4. Funcionamiento de la planta

La planta desaladora a controlar está destinada a la producción de agua potable utilizando el proceso de ósmosis inversa con recuperación de energía mediante cámaras hiperbáricas. Su capacidad de producción es de unos 200.000 m^3/día de agua con un total de sólidos disueltos de 500 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** antes del postratamiento. El agua de mar contiene 35.000 partes por millón y se considera agua potable si contiene menos de 500 ppm. Este proceso de desalación será explicado en el apartado siguiente.

La captación de agua de mar se realiza mediante toma submarina y bombeo, estando la casa de bombas situada en la zona de costa. El retorno de salmuera es asimismo por emisario submarino. El sistema de bombeo será mediante bombas centrífugas horizontales de 65 bares de presión aproximadamente, y recuperación de energía por cámaras hiperbáricas y bombas “booster”.

Un esquema de funcionamiento de una planta desaladora como la que se diseña en este proyecto se muestra en la figura 1.

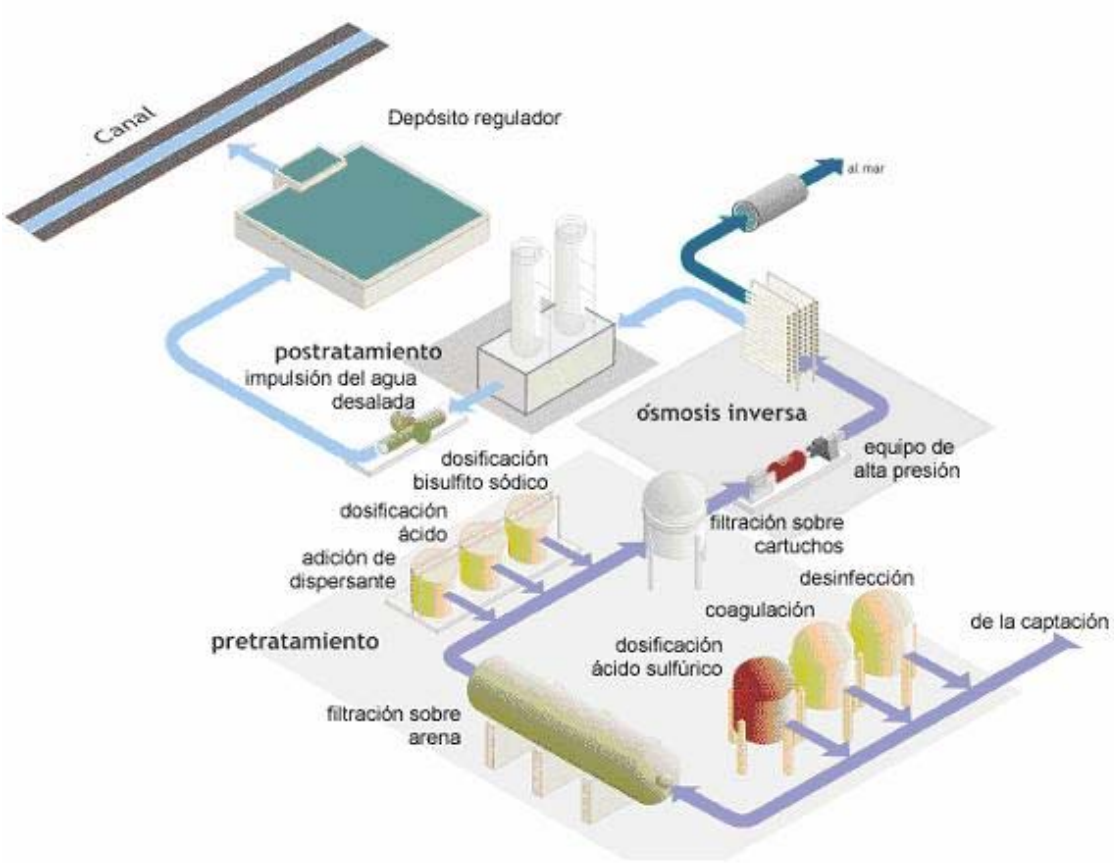

Figura 1: Esquema del proceso de desalación mediante ósmosis inversa

Como puede verse, la planta consta de los siguientes componentes:

- Bombas de captación de agua de mar.
- Filtros de arena a presión.
- Filtros de antracita a presión.
- Filtros de cartuchos.
- Racks de ósmosis inversa, con sus respectivas bombas de alta presión y recirculación.
- Bombas de agua producto.
- Dosificaciones de reactivos químicos para pretratamiento y postratamiento.

