de población. Los restos que no sirven para el consumo humano se usan para producir aceites para alimentar al ganado, producir jabones o incluso biodiesel. Así como la piel para la industria cosmética.

Salinity of RO reject brine (mS·cm ⁻¹)	Tilapia (<i>Oreochromis</i> sp.) production	Annual yield of dry biomass (ton·ha ⁻¹)	Amount of forage saltbush given to goats (kg·day ⁻¹ ·animal ⁻¹)	Weight increase of the livestock (g·day ⁻¹)
11.38	648.4 kg in 153 days	14.9	1.5	138

Tabla 3. Productividad del esquema.

3.6.3. Cultivo de forraje

A parte de los arbustos *Atriplex*, se pueden cultivar otras especies de plantas sirviéndose de la salmuera. Gracias a estudios realizados con diferentes especies de flores, hortalizas y tubérculos se ha conseguido adaptar algunas de estas a condiciones menos favorables, con agua salina, suelos pobres y peores fertilizantes. Una de las técnicas consiste en usar el agua con alta salinidad sólo en las más avanzadas etapas del desarrollo de la planta, cuando tienen una mayor tolerancia a la sal. Se procede a la siembra en la época de lluvias para que durante la germinación se recurra a agua de mejor calidad baja en sal. Más tarde en la estación seca proceder a agua más salobre aprovechando que la planta ya está más crecida y es más tolerante a asimilar estas sales. También se suele recurrir a los orines del ganado diluidos en agua dulce.

Los cultivos que mejor respuesta han mostrado frente a los diferentes niveles de salinidad que se utilizan durante el proceso que dura un año son; tomate, lechuga, remolacha, girasol, algodón, papaya, feijoa y la caña de azúcar. Dependiendo de la calidad del agua con la que se cuente se adecuará una especie mejor que otra y atendiendo a las necesidades y demanda de la zona. Además, estos cultivos ayudan a reducir el exceso de salinidad del suelo que empeora la calidad del mismo y así permiten su regeneración y su posterior reutilización. Véase tabla 4.

Species	Type of cultivation	Range of salinity of the study (mS·cm ⁻¹)	Inhibition of the grc each increasing mS within the range
Lettuce (<i>Lactuca sativa</i>)	Hydroponic	1.3-5.2	7.0%, 15.0%, 17.0%
Beetroot (<i>Beta vulgaris</i>)	Hydroponic	1.2-5.2	7.0% to 9.0%
Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	Hydroponic	2.1-10.1	2.6%
Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i>) – Miller Astona variety	Soil cultivation	1.8-8.8	6.0%
Sunflower (<i>Helianthus annuus L.</i>)	Soil cultivation	0.5-5.0	10.0% to 11.0%
Sunflower (<i>Helianthus annuus L.</i>)	Soil cultivation, under nitrogen fertilization	0.5-4.9	7.6%
Sunflower (<i>Helianthus annuus L.</i>) – Red Sun variety	Hydroponic	0.5-16.4	5.8%
Cotton (<i>Gossypium hirsutum</i>)	Soil cultivation	0.5-8.5	10.0%
Cotton (<i>Gossypium hirsutum</i>)	Soil cultivation, under nitrogen fertilization	0.7-8.7	9.5%
Papaya (<i>Carica papaya L.</i>)	Soil cultivation	1.2-4.8	7.2%
Feijoa (<i>Acca sellowiana</i>)	Soil cultivation	2.8-11.1	20.0%
Sugar cane (<i>Saccharum officinarum</i>) – My 5514 variety	Soil cultivation	3.2-6.0	10.0%

Tabla 4. Reducción cuantitativa (rendimientos) de la sal del suelo con la cosecha de diferentes cultivos.

4 DESALACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa (OI) se basa en el concepto de ósmosis, que es un proceso físico natural que se da en la vida de los animales y plantas, y consiste básicamente en el siguiente efecto: Teniendo en cuenta un recipiente con dos compartimentos independientes separados entre sí por una membrana semipermeable, los cuales contienen una solución salina y otra de agua dulce (o solución de menor concentración), una parte del agua dulce pasará a través de la membrana semipermeable a la solución salina, es decir, se produce un flujo espontáneo de agua desde la solución diluida a la solución más concentrada – véase la parte izquierda de la figura 7 -. Cuantificando la diferencia de nivel existente de la solución salina respecto a la de agua dulce, nos indicará la medida de la presión osmótica de dicha solución. La presión osmótica será la presión que hay que aplicar en la solución concentrada para evitar la ósmosis natural. Por tanto, al aplicar una presión mayor que la osmótica obtendremos el fenómeno de la ósmosis inversa, en el cual se invierte el sentido espontáneo de flujo de disolvente – véase la parte izquierda de la figura 7 -.

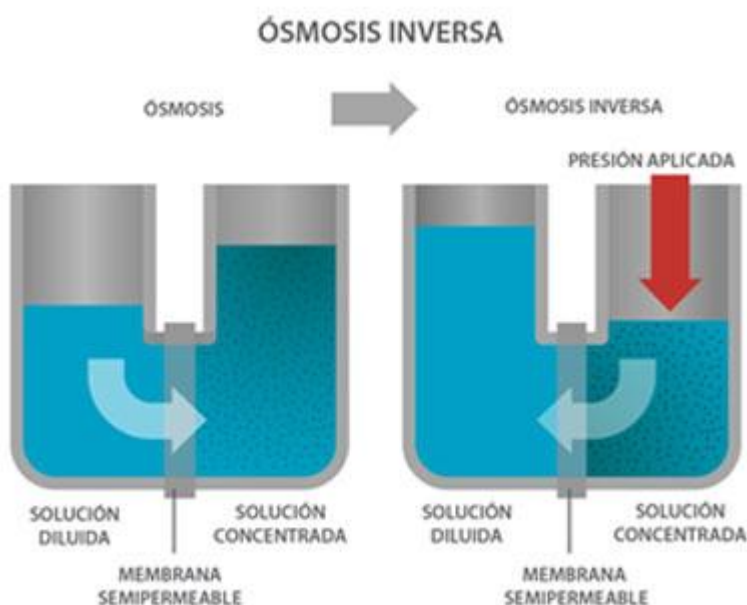


Figura 7. Diagramas ilustrativos de los procesos de ósmosis y de ósmosis inversa.

4.1. Antecedentes históricos, presente y futuro de la OI

La ósmosis inversa se lleva utilizando para producir agua dulce a partir de agua del mar o salobre desde que en 1748 la descubriera Abbé Nollet, pero no es hasta cien años más tarde cuando se utiliza este método en 1867. Las primeras membranas eran fabricadas en piel de animales. Más adelante se fue avanzando en su investigación llegando a las membranas fabricadas en acetato de celulosa.

Las primeras plantas piloto se construyen en los años sesenta, ambas en la Universidad de Los Ángeles, en California. Siendo la primera instalación que se conoce a nivel industrial que suministraba agua potable realizada en la ciudad de Coalinga (California) en 1965.

Esta tecnología se ha desarrollado enormemente en la última década para obtener agua potable a partir de agua de mar. Más de las dos terceras partes de las plantas que se encuentran en España y más en concreto en Canarias

utilizan la OI. A parte de agua de mar también se puede utilizar agua salobre, el agua de alimentación es bombeada a grandes presiones dando lugar a dos flujos, uno de baja concentración llamado de producto y otro de alta concentración denominado rechazo o salmuera.

Incluso la membrana de ósmosis inversa más perfecta existe un balance dinámico entre flujo de moléculas de agua pura y la difusión de iones inorgánicos. Este paso de sales y flujo de agua se puede controlar a través de la composición de la membrana y la técnica de fabricación.

4.2. Instalación desaladora de agua mediante OI

Constan de 4 partes bien diferenciadas:

1. Captación de agua de mar.
2. Pretratamiento físico-químico.
3. Núcleo productivo del proceso: Equipos de alta presión, bastidores de membranas de OI y dispositivos de recuperación energética.
4. Postratamiento del agua producida.

