

Proyecto Fin de Máster

Sistemas de Energía Térmica

Desalación de agua de mar mediante energías renovables: Dimensionado en Canarias

Autor: Francisco Javier Sanz Vargas

Tutor: Lourdes García Rodríguez

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

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Máster
Sistemas de Energía Térmica

Desalación de agua de mar mediante energías renovables: Dimensionado en Canarias

Autor:

Francisco Javier Sanz Vargas

Tutor:

Lourdes García Rodríguez

Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Máster: Desalación de agua de mar mediante energías renovables: Dimensionado en Canarias

Autor: Francisco Javier Sanz Vargas

Tutor: 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, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Índice	ix
Índice de Tablas	xi
Índice de Figuras	xii
Notación	xiv
1 Introducción	1
2 Fundamentos de energía solar	2
2.1 <i>Energía solar térmica</i>	2
2.2 <i>Energía solar fotovoltaica</i>	9
2.3 <i>Energía eólica</i>	14
3 Desalación mediante energía renovable	20
3.1 <i>Introducción</i>	20
3.2 <i>Evaluación de desarrollos recientes en desalación solar</i>	22
3.2.1 <i>Desalinización basada en destilación de membrana (MD)</i>	22
3.2.2 <i>Desalación mediante energía solar</i>	23
3.2.3 <i>Energía solar térmica para la producción de agua y electricidad</i>	23
3.2.4 <i>Desalación solar térmica: destilación vs ósmosis inversa</i>	24
3.2.5 <i>Tecnología de desalación solar fotovoltaica</i>	30
3.2.6 <i>Soluciones viables para un mercado potencial</i>	31
3.2.7 <i>Tecnologías candidatas para el mercado potencial</i>	33
4 Cálculo estimado de la producción en aerogeneradores	36
4.1 <i>Caracterización simplificada del recurso eólico: distribución de Weibull</i>	36
4.2 <i>Cálculo simplificado de la producción anual de un aerogenerador</i>	40
4.3 <i>Métodos de cálculo más precisos para la producción anual</i>	42
4.4 <i>Producción anual por localización para cubrir la demanda de desalación</i>	44
5 Cálculo estimado de producción fotovoltaica	56
5.1 <i>Cálculo de la superficie necesaria para instalación fotovoltaica</i>	56
5.2 <i>Comparativa de los recursos eólico y fotovoltaico</i>	57
6 Conclusiones	58
7 (APÉNDICE) Tecnología de Ósmosis Inversa (RO)	59
7.1 <i>Descripción del proceso</i>	59
7.2 <i>Componentes principales</i>	62
Referencias	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados del análisis termodinámico del sistema MD de la Fig. 18 [7].	30
Tabla 2. Resultados de velocidad promedio para distintos aerogeneradores VESTAS.	38
Tabla 3. Resultados de la distribución de Weibull para distintos aerogeneradores VESTAS.	39
Tabla 4. Resultados de la potencia anual en los distintos aerogeneradores VESTAS.	41
Tabla 5. Correcciones para el cálculo de las funciones de probabilidad según la altura.	43
Tabla 6. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 6.	45
Tabla 7. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 12.	46
Tabla 8. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 1.	47
Tabla 9. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 15.	49
Tabla 10. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 16.	49
Tabla 11. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 14.	51
Tabla 12. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 13.	52
Tabla 13. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 2.	53
Tabla 14. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 4.	53
Tabla 15. Producción eólica y producción de agua en planta de desalación.	54
Tabla 16. Resultados diarios y anuales de producción eólica y de agua en planta de desalación.	54
Tabla 17. Resultados de cálculo en la instalación fotovoltaica.	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de proceso central termosolar [1].	3
Figura 2. Central termosolar en Chile [1].	4
Figura 3. Horno solar en Odeillo [2].	5
Figura 4. Esquema de configuración disco parabólico con motor Stirling [3].	5
Figura 5. Esquemas de procesos industriales [1].	7
Figura 6. Esquemas de procesos en la edificación [1].	8
Figura 7. Esquema de instalación FV con baterías sin inversor [4].	13
Figura 8. Esquema unifilar de instalación FV de conexión a red [4].	14
Figura 9. Componentes de un aerogenerador [5].	16
Figura 10. Consumo de energía de diferentes tecnologías de desalación solar [7].	25
Figura 11. Energía solar requerida para producción de agua dulce en kJ/kg [7].	26
Figura 12. Comparación entre la desalinización de SWRO y la destilación más eficiente [7].	27
Figura 13. Diagrama de la conexión en serie de módulos MD sin reciclaje de salmuera [7].	28
Figura 14. Localización de las estaciones meteorológicas utilizadas [17].	36
Figura 15. Función Weibull según el modelo V112-3.3 frente a la velocidad del viento.	39
Figura 16. Función Weibull según el modelo V117-3.3 frente a la velocidad del viento.	39
Figura 17. Función Weibull según el modelo V126-3.3 frente a la velocidad del viento.	40
Figura 18. Error relativo (%) de la potencia media anual según la estación meteorológica.	44
Figura 19. Movimiento inicial del fluido en el proceso ósmosis directa [22].	59
Figura 20. Variación de volumen en el proceso ósmosis inversa [22].	59
Figura 21. Diagrama conceptual del proceso básico de desalación de agua de mar [22].	61
Figura 22. Diagrama de la configuración con dos pasos [22].	61
Figura 23. Configuración dos etapas para desalar agua salobre de alta concentración [22].	61

ADC	Affordable Desalination Collaboration
BOO	Built, Own and Operate
BOOT	Built, Own, Operate and Transfer
ED	ElectroDialysis
IWPP	Independent Water and Power Project
MED	Multi-Effect Distillation
MF	Micro-Filtration
MSF	Multi-Stage Flash distillation
NF	Nano-Filtration
PV	Pressure Vessel
RO	Reverse Osmosis
R&D	Research and Development
SWRO	Sea Water Reverse Osmosis
TDS	Total Dissolved Solids
TOC	Total Organic Compounds
TSS	Total Suspended Solids
VC	Vapour-Compression
UF	Ultra-Filtration

1 INTRODUCCIÓN

Existe un desequilibrio entre la demanda y el suministro de agua de calidad para abastecer a la población, la agricultura y la industria producido por el aumento de la población y los cambios climatológicos de algunas regiones del planeta.

La gran necesidad de agua potable junto con el alto potencial energético disponible hace posible el desarrollo de métodos de producción de energía sostenible basados en desalinización de agua de mar, convirtiéndose en una tecnología cada vez más atractiva y necesaria.

Existen diversas tecnologías utilizadas a escala industrial para la desalación de agua de mar.

Entre todas las tecnologías, la ósmosis inversa de agua del mar es la más extendida internacionalmente. Actualmente es una tecnología madura y se puede desarrollar en todas las zonas costeras del mundo con recursos hídricos naturales limitados. Los avances en investigación y desarrollo respecto a esta tecnología son continuos y han permitido competir con otras tecnologías como la destilación. Una de las innovaciones más recientes tiene como objetivo reducir a gran escala el consumo de energía y minimizar los efectos negativos de incrustación y ensuciamiento en las membranas.

A escala industrial existen varias tecnologías para llevar a cabo la desalinización del agua de mar, las cuales se dividen en dos categorías: procesos térmicos y procesos de membrana. En relación a los procesos térmicos se encuentran MSF (Multi-Stage Flash distillation), MED (Multi-Effect Distillation) y VC (Vapour Compression), que cuando se trata de termocompresión siempre está conectada a una planta MED. Respecto a los de membrana el más extendido es la ósmosis inversa (RO), seguido de la electrodiálisis ED para agua salobre.

Las estadísticas del mercado de desalación actualizadas hasta el año 2016, muestran que la capacidad de los procesos de membrana ha crecido de forma elevada durante el transcurso de los años, destacándose muy por encima de los procesos térmicos desde 2006 hasta 2016.

La desalación mediante membrana semipermeable necesita menos energía que la desalinización térmica, por lo cual es una tecnología más atractiva y económicamente viable.

La esencia del presente proyecto se centra en el atractivo del uso de energías renovables para la desalación de agua de mar, ya que existen zonas con escasez de agua desalinizada que cuentan con buen potencial eólico y solar principalmente. Además de factores medio ambientales, se produce simultaneidad estacional entre la demanda de agua potable y la disponibilidad de las energías renovables que hacen de esta sinergia una oportunidad interesante para la producción de energía de manera sostenible.

De esta forma las plantas de ósmosis inversa o electrodiálisis tendrán la ventaja de incorporar sistemas eólicos o fotovoltaicos dependiendo del factor meteorológico que predomine, y sus principales elementos serán: un sistema de generación eléctrica (parque eólico o fotovoltaico), un sistema de almacenamiento de la energía, y una planta desaladora de agua para la producción de agua potable necesaria.

El análisis económico depende de diversos criterios e hipótesis de partida y resulta complejo debido a la integración de numerosos factores a considerar, pero principalmente el coste del agua producida en una planta de desalación depende del coste debido a la inversión inicial, el coste de mantenimiento y operación, y el coste de la energía que se consume en el proceso.

2 FUNDAMENTOS DE ENERGÍA SOLAR

2.1 Energía solar térmica

El sol es un recurso autóctono, disponible, abundante y gratuito que permite convertir la radiación incidente en calor a través del agua o el aire, para transmitirlo a procesos de generación de otro tipo de energía, principalmente eléctrica. Transmite a la Tierra una energía 4.000 veces superior a la cantidad necesaria para el ser humano, aunque de forma discontinua, ya que varía debido a diversos factores como el clima y la época del año.

La radiación solar que incide en la superficie terrestre satisface las necesidades de energía primaria en el mundo, y posee un valor promedio de 1,3 kW/m², aunque se debe tener en cuenta que dicho valor se ve disminuido por los fenómenos de reflexión hasta 1 kW/m². Se encuentra limitada por variaciones estacionales, geográficas, diurnas y condiciones atmosféricas adversas.

Esta radiación es una energía de baja densidad no controlable y generalmente desacoplada del consumo, sin embargo, es una energía gratuita descentralizada y disponible para los potenciales usuarios. Su conversión en energía útil, eléctrica o térmica cuenta con una serie de limitaciones técnicas que afectan directamente al rendimiento necesario, limitaciones económicas con respecto a otras tecnologías convencionales, y limitaciones espaciales por superficie necesaria.

La energía solar térmica permite disminuir el consumo de energía primaria y las emisiones de CO₂, por lo que supone una mejora de la eficiencia energética de numerosas aplicaciones como industrias y edificios. Algunas de las aplicaciones de esta energía corresponden a la producción de agua caliente sanitaria (ACS), calentamiento de agua de piscina, y climatización de edificios.

Se ha usado como fuente energética desde la antigüedad; desde hace más de 2.000 años se ha utilizado la radiación solar para la extracción de sal del agua del mar, e incluso en la civilización griega se apreciaban técnicas catalogadas como sistemas pasivos de captación de energía solar en el diseño de viviendas.

Actualmente las técnicas para el aprovechamiento de energía solar son muy diferentes, y cuentan con un gran avance tecnológico comprendido desde un sencillo secado solar de granos, hasta las técnicas más específicas de conversión directa en electricidad mediante paneles fotovoltaicos.

Los captadores solares absorben la radiación solar incidente y la transforman en calor aprovechable con múltiples diseños tecnológicos distintos, pudiendo alcanzar temperatura muy elevadas.

La tecnología solar es una tecnología madura que se ha implantado en el sector de la edificación durante el transcurso de los años, y su alta fiabilidad ha permitido su integración en la mayor parte de instalaciones domésticas, terciarias e industriales.

El dispositivo que capta la radiación, la transfiere a un fluido caloportador para su conversión en energía térmica de uso directo en determinados procesos como en el caso de una piscina. También se pueden encontrar aplicaciones de uso indirecto mediante un intercambiador de calor, o la generación de electricidad.

Los sistemas de conversión de la energía solar se pueden clasificar en:

- 1). Activos y pasivos
- 2). Térmicos y fotovoltaicos
- 3). Con concentración y sin concentración

A) SISTEMAS ACTIVOS

a) Aplicaciones a alta temperatura

- Centrales termosolares:

Utilizan dispositivos denominados colectores para captar la radiación solar y llevar a cabo la transformación térmica por encima de los 500°C aprovechando el calor de la radiación incidente.

Las centrales termosolares tienen el objetivo de producir energía eléctrica a gran escala, para lo cual necesitan captadores parabólicos o elevado número de espejos orientados hacia un mismo punto.

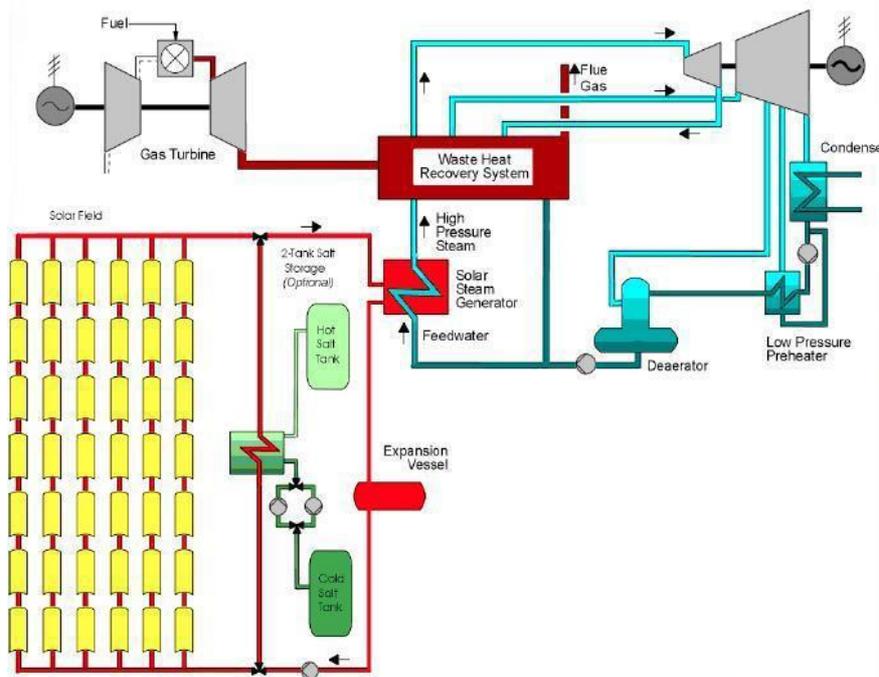


Figura 1. Esquema de proceso central termosolar [1].

El calor del absorbedor se transmite a un fluido portador, principalmente sodio fundido o vapor de agua a presión ya que debe soportar elevadas temperaturas. Este fluido circula en un circuito cerrado, y es transportado a un sistema de almacenamiento para utilizarse en un sistema de generación de vapor que alimenta a una turbina, la cual actuará sobre un alternador para obtener finalmente energía eléctrica.

La aplicación más frecuente es el receptor central, compuesto por un campo de espejos orientables que reciben el nombre de heliostatos. Estos concentran la radiación incidente sobre una caldera situada en el punto alto de una torre. El sistema de orientación de los espejos al sol debe ser constante, por lo que deben incluir soportes móviles y contar con un sistema informático que determine de manera precisa la posición en cada momento del día.



Figura 2. Central termosolar en Chile [1].

- Hornos solares:

Son aplicaciones compuestas por espejos parabólicos (heliostatos) que permiten concentrar en un foco con un área del tamaño de una olla los rayos reflejados de la radiación incidente. Los hornos solares alcanzan muy altas temperaturas dependiendo del proceso instalado (hasta 6.000°C), y suelen destinarse a la generación de electricidad y fines experimentales. Tipos de procesos:

- Producción de aire caliente en torres solares mediante receptores metálicos con temperatura aproximada de 1.000 °C.
- Producción de hidrógeno mediante la ruptura de moléculas de metano a una temperatura de 1.400°C aproximadamente.
- Prueba de materiales que se utilizan en ambientes extremos como por ejemplo reactores nucleares o vehículos especiales con un nivel de temperatura hasta los 2.500 °C.
- Producción de nanomateriales por sublimación solar inducida con temperaturas hasta los 3.500 °C y enfriamiento controlado; por ejemplo, nanopartículas de cinc o nanotubos de carbono.

Los hornos solares cuentan con un factor limitante como energía renovable en la Tierra, que corresponde a la dependencia de un clima soleado, aunque pueden combinarse con otros sistemas de almacenamiento termal para producir energía durante los días nublados o durante la noche. Se pueden utilizar para proporcionar energía en procesos industriales.

El horno solar existente más grande es el horno solar de Odeillo, inaugurado en el año 1970 y situado en Font-Romeu-Odeillo-Via (Pirineos Orientales, Francia). Consta de un conjunto de espejos planos para recolectar la luz del sol, reflejándola sobre un gran espejo curvo. Se muestra a continuación una imagen de su configuración, tomada de <http://ruta-33.blogspot.com/2014/06/el-mas-grande-horno-solar-en-odeillo.html>:



Figura 3. Horno solar en Odeillo [2].

- Concentrador con motor Stirling:

Esta aplicación se compone de un concentrador solar y un motor que funciona mediante calor aplicable a un fluido, o una microturbina acoplada a un alternador. El fluido que recibe el calor se localiza en el interior de un receptor y alcanza una temperatura aproximada de 750 °C. La energía obtenida se utiliza para generar energía a través del motor

A continuación, se muestra un esquema del sistema disco parabólico con motor Stirling, junto con todos los elementos que lo componen:

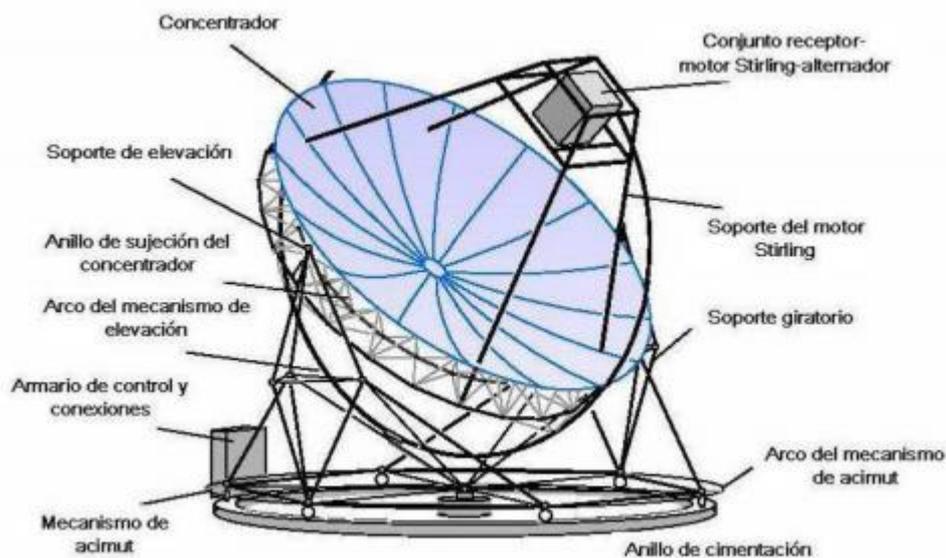


Figura 4. Esquema de configuración disco parabólico con motor Stirling [3].

Los sistemas disco-motor se corresponden con la tecnología solar más antigua, usándose los ciclos de Rankine y Stirling desde el año 1800 en varias empresas de sistemas solares. En año 1970 y principios de 1980 se desarrolló la tecnología moderna a través de empresas americanas aeroespaciales, pero contaban con estructuras pesadas de elevado coste.

Actualmente se considera una tecnología inmadura, pero representa muchas ventajas con respecto a otras tecnologías que aprovechan el recurso solar, debido principalmente a su simplicidad técnica y modularidad.

Cuenta con un alto grado de automatización, ausencia de fluido y un elevado rendimiento que le permite transformar por encima del 25% de la radiación incidente en energía eléctrica, por ello, las centrales de disco parabólico gozarán de un fuerte protagonismo de cara al futuro una vez resueltos los problemas de la tecnología por no estar suficientemente desarrollada.

Las plantas de disco parabólico se componen de multitud de unidades autónomas que se conectan a motores Stirling situados en el foco. Se consiguen altas relaciones de concentración, incluso por encima de 3000 gracias a la curva parabólica del concentrador y al pequeño cociente entre distancia focal/diámetro ($f/D=0.6$). Una ventaja de esta aplicación es que permite alcanzar elevadas temperaturas de operación entre 650 y 800 °C, consiguiendo eficiencias en el motor superiores a 40% en ciertos casos.

El objetivo de estas centrales es la generación de energía eléctrica de forma directa mediante el motor Stirling, haciendo uso de uno o varios paraboloides de revolución que concentran en un foco puntual (receptor), los rayos incidentes sobre la superficie.

El motor Stirling cuenta con pistones en movimiento y la combustión producida es externa, por lo que la cámara de combustión se encuentra fuera de los cilindros.

b) Aplicaciones a media temperatura (Procesos industriales):

Si se desea alcanzar una temperatura superior a 100°C se debe concentrar la radiación solar mediante lentes o espejos. Una superficie puntual denominada foco sobre la que se canaliza la radiación, eleva la temperatura notablemente en los colectores planos (entre 200 y 500°C). Dicha superficie puede tener cualquier forma según la técnica aplicable. Por ejemplo, para una concentración media ($T < 300^\circ\text{C}$), lo más adecuado es utilizar un colector cilindro-parabólico, que consta de un espejo en el que se refleja la radiación incidente sobre un tubo de vidrio que se encuentra en la línea focal, el cual engloba al absorbedor y al fluido portador de calor.

La casuística más adecuada para la concentración de los rayos se basa en orientar los colectores al sur (teniendo la referencia del hemisferio norte) y con una inclinación igual a la latitud del lugar. Se debe implementar un dispositivo que permita girar a los espejos durante el día sincronizado con el movimiento aparente del sol.

Los colectores cilindro-parabólicos cuentan con numerosas ventajas frente a los planos: tienen una menor superficie de absorción, menores pérdidas de calor, operan a temperaturas superiores (interesantes posibilidades de utilización industrial, desalación de agua de mar, refrigeración y climatización) y requieren depósitos de acumulación más pequeños, pero tienen el inconveniente de ser más caros.

Una aplicación industrial interesante es la denominada granja solar, que está destinada a la producción de calor o electricidad mediante una asociación de colectores que pueden alcanzar elevadas temperaturas para posteriormente aplicarla en procesos térmicos.