En líneas generales, el agua de mar se acondiciona químicamente mediante la dosificación de ácido sulfúrico, coagulante y desinfectante, y se filtra a través de filtros de arena y antracita para eliminar la materia en suspensión. Tras estos pasos y antes del proceso de ósmosis, se añade bisulfito sódico, dispersante y ácido. Por último, se realiza una última filtración, esta vez sobre cartuchos. Una vez terminado el pretratamiento, el

agua sufre una microfiltración por ósmosis inversa, para lo que es bombeada mediante las bombas de alta presión. El agua producto se almacena en un depósito.

Para realizar la desalación, la planta se distribuirá en varios edificios, en los cuales se realizan diferentes funciones:

- Edificio eléctrico de captación
- Edificio de filtración
- Edificio de dosificación química
- Edificio de producción
- Edificio eléctrico y de control
- Edificio de bombas de agua producto

Para tener un conocimiento más general acerca del funcionamiento de las plantas desaladoras, se debe tener en cuenta que existen diferentes tecnologías en la actualidad para la desalación de agua de mar.

4.1. Técnicas de desalación

Además de en el procedimiento utilizado, estas técnicas se diferencian también en el mayor o menor impacto ambiental que provocan.

No debe negarse el impacto ambiental asociado a las plantas desaladoras. Es importante recalcar que durante el proceso de desalación se produce un volumen importante de agua de rechazo de elevada salinidad, la salmuera, y con abundante contenido en productos aditivos empleados en la desalación, como los productos químicos antes comentados en el pre- y postratamiento.

En las desaladoras próximas a la costa, el agua de rechazo se vierte principalmente al medio marino, donde debido a su mayor densidad forma una capa hipersalina que se dispersa sobre el fondo, pudiendo afectar a los organismos allí presentes. La magnitud de este impacto dependerá de las características de la planta desaladora, de su vertido y de las condiciones biológicas del ambiente marino receptor. La generación de CO_2 y NO_x provocada por el consumo energético son también aspectos contaminantes de gran importancia.

Por estas razones, previo a la producción de agua mediante desalación es necesario tener en cuenta aspectos medioambientales importantes tales como el emplazamiento de la planta, el abastecimiento eléctrico mediante energías renovables y la emisión de las salmueras en zonas donde no afecten a los ecosistemas marinos.

Las técnicas existentes pueden clasificarse en técnicas con cambio de fase (o evaporativas) y sin dicho cambio, como vemos en la tabla 1:

Técnicas de desalación
Procesos que implican un cambio de fase en el agua
Desalación y flashing en múltiple efecto (MED, MSF)
Congelación
Desalación con compresión de vapor
Desalación a baja temperatura
Procesos sin cambio de fase
Desalación por ósmosis inversa (OI)
Desalación mediante electrodiálisis

Tabla 1: Técnicas de desalación

La mayoría de las plantas existentes utilizan las técnicas de desalación por ósmosis inversa mediante membranas (OI) y de desalación por compresión de vapor. Aunque, evidentemente, las dos necesitan energía, en el primer caso la electricidad y en el segundo caso el vapor, este segundo tipo es menos utilizado debido a la gran cantidad de energía que precisa y, por tanto, su elevado coste. De hecho, de las 900 plantas desaladoras que existen en España, el 90% son de membranas, de hecho, Canarias es el único sitio de España donde hay desaladoras de vapor. En los países donde la energía es muy barata, como Arabia Saudí, Libia o Argelia, sólo existen desaladoras de vapor, aprovechando su mayor resistencia a fallos. Para abaratar el proceso, en ocasiones se utiliza el vapor de centrales térmicas.

Desalación por ósmosis inversa (OI)

Es la técnica utilizada por la desaladora de este proyecto, por lo que nos detendremos en su explicación. El proceso tiene varias fases:

Captación de agua

Se realiza en pozos próximos a la costa, desde los cuales se bombea hacia la planta.

Pretratamiento

Una vez en la planta, el agua se filtra y se acondiciona químicamente varias veces. Después, se impulsa a alta presión hacia los llamados bastidores de membranas (ver figura 2), y es aquí donde se lleva a cabo el proceso de desalación por el procedimiento de la ósmosis inversa.

Figura 2: Bastidores de membranas

Desalación

El proceso consiste en hacer pasar agua desde la solución más concentrada a la menos concentrada (justo lo contrario de la ósmosis). La ósmosis es un fenómeno físico-químico que tiene lugar cuando dos soluciones acuosas de diferente concentración entran en contacto a través de una membrana semipermeable. Esta membrana permite sólo el paso del agua. Así, el agua tiende a atravesar la membrana en el sentido de menor a mayor concentración, para igualar ambas. Este proceso se puede ver claramente en la figura 3.

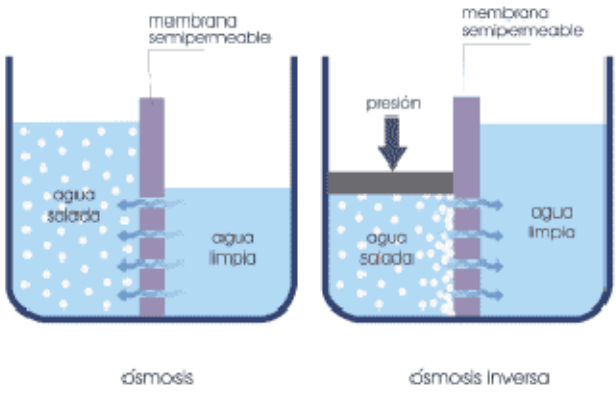

Figura 3: Proceso de ósmosis inversa

De la misma manera, la ósmosis inversa se aplica para obtener agua dulce partiendo del agua del mar, separando sus sales. El paso del agua por una de estas membranas se observa en la figura 4.

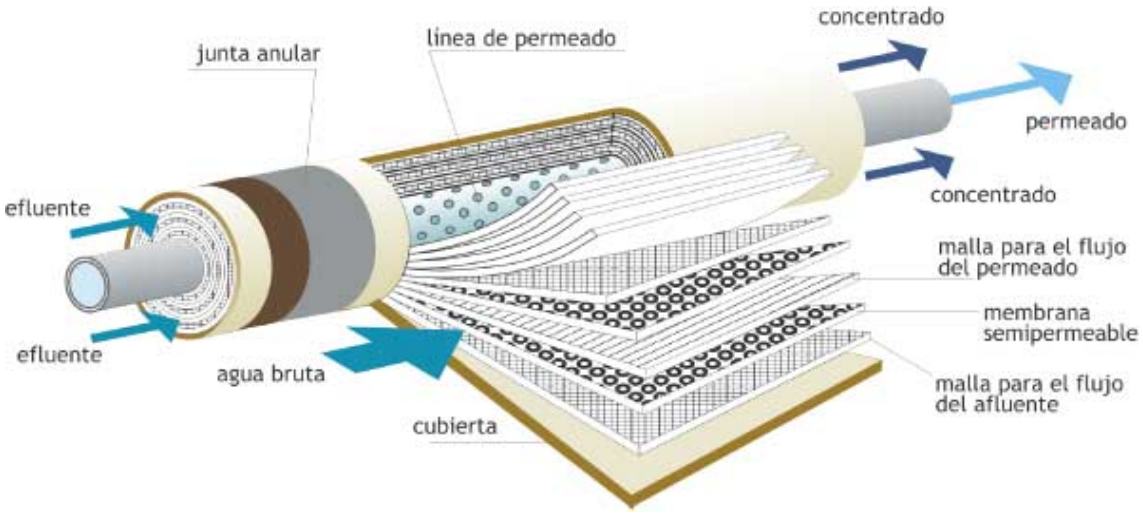

Figura 4: Membrana para la ósmosis inversa

Postratamiento y almacenamiento

Una vez desalada, el agua se remineraliza y desinfecta. Después se almacena en un depósito.

Evacuación del agua de rechazo

Aunque el retorno de salmuera es al medio marino, el ahorro de espacio y energía, así como la fiabilidad y la posibilidad de ampliación hacen de esta tecnología la más usada en la actualidad.

Desalación mediante electrodiálisis

La electrodiálisis es otro de los procesos que, como la ósmosis inversa, desalinizan el agua del mar sin que se produzca un cambio de fase. Este tipo de plantas se basan en el hecho de que si se hace circular por una solución iónica una corriente continua, los iones cargados positivamente (cationes) se desplazan en dirección al electrodo negativo o cátodo. Del mismo modo, los iones cargados negativamente (aniones) se desplazan hacia el electrodo positivo o ánodo.

La electrodiálisis consiste en colocar entre el ánodo y el cátodo un par de membranas semipermeables, siendo una de las cuales permeable a los cationes y la otra a los aniones. De esta manera, se irá formando paulatinamente una zona de baja salinidad entre las dos membranas.

Al igual que las plantas de ósmosis inversa, las plantas de electrodiálisis requieren un cuidadoso pretratamiento del agua de entrada, a fin de no dañar irreversiblemente las membranas.