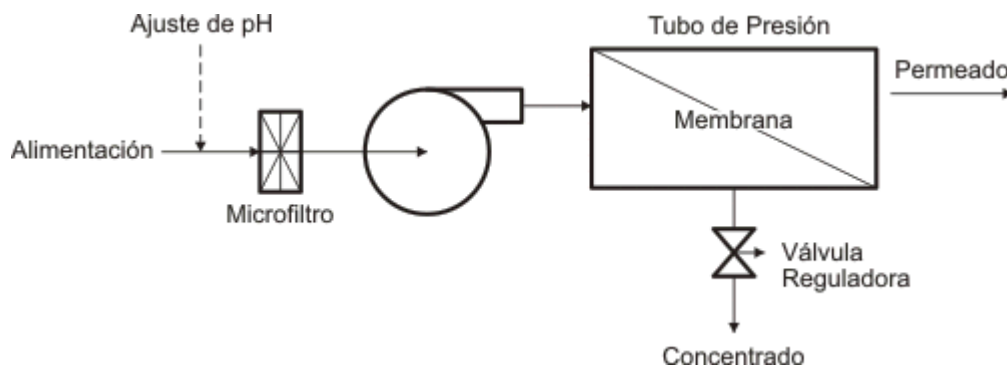


Figura 8. Diagramas conceptual de una instalación de ósmosis inversa.

Las principales diferencias entre desalar agua salobre respecto a una Instalación de Desalación de Agua de Mar (IDAM) son [10]:

- El tamaño de la instalación y la capacidad de producción.
- La salinidad del agua salobre es inferior a la de mar.
- El pretratamiento diseñado para la instalación de agua salobre no es estándar, a diferencia del de agua de mar.
- Los equipos de bombeo son de media presión en vez de alta presión.
- No se suelen incorporar equipos de recuperación de energía.
- Conversiones > 45%, cercanas al 90%.
- Las membranas tienen que soportar menos presiones de trabajo.

4.2.1. Captación del agua de mar

La localización y el caudal de extracción son los factores clave para el diseño de pretratamiento requerido para el agua de alimentación. Hay dos formas más comunes para captar agua bruta:

1. Toma mediante pozos aislados o mediante cántara común: Las máquinas de perforación llegan a

alcanzar profundidades superiores a 40 metros hasta alcanzar la suficiente permeabilidad del terreno que garantice el caudal de extracción demandado. Las bombas de captación del agua bruta se realizan con bombas sumergibles instaladas en el interior de cada perforación. Suele presentarse una escasa o nula actividad biológica, lo que resulta favorable.

2. Toma abierta superficial o a través de un emisario submarino: No existe problema de caudal de extracción pero se reduce el rendimiento de la instalación debido a:
 - a. Presencia de sólidos en suspensión.
 - b. Elevada actividad biológica.
 - c. Sensibilidad a la polución por hidrocarburos.
 - d. Temperatura variable.

Se debe optar por esta segunda vía cuando no se tenga otra alternativa, lo que nos conduciría a un pretratamiento más complejo y costoso que se traduciría en un mayor encarecimiento del coste del metro cúbico del agua desalada.

4.2.2. Pretratamiento físico-químico

Para que la planta funcione correctamente se debe tener un pretratamiento adecuado, bien diseñado y que la explotación y mantenimiento se realicen adecuadamente.

La misión del pretratamiento es suprimir o reducir los atascamientos que se puedan producir en la membrana, de manera que el rendimiento de la planta no se vea afectado. Generalmente el decrecimiento del rendimiento de una planta es debido a materias atrapadas en el módulo o sobre la membrana. Se traduce en un incremento del paso de sales y en una disminución de la productividad. Las limpiezas periódicas recuperan la mayor parte de las características del caudal del módulo. En condiciones estacionarias de funcionamiento la salinidad del agua producto (o permeado) debe permanecer casi constante así como la pérdida de carga del módulo. Un aumento de estos factores son síntomas de un ensuciamiento o precipitación de las membranas.

Para un resultado satisfactorio hace falta acondicionar el agua bruta que garantice la total eliminación de problemas de funcionamiento mediante un pretratamiento físico y químico que consta de:

- a) Desinfección: para eliminar la posible actividad biológica presente en el agua es necesario esterilizar la misma, para así evitar que dichos organismos proliferen en el resto de la instalación. Normalmente se recurre al hipoclorito sódico, que es el bactericida más efectivo en intervalos reducidos de pH. El único inconveniente que tiene este método es que pueden formarse derivados clorados altamente perjudiciales para la salud que se han de eliminar.
- b) Acidificación: se usa para evitar incrustaciones, reducir la velocidad de oxidación de los iones ferrosos y disminuir la velocidad de hidrólisis de las membranas. También permite mantener el pH del agua controlado.
- c) Coagulación: evita la precipitación sobre las membranas de materias coloidales, para ello se agrupan gracias a la adición de un reactivo químico, polielectrolitos o sales de hierro. Posteriormente se retienen en un lecho filtrante los flóculos agrupados.
- d) Filtración: después de los pasos anteriores se hace pasar el agua a través de filtros multicapa. La regeneración del lecho filtrante se realiza con lavados a contra corriente. Los filtros incluyen arena, arena de sílice, carbón, tierra, perlita y carbón activado en polvo o gránulos.
- e) Filtración lenta con arena: consiste en un tanque impermeable al agua que contiene una capa de arena soportada sobre otra de grava. La arena sucia se limpia hidráulicamente. Es altamente eficaz cuando se tratan aguas sin necesidad de coagulación previa, es eficaz para separar la mayor parte de materia en suspensión.
- f) Decloración: la mayoría de las membranas utilizadas en la OI no toleran el cloro ni agentes oxidantes, para ello se recurre al carbón activo.
- g) Antiincrustantes: las sales poco solubles deben requerir atención para evitar que precipiten sobre la membrana. Para ellos se usan dispersantes compatibles con dicha membrana.
- h) Microfiltración: antes del bombeo a alta presión se instala como última etapa de pretratamiento la filtración por cartuchos. El agua a presión se hace pasar por los cartuchos filtrantes. Últimamente suele sustituirse por ultrafiltración.

4.2.3. Tipos de ensuciamiento

Se producen por la acumulación de sustancias sobre la superficie de la membrana por:

1. Precipitaciones.
2. Depósitos.
3. Circunstancias especiales.

4.2.3.1. Ensuciamiento por precipitaciones

En el agua existen dos elementos que pueden producir precipitaciones sobre las membranas:

- a) Precipitación por sales minerales: si las sales presentes en el agua superan sus productos de solubilidad, es decir, se da cuando las sales presentes son débilmente solubles. La potencialidad de precipitados de cualquier agua se determinan a partir de los análisis del agua.
- b) Precipitaciones de óxidos metálicos: las aguas brutas pueden contener sales solubles de iones metálicos que por oxidación pueden formar hidróxidos insolubles. Estos son el hierro, manganeso y aluminio.

4.2.3.2. Ensuciamiento por depósitos

Este tipo de ensuciamiento se da cuando las sustancias quedan retenidas en la superficie de la membrana, estas pueden ser:

- Partículas de gran tamaño: Para evitarlo se colocan justo antes de la bomba de alta presión un filtro de cartuchos como dispositivo de seguridad para retener las partículas de mayor tamaño.
- Sustancias coloidales: se producen por la coagulación de las mismas sobre la superficie de la membrana, es necesario en estos casos controlar la concentración de coloides presentes en el agua bruta.
- Sustancias biológicas: se produce cuando el agua bruta contiene suficientes elementos nutritivos como para favorecer el rápido desarrollo de microorganismos en el interior del módulo. Puede afectar a las membranas si estas son biodegradables. Si no lo son actuaría como un atascamiento coloidal.

4.2.3.3. Ensuciamiento por circunstancias especiales

En casos excepcionales pueden presentarse tipos extraños de ensuciamiento debidos a:

- Azufre coloidal: se da en pozos de agua bruta en los que haya presencia de ácido H_2S donde además se inyecte cloro o pentre aire por los mismos. Por ello se ha de evitar la entrada de aire en los pozos.
- Compuestos orgánicos: en zonas muy próximas a complejos industriales, trazas de compuestos orgánicos (aceites, etc.) que pueden atascar los módulos.

4.2.4. Equipos de alta presión y membranas de OI

El equipo de alta presión está constituido por tres elementos:

- Bomba de alta presión.
- Motor de accionamiento eléctrico.
- Dispositivos de recuperación de energía.

En el caso de utilizar una turbina Pelton como recuperador de energía, al conjunto de estos tres elementos instalados sobre una bancada rígida se le denomina turbobomba. La recuperación de energía se realiza con una turbina que puede funcionar como una bomba de alta presión invertida, denominadas turbinas de contrapresión. Se basan en la transmisión de la energía recuperada de la salmuera con una presión alta al girar los álabes de la rueda. Las bombas de alta presión deben aportar una presión superior a la presión osmótica del agua a tratar. La selección de la bomba se basa en la presión de bombeo necesaria y el caudal de producción deseado. Hay dos tipos:

- a) Bombas de desplazamiento positivo o de tipo pistón; pequeña producción, más costosas y necesitan de un mayor mantenimiento.
- b) Bombas centrífugas; son las más utilizadas, rendimiento hidráulico inferior pero fiabilidad mucho mayor a parte de necesitar poco mantenimiento.