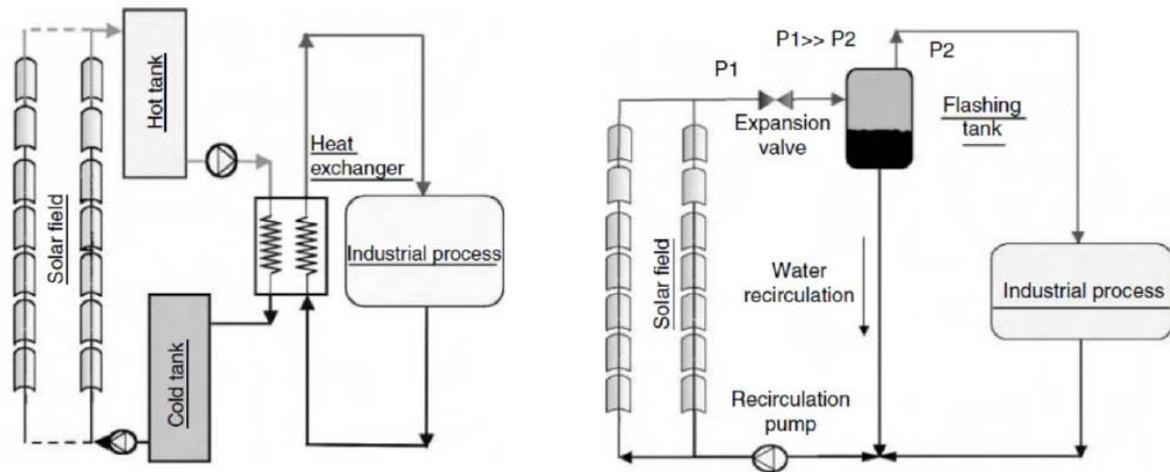


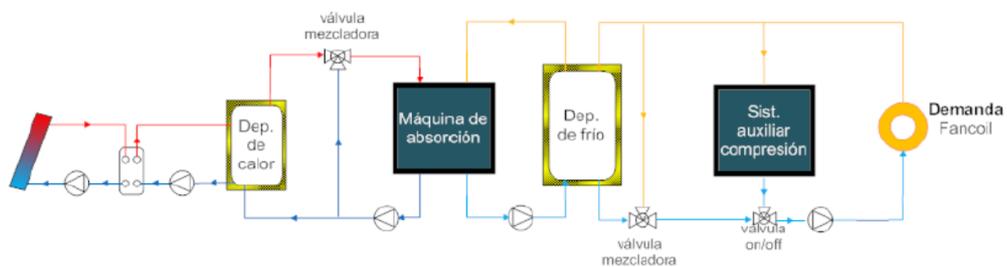
Figura 5. Esquemas de procesos industriales [1].

c) Aplicaciones a baja temperatura (Industria y edificación):

Son sistemas que se utilizan para calentar el agua sin llegar al punto de ebullición, con la ayuda de un conjunto de elementos para suministrar agua caliente (sistemas solares activos), entre los que se pueden destacar:

- Subsistema colector: compuesto por paneles o placas con estructura plana y metálica que engloban un conjunto de tubos de color negro mediante los que circula agua. Están encargadas de captar la radiación incidente y tienen un cristal en la parte superior que facilita el paso de los rayos, al mismo tiempo que hace la función de aislante térmico, induciendo un efecto invernadero artificial. El color negro de los tubos permite absorber la máxima radiación solar.
- Subsistema de almacenamiento: son depósitos donde se almacena el agua caliente que proviene de los paneles.
- Subsistema de distribución: instalación de tuberías y accesorios que permiten transportar el agua caliente desde el colector hasta los depósitos de almacenamiento y posteriormente desde estos depósitos a los puntos de consumo.

Estos sistemas necesitan un equipo convencional de apoyo como calentadores eléctricos o a gas, ya que no garantizan por completo las necesidades energéticas. Estos podrán suplir la falta de energía debido principalmente a condiciones climatológicas.



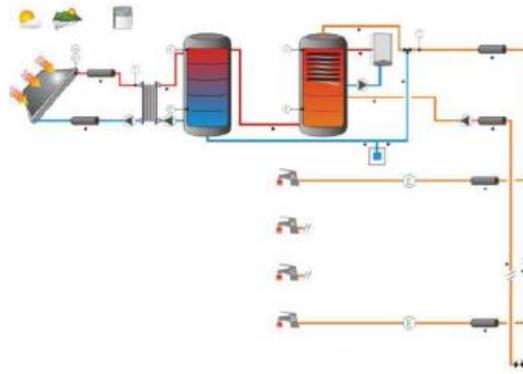


Figura 6. Esquemas de procesos en la edificación [1].

Las aplicaciones de baja temperatura más destacadas son:

- Producción de agua caliente sanitaria
- Calefacción
- Refrigeración
- Piscinas
- Producción de agua caliente
- Secado

B) SISTEMAS PASIVOS

No necesitan ningún dispositivo para captar la energía solar, el aprovechamiento del recurso se logra aplicando distintos elementos arquitectónicos, reduciendo así, en lo posible, el consumo energético y minimizando el impacto ambiental.

El elemento más característico de un sistema de conversión de energía solar a energía solar térmica es el sistema de captación, y la configuración del sistema de captación depende fundamentalmente del nivel térmico necesario en el proceso. Como la densidad de radiación solar disponible es pequeña (inferior a 1 kW/m^2), si el nivel de temperatura requerido es elevado (superior a $100 \text{ }^\circ\text{C}$), hay que considerar sistemas que reduzcan las pérdidas térmicas al máximo (incorporando el vacío en el diseño del sistema) y/o aumentando la densidad de radiación disponible mediante técnicas de concentración.

Cuando se tienen niveles de temperaturas por debajo de 80°C se usan los captadores solares planos con una superficie negra o selectiva. Sin embargo, con temperaturas superiores a dicho valor se utilizan tubos de vacío sin concentración hasta los $120 \text{ }^\circ\text{C}$, y sistemas de concentración por encima de los $120 \text{ }^\circ\text{C}$, consiguiendo de esta forma un aumento de la concentración por tener mayor temperatura.

Entre los sistemas de captación solar destacan: sistemas de radiación no vidriados que calientan agua de piscinas o spa; captadores solares de vacío; captadores solares con sistemas de concentración de radiación de grandes instalaciones; o captadores solares térmicos con sistemas de seguimiento del sol, los cuales rotan según se mueva el sol durante el día para obtener la mayor cantidad de energía posible.

VENTAJAS DE UN SISTEMA SOLAR TÉRMICO

Las ventajas que diferencian a un sistema solar térmico son:

- No contaminación; es una energía limpia a diferencia de los combustibles fósiles.
- Fuente de energía ilimitada; el sol es una fuente inagotable de energía renovable.
- Alto grado de alcance; el sol llega donde no llegan los tendidos eléctricos.
- Mantenimiento mínimo; el mantenimiento es sencillo y casi inexistente

- Ahorro; no sólo energético, también económico.

DESVENTAJAS DE UN SISTEMA SOLAR TÉRMICO

Las desventajas de un sistema solar térmico son:

- Variabilidad en los patrones y cantidad radiación; los niveles de radiación son muy variables.
- Inversiones elevadas; el mantenimiento es mínimo pero la inversión inicial importante.
- Limitación respecto a estética de edificios.
- Espacio; si el objetivo es a gran escala, se necesita un amplio terreno para la instalación, lo cual, resulta complejo y caro.

2.2 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica consiste en un proceso de conversión directa de las partículas de luz, denominadas fotones, en electricidad a través de un material semiconductor.

Un semiconductor es una sustancia que posee una conductividad intermedia entre un aislante y un conductor, y que según sus características mediante un proceso de dopado (adición de impurezas que afectan a propiedades eléctricas), se puede dividir en dos tipos: tipo “p” y tipo “n”.

Añadiendo impurezas de boro al silicio, se consigue un semiconductor tipo p, en cambio añadiendo impurezas de fósforo se obtiene un semiconductor n. El elevado coste de estos materiales tiene una fuerte dependencia con el alto grado de pureza necesario.

Una célula fotovoltaica está compuesta por un disco monocristalino de silicio dopado de tipo n en la superficie expuesta al sol, y de tipo p en la parte inferior completada mediante contactos eléctricos que permiten el paso de la corriente eléctrica por el circuito exterior.

Un módulo fotovoltaico se compone de dichas células fotovoltaicas conectando generalmente 36, 72 o 108 de ellas entre dos láminas de vidrio con la función de protegerlas de la intemperie. Este módulo tiene capacidad de proporcionar una corriente continua de 18 V y una iluminación de 1 kW/m². Conectando un conjunto de módulos fotovoltaicos sobre un soporte mecánico se construye un panel fotovoltaico. Según la conexión de dichos módulos (serie o paralelo) puede conseguirse cualquier valor de tensión y de intensidad de corriente.

Un módulo fotovoltaico está protegido del exterior y vinculado al mismo mediante los siguientes elementos estructurales:

- Cubierta frontal: se compone de un vidrio transparente con una transmisividad del 95% a la radiación incidente.
- Cubierta posterior: es una lámina delgada de polímero (tedlar) opaca a la radiación solar. Frecuentemente, se coloca un polímero transparente añadiendo un vidrio para conseguir una mejor integración en la cubierta y fachadas de edificios que tienen aplicaciones de conexión a red.
- Encapsulante: es un polímero transparente compuesto por etilen-vinil-acetato que permite la unión de las células y las ajusta entre las dos cubiertas. Su función es evitar huecos y permitir el ensamblaje del módulo.
- Diodos de paso y diodos de bloqueo. Los primeros se disponen en paralelo de asociaciones de células en serie para evitar el deterioro de una célula sombreada por la descarga de potencia sobre la misma. Los segundos tienen la función de proteger a sistemas fotovoltaicos aislados con intensidades inversas que proceden de la batería en el transcurso de la noche, y además, bloquear los flujos de intensidad inversa en ramas colocadas en paralelo deterioradas o sombreadas.
- Marco: se coloca en perfiles rígidos de aluminio sellados con juntas de neopreno y silicona.
- Cajas de conexiones: se encuentran en la cara posterior del módulo, y contienen un polo positivo y un

polo negativo.

Resulta complejo determinar la durabilidad de un módulo fotovoltaico, sin embargo, pueden superar los 30 años de vida si está homologado y cumple la normativa vigente, pero reduce sus prestaciones en un 20-25% respecto del primer día cuando supera 25 años.

Un módulo fotovoltaico es una aplicación característica que no posee combustibles ni ruido, además de no requerir partes móviles, simplemente la célula fotovoltaica expuesta a la radiación para absorber la energía contenida en los fotones. Estos ponen en movimiento los electrones que formarán un campo eléctrico interno para generar la corriente eléctrica continua en la superficie de la célula.

Este efecto generado recibe el nombre de efecto fotovoltaico, y cuenta con un valor bajo de rendimiento, alcanzando un valor máximo del 25% aproximadamente en la transformación de la energía luminosa en eléctrica. En este proceso la energía obtenida posee un valor bajo de tensión entre 380 y 800 V en corriente continua. Para la transformación de dicha corriente en alterna se utiliza el inversor.

Es necesario disponer de un acumulador en una instalación fotovoltaica para almacenar la energía eléctrica que no se utiliza en energía química. No obstante, se puede encontrar conectado en paralelo con la red en caso de usar la energía de la misma cuando no haya radiación solar.

Los paneles solares deben instalarse en lugares adecuados, es decir, aquellos que se encuentran expuestos al sol durante el mayor número de horas posible y con una orientación adecuada, factores de los cuales dependerá el rendimiento de la instalación.

Las diferentes formas de disponer de electricidad se dividen en:

- electricidad directa
- almacenada en baterías (energía eléctrica descentralizada)
- electricidad inyectada en la red.

Un aumento de producción de energía está ligado a tres factores clave: una reducción de la temperatura del panel fotovoltaico, una orientación al sur, y la mayor cantidad de radiación incidente posible, por lo que serán dos objetivos en el diseño de una instalación. Con respecto a la ubicación, su rendimiento disminuirá cuanto más tiempo se encuentre expuesto a sombras.

Los componentes a destacar en una instalación fotovoltaica son el inversor, la batería y el regulador de tensión. El inversor se encarga de transformar la corriente continua en alterna, la batería almacena la energía y el regulador controla y protege la batería.

Existen principalmente dos grupos de instalaciones fotovoltaicas:

- Aisladas de la red: instaladas en lugares sin acceso a la red convencional, y preparadas para cubrir las necesidades de energía eléctrica. Como ejemplo de este tipo pueden encontrarse los bombeos de agua para riego, electrificación rural, abastecimiento humano, telecomunicaciones, señalización e iluminación de carreteras...
Cuentan con módulos fotovoltaicos o células solares pudiendo incluir baterías, inversores y reguladores.
- Conectadas a la red: inyectan a la red de la compañía correspondiente la energía producida con la obtención de ingresos por la venta de la misma. En estas instalaciones se dispone de los módulos, un inversor, protecciones eléctricas y contadores. Se encuentran muy reguladas por legislación, ya que se vende la energía producida a la red.

Se pueden clasificar distintas aplicaciones fotovoltaicas:

- Remotas: en lugares que tienen un consumo bajo de electricidad y necesitan acumular la energía mediante baterías. Por ejemplo, repetidores de radio y TV, balizas, radiofaros.
- Usos rurales: son instalaciones aisladas de la red que no suelen requerir acumulación, como por

ejemplo la molienda y el riego.

- Autogeneración: son centros de consumo conectados a la red, los cuales utilizan la energía solar como base y la de la red como un complemento.
- Grandes centrales: son aquellas instalaciones que generan de forma masiva la electricidad. Se pueden encontrar solo en lugares con evolución tecnológica, con opción de asumir los costes de fuentes energéticas convencionales y con buenas condiciones climáticas.

El generador fotovoltaico compuesto de una asociación de módulos en serie-paralelo, transforma la radiación en electricidad, y se puede llevar a cabo en sólidos, líquidos y gases. La aplicación que mayor eficiencia ofrece corresponde a materiales sólidos.

El proceso de fabricación de una célula fotovoltaica es bastante complejo e implica unos costes elevados, por ello se realizan actualmente investigaciones centradas en la utilización de nuevos materiales y en aumentar la radiación incidente para poder disminuir el coste de estos elementos. Se han encontrado semiconductores con buenas propiedades fotovoltaicas y con un coste de producción muy por debajo del que se tiene para el silicio. Por otro lado, se han utilizado células bifaciales que reciben la radiación solar por ambas caras, y se ha desarrollado la óptica de las lentes.

Una atractiva ventaja de la energía fotovoltaica es que se engloba dentro de energías limpias sin emisión de residuos, con una fuente inagotable y gratuita de energía. Es una energía que compensa desigualdades, ya que los países menos desarrollados la tienen disponible y no necesitan importarla.

Como inconvenientes destacan: una gran exigencia respecto a la superficie de suelo requerida, un alto coste de las instalaciones con relación a su rendimiento, la no uniformidad de la radiación limitándose el uso a zonas de elevado número de horas de sol al año, la contaminación al producir y mantener los paneles, o la modificación del entorno inmediato debido a la magnitud de los mismos.

Las diferentes medidas de protección que deben incluir las instalaciones fotovoltaicas se dividen en dos grupos, por un lado, las de corriente continua (desde el campo solar hasta la entrada al inversor), y por otro en el lado de alterna (desde la salida del inversor hasta la conexión con la línea eléctrica de la empresa distribuidora).

❖ Protecciones en la parte de corriente continua:

En instalaciones de conexión a red, los cuadros de protección entre los paneles y el inversor son estancos, con una protección mínima IP65, con capacidad de resistir a la radiación ultravioleta, y disponen de tres tipos de protecciones en su interior, que corresponden contra sobretensiones empleando varistores o limitadores de tensión. Estos elementos impiden que la tensión entre dos puntos no supere un valor límite aguas abajo.

Para mejorar esta protección contra sobretensiones es aconsejable:

- Colocar lo más cerca posible los cables del polo negativo y positivo en la parte de continua.
- Una adecuada superficie equipotencial
- Una longitud máxima de 0,5 m para los cables que unen los varistores con tierra
- Unir cada polo con un dispositivo de protección a tierra en los sistemas flotantes, para que la protección contra sobretensiones no sea diferencial
- Realizar la protección contra sobretensiones cerca del equipo a proteger (máximo 10 m).

Es necesaria una protección contra los flujos de corriente eléctrica indebida entre hileras, con unos elementos denominados seccionadores fusibles en carga que se ajusten en intensidad a los límites indicados por el fabricante de los paneles. Estos elementos tienen la función de impedir el paso de la corriente en un valor límite, y cuentan con la capacidad de abrir el circuito cuando está circulando una intensidad de forma

que no se produzcan arcos eléctricos. Esta medida se encuentra complementada con un by-pass de protección para las células fotovoltaicas contra intensidad de corriente y efecto del punto caliente.

Una protección contra los defectos de aislamiento también resulta necesaria en el polo negativo y/o positivo, con unos dispositivos de control de defecto para revisar que no se pongan los conductores en contacto con la tierra. Utilizan interruptores para abrir un circuito y corregir el defecto.

Esta medida también se complementa con la disposición de conectores y cuadros eléctricos de clase II, es decir, equipos diseñados y sometidos a pruebas para garantizar un doble aislamiento del dispositivo correspondiente. La forma de señalar estos elementos se distingue con un doble cuadro concéntrico como símbolo.

Las protecciones en la parte de corriente continua (campo solar), se complementan generalmente con las siguientes medidas:

- Señalización de advertencia de riesgo eléctrico tanto en el campo solar como en la caseta de inversores.
- Cerramiento adecuado del campo solar, incluyendo televigilancia para impedir la entrada de personas o animales.
- Cuadros eléctricos, conectores entre paneles, cables y conductos de canaletas que cumplen el reglamento eléctrico de baja tensión, diseñados para resistir a las condiciones de intemperie: humedad, radiación, bajas y altas temperaturas.
- Seccionador general a la entrada del inversor para reemplazarlo en caso de ser necesario sin riesgo eléctrico. Se recomienda intercalar en cada hilera un seccionador en carga para sustituir o reparar los paneles sin riesgo eléctrico cuando la tensión de las hileras es elevada, superando 120 V aproximadamente.
- Polo negativo y positivo flotantes sin conectarse a tierra y señalizados correctamente por colores, siendo el color negro correspondiente al polo negativo y el rojo para el polo positivo.
- Conexión equipotencial a tierra de masas para la estructura soporte metálica y el marco de los paneles.
- Estructura soporte y cimentación diseñada según el CTE, mediante materiales que resisten las condiciones de la intemperie
- Protección frente a rayo
- Conductores con intensidad mínima del 125% del valor de intensidad de cortocircuito de las hileras correspondientes para evitar riesgo de sobreintensidad.

❖ Protecciones en la parte de corriente alterna

Se emplean varistores para limitar tensiones, interruptores magnetotérmicos contra sobreintensidades y cortocircuitos de la red, e interruptores contra contactos indirectos o defectos de aislamiento.

Las protecciones de la parte de corriente alterna se complementan con las siguientes medidas:

- Inversor con protecciones de variaciones de tensión fuera del rango 0.85 y 1.1 de tensión nominal, fuera de frecuencia del rango 49 y 51 Hz, rearme del propio inversor, y funcionamiento en isla
- Puesta a tierra independiente (neutro) de uno de los conductores a la salida del inversor separada de la otra tierra de masas, para conectarse al neutro de la red eléctrica.
- Carcasa del inversor conectada a la toma de tierra de la estructura y el marco de los paneles
- Cuadros eléctricos, conectores, y cables diseñados para soportar condiciones exteriores, interiores, o enterrado, y cumplimentando tanto el R.E.B.T, como las especificaciones de la compañía eléctrica de distribución. No se debe superar una caída de tensión mayor de 1,5 % de la tensión nominal trabajando a intensidad nominal desde el inversor hasta la caja general de protecciones. El conductor debe admitir un 125% de la intensidad nominal.

- Seccionador a general a la salida del inversor para reemplazarlo en caso necesario
- Equipos de medida y caja general de protección de acuerdo a las condiciones de la compañía eléctrica y normativa vigente.

Se debe realizar un mantenimiento preventivo y correctivo a todas las instalaciones, como las indicadas en la H5-5 del código técnico de edificación:

- Verificación de protecciones eléctricas
- Asegurar el correcto estado del inversor
- Examinar el estado mecánico de cables (tomas de tierra, reapriete de bornas) y terminales, así como pletinas, transformadores
- Comprobar la adecuada limpieza de los elementos
- Verificación del estado de los paneles y la conexiones

A continuación, se muestra un ejemplo de instalación fotovoltaica autónoma:

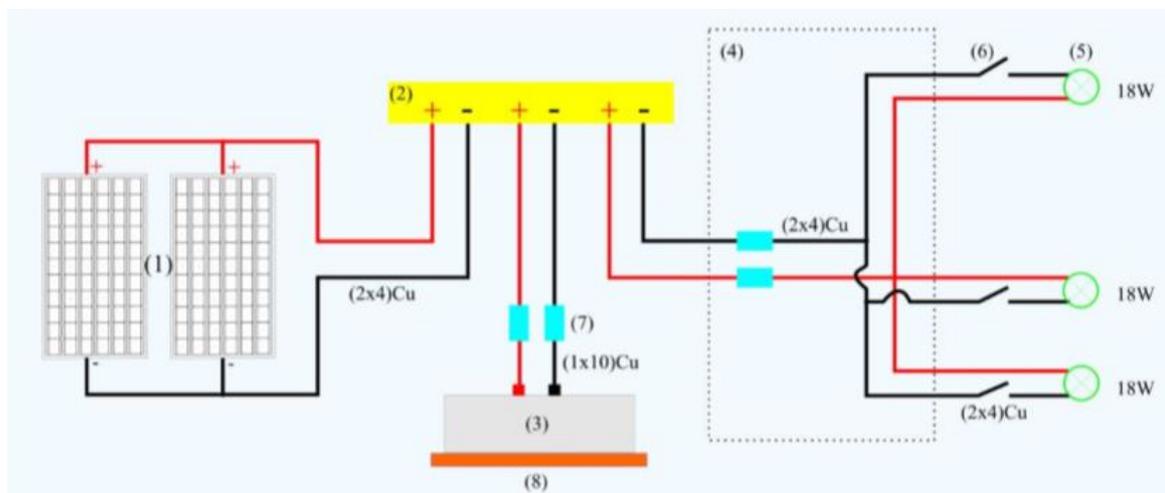


Figura 7. Esquema de instalación FV con baterías sin inversor [4].