Desalación con compresión de vapor

La desaladora por compresión de vapor funciona a partir de un calentamiento inicial del agua de mar hasta obtener vapor, para después comprimirlo y reutilizarlo nuevamente en el calentamiento de agua salina y así producir más vapor, el cual se condensa y se retira como agua dulce.
Como ventaja, las desaladoras que funcionan con vapor sufren menos averías que las de membranas, pero su precio, como hemos dicho, es mayor por el gran gasto de energía que necesitan.

Desalación a baja temperatura

Las desaladoras a baja temperatura han ido mejorando su tecnología, al igual que las de múltiple efecto (MED). El principio general para explicar su funcionamiento radica en enfriar y calentar el agua salada para después bajarle la presión y obtener así vapor de agua dulce.

Las plantas para la desalación a baja temperatura tienen como única fuente de energía la electricidad y funcionan mediante el sistema de evaporación-condensación en proceso continuo con recuperación de la energía aportada. Constan de un evaporador cilíndrico con gran superficie de evaporación y un condensador concéntrico. Se utiliza agua de mar para el enfriamiento del condensador y este agua se envía al evaporador. Un ventilador de alta presión estática impulsa el vapor-aire en circuito cerrado entre evaporador y condensador, creándose una diferencia o gradiente de presión entre las dos zonas que da como resultado el vapor de agua producto. El evaporador y condensador están aislados térmicamente entre sí y con el exterior.

Las características principales de este sistema son:

- Sistema de vaporización/condensación que copia a la naturaleza en su gestión del ciclo del agua
- Consumo energético comparable con los sistemas basados en ósmosis inversa
- El calor transportado por el vapor se recupera en el condensador
- Bajo coste de mantenimiento
- Bajo coste del equipo
- Respetuoso con el medio ambiente, al recuperar energía
- Sin salmueras de difícil eliminación

Desalación y flashing en múltiple efecto (MED, MSF)

La desalación y el flashing en múltiple efecto se conocen internacionalmente con las siglas MED (Multi Effect Distillation) y MSF (Multi Stage Flash).

Estos procesos consisten básicamente en producir vapor primero y condensarlo después. Con el fin de aumentar la eficiencia del sistema, se acoplan en serie diversos destiladores simples, dando lugar a las denominadas plantas de Destilación en Múltiple Efecto (MED), aumentando la eficiencia con el número de etapas desaladoras. En la práctica, por razones económicas, el número de etapas no suele ser mayor de 14.

En cada etapa desalinizadora, la energía térmica requerida por el evaporador es aportada por la condensación del vapor producido en la etapa anterior. El agua de mar que se pretende desalinizar se hace pasar, en una determinada cantidad, por el condensador de la planta, con el fin de condensar el vapor que se ha producido en el último efecto. Tras atravesar el condensador, una parte del agua de alimentación se rechaza, utilizándose sólo una fracción de ella como agua de alimentación para el proceso. Este agua de alimentación se hace pasar por una serie de precalentadores, con el objeto de aumentar su temperatura hasta aproximarla a la de evaporación existente en la primera etapa.

Existe un precalentador en cada etapa, de tal manera que tras pasar por el último precalentador, el agua de alimentación es introducida en la primera etapa, pulverizándose sobre un intercambiador de calor de haz tubular. Por el interior de los tubos de este intercambiador circula el fluido caliente que aporta la energía térmica que requiere el proceso. De este modo se producen una serie de evaporaciones y condensaciones sucesivas que conducen a la producción de una determinada cantidad de destilado.

Las plantas desaladoras de flashing en múltiple efecto (MSF) tienen grandes similitudes con las plantas MED. Sin embargo existen algunas diferencias que deben ser tenidas en cuenta:

a) la evaporación del agua en cada etapa no se produce mediante el aporte de energía térmica en un intercambiador de calor, sino por flashing (expansión brusca de agua caliente presurizada hasta una presión inferior a la de saturación). Con esto se elimina un intercambiador de calor (el evaporador) en cada etapa.

b) la temperatura superior de trabajo en una planta MSF es del orden de los 115-120ºC, mientras que en una planta MED es del orden de los 70ºC. La existencia de temperaturas más altas en una planta MSF obliga a un pretratamiento inicial del agua más complicado y costoso (acidificación, desgasificación y neutralización). Esto implica mayores costes de operación y mantenimiento.

c) en una planta MSF, la cantidad de agua de mar introducida en el proceso debe ser de 5 a 10 veces superior a la del destilado que se desea producir, lo que implica que la cantidad de agua que hay que bombear para conseguir una misma producción de destilado, es mucho mayor en una planta MSF que en una MED, donde se tiene una relación de 1:2 aproximadamente.