Actualmente el uso de turbinas Pelton es obsoleto y se instalan otro tipo de dispositivos. Los recuperadores de energía se dividen en:

- a) Turbocharger: se trata de un recuperador de energía proveniente del rechazo, no hay necesidad de un motor de accionamiento eléctrico. Se instala en serie con la bomba de alta presión, a continuación de la misma.
- b) Cámaras isobáricas o intercambiadores de presión: Se instalan en paralelo con la bomba de alta presión. Tras las cámaras isobáricas debe instalarse una pequeña bomba de circulación o bomba *booster*.

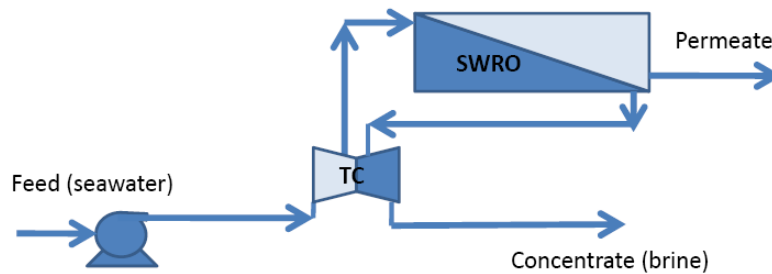


Figura 9. Esquema del núcleo productivo de una IDAM (SWRO – Sea Water Reverse Osmosis) que utiliza turbocharger (TC) como recuperación energética [11].

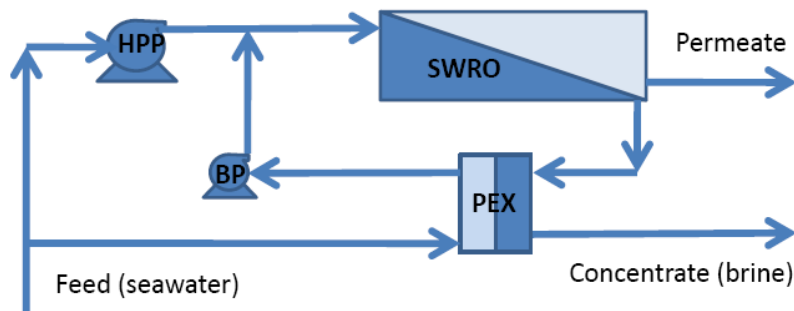


Figura 10. Esquema del núcleo productivo de una IDAM que utiliza intercambiadores de presión (PEX) como recuperación energética [11]. Notación: SWRO – Sea Water Reverse Osmosis, bastidor de membranas de agua de mar; BP – Booster Pump, bomba de circulación; HPP- High Pressure Pump, bomba de alta presión).

El número de membranas requerido depende de:

- Características del agua de alimentación.
- Temperatura.
- Conversión.
- Presión de alimentación.
- Comportamiento de la membrana ante el ensuciamiento y el tiempo de operación (Fouling factor y coeficiente de compactación de la membrana).

Al conjunto de membranas se las agrupa en lo que se denomina bastidor de membranas, que interconecta membranas en serie y en paralelo – véase figura 11 –, formando unidades independientes. Las membranas en serie se alojan dentro de un cilindro llamado tubo de presión. Diversos tubos de presión se interconectan en paralelo, dando lugar al bastidor de membranas. Normalmente un bastidor de membranas es alimentado por una única bomba de alta presión.

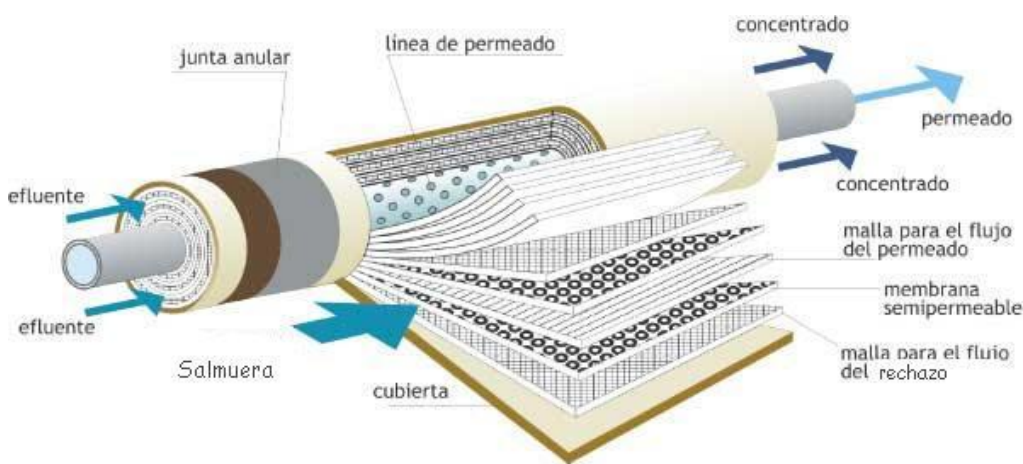


Figura 11. Esquema de un elemento comercial de membrana de ósmosis inversa de arrollamiento en espiral, el único tipo empleado en desalación de agua de mar

4.2.5. Postratamiento del agua producida

Con objeto de corregir el pH del agua producida por OI, se ajusta a niveles de potabilidad (6,5-8,5), es necesario incrementar la basicidad del agua con la adición de bases como el hidróxido sódico o el hidróxido cálcico. Por razones de potabilidad se aconseja mantener un nivel de cloro libre para evitar el desarrollo de crecimiento de organismos.

5 PREDISEÑO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA (OI)

En el mercado existen varios fabricantes de membranas tanto para agua de mar como para agua salobre, todos ellos disponen de software informático de aplicación práctica para el diseño de los bastidores de membranas de una instalación, que simulan el funcionamiento de una planta. De entre los que cabe destacar Filmtec-Dow Chemical que dispone de una aplicación informática para módulos de distinta configuración, en especial para membranas de arrollamiento en espiral. El nombre de esta aplicación es ROSA y es el medio utilizado para calcular las diferentes simulaciones llevadas a cabo en este trabajo.

Para hacer una estimación del consumo y necesidades de una planta desaladora, que será el vehículo por el cual se obtendrá el agua dulce y la posterior salmuera objeto de este trabajo, se ha recurrido al software ROSA el cual introduciendo una serie de datos se obtiene un informe que nos da la información necesaria para llevar a cabo el proyecto planteado:

- Composición química del agua, ya sea agua de mar o agua salobre de alta o baja salinidad en este caso.
- Caudal de alimentación del sistema.
- Presión de alimentación de la bomba.
- Rendimiento de la bomba.
- Configuración de la planta, número de pasos y etapas que dependerá de la composición del agua de entrada.
- pH del agua.
- Temperatura de operación, a la cual se encuentra el agua bruta o de alimentación, dependiendo de si se obtiene de mar abierto o de pozo variará la temperatura, así como la zona del planeta.
- Número y modelo de membranas de filtración que conociendo los valores para los que han sido testadas de flujo, presión y concentraciones, habrá que decantarse por la que optimice el proceso para que sea lo más económico posible tanto en consumo de la bomba como en la cantidad de flujo de permeado.

El programa además incorpora una serie de advertencias en el caso de que algunos parámetros hayan superado ciertos límites prefijados por el fabricante.

5.1. Parámetros de funcionamiento en una instalación de membranas de ósmosis inversa.

En este apartado se explicará el por qué es necesario utilizar estos programas informáticos para la estimación y simulación de las plantas desaladoras y el significado físico de las ecuaciones que utiliza en su desarrollo.

Los principales parámetros operativos que se deben tener en cuenta son los que respectan al balance de masa de caudales y sales:

$$Q_F = Q_P + Q_R$$
$$Q_F \cdot C_F = Q_P \cdot C_P + Q_R \cdot C_R$$

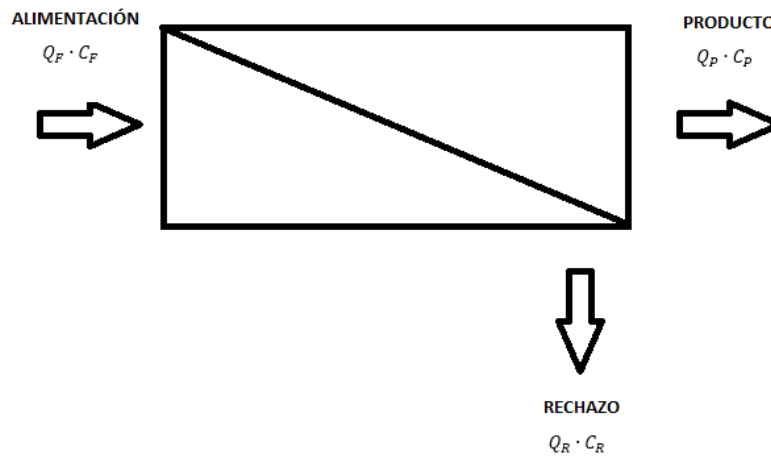


Figura 12. Caudales y concentraciones del agua de alimentación, producto y rechazo.

En toda instalación con membranas de ósmosis inversa hay tres flujos de caudales con sus respectivas concentraciones de sales. En las que destaca el flujo de permeado que será el que tenga la concentración de sales más baja, mientras que el correspondiente al rechazo o salmuera presenta la más alta concentración.

5.1.1 Factor de conversión (R)

Se expresa en tanto por ciento y es el cociente entre el caudal de agua producto (Q_P) y el caudal de agua bruta de alimentación (Q_F). Su expresión es:

$$R = \frac{Q_P}{Q_F} \times 100$$

Este valor nos indica la cantidad de agua desalada que se obtiene a partir de cierta cantidad de agua bruta de alimentación. La conversión total de una planta se obtiene a partir de los factores de conversión parciales de los diferentes tubos modulares que la componen, que a su vez estos factores se obtienen a partir del factor de conversión de cada elemento.

La presión efectiva de operación de una planta de OI se define como la presión suministrada por la bomba principal menos la presión osmótica del flujo alimentación-rechazo. Un factor de conversión alto implica una elevada concentración de salmuera, dando lugar a ensuciamientos cristalinos o scaling.

En la aplicación ROSA se especifican los flujos mínimos de salmuera permisible, con esto se consigue evitar un régimen laminar al paso por la membrana que ocasiona estancamientos de sales y posibles polarizaciones por concentración, por ello se busca siempre un régimen turbulento, además saltan advertencias en el caso que se plantee una incorrecta simulación. Para asegurarse que esto no ocurre se diseñan plantas de OI con varias etapas, de manera que cada etapa contiene menos tubos de presión que la etapa anterior, con esto se garantiza una velocidad del agua constante y por tanto una reducción del riesgo de formación de sales cristalinas.

5.1.2 Caudal de agua producto

El caudal de agua producto en una membrana semipermeable tiene la expresión simplificada:

$$Q_P = L_P \times A \times (\Delta P - \Delta \Pi)$$

Siendo $L_P = \frac{K_P}{r}$, y donde:

ΔP : diferencia de presión hidrostática a través de la membrana.

$\Delta\Pi$: diferencial de presión osmótica.

L_P : permeabilidad hidráulica del agua.

A: área de membrana instalada.

r: espesor de la membrana.

K_P : coeficiente asociado a la permeabilidad.

Esta ecuación se puede expresar de forma más sencilla:

$$Q_P = K \times \Delta P^*$$

donde K es una característica de cada tipo de membrana y ΔP^* es la diferencia de presión neta a través de la membrana. A mayores concentraciones de sal mayores son las presiones osmóticas, por tanto, la presión osmótica es función directa del contenido de sales disueltas.

El flujo de volumen a través de una membrana, es una función que depende del área de la membrana y del tiempo, que suele ser un dato aportado por el fabricante. De esta manera se puede calcular de forma aproximada el número de membranas idóneo que habría que instalar. Pero la realidad es otra, y es que para conocer la productividad real de una planta es necesario tener en cuenta otros parámetros como la temperatura del agua o el tiempo de operación de la planta que influyen en la presión osmótica. Para ello se hacen una serie de correcciones basándose en los siguientes factores y queda esta ecuación corregida:

$$Q_P = f_P \times f_T \times f_t \times Q_{P,0}$$

donde:

Q_P : caudal de producto de la planta de OI en las condiciones reales de trabajo.

$Q_{P,0}$: caudal de producto de la planta de OI en las condiciones normalizadas.

f_P : factor de corrección de la productividad asociado a la presión.

f_T : factor de corrección debido a la temperatura.

f_t : factor de disminución del caudal específico de las membranas como consecuencia del tiempo de operación.

5.1.3 Paso de sales

Se define como el cociente entre la concentración de sales en el permeado con respecto al promedio de concentración de sales en la alimentación:

$$SP = \frac{C_P}{C_F}$$

Es un parámetro que viene dado dentro de las características técnicas del fabricante, los factores que influyen en el paso de sales son el tipo y concentración de constituyentes en la alimentación, la presión de operación y el factor de conversión. En una planta de OI, el paso de sales hay que corregirlo en condiciones normalizadas, que suele ser distinto. La expresión en general es:

$$SP = f_c \times (SP_0)$$

$$f_c = \frac{SP}{SP_0} = \frac{\frac{C_P}{C_F}}{\frac{C_{P0}}{C_{F0}}} = \frac{C_{F0}C_P}{C_FC_{P0}}$$

$$C_P = \frac{Q_S}{Q_P}$$

donde Q_P es el caudal de agua a través de la membrana y Q_S el caudal de sales:

$$Q_S = K \times \frac{A}{d} \times \Delta C$$

siendo:

A: área de la membrana instalada.

d: espesor de la membrana.

ΔC : diferencia de concentración de una determinada sal a través de la membrana.

Como se puede observar para calcular estos parámetros imprescindibles para la simulación de una planta de OI es necesario contar con datos que sólo conocen y tienen acceso el fabricante, por ello hay que utilizar la aplicación informática, que es una herramienta que proporcionan para así evitar tener que desvelar esos datos. Y que de otra forma sería muy complicado calcular empíricamente ya que las mediciones para que los datos sean exactos han de ser llevados a cabo en el punto justo de entrada y salida de la membrana, cuyos valores no son constantes, sino que varían a medida que la membrana se ensucia, cambia la temperatura del agua o se degrada ésta. Por ello se usa este software para simular estas situaciones.

6 DISEÑOS PROPUESTOS PARA LOS SISTEMAS DE DESALACIÓN

Una vez introducido el software ROSA se va a explicar los 3 distintos casos que se han cogido de ejemplo en este trabajo para simular una planta de OI con ayuda de la aplicación informática, en el que se han elegido tres aguas de distinta concentración salina y características; agua salobre de alta salinidad, agua salobre de baja salinidad y agua del océano Atlántico. Con estas simulaciones se ha tratado de estimar el consumo energético de una planta de OI real.

6.1. Caso1: Agua salobre de alta salinidad (BWRO)

En este caso se ha trabajado con una composición química estándar [12]:

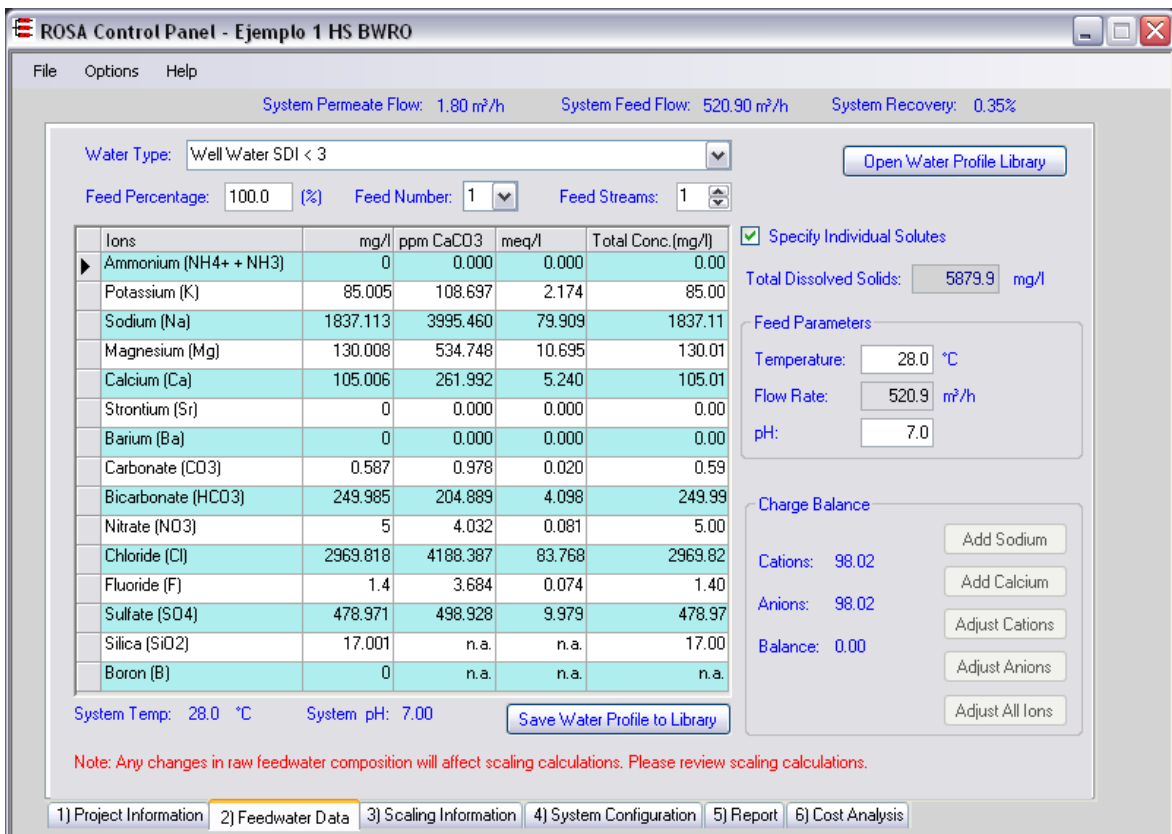


Figura 13. Composición de agua salobre de alta salinidad en el software ROSA.

El siguiente paso es establecer la configuración que va a tener el sistema, es decir, como se va a proceder a desalar el agua bruta, en este caso lo normal es hacerlo en un paso con dos etapas. Como se observa en la figura 14 la alimentación entra en la primera etapa impulsada a la presión marcada, obteniéndose un flujo de permeado y otro de concentrado o rechazo, que será nuevamente tratado en otra etapa volviendo a tener de nuevo dos flujos, uno de permeado de peor calidad que se mezclará con el obtenido en la primera etapa, que es de mejor calidad, y otro concentrado de salmuera al que se le dará un uso sostenible previamente habiendo pasado por los recuperadores de energía, ya que este rechazo sale a una presión considerable.

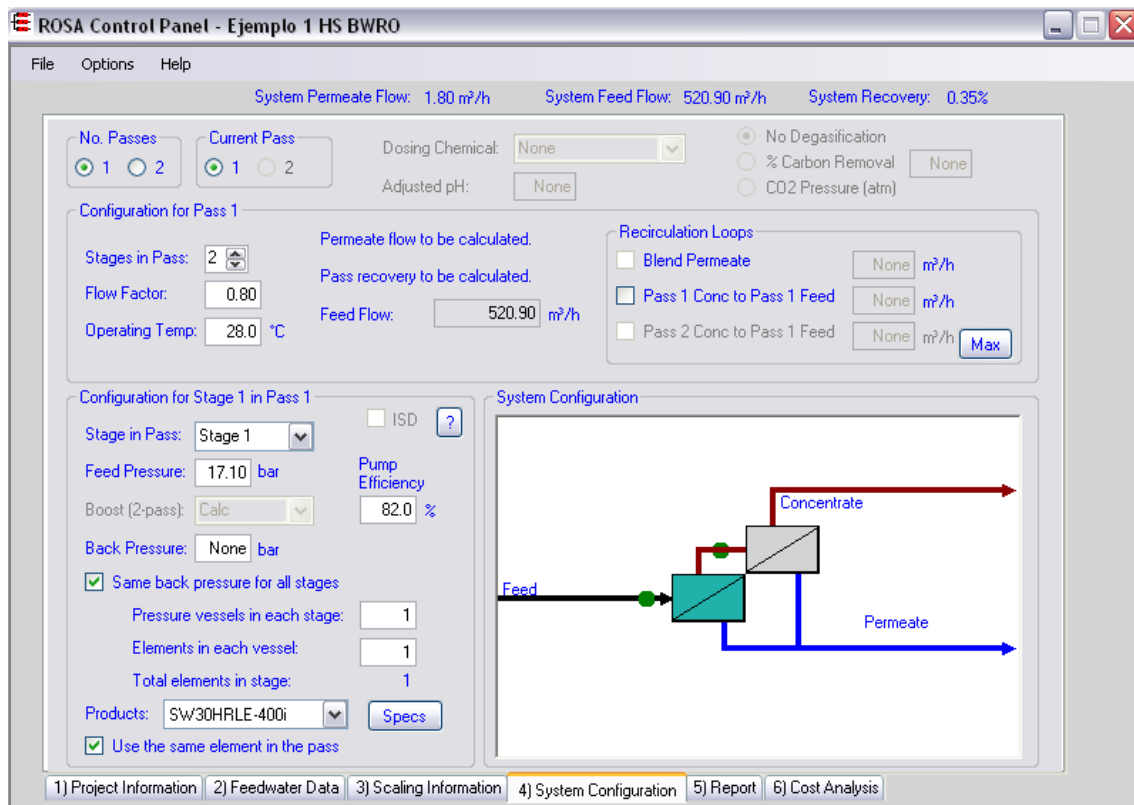


Figura 14. Configuración del sistema para agua salobre de alta salinidad en el software ROSA.

Una vez introducidos todos los datos y elegido un modelo de membrana así como su distribución se procede a generar un informe –véase figura 15- que detalla toda la información acerca del caudal de permeado y concentrado, presión de salida, composición, porcentaje de recuperación y consumo específico de la bomba principal son los más importantes y lo que se han analizado para la selección.

Case-specific:

System Details

Feed Flow to Stage 1	320.90 m ³ /h	Pass 1 Permeate Flow	435.61 m ³ /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	520.90 m ³ /h	Pass 1 Recovery	83.63 %	Feed	4.10 bar
Feed Pressure	17.10 bar	Feed Temperature	28.0 °C	Concentrate	24.32 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	5879.89 mg/l	Average	14.25 bar
Chem. Dose	None	Number of Elements	600	Average NDP	7.06 bar
Total Active Area	24525.60 M ²	Average Pass 1 Flux	17.76 lmh	Power	351.64 kW
Water Classification: Well Water SDI < 3				Specific Energy	0.81 kWh/m ³

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m ³ /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m ³ /h)	Conc Flow (m ³ /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m ³ /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-440i	50	8	320.90	16.76	0.00	163.47	15.34	357.43	21.86	0.00	17.10	137.21
2	BW30-440i	25	8	163.47	24.19	0.00	85.29	23.42	78.18	9.56	0.00	9.00	640.96

Name	Pass Streams (mg/l as Ion)									
	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate			Total		
			Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2				
NH4+ - NH3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	85.00	85.00	264.41	493.14	2.93	12.69	4.70			
Na	1837.11	1837.11	5752.60	10825.38	46.33	218.14	77.16			
Mg	130.01	130.01	411.15	781.95	1.42	6.61	2.35			
Ca	105.01	105.01	332.14	631.72	1.13	5.29	1.87			
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
CO3	0.39	0.39	9.14	36.12	0.00	0.00	0.00			
HCO3	249.99	249.99	766.82	1403.45	6.97	31.03	11.27			
NO3	5.00	5.00	11.69	17.00	1.94	3.89	2.63			
Cl	2969.82	2969.82	9305.73	17523.10	72.02	340.49	120.21			
F	1.40	1.40	4.37	8.20	0.04	0.19	0.07			
SO4	478.97	478.97	1517.12	2889.94	4.16	19.37	6.89			
SiO2	17.00	17.00	53.65	101.67	0.24	1.25	0.42			

Figura 15. Informe generado con el software ROSA del caso de agua salobre de alta salinidad. En pág34

Haciendo un estudio a base de probar diferentes modelos de membranas con diferentes disposiciones, es decir, número de pressure vessels y membranas, y observando cómo afecta al caudal de permeado, partículas en suspensión y consumo específico en general se ha desarrollado la siguiente tabla 5:

En la tabla 5 la fila sombreada de color amarillo es la opción que optimiza el proceso ya que maximiza el caudal de permeado de una alta calidad, 227 ppm, con un consumo más que razonable observando los otros casos y sin tener que cambiar la presión de alimentación que viene establecida de fábrica.

La selección se ha basado en el conocimiento de que un agua apta para el consumo humano ha de tener una presencia de TDS o sólidos en suspensión inferior a 500 ppm siendo la concentración óptima de 300 ppm. Y que el boro nunca supere una concentración de 2ppm siendo el valor óptimo el comprendido entre 1-1,5ppm, en este caso no es objeto de estudio ya que el agua salobre carece de este compuesto, no será así en el agua de mar que si habrá que ser tenido en cuenta.

La ficha técnica de la membrana seleccionada con las especificaciones del fabricante se puede consultar en el anexo A.

Tipo de Membrana	Sepecific Energy [kWh/m ³]	TDS [ppm]
XLE-440 & LE-440i	0,8	425
XLE-440 & BW30-440i	0,81	374
XLE-440	0,78	631
LE-440i (8M) & XLE-440 (7M)	0,82	402
LE-440i (7M) & XLE-440 (8M)	0,83	417
LE-440i & XLE-440 (7M)	0,83	374
LE-440i & XLE-440	0,81	445
LE-440i & BW30-440i	0,85	195
LE-440i	0,83	247
LE-440	0,83	247
LE-400	0,86	216
HSRO-390-FF	0,91	79
BW30-440i & XLE-440	0,9	328
BW30-440i & LE-440i	0,92	167
XLE-440 & LE-440i (7M)	0,82	359
XLE-440 & LE-440i (6M)	0,85	295
XLE-440 (7M) & LE-440i (8M)	0,81	373
XLE-440 (8M) & LE-440i (7M)	0,8	410
XLE-440 (8M) & LE-440i (6M)	0,81	396
XLE-440 (7M) & LE-440i (6M)	0,82	345
XLE-440 (6M) & LE-440i (7M)	0,84	309
BW30-440i PV(50&25)	0,81	227
BW30-440i PV(32&32)	0,89	187

Tabla 5. Resultados obtenidos con el software ROSA para las diferentes modelos y/o disposiciones de membranas.

6.2. Caso 2: Agua salobre de baja salinidad (BWRO)

Repitiendo el procedimiento del caso 1 pero esta vez teniendo en cuenta que la composición del agua será distinta, más pobre en sales. Véase figura 16.

System Permeate Flow: 591.60 m³/h System Feed Flow: 657.40 m³/h System Recovery: 89.99%

Water Type: Well Water SDI < 3 Open Water Profile Library

Feed Percentage: 100.0 (%) Feed Number: 1 Feed Streams: 1

Ions	mg/l	ppm CaCO3	meq/l	Total Conc. (mg/l)
Ammonium (NH4+ + NH3)	0	0.000	0.000	0.00
Potassium (K)	6.516	8.332	0.167	6.52
Sodium (Na)	90.219	196.213	3.924	90.22
Magnesium (Mg)	11.728	48.241	0.965	11.73
Calcium (Ca)	96.233	240.103	4.802	96.23
Strontium (Sr)	0	0.000	0.000	0.00
Barium (Ba)	0	0.000	0.000	0.00
Carbonate (CO3)	0.065	0.108	0.002	0.065
Bicarbonate (HCO3)	72.424	59.359	1.187	72.42
Nitrate (NO3)	0	0.000	0.000	0.00
Chloride (Cl)	190.239	268.297	5.366	190.24
Fluoride (F)	0.2	0.525	0.011	0.20
Sulfate (SO4)	158.017	164.601	3.292	158.02
Silica (SiO2)	24.359	n.a.	n.a.	24.36
Boron (B)	0	n.a.	n.a.	n.a.

Specify Individual Solutes: Total Dissolved Solids: 650.0 mg/l

Feed Parameters: Temperature: 25.0 °C Flow Rate: 657.4 m³/h pH: 7.0

Charge Balance: Cations: 9.86 Anions: 9.86 Balance: 0.00

System Temp: 25.0 °C System pH: 7.00 Save Water Profile to Library

Note: Any changes in raw feedwater composition will affect scaling calculations. Please review scaling calculations.

1) Project Information 2) Feedwater Data 3) Scaling Information 4) System Configuration 5) Report 6) Cost Analysis

Figura 16. Composición agua alimentación caso agua salobre baja salinidad.

System Permeate Flow: 591.60 m³/h System Feed Flow: 657.40 m³/h System Recovery: 89.99%

No. Passes: 1 Current Pass: 1 Dosing Chemical: None Adjusted pH: None

Configuration for Pass 1: Stages in Pass: 2 Flow Factor: 0.85 Operating Temp: 25.0 °C Feed Flow: 490.60 m³/h

Recirculation Loops: Blend Permeate (166.80 m³/h) Pass 1 Conc to Pass 1 Feed (None m³/h) Pass 2 Conc to Pass 1 Feed (None m³/h)

Configuration for Stage 1 in Pass 1: Stage in Pass: Stage 1 Feed Pressure: 8.00 bar Boost (2-pass): Calc Back Pressure: None bar Same back pressure for all stages: Pressure vessels in each stage: 35 Elements in each vessel: 8 Total elements in stage: 280 Products: BW30-440i Use the same element in the pass:

System Configuration Diagram: Shows Feed entering a stage, with Permeate being recirculated back to the stage (Blend) and Concentrate being removed.

1) Project Information 2) Feedwater Data 3) Scaling Information 4) System Configuration 5) Report 6) Cost Analysis

Tuesday, February 09, 2016 Opened project 'Ejemplo 2 Low Salinity BWRO'

Figura 17. Configuración del sistema de agua salobre de baja salinidad.

Como se puede observar en la figura 17 la disposición es bastante parecida a la de agua salobre de alta salinidad con la diferencia de que el permeado de salida se mezcla con el flujo de alimentación de agua salobre, es decir, obtenemos un permeado de peor calidad pero como el agua de alimentación es pobre en sales es viable y se gana en cantidad de flujo sin sacrificar demasiado su calidad.

El informe generado es el siguiente –véase figura 18- junto con la posterior tabla de diferentes modelos y disposiciones de membranas para optimizar el proceso – tabla 6-.

System Details												
Feed Flow to :	490.60 m ³ /h	Pass 1 Perme:	390.11 m ³ /h	Osmotic Pressure:								
Raw Water Flo	657.40 m ³ /h	Pass 1 Recove	79.52 %	Feed	0.35 bar							
Feed Pressure	8.00 bar	Feed Temper:	25.0 C	Concentrate	1.59 bar							
Flow Factor	0.85	Feed TDS	650.00 mg/l	Average	0.97 bar							
Chem. Dose	None	Number of Elx	496	Average NDP	6.30 bar							
Total Active A	20274.50 M ²	Average Pass	19.24 l/mh	Power	186.04 kW							
Water Classification: Well Water SDI < 3		Bypass Blendi	166.80 m ³ /h	Specific Energy	0.33 kWh/m ³							
System Recov	84.71 %	Total Blended	556.91 m ³ /h									

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m ³ /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m ³ /h)	Conc Flow (m ³ /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m ³ /h)	Avg Flux (l/mh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-440i	32	8	490.60	7.66	0.00	313.25	4.27	177.35	16.95	0.00	8.00	4.84
2	BW30-440i	30	8	313.25	8.93	0.00	100.49	7.46	212.76	21.69	0.00	5.00	10.93

Pass Streams (mg/l as Ion)									
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate			Total	Blended Total
			Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total		
NH4+ + NH3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	6.52	6.52	10.16	31.34	0.07	0.16	0.12	2.04	
Na	90.22	90.22	140.78	434.19	0.92	2.19	1.61	28.15	
Mg	11.73	11.73	18.34	56.90	0.05	0.13	0.09	3.58	
Ca	96.23	96.23	150.48	466.92	0.42	1.02	0.75	29.35	
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	0.06	0.06	0.17	1.98	0.00	0.00	0.00	0.01	
HCO3	72.42	72.42	112.85	344.81	1.08	2.06	1.59	22.70	
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	190.24	190.24	297.08	918.40	1.53	3.62	2.67	58.85	
F	0.20	0.20	0.31	0.96	0.00	0.01	0.00	0.06	
SO4	158.02	158.02	247.18	767.68	0.54	1.33	0.97	48.01	
SiO2	24.36	24.36	38.02	117.66	0.23	0.41	0.33	7.52	
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	9.01	9.01	9.06	9.84	8.81	9.07	8.96	9.07	
TDS	650.00	650.00	1015.38	3140.83	4.84	10.93	8.14	200.26	
pH	7.00	7.00	7.17	7.54	5.30	5.56	5.46	6.54	

Figura 18. Informe generado por el software ROSA del caso de agua salobre con baja salinidad.

Tipo de Membrana	Specific Energy [kWh/m ³]	TDS [ppm]
BW30-440i (30PV)	0,33	200
BW30-400/34i (28PV)	0,33	199
BW30-400/34i (25PV)	0,35	207
BW30-440i 5bar	0,36	214
BW30-400i 4bar	0,36	223
BW30-365-IG	0,39	226
BW30-400-IG	0,41	238

Tabla 6. Resultados obtenidos con el software ROSA para basar la selección del caso más favorable.

La correspondiente ficha técnica con las especificaciones de la membrana seleccionada se puede consultar en el anexo A.

6.3. Caso 3: Agua de mar (Océano Atlántico) SWRO

Por último se analiza el proceso para agua de mar, en concreto para agua del Océano Atlántico de las inmediaciones de las Islas Canarias que se encuentra a una temperatura bastante cálida y es de una muy buena calidad para el tratamiento de la desaladora. Figura 19.

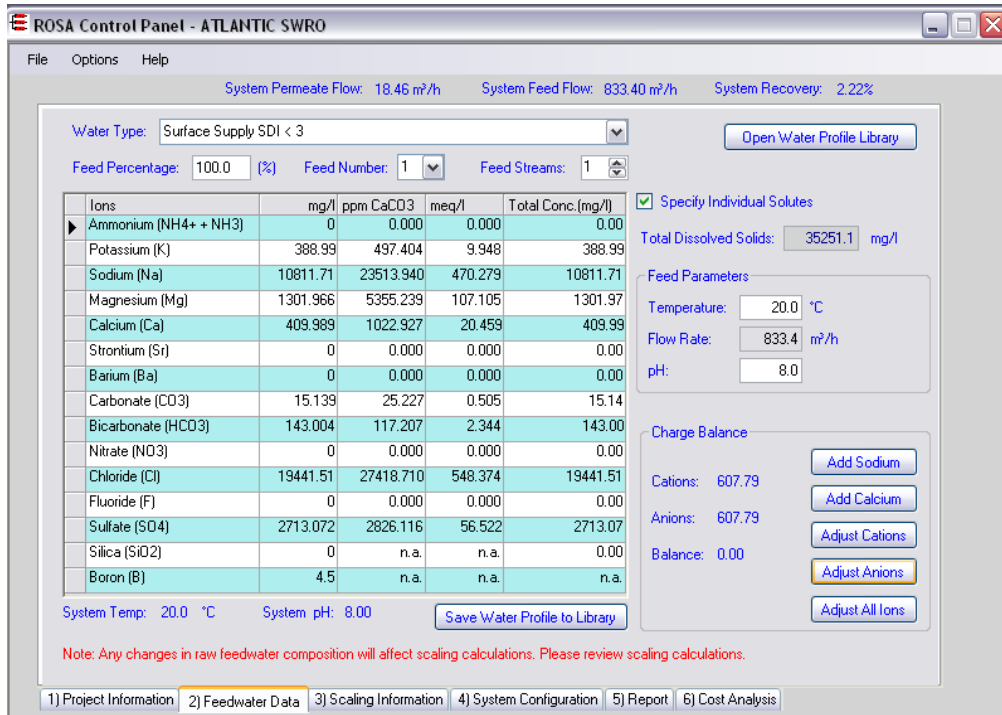


Figura 19. Composición química del agua de mar.

Para este caso se utiliza una configuración más simple que en los anteriores casos ya que como se ha comentado esta agua es de muy buena calidad y solo es preciso un paso con una etapa. Figura 20.

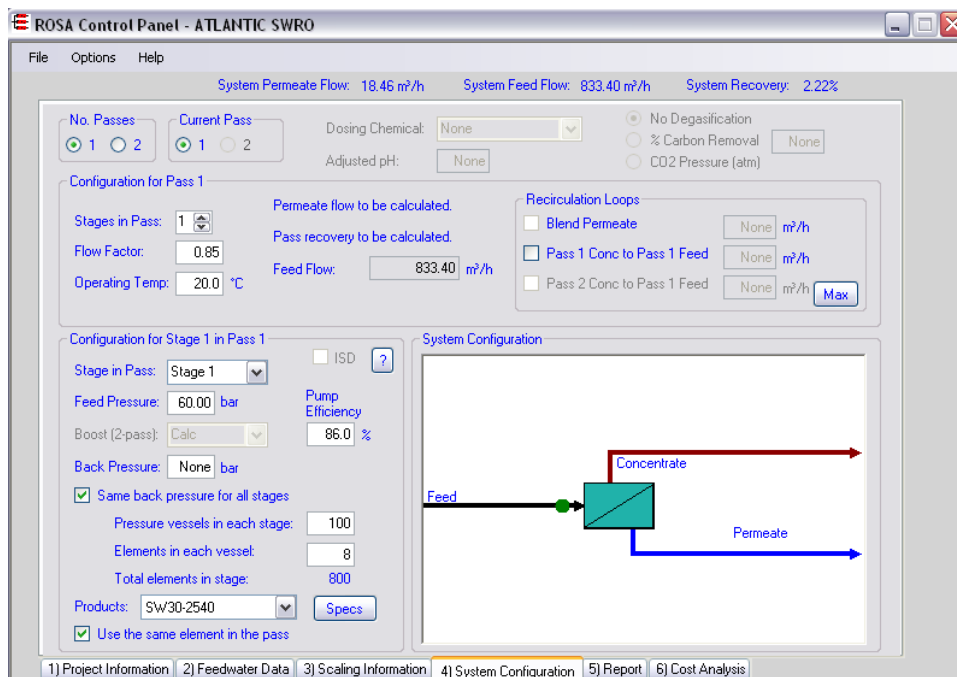


Figura 20. Configuración para el agua de mar.

El informe generado es el siguiente, figura 21:

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m³/h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m³/h)	Conc Flow (m³/h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m³/h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	W30XLE-440i	110	8	833.40	51.66	0.00	434.53	50.56	398.87	11.09	0.00	52.00	216.13

Pass Streams (mg/l as lon)						
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate	
			Stage 1	Stage 1	Stage 1	Total
NH4+ + NH3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	388.99	388.99	743.16	3.15	3.15	3.15
Na	10811.71	10811.72	20666.30	76.06	76.06	76.06
Mg	1301.97	1301.97	2495.16	2.09	2.09	2.09
Ca	409.99	409.99	785.73	0.65	0.65	0.65
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	15.14	15.14	31.71	0.00	0.00	0.00
HCO3	143.00	143.00	268.58	1.39	1.39	1.39
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	19441.51	19441.51	37172.40	125.35	125.35	125.35
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	2713.07	2713.07	5201.90	1.73	1.73	1.73
SiO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Boron	4.51	4.51	7.73	1.00	1.00	1.00
CO2	0.80	0.80	1.83	1.01	1.01	1.01
TDS	35251.14	35251.14	67409.09	216.13	216.13	216.13
pH	8.00	8.00	7.97	6.32	6.32	6.32

Figura 21. Informe generado por el software ROSA para el caso de agua de mar.

Tipo de membrana	Specific Energy [kWh/m ³]	TDS [ppm]	Boro [ppm]
SW30ULE-440i(8M)	3,48	349,12	1,26
SW30ULE-400i(8M)	3,53	317,27	1,2
SW30XLE-440i(8M)	3,59	193,03	0,92
SW30XLE-400i(8M)	3,65	175,28	0,86
SW30HRLE-440i(8M)(FF=0,9)	3,68	161,63	0,78
SW30HRLE-440i(8M)	3,72	161,07	0,78
SW30HRLE-440i(8M)(FF=0,8)	3,76	160,59	0,79
SW30HRLE-400i(8M)	3,81	146,9	0,73
SW30HRLE-440i(7M)	3,86	142,24	0,72
SW30HRLE-370/34i(8M)	3,94	130,97	0,73
SW30XHR-440i(8M)	3,95	117,48	0,59
SW30XHR-400i(8M)	4,09	107,69	0,55
SW30HR-380(8M)	4,09	178,2	0,72
SW30HRLE-440i(6M)	4,16	124,98	0,65
SW30HRLE-440i(5M)	4,43	108,4	0,58
SW30HRLE-440i(4M)	5,01	93,89	0,51
SW30XLE-440i(8M) 52 bar 110PV	3,51	216	1

Tabla 7. Resultados medidos para el caso de agua de mar con el software ROSA.

En este caso la opción que optimiza el proceso no es la más económica en cuanto a ahorro energético (sombreado amarillo) si no la de sombreado verde ya que a pesar de tener un mayor consumo, se obtiene un mayor caudal de permeado y como se puede observar de una mejor calidad.

7 CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha analizado el interés de acoplar sistemas de desalación con determinadas actividades productivas que podrían ser útiles para ofrecer desarrollo sostenible en lugares remotos o países en vías de desarrollo. Con tal objetivo se han buscado en la literatura opciones para dar utilidad a efluentes que normalmente no tiene utilidad posterior, o que incluso presentan un problema medioambiental. Las principales conclusiones extraídas son las siguientes:

1. Se ha identificado un caso de especial interés –véase figura 22-, cuyo concepto ha sido propuesto en la literatura para el caso específico de pozos de aguas salobres, dando utilidad a:
 - El concentrado de los procesos de desalación, para el cultivo de microorganismos.
 - Las aguas residuales de actividades ganaderas.

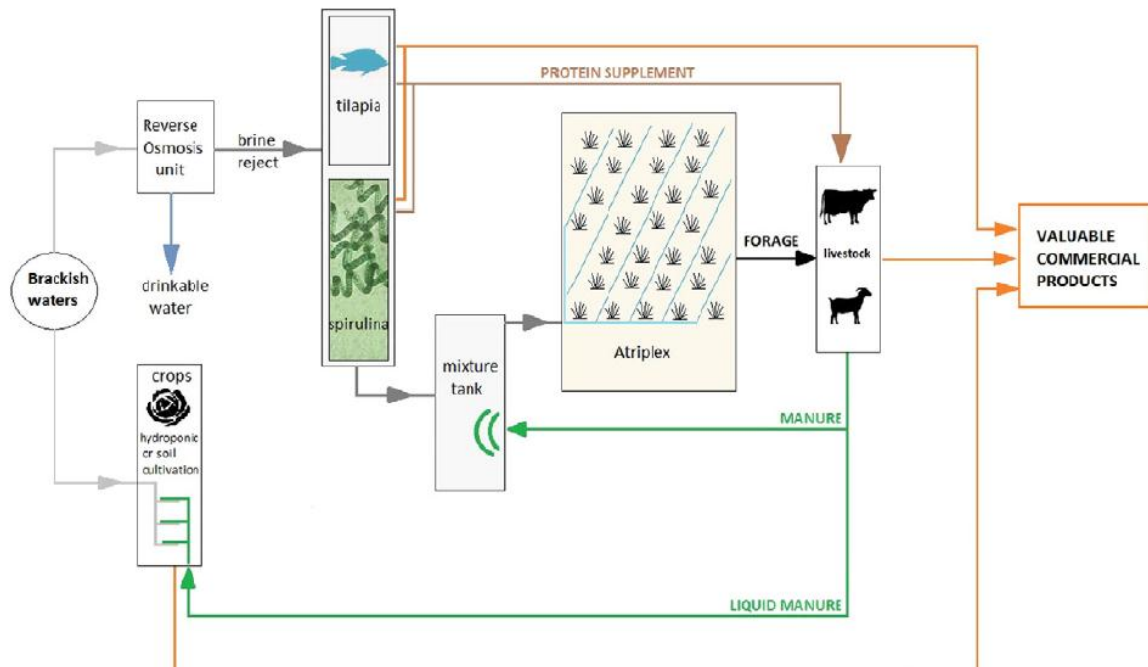


Figura 22. Esquema de la propuesta de cultivo.

2. Se ha realizado una búsqueda bibliográfica a fin de seleccionar cultivos de microalgas u otros microorganismos de interés. Se identifican de interés el cultivo de: Spirulina y Chlorella zofingiensis.
3. En este contexto se ha elegido un emplazamiento adecuado. En base al estudio de las condiciones propicias en las que se dan las algas y el cultivo de las especies seleccionadas, se ha elegido el emplazamiento, que a su vez es un lugar en vías de desarrollo al que se le quiere dotar de medios suficientes para poder ser autosuficientes e incluso generar excedentes para su comercio. Se selecciona Cabo Verde.

Los casos de prediseño se han realizado con tres tipos de agua que se pueden encontrar en el emplazamiento en cuestión, Cabo Verde, tanto de pozo de agua salobre como el agua del Océano Atlántico directamente.

4. Se ha analizado una serie de supuestos casos prácticos en los que se simulaba la explotación de la planta de ósmosis inversa en cuestión para hacer estimaciones del consumo energético a los que tendría que enfrentarse la región para así valorar si era una opción viable o no, ya que la región para la que se ha realizado el trabajo no posee todos los recursos energéticos con los que cuenta el primer mundo. Los diseños más eficientes son:
- Para aguas salobres de alta concentración: Presenta un consumo específico de $0,81 \text{ kWh/m}^3$ para una producción de $435,61 \text{ m}^3/\text{h}$, a $17,10 \text{ bar}$ de presión de alimentación y una disposición de 50 tubos de presión en la primera etapa y 25 en la segunda, con 8 membranas, del modelo BW30-440i, en cada uno.
 - Para aguas salobres de baja concentración: Presenta un consumo específico de $0,33 \text{ kWh/m}^3$ para una producción de $556,91 \text{ m}^3/\text{h}$, a 8 bar de presión de alimentación y una disposición de 32 tubos de presión en la primera etapa y 50 en la segunda, con 8 membranas, del modelo BW30-440i, en cada uno.
 - Para agua de mar: Presenta un consumo específico de $3,51 \text{ kWh/m}^3$ para una producción de $398,87 \text{ m}^3/\text{h}$ a 52 bar de presión de alimentación y con una disposición de 110 tubos de presión con 8 membranas, del modelo SW30XLE-440i, en cada uno.
En este caso, la aplicación de recuperadores energéticos eficientes supondría un ahorro en torno al 40% del consumo principal.

En todos los casos habría que añadir a estos valores los consumos auxiliares asociados a la captación y pretratamiento de la alimentación y del suministro del producto.

En base a las citadas conclusiones, tendría indudable interés extender el análisis en los siguientes aspectos:

- La opción más interesante para abastecer esta planta sería por medio de fuentes de energías renovables para integrar el proyecto con el medio y así minimizar los residuos e impacto ambiental.
- Buscar más microorganismos de interés.
- Buscar nuevas sinergias entre actividades productivas y residuos de procesos.
- Buscar otros emplazamientos idóneos.

Por último, añadir que este es un trabajo realizado sobre un campo al que aún le queda un largo recorrido pues se ha empezado a investigar recientemente, y del que en un futuro no muy lejano será una alternativa más que competente a las distribuciones convencionales de plantas de desalación por ósmosis inversa.

REFERENCIAS

- [1] Saeid, A., and Chojnacka, K., "Toward production of microalgae in photobioreactors under temperate climate". *Chemical Engineering Research and Design*, 93, 2015, pp. 377-391.
- [2] Lee, O.K.; Seong, D.H.; Lee, G.L. and Lee, E.Y., "Sustainable production of liquid biofuels from renewable microalgae biomass". *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 29, 2015, pp 24-31.
- [3] Laura Torrentera Blanco and Albert G.J. Tacon, " La producción de alimento vivo y su importancia en acuicultura". FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (<http://www.fao.org/docrep/field/003/ab473s/ab473s02.htm>)
- [4] A. J. Areces y M. Araujd. Influencia de la salinidad y la temperatura sobre el crecimiento de *Bryothamnion triquetrum* (Rhodophyta: Rhodomelaceae)
- [5] Adriana Vallejo L., Federico Newmark y María Mercedes Crías. "Efecto de la salinidad sobre el crecimiento poblacional y el rendimiento del rotífero *Brachionus Plicatilis* (cepa ciénaga grande de Santa María)" *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-Invemar*, 22, 1993
- [6] Gerardo, M.L.; Van Den Hende, S.; Vervaeren, H.; Coward, T. and Skill, S.C., "Harvesting of microalgae within a biorefinery approach: A review of the developments and case studies from pilot-plants". *Algal Research*, 11, 2015, pp 248-262.
- [7] <http://www.islascaboverde.com/weather.asp>
- [8] Sheng-Yi, C.; Chien-Ya, K.; Tsai-Yu C.; Yu-Bin, C.; Chiu-Mei, K. and Chih-Sheng, L. "Cultivation of microalgal *Chlorella* for biomass and lipid productions using wastewater as nutrient resource". *Bioresource Technology*, 184, 2015, pp 179-189.
- [9] A.S. Sánchez, I.B.R. Nogueira, R.A. Kalid. "Uses of the reject brine from inland desalination for fish farming, *Spirulina* cultivation, and irrigation of forage shrub and crops". *Desalination*, 364, 2015, pp 96-107.
- [10] José Miguel Vega. "Introducción a la desalación de aguas" 2002, pp 181-225.
- [11] Lourdes García Rodríguez (2013). "SeaWater Reverse Osmosis (SWRO) desalination technology: Skid Design". Máster en Sistemas de Energía Térmica, curso 2013-2014. Informe personal.
- [12] Mark Wilf. "The guidebook to membrane desalination technology" 2007, pp 470- 493.

Anexo A: Fichas Técnicas de las membranas analizadas