En la figura se pueden identificar los siguientes elementos:

- (1) 2 módulos FV en paralelo
- (2) Regulador con sonda de temperatura
- (3) Batería
- (4) Cuadro de distribución con fusible o magnetotérmico
- (5) 3 lámparas fluorescentes
- (6) Interruptor manual
- (7) Fusibles o magnetotérmicos
- (8) Bancada de madera/plástico aislante

Un ejemplo de instalación fotovoltaica de conexión a red se puede observar en la siguiente figura:

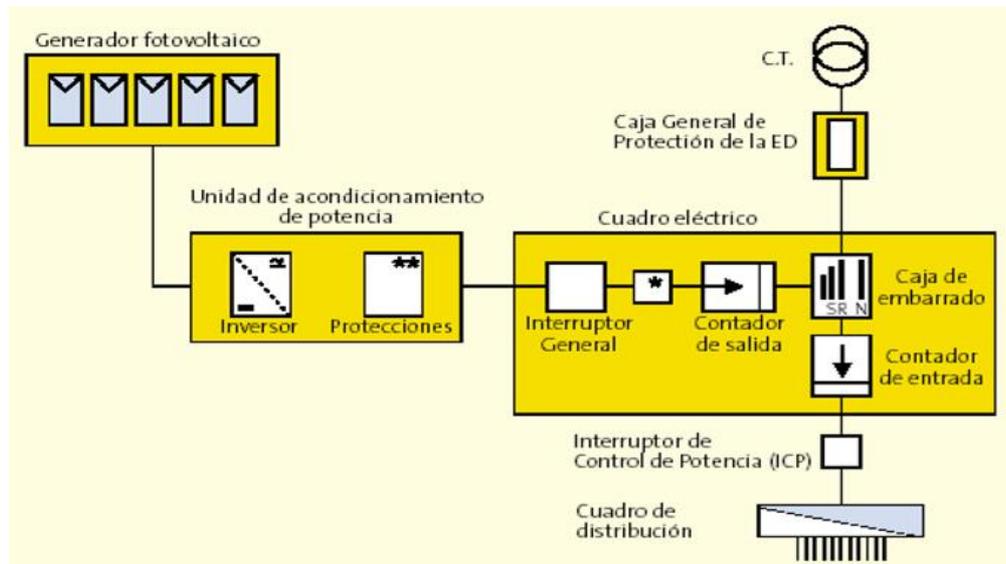


Figura 8. Esquema unifilar de instalación FV de conexión a red [4].

2.3 Energía eólica

La energía eólica es la energía que se obtiene del viento que se origina por desigual calentamiento de la superficie del planeta, originando movimientos convectivos de la masa atmosférica. Se trata de un tipo de energía cinética producida por el efecto de las corrientes de aire, que, a su vez, puede ser convertida en electricidad a través de un generador eléctrico, o bien, en energía mecánica mediante aerobombas. Es una energía renovable, limpia, que no contamina y que ayuda a reemplazar la energía producida a través de los combustibles fósiles. Se trata de uno de los métodos más extendidos y productivos para obtener energía eléctrica limpia a nivel mundial.

Es uno de los recursos energéticos más antiguos explotados por el ser humano y actualmente la energía más eficiente y madura de todas las renovables. Sin embargo, sigue en continuo desarrollo, contando con mejoras tecnológicas y sometida a investigación con el objetivo de ser aún más fiable y eficiente.

Presenta numerosos beneficios en relación a otros recursos en los ámbitos económico y ambiental:

1. Escasa contaminación. Al tratarse de una energía limpia tiene poco impacto sobre el medio ambiente, ya que no cuenta con procesos de combustión que pueda dañar la fauna, el suelo, la vegetación y el agua. Otra ventaja de esta energía es que no provoca efecto invernadero.
2. Es un recurso inagotable, disponible en todo el planeta, seguro y autóctono, lo que permite reducir importaciones energéticas, fomentando empleo y riqueza local.
3. Permite reducir la dependencia de combustibles fósiles, ayudando a frenar el cambio climático.
4. No tiene impacto en el transporte de energía, reduce el tráfico terrestre y marítimo. Los parques eólicos son fáciles de desmontar y favorecen la reutilización del terreno.
5. Alta rentabilidad económica y bajos costes de producción. Es una de las fuentes más baratas y compite con las fuentes tradicionales por su alta rentabilidad. Por otro lado, el tiempo de construcción respecto a otras aplicaciones es bajo.

La producción de electricidad mediante el recurso eólico contribuye al desarrollo sostenible del planeta, pero al mismo tiempo cuenta con una serie de inconvenientes importantes, como el patrón de producción variable debido al viento. Además, la densidad del mismo es muy baja, de manera que se necesita mucha superficie para lograr cantidades importantes de energía eléctrica. También modifica el espacio medioambiental a la hora de su construcción, con un fuerte impacto visual, sobre aves, acústico, por erosión e interferencias electromagnéticas.

El dispositivo que realiza la conversión de energía cinética del viento en energía eléctrica se denomina aerogenerador, se compone de un generador eléctrico movido por una turbina que a su vez está accionada por el viento, y constituye el elemento principal en una instalación eólica. Tendrá un diseño distinto según la potencia y la eficiencia de cada aplicación.

Las nuevas tecnologías a desarrollar en el sector eólico están encaminadas al aumento de la eficiencia energética, la reducción de litros de lubricantes necesarios, disminución de ruido y reducción de la velocidad de las palas. Con estas medidas disminuye el riesgo de colisión de las aves.

El aerogenerador se conoce históricamente como “molino de viento”, y está compuesto por: una torre, un sistema de orientación ubicado en el extremo superior de dicha torre, un armario de acoplamiento a la red eléctrica unido a la base de la torre, una góndola armazón que engloba los componentes mecánicos del molino, un eje y un mando del rotor delante de las palas, y finalmente dentro de la góndola un freno, un multiplicador, un generador y el sistema de regulación eléctrica.

El aerogenerador dispone fundamentalmente de cuatro sistemas:

- Sistema de orientación: mantiene el rotor de cara al viento, de forma que puede evitar las pérdidas de rendimiento y los grandes esfuerzos por los cambios de dirección y velocidad producidos en dicho rotor.
- Sistema de regulación: permite el control de la velocidad del rotor y de su par motor en el eje, para evitar fluctuaciones provocadas por la velocidad del viento.
- Sistema de transmisión: mediante un dispositivo multiplicador colocado entre el rotor y el generador, permite accionar el generador de corriente por el aumento de la velocidad de giro del rotor.
- Sistema de generación: produce corriente continua mediante la dinamo y la corriente alterna mediante el alternador, el cual puede ser síncrono o asíncrono.

Las palas de un aerogenerador se conectan al rotor conectado al eje y envía la energía de rotación al generador eléctrico, que contiene imanes que permiten producir voltaje eléctrico, y por tanto, energía eléctrica. Una vez generada, se necesita sincronizar la frecuencia del sistema del aerogenerador con la frecuencia de la red.

A continuación, se muestra un esquema de esta configuración de elementos:

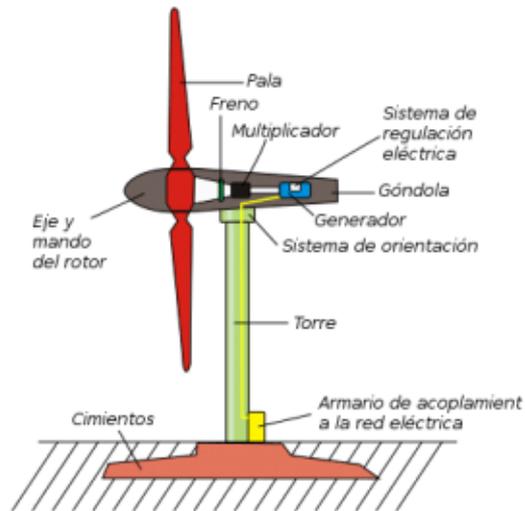


Figura 9. Componentes de un aerogenerador [5].

En las instalaciones eólicas resulta necesario un previo estudio del emplazamiento correspondiente, al mismo tiempo que cumplir los requisitos de comportamiento del aire, y así poder obtener un buen rendimiento del aerogenerador. Se mide el viento en diferentes alturas, y se comprueba su dirección y velocidad, proceso denominado “rosa de los vientos”, y recomendado a tener una duración de un año. Este estudio, facilita la búsqueda de la posición óptima de los aerogeneradores, corrobora si la ubicación de parque eólico es adecuada, y asegura que no afecta negativamente al medio ambiente. Este estudio previo consta de los siguientes factores:

- ✓ Impacto ambiental en la zona: se necesitan espacios amplios sin árboles ni tránsito de aves para evitar daños al medio, ya que a pesar de contar con una energía limpia, los aerogeneradores son muy grandes y pueden modificar el entorno visualmente.
- ✓ Potencial energético de la zona: además de unas condiciones favorables para la producción, se recomienda una comunidad próxima para el consumo de la energía eólica generada.
- ✓ Comportamiento del aire: análisis previo de la dirección, temperatura y capacidad de generación durante un año.

Una vez estudiando el viento, se analizará el entorno y deberá respetarse la avifauna, además de mantener la lejanía de los parques eólicos con los núcleos urbanos para no generar contaminación acústica, instalar los aerogeneradores en suelos no urbanizables, y evitar interferencias con señales electromagnéticas.

Los parques eólicos transmiten la electricidad desde el centro de transformación hasta una subestación de distribución mediante una línea eléctrica que permite hacer llegar la energía producida al usuario final.

Se destacan a continuación algunas ventajas de la energía eólica:

- Fuente inagotable de energía renovable: disponibilidad del viento constante en muchos lugares del mundo.
- Ocupación de poco espacio: en comparación con otro tipo de energía, necesita menos terreno para producir y acumular la misma cantidad de energía. Además, es reversible, es decir, se puede renovar su área ocupada fácilmente.
- No contamina: es la energía más limpia después de la energía solar, no implica ningún proceso de combustión en su generación, de manera que no produce gases tóxicos ni residuos sólidos. Un aerogenerador alcanza una capacidad de energía similar a la de 1.000 kg de petróleo.
 - Bajo coste: tanto el mantenimiento de la turbina eléctrica como su coste son relativamente

bajos, incluso en algunos casos el coste de producción es el mismo que el del carbón e incluso la energía nuclear.

- Compatible con otras actividades: las instalaciones de energía eólica no interrumpen el desarrollo de actividades tradicionales como la agricultura y la ganadería, sin generar impacto negativo en la economía local.

Inconvenientes de la energía eólica:

- El viento no se encuentra garantizado: es relativamente impredecible porque no se cumplen todas las previsiones de producción, principalmente en intervalos cortos de tiempo. Se realizan inversiones a largo plazo para minimizar los riesgos, por tanto hay mayor seguridad para calcular el retorno de las mismas. Los valores de velocidad entre los que funcionan correctamente los aerogeneradores corresponden a un viento entre 10 y 40 km/h. Por debajo de 10 km/h la energía no resulta rentable y por encima de 40 km/h hay riesgos físicos para la estructura.
- No almacenable: debe ser consumida de manera inmediata una vez producida. No es posible ofrecer una alternativa al uso de otros tipos de energía
- Impacto en el paisaje: puede dificultar la visibilidad desde largas distancias por la construcción de grandes parques eólicos e incluso crear malestar en la población por el impacto estético en el paisaje. La altura promedio de las torres oscila entre 50 y 80 metros, con unas palas giratorias que se elevan otros 40 metros por encima.
- Afecta a las aves: principalmente debido a las palas giratorias que se mueven a velocidades hasta 70 km/h. Las aves no tienen la capacidad de detectar visualmente las cuchillas a esos valores de velocidad, y terminan colisionando con ellas.

Implantación de energía eólica a nivel mundial:

Según los datos de la consultora Navigant BTM, en el cierre del año 2015, la potencia eólica en el mundo superó los 400.000 MW instalados, previéndose un crecimiento del 40% hasta 2019, sobrepasando los 600.000 MW.

España forma parte de los países pioneros y líderes de aprovechamiento del viento para producir energía eléctrica. Después de 30 años de instalarse el primer aerogenerador en el país, consiguió el tercer puesto en obtención de electricidad a través del recurso eólico durante un año entero, concretamente el año 2013 con un 20,9% de la producción total. Estos datos sitúan a España como un país bastante avanzado en soluciones tecnológicas que permiten su integración en la red.

En los últimos años la implantación eólica en el país se ha ralentizado, sin embargo, España sigue siendo el segundo país europeo en potencia eólica operativa después de Alemania (43.723 MW) con 23.000 MW instalados, y el quinto del mundo, tras China (138.060 MW), EE.UU. (71.000 MW) e India (25.219 MW), según las estimaciones de la citada consultora.

Actualmente la energía eólica se aprovecha de dos formas distintas, los aerogeneradores o turbinas producen electricidad y las aerobombas están destinadas al bombeo de agua.

- Aerobombas: se utilizan para sacar agua de los pozos con la ayuda exclusiva del viento. El modelo existente más frecuente es el molino multipala americano.
- Aerogeneradores: producen energía eléctrica de dos formas:
 - Aplicaciones aisladas de media o pequeña potencia de usos domésticos o agrícolas como la iluminación, bombeo, y riego; o incluso en instalaciones industriales para desalación de agua de mar. Se incluyen sistemas de baterías de acumulación en caso de estar condicionados por un horario específico, o bien combinaciones de otro tipo de generadores eléctricos.
 - Conexión directa a red: para potencias grandes de más de 10 o 100 KW, aunque también es factible en ocasiones la conexión de modelos más pequeños, teniendo en cuenta los costes de conexión a red. La rentabilidad más interesante se obtiene cuando se agrupan

máquinas que vierten energía conjuntamente a la red eléctrica (parques eólicos).

Una aplicación interesante son los aerogeneradores pequeños de potencia con un valor de hasta 50 kW destinados al abastecimiento de electricidad para edificios aislados sin conexión a red. Suelen combinarse con paneles fotovoltaicos para generar energía eléctrica de origen renovable.

Clasificación de aplicaciones eólicas según su ámbito:

- Centralizadas: producción de energía eléctrica en cantidades relativamente importantes, dentro de las cuales se puede encontrar:
 - o Aerogeneradores de gran potencia
 - o Parques eólicos que contribuyen a importante producción eléctrica en el futuro
- Vertidas directamente a la red de distribución
- Autónomas: uso directo de la energía mecánica o su conversión en energía térmica o eléctrica, entre las que encontramos 3 grupos según el tipo de energía utilizada:
 - o Energía mecánica: bombeo de agua con bombas de pistón, tornillo helicoidal o centrífugas
 - o Energía térmica: calentamiento del agua por rozamiento mecánico o por compresión del fluido refrigerante de una bomba de calor
 - o Energía eléctrica: obliga al almacenamiento o interconexión del sistema de generación autónomo con la red de distribución eléctrica.

Las aplicaciones autónomas se basan en las necesidades de comunidades pequeñas o tareas agrícolas, entre las que podemos destacar:

- Bombeo de agua y riego
- Acondicionamiento y refrigeración de almacenes
- Refrigeración de productos agrarios
- Secado de cosechas
- Calentamiento de agua
- Acondicionamiento de naves de cría de ganado
- Alumbrado y usos eléctricos diversos

Junto a sus diversas aplicaciones, también se pueden diferenciar entre los dos tipos básicos en los que encontramos el recurso eólico en el planeta:

- Eólica terrestre (onshore): se trata de la energía que se obtiene mediante los aerogeneradores situados en la superficie terrestre. Este tipo de aerogeneradores presentan una potencia unitaria más elevada y sus costes de instalación y mantenimiento son más reducidos. Aparte, cuenta con una mejor accesibilidad.
- Eólica marina (offshore): posee el mismo funcionamiento, pero con la diferencia de que los aerogeneradores se encuentran ubicados en el mar. De esta forma, el impacto visual y acústico es menor, lo que permite un mayor aprovechamiento del recurso eólico (sin limitaciones de espacio). Por otra parte, gracias a tener un régimen de viento más laminar y una velocidad más constante, la vida útil del generador es mayor.

En el análisis inicial de las energías renovables y fundamentos de energía solar se puede destacar la similitud entre cada una de las aplicaciones, ya que están consideradas como energías limpias no contaminantes y comparten ventaja de disponer de una fuente inagotable y gratuita de energía.

La implantación de energías renovables sufre un lento desarrollo debido a elevados costes de inversiones iniciales y variabilidad del clima. Resulta complejo aprovechar los recursos renovables en cuanto a producción continua de energía en todas las partes del planeta, pero sin embargo tienen alto grado de alcance, y compensan desigualdades ya que se encuentran disponibles en países no desarrollados.

La energía eólica resulta la tecnología más eficiente y madura de las renovables. Cuenta con una elevada rentabilidad económica y bajo coste de producción, reduce la dependencia de combustibles fósiles, y evoluciona tecnológicamente de forma continua.

3 DESALACIÓN MEDIANTE ENERGÍA RENOVABLE

3.1 Introducción

La mejor solución de desalinización solar se analiza, caso por caso, considerando diferentes escenas:

- Comunidades rurales con demanda limitada de agua dulce ($<100 \text{ m}^3/\text{d}$). Actividades intensivas de investigación y desarrollo centradas en proporcionar agua dulce a pequeñas comunidades rurales en países en desarrollo. Se han construido muchos sistemas de baja eficiencia, que integran el proceso de conversión y desalinización solar térmica en el mismo dispositivo. Sin embargo, a medida que la capacidad de la planta aumenta el uso de tales dispositivos no tienen sentido debido a su baja eficiencia energética.
- Regiones con alta demanda tanto de agua ($> 25,000 \text{ m}^3 / \text{d}$) como de electricidad ($> 10 \text{ MW}$). Este tipo de sistemas han sido poco analizados. Una planta de energía solar puede producir las necesidades energéticas de una planta de desalinización, basada en ósmosis inversa o en cualquier proceso de destilación.
- Demanda de agua intermedia ($<25,000 \text{ m}^3 / \text{d}$ y $> 100 \text{ m}^3 / \text{d}$). Los sistemas de destilación solar consisten en una unidad de desalinización y un campo solar directamente conectado o acoplado por un sistema de almacenamiento de energía. En caso de utilizar un proceso de desalinización impulsado por electricidad, es necesario un ciclo de potencia con una potencia de salida relativamente pequeña. Se han implementado varias plantas, normalmente en el marco de proyectos de I + D.

En lo que respecta a la desalinización solar, la ósmosis inversa (RO) se alimenta con electricidad, por lo que se requiere la conversión de energía de energía solar térmica a electricidad. Por lo tanto, una evaluación comparativa de diferentes tecnologías basadas en cualquiera de ellas, la destilación y la ósmosis inversa (RO) no es fácil. Al analizar los sistemas de destilación, dos parámetros son esenciales para evaluar el rendimiento del proceso:

- La relación de rendimiento, PR, que es la relación entre la entalpía de agua del cambio de fase (2330 kJ / kg) y el consumo de energía térmica específico del proceso en sí (kJ / kg).
- La relación de salida de ganancia, GOR: relación entre el producto obtenido (kg de vapor condensado) y la energía requerida del proceso en términos de kg de vapor condensado de la fuente térmica.

GOR y PR tienen valores similares debido a sus definiciones respectivas y dependen principalmente de la tecnología de destilación. Por el contrario, el Consumo de Energía Específico (SEC) de la tecnología actual de RO depende en gran medida de la concentración de sal.

La desalación por ósmosis inversa impulsada por campos fotovoltaicos solares es una tecnología madura disponible comercialmente. Además, se han instalado varias plantas de desalinización por energía solar basadas en destilación Multi-Stage Flash (MSF), Multi-Effect Distillation (MED) y Membrane Distillation (MD) en el marco de proyectos de I + D. Otras tecnologías se han implementado recientemente, como la ósmosis inversa (RO) activada por un ciclo de energía solar, congelación solar y compresión de vapor mecánica solar. Finalmente, el concepto de desalinización solar directa, que integra dentro del mismo dispositivo el proceso de conversión de energía y destilación, se limita a los sistemas de pequeña capacidad. Muchos de estos sistemas han sido diseñados e instalados.

Los sistemas de desalación solar-térmica desarrollados en el siglo XX y principios del siglo XXI se basaron principalmente en las siguientes tecnologías:

- Lagunas solares de gradiente de salinidad acopladas a plantas de destilación. Los estanques solares con graduación de salinidad son dispositivos solares que integran el almacenamiento térmico a largo plazo. Esta característica, junto con su bajo costo y economía de escala, los hace especialmente adecuados para ser acoplados a unidades de destilación. Esta tecnología fue estudiada a fondo durante los años 80, atribuible al mercado de destilación dominante de la desalinización de agua de mar. Es destacable la instalación de prueba de El Paso (EE. UU.), Descrita por Lu et al. Este estanque solar no solo controla los procesos de desalación térmica, sino también la desalinización de RO mediante un ciclo Rankine de baja temperatura. El estanque solar de Los Baños es otra instalación de prueba en la que se probó la RO térmica solar.
- Destilación de MSF impulsada por campos de colectores solares. El desarrollo de plantas experimentales con capacidades de hasta 100 m³/d muestra el interés centrado en la tecnología solar de MSF durante el siglo XX. Con respecto al desarrollo de la tecnología, Mabrouk y Fath lograron recientemente un importante avance. Informan sobre la campaña de prueba experimental realizada con pretratamiento de NanoFiltration (NF) de la alimentación MSF, lo que resulta en una alta temperatura y una relación de rendimiento mejorada (PR) de 15. Sin embargo, el alto consumo auxiliar del proceso de MSF limita las perspectivas comerciales de desalinización solar basada en la tecnología de MSF. Cabe señalar que el tratamiento en NF requiere un consumo eléctrico adicional y el uso de NF no reduce la gran tasa de flujo de masa que circula a través de la planta. Por lo tanto, el consumo auxiliar aumenta dramáticamente. Una planta convencional representativa en la que se integran los procesos de NF y destilación es la planta de Sharjah, basada en la destilación de flash de etapas múltiples.
- MED impulsado por campos colectores solares. Algunas plantas de destilación Multi-Effect (MED) impulsadas por colectores solares se instalaron en diferentes ubicaciones basadas en una unidad MED de 14 efectos con una capacidad de 72 m³/d existentes en el centro de investigación solar Plataforma Solar de Almería (PSA-CIEMAT). En España se han instalado diferentes plantas solares en el marco de diferentes proyectos de I + D:
 - Planta MED impulsada por vapor desde un campo solar parabólico.
 - MED-TC (Compresores térmicos) impulsados por el vapor generado por un campo solar parabólico.
 - Planta MED accionada por agua calentada mediante concentradores parabólicos compuestos.
 - MED acoplado a una bomba de calor de absorción de doble efecto (DEAHP) a través de dos tanques de agua auxiliares. Un nuevo campo colector parabólico y una caldera producen el vapor requerido por el DEAHP (saturado a 180 ° C). La entrada de calor a baja temperatura del ciclo de absorción es el vapor generado en el último efecto de destilación. Además de eso, el DEAHP proporciona el consumo de calor requerido de la unidad MED como agua caliente.

La tecnología MED-DEAHP se desarrolló en la PSA. Para un flujo dado y condiciones termodinámicas de la fuente de vapor externa, MED-DEAHP proporciona una RP más alta que la de MED-TC. Por lo tanto, el formador es superior a MED-TC, sin embargo, no está disponible comercialmente. Además, Hassan ha propuesto y desarrollado el proceso de MED por medio de NanoFiltration (NF) como tratamiento previo de agua de mar. Sin embargo, como el tratamiento previo con NF aumenta el consumo de electricidad auxiliar, esto no se recomienda en la desalinización solar. Además, recientemente, ha habido un creciente interés en desarrollar:

- Sistemas de destilación de membrana (MD), que son especialmente adecuados para la desalación solar. Se han obtenido valores de PR de aproximadamente 7.
- Sistemas de desalinización de RO impulsados por los ciclos orgánicos de Rankine, como una alternativa potencial a la desalinización PV-RO. El problema clave puede ser que los ORC solares utilicen almacenamiento de energía térmica en lugar de baterías. Se han instalado unos ocho sistemas piloto.
- Sistemas de desalación integrados en centrales solares. El creciente interés en integrar las

producciones de agua dulce y electricidad es atribuible al hecho de que las demandas de energía y agua generalmente están vinculadas en regiones aisladas y áridas. Las primeras actividades de I+D de este sector son las siguientes: un sistema híbrido MSF-RO impulsado por una planta solar de doble propósito en Kuwait. El sistema de desalinización consiste en una planta de 25 m³/d MSF y una planta de 20 m³/d de RO.

En lo que respecta a los análisis de plantas de cogeneración: Rheinländer y Lippke estudiaron un sistema de acoplamiento de una planta MED a una planta de torre solar, y Glueckstern presentó un análisis detallado de plantas solares de doble propósito.

3.2 Evaluación de desarrollos recientes en desalación solar

3.2.1 Desalinización basada en destilación de membrana (MD)

En esta sección, se describen las tecnologías pre-comerciales o comerciales existentes de MD y se informan las evaluaciones experimentales externas realizadas por organizaciones de investigación independientes. A continuación, se presenta una breve descripción de dichos módulos de MD, ordenados por la empresa fabricante:

- Scarab Development AB. La compañía sueca Scarab Development AB desarrolló módulos MD. Estos productos se han probado en la Plataforma Solar de Almería CIEMAT en el marco del proyecto MEDESOL de la UE (FP62005-Global-4, FP6-036986, Desalinización de agua de mar por el innovador sistema de destilación de membrana con energía solar). La tecnología se basa en el espacio de aire MD, utilizando membranas de lámina plana.
- Tecnología Memstill. La tecnología de Memstill es atribuible a las patentes desarrolladas por una organización de investigación en Holanda, TNO, con licencia de la compañía Keppel-Seghers (Singapur). Este último contrató a la Plataforma Solar de Almería para probar dos de los módulos prototipo de la compañía. Ambos prototipos, M33 y PT5, se basan en el proceso MD de espacio líquido y tienen una configuración de membrana de lámina plana y un área de membrana total de 9 m². El prototipo M33 se fabrica como un solo módulo, mientras que el último está compuesto por tres módulos en serie.
- Aquastill. La compañía Aquastill inició sus actividades en 2008. Sus módulos de MD se conocen como AQUA | FLEX 25; AQUA | FLEX 100 y AQUA | FLEX 150R.
- Primavera solar. El Instituto Alemán ISE-Fraunhofer ha desarrollado un módulo de MD que hoy se comercializa con su spin- o Solar Spring. Ha habido varias unidades piloto alimentadas por energía solar térmica; Uno de los primeros está en el Instituto Tecnológico de Canarias, otro en la Plataforma Solar de Almería-CIEMAT. El Oryx 150 consta de un módulo MD de espacio líquido con una configuración enrollada en espiral y una temperatura máxima permitida de 85 ° C.
- Memsys. La empresa alemana Memsys ha desarrollado un módulo MD. Entre los sistemas piloto se encuentran los instalados en la Plataforma Solar de Almería-CIEMAT y Singapur.
- Aquaver. La compañía Aquaver comercializa como WTS-40A un módulo MD basado en módulos Memsys, con membranas V-MEMD de lámina plana (5.76 m²). Utiliza una novedosa configuración de MD de vacío que utiliza el concepto de destilación Multi-Effect con siete efectos que trabajan en un punto de ebullición decreciente.

3.2.2 Desalación mediante energía solar

Los colectores solares de seguimiento de un eje, los concentradores lineales de Fresnel o los canales parabólicos son las tecnologías más eficientes para impulsar un Ciclo de Rankine Orgánico (ORC) para producir el consumo de energía de un sistema de RO. El principal inconveniente de estos colectores solares es el alto costo requerido para instalarlos y operarlos. Por otro lado, los sistemas de ORC / RO solares impulsados por colectores solares estacionarios son instalaciones bastante simples.

El parámetro principal referente a la eficiencia energética del ORC es la temperatura máxima. Se analizan tres rangos de temperatura para evaluar el valor máximo correspondiente de la eficiencia energética que podría alcanzarse. Los rangos de temperatura seleccionados están relacionados con los tipos recomendados de colectores solares de la siguiente manera: Los concentradores lineales de Fresnel son adecuados para temperaturas entre 150 °C y 200 °C. Los colectores parabólicos se recomiendan para temperaturas > 275 °C. Los colectores más grandes, similares a los utilizados en las plantas de energía solar, deben utilizarse a temperaturas superiores a 350 °C. Además de eso, entre 350 °C y 275 °C se podrían utilizar colectores más pequeños, siendo importante el aislamiento térmico del tubo absorbente. Finalmente, el rango intermedio de 200 °C a 275 °C puede ser adecuado tanto para concentradores lineales de Fresnel como para cilindros parabólicos con un tamaño relativamente pequeño.

Los valores máximos de eficiencia energética de ORC se registran considerando los siguientes rangos de temperatura:

- 150 °C – 200 °C: Quoilng et al. informa sobre las eficiencias térmicas del ORC del 13,1% para una fuente de calor de 190 °C y un fluido de trabajo SES36. La eficiencia global correspondiente del ORC solar es de aproximadamente el 8%. Además de eso, en el análisis informado, R245fa exhibe una eficiencia ligeramente baja. Por otra parte, Wang et al. analizaron diferentes fluidos, obteniendo una temperatura térmica de 190 °C superior al 15% para el fluido de trabajo R134a.
- 275 °C – 350 °C: el valor máximo de eficiencia térmica encontrado por los autores en la encuesta bibliográfica es del 28,2%.
- 350 °C – 400 °C: los valores de 29.8–30.5% son los mejores reportados por Maraver et al. para los siloxanos.

3.2.3 Energía solar térmica para la producción de agua y electricidad

Las principales referencias centradas en el concepto concentrado de energía solar y desalación son Palenzuela et al., Ortega-Delgado et al. y Sharaf et al., entre otros. Con respecto a la evaluación precisa sobre la integración de un proceso de destilación dentro de una planta de energía solar, el problema principal es la disponibilidad de modelos operativos validados para simular el subsistema de destilación en operaciones de carga parcial. Además, el efecto de la planta de destilación sobre la eficiencia del ciclo de potencia depende de la capacidad de la planta, el diseño específico y el punto de operación. No se dispone de evaluaciones exhaustivas ni datos experimentales sobre el área de operación de carga parcial. Por lo tanto, no es posible realizar una evaluación por áreas de esta tecnología.

La unidad de destilación se puede modelar en un punto de diseño determinado según la literatura disponible. Si la termocompresión (TC) está acoplada al proceso de destilación, la selección del punto de diseño es bastante compleja. Con respecto a MED-TC, Hana fi et al. describe un modelo completo de un termocompresor para aplicaciones MED-TC. Además, Ameri et al., Kamali et al., Kouhikamali et al., Galván-Ángeles et al. y Al-Najemetal. informan sobre modelos paramétricos del compresor y la unidad MED. Además, Choi, Sayyadi y Esfahani et al. realizar análisis respectivos, exergéticos, termoeconómicos y de optimización de la tecnología MED-TC. Además, algunas referencias útiles para validar modelos con plantas de MED-TC son Temset et al.; Kouhikamali et al. y Al-Mutaz y Wazeer.

Aunque las referencias mencionadas anteriormente son útiles para evaluar la integración de las unidades de destilación en las plantas de energía solar, se necesitan modelos dinámicos. Mazini et al. y Ortega-Delgado et al. describen los modelos de desempeño de MED-TC desarrollados para calcular la eficiencia y la producción de agua del proceso de destilación de MED-TC en su totalidad dentro de un rango adecuado de la fuente de vapor externa. En cuanto a las pruebas experimentales de las campañas, la literatura es escasa. La operación fuera de las condiciones nominales de una unidad MED ha sido evaluada experimentalmente por Fernández-Izquierdo et al.

3.2.4 Desalación solar térmica: destilación vs ósmosis inversa

- Demandas de agua medianas y grandes ($> 100\text{m}^3/\text{d}$):

La desalinización solar es un concepto atractivo, ya que permite que el agua potable se produzca a partir de agua de mar y agua salobre utilizando energía solar. Además, las regiones con escasez de agua y estrés hídrico son regiones típicamente áridas con alta radiación solar. Todo encaja y se alinea con la sostenibilidad; por lo tanto, el desafío es producir agua potable con desalinización solar a un costo razonable.

El primer y esencial paso es buscar la eficiencia energética en la desalación solar. Pensar en términos de unidades de energía solar requeridas por unidad de agua potable producida es la única forma de avanzar y buscar el proceso de desalinización solar que requiere menos energía. Para ello, se evalúa la energía solar necesaria para obtener 1 kg de agua dulce mediante diferentes tecnologías. En esta subsección solo se consideran las tecnologías de desalinización adecuadas para demandas de agua de medianas a grandes. Se utilizan datos calculados en García-Rodríguez y Delgado-Torres [6]: se considera una salinidad de agua de mar de 35,000 ppm.

La Fig. 15 muestra el análisis de energía para diferentes procesos de desalinización de agua de mar a partir de energía solar térmica. Primero, la tecnología de destilación más eficiente, que consiste en una unidad de destilación Multiefecto (MED) acoplada a una bomba de calor de absorción de doble Efecto (DEAHP), que exhibe un PR de 20. Esto es equivalente a un consumo de calor específico de aproximadamente 115 kJ/kg. El DEAHP requiere concentradores solares de un eje, por lo que esta opción es la opción parabólica TroughCollector (PTC) mostrada. En segundo lugar, MED impulsado por colectores solares estacionarios, colector de tubos evacuados (ETC) dentro de un rango de rendimiento térmico y Concentrado Parabólico Compuesto (CPC) - y PTC. Finalmente, la ósmosis inversa (RO) funciona con un ciclo orgánico de Rankine orgánico (ORC).

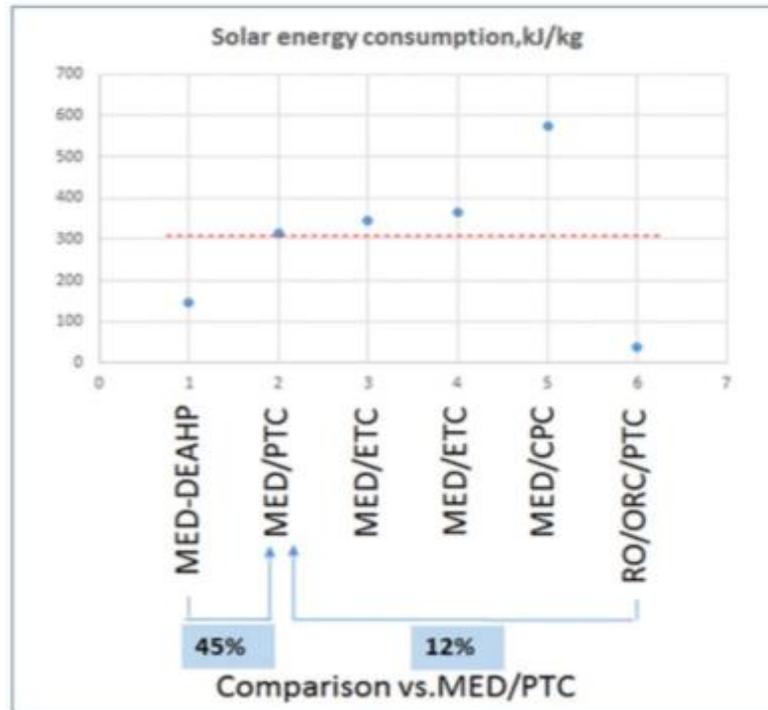


Figura 10. Consumo de energía de diferentes tecnologías de desalación solar [7].

La primera conclusión relevante es que los procesos de destilación requieren al menos cuatro veces más energía que el proceso de desalinización RO, siendo MED-DEAHP el más eficiente entre ellos. La desalinización de RO también puede ser alimentada por plantas fotovoltaicas y solares fotovoltaicas, por lo que ambas tecnologías deben compararse con la destilación. Tales comparaciones se reportan a continuación.

La Fig.16 muestra la influencia del rendimiento de conversión térmica solar en la energía solar requerida para producir una unidad de masa de agua dulce a partir de agua de mar. Los valores del eje OX corresponden a diferentes sistemas de conversión térmica solar, estanques solares (SP) con gradiente de salinidad, colectores de placa plana (FPC), concentradores parabólicos compuestos (CPC), colectores de tubos de evacuación (ETC) y colectores de cilindros parabólicos (PTC). En el análisis solo se incluyen los procesos MED y RO, ya que MSF es menos eficiente que MED.

Un conjunto de curvas representa la desalinización solar ORC-RO con diferentes valores de rendimiento térmico de la ORC: 10%, 15%, 20% y 25%. La temperatura superior requerida aumenta con el rendimiento del ciclo. Por lo tanto, el colector solar y los colectores solares estacionarios serían adecuados con un rendimiento del ciclo tan bajo como el 10%. Se han informado análisis exhaustivos de la RO impulsada por ORC solar. En este caso, el consumo de energía específico se obtiene multiplicando los rendimientos del colector solar y el del ciclo orgánico Rankine.

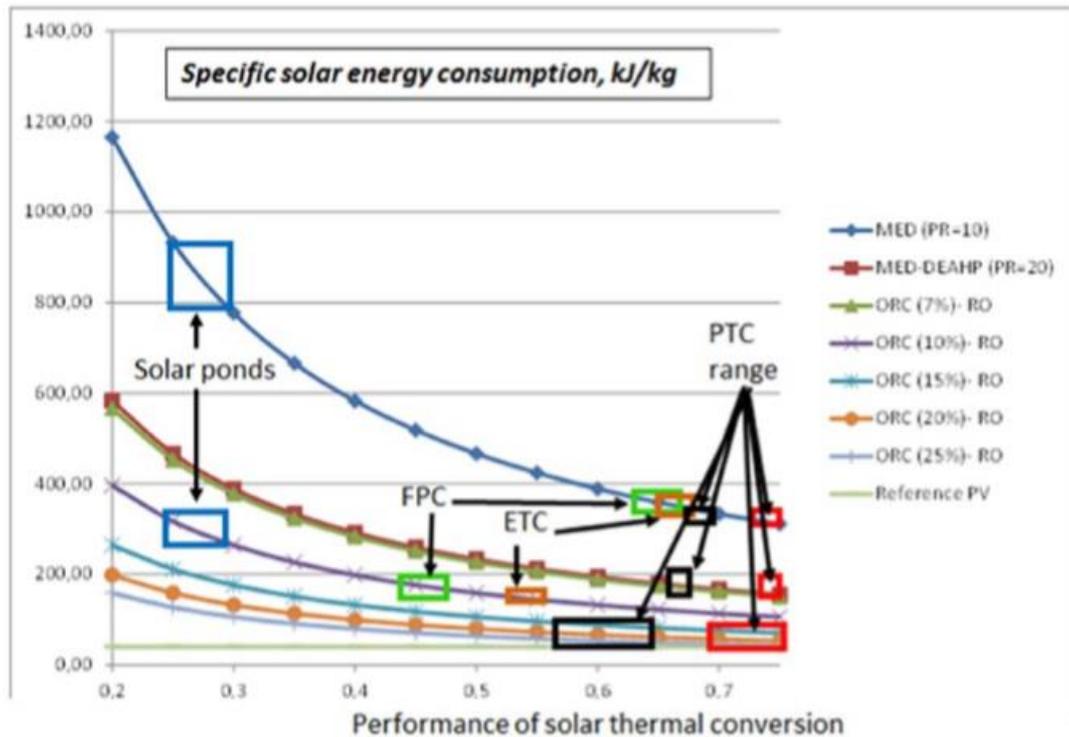


Figura 11. Energía solar requerida para producción de agua dulce en kJ/kg [7].

La tecnología MED exhibe el mayor consumo de energía (PR = 10). La curva correspondiente, en la parte superior, muestra la elevada influencia en la energía requerida de la tecnología solar térmica que podría utilizarse: estanques solares, colectores estacionarios (FPC y ETC) y PTC dentro de un rango representativo de rendimiento para esta tecnología.

La tecnología MED-DEAHP (PR=20) da como resultado un requerimiento de energía solar equivalente al ORC-RO solar en el que el rendimiento térmico del ORC es del 7% (este es un valor bajo, ya que incluso con los colectores solares estacionarios, el mayor rendimiento del ORC puede ser logrado). En la curva MED-DEAHP se marca el rango correspondiente a PTC.

Como valor de referencia para la comparación con la tecnología de la competencia, PV-RO, se incluye una línea horizontal en la figura considerando una eficiencia energética del 14% para la conversión solar fotovoltaica. Se pueden lograr eficiencias de conversión de PV en torno al 20%. Los valores de eficiencia dependen del costo del producto comercial seleccionado.

La figura 16 muestra que PV / RO exhibe las necesidades de energía solar más bajas en comparación con ORC / RO solar y la destilación solar. Además, es necesaria una comparación entre el RO impulsado por las plantas de energía solar y la destilación. Además, para evaluar las perspectivas futuras de una tecnología determinada, se debe analizar la influencia de la evolución histórica del consumo de energía principal de la desalación por ósmosis inversa de agua de mar (SWRO). Evolución anterior desde 7 kWh / m³ hasta aproximadamente 2 kWh / m³ y valores futuros, que pueden ser más bajos. Luego, se presenta un análisis complementario en el cual los sistemas de RO solar-térmicos se comparan con la mejor tecnología de destilación solar, MEDDEAHP (PR = 20).

Como ejemplo, con 115 kJ de energía solar consumida, un MED-DEAHP produciría 1 kg de agua dulce. La producción correspondiente mediante SWRO solar depende del rendimiento de los colectores solares y de las características específicas del ciclo de Rankine utilizado. En la Fig. 17, para una unidad dada de energía solar consumida, se muestran los procesos de producción de SWRO y MEDDEAHP (PR = 20). Los rangos razonables de rendimiento térmico de los ciclos de los rangos se seleccionan, entre el 10% y el 25% para ORC, y el 31–37% para las centrales eléctricas convencionales basadas en PTC. La Fig. 17 demuestra que la desalación solar-térmica de RO es superior a la destilación impulsada por colectores solares térmicos.

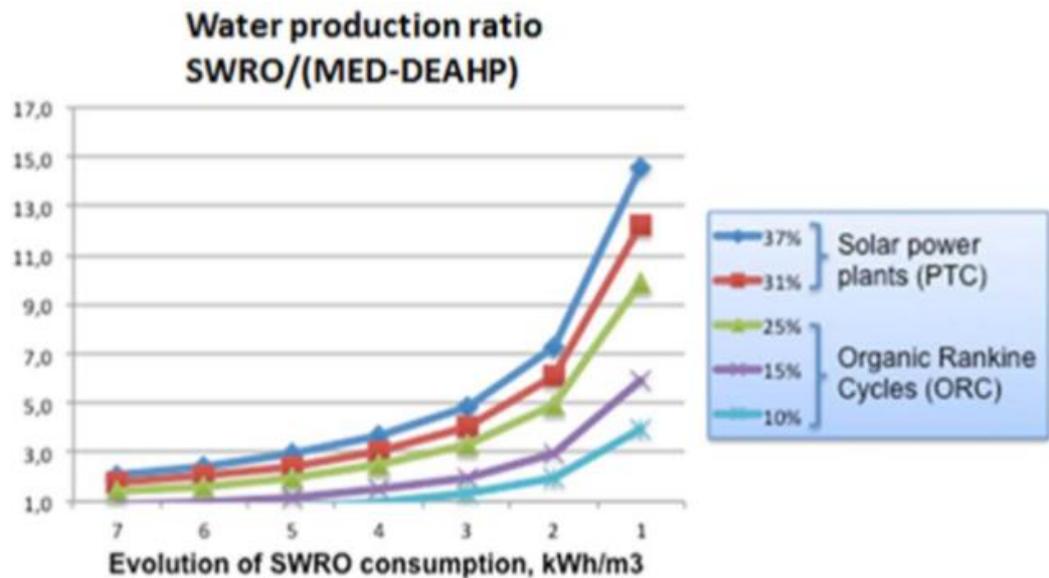


Figura 12. Comparación entre la desalinización de SWRO y la destilación más eficiente [7].

Para un valor dado de la energía solar consumida, el eje OY muestra la proporción de producción de agua por SWRO y destilación basada en MED-DEAHP.

➤ Pequeñas demandas de agua (<100 m³/d):

En el marco de las pequeñas demandas de agua dulce (<100 m³ / d), se debe tener en cuenta otra tecnología de destilación, MD. En esta sección se detallan los principales aspectos de la tecnología MD, identificando las posibles limitaciones de la tecnología y los diseños actuales. Con el fin de evaluar el potencial de desarrollo de dichos módulos de MD, se realiza un análisis termodinámico de los módulos de MD conectados en serie sin recirculación de salmuera. La configuración conceptual básica se muestra en la Fig. 18.

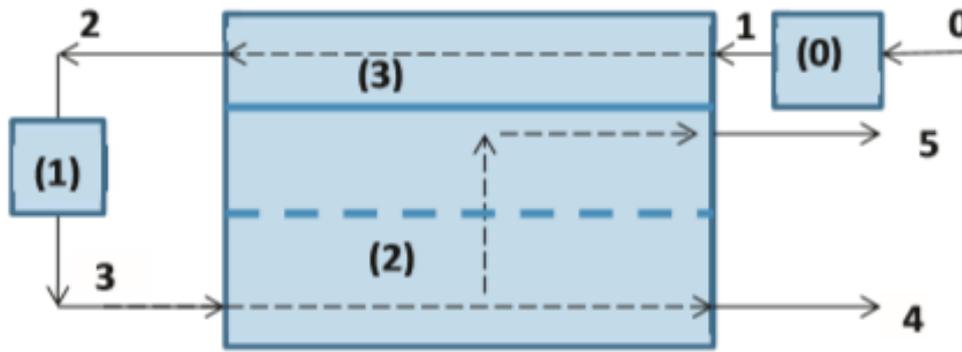


Figura 13. Diagrama de la conexión en serie de módulos MD sin reciclaje de salmuera [7].

La función principal de los componentes que se muestran en esta figura es la siguiente:

- Ingesta de agua de mar, bombeo y pretratamiento de agua de mar. Los balances de materia y energía correspondientes son:

$$(1) S_1 = S_0$$

$$(2) q_0 - q_1 = 0$$

$$(3) q_0 \cdot h_0 - q_1 \cdot h_1 + P_W = 0$$

En las ecuaciones anteriores y siguientes, los subíndices corresponden a los flujos de masa numerados de la Fig. 18. Además, las cantidades involucradas son: salinidad (fracción de masa de sales), S ; tasa de flujo de masa, q ; entalpía de masas, h ; Potencia térmica, P_Q , y potencia auxiliar, P_W .

- El calentamiento de la alimentación después de ser precalentado, tiene lugar dentro del calentador de salmuera por medio de una fuente de energía térmica externa. Las ecuaciones termodinámicas correspondientes son las siguientes:

$$(4) S_3 = S_2$$

$$(5) q_2 - q_3 = 0$$

$$(6) q_2 \cdot h_2 - q_3 \cdot h_3 + P_Q = 0$$

- Proceso de desalación, en el que la alimentación líquida aumenta su concentración de sal y disminuye su temperatura debido a la generación de vapor (subíndice, v) y las pérdidas térmicas a través de la membrana, P_Q , L . El proceso de desalinización también incluye la condensación de vapor. Este subsistema está limitado por la superficie de condensación. El canal delimitado por la membrana a través de la cual circula la alimentación se denomina comúnmente en la tecnología de membrana de desalinización, el canal de alimentación. El canal de condensación está en el lado opuesto de la membrana, limitado a la superficie de condensación. Las siguientes ecuaciones resultan, respectivamente, de aplicar los balances de masa y energía y la definición de la tasa de recuperación, r , como la relación de la tasa de flujo de masa del producto (5) y el agua de mar (3):

$$(7) S_4 = \frac{S_0}{1-r}$$

$$(8) q_3 - q_4 - q_5 = 0$$

$$(9) \quad q_3 \cdot h_3 - q_4 \cdot h_4 - q_5 \cdot h_5 - q_v \cdot \Delta h_{fg} - P_{QL} = 0$$

- Proceso de recuperación de calor por medio de calor transferido a través de la superficie de condensación, lo que resulta en un precalentamiento de la alimentación, expresado por:

$$(10) \quad S_1 = S_2$$

$$(11) \quad q_1 - q_2 = 0$$

$$(12) \quad q_v \cdot \Delta h_{fg} + P_{QL} + q_1 \cdot h_1 - q_2 \cdot h_2 = 0$$

El intercambio de calor consiste en pérdidas térmicas a través de la membrana, PQ, L y la entalpía de cambio de fase liberada, ($q_v \cdot \Delta h_{fg}$). Además de eso, es importante establecer el límite máximo termodinámico para obtener un impulso generado por el flujo de alimentación previamente calentado en un estado termodinámico determinado. En este proceso de generación de vapor, la entalpía de la alimentación calentada disminuye hasta el límite existente de la entrada de flujo de enfriamiento que normalmente es la temperatura ambiente.

La Tabla 1 proporciona los principales resultados del análisis termodinámico de un sistema MD con la configuración que se muestra en la Fig. 4, para diferentes condiciones de operación. Las dos primeras columnas muestran, respectivamente, la temperatura máxima (T3) y la diferencia T4-T0, que es similar al gradiente de temperatura global entre el enfriamiento y los flujos de alimentación (T3-T2) generados por el calentador de salmuera. La última columna, "Precalentamiento", proporciona el aumento de temperatura debido al precalentamiento de la alimentación. También se muestran la tasa de recuperación correspondiente, r, y la relación de rendimiento, PR. Además, el gradiente de temperatura más bajo a través de la membrana encontrada es de aproximadamente 5 °C y normalmente > 10 °C.

T máx. (°C)	T4-T0 (°C)	T5-T1 (°C)	PR	r (%)	T3-T2 (°C)	Precalentamiento (°C)
95	25	3	2	8.1	23	51
85	25	3	1.6	6.5	23.4	40.6
75	25	3	1.2	4.8	23.8	30.2
65	25	3	0.8	3.7	24.2	19.8
55	25	3	0.3	1.5	24.6	24.6
95	15	3	4.1	9.6	13.7	60.3
85	15	3	3.3	8	13.9	50.1
75	15	3	2.6	2.6	14.1	39.9

65	15	3	1.9	4.8	14.3	29.7
55	15	3	1.3	3.1	14.6	19.4
45	15	3	0.6	1.5	14.8	9.2
95	10	2	6.6	10.4	9.1	65
85	10	2	5.5	8.7	9.2	54.8
75	10	2	4.4	7.2	9.3	44.7
65	10	2	3.3	5.6	9.4	34.5
55	10	2	2.4	3.9	9.6	24.3
45	10	2	1.4	2.3	9.8	14.2
95	5	2	13.8	11.1	4.6	69.3
85	5	2	11.8	9.5	4.7	59.3
75	5	2	9.7	7.9	4.7	49.2
65	5	2	7.6	6.3	4.8	39.2
55	5	2	5.7	4.7	4.8	29.1
45	5	2	3.7	3	4.9	19.1

Tabla 1. Resultados del análisis termodinámico del sistema MD de la Fig. 18 [7].

3.2.5 Tecnología de desalación solar fotovoltaica

La desalación solar fotovoltaica / RO es una tecnología competitiva de desalinización basada en sistemas solares térmicos. La tecnología fotovoltaica conectada a un sistema RO es comercial desde los años 90. Como ejemplo, el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC, España) desarrolló un sistema independiente (DESSOL® [8]), disponible hasta 100 m³/d de capacidad nominal. La energía fotovoltaica podría competir con las inspecciones de energía convencionales debido a la larga distancia a la red eléctrica. Los sistemas de RO alimentados por campos fotovoltaicos normalmente incluyen baterías. Además, es una investigación notable realizada por el ITC [8] sobre sistemas de capacidad gradual [9], aplicables a PV y RO de energía eólica, y por Thomson e In-Field [10]. Este concepto consiste en diseñar la planta de RO con la capacidad de ajustar la entrada de energía variable, minimizando así los requisitos de la batería.

Además, los requisitos de mantenimiento y suministro de productos químicos se deben tener en cuenta en la primera etapa de la selección del proceso. La tecnología solar más adecuada para la desalación de agua salobre a la menor escala de la demanda de agua dulce es la electrodiálisis solar fotovoltaica (ED). Se han implementado varias plantas piloto de sistemas ED conectados a células fotovoltaicas mediante baterías. Además, este tipo de plantas incluso podrían operar en lotes, permitiendo así una operación simple sin baterías. Esta es una ventaja importante en comparación con la ósmosis inversa de agua salobre en caso de pequeñas demandas de agua dulce. Finalmente, debe destacarse que si los recursos eólicos son explotables en la ubicación de la planta, la RO con energía eólica es la mejor opción [11].

3.2.6 Soluciones viables para un mercado potencial

➤ Pequeñas demandas de agua

La escena de las pequeñas demandas de agua es la mejor aplicación de la desalinización de energía renovable, ya que la alta inversión requerida no es tan grande y con frecuencia no hay una red eléctrica disponible cerca de la demanda de agua. En este caso, se consideran capacidades de planta de hasta 100 m³/d, por lo que la simplicidad del sistema es un requisito importante a tener en cuenta. Por lo tanto, el uso de energía solar térmica se limita a los colectores solares estacionarios: placa plana o concentradores parabólicos compuestos. Dados los valores correspondientes del consumo de energía solar que se muestra en la Fig. 15, los procesos de ORC / RO solar y de destilación convencional (MED y MSF) se rechazan en comparación con PV-RO.

El control y el almacenamiento de energía en los sistemas PV-RO implementados durante el siglo XX, han logrado un desarrollo significativo alcanzando una gran madurez tecnológica [12]. Con respecto a los problemas operacionales, las necesidades de suministro de productos químicos, repuestos y personal especializado para el mantenimiento pueden ser los problemas más importantes de PV-RO. PV-ED también debe considerarse en el caso de agua salobre con baja concentración de sal. Además, debido a que el suministro de energía intermitente es interesante, los sistemas ED son interesantes ya que pueden operar en lotes [13] - [14]. Solo en caso de desalinización de agua de mar, otra tecnología candidata es MD. A pesar de la baja eficiencia energética, una ventaja significativa podría ser que MD puede operar con salmueras de alta salinidad hasta la saturación, lo que resulta en una posible actividad económica basada en la obtención de sales con alto valor económico. Los sistemas solares autónomos son adecuados para este rango de capacidad.

➤ Grandes demandas de agua; energía solar térmica para producción de agua y electricidad.

Los sistemas de gran capacidad en el marco de la desalación con energía renovable podrían ser de alrededor de 25.000 m³/d. Dichas demandas de agua pueden requerir consumos de energía dentro del rango de las plantas de energía solar. Debido a la economía de escala, el tamaño excesivo de las plantas de energía solar para producir tanto agua como electricidad es un aspecto clave en las oportunidades de mercado. En este marco, las autoridades regionales y nacionales son las que toman las decisiones, ya que el mercado potencial se basa en la comprensión global del suministro de agua y energía en general.

Para ejecutar una planta de desalinización con energía solar concentrada (CSP) se consideran dos conceptos posibles, parabólicos a través de colectores (PTC) y torre. En ambos conceptos, solo las áreas con alta radiación solar (>1800 kWh/m²) son adecuadas, sin embargo, se requiere una superficie importante para el campo solar, siendo este requisito aún mayor para el concepto PTC. En el concepto de torre, el efecto de una reducción en la radiación solar en la eficiencia de la planta es mayor debido a la distancia de los espejos al receptor solar. Por lo tanto, en ambos conceptos, colocar la planta solar cerca de la costa resultará en una reducción de la eficiencia debida al alto nivel de humedad en el ambiente.

Las plantas de desalinización de agua de mar de RO están típicamente cerca del mar, para reducir los costos de energía del transporte del agua de mar a la planta de desalinización. Por lo tanto, la ubicación óptima para una planta de desalación es diferente a la óptima para la planta de energía solar correspondiente, ya que es la solución para conectar ambos desde el punto de vista eléctrico, a través de una línea de energía dedicada o conectándolos a la red eléctrica. Por lo tanto, existen posibles sinergias de tener ambas plantas en la misma ubicación:

- Alimentación de agua de mar de la planta de desalinización como enfriamiento de la planta solar.

- Se abandona el agua del producto de la planta de desalación para el ciclo de alimentación de agua de reposición.

La planta de energía solar operará durante el día o durante un período prolongado de tiempo si se considera el almacenamiento de energía. Sin embargo, estos sistemas de almacenamiento requieren importantes gastos de capital (CAPEX) y gastos de operación (OPEX) que pueden justificarse en las plantas de energía solar que forman parte del sistema de generación de energía y la red.

En una planta de RO alimentada por una planta solar, la demanda de energía queda definida por la planta de desalación. Las plantas de desalación están diseñadas típicamente para funcionar al 100% de su capacidad las 24 horas del día e intentar maximizar la disponibilidad de la planta para reducir el costo por m³ de agua producida. Por lo tanto, el perfil de producción de energía discontinua de la planta de energía solar no coincide con el funcionamiento óptimo de una planta de desalinización en un estado estable de 24 horas al día.

El concepto óptimo de desalación solar es aquel para el cual el costo del m³ de agua desalinizada es el más bajo considerando tanto CAPEX como OPEX. Esto solo puede ser posible mediante la optimización de la planta de energía solar y la planta de desalinización. Por lo tanto, el concepto de desalinización solar óptima requiere que la planta de desalación se encuentre junto al mar, la planta de energía solar está ubicada donde la radiación solar es lo más alta posible y ambas están conectadas a través de la red. La planta de energía solar se dimensiona, por lo menos para producir la energía requerida acumulada en un año que la planta de desalinización consumirá en ese año en función de una operación de estado estable de 24 h. El consumo de agua de la planta de energía solar debe estar garantizado por la disponibilidad de agua superficial o subterránea, el almacenamiento de agua de lluvia o incluso el transporte.

Otro concepto relacionado es la producción de agua distribuida, que es inherente a la gestión del suministro de agua. A veces, la población se distribuye a lo largo de la costa con un patrón y una orografía que hacen la opción más adecuada para implementar dos plantas de desalinización diferentes en lugar de una. Además, se debe tener en cuenta que en algunas ocasiones la mejor ubicación de la nueva planta de RO estará junto a la planta de producción de energía convencional existente.

En resumen, la producción integrada de agua y electricidad basada en una planta de energía solar no tiene ventajas. Por lo tanto, esta producción integrada solo se recomienda para satisfacer la demanda de agua directamente asociada al equipo de la planta de energía solar y al personal. En este caso, parte de la demanda requiere agua dulce con TDS del orden de ppb. La opción recomendada es SWRO para producir permeado con suficiente calidad para el consumo humano. Además, los procesos capaces de proporcionar permeado con TDS en el orden de ppb como electrodiálisis y electrodesionización, deben usarse como tratamiento del permeado de SWRO.

➤ Demanda intermedia de agua

Se considera como demanda de agua intermedia un rango de capacidad entre 100 m³/d y 25,000 m³/d. En este caso habrá oportunidades de mercado para las siguientes opciones:

- Concentradores de Dish Stirling para conducir la planta de RO. Aunque el alto mantenimiento de los motores Stirling es un inconveniente.
- Planta de RO alimentada por concentradores de plato acoplados a microturbinas de gas. Se ha instalado un prototipo con producción de electricidad de 10 kW en el centro de investigación italiano ENEA [15]- [16] . Un rango adecuado para esta tecnología en desarrollo es de aproximadamente 10 a 30 kWe, por lo que una sola unidad podría producir hasta aproximadamente 10 m³/h. Además, varias turbinas de micro gas solar podrían funcionar en paralelo para impulsar una planta de RO. No se han realizado estudios relacionados con la desalinización hasta el momento.
- Concentradores lineales de Fresnel o canales parabólicos para conducir una planta de RO por medio de un ORC. No hay limitaciones técnicas para el desarrollo comercial de esta tecnología,

excepto la disponibilidad de productos comerciales confiables de ORC dentro de una amplia gama de potencia de salida. Los productos Turboden de 1 MW para la producción de energía solar exhiben alta eficiencia con las únicas limitaciones atribuibles a los fluidos orgánicos. El uso de almacenamientos térmicos innovadores podría promover el desarrollo del mercado de dicha tecnología.

La tecnología solar competidora es la PV-RO. Dependiendo de la curva de demanda, el almacenamiento de agua dulce puede minimizar el uso de baterías. La decisión final debe basarse en el CAPEX y el OPEX de un proyecto específico, así como en la disponibilidad de la tierra y la orografía. Estas cuatro tecnologías no permiten el funcionamiento continuo de la planta de desalinización, lo que resulta en un sobredimensionamiento de la planta de RO para lograr una demanda de agua determinada. Además, para ampliar las horas diarias de operación de la planta de desalinización, también se debe sobredimensionar el área solar térmica o fotovoltaica.

Para la energía solar térmica, en comparación con las plantas de desalinización solar con respaldo de energía convencional, se requiere aproximadamente el doble del campo solar y la capacidad de la doble planta para aproximadamente 12 h/d de operación de la planta. Por lo tanto, el diseño de la planta de desalación basada en un concepto independiente resulta en un aumento significativo del costo de capital. Además, la operación y el mantenimiento también se incrementan debido a la operación discontinua de la planta de desalinización. Las plantas de desalación solar autónomas dentro de este rango de demanda de agua no se recomiendan debido a las razones mencionadas anteriormente. La selección de diseño recomendada es la operación continua de la planta de desalinización como combinación de tres modos de operación:

- Modo 1: planta de desalinización en sus condiciones de trabajo nominales impulsadas por el sistema solar térmico o fotovoltaico.
- Modo 2: Planta de desalinización operada fuera de sus condiciones nominales (carga parcial). Este modo requiere un diseño específico modificado. Se han desarrollado diferentes conceptos para igualar el consumo de la planta de desalación y la producción de electricidad.
- Modo 3: Planta operada en condiciones nominales conectadas a la red cuando el modo 1 no es posible y el modo 2 no se recomienda.

En el caso de la conveniencia de usar el modo 3 solo en horas específicas, debe compararse la opción de apagar la planta o usar suficiente almacenamiento de energía. El rendimiento relativamente bajo de la ORC hace que la opción de utilizar un gas convencional sea rechazada. El cuello de botella de esta tecnología es la disponibilidad de almacenamiento térmico económico y de alta capacidad para desarrollar sistemas de desalación autónomos. En lo que respecta a las turbinas de micro gas solar, pueden funcionar con combustibles fósiles, pero esta opción solo se recomienda en días nublados.

3.2.7 Tecnologías candidatas para el mercado potencial

Para evaluar las tecnologías candidatas para el mercado potencial de desalinización solar térmica, son necesarios los análisis de gastos de capital (CAPEX). La comparación global de tecnologías solares normalmente se basa en puntos de diseño.

Dado que la curva de la producción térmica de canales parabólicos es bastante plana en días claros, excepto en el amanecer y el atardecer, el tamaño del campo solar se establece en el punto de diseño como el requerido para conducir la planta de desalinización en sus condiciones nominales. Normalmente el campo solar de un sistema autónomo está sobredimensionado significativamente para ampliar las horas de operación.

Además, el proceso MED convencional o acoplado a DEAHp exhibe CAPEX mucho más alto que ambos, ORC / SWRO solar y PV / SWRO. Además, la operación continua sin respaldo de energía convencional no es razonable mediante el uso de canales parabólicos. Además, SWRO es superior a los procesos de destilación convencionales en relación con la operación discontinua. Entonces, MED y

MED-DEAHP son rechazados. El uso directo de combustibles fósiles como respaldo de los procesos de destilación no tiene sentido debido a su alto consumo de energía. En resumen, ORC / SWRO solar y PV / SWRO son las mejores tecnologías.

Se pueden concluir los siguientes aspectos en la desalación de agua mediante energía renovable:

Los sistemas de destilación de membranas para desalación se encuentran poco desarrollados actualmente, sin embargo, cuentan con oportunidades futuras de mercado para aplicaciones de muy pequeña capacidad. Los sistemas convencionales de destilación Multi Effect y destilación flash cuentan con un elevado consumo energético.

Las principales conclusiones con respecto a las soluciones viables para un mercado potencial de desalación con energía solar térmica a partir del análisis realizado son las siguientes:

- Los sistemas de destilación de membrana, cuando estén completamente desarrollados, tendrán oportunidades de mercado en sistemas de desalinización de agua de mar de muy pequeña capacidad. El principal inconveniente son los requisitos de enfriamiento como cualquier otra tecnología de destilación. De lo contrario, se obtiene una baja tasa de recuperación.
- Los procesos de destilación convencionales, la destilación Multi-Effect y la destilación de flash en etapas múltiples muestran un consumo de energía solar demasiado alto como para competir con la ósmosis inversa solar para la desalación del agua de mar. Además, la operación discontinua no es adecuada para tales tecnologías. Por lo tanto, también se rechaza la integración en la planta de energía solar convencional de procesos de destilación.
- Los únicos sistemas independientes con oportunidades de mercado de hasta 20.000 m³/d se basan en ósmosis inversa impulsada por:
 - o Cilindros parabólicos o concentradores lineales de Fresnel mediante ciclos orgánicos de Rankine.
 - o Concentradores de plato acoplados a microturbinas de gas en caso de una demanda limitada de agua. Una sola unidad podría producir aproximadamente 10 m³/h de agua dulce a partir de agua de mar. Además, varias unidades podrían acoplarse para impulsar la misma planta de desalación.

La principal ventaja de ambas opciones en comparación con la desalinización PV-RO es el posible uso del almacenamiento térmico en lugar de las baterías. Si es posible, se recomienda utilizar la red eléctrica como respaldo de energía. Las calderas de incendio no se recomiendan como respaldo de energía de los Ciclos de Rankine orgánicos solares debido a la eficiencia relativamente baja. Esta tecnología podría competir con la fotovoltaica. Sin embargo, debe tenerse en cuenta una mayor disminución de los precios de los sistemas fotovoltaicos. Además de eso, las turbinas de micro gas solar tienen la ventaja de la disponibilidad de rechazo de calor, que permite el concepto de descarga de líquido cero (ZLD). Finalmente, pueden ser alimentados por la noche con fósiles convencionales si es necesario. Esas características podrían volverse competitivas en comparación con los sistemas de desalinización PV-RO en casos específicos.

La planta de energía solar y desalación mediante ósmosis inversa cubren las demandas más altas. Se recomienda encontrar un equilibrio global entre el consumo de electricidad por la producción de agua y la generación de electricidad solar, en lugar del concepto tradicional de integrar ambos procesos dentro de la misma planta. Además, la ubicación y producción de la planta de energía solar podrían adaptarse a la conveniencia de CAPEX y OPEX. La producción distribuida de agua dulce podría adoptarse si la orografía y la distancia entre los lugares de demanda de agua lo hacen adecuado.

4 CÁLCULO ESTIMADO DE LA PRODUCCIÓN EN AEROGENERADORES

4.1 Caracterización simplificada del recurso eólico: distribución de Weibull

El objetivo de cálculo en este apartado será estimar la potencia producida por un aerogenerador en un emplazamiento concreto, en este caso se han elegido dieciséis estaciones meteorológicas del archipiélago canario. En la siguiente figura se pueden observar las ubicaciones de los dieciséis climas seleccionados en seis de las siete islas que constituyen el archipiélago (Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria, Tenerife, La Gomera, y El Hierro).

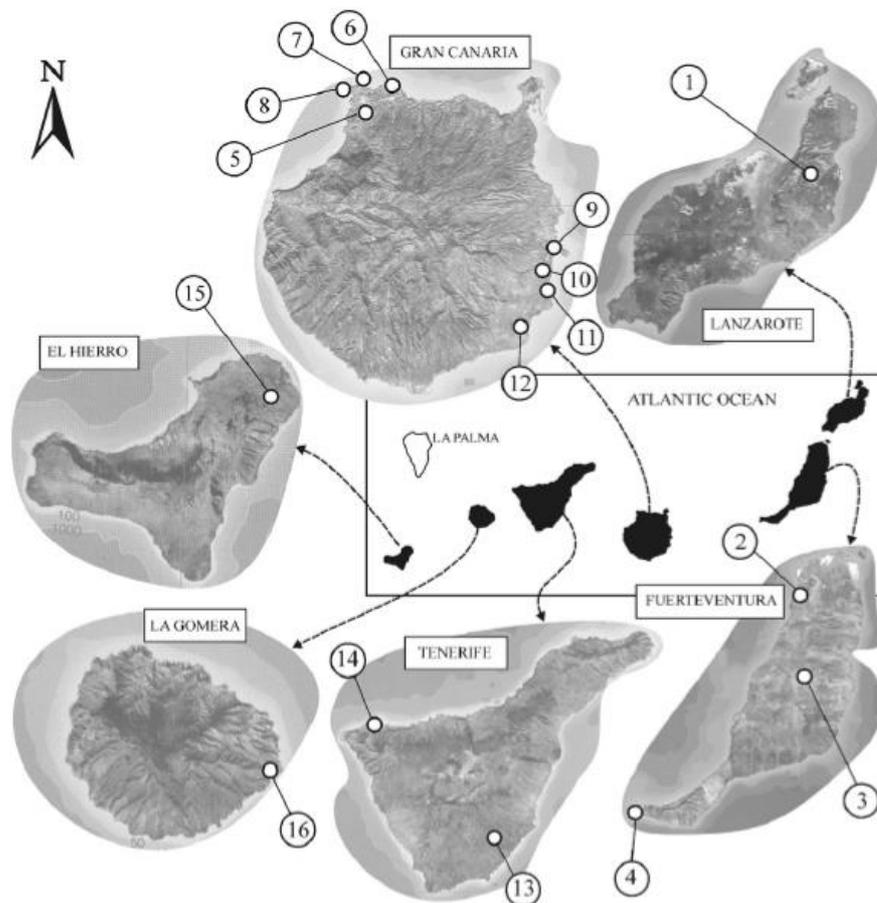


Figura 14. Localización de las estaciones meteorológicas utilizadas [17].

La velocidad del viento cambia continuamente y resulta necesario utilizar una descripción de manera estadística que permita evaluar el potencial eólico de la zona en estudio. La distribución de Weibull describe la frecuencia de la distribución de velocidades del viento para un intervalo de tiempo determinado.

La función de distribución Weibull depende de dos parámetros:

- Parámetro de escala, c : determina la velocidad promedio del viento en el lugar de estudio
- Parámetro o factor de forma, k : indica el grado de dispersión de los registros

La expresión de la distribución Weibull corresponde a:

$$f(v; k, c) = \begin{cases} \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) & ; v \geq 0; k, c > 0 \\ 0 & ; v < 0 \end{cases}$$

Siendo

v : velocidad del viento [m/s]

c : velocidad promedio [m/s]

k : factor de forma

En un primer ejemplo concreto, se analizan los valores de los parámetros de la función de Weibull. Para ello, se toma una densidad de aire correspondiente a 1.225 kg/m³, una velocidad de 10 m/s, y dos valores positivos para los parámetros k y c [18], es decir:

$k=2$; $c=7.3$ m/s → Obteniendo un resultado de $f = 0.057$

A efectos de corregir la distribución de Weibull para la altura correspondiente al buje del aerogenerador, se debe utilizar la siguiente expresión:

$$\alpha(Z) = \frac{v(Z)}{v(Z_{ref})} = \frac{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_{ref}}{Z_0}\right)}$$

Siendo

$Z_{ref} = 10$ m → altura de referencia

$Z_0 = 0.0024$ m → rugosidad del terreno

Esta última expresión permite obtener la velocidad media del viento en una localización concreta para diferentes alturas. Asimismo, se hará uso de un catálogo donde se encuentran las especificaciones de los aerogeneradores, para obtener los parámetros necesarios de diseño y detallar un resultado numérico de la velocidad promedio a distintas alturas.

En el catálogo de VESTAS [19], se eligen tres modelos de aerogeneradores. Se puede ver en la siguiente tabla el resumen de resultados:

Modelo Aerogenerador	Altura (m)	Alpha (α)	Velocidad media (m/s)
V112-3.3	84	1.255	9.164
V117-3.3	91.5	1.266	9.239
V126-3.3	119	1.297	9.469

Tabla 2. Resultados de velocidad promedio para distintos aerogeneradores VESTAS.

Se comprueba que la variación de la velocidad con la altura es bastante reducida en el rango objeto de análisis (80-120 m).

En el cálculo eólico de la velocidad promedio según el tipo de aerogenerador del catálogo VESTAS, se comprueba que la variación de la velocidad con la altura es bastante reducida en el rango objeto de análisis de cuarenta metros de variación, es decir, para obtener valores de velocidades elevados se necesitará una gran altura, o bien elegir otro tipo de generador que tenga diferentes parámetros de diseño.

Por último, se procede a la representación gráfica de la distribución de Weibull frente a la velocidad del viento en los tres modelos de generador escogidos. Para ello se incluirá el valor de cada velocidad promedio en la fórmula obtenida inicialmente de la distribución Weibull, teniendo en cuenta que se tiene un factor de forma correspondiente a 2. Para tener un rango de valores de velocidad de viento y delimitar la función, se supone una velocidad que varía desde 0 a 25 m/s. Con estos datos se puede formular un resultado tanto numérico como gráfico de la función.

	Modelo V112-3.3	Modelo V117-3.3	Modelo V126-3.3
Velocidades (m/s)	c = 9.164	c = 9.239	c = 9.469
0	0.000	0.000	0.000
1	0.024	0.023	0.022
2	0.045	0.045	0.043
3	0.064	0.063	0.061
4	0.079	0.078	0.075
5	0.088	0.087	0.084
6	0.093	0.092	0.090
7	0.093	0.092	0.090
8	0.089	0.089	0.087
9	0.082	0.082	0.081
10	0.072	0.073	0.073
11	0.062	0.062	0.064
12	0.051	0.052	0.054
13	0.041	0.042	0.044
14	0.032	0.033	0.035
15	0.025	0.025	0.027
16	0.018	0.019	0.021
17	0.013	0.013	0.015
18	0.009	0.009	0.011

19	0.006	0.006	0.008
20	0.004	0.004	0.005
21	0.003	0.003	0.003
22	0.002	0.002	0.002
23	0.001	0.001	0.001
24	0.001	0.001	0.001
25	0.000	0.000	0.001

Tabla 3. Resultados de la distribución de Weibull para distintos aerogeneradores VESTAS.

A continuación, se representan gráficamente los resultados obtenidos para cada aerogenerador:

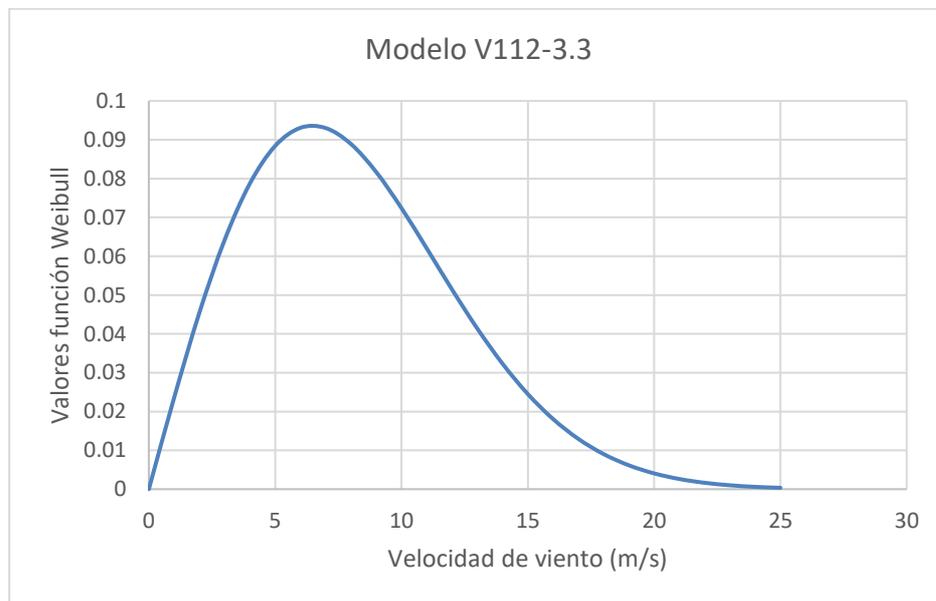


Figura 15. Función Weibull según el modelo V112-3.3 frente a la velocidad del viento.

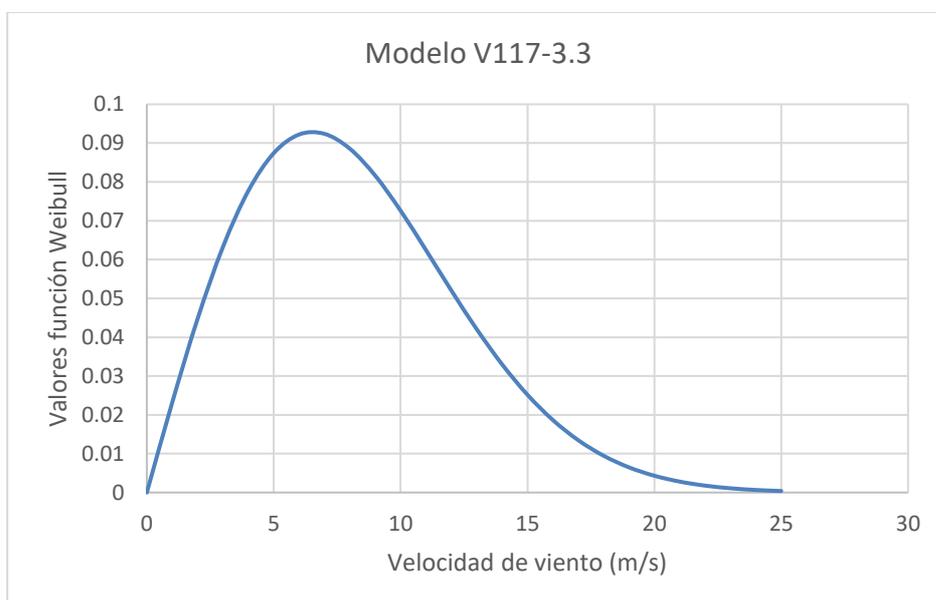


Figura 16. Función Weibull según el modelo V117-3.3 frente a la velocidad del viento.

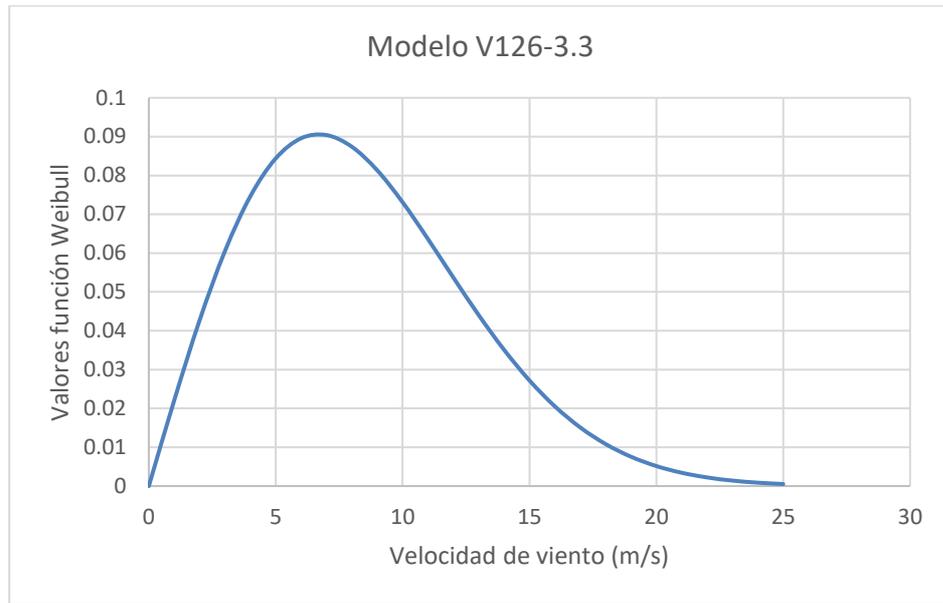


Figura 17. Función Weibull según el modelo V126-3.3 frente a la velocidad del viento.

La distribución de Weibull es una función que indica la probabilidad de que la velocidad del viento tenga un valor concreto, en este caso se han obtenido los resultados asumiendo un factor de forma igual a dos. Para realizar el cálculo de las diferentes localizaciones geográficas habría que modificar los distintos valores de factor de forma en cada estación meteorológica, ya que este factor es variable según el lugar donde se realice el estudio.

4.2 Cálculo simplificado de la producción anual de un aerogenerador

En los catálogos de aerogeneradores comerciales, los fabricantes ofrecen la curva de comportamiento del aerogenerador donde se representa la potencia frente a la velocidad del viento.

Para el caso de los tres aerogeneradores del catálogo VESTAS elegidos, se necesita construir una función que refleje el comportamiento de la potencia frente a la velocidad del viento en cada uno de ellos, por lo que una vez consultado el catálogo se tiene:

$$\mathbf{Modelo V112/3.3} = P(v) = \begin{cases} 3300, & 13 \leq v \leq 25 \\ 300 \cdot v - 990, & 3 < v < 13 \\ 0, & v \leq 3 \end{cases}$$

$$\mathbf{Modelo V117/3.3} = P(v) = \begin{cases} 3300, & 13 \leq v \leq 25 \\ 300 \cdot v - 990, & 3 < v < 13 \\ 0, & v \leq 3 \end{cases}$$

$$\mathbf{Modelo V126/3.3} = P(v) = \begin{cases} 3300, & 12 \leq v \leq 25 \\ 366.7 \cdot v - 1100, & 3 < v < 12 \\ 0, & v \leq 3 \end{cases}$$

Se modela como una función por partes, suponiendo la pendiente creciente de la gráfica como línea recta.

La producción anual de los aerogeneradores se determina con la integral:

$$\int_0^{25} P(v) \cdot Wb(v) \cdot dv$$

Se consideran las correcciones por altura para 84, 91.5, y 119 metros de los distintos modelos de aerogeneradores.

Teniendo en cuenta que la distribución Weibull está definida en todo el intervalo y que la función de la potencia es nula para velocidades menores a 3 m/s, podemos utilizar el programa de cálculo Excel y obtener la producción anual para cada uno de los aerogeneradores. Se detalla en la siguiente tabla el desglose de cálculo tanto de la potencia como de la producción anual por aerogenerador:

V	Modelo V112-3.3		Modelo V117-3.3		Modelo V126-3.3	
	P(kW)	P*dWb	P(kW)	P*dWb	P(kW)	P*dWb
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	300	23.621	300	23.311	366.8	27.378
5	600	53.0511	600	52.446	733.5	61.901
6	900	83.768	900	82.988	1100.2	98.553
7	1200	111.619	1200	110.856	1466.9	132.610
8	1500	133.373	1500	132.844	1833.6	160.258
9	1800	147.057	1800	146.953	2200.3	178.981
10	2100	152.031	2100	152.479	2567	187.706
11	2400	148.838	2400	149.882	2933.7	186.700
12	2700	138.903	2700	140.497	3300.4	177.289
13	3300	136.564	3300	138.797	3300	145.311
14	3300	106.633	3300	108.941	3300	115.799
15	3300	80.887	3300	83.100	3300	89.7850
16	3300	59.648	3300	61.646	3300	67.7766
17	3300	42.782	3300	44.497	3300	49.839
18	3300	29.859	3300	31.266	3300	35.7162
19	3300	20.287	3300	21.394	3300	24.953
20	3300	13.422	3300	14.261	3300	17.002
21	3300	8.649	3300	9.262	3300	11.301
22	3300	5.429	3300	5.863	3300	7.329
23	3300	3.321	3300	3.618	3300	4.638
24	3300	1.981	3300	2.177	3300	2.865
25	3300	1.151	3300	1.277	3300	1.728
		1503 kW		1518 kW		1785 kW

Tabla 4. Resultados de la potencia anual en los distintos aerogeneradores VESTAS.

Suponiendo un número de horas de funcionamiento de los aerogeneradores de 3500 según el IDAE [20], una primera estimación de cálculo de producción anual en un parque eólico compuesto por diez aerogeneradores de cada uno de los tres tipos elegidos se corresponde con los siguientes resultados:

- 10 aerogeneradores modelo **V112-3.3**: Producción anual → **52605 MWh/año**
- 10 aerogeneradores modelo **V117-3.3**: Producción anual → **53130 MWh/año**
- 10 aerogeneradores modelo **V126-3.3**: Producción anual → **62475 MWh/año**

4.3 Métodos de cálculo más precisos para la producción anual

Existen métodos de cálculo para la producción anual de un generador fuera del alcance del proyecto, cuyas expresiones corresponden a funciones de distribución de probabilidad más precisas que la Weibull, como pueden ser:

- Mezcla de la distribución normal de Weibul truncada (Singly-Truncated normal Weibull mixture distribution):

$$fg(v; \xi, \theta, k, c, \omega) = \omega \cdot g(v; \xi, \theta) + (1 - \omega) \cdot f(v; k, c)$$

Esta distribución depende de las siguientes funciones:

$$g(v; \xi, \theta) = \begin{cases} \mathbf{Z}(v; \xi, \theta) / \int_0^{\infty} \mathbf{Z}(v; \xi, \theta) dv & ; v \geq 0; \theta > 0 \\ \mathbf{0} & ; v < 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{Z}(v; \xi, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(v - \xi)^2}{2\theta^2}\right)$$

- Distribución de dos componentes de la mezcla de Weibul (Two component mixture Weibull distribution):

$$ff(v; k_1, c_1, k_2, c_2, \omega) = \omega \cdot f(v; k_1, c_1) + (1 - \omega) \cdot f(v; k_2, c_2)$$

Para la particularización de los cálculos a una altura del buje determinada es necesario realizar correcciones en las funciones anteriores. Puede verse en la siguiente tabla, el listado de correcciones:

k	$k' = k$
c	$c' = \alpha c$
ξ	$\xi' = \xi \alpha$
θ	$\theta' = \alpha \theta$
ω	$\omega' = \omega$
$f(v; k, c)$	$f(v; k', c')$
$fg(v; \xi, \theta, k, c, \omega)$	$fg(v; \xi', \theta', k', c', \omega')$
$ff(v; k_1, c_1, k_2, c_2, \omega)$	$ff(v; k'_1, c'_1, k'_2, c'_2, \omega')$

Tabla 5. Correcciones para el cálculo de las funciones de probabilidad según la altura.

El orden de magnitud de los errores cometidos al realizar estimaciones anuales basadas en la distribución simplificada de Weibull se obtiene aplicando la siguiente expresión:

$$\left\{ \text{Error} \right\}_{\text{relativo}} = \frac{\left\{ \left\{ \text{Producción anual} \right\}_{\text{Distribución Finita}} - \left\{ \text{Producción anual} \right\}_{\text{Distribución Weibull}} \right\}}{\left\{ \text{Producción anual} \right\}_{\text{Distribución Finita}}}$$

La figura mostrada a continuación pertenece a un análisis del error relativo cometido al calcular la potencia media anual corriente aguas arriba de un generador frente a las distintas estaciones meteorológicas simuladas:

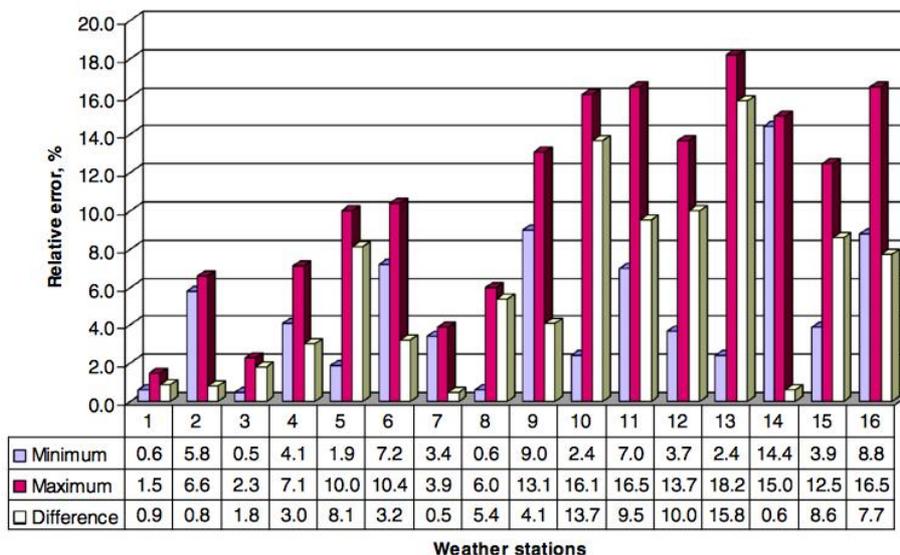


Figura 18. Error relativo (%) de la potencia media anual según la estación meteorológica.

4.4 Producción anual por localización para cubrir la demanda de desalación

En este apartado se construirá una planta de desalación mediante ósmosis inversa con la ayuda del software de simulación ROSA [21], para detallar el consumo específico necesario en las distintas localizaciones de Las Islas Canarias, y de esta forma poder analizar la viabilidad de abastecimiento energético con el parque eólico compuesto por diez aerogeneradores.

Podría plantearse como propuesta razonable el desarrollo de un proyecto sostenible de agua, aportando el 100% del consumo energético necesario de una planta de desalación mediante ósmosis inversa vertiendo a la red eléctrica dicha producción de energía procedente del parque eólico. Por tanto, se podrá garantizar una cantidad diferente de consumo necesario de electricidad necesario para desalar según la localización en la que se construya el parque eólico.

Se desarrolla a continuación el proceso de cálculo y la particularización para cada región.

Para el cálculo del consumo específico de la planta de desalación, se introduce en ROSA el tipo de agua, que corresponde a la composición del océano atlántico, junto con los siguientes parámetros de entrada:

- R: recuperación de permeado de 50 %,
- Flujo de permeado de 3.65 m³/h
- Configuración de planta de un paso y una etapa compuesta de:
 - o 8 elementos de membrana por tubo
 - o Tipología de membranas: SW30ULE-400i

Con estos datos de entrada, los resultados de la simulación corresponden a:

- Consumo específico (SEC): 3.6 kWh/m³
- Concentración de sólidos disueltos (TDS): 363.36 mg/l
- Concentración de Boro: 1 ppm

Para calcular la producción del parque eólico, se toman nueve medidas de los parámetros de la distribución de Weibul para cada estación meteorológica según el emplazamiento:

- Norte de Gran Canaria (Estación 6)
- Sur de Gran canaria (Estación 12)
- Lanzarote (Estación 1)
- El Hierro (Estación 15)
- La Gomera (Estación 16)
- Norte de Tenerife (Estación 14)
- Sur de Tenerife (Estación 13)
- Norte de Fuerteventura (Estación 2)
- Sur de Fuerteventura (Estación 4)

Las horas de funcionamiento de los aerogeneradores se toman del IDAE [20]. Teniendo este dato, se puede calcular la producción anual del aerogenerador, y, por tanto, del parque eólico.

Se supone el valor intermedio de 3.500 horas de funcionamiento al año de los aerogeneradores para todas estaciones meteorológicas con el objetivo de comparar la producción anual según los patrones de variabilidad de viento de cada localización.

Con el fin de calcular la energía necesaria para llevar a cabo la desalación en la planta, se eligen los aerogeneradores del modelo V117-3.3 para la construcción del parque eólico. Mediante el consumo específico de la planta de ósmosis inversa diseñada, y la producción energética anual del parque eólico podrá calcularse la cantidad de agua potable que se puede obtener con el abastecimiento sostenible de la instalación eólica.

- Estación R. Prieto, Norte de Gran Canarias (6)

V	(Modelo V112-3.3)		(Modelo V117-3.3)		(Modelo V126-3.3)	
	P	P*dWb	P	P*dWb	P	P*dWb
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	300	25,849	300	25,523	366,8	30,006
5	600	57,316	600	56,702	733,5	67,031
6	900	89,097	900	88,348	1100,2	105,167
7	1200	116,542	1200	115,884	1466,9	139,077
8	1500	136,314	1500	135,977	1833,6	164,743
9	1800	146,707	1800	146,875	2200,3	179,865
10	2100	147,623	2100	148,391	2567	183,913
11	2400	140,267	2400	141,629	2933,7	177,874
12	2700	126,688	2700	128,546	3300,4	163,804
13	3300	120,201	3300	122,615	3300	129,856
14	3300	90,318	3300	92,663	3300	99,822
15	3300	65,742	3300	67,866	3300	74,460
16	3300	46,386	3300	48,203	3300	53,931
17	3300	31,744	3300	33,220	3300	37,950
18	3300	21,079	3300	22,224	3300	25,956
19	3300	13,587	3300	14,438	3300	17,261
20	3300	8,504	3300	9,112	3300	11,165
21	3300	5,169	3300	5,587	3300	7,026
22	3300	3,053	3300	3,330	3300	4,302
23	3300	1,752	3300	1,929	3300	2,564
24	3300	0,977	3300	1,087	3300	1,488
25	3300	0,529	3300	0,595	3300	0,841
Nºaerogen.	1	1395,44		1410,74		1678,10
	10	13,954		14,107		16,781
Produc. Anual						
[MWh/año]		48840,57		49376,02		58733,53

Tabla 6. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 6.

Instalando el parque eólico en esta estación meteorológica se podría abastecer el consumo de electricidad necesario para **13715561.11 m³/año**.

- Estación P.Izquierdo, sur de Gran Canarias (Estación 12)

V	(Modelo V112-3.3)		(Modelo V117-3.3)		(Modelo V126-3.3)	
	P	P*dWb	P	P*dWb	P	P*dWb
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	300	16,179	300	15,948	366,8	18,667
5	600	37,843	600	37,344	733,5	43,842
6	900	62,796	900	62,048	1100,2	73,122
7	1200	88,728	1200	87,808	1466,9	103,948
8	1500	113,444	1500	112,469	1833,6	133,840
9	1800	135,055	1800	134,166	2200,3	160,610
10	2100	152,120	2100	151,462	2567	182,522
11	2400	163,727	2400	163,428	2933,7	198,390
12	2700	169,506	2700	169,662	3300,4	207,619
13	3300	186,551	3300	187,281	3300	189,132
14	3300	164,535	3300	165,712	3300	168,937
15	3300	142,257	3300	143,771	3300	148,062
16	3300	120,651	3300	122,387	3300	127,412
17	3300	100,430	3300	102,278	3300	107,712
18	3300	82,086	3300	83,946	3300	89,494
19	3300	65,903	3300	67,695	3300	73,108
20	3300	51,989	3300	53,652	3300	58,737
21	3300	40,310	3300	41,803	3300	46,425
22	3300	30,726	3300	32,028	3300	36,107
23	3300	23,029	3300	24,134	3300	27,639
24	3300	16,974	3300	17,889	3300	20,826
25	3300	12,306	3300	13,046	3300	15,450
Nºaerogen.	1	1977,15		1989,96		2231,60
	10	19,771		19,900		22,316
Producc.Anual						
[MWh/año]		69200,14		69648,48		78106,08

Tabla 7. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 12.

Instalando el parque eólico en esta estación meteorológica se podría abastecer el consumo de electricidad necesario para **19346800 m³/año**.

- Estación Los Valles, Lanzarote (Estación 1)

V	(Modelo V112-3.3)		(Modelo V117-3.3)		(Modelo V126-3.3)	
	P	P*dWb	P	P*dWb	P	P*dWb
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	300	16,690	300	16,454	366,8	19,266
5	600	38,865	600	38,360	733,5	45,059
6	900	64,142	900	63,397	1100,2	74,772
7	1200	90,050	1200	89,151	1466,9	105,656
8	1500	114,284	1500	113,360	1833,6	135,098
9	1800	134,918	1800	134,116	2200,3	160,851
10	2100	150,546	2100	150,014	2567	181,196
11	2400	160,359	2400	160,221	2933,7	195,046
12	2700	164,144	2700	164,483	3300,4	201,960
13	3300	178,431	3300	179,371	3300	181,863
14	3300	155,288	3300	156,644	3300	160,428
15	3300	132,352	3300	134,001	3300	138,731
16	3300	110,544	3300	112,364	3300	117,684
17	3300	90,529	3300	92,407	3300	97,981
18	3300	72,724	3300	74,565	3300	80,102
19	3300	57,329	3300	59,058	3300	64,325
20	3300	44,363	3300	45,928	3300	50,757
21	3300	33,707	3300	35,079	3300	39,365
22	3300	25,152	3300	26,320	3300	30,013
23	3300	18,437	3300	19,404	3300	22,501
24	3300	13,278	3300	14,058	3300	16,590
25	3300	9,396	3300	10,010	3300	12,032
Nºaerogen.	1	1875,53		1888,77		2131,28
	10	18,755		18,888		21,313
Produc.Anual						
[MWh/año]		65643,50		66106,78		74594,73

Tabla 8. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 1.

Instalando el parque eólico en esta estación meteorológica se podría abastecer el consumo de electricidad necesario para **18362994.44 m³/año**.

- Estación Valverde, El Hierro (Estación 15)

V	(Modelo V112-3.3)		(Modelo V117-3.3)		(Modelo V126-3.3)	
	P	P*dWb	P	P*dWb	P	P*dWb
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	300	10,496	300	10,339	366,8	12,080
5	600	25,101	600	24,744	733,5	28,967
6	900	42,798	900	42,225	1100,2	49,556
7	1200	62,442	1200	61,670	1466,9	72,595
8	1500	82,845	1500	81,919	1833,6	96,767
9	1800	102,850	1800	101,839	2200,3	120,773
10	2100	121,405	2100	120,394	2567	143,408
11	2400	137,614	2400	136,697	2933,7	163,625
12	2700	150,787	2700	150,059	3300,4	180,580
13	3300	176,505	3300	176,004	3300	174,281
14	3300	166,394	3300	166,281	3300	165,690
15	3300	154,532	3300	154,785	3300	155,278
16	3300	141,475	3300	142,059	3300	143,542
17	3300	127,750	3300	128,617	3300	130,960
18	3300	113,830	3300	114,923	3300	117,973
19	3300	100,122	3300	101,383	3300	104,972
20	3300	86,958	3300	88,329	3300	92,289
21	3300	74,598	3300	76,023	3300	80,191
22	3300	63,223	3300	64,652	3300	68,883
23	3300	52,947	3300	54,340	3300	58,504
24	3300	43,824	3300	45,145	3300	49,139
25	3300	35,854	3300	37,080	3300	40,823
Nºaerogen.	1	2074,35		2079,51		2250,88
	10	20,744		20,795		22,509
	Producc.Anual [MWh/año]	72602,28		72782,70		78780,66

Tabla 9. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 15.

Instalando el parque eólico en esta estación meteorológica se podría abastecer el consumo de electricidad necesario para **20217416.67 m³/año**.

- Estación San Sebastián, La Gomera (Estación 16)

V	(Modelo V112-3.3)		(Modelo V117-3.3)		(Modelo V126-3.3)	
	P	P*dWb	P	P*dWb	P	P*dWb
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	300	27,642	300	27,307	366,8	32,162
5	600	60,045	600	59,453	733,5	70,478
6	900	91,025	900	90,376	1100,2	108,004
7	1200	115,584	1200	115,134	1466,9	138,915
8	1500	130,643	1500	130,625	1833,6	159,357
9	1800	135,253	1800	135,811	2200,3	167,774
10	2100	130,322	2100	131,484	2567	164,720
11	2400	118,034	2400	119,714	2933,7	152,317
12	2700	101,155	2700	103,189	3300,4	133,537
13	3300	90,653	3300	93,056	3300	100,351
14	3300	64,045	3300	66,189	3300	72,814
15	3300	43,632	3300	45,422	3300	51,049
16	3300	28,684	3300	30,093	3300	34,603
17	3300	18,205	3300	19,258	3300	22,691
18	3300	11,161	3300	11,910	3300	14,400
19	3300	6,611	3300	7,121	3300	8,848
20	3300	3,785	3300	4,117	3300	5,265
21	3300	2,096	3300	2,303	3300	3,035
22	3300	1,122	3300	1,246	3300	1,695
23	3300	0,581	3300	0,653	3300	0,918
24	3300	0,291	3300	0,331	3300	0,482
25	3300	0,141	3300	0,162	3300	0,245
Nºaerogen.	1	1180,71		1194,95		1443,66
	10	11,807		11,950		14,437
Producc.Anual [MWh/año]		41324,82		41823,41		50528,09

Tabla 10. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 16.

Instalando el parque eólico en esta estación meteorológica se podría abastecer el consumo de electricidad necesario para **11617613.89 m³/año**.

- Estación El Rayo, Norte de Tenerife (Estación 14)

V	(Modelo V112-3.3)		(Modelo V117-3.3)		(Modelo V126-3.3)	
	P	P*dWb	P	P*dWb	P	P*dWb
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	300	38,709	300	38,338	366,8	45,496
5	600	76,797	600	76,344	733,5	91,583
6	900	104,204	900	104,064	1100,2	126,511
7	1200	116,072	1200	116,543	1466,9	143,936
8	1500	112,790	1500	113,955	1833,6	143,328
9	1800	98,386	1800	100,106	2200,3	128,538
10	2100	78,280	2100	80,279	2567	105,488
11	2400	57,377	2400	59,356	2933,7	80,013
12	2700	39,000	2700	40,732	3300,4	56,465
13	3300	27,167	3300	28,670	3300	33,517
14	3300	14,621	3300	15,604	3300	18,851
15	3300	7,437	3300	8,033	3300	10,053
16	3300	3,577	3300	3,914	3300	5,086
17	3300	1,628	3300	1,806	3300	2,443
18	3300	0,701	3300	0,789	3300	1,114
19	3300	0,286	3300	0,327	3300	0,483
20	3300	0,111	3300	0,128	3300	0,199
21	3300	0,041	3300	0,048	3300	0,078
22	3300	0,014	3300	0,017	3300	0,029
23	3300	0,005	3300	0,006	3300	0,010
24	3300	0,001	3300	0,002	3300	0,003
25	3300	0,000	3300	0,001	3300	0,001
Nºaerogen.	1	777,21		789,06		993,22

10	7,772	7,891	9,932
Producc.Anual [MWh/año]	27202,18	27617,12	34762,87

Tabla 11. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 14.

Instalando el parque eólico en esta estación meteorológica se podría abastecer el consumo de electricidad necesario para **7671422.22 m³/año**.

- Estación Granadilla, Sur de Tenerife (Estación 13)

V	(Modelo V112-3.3)		(Modelo V117-3.3)		(Modelo V126-3.3)	
	P	P*dWb	P	P*dWb	P	P*dWb
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	300	17,840	300	17,598	366,8	20,634
5	600	40,828	600	40,332	733,5	47,481
6	900	65,969	900	65,279	1100,2	77,242
7	1200	90,324	1200	89,563	1466,9	106,615
8	1500	111,366	1500	110,689	1833,6	132,685
9	1800	127,237	1800	126,802	2200,3	153,204
10	2100	136,872	2100	136,814	2567	166,765
11	2400	140,014	2400	140,418	2933,7	172,836
12	2700	137,106	2700	138,001	3300,4	171,686
13	3300	142,032	3300	143,524	3300	147,781
14	3300	117,344	3300	119,083	3300	124,163
15	3300	94,578	3300	96,419	3300	101,897
16	3300	74,415	3300	76,234	3300	81,734
17	3300	57,187	3300	58,891	3300	64,116
18	3300	42,944	3300	44,469	3300	49,208
19	3300	31,524	3300	32,834	3300	36,964
20	3300	22,628	3300	23,714	3300	27,185
21	3300	15,887	3300	16,757	3300	19,579
22	3300	10,913	3300	11,589	3300	13,814
23	3300	7,335	3300	7,845	3300	9,548
24	3300	4,825	3300	5,199	3300	6,468
25	3300	3,107	3300	3,373	3300	4,293
Nºaerogen.	1	1492,28		1505,43		1735,90

10	14,923	15,054	17,359
Producc.Anual [MWh/año]	52229,66	52689,89	60756,41

Tabla 12. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 13.

Instalando el parque eólico en esta estación meteorológica se podría abastecer el consumo de electricidad necesario para **14636080.56 m³/año**.

- Estación Taca, Norte de Fuerteventura (Estación 2)

V	(Modelo V112-3.3)		(Modelo V117-3.3)		(Modelo V126-3.3)	
	P	P*dWb	P	P*dWb	P	P*dWb
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	300	32,816	300	32,425	366,8	38,240
5	600	70,291	600	69,630	733,5	82,704
6	900	104,745	900	104,081	1100,2	124,722
7	1200	130,337	1200	129,983	1466,9	157,402
8	1500	143,913	1500	144,126	1833,6	176,656
9	1800	145,093	1800	146,002	2200,3	181,430
10	2100	135,722	2100	137,300	2567	173,257
11	2400	118,964	2400	121,058	2933,7	155,376
12	2700	98,361	2700	100,739	3300,4	131,723
13	3300	84,779	3300	87,438	3300	95,442
14	3300	57,426	3300	59,677	3300	66,577
15	3300	37,393	3300	39,175	3300	44,742
16	3300	23,422	3300	24,752	3300	28,987
17	3300	14,120	3300	15,061	3300	18,114
18	3300	8,196	3300	8,829	3300	10,923
19	3300	4,583	3300	4,988	3300	6,359
20	3300	2,469	3300	2,717	3300	3,575
21	3300	1,282	3300	1,427	3300	1,941
22	3300	0,642	3300	0,723	3300	1,018
23	3300	0,310	3300	0,354	3300	0,516
24	3300	0,144	3300	0,167	3300	0,253
25	3300	0,065	3300	0,076	3300	0,120
Nºaerogen.	1	1215,07		1230,73		1500,08

10	12,151	12,307	15,001
Producc.Anual [MWh/año]	42527,53	43075,48	52502,67

Tabla 13. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 2.

Instalando el parque eólico en esta estación meteorológica se podría abastecer el consumo de electricidad necesario para **11965411.11 m³/año**.

- Estación P. Jandía 1, Sur de Fuerteventura (Estación 4)

V	(Modelo V112-3.3)		(Modelo V117-3.3)		(Modelo V126-3.3)	
	P	P*dWb	P	P*dWb	P	P*dWb
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	300	24,783	300	24,446	366,8	28,665
5	600	56,671	600	55,981	733,5	65,910
6	900	91,473	900	90,517	1100,2	107,119
7	1200	125,090	1200	124,040	1466,9	147,687
8	1500	154,015	1500	153,089	1833,6	183,559
9	1800	175,682	1800	175,101	2200,3	211,632
10	2100	188,648	2100	188,596	2567	229,984
11	2400	192,598	2400	193,192	2933,7	237,922
12	2700	188,190	2700	189,466	3300,4	235,866
13	3300	194,494	3300	196,597	3300	202,584
14	3300	160,280	3300	162,714	3300	169,808
15	3300	128,832	3300	131,396	3300	139,005
16	3300	101,071	3300	103,594	3300	111,200
17	3300	77,432	3300	79,784	3300	86,980
18	3300	57,956	3300	60,052	3300	66,552
19	3300	42,396	3300	44,190	3300	49,832
20	3300	30,321	3300	31,802	3300	36,524
21	3300	21,206	3300	22,388	3300	26,212
22	3300	14,507	3300	15,421	3300	18,424
23	3300	9,710	3300	10,396	3300	12,686
24	3300	6,359	3300	6,860	3300	8,557
25	3300	4,076	3300	4,431	3300	5,657
Nºaerogen.	1	2045,79		2064,05		2382,36
	10	20,458		20,641		23,824
Producc.Anual [MWh/año]		71602,68		72241,91		83382,77

Tabla 14. Potencia y producción anual de los aerogeneradores VESTAS, estación 4.

Instalando el parque eólico en esta estación meteorológica se podría abastecer el consumo de electricidad necesario para **20067197.22 m³/año**.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se detalla una tabla comparativa que permitirá elegir la localización más conveniente para instalar el parque eólico:

Estación Met.	Producción eólica anual [MWh/año]	Producción de agua [m ³ /año]
6	4.94E+04	1.37E+07
12	6.96E+04	1.93E+07
1	6.61E+04	1.84E+07
15	7.28E+04	2.02E+07
16	4.18E+04	1.16E+07
14	2.76E+04	7.67E+06
13	5.27E+04	1.46E+07
2	4.31E+04	1.20E+07
4	7.22E+04	2.01E+07

Tabla 15. Producción eólica y producción de agua en planta de desalación.

Como se puede observar en la tabla la estación meteorológica más interesante corresponde a la de mayor producción de energía, ya que toda esta producción estará destinada al consumo de energía necesario en la planta de desalación, por lo que el parque eólico de la estación Valverde, en la isla del Hierro abastecerá la electricidad necesaria para producir la mayor cantidad de agua en la planta de ósmosis inversa.

Esta localización posee el mayor valor del parámetro factor de escala en la distribución de Weibul, es decir, la mayor velocidad promedio del viento, por lo que se puede concluir que existe coherencia con respecto al resultado de mayor producción energética. Por tanto, El Hierro será el lugar con las mejores condiciones de viento para la producción de energía de los aerogeneradores que conforman el parque eólico.

Se muestra a continuación una tabla de resultados correspondientes a distintos indicadores de medida de la producción eólica anual, para tener un detalle de la producción media de agua diaria, y la producción eólica con respecto a los MW nominales del parque eólico tanto anual como diaria:

Estac. Met.	Producción eólica anual [MWh/año]	Producción de agua [m ³ /año]	Producción diaria media de agua [m ³ /d]	Producción eólica anual [MWh/año/MWnom]	Producción diaria media de agua por MWnom [m ³ /d/MW]
6	4.9E+04	1.4E+07	3.8E+04	1.5E+03	1.1E+03
12	7.0E+04	1.9E+07	5.3E+04	2.1E+03	1.6E+03
1	6.6E+04	1.8E+07	5.0E+04	2.0E+03	1.5E+03
15	7.3E+04	2.0E+07	5.5E+04	2.2E+03	1.7E+03
16	4.2E+04	1.2E+07	3.2E+04	1.3E+03	9.6E+02
14	2.8E+04	7.7E+06	2.1E+04	8.4E+02	6.4E+02
13	5.3E+04	1.5E+07	4.0E+04	1.6E+03	1.2E+03
2	4.3E+04	1.2E+07	3.3E+04	1.3E+03	9.9E+02
4	7.2E+04	2.0E+07	5.5E+04	2.2E+03	1.7E+03

Tabla 16. Resultados diarios y anuales de producción eólica y de agua en planta de desalación.

En el desglose del cálculo eólico se puede contemplar la gran diferencia entre la producción diaria media de agua por MW nominal instalado obtenida en la zona sur y la zona norte de cada isla, como por ejemplo en el caso de Tenerife y Fuerteventura. Estos resultados demuestran que el recurso eólico es mayormente aprovechable en las zonas del norte de las islas.

5 CÁLCULO ESTIMADO DE PRODUCCIÓN FOTOVOLTAICA

5.1 Cálculo de la superficie necesaria para instalación fotovoltaica

Se procede a determinar el área que se necesita para cubrir la producción anual mediante el recurso solar en diferentes localizaciones, que dependerá de las estaciones meteorológicas.

Cada estación tendrá distintos parámetros de DNI (Irradiancia normal directa), elevación solar, azimut, temperatura, radiación y velocidad de viento. Por tanto, se calculará la superficie en cada caso para estudiar la viabilidad de una instalación fotovoltaica y abastecer el consumo de la planta desaladora.

Se toma un PR fotovoltaico de 77%. Este factor se denomina coeficiente de rendimiento (Performance Ratio), y es una magnitud independiente del lugar de ubicación que expresa la relación entre el rendimiento real y el rendimiento nominal de la instalación fotovoltaica. Indica la proporción de energía disponible para la alimentación tras descontar pérdidas energéticas y el consumo de la operación.

Para el cálculo de la superficie necesaria en cada localización, se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Producción anual} = \text{DNI} \cdot \text{Superficie} \cdot \text{PR}$$

Se dispone de la producción energética necesaria en la planta de desalación, los datos de irradiancia de cada zona, y el PR de 77%. Mediante unos ficheros recopilatorios de datos de radiación por islas, se realiza el cálculo de la superficie en estudio de las estaciones correspondientes. En la siguiente tabla se muestran los resultados de área necesaria en cada uno de los casos estudiados.

Estación	DNI (MWh/m ²)	Producc. Anual (MWh/año)	Área Captación (hectáreas)
1	1.99	6.6E+04	4.30
2	1.82	4.3E+04	3.08
4	2.07	7.2E+04	4.54
8	1.81	7.4E+04	5.32
11	1.98	5.5E+04	3.64
16	2.21	4.2E+04	2.46

Tabla 17. Resultados de cálculo en la instalación fotovoltaica.

Las estaciones que cuenten con un valor de superficie necesaria superior a cuatro hectáreas no se contemplarán ya que no es posible disponer de esa cantidad de espacio en una isla para llevar a cabo dicha instalación; se requiere menor cantidad de terreno ocupado.

5.2 Comparativa de los recursos eólico y fotovoltaico

La estación meteorológica más rentable para la instalación de un parque eólico es aquella que cuenta con un mayor valor del factor de escala (velocidad promedio del viento), ya que produce mayor cantidad de energía, por tanto, se concluye que la localización óptima para obtener la mayor producción anual del parque es Valverde, en la isla del Hierro, con un valor de $7.3E+04$ MWh/año.

En cambio, en el caso de fotovoltaica se analizan las mejores condiciones de radiación solar y aquellas instalaciones que no requieran gran superficie de terreno para su construcción, puesto que no es una solución viable en una isla por la escasa disponibilidad del mismo.

Inicialmente, la estación meteorológica que cuenta con mayor valor de producción anual es P.Vargas, pero necesita de un área de captación muy elevada para llevar a cabo su instalación cercana a la zona costera, por lo que la solución a priori más interesante en fotovoltaica será la estación de S.Sebastián, ya que cuenta con un valor de producción elevado correspondiente a $4.2E+04$ MWh/año y es la que menor área de captación necesita.

Los resultados obtenidos demuestran que será más interesante a nivel productivo aprovechar el recurso eólico cercano a las zonas costeras, ya que se consigue una gran cantidad de energía sin necesidad de disponer de tanto terreno ocupado.

En la isla de La Gomera resulta más interesante la instalación fotovoltaica ya que se cuenta con un valor de irradiancia directa normal elevado y un valor de velocidad promedio del viento bajo.

Se plantea una posibilidad de solución híbrida para algunas de las islas estudiadas, es decir, aprovechamiento de ambos recursos renovables independientes según las condiciones climatológicas y factores de la distribución Weibul. Como por ejemplo en el caso de la isla de Fuerteventura que cuenta con buenas condiciones de viento, de radiación solar incidente, y además una superficie de captación no elevada. Por tanto, se podría instalar un parque eólico en la parte norte y un parque fotovoltaico en el sur, sin necesidad de ubicar en un sitio fijo la planta desaladora en la isla, para sacar mayor partido de la producción energética.

6 CONCLUSIONES

La revisión bibliográfica realizada muestra que existe una solución viable de abastecimiento energético a implementar en el marco de las energías renovables para obtener un adecuado aprovechamiento sostenible y producir energía necesaria de manera limpia sin dañar el medio ambiente. Sin embargo, las aplicaciones actuales necesitan de un mayor desarrollo para llegar a ser competitivas en el mercado. La tecnología más interesante y destacada sobre el resto es la ósmosis inversa, siendo maduras las tecnologías de aprovechamiento de desalación mediante ósmosis inversa alimentada por energías eólica y/o fotovoltaica. En este trabajo se adopta la propuesta planteada en la bibliografía para propiciar la desalación solar a gran escala: Instalar una o varias plantas de desalación en los puntos de consumo deseados abasteciéndose de la red eléctrica. Por otra parte, instalar independientemente uno o varios sistemas de energías renovables conectados a red para compensar el consumo de la planta de desalación.

Puede utilizarse una metodología de cálculo muy sencilla para disponer de una estimación de la producción de un parque eólico en una localización concreta de la cual se disponga de los parámetros de la distribución de Weibull. Se han analizado un total de dieciséis estaciones meteorológicas correspondientes a seis islas del archipiélago canario. Los parámetros de mayor influencia son el factor de escala, y a su vez la velocidad promedio del viento en cada localización, es decir, los parámetros de la distribución de Weibul.

La propuesta de abastecimiento de agua desalada sostenible en Canarias se centra en la instalación de parques eólicos en la parte norte de las islas, ya que cuentan con mejores condiciones de viento para alcanzar una mayor producción de agua en la planta de desalación, y ocupan menor cantidad de terreno que las instalaciones fotovoltaicas para un mismo valor de producción.

Estas instalaciones ofrecen la ventaja de poder plantear diferentes proyectos sostenibles de energía con libre elección de gestionabilidad, debido al alcance de producción eólica.

Es decir, como el consumo de la planta de desalación queda totalmente cubierto con el parque eólico en estudio, hay un excedente de energía que puede ser aprovechado para verter a la red, por lo que quedaría a libre elección del gobierno de Canarias, en caso de plantear la propuesta, optar por un abastecimiento del 50% de la producción eólica anual mediante los aerogeneradores y verter energía a la red eléctrica.

En el análisis realizado, se ha considerado un aporte del 100% de la producción eólica para abastecer la producción de agua potable en la planta de desalación.

En un segundo plano, se ha propuesto una solución híbrida con el modelo eólico y fotovoltaico implementados al mismo tiempo para aprovechar entre sí el déficit de ambos recursos según la localización en las islas, como ocurre en el sur de las mismas por falta de elevados valores de velocidad promedio del viento, lo cual se podrá compensar con el recurso fotovoltaico.

Las islas cercanas a África son las que mayor cantidad de agua necesitan: Lanzarote, Fuerteventura y Gran Canarias. El incremento de la población y el desarrollo de la agricultura requieren la implantación de la solución híbrida en Gran Canarias y Fuerteventura, y la instalación del parque eólico en Lanzarote, que son las aplicaciones que mayor producción de agua desalada pueden aportar.

7 (APÉNDICE) TECNOLOGÍA DE ÓSMOSIS INVERSA (RO)

7.1 Descripción del proceso

La tecnología de ósmosis inversa (RO, Reverse Osmosis) consiste en un intercambio entre soluciones con diferente concentración de sal, mediante el paso de disolvente desde la solución más diluida hacia la más concentrada a través de una membrana semipermeable hasta el momento que se alcanza el dicho equilibrio entre ambas concentraciones.

La fuerza motriz que genera el flujo de disolvente depende de la presión osmótica y se relaciona con la diferencia de concentración salina entre ambas soluciones. La presión osmótica es la presión de equilibrio que se alcanza entre la disolución y el disolvente puro. Cuando el equilibrio se establece entre dos disoluciones de distinta concentración, la presión equilibrio corresponde a la diferencia de presiones osmóticas. Por tanto, la presión osmótica del disolvente puro es nula – ver figura 10 -.

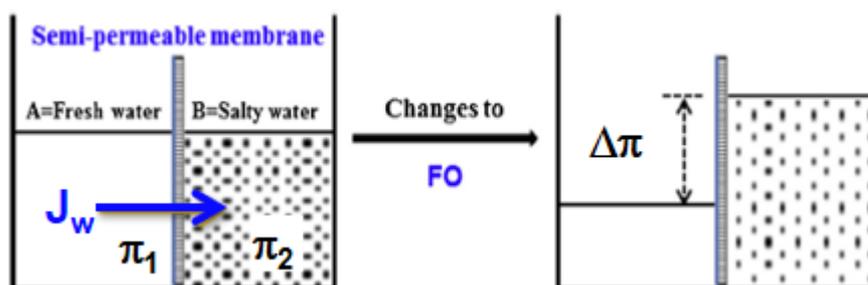


Figura 19. Movimiento inicial del fluido en el proceso ósmosis directa [22].

El proceso de ósmosis inversa (RO) se basa en la ósmosis directa, pero de forma inversa, de manera que se aplica una presión sobre la solución concentrada superior a su presión osmótica y se favorece el paso de la solución concentrada hacia la solución más diluida a través de la membrana semipermeable.

Para reproducir este fenómeno a escala industrial con agua de mar, se necesita una bomba que aplique la presión sobre la solución concentrada, y una membrana semipermeable para permitir el paso de disolvente – ver figura 11 -.

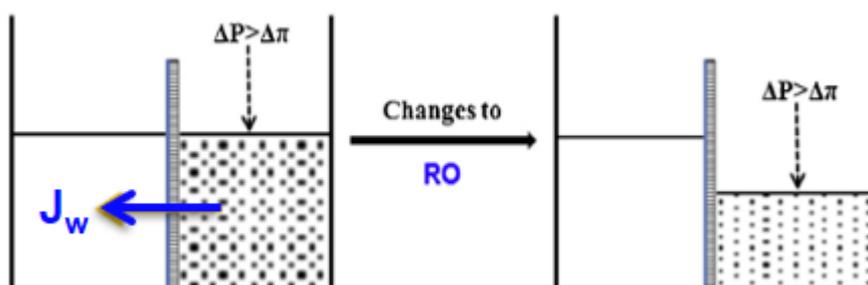


Figura 20. Variación de volumen en el proceso ósmosis inversa [22].

Las membranas utilizadas en los procesos industriales y desalación de agua de mar se constituyen de poliamida arrollada en espiral, y las bombas necesarias para aplicar la presión de trabajo son bombas centrífugas de varias etapas para grandes flujos y volumétricas para caudales menores.

Los elementos comerciales de membrana de arrollamiento en espiral se conectan en series de 7-8 elementos dentro de un cilindro denominado tubo de presión, lo que constituye el permeador. La disposición de estos permeadores conectados en paralelo constituye el bastidor de membranas.

El bastidor, también denominado “tren” es alimentado por una única bomba de alta presión. El tren de RO más sencillo para desalación de agua de mar consta de un bastidor de membranas, la bomba de alta presión y los dispositivos de recuperación energética. Una planta de desalación de agua de mar por ósmosis inversa (SWRO) se compone de diversos trenes en paralelo.

El proceso de ósmosis inversa a escala industrial para agua de mar (SWRO) consta de las siguientes etapas:

- Captación del agua de mar: Toma y bombeo de agua de mar.

La toma de agua de mar se puede realizar en pozos de playa, ya que proporcionan una mejor calidad de agua con menos turbidez y ausencia de actividad biológica. El inconveniente para las plantas de alta capacidad es la limitación de los flujos de alimentación, que requieren una gran superficie para perforaciones con alta permeabilidad cerca de la costa.

- Pre-tratamiento del agua de mar.

Engloba todos los procesos fisicoquímicos para prevenir el ensuciamiento y la incrustación de sales en las membranas. Se realiza una selección apropiada de los procesos a emplear dependiendo de la calidad del agua de alimentación. El proceso más utilizado actualmente es la eliminación de contaminantes mediante el uso de membranas UF, ya que muestra el mejor equilibrio entre contaminantes eliminados y producción de permeado.

Una de las principales limitaciones de los pretratamientos convencionales como la microfiltración y la dosificación de productos químicos, es que no garantizan la protección adecuada de las membranas RO contra el ensuciamiento y la incrustación cuando se ven modificadas las características del agua de alimentación.

Los pretratamientos con membrana son adecuados para el tratamiento de aguas superficiales, ya que estas contienen más sólidos orgánicos coloidales y suspendidos, pero sufren debido a variabilidad y problemas esporádicos.

- Desalinización y recuperación de energía

Esta etapa incluye los principales componentes de la planta de SWRO y consiste en los siguientes procesos:

- Bombeo de alta presión. El flujo de alimentación del sistema de pretratamiento tiene que ser presurizado hasta la presión requerida por el tren SWRO. Solo una parte de este flujo pasa por la bomba de alta presión, el resto es presurizado por el dispositivo de recuperación de energía debido a la energía hidráulica del flujo de salmuera.
- Proceso de desalación de agua de mar. Se lleva a cabo en el bastidor de membranas RO (entrada de la membrana). La configuración del proceso consiste en el montaje de tubos de presión trabajando en paralelo con elementos de membrana en el interior conectados en serie.

El sistema más simple para desalación de agua de mar es una configuración de tren SWRO con una sola etapa y un solo paso, según se muestra en la siguiente figura.



Figura 21. Diagrama conceptual del proceso básico de desalación de agua de mar [22].

Además, puede instalarse un segundo paso (figura 13) para el tratamiento de permeado y obtener de esta forma una mejor calidad del producto.

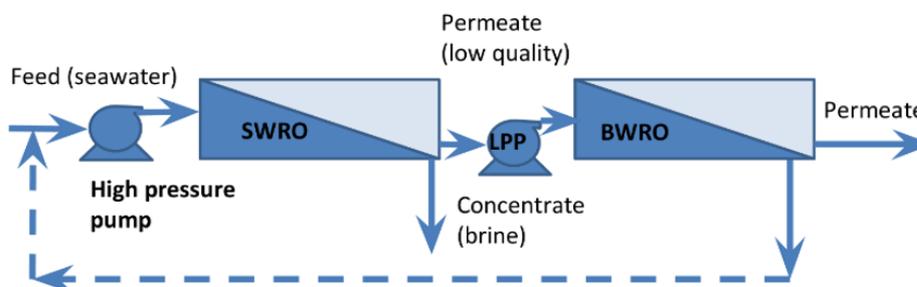


Figura 22. Diagrama de la configuración con dos pasos [22].

Puede instalarse una configuración de dos etapas para la desalación de agua salobre con alta concentración de sal; en este caso la corriente tratada a la salida de BWRO es la salmuera, con el objetivo de conseguir un permeado de mayor calidad (figura 14).

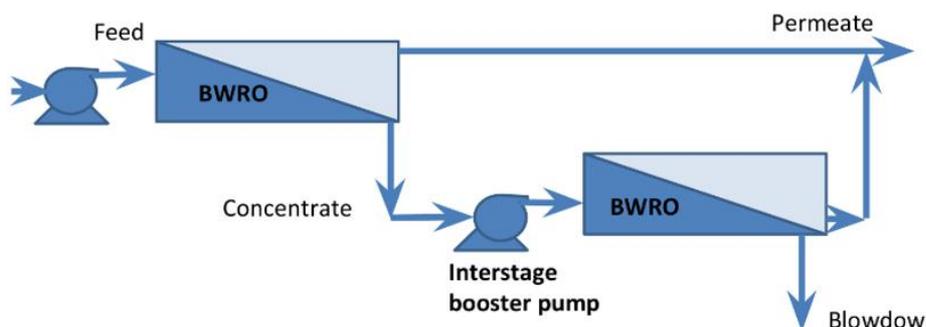


Figura 23. Configuración dos etapas para desalar agua salobre de alta concentración [22].

Los puntos de control más importantes del proceso de ósmosis inversa son:

- Presión de alimentación en el pretratamiento antes de entrar en los recipientes a presión.
- Flujo de salmuera.
- Recuperación de energía de la salmuera.

Pueden utilizarse turbobombas instaladas tras la bomba de alta presión como bombas de refuerzo, por lo que se presurizará la descarga de la bomba.

Por el contrario, los sistemas de recuperación de energía basados en intercambiadores de presión funcionan en paralelo a la bomba de alta presión. Procesan solo una fracción de la corriente proveniente del sistema de pretratamiento de agua de mar. Se requiere otra bomba a la salida de

estos intercambiadores para recuperar la presión perdida en el equipo antes de mezclarse la corriente con el flujo de salida de la bomba de alta presión. Esta segunda opción es la más utilizada por su mayor eficiencia.

7.2 Componentes principales

Las plantas de ósmosis inversa de agua de mar disponen de los siguientes elementos y sistemas auxiliares [23]:

- **Bombas de alta presión.**

Estos elementos son necesarios para aportar la presión necesaria al agua de mar a la entrada de las membranas.

Normalmente cada bastidor RO es alimentado con una bomba de alta presión, siendo la presión de operación entre 5 y 6,5 MPa para el agua de mar con una concentración inferior a 40.000 mg/l TDS.

Sin embargo, existen plantas en las cuales una o más bombas de alta presión alimentan en paralelo algunos bastidores de RO.

- **Sistema de recuperación de energía.**

Este sistema lleva a cabo la transferencia de energía entre la salmuera y la alimentación, normalmente hay varias unidades trabajando en paralelo.

Décadas atrás, los sistemas centrífugos que utilizaban turbinas Pelton habían sido los más aceptados en las plantas de alta capacidad de SWRO debido a su fiabilidad y eficiencia, típicamente hasta el 80% [Sánchez 2008].

Actualmente, hay varios fabricantes de intercambiadores de presión como por ejemplo ERI (PX). Algunos de estos dispositivos alcanzan una eficiencia del 97% desde la corriente de salmuera a la alimentación. Obtienen un excelente consumo de energía específica entre 1,80 y 2,20 kWh/m³ en las nuevas plantas instaladas de SWRO [Dundorf et al., 2007][Pefiate et al., 2010].

- **Módulos de membrana.**

Los módulos de ósmosis inversa utilizados para desalar el agua son arrollamientos en espiral, que tienen un elevado rechazo de sal, superior al 99% en las típicas condiciones de test.

Tienen una conversión del 8-10 % en condiciones normales de operación.

Las membranas y los espaciadores están enrollados sobre el tubo colector de permeado. A lo largo de los espacios entre las membranas circula tanto el permeado como el concentrado, ya que las capas de permeado y concentrado son alternativas.

La corriente de permeado, perpendicular al colector de permeado, pasa a través de los orificios existentes en la superficie del tubo colector y es recogida en uno de los extremos del elemento de membrana. Por el contrario, la corriente de alimentación (concentrado) circula axialmente por el colector. Los espaciadores de alimentación normalmente utilizados en membranas de arrollamiento espiral, son de entre 0,66 y 0,86 mm de espesor hechos de materiales de poliolefina. En comparación con las membranas existentes, las membranas de ósmosis inversa presentan un mayor desarrollo.

- **Tubo de presión.**

El agua de alimentación pasa a través de los elementos de membrana en serie, y el concentrado de un elemento es la alimentación del siguiente, de modo que la salmuera en el tubo de presión es el concentrado del último elemento. Normalmente el permeado de los elementos sucesivos es mezclado y

recogido sólo por un extremo del tubo de presión. Sin embargo, el permeado puede ser recogido de ambos extremos (división parcial) a fin de obtener dos productos de calidad diferentes. El permeado resultante de mezclar el producto de los últimos elementos tiene menor calidad que los elementos situados al principio.

Hoy día, el tubo de presión consiste en 7-8 elementos con un diámetro de 8". Según el objetivo de la recuperación y el rechazo de boro a cumplir, se puede recomendar un número diferente de elementos en serie.

- **Tren SWRO.**

La capacidad de producción de cada tren RO suele estar relacionada con la capacidad total de la planta y el tipo de elemento recuperador de energía instalado.

Era común diseñar bastidores de RO de 2.500 m³/día o 5.000 m³/día, debido a que los equipos de recuperación de energía utilizados eran de tipo centrífugo. Actualmente los trenes más comunes de RO son de 7.500 m³/día, e incluso en plantas de alta capacidad por encima de 10.000 m³/día gracias a la modularidad de los intercambiadores de presión basados en cámaras isobáricas. Este es el caso de la planta de desalación de agua de mar de Almería con una capacidad de producción de 120.000 m³/día, la cual se compone de 10 líneas RO de 12.000 m³/día.

REFERENCIAS

- [1] D. I. E. Grupo Termotecnia, Introducción a los sistemas de energía solar- MSET, 2019.
- [2] D. J. M. Delgado y D. I. Lillo, Tecnologías Termosolares- MSET, 2019.
- [3] D. J. M. Delgado y D. I. Lillo, Tecnologías Termosolares, 2019.
- [4] I. Lillo, Instalaciones Fotovoltaicas - Ingeniería de la Energía, 2017-2018.
- [5] E.eólica y F. Eficiencia energética, «<https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/energia-eolica/>,» [En línea].
- [6] L. García-Rodríguez y A. Delgado-Torres, Solar-powered Rankine cycles for fresh water production, *Desalination* 212, 2007.
- [7] L. García-Rodríguez y A. Buenaventura, Solar thermal-powered desalination: A viable solution for a potential market, 2018.
- [8] DESSOL®, <http://www.itccanarias.org/web/tecnologias/agua/dessol.jsp?lang=es>, 2017.
- [9] J. Carta, J. González y V. Subiela, The SDAWES project: an ambitious R&D prototype for wind-powered desalination, *Desalination* 161, 2004.
- [10] M. Thomson y D. Infield, A photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries, *Desalination* 153, 2003.
- [11] L. G. Rodríguez, Desalination by wind power, *Wind Eng.* 28, 2004.
- [12] M. Thomson y D. Infield, A photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries, *Desalination* 153, 2002.
- [13] J. Ortiz, J. Sotoca, E. Expósito, F. Gallud, V. García-García y A. Montiel, Brackish water desalination by electrolysis: batch recirculation operation modelling, 2005.
- [14] J. Ortiz, E. Expósito, F. Gallud, V. García-García, A. Montiel y A. Aldaz, Desalination of underground brackish waters using and electrolysis system powered directly by photovoltaic energy, *Desalination* 208, 2007.
- [15] P. OMsop, <https://omsop.serverdata.net/Pages/Project%20Brochure.aspx..>
- [16] D. Sánchez, A. Bortkiewicz, J. M. Rodríguez, G. S. Martínez, G. Gavagnin y T. Sánchez, A methodology to identify potential markets for small-scale solar thermal power generators, *Appl. Energy* 169, 2016.
- [17] J. A. Carta y P. Ramírez, Use of mixture distribution models in the analysis of wind energy in the Canarian Archipelago, *Energy Conversion and Management*, 2007.

-
- [18] V. Romero-Ternero, L. García-Rodríguez y C. Gómez-Camacho, Thermoeconomic analysis of wind powered seawater reverse osmosis desalination in the Canary Islands, Received 14 February 2005; accepted 6 June 2005.
- [19] S. Vestas Wind y A/S, VESTAS 3_MW_Product_Brochurepdf.
- [20] M. Mayo, J. Aymamí, A. García, O. Lacave, L. Lledó y S. Parés, Análisis del recurso. Atlas eólico de España, Estudio técnico PER 2011-2020.
- [21] L. G. Rodríguez, Use of commercial software for SWRO rack design, Febrero, 2017.
- [22] F. J. Sanz Vargas, Viabilidad de plantas de desalación por ósmosis inversa con aprovechamiento de gradientes salinos y recuperadores iSave (TFG), 2018.
- [23] L. García Rodríguez, «OSMOSIS DESALINATION TECHNOLOGY: DESCRIPTION», Máster Universitario en Ingeniería Industrial, Asignatura: Diseño Eficiente en Instalaciones de Desalación de Agua, 2017.
- [24] V. Romero-Ternero, L. García-Rodríguez y C. Gómez-Camacho, Thermoeconomic analysis of wind powered seawater desalination in the Canary Islands, Desalination, 2005.
- [25] I. T. Canarias, ITC (Canary Islands Technological Institute) DESSOL®, <http://www.itccanarias.>, 2017.