4.2. Elección del proceso óptimo

Cada uno de los procesos mediante los cuales se puede desalar el agua tiene sus propias características diferenciadoras, que lo hace más o menos adecuado para cada caso.

Entre los factores que hay que considerar cabe destacar los siguientes: salinidad del agua a tratar, disponibilidad de mano de obra cualificada para la operación de la planta, precio de la energía térmica y eléctrica, disponibilidad de calor residual a baja temperatura, etc..

Como característica general, se tiene que el consumo energético de los procesos de desalación mediante cambio de fase no depende de la salinidad del agua a tratar. La cantidad de energía térmica (calor) necesaria para obtener un Kg. de agua destilada es prácticamente independiente de la salinidad inicial del agua. En cambio, los procesos sin cambio de fase (ósmosis inversa y electrodiálisis) consumen tanto más energía cuanto mayor es la salinidad del agua de partida.

Otra característica de los procesos sin cambio de fase es, como se ha comentado, que requieren un cuidadoso pretratamiento del agua de proceso, ya que en caso contrario se vería gravemente amenazada la vida útil de las membranas de ósmosis o electrodiálisis. Hay que tener presente que el coste de las membranas constituye una parte importante (20% aproximadamente) del coste total de la planta. Este es el motivo por el que estas plantas requieren mano de obra de cierta cualificación para operarlas adecuadamente.

El coste inicial de la inversión es superior en las plantas MED y MSF al de otros tipos de plantas, pero tienen la ventaja de que pueden utilizar energía residual a baja temperatura.

4.3. Comparativa entre los procesos

De las cuatro tecnologías mencionadas más importantes (MSF, ósmosis inversa, MED y electrodiálisis), cada una tiene su propia cuota de mercado. Esto se debe a que para cada caso concreto hay que evaluar muy cuidadosamente todas las ventajas e inconvenientes de cada uno de los procesos si se quiere elegir el proceso más adecuado, ocurriendo que lo que en un caso concreto puede ser considerado un inconveniente, en otro resulta ser una ventaja bajo otras circunstancias. Por consiguiente, hay que analizar cuidadosamente todos los factores antes de poder decidir cuál es el proceso óptimo para cada caso concreto.

Dentro de los procesos evaporativos (con cambio de fase), se puede decir que, actualmente, las plantas de compresión de vapor están claramente enfocadas al mercado de plantas con una capacidad inferior a los 4.000 m^3/día, mientras que para plantas de gran capacidad que trabajan con agua de mar se instalan plantas MSF, MED y de ósmosis inversa. De hecho, en la actualidad las plantas MED están avanzando en el mercado frente a las plantas MSF, debido a las ventajas productivas y energéticas de las plantas MED. Otra ventaja adicional de las plantas MED frente a las MSF son sus menores costes de operación y mantenimiento (derivados de la menor temperatura de operación).

En lo que respecta a las plantas de ósmosis inversa, están teniendo un rápido crecimiento en los últimos años derivado de su menor consumo energético.

Puesto que no puede decirse de forma general que un proceso es mejor que otro, en la tabla 2 se exponen algunas nociones básicas que pueden ser útiles a la hora de elegir el proceso óptimo para un caso determinado.

	MSF	MED	CV	OI
Estado comercial	Desarrollado	Desarrollado	En desarrollo	Desarrollado
Capacidad mundial	800.000 m^3/d	80.000 m^3/d	60.000 m^3/d	500.000 m^3/d
Tamaño	45.000 m^3	18.000 m^3	3.000 m^3	9.000 m^3
Fabricantes	Muchos	Pocos	Pocos	Muchos
Consumo energía Vapor Electricidad	 125 ºC 3-6 kWh/m^3	 70 ºC 1.5-2.5 kWh/m^3	 --- 8-12 kWh/m^3	 --- 6-7 kWh/m^3
Temperatura máx.	120 ºC	75 ºC	75 ºC	100 ºC
Conversión	10% - 25%	25% - 40%	40% - 50%	35% - 45%
Mantenimiento (limpiezas/año)	2 - 4	0.5 - 2	0.5 - 2	1 - 2
Pretratamiento	Moderado	Simple	Simple	Exigente
Requerimientos de operación	Medio	Bajo	Bajo	Muy alto

Tabla 2: Comparativa entre técnicas