



escolauniversitaria
POLITÉCNICA



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Estudio de un sistema de desalinización
basado en Energías Renovables para
abastecer los Invernaderos de la zona de
Almería, España



Máster en Eficiencia y Aprovechamiento Energético

Alejandro Martín Gómez

Tutores:

José Luis Casteleiro Roca (jose.luis.casteleiro@udc.es)

Francisco Zayas Gato (j.zayas.gato@udc.es)

Resumen

Debido a la creciente escasez de agua, producto del cambio climático, combinado con la disminución de los suministros y un aumento en la demanda de este recurso, las tensiones alrededor de este líquido están aumentando, y en el mundo de la geopolítica ya se empieza a hablar de las “Guerras por el Agua”. Ya que los conflictos por este bien van en aumento, sobre todo en países subdesarrollados, que suelen ser los más afectados por las sequías. Pero España, especialmente Almería, la ciudad más soleada de Europa, también sufre por la crisis hídrica, una situación que está siendo agravada por el sector agrónomo, con alrededor de 35.000 hectáreas de cultivos hortícolas, y aumentando. Y una demanda de 146,8 hm³ de agua cada año. Este estudio trata de analizar los diferentes métodos de desalinización de la bibliografía científica actual para diseñar una planta desalinizadora y abastecer el 50% de esta demanda de agua con una planta abastecida por energías renovables. Utilizando los dos recursos más abundantes de la zona; los residuos agrícolas (con un digestor anaeróbico) y la irradiación solar (con una granja solar-fotovoltaica). Con el fin de producir los 472.820 kWh/día que consume la planta propuesta para generar 201.200 m³ de agua cada día y abastecer los invernaderos. Además, se venderá energía eléctrica a la red para abaratar los costes de la producción del agua y amortizar el proyecto en menos tiempo. Por lo que se realizó un estudio económico para averiguar la viabilidad del proyecto. Se estimó un coste de capital de 1.006,8 M€, con un precio de producción de 0.043€/m³, y un precio de venta de 0,08€/m³ esto resulta en un índice de rentabilidad del 16% a lo largo de 20 años y una amortización en once. Finalmente se realizó un estudio ambiental, y se estimó que las emisiones desplazadas por la producción de energía eléctrica son de 895.412 tCO₂/año, principalmente por el reemplazo de la producción de electricidad con energías renovables.

Abstract

Due to the growing scarcity of water, product of climate change, combined with a decrease in the supply and an increase in the demand of this resource. The tensions around this liquid have increased in the XXI century. In the world of geopolitics they are already talking about the “Wars for Water”, since conflicts to fight for the security of this essential resource are increasing, especially in underdeveloped countries, which are usually the most affected by droughts. But this is not unique to the poorest countries in the world. In Spain, Almería, the hottest city in Europe, farmers have been suffering a water crisis for years. Mainly due to the agriculture sector, with around 35.000 hectares of horticultural crops, and growing. Which demands 146,8 hm³ of water every year. This study tries to analyse the different desalination methods of the current scientific bibliography, to design a desalination plant to supply 50% of this water demand, powered by renewable energies. Benefiting from the two most abundant resources of the area, agriculture waste and solar irradiance, these two sources of energy combined, with an anaerobic digester and a solar photovoltaic plant are able produce the 472.820 kWh/day that the desalination plant needs to generate 201.200 m³ of water per day. Furthermore, the anaerobic digester was designed with extra capacity to sell electricity back to the grid to reduce the project’s payback time, therefore an economic analysis has been developed to study the viability of the project. It has been found that the total capital costs will be around 1.006,8 M€ and the price of the production of a metre cube of water will be 0,043€, with a selling price of 0,08€ this will result in a profitability index of 16% in the space of 20 years and a payback time of eleven years. Finally an environmental impact assessment was made to figure out the emissions displaced by the production of electricity, and it was found that 895.412 tCO₂ are displaced each year, mainly due to the replacement of fossil fuels with renewable technologies.

Agradecimientos

Primero darles las gracias a mis padres por hacer posible esta oportunidad de estudiar en Galicia y apoyarme durante todo este tiempo.

Este proyecto no hubiera sido lo mismo sin la ayuda de José Manuel García Martín, Ingeniero Agrónomo en *Unicom* (y mejor primo), gracias por los datos facilitados que han hecho este trabajo más llevadero.

Finalmente me gustaría darle las gracias a mi tutor, José Luis Casteleiro Roca por su ayuda y disponibilidad, gracias por echarme una mano cuando lo necesitaba.

ÍNDICE

Resumen	2
Abstract.....	3
<i>Agradecimientos</i>	4
LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE FIGURAS	7
ABREVIATURAS	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. LA DESALINIZACIÓN EN ESPAÑA.....	12
3. TÉCNICAS DE DESALINIZACIÓN	17
3.1 Desalinización por membranas	18
3.1.1 Osmosis inversa	18
3.1.2 Electrodialisis	21
3.1.3 Nanofiltración	23
3.1.4 Resina de intercambio iónico	24
3.2 Métodos térmicos	24
3.2.1 Destilación de Múltiple Efecto y Adsorción (MED Y MEDAD)	25
3.2.2 Destilación Instantánea en Etapas múltiples (MSF)	27
3.3 Comparación de rendimientos y costes	27
4. ENERGÍAS RENOVABLES EN LA DESALINIZACIÓN	31
4.1 Energía Solar.....	32
4.1.1 Destilación solar (Solar Stills).....	32
4.1.2 Captadores solares y concentración de energía solar térmica	34
4.1.3 Sistemas Fotovoltaicos y híbridos	35
4.2 Energía Eólica	37
4.3 Energía Geotérmica.....	38
4.4 Biomasa y poligeneración	41
5. DISEÑO DE LA PLANTA.....	42
5.1 Demanda de agua	43
5.2 Consumo energético	45
5.3 Estudio Solar.....	48
5.3.1 Radiación, Orientación e Inclinación de los paneles	48

5.3.2 Selección del módulo y numero de paneles.....	49
5.3.3 Selección del Inversor y configuración	50
5.3.4 Pérdidas del sistema	51
5.3.5 Distancia entre filas	52
5.3.6 Resultados	53
5.4 Estudio biomasa	54
5.4.1 Residuos hortícolas de la zona de Almería	55
5.4.2 Aprovechamiento energético	56
5.4.3 Digestores Anaeróbicos para la producción de Biogás	57
5.4.4 Gestión de residuos	64
5.4.5 Reciclado de residuos	65
5.5 Diseño combinado.....	66
6. ESTUDIO ECONÓMICO	68
6.1 Presupuesto.....	68
6.1.1 Costes fase de construcción	68
6.1.2 Costes fase de explotación	69
6.1.3 Resumen costes	71
6.2 Precios	71
6.2.1 Precios de electricidad.....	71
6.2.2 Precios del agua.....	73
6.3 Rentabilidad económica	74
7. ESTUDIO AMBIENTAL Y RECOMENDACIONES	79
7.1 Emisiones evitadas por el digestor anaeróbico	79
7.2 Emisiones evitadas por la Granja Solar	80
7.3 Recomendaciones	81
8. CONCLUSIONES	81
BIBLIOGRAFÍA.....	83
ANEXO I: ESTUDIO SOLAR (INFORME DE PVSYST)	88

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. CAPACIDAD VS CANTIDAD DE LAS DESALIZADORAS	13
TABLA 2. CAUDAL DE DIFERENTES DESALADORAS DE ESPAÑA Y SU UBICACIÓN – [ELABORACIÓN PROPIA] (Domingo Zarzo , 2020)	14
TABLA 3. COSTOS DE AGUA VS FUENTE - [ELABORACIÓN PROPIA] (Domingo Zarzo , 2020)	15
TABLA 4. CONSUMO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE DESALINIZACIÓN [ELABORACIÓN PROPIA] (Bahareh Kokabian , 2019)	28
TABLA 5. COSTES DE CAPITAL Y OPERACIÓN (OI Y MED) (Stewart Burn, Manh Hoang, Domingo Zarzo , 2015).....	30
Tabla 6. CANTIDAD DE CULTIVOS VS CONSUMO DE AGUA (Alfredo Tolón Becerra, 2010) y (Fernandez M.D, 2012)	44
Tabla 7. PÉRDIDAS DEL SISTEMA [Elaboración Propia]	51
Tabla 8. RESIDUOS AGRICOLAS ALMERIA (CAJAMAR, 2016) Y (Nieto, 2016).....	55
Tabla 9. DESTINOS DE LOS RESIDUOS AGRICOLAS ALMERIENSES [Elaboración propia].....	64
Tabla 10. COSTES DE CONSTRUCCIÓN [Elaboración propia]	69
Tabla 11. COSTES DE PERSONAL [Elaboración propia]	70
Tabla 12. COSTES DE MANTENIMIENTO [Elaboración propia]	70
Tabla 13. OTROS COSTES [Elaboración propia]	70
Tabla 14. RESUMEN DE COSTES [Elaboración propia]	71
Tabla 15. LCOE PLANTA SOLAR [Elaboración propia]	72
Tabla 16. LCOE PLANTA BIOMASA [Elaboración propia]	73
Tabla 17. FLUJOS DE CAJA [Elaboración propia].....	76

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CAPACIDAD INSTALADA VS CONSUMO ENERGÉTICO DURANTE LOS AÑOS 1970 Y 2010 (Acuamed, 2017).....	16
FIGURA 2. ESQUEMA DE UN SISTEMA DE DESALINIZACIÓN POR OSMOSIS INVERSA (Acuamed, 2017)	19
FIGURA 3. ESQUEMA FUNCIONAMIENTO PILA ELECTRODÁLISIS (Universidad de Alicante , n.d.)	22
FIGURA 4. PROCESO DE DESTILACIÓN SIMPLE	24
FIGURA 5. DESTILACIÓN MULTI-EFECTO ESQUEMA.....	26
FIGURA 6. TECNOLOGIAS INSTALADAS A NIVEL GLOBAL (Bahareh Kokabian , 2019).....	29
FIGURA 7. COSTES RELATIVOS DE OPERACIÓN (Stewart Burn, Manh Hoang, Domingo Zarzo , 2015)	30
FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN COSTES OI [ELABORACIÓN PROPIA].....	31
FIGURA 9. MODELOS DE SOLAR STILL (Eduardo Zarza Moya, 2006)	33
FIGURA 10. ESQUEMA OI CON CAPTADORES SOLARES (Mohammad Ali Abdelkareem, 2018)	35

FIGURA 11. ESQUEMA PLANTA DESALINIZACIÓN VAZQUEZ-FIGUEROA (Energetica Futura , 2010)	38
FIGURA 12. MAPA YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS (Jaime Marcos, 2012).....	40
FIGURA 13. METODOLOGIA DISEÑO PLANTA DESALINIZACIÓN [Elaboración Propia].....	42
FIGURA 14. SALINIDAD MAR MEDITERRANEO (IAGUA, 2017)	46
FIGURA 15. IRRADIACIÓN SUELO VS EN PLANO [Elaboración propia]	49
FIGURA 16. DISTANCIA ENTRE FILAS.....	52
FIGURA 17. ENERGÍA ARRAY FV [Elaboración propia]	53
FIGURA 18. BALANCES ENERGÉTICOS [Elaboración Propia].....	54
FIGURA 19. FLUJO DE PROCESOS DE UN DIGESTOR ANAEROBICO (Katerina Stamatelatou , 2011)	58
FIGURA 20. COMPARACIÓN DE ENERGÍA BIOMASA Y RESIDUOS [Elaboración propia]	61
FIGURA 21. DESGLOSE DE ENERGÍA CENTRAL DE BIOMASA [Elaboración propia]	62
FIGURA 22. ESQUEMA FINAL PLANTA [Elaboración Propia]	67
FIGURA 23. ECUACIÓN LCOE.....	72
FIGURA 24. ECUACIÓN VAN.....	74
FIGURA 25. ECUACIÓN TIR.....	75
FIGURA 26. AMORTIZACIÓN DEL PROYECTO [Elaboración propia].....	77
FIGURA 27. ECUACIÓN VALOR EN CONTINUACIÓN	77

ABREVIATURAS

OCDE - Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

NaCl - Cloruro de sodio

H₂O - Molécula de agua

AEDyR - Asociación Española de Desalinización y Reutilización

pH - Potencial de hidrogeno

CO₂ - Dióxido de Carbono

CEM - Membranas de Intercambio Catiónico

AEM - Membranas de Intercambio Aniónico

MED - Destilación de Múltiple Efecto

MEDAD - Destilación de Múltiple Efecto de Adsorción

MSF - Destilación Instantánea en Etapas Múltiples

OI - Osmosis Inversa

AIE - Agencia Internacional de la Energía

IRENA - Agencia Internacional de Energías Renovables

CH₄ - Metano

H₂S - Sulfuro de Hidrógeno

VAN - Valor Actual Neto

TIR - Tasa Interna de Rentabilidad

LCOE - Levelized Cost of Electricity

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial para la vida en la tierra. Ocupando el 71% de la superficie global, se podría decir que nunca nos faltará este bien, ya que lo tenemos en abundancia. Sin embargo, agua dulce - la que necesitamos para beber, lavarnos e irrigar los campos de cultivo – es bastante escasa. Solo un 3% del agua en la tierra es dulce, y 2.5% de esta está congelada en glaciares o es inaccesible, dejándonos con un 0.5% de agua dulce disponible (CCAO, 2020) Por otro lado, los ríos, lagos y acuíferos se están secando o desapareciendo, en gran parte por una alteración de los ciclos de agua, patrones del tiempo y sequías debido al cambio climático. Además, con una población en crecimiento, consumiendo y demandando incluso más bienes y servicios, esta situación solo tiende a empeorar. La producción de comida y de procesos intensivos de agua se va a tener que expandir durante las próximas décadas, para abastecer a la población y saciar la demanda global. El agua también es necesaria para la creación de productos, desde coches a libros. Muchos de los productos que utilizamos diariamente tienen un gran impacto al suministro global de agua, por ejemplo, para producir medio litro de un refresco (como la Coca-Cola) se necesitan 175 litros de agua (Leahy, 2018) debido a todos los procesos en la línea de producción que se necesitan para crear el producto final, desde extraer los recursos para el embotellado hasta el transporte.

La humanidad se enfrenta al desafío de tener mucha agua en algunos lugares e insuficiente agua en otros. En esta economía global que solo demanda un crecimiento exponencial, las sequías pueden llegar a ser un grave problema, incluso en países ricos en agua. Alrededor del 38% del consumo de agua en la Unión Europea es dependiente de otros países, para cultivar arroz, algodón y otros productos que importa (Leahy, 2018). Esto hace que los países de la Unión Europea sean muy vulnerables a las sequías.

Uno de los sectores económicos que demanda más agua es la agricultura, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) estima que el 70% del agua utilizada en el mundo va destinada a la irrigación de cultivos. Hay que resaltar que este sector también contribuye a la polución del agua a través de pesticidas, excesos de nutrientes y otros contaminantes. Una administración sostenible del agua en la agricultura es esencial para incrementar la producción y para mantener los beneficios sociales, económicos y

medioambientales de los ciclos de agua. No solo hay que reducir la demanda de agua de los cultivos, también hay que encontrar nuevas formas de obtener este recurso tan valioso e infravalorado. Resolver los retos del futuro requiere una reconsideración de como manejamos el agua en la agricultura, y como se puede reposicionar en un contexto más amplio la gestión y la seguridad de abastecimiento de este recurso.

Incentivos mediante políticas adecuadas y progresivas pueden ayudar a los agricultores a conservar la biodiversidad, proteger los ecosistemas y minimizar los impactos medioambientales de este sector.

La península ibérica es una de las zonas más calurosas de Europa, y las sequías son un fenómeno común en esta zona, la realidad es que estos periodos solo se harán más intensos y duraderos en las próximas décadas. Con una mala gestión y sobreexplotación del agua, España y Portugal necesitan cambiar su modelo y dejar de priorizar los grandes consumos. Las soluciones no están en construir nuevos embalses y aumentar la superficie de los cultivos, esto es una política inadecuada que solo aumenta la desertificación en nuestro territorio, ya que esto resulta en una demanda superior a la cantidad de agua disponible. Por otro lado, según datos del Informe Anual de Indicadores del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente, España tiene un 25% de pérdidas en sus redes de suministros. Esto se debe a varios factores; tal como una falta de concienciación sobre la demanda y consumo, una falta de coordinación entre los reguladores de agua y un déficit de inversión y envejecimiento de las infraestructuras (Sandoval, 2017). Está claro, que nuestros intentos para planificar y mitigar el estrés hídrico en el país no se adaptan a nuestra realidad climática. Aproximadamente la mitad de las masas de agua subterráneas, que son clave para abastecer al país, están en mal estado ecológico, tanto por sobre explotación como por contaminación. Asimismo, el 42% de las aguas superficiales (ríos, lagos, transición y costeras) se encuentran en mal estado. (IAGUA , 2017).

En Almería, el desván de Europa dado su clima y que su principal motor económico es el agroalimentario, este problema es incluso más grave. Y lleva sufriendo una crisis hídrica desde hace años, los pozos se están secando, hay una falta de embalses y sus desaladoras ya están en pleno rendimiento. Y con climas cada vez más calurosos, la demanda de agua es incluso mayor y la zona de Almería no tiene suficientes infraestructuras para suministrar esta demanda. En la zona de Roquetas y el Ejido se están esforzando para recuperar acuíferos y

esperan poder ampliar la desaladora del Campo de Dalias en los próximos 2 años, para que pase a producir diez hectómetros cúbicos más para asegurar el riego de los campos vecinos (Maturana, Diario de Almería , 2020). Según la Mesa del Agua de Almería la situación hídrica es crítica y los agricultores demandan inversiones de verdad para seguir produciendo: Sin agua, no hay fertilidad ni ganancias. Una de las soluciones para afrontar esta crisis es la desalinización, que es el proceso de remover la sal de nuestros océanos (NaCl) del agua dulce (H₂O). Este proceso es natural, que ocurre cuando el sol calienta el océano y el agua se evapora, volviendo de nuevo en forma de lluvia al ciclo que se repite una y otra vez.

En estas épocas de incertidumbre es esencial resolver estos problemas con soluciones innovadoras. Para hacer frente a esta crisis en Almería, este estudio se centrará en el diseño de una planta de desalinización de agua salada basada en energías renovables para cubrir con 50% de la demanda de los cultivos Almerienses. Adicionalmente se investigará su impacto ambiental y se realizará un estudio económico, con el fin de reducir el estrés hídrico y fomentar el desarrollo sostenible de la localidad.

2. LA DESALINIZACIÓN EN ESPAÑA

El agua tiene una gran importancia ambiental, social y económica. Asimismo, la desalinización presenta numerosos puestos de trabajos, desde la gestión del agua hasta el cumplimiento de estándares sanitarios para el uso de esta. Fomentar la desalinización es proteger la salud de los ciudadanos y la del medio ambiente.

España es un país puntero en el desarrollo de tecnologías de desalinización, ya lleva obteniendo agua a través de estos métodos desde hace más de 40 años. En el 2019, España ocupaba el cuarto puesto en todo el mundo en cuanto a capacidad instalada. En el mismo año, España produjo alrededor de 5.000.000 m³/día para el abastecimiento en hogares, riego y uso industrial (AEDyR, 2019). Para tener una idea de la cantidad de esta cifra, según el Instituto Nacional de Estadística, el consumo medio por habitante y por día es de 136 litros (INE, 2016), esto quiere decir que se podría abastecer más de 36 millones de personas, siempre que estén ubicadas en la costa, que es el 78% de la población española con la producción de agua a través de las plantas de desalinización instaladas en la Península.

Según la Asociación Española de Desalinización y Reutilización (AEDyR), España tiene instaladas 765 desalinizadoras con una producción superior al 100 m³/ día (405 plantas de agua salobre y 360 de agua de mar). En la tabla 1, se puede observar un desglose de las plantas de desalinización instaladas en España y sus capacidades correspondientes.

Tipo	Capacidad (m³/día)	Cantidad
<i>Grande</i>	10.000 – 250.000	99
<i>Mediano</i>	500 – 10.000	450
<i>Pequeño</i>	100 - 500	216

TABLA 1. CAPACIDAD VS CANTIDAD DE LAS DESALIZADORAS

En zonas como las del mediterráneo, con una población elevada y sus dos principales motores económicos siendo el agrícola y el turismo, la desalinización propone otro importante empuje para el desarrollo en zonas con escasez de este recurso. La desalinización en España empezó en Lanzarote en 1964 y en el presente las islas canarias siguen apostando por esta tecnología. Gracias a un decremento en el consumo energético y una considerable reducción en los costes de inversión y operación de esta. Además de una subvención por parte de la consejería de transición ecológica de 8,5 millones de euros para el funcionamiento de 23 plantas. El agua desalada del océano atlántico se ha convertido en el principal recurso hídrico para el abastecimiento urbano y turístico de canarias, con un total de 128 millones de m³ suministrados cada año (Gobierno de Canarias , 2021). Por otro lado, en el mediterráneo Aqualia planea recuperar la desaladora abandonada en el 2011, con objetivos de estar activos a principios del 2022 y producir 20 hm³ cada año, capaz de regar 3.000 hectáreas, equivalente al 10% de la superficie de los cultivos de la provincia de Almería (IAGUA, 2021). En la tabla 2 se pueden observar las desaladoras con mayor producción en la España peninsular.

Nombre	Provincia	Caudal (hm³/año)
<i>Torre Vieja</i>	Alicante	80
<i>El Atabal</i>	Málaga	60
<i>Águilas</i>	Murcia	60
<i>Carboneras</i>	Almería	42
<i>Campo de Dalías</i>	Almería	30,1
<i>Sagunto</i>	Valencia	8
<i>Moncofa</i>	Castellón	10
<i>Marina Baja</i>	Alicante	18
<i>Bajo Almanzora</i>	Almería	15
<i>Oropesa</i>	Castellón	18
<i>Ceuta</i>	Ceuta	11,7
<i>Melilla</i>	Melilla	7

**TABLA 2. CAUDAL DE DIFERENTES DESALADORAS DE ESPAÑA Y SU UBICACIÓN – [ELABORACIÓN PROPIA]
(DOMINGO ZARZO , 2020)**

A partir de la sequía de los años 90, se instalaron alrededor de 300 unidades de pequeña producción para plantas privadas de la agricultura (Zarzo, Campos E y Terrero, 2013). Estas sequías están siendo cada vez más comunes, la del año 2017, que trajo un 30% menos de precipitaciones de lo normal, también es comparable con la sequía de los años 90. Y a falta de precipitaciones la desalinización es una tecnología ideal para facilitar el abastecimiento de agua en zonas geográficas con difícil acceso a este recurso. Este tipo de proyectos reducen la dependencia en trasvases y pozos subterráneos que en estas últimas décadas llevan cargando con un gran aporte del regadío de los cultivos que no podrá sostenerse mucho más.

España utiliza un 21% de agua desalada para la agricultura, esto le hace el mayor país que utiliza esta aplicación para fines agrícolas. (Zarzo, Campos E y Terrero, 2013), en comparación con un 2% a nivel mundial. Una de las ventajas de utilizar agua desalada para fines agrícolas, es que requiere una menor calidad del agua y postratamiento que una planta desaladora para abastecer a los habitantes de la localidad. Por esto es posible obtener precios más bajos en las plantas específicamente diseñadas para uso agrícola. El consenso social de los agricultores que riegan sus cultivos con agua desalada es que es demasiado cara y que solo ciertos cultivos pueden permitirse un suministro 100% de agua desalada, en la tabla 3 se pueden comparar las dotaciones y precios de una comunidad de regantes en Almería. Se puede observar que es cierto que el agua desalada es más cara que la de otros suministros, pero los costes del

agua hay que compararlos con la productividad del tipo de agua en diferentes cultivos. Ya que ciertos cultivos necesitan menos demanda de agua y pueden sacar más beneficios por metro cubico.

<i>Fuente de agua</i>	Dotación (Hm³/año)	Conductividad del agua (μS/cm)	Coste del agua (€/m³)
<i>Trasvase Tajo-Segura</i>	5,32	2000	0,11
<i>Trasvase Negratin</i>	5	1300	0,23
<i>Pozos</i>	1,5	3500	0,09
<i>Agua desalada</i>	4,5	300	0,34

TABLA 3. COSTOS DE AGUA VS FUENTE - [ELABORACIÓN PROPIA] (DOMINGO ZARZO , 2020)

Sí que es cierto que algunos cultivos son inviables económicamente para ser suministrados por agua desalada, ya que tienen una demanda de agua bastante alta, como es el arroz, los almendros y el algodón. Pero para las tierras de cultivos de hortícolas protegidos, que es el cultivo mayoritario de la zona de Almería, su productividad económica del agua es de 6,97 €/m³ (que es el rendimiento económico por cada metro cubico suministrado) y teóricamente los productos con una productividad económica del agua de 1€/m³ pueden soportar el precio del agua desalada (Martinez, 2020). Pero también hay que tener en cuenta que la mayoría de las plantas desalinizadoras cuentan con subvenciones, y uno de los mayores retos de esta tecnología es que su precio sea competitivo con los de las otras fuentes de agua, ya que los costes de desalinización reales oscilan entre 0,5 y 1 €/m³ (Acuamed, 2017) el precio va variando, dependiendo de la capacidad instalada. Siendo las plantas con mayor capacidad las que tienen el precio más barato. Otros de los factores que afectan al precio de las plantas desaladoras es el consumo energético, la energía conlleva casi la mitad del total de los costes. Con la volatilidad del precio del petróleo y la dependencia que tiene España de los combustibles fósiles, es clave combinar medidas de eficiencia, reutilización del agua y energías renovables en este sector. En la figura 1 se puede observar la evolución de la relación entre capacidad instalada y consumo energético en España entre los años 1970 y 2010.

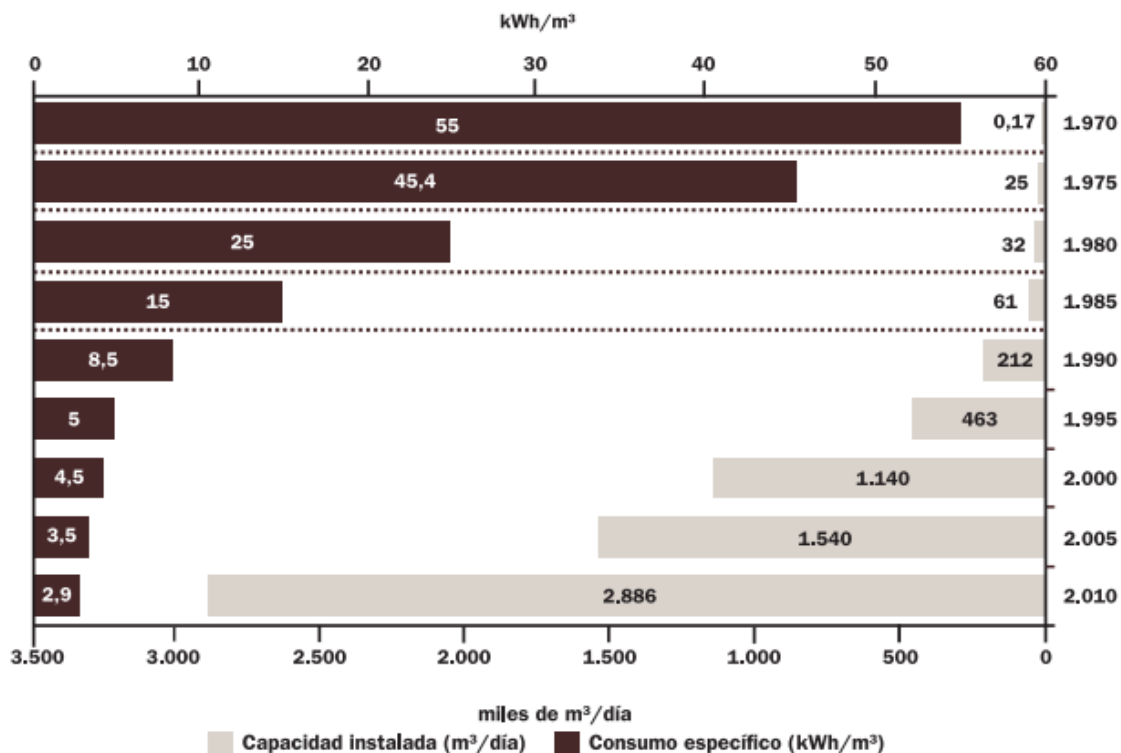


FIGURA 1. CAPACIDAD INSTALADA VS CONSUMO ENERGÉTICO DURANTE LOS AÑOS 1970 Y 2010 (ACUAMED, 2017)

Como se puede ver el sector de la desalinización esta exponencialmente creciendo, también hay una correlación entre una bajada de precios y el incremento de la capacidad instalada, esto se debe a las innovaciones tecnológicas de la época y el descubrimiento de nuevos materiales y métodos para desalinizar que bajó el consumo energético de 55 kWh/m³ a 2,9kWh/m³. Para hacernos una idea, el consumo medio diario de un hogar español es de 9kWh, 1,35 € o 3,6 kg/CO₂ (REE, 2020) esto significa que cada hogar podría generar 3100 litros diarios de agua con la electricidad que consume. A parte de reducir el consumo de energía, es importante trabajar en la reducción de los impactos ambientales, de la que se profundizará más adelante.

En sitios como Almería, con una abundancia en recursos energéticos sostenibles como la radiación solar y sus residuos agrícolas, es posible obtener una ecuación para obtener recursos hídricos con energías limpias a un precio asequible. Según el presidente de AEDyR, Domingo Zarzo el límite del consumo energético está en torno a 1 kWh/m³ para agua desalada del mar, que es limite termodinámico para la desalinización, a pesar de los esfuerzos innovadores para ahorrar energía usando nuevos materiales y nanotecnologías, es la física la

que tiene la última palabra, ya que solo nos permite avanzar en pequeños escalones (Zarzo, 2017). Para entender mejor los avances tecnológicos que se han vivido en estas últimas décadas a continuación, se estudiarán las diferentes tecnologías que hicieron esta bajada de precio posible, facilitando la expansión de este sector a nivel global y nacional.

3. TÉCNICAS DE DESALINIZACIÓN

Todos sabemos que la sal se disuelve en el agua, pero cuando vemos este proceso microscópicamente, el agua está reaccionando con la sal, y rompiéndola para formar partículas cargadas que interactúan en un nivel químico para formar agua salada, intentar separar la sal de esta solución no es un proceso sencillo, pero existen varias técnicas que se han desarrollado durante los años para hacerlo posible. Las tecnologías de desalinización nos ayudan a conseguir un ahorro y eficiencia en el uso del agua, por otro lado, también nos aportan una seguridad de abastecimiento y calidad de este líquido. Los orígenes de esta tecnología se remontan a la época histórica de la antigua Grecia de Aristóteles, en esos años ya existían estudios teóricos que usaban alambiques para la destilación. Además, nos dan la oportunidad de generar agua potable de calidad para la agricultura, de manera efectiva e independiente del clima.

Hay un número significativo de tecnologías disponibles para la desalinización del agua, la mayoría son comerciales, sin embargo, hay otras que se están desarrollando en el laboratorio. La elección de la tecnología depende bastante de la calidad del agua, la demanda de energía y el valor económico del agua recogida.

La desalinización térmica es el proceso más antiguo que es simplemente calentar el agua, recoger ese vapor y convertirlo en agua fresca. El otro método es la desalinización por membranas, que no necesita calor, pero si mucha presión para hacer pasar el fluido por una membrana semipermeable, con diversas capas, donde el fluido pasa con el fin de lograr un producto libre en sales. A lo largo de los años se descubrieron otras formas para eliminar la sal y otras sustancias dañinas para el cuerpo humano. En este apartado se estudiarán las tecnologías más importantes en profundidad para profundizar y comparar cuál de ellas sería la más adecuada para el diseño de la planta.

3.1 Desalinización por membranas

3.1.1 Osmosis inversa

La osmosis inversa es el proceso que tiene la mayor ventaja, ya que es el proceso que mejor balancea los costes de la inversión con la calidad del agua producida. El proceso se puede dividir en varias etapas:

- Pretratamiento
- Osmosis inversa
- Recuperación de energía
- Postratamiento de agua desalada
- Vertido de salmuera

A continuación, se explicarán cada una de estas fases.

3.1.1.1 El pretratamiento

Después de la toma de agua de mar, el líquido se enfrenta a un tratamiento que depende de la calidad del agua. Con tratamientos físicos y químicos se puede asegurar la retención de las partículas sólidas en el agua salada y asegurar que el líquido llegue a las condiciones óptimas (físicas y químicas) antes de llegar al proceso de osmosis inversa. Esto se consigue con filtros de arena y de carbón activo, el carbón activo es un material natural con millones de cavidades microscópicas donde las moléculas se ven atrapadas, ajustando el pH e impidiendo desarrollos biológicos en el sistema, removiendo sabores y olores. Además, en el tratamiento químico también se suele incluir disolventes para evitar el atasco de las membranas y bisulfito sódico para eliminar el cloro residual.

3.1.1.2 Osmosis inversa

La osmosis es un proceso natural, en el que un líquido derivado de una solución menos concentrada pasa por una membrana semi permeable, hasta otra solución de mayor concentración, hasta alcanzar su equilibrio. El proceso inverso, requiere una presión exterior superior a la presión osmótica, la presión osmótica es ese impulso natural que obliga al agua a pasar de un lado a otro. Esta presión obliga al líquido a pasar por la membrana e ir al contrario del proceso natural de osmosis. El proceso de conversión de agua salada tiene una

eficiencia de alrededor de un 45%, básicamente, para obtener 45 partes de agua desalada es necesario tomar 100 de agua bruta (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2018). Esto significa que un 55% del agua a presión pasa a convertirse en salmuera, que es un agua con una alta concentración de sal.

En la figura 2 se puede observar un sistema de desalinización por osmosis inversa con todas sus etapas.

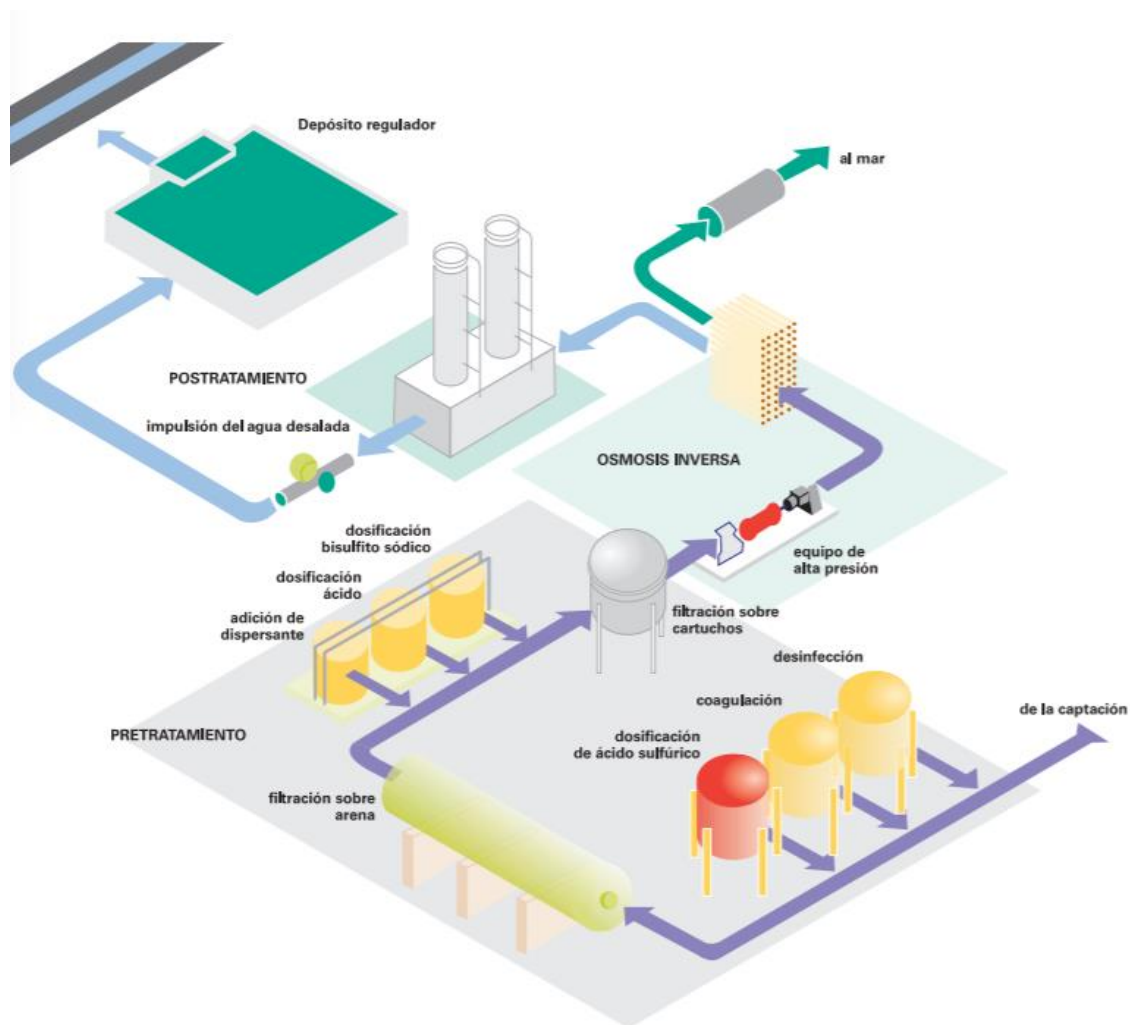


FIGURA 2. ESQUEMA DE UN SISTEMA DE DESALINIZACIÓN POR OSMOSIS INVERSA (ACUAMED, 2017)

Como se puede ver en la figura 2, una o más bombas de alta presión son necesarias para producir la presión necesaria para desalinizar el agua de mar, la presión necesaria está entre 65 a 70 atmósferas. Cuanto mayor sea esta presión, el flujo de permeado aumenta proporcionalmente. En las grandes plantas de desalinización suele haber entre 5 y 7 membranas, cuando el agua entra en la primera membrana a la presión de trabajo, y pasa a

la siguiente, el agua abra aumentado su salinidad y abra perdido presión por perdidas de rozamiento en las paredes de las tuberías, por estas razones la segunda membrana tendrá un rendimiento inferior que la primera y así sucesivamente, por eso es necesario trabajar a presiones tan altas, cuantas más membranas, más presión se necesita y por lo tanto más energía. Finalmente, los sistemas de desalinización a partir de osmosis inversa requieren de un suministro constante de energía para evitar el envejecimiento de sus membranas.

3.1.1.3 Recuperación de energía

Con el fin de reducir el consumo energético del proceso de desalinización, se introduce un sistema de recuperación de energía o cogeneración en la bomba de alta presión, esta instalación reduce considerablemente el consumo energético. Devolviendo la energía a los equipos que alimentan el proceso de osmosis inversa, reutilizando el calor para generar presión. De esta forma, se ha pasado de un consumo de 8kWh/m^3 en los años 80 a 3.5kWh/m^3 en el 2007 (ACUAMED, 2007). En estudios más recientes de diferentes Universidades Australianas se confirmó que usando turbinas de recuperación de energía el consumo de electricidad por metro cubico es de $2,8\text{ kWh}$, sin embargo, con intercambiadores de presión el consumo energético puede bajar a $2,2\text{ kWh/m}^3$ (Stewart Burn, Manh Hoang, Domingo Zarzo , 2015). Está claro que el precio de desalinización depende del precio de la energía, y el coste de la energía varía dependiendo de la tecnología utilizada para generarla. Si la planta está conectada a la red, una estrategia para reducir los costes de electricidad sería maximizar la producción del producto en horas valle, si la demanda lo permite.

3.1.1.4 Postratamiento

Un postratamiento es necesario ya que el agua tratada por osmosis inversa tiene un pH sutilmente ácido, con un desequilibrio iónico y alto contenido de CO_2 . Asimismo, el postratamiento dependerá de la utilidad del agua desalada. Diferentes tecnologías y procesos se utilizarán para alcanzar la calidad suficiente del agua, ya que el postratamiento variará dependiendo si la planta desea agua potable, de regadío o para otros procesos diferentes. En el caso de la agricultura, el agua de los cultivos se basa en un equilibrio entre sodio, calcio y magnesio para garantizar una buena filtración en el suelo. Además, es necesario eliminar el

boro, ya que presenta un problema para las plantas. La conductividad eléctrica también debe de ser alterada, para mantener un valor de 0.3dS/cm (deciSiemens por cm) (Lenntech, 2009). Finalmente, una desinfección del líquido no es requerida, pero este proceso si es obligatorio para consumo humano.

3.1.1.5 Tratamiento de salmuera

Como se ha mencionado anteriormente los desperdicios del proceso de desalinización incluyen salmuera concentrada. Estos desperdicios se pueden tratar de formas diferentes:

- Desechados directamente al mar (este método amenaza a los ecosistemas y no es recomendado. Ya se está penalizando en muchos países por verter salmuera al mar, ya que tiene un gran efecto negativo en la vida marina)
- Mezclar los desperdicios con otros antes de arrojarlos
- Procesar los desperdicios en una planta de aguas residuales para reducir el impacto ambiental.
- Evaporar, secar y desechar los desperdicios en montañas de sal

El método de tratamiento de los desperdicios dependerá de la ubicación de la planta

3.1.2 Electrodialisis

Este es un método que se utiliza únicamente para aguas salobres. El fundamento de este proceso es el siguiente, bajo la influencia de un potencial eléctrico las sales disueltas se transfieren a una membrana semipermeable. La electrodialisis es una técnica basada en el transporte de iones a través de membranas semipermeables bajo la influencia de un campo eléctrico, en una pila de electrodialisis convencional, se alternan membranas de intercambio catiónico (CEM) y aniónico (AEM) entre el cátodo y el ánodo (Universidad de Alicante , n.d.), como se puede ver en la figura 3.

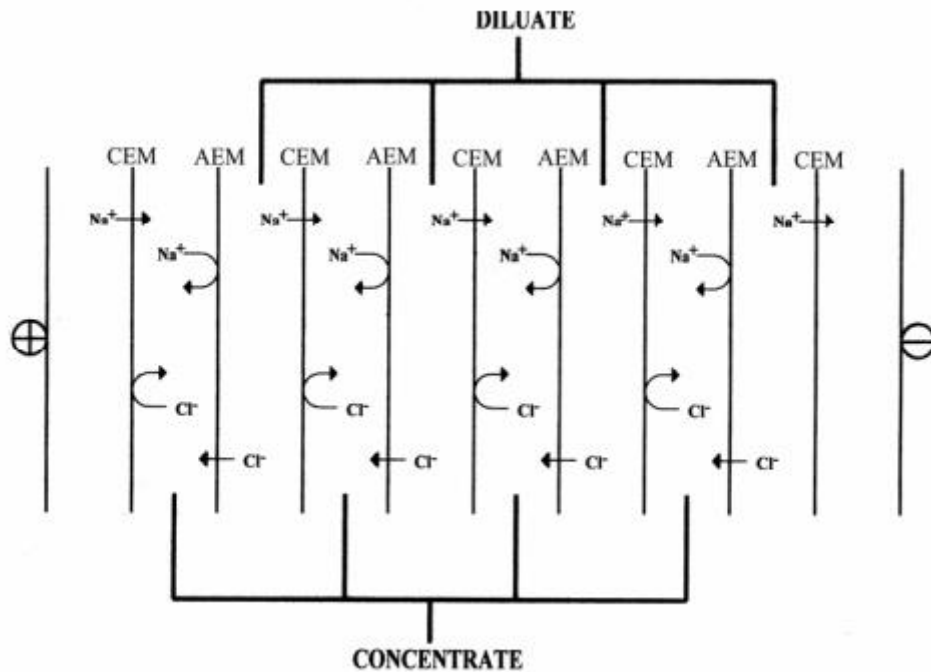


FIGURA 3. ESQUEMA FUNCIONAMIENTO PILA ELECTRODÍALISIS (UNIVERSIDAD DE ALICANTE , N.D.)

Las cargas catiónicas se transfieren a las membranas de intercambio catiónico que solo dejan pasar las cargas positivas y bloquean las negativas. Asimismo, los aniones se mueven al ánodo pasando por la membrana de intercambiador de aniones que solo deja pasar las cargas negativas y bloquea las positivas. Gracias a este proceso, se puede separar los cationes y aniones de la solución concentrada. La electrodiálisis reversible, que utiliza el mismo concepto que la electrodiálisis, pero invierte la polaridad de los electrodos periódicamente para transferir los iones en direcciones opuestas, esto ayuda al lavado de las membranas y complica la formación de incrustaciones, mejorando el mantenimiento y la vida útil de la planta. La planta industrial más grande del mundo de electrodiálisis reversible se encuentra en Abrera, Barcelona, con una capacidad de generar 200.000m³/día tratando el agua del río Llobregat, con un consumo energético de 0,6 kWh/m³ y produciendo agua a un coste de 0,2€/m³ (Stewart Burn, Manh Hoang, Domingo Zarzo , 2015). Es verdad que el precio es bastante atractivo, pero tienen bastantes desventajas:

- En escala industrial, cada célula de electrodiálisis contiene cientos de parejas de membranas de intercambio catiónico y aniónico, añadiendo complejidades al sistema.
- Las membranas y los electrodos tienen una vida corta por la corrosión que sucede en la reacción química.

- Esta tecnología solo elimina las sustancias cargadas, otras partículas no cargadas y potencialmente contaminantes pasaran desapercibidas y acabaran en el producto final.

3.1.3 Nanofiltración

La filtración es un proceso para remover partículas del agua, forzando el líquido por un medio poroso, el tamaño de los poros en la nanofiltración es de 0.01 micrómetros. Con este tamaño es capaz de eliminar la mayoría de las moléculas orgánicas, virus y sales, esto es esencial para mitigar los efectos de la bio-obstrucción de las membranas. La nanofiltración se utiliza también para suavizar el agua, comúnmente conocido como ablandar el agua ya que remueven iones divalentes, y estos hacen el agua más fuerte o dura, como el calcio y el magnesio, este proceso es importante para evitar incrustaciones o formaciones de sarro en las tuberías y equipos. El diseño y operación de la membrana de nanofiltración es muy similar al de Osmosis Inversa pero la nano membrana trabaja a presiones menores y no remueve los iones monovalentes tan eficazmente. Dependiendo de la membrana la nanofiltración eliminará entre un 50 a un 90% de los iones monovalentes, en comparación con la membrana de osmosis inversa que remueve un 98-99% (Water Professionals , 2017) Por esta razón en algunas plantas de tratamiento de agua utilizan la nanofiltración como pretratamiento antes de la osmosis inversa. Los beneficios de utilizar este método para el proceso de pretratamiento son los siguientes (LENNTECH, 2009)

- Se aumenta la vida de la instalación
- Las tareas de mantenimiento se simplifican
- Los costes de empleo son menores

Otras utilidades de la nanofiltración incluyen:

- Eliminación de pesticidas de aguas subterráneas
- Eliminación de metales pesados
- Eliminación de nitratos

3.1.4 Resina de intercambio iónico

La resina de intercambio iónico no se utiliza directamente en la desalinización, sin embargo, juega un papel importante en el pretratamiento del agua para la Osmosis Inversa gracias a su capacidad para purificar, separar y descontaminar soluciones acuosas, removiendo las partículas contaminantes y el boro del agua. El boro es un mineral que es fundamental para nuestra alimentación, pero como todo en exceso puede conllevar a ciertos peligros debido a su toxicidad.

Esta tecnología consiste en dos tipos diferentes, resinas de intercambio catiónico, que intercambian iones positivos cargados como el sodio por calcio y resinas de intercambio aniónico que intercambian iones negativos como el cloruro por el arsénico. Además, las resinas se pueden regenerar con ácidos o sustancias alcalinas, respectivamente. Esto significa que requieren de químicos para su regeneración y puede limitar sus aplicaciones.

3.2 Métodos térmicos

Los métodos térmicos de destilación incluyen tres pasos, que son los procesos que ocurren en una destilación simple. Primero se crea vapor, añadiendo calor a una cantidad de agua salada, se separa este vapor del líquido y finalmente se condensa por la eliminación de este calor. Los procesos de evaporación y condensación ocurren en cámaras distintas.

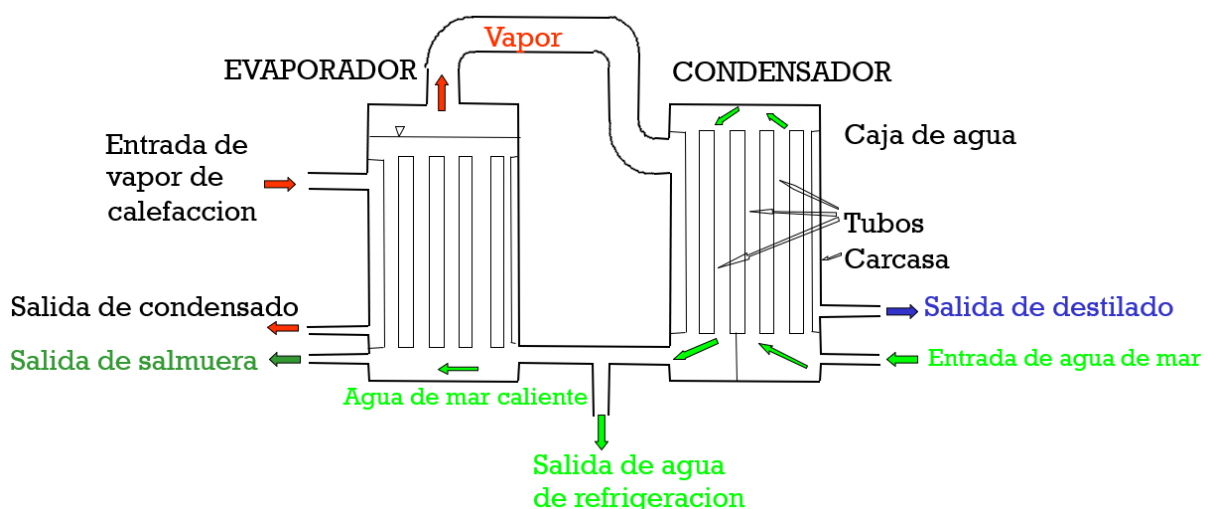


FIGURA 4. PROCESO DE DESTILACIÓN SIMPLE

El vapor se crea dentro de los tubos del evaporador y circula hasta el condensador donde se transforma en estado líquido al contacto con los tubos dentro de la carcasa, que tienen una temperatura menor ya que por estos tubos suele circular agua fría para intercambiar el calor. En la Figura 4 se puede observar el proceso de destilación simple.

3.2.1 Destilación de Múltiple Efecto y Adsorción (MED Y MEDAD)

Como se ha mencionado anteriormente la destilación térmica utiliza la evaporación como método de desalinización, y si se colocan varios evaporadores en serie, se incrementa la producción de vapor producido por la misma cantidad de vapor externo. El primer efecto es alimentado con vapor a 70°- 80°C y en el resto de las fases se utiliza el calor de condensación del vapor producido por la etapa anterior, elevando la temperatura del agua salada desde los 22°C (2° o 3°C por efecto) hasta la temperatura del vapor de alimentación. (Moreno, 2011) Asegurándose que la presión en las cámaras de los evaporadores se mantenga decreciente para asegurar el flujo de calor. Este método de destilación se denomina múltiple efecto y la figura 5 muestra una sección de una planta de destilación de triple efecto y sus diferentes procesos (sin mostrar equipos auxiliares como bombas). Otros ejemplos de destilación multi-efecto, incluyen un condensador dentro del evaporador en vez de solo tener uno al final del sistema.

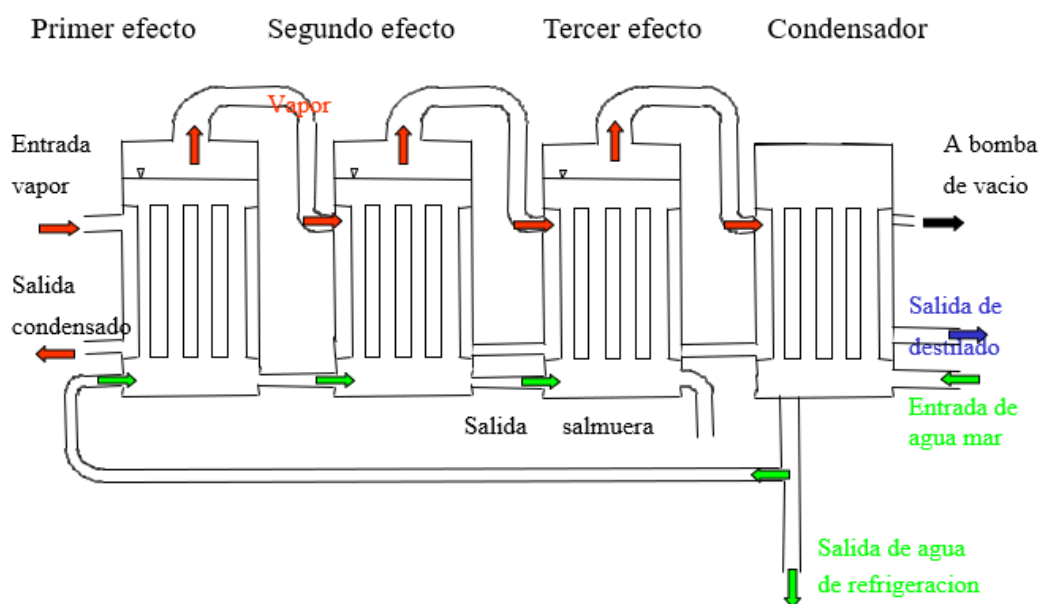


FIGURA 5. DESTILACIÓN MULTI-EFECTO ESQUEMA

Se puede observar en la figura 5 que el vapor producido en el primer efecto proporciona el calor para la evaporación del segundo efecto, para asegurar este flujo de calor, la temperatura del segundo evaporador tiene que ser menor. El resultado del multi-efecto es multiplicar la cantidad de agua producida, ya que la condensación de 1 kg de vapor en el primer evaporador producirá 3kg de agua en el condensador. Además, de reducir la cantidad de energía suministrada a un factor idéntico al número de efectos. Asimismo, el número de efectos está limitado debido a la necesidad de una diferencia de temperatura para el transporte del calor. En sitios áridos donde el agua desalada se necesita más, el agua de salida puede rondar los 28°C, pero incorporando un proceso de adsorción el agua de salida puede llegar a una temperatura de 7°C, aumentando la diferencia de temperatura y a su vez el número de efectos. Y cada efecto puede operar a una diferencia mayor de temperatura aumentando la cantidad de agua potable suministrada. Esta adición al sistema aumentará el consumo energético pero la alimentación de la máquina de adsorción se puede conseguir con energías renovables o el calor residual de sistemas industriales. Con esta nueva innovación aprovechando la excelente sinergia de los efectos, la producción de agua se multiplica de dos a tres veces (Muhammad Wakil Shahzad , 2015) comparado con plantas de multi efecto tradicionales.

3.2.2 Destilación Instantánea en Etapas múltiples (MSF)

La destilación instantánea o 'flash' por etapas múltiples es un proceso térmico para desalar grandes cantidades de agua marina. Se basa en el principio que la temperatura de ebullición del agua es menor cuando baja la presión. El proceso funciona en tanques cerrados (una etapa) donde la presión baja progresivamente. Cuando agua salada precalentada entra en la primera etapa, parte de esta agua se evapora (instantáneamente), formando vapor que se puede condensar a agua potable en intercambiadores de calor en forma de tubos. El resto del agua que no se haya evaporado se recolecta y pasa a la siguiente etapa, donde el proceso se repite. Uno de los sistemas más grandes del mundo con esta tecnología se encuentra en Al-Jubayl, Arabia Saudí, que es capaz de producir más de 750.000 de m³ de agua desalada al día (BRITANNICA , 2015). Este concepto es bastante utilizado en la industria química y petrolera para separar varios compuestos orgánicos de una misma solución líquida. Los principios de este método requieren un intercambio térmico en la mezcla para su funcionamiento, para que la mezcla alcance su temperatura de ebullición y el componente con la mayor presión de vapor se evapore. Esta temperatura es aquella que se alcanza cuando las presiones parciales de los componentes de la mezcla (sumadas en su totalidad) igualan la presión de operación (IQR, 2020). También, hay que mencionar que la evaporación tiene lugar en cámaras que se mantienen al vacío. Tener las cámaras en vacío reduce el consumo energético de los procesos, ya que la presión disminuye. En teoría en un vacío perfecto no habría materia y la presión tendría un valor de 0 bares, ya que la presión es un resultado de la colisión de las partículas y moléculas del gas con las paredes de las cámaras, así que cuantos menos moléculas y partículas menor será la presión. Pero en la práctica se suele decir que un vacío es aquella presión menor que la presión atmosférica, que es alrededor de 101.3 kPa, y esta se puede obtener con bombas de vacío.

3.3 Comparación de rendimientos y costes

La tabla 4 presenta un resumen de las técnicas de desalinización más utilizadas y explicadas anteriormente, como se ha mencionado las técnicas de destilación térmicas; Instantánea en Etapas múltiples (MSF por sus siglas en Ingles) y de Múltiple Efecto (MED por sus siglas en

Ingles) no solo demandan calor, sino también electricidad para llegar a la temperatura de operación correspondiente. Aunque el consumo de electricidad es menor en estas tecnologías, y si se les suma el calor que hay que generar para mantener los procesos en funcionamiento, el sistema se hace más complejo y costoso comparado con la tecnología de membranas.

Tecnología	Tipo de agua	Consumo energético (kWh/m³)	Energía térmica (kWh/m³)	Temperatura de operación (°C)
<i>MSF</i>	Salobre y salada	2,5-3,5	12	90-110
<i>MED</i>	Salobre y salada	1,5-2,5	6	70
<i>Electrodiálisis</i>	Salobre	1,5-4	-	Ambiente
<i>Nanofiltración</i>	Salobre	2,54-3,35	-	Ambiente
<i>Osmosis Inversa</i>	Salobre y salada	2,9-5	-	Ambiente

TABLA 4. CONSUMO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE DESALINIZACIÓN [ELABORACIÓN PROPIA] (BAHAREH KOKABIAN , 2019)

Además, gracias a nuevas innovaciones en los materiales de membrana estas están reemplazando las técnicas de desalinización térmicas. En la actualidad, las tecnologías más utilizadas en la desalinización son la Osmosis Inversa, después viene la Destilación de Múltiple Efecto y la Destilación Instantánea en Múltiples Etapas. Como se puede ver en la figura 6 estas tecnologías tienen el 95% de la capacidad instalada del planeta.

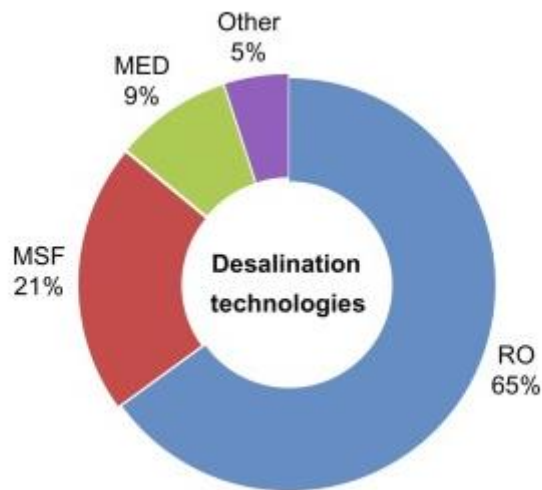


FIGURA 6. TECNOLOGIAS INSTALADAS A NIVEL GLOBAL (BAHAREH KOKABIAN , 2019)

El precio de las plantas de desalinización varía dependiendo de su tamaño y tipo, de la calidad del agua y de donde proviene, la ubicación de la planta, el precio de la electricidad y la vida útil de la instalación. Además, sumando los precios de operación y mantenimiento. Un agua con baja salinidad requiere menos químicos y consumo energético, y gracias a economías de escala, instalaciones más grandes reducen el coste de la unidad de agua producida.

En la figura 7 se puede observar un análisis de los costes de operación entre las 3 tecnologías más utilizadas para la producción de agua en la agricultura. Se puede ver que el precio relativo (en dólares americanos) es menor en la Osmosis Inversa, debido a que no requiere un aporte de calor.

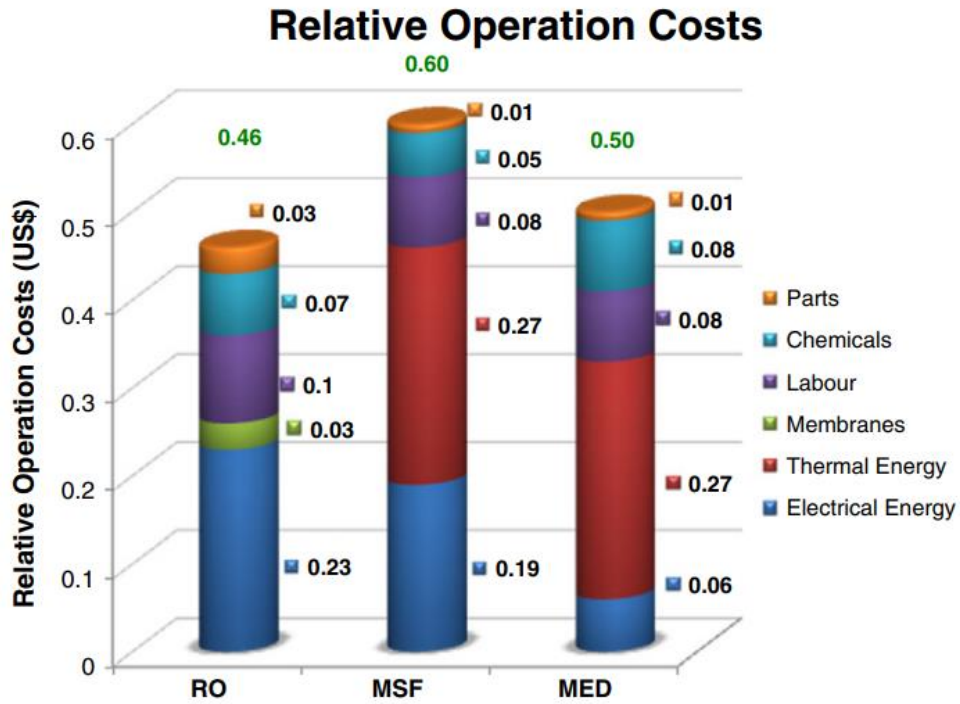


FIGURA 7. COSTES RELATIVOS DE OPERACIÓN (STEWART BURN, MANH HOANG, DOMINGO ZARZO , 2015)

Pero los costes asociados a plantas de desalinización y a la mayoría de los proyectos energéticos suelen estar divididos en dos: Los capitales iniciales y los costes anuales de operación. La tabla 5 muestra los costes de capital y operación (que fueron convertidos de dólares australianos del 2015 a euros del 2021).

Parámetro	Osmosis Inversa (Agua salada)	MED
Capital Inicial (€/m ³ /día)	1378 – 2151	2152 - 3359
Costes de operación (€/m ³ /día)	1,63 - 1,89	Con cogeneración: 0,47 - 0,82
		Sin cogeneración: 1,55 - 2412

TABLA 5. COSTES DE CAPITAL Y OPERACIÓN (OI Y MED) (STEWART BURN, MANH HOANG, DOMINGO ZARZO , 2015)

Las plantas de desalinización de agua salada por osmosis inversa son las más utilizadas por alguna razón, tienen un menor coste inicial y suelen tener un menor coste de operación. La distribución de estos costes de operación y capital inicial se pueden ver en la figura 8.

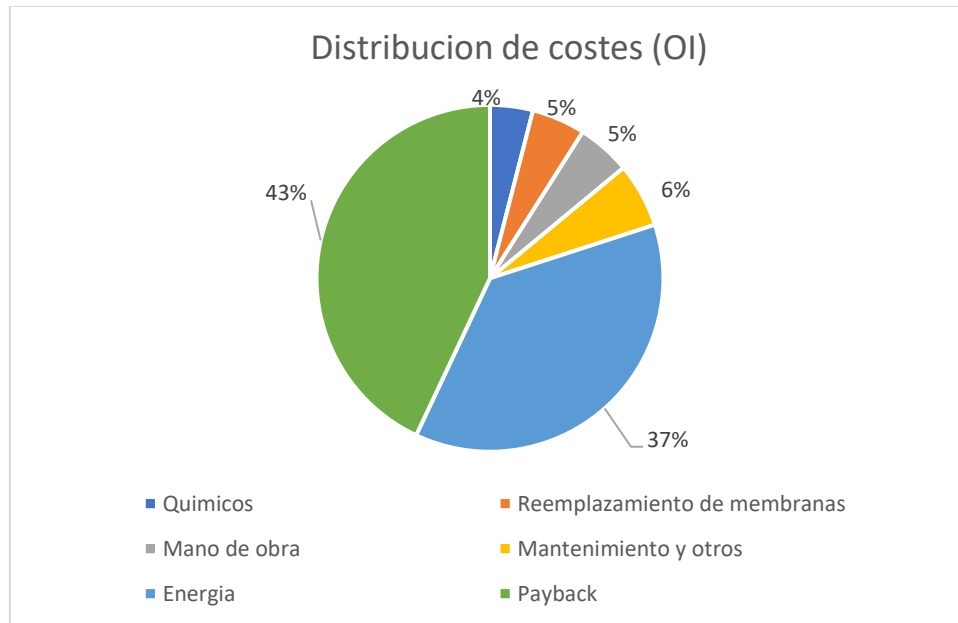


FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN COSTES OI [ELABORACIÓN PROPIA]

Se puede observar que la energía y la amortización de los costes ocupan más de tres cuartos del total, y esta energía se suele sacar de fuentes como el Gas Natural o directamente de la Red Eléctrica. Con el fin de disminuir la dependencia en los combustibles fósiles, y fomentar el desarrollo sostenible en el siguiente apartado se estudiará el potencial que tienen las energías renovables en este sector para reducir la huella de carbono del agua producida.

4. ENERGÍAS RENOVABLES EN LA DESALINIZACIÓN

Las energías renovables ofrecen una solución amigable con el medioambiente para ofrecer un abastecimiento seguro de electricidad en tiempos donde las reservas de combustibles fósiles perjudican la sostenibilidad de la economía global. Asimismo, la integración de las renovables en la purificación del agua está siendo cada día más atractiva. Ya que, en áreas donde se carecen de estos recursos hídricos suelen estar acompañados con abundante energía solar, como es el caso de Almería. Además, según la Agencia Internacional de la energía (IEA) la energía solar es la forma más barata de producir electricidad, incluso por

debajo del precio del carbón y el gas (Evans, 2020). Esto hace posible la penetración de las energías renovables en este sector, ya que los precios de producción se abaratarían. Este apartado se centrará en estudiar los últimos avances tecnológicos y esfuerzos en la integración de las energías renovables en la desalinización, centrándose en los recursos renovables de la zona de Almería. La idoneidad de acoplar las energías renovables a la desalinización depende de la exigencia de los procesos y la forma de energía que se puede obtener del recurso a considerar. Por eso un estudio de las diferentes tecnologías y su potencial en la desalinización es importante antes de diseñar una planta industrial de este tipo.

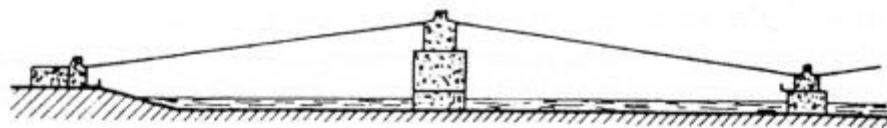
4.1 Energía Solar

El uso de la radiación solar para la desalinización se puede dividir en tres tecnologías:

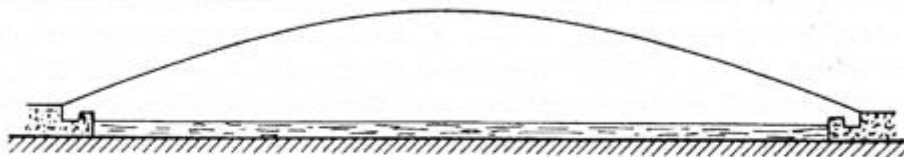
- Destilación Solar (Solar Stills)
- Colectores solares para la generación de calor en plantas de MED y MSF
- Fotovoltaica para la generación de electricidad en plantas de Osmosis Inversa y Electrodiálisis

4.1.1 Destilación solar (Solar Stills)

La destilación solar utiliza la radiación directa de la energía solar para desalinizar el agua mediante la evaporación. La construcción de este tipo de plantas es muy simple y son muy útiles en zonas o países con recursos económicos y técnicos limitados. El diseño de estas plantas es muy similar a un invernadero, la energía solar entra a través de un cristal o plástico y calienta una cuenca de agua salada. Donde se evapora y luego se condensa en las paredes de cristal y finalmente las gotas de agua limpia son recolectadas para su uso. Una buena regla de tres es que, por cada metro cuadrado de suelo, este método produce 4 litros de agua fresca al día (Mohamed A. Eltawil , 2009) por eso es importante utilizar materiales baratos en su construcción para minimizar los costes de capital. Ya que requieren una gran cantidad de terreno y tienen un rendimiento bajo. Como se puede ver en la figura 9 existen diferentes diseños de la cubierta para conducir las gotas del agua a los colectores.



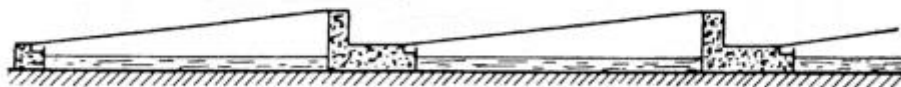
Diseño Básico



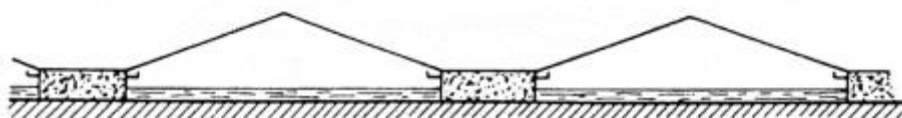
Solar Still de cubierta inflada



Solar Still de cubierta plástica tensionada



Cubierta de vidrio inclinada



Solar Still tipo invernadero

FIGURA 9. MODELOS DE SOLAR STILL (EDUARDO ZARZA MOYA, 2006)

Una de las ventajas de este método es que tiene unos costes de mantenimiento bajos gracias a que no tienen partes móviles, por eso no requieren mucha atención ni habilidades técnicas en su explotación. Por esto, la destilación solar es muy atractiva en sitios como África, Asia y núcleos rurales de países mediterráneos, con abundante radiación solar, problemas de sequía y un alcance ilimitado a recursos de construcción. Por estas razones un sistema Solar Still requiere que (Eduardo Zarza Moya, 2006):

- Sea fácil montarlo en campo
- Este construido con materiales locales
- Sea ligero y fácil de manejar,
- Que no requiera un consumo energético externo
- Que sirva simultáneamente para captar agua de lluvia y que esté construido con materiales que no contaminen el agua destilada.

4.1.2 Captadores solares y concentración de energía solar térmica

Los captadores solares absorben la radiación solar y la convierten en energía térmica, que se puede utilizar directamente o convertirla en mecánica o eléctrica indirectamente. Estas tecnologías concentran la energía solar con sistemas centrales de torres y reflectores para generar electricidad mediante vapor.

Un sistema muy utilizado son los colectores parabólicos, diseñados con una curva para reflejar el calor a un receptor ubicado en la línea focal del colector, estos sistemas siguen el movimiento del sol y sus componentes principales se pueden dividir en; espejos, receptores y un motor, con una temperatura de trabajo de 100 a 400°C. Estos sistemas transfieren la radiación solar a un fluido, normalmente agua, la energía térmica de este fluido se utiliza para evaporar el fluido de trabajo del ciclo de Rankine (el fluido secundario) que impulsará una turbina que producirá energía mecánica para operar las bombas de presión de los sistemas de Osmosis Inversa. Además, el calor solar se puede almacenar durante el día en materiales como el cemento o la cerámica para luego utilizarla por la noche para producir electricidad. Un esquema de la operación de este sistema, con recuperación de energía se puede ver en la figura 10.

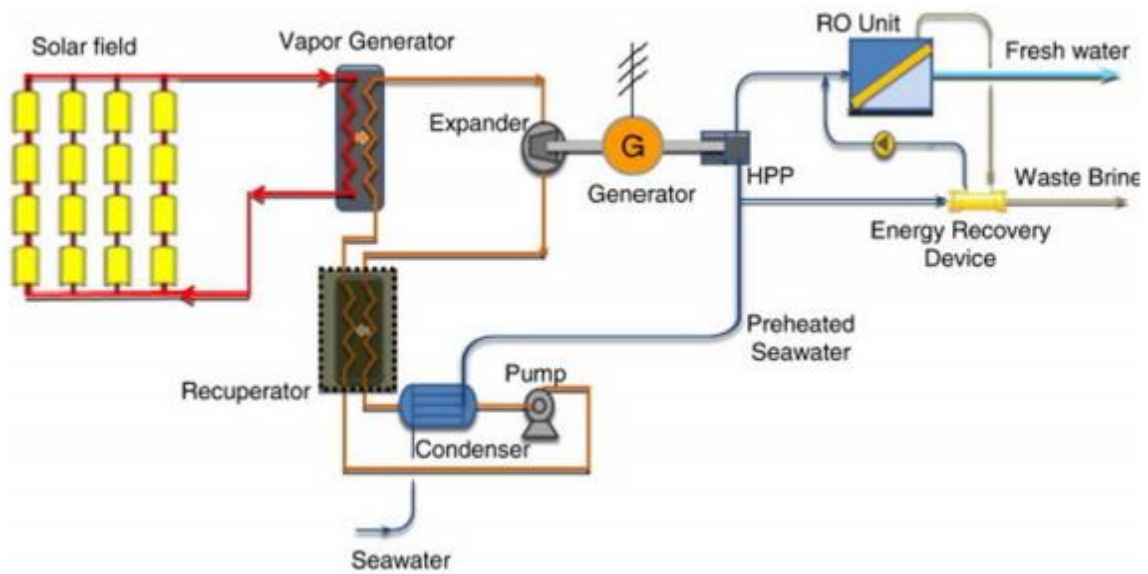


FIGURA 10. ESQUEMA OI CON CAPTADORES SOLARES (MOHAMMAD ALI ABDELKAREEM, 2018)

Sin embargo, esto no significa que la planta de desalinización pueda operar a un ritmo constante, si la planta de desalinización está siendo abastecida por electricidad, la capacidad de la planta dependerá de las variaciones diarias y estacionales de los niveles de radiación solar.

4.1.3 Sistemas Fotovoltaicos y híbridos

La energía fotovoltaica está teniendo un crecimiento exponencial en la economía global. Según un informe de la Agencia Internacional de Energías renovables (o IRENA por sus siglas en ingles), entre el 2010-2019, el precio por potencia instalada se redujo un 82% (Lempere, 2020) y esta tendencia no se para aquí. Debido a mejoras en el diseño de los paneles, la mejora de tecnología y menores costos de fabricación, la Agencia Internacional de la Energía (o IEA) previene que la capacidad total de energía renovable del mundo crecerá un 50% entre 2019 y 2024. Y la energía fotovoltaica representara el 60% de este aumento (IEA, 2019). Por esta razón será clave incorporar la energía fotovoltaica en la construcción, desde industrias hasta viviendas pasando por la desalinización. Además, científicos han desarrollado células solares capaces de convertir la luz del sol a electricidad con una eficiencia del 44,5%. Sin embargo, la máxima eficiencia de un panel solar comercial es de 25% (World Economic Forum, 2017), siguiendo este mismo patrón, en el futuro esta barrera se romperá otra vez y

los paneles fotovoltaicos se volverán más efectivos, capaz de absorber diferentes partes del espectro solar, produciendo más electricidad por metro cuadrado.

Los componentes básicos de un sistema fotovoltaico incluyen paneles fotovoltaicos, Inversores DC y un banco de baterías. El acople de la potencia fotovoltaica con la Osmosis Inversa ha generado gran interés a los tecnólogos. Ya que desde los años 80 existen sistemas de recuperación de energía útil de bombas de presión, capaces de reciclar la energía hidráulica de los desechos de salmuera para asistir al bombeo de la entrada de agua salada, (Keefer BG, 1985) optimizando la eficiencia y requiriendo menos potencia fotovoltaica para el bombeo del agua. Esta tecnología es mucho más sostenible que los generadores de Diesel convencionales, además de no producir ningún gas de efecto invernadero después de su instalación, tienen un mantenimiento mínimo, requiriendo solo una limpieza mínima de dos veces al año. Asimismo, con el fin de mejorar el rendimiento se pueden añadir sistemas de seguimiento solar en uno o dos ejes y sistemas de limpieza automática. También existen otros métodos para mejorar el rendimiento de las granjas fotovoltaicas, como sistemas de enfriado, sobre todo en áreas muy calurosas.

Si la planta de desalinización se abastece solamente con un sistema fotovoltaico, un banco de baterías sería necesario para producir un flujo constante de energía durante la noche, para mitigar las variaciones en la producción debido a nubes, días de lluvia y durante la noche. Pero también se puede acoplar con otras tecnologías renovables como la eólica, biomasa o bombeo para reducir la intermitencia y abaratar los costes de electricidad. Modelos matemáticos y diseños de un sistema híbrido Fotovoltaica-Eólica-Hidrogeno para abastecer a una planta de Osmosis Inversa se presentan en (A.Maleki, 2016), los modelos evalúan la posibilidad de abastecer un área de Irán con escasez de agua usando los precios del ciclo de vida de la maquinaria, sin embargo, concluyeron que una planta de Fotovoltaica-Hidrogeno-Osmosis Inversa sería el sistema más robusto y económico de los considerados en el estudio. Cualquier proceso de desalinización explicados anteriormente que consuma electricidad, como la Osmosis Inversa y la Electrodialisis podrá acoplarse a un sistema de generación eléctrica, como es la fotovoltaica.

4.2 Energía Eólica

La conexión de la energía eólica con las plantas de desalinización depende del recurso eólico de la zona y suelen ser más económicos en islas como las Canarias donde se reduce el coste de la producción del agua cuando se compara con los precios de transportar el agua a las islas o utilizar combustibles convencionales como fuente de alimentación. Además de tener acceso a fuertes vientos atlánticos, ofreciendo un gran potencial eólico. Estos sistemas se pueden conectar a la red o directamente a la planta de desalinización donde se ve perjudicada por las variaciones del viento, y donde se necesitaría un sistema de apoyo como generadores diésel, baterías o flywheels (Mohamed A. Eltawil , 2009). Debido a estas características, la tecnología de desalinización preferida para la energía eólica sería la Osmosis Inversa, por su bajo consumo energético. Pero en aguas salobres la electrodiálisis empieza a ser más interesante, estudios tecnológicos y test experimentales instalados en el Instituto Tecnológico de Gran Canarias han acoplado un parque eólico (conectado a la red eléctrica) a un sistema de desalinización por electrodiálisis, con una capacidad de 72 a 192m³/día. (Penate B. Castellano, 2001). Pero debido a la intermitencia de la energía eólica, esta tecnología funciona mejor trabajando con otros recursos renovables. Como el Sistema Integral VF ideado por el gran escritor español e inventor Alberto Vázquez-Figueroa, donde utiliza el bombeo eólico para llevar el agua a una altura de 600m en horas valle, permitiendo la desalinización por Osmosis Inversa por presión natural, a costes muy bajos. Y simultáneamente dejar caer el agua a una turbina para generar electricidad en horas punta (Energética Futura , 2010). Con este sistema el m³ de agua costaría al agricultor 0,08 euros y se puede reducir su precio (hasta los 0,05 euros) dependiendo de la cantidad de energía que se devuelva a la red. (Energialis , 2018) La figura 11 muestra como funcionaria el diseño.

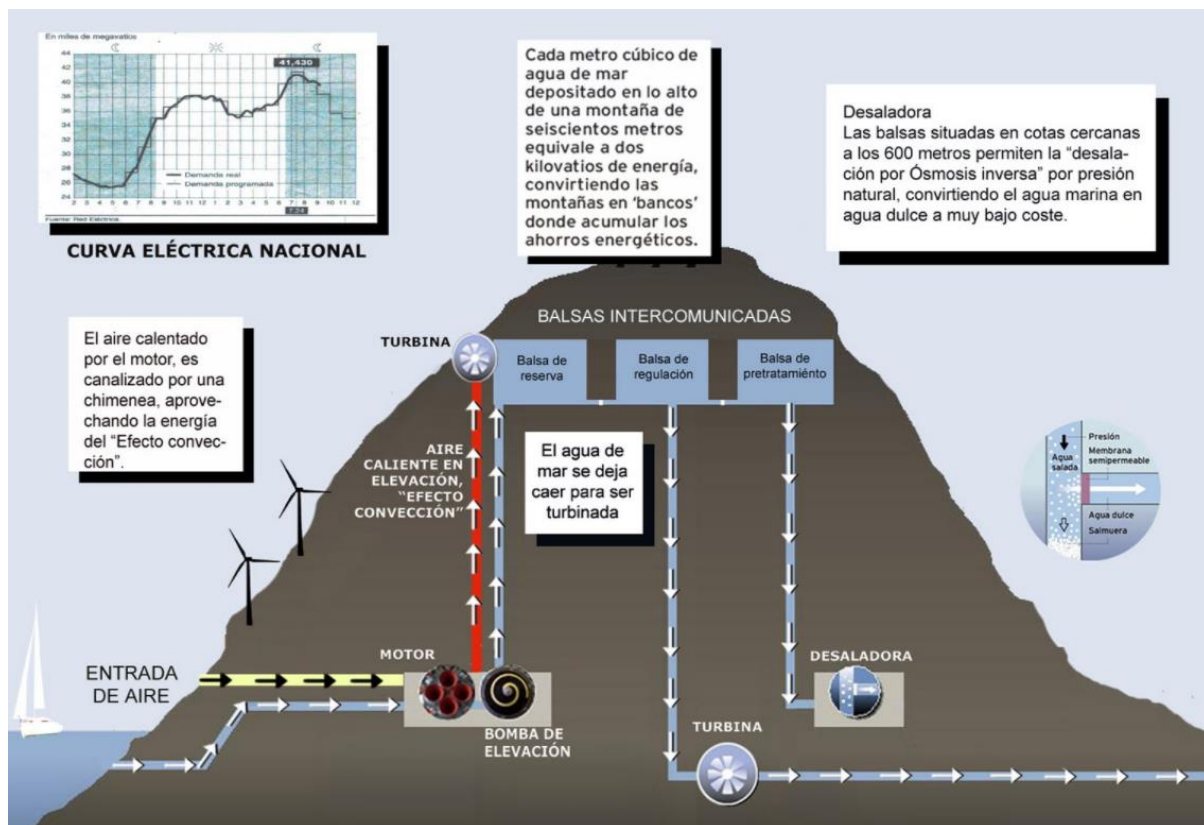


FIGURA 11. ESQUEMA PLANTA DESALINIZACIÓN VAZQUEZ-FIGUEROA (ENERGETICA FUTURA , 2010)

A parte de un precio increíblemente bajo, este sistema también tiene la ventaja de estabilizar la curva eléctrica nacional, mitigando el estrés en la red eléctrica. En Almería, según un estudio realizado por la Junta de Andalucía, en el Potencial de Centrales Renovables de la zona (Junta de Andalucía , 2020), estima que tiene una superficie disponible de 50.000 hectáreas de terreno donde se podrían instalar 2.489MW de potencia aprovechable eólica. Que es un 10% de la potencia eólica de la comunidad autónoma, con Cádiz y Sevilla teniendo más del 61%. Pero sería más interesante económica y tecnológicamente estudiar tecnologías más estables y que no requieran un apoyo externo para su utilización, como es la energía geotérmica.

4.3 Energía Geotérmica

La energía geotérmica se obtiene mediante el aprovechamiento del calor procedente del interior de la tierra, este calor se encuentra en estado líquido (agua), gaseoso (vapor) o sólido (rocas calientes). Y esta energía se puede utilizar para calefacción, acondicionamiento o para generar electricidad. En la generación de electricidad se necesitan temperaturas altas, que se suelen encontrar a una gran profundidad o cerca de placas tectónicas activas. Esta energía

renovable cubre una porción significativa de la demanda de electricidad en países como Islandia, El Salvador, Nueva Zelanda, Kenia y las Filipinas. Además de proporcionar más del 90% de la calefacción en Islandia, esta tecnología tiene 14.050 MW de capacidad instalada en todo el globo (IRENA, 2020). Y tiene un gran potencial, ya que no es intermitente como son la radiación solar o el viento, convirtiéndola en una tecnología muy atractiva para la desalinización, ya que tiene un suministro estable y fiable. Esta energía proviene del interior de la tierra, y la temperatura aumenta cuanto más profundidad se alcance. Esta proporción se llama gradiente geotérmico, durante los primeros kilómetros de la corteza, la temperatura aumenta unos 3°C por cada 100 metros (ICGC, 2020)

Además del potencial de la energía geotérmica en otras aplicaciones industriales y domésticas, esta tecnología es ventajosa para la desalinización por las siguientes razones (GUDE V.G, 2016)

- Estas fuentes proporcionan un suministro de calor estable y seguro
- Alto factor de capacidad
- Una fuente de geotérmica de media temperatura puede generar calor de 70 a 90°C, que es la temperatura ideal para la desalinización por Destilación de Efecto Múltiple. Además, existen yacimientos con temperaturas superiores a 100°C, perfectas para la generación de electricidad.
- No genera ningunas emisiones contaminantes, lo que la hace la energía renovable más sostenible
- Reduce el consumo de energías fósiles, incentivando el abastecimiento local y seguro de electricidad.

Esta tecnología en España ha estado frenada debido a una gran inversión inicial y hoy no existe ninguna planta de producción de electricidad de Geotérmica. En la figura 12 se puede ver las diferentes zonas de la península con potencial geotérmico.

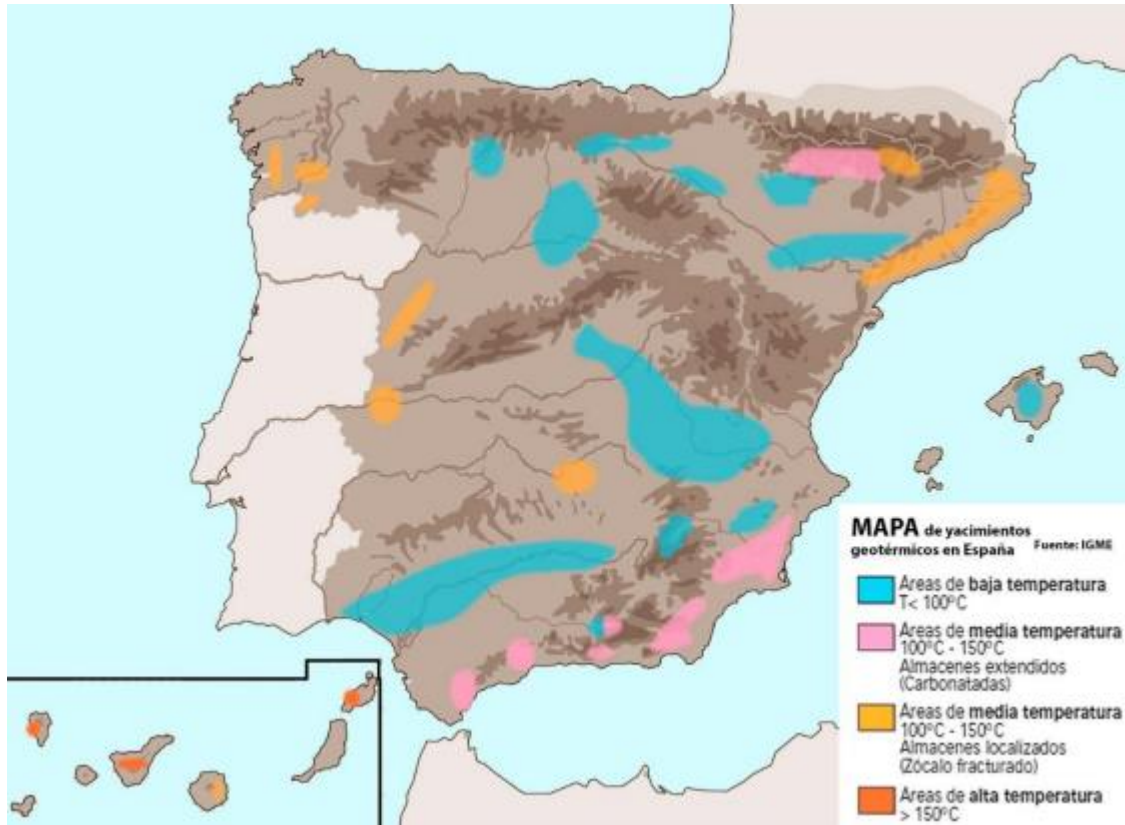


FIGURA 12. MAPA YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS (JAIME MARCOS, 2012)

Como se puede observar la zona Andalucía tiene áreas potenciales de media temperatura, esto es debido a la fricción entre las placas del zócalo y la cantidad de materiales graníticos (Avatar Energía, 2018). En Níjar, Almería se hayo un yacimiento geotérmico, entre las fallas de Carboneras y la fractura de Sierra Alhamilla donde a través de un intercambiador de calor podría generar electricidad y calor con el fin de calefactar los invernaderos para aumentar el rendimiento de los cultivos. Este hallazgo ha sido viable a 490 metros, con una temperatura media de $41,8^{\circ}\text{C}$, un gradiente térmico de $8,87^{\circ}\text{C}$ cada 100 metros y un caudal de promedio de 22,72 litros por segundo (Simón, 2017) pero por problemas de administración y burocráticos, todavía no se ha desarrollado la planta, a pesar de ser económicamente viable y tener un tiempo de amortiguación de dos años. Además de tener un potencial enorme para la generación de electricidad, calefacción y frío, teniendo a países como Islandia y Nueva Zelanda de referencia, el desarrollo de esta tecnología en la península sigue en su infancia.

4.4 Biomasa y poligeneración

La biomasa se considera como aquellos recursos energéticos de tipo renovable que originan a partir de una materia orgánica de tipo biológica. En teoría, también se caracteriza por ser una energía carbón neutral, ya que los gases que emiten durante su combustión y transporte son compensados por el carbón que atrapa en el suelo durante el crecimiento del recurso orgánico. La ventaja de la biomasa es que se puede utilizar para generar calor, electricidad, cogeneración, poligeneración y para procesos industriales como la desalinización. La biomasa es un recurso muy importante en nuestra sociedad, y sobre todo en países subdesarrollados donde dependen de la biomasa para cocinar y calentar sus hogares. Según la Agencia Internacional de la Energía la producción de biocombustible en 2018 fue de 154 billones de litros (546TWh) y se estima un incremento del 6% cada año hasta 2030, llegando a 1168 TWh, pasando por 922 TWh en 2025 (IEA, 2020), para visualizar esta cifra, Alemania es el octavo país que más electricidad consume, un total de 413 TWh, y China está en cabeza con 6011 TWh, por debajo esta EE. UU con 3901 TWh (IEA, 2020)

Para combatir la variabilidad de las energías renovables, la poligeneración es una estrategia sólida, generando más de una forma de energía para equilibrar la producción, reducir los costes de producción y los gases de efecto invernadero. La combinación de un sistema solar-biomasa se complementa durante todo el año, con la combinación de la biomasa para estabilizar la variabilidad de irradiación solar de las estaciones. En un estudio de la Universidad Tecnológica de Delhi (U.Sahoo, R. Kumar, 2015) estudiaron el alcance de una planta híbrida solar-biomasa con enfriado, para abastecer una desalinizadora con un proceso de poligeneración en la India. El sistema produce vapor para la generación de energía, y el enfriamiento se produce mediante un sistema de refrigeración por absorción de vapor. El sistema de desalinización es por Destilación de Múltiple Efecto y se abastece por el calor del agua de vapor del sistema de enfriado. Este sistema de poligeneración, produce calor, frío y electricidad. Y es capaz de producir una media de 6000l/m²/día solo con el calor de los colectores solares, siendo la producción variable a lo largo del año. También concluyeron con un estudio termodinámico que la electricidad requerida para desalinizar agua a un rendimiento de 900l/h se necesita una potencia eléctrica de 65kW.

Sin embargo, el uso de la biomasa en la desalinización no se ha desarrollado como una alternativa tan viable como la fotovoltaica, ya que los residuos orgánicos no suelen ser abundantes en regiones áridas, y el crecimiento de la biomasa para la generación de electricidad requiere más agua de la que la planta podría producir. Pero este no es el caso en la zona de Almería y sus invernaderos. Que no solo tienen un abundante recurso solar, también disponen de toneladas de residuos agrícolas. Por esta razón, a continuación, se investigará la poligeneración solar-biomasa de la zona de Almería para abastecer la planta desalinizadora. Ya que ofrece una solución muy beneficiosa, produciendo energía eléctrica estable y segura. Además, de gestionar y explotar los recursos locales de la zona, residuos agrícolas e irradiación solar.

5. DISEÑO DE LA PLANTA

En este apartado se define la tecnología elegida para la planta, además de los parámetros clave para el funcionamiento de esta, desde la capacidad de producción de agua diaria hasta el dimensionamiento de los sistemas de producción de energía eléctrica. En la figura 13 se puede observar el diagrama de flujo utilizado en el diseño de este proyecto.

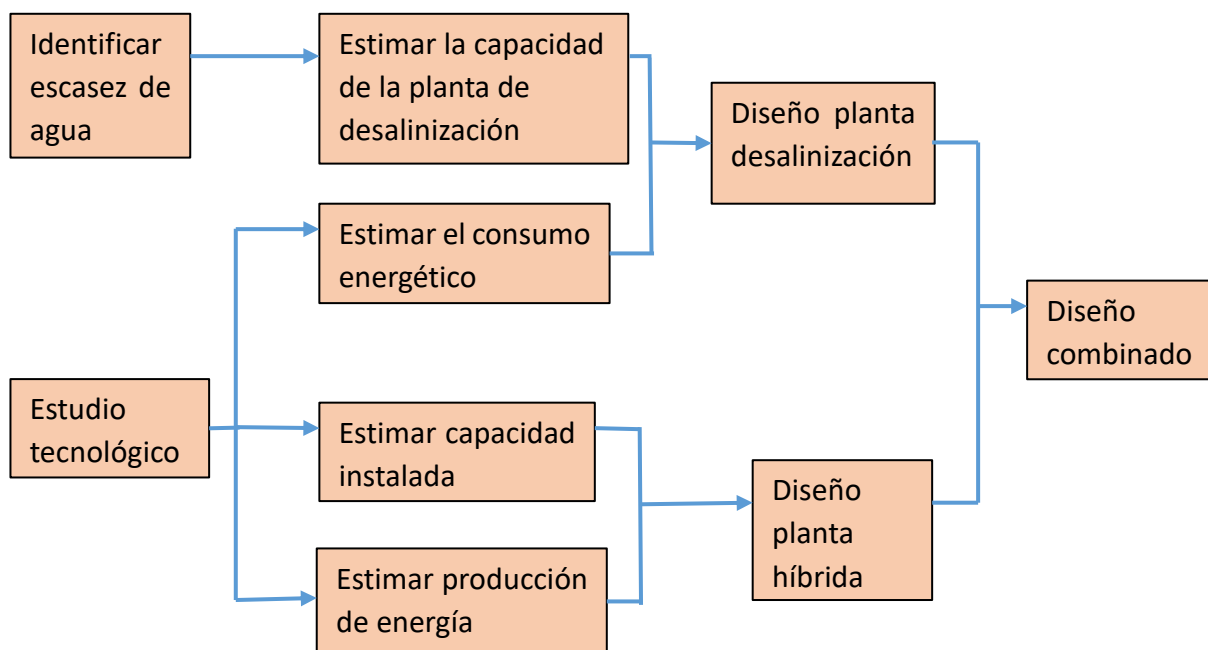


FIGURA 13. METODOLOGIA DISEÑO PLANTA DESALINIZACIÓN [ELABORACIÓN PROPIA]

Según el estudio bibliográfico realizado anteriormente, la Osmosis Inversa es la tecnología más madura en el mercado español. Además de tener un consumo de electricidad de alrededor de 2,2 kWh/m³, gracias a las mejoras en las tecnologías de intercambiadores de calor. Su gran eficiencia energética la convierte en la más atractiva para el acople con las energías renovables. Además, de ser la más económica (comparada con otras plantas de desalinización renovables) cuando se combina con el hidrogeno para proporcionar una producción de electricidad más estable. Sin embargo, debido a las grandes cantidades de residuos agrícolas de la zona de Almería, el hidrogeno será reemplazado por la producción de biogás con almacenamiento mediante la biomasa residual agrícola. Este último recurso será clave para resolver uno de los problemas asociados a la implementación de plantas de desalinización abastecidas por energías renovables, la variabilidad en la producción de electricidad. La metodología propuesta es suficiente para un diseño preliminar, la cual se utilizará para estimar el precio del agua y su huella de carbono, mediante un estudio económico y ambiental, teniendo en cuenta los costes de producción, el índice de rentabilidad y los gases de efecto invernadero emitidos durante la explotación del proyecto.

5.1 Demanda de agua

La crisis hídrica de la provincia de Almería está parando el impulso socioeconómico de la zona: La agricultura. Esta batalla está resultando en la contaminación y explotación de los acuíferos, pero por otro lado está generando alrededor de 1.774,29 millones de euros, debido a la exportación de estos productos, alrededor del 70% de los vegetales son enviados al extranjero (CAJAMAR, 2015). Esto ha resultado en un crecimiento exponencial de los cultivos, combinado con una mala gestión del recurso hídrico, resultando en una batalla moral entre lo económico y la protección del medio natural.

Almería es una de las zonas más áridas de Europa, con carácter de climas subdesérticos, con temperaturas medias cada vez más altas, intensificados por el cambio climático. Por otro lado, cada campaña es cada vez menos lluviosa que la anterior. Las precipitaciones registradas durante el 2019/2020 fueron 208,3 l/m², un descenso del 7% con la campaña anterior. (Torrente, 2020).

Si que es cierto que Almería tiene una eficiencia elevada en el uso del agua, pero el 80% de esta agua proviene del subsuelo (D.L. Valera, F. Camacho , 2016). Principalmente por la diferencia de precios con el agua de pozos y un límite en la capacidad de producción de agua desalada de las plantas existentes de Almería. Pero un estudio realizado por el centro de Investigación CIAIMBITAL, de la Universidad de Almería, comparo la producción y rendimiento económico de dos plantaciones de tomates, siendo el tomate el cultivo más importante de la zona. Una con agua suministrada por la desaladora del Campo de Níjar con una salinidad de 0,397 dS/m (a 0,52€/m³) y otra proveniente del pozo de los Grillos (7,47 dS/m; 0,29€/m³), concluyeron que, aportando el mismo volumen de agua, el tomate suministrado con agua desalada incremento la producción un 3,73 kg/m², además de mejorar la calidad de la fruta, haciendo más rentable utilizar el agua desalada para el riego de frutas y verduras cultivadas en invernadero. Compensando el precio superior del agua con un aumento en la producción de la fruta.

El primer paso para diseñar la planta de desalinización es identificar la escasez de agua, empezando por el estrés hídrico de los invernaderos, siendo necesario calcular la demanda de agua de estos. En la tabla 6 se puede observar los resultados obtenidos mediante un estudio bibliográfico.

Cultivos	Aportes (m³/ha)	Superficie (ha)	Total (m³/año)	Total (m³/día)
<i>Tomate</i>	4.110	10.345	42.517.950	116.487,5
<i>Berenjena</i>	4.190	2.446	10.248.740	28.078,7
<i>Calabacín</i>	3.490	7.369	25.717.810	70.459,7
<i>Pepino</i>	2.700	4.979	13.443.300	36.830,9
<i>Pimiento</i>	3.370	9.326	31.428.620	86.105,8
<i>Melón</i>	1.770	2.946	5.214.420	14.286,1
<i>Judías verdes</i>	1.680	1.439	2.417.520	6.623,3
<i>Sandía</i>	1.890	8.378	15.834.420	43.382
Total	23.200	-	146.822.780	402.255

TABLA 6. CANTIDAD DE CULTIVOS VS CONSUMO DE AGUA (ALFREDO TOLÓN BECERRA, 2010) Y (FERNANDEZ M.D, 2012)

Se puede observar que la cifra total es de 146,8 hm³ anuales (0,4 hm³ diarios), pero esta demanda no es constante durante todo el año, siendo los meses más calurosos los que demandan más agua.

Según el comité de Gestión de Aguas de Almería, el 60% de las masas de agua están en mal estado (Maturana, 2021), y el Plan Hídrico de Demarcación estima un déficit hídrico de 73 hm³ (León, 2016) que es un 50% de la demanda anual. Con una planta desaladora que cubra este déficit, se podría dejar el agua en los pozos para que se recuperen. Por esta razón la planta desalinizadora se dimensionará con una capacidad máxima de 201.200 m³/día, más de la mitad del consumo de agua de los cultivos hortícolas de la zona. El siguiente paso en el diseño sería calcular la energía necesaria para desalar esta cantidad de agua.

5.2 Consumo energético

Como hemos visto anteriormente la Osmosis Inversa requiere una presión de funcionamiento para conseguir un flujo de agua a través de las membranas, que suelen estar en serie dentro del tubo de presión, y en las grandes plantas suele haber alrededor de 7 membranas. El consumo energético de la planta dependerá de esta presión osmótica que se puede calcular con la ley de Van't Hoff:

$$P_o = i \times M \times R \times T$$

Donde P_o es la presión osmótica, i es el factor de Van't Hoff (que tiene un valor de 2 debido a que NaCl proporciona una unidad de Na⁺ y otra de Cl⁻), M es la concentración molar, R es la constante de los gases (0,082 atmóferas x litro/ Mol/ °K) y T es la temperatura en grados Kelvin.

Como se puede ver en la figura 14 la zona de Almería tiene alrededor de 37.250 ppm de salinidad, teniendo en cuenta este valor a una temperatura media anual de 20 °C la densidad del agua es de 1,0233 kg agua/litro. Y el peso molecular del cloruro sódico es 58,44

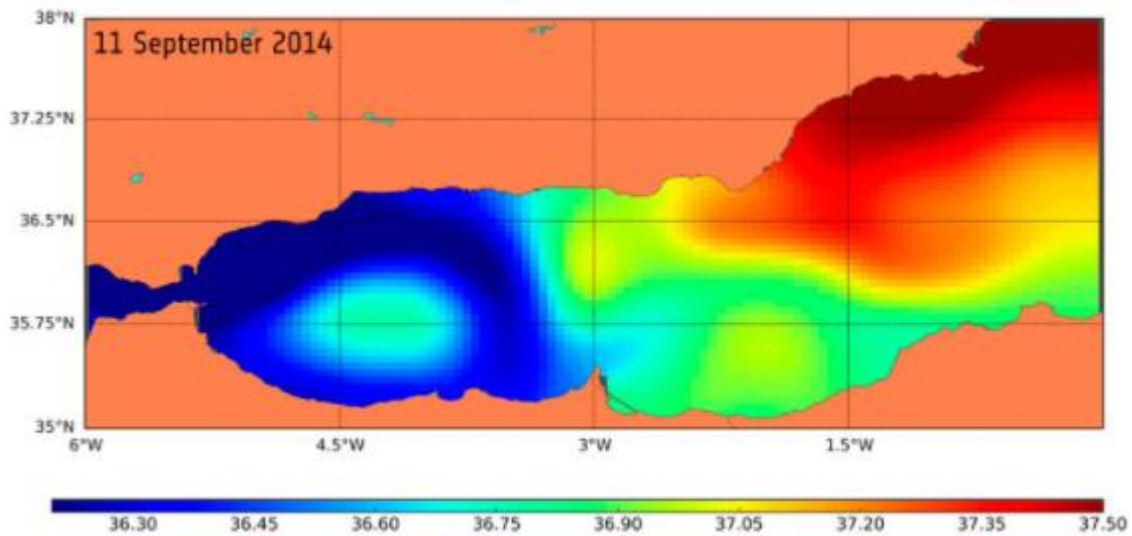


FIGURA 14. SALINIDAD MAR MEDITERRANEO (IAGUA, 2017)

Lo que nos da una concentración molar para el agua de mar Almeriense de:

$$M = \frac{37,25 \text{ (gr sal / kg agua)} \times 1,0233 \text{ (kg agua/litro)}}{58,44 \text{ (gr sal/ mol)}} = 0,6522 \text{ moles/litro}$$

Por consiguiente, la presión osmótica ideal de esta agua es de:

$$P_o = 2 \times 0,6522 \text{ (mol/l)} \times 0,082 \text{ (atm l/mol/K)} \times 293,15 \text{ }^\circ\text{K} = 31,35 \text{ atm}$$

Aplicando una presión superior a 31,35 atmósferas, el caudal del agua comenzará a atravesar la membrana osmótica. Pero el flujo de agua a esta presión sería insignificante, y para que el proceso resulte comercialmente rentable es importante trabajar a presiones más altas. Actualmente, las presiones de trabajo están entre 65 y 70 atmósferas. (Antonio Estevan, 2007). El producto de la presión y el volumen nos da como resultado la energía necesaria para presurizar el fluido. Si queremos desalinizar 1 m³ de agua salada el consumo de energía será la siguiente:

$$W = P \text{ atm} \times 1 \text{ m}^3 = P \text{ atm m}^3 \times 0,02815 \text{ (kWh/atm m}^3\text{)}$$

$$W_{min} = 31,35 \text{ atm m}^3 \times 0,02815 \text{ (kWh/atm m}^3\text{)} = 0,882 \text{ kWh (para desalar 1 m}^3\text{)}$$

Pero este valor solo sería suficiente para desalar las primeras gotas de agua, por lo que el trabajo necesario teórico tendría que ser

$$\begin{aligned}W_{trabajo} &= 70 \text{ atm m}^3 \times 0,02815 \text{ (kWh/atm m}^3\text{)} \\ &= 1,9705 \text{ kWh (para desalar 1 m}^3\text{)}\end{aligned}$$

Teniendo en cuenta los rendimientos de los procesos de desalinización, Osmosis Inversa con una turbina de Pelton (Antonio Estevan, 2007)

- Bombas de alta presión (motores eléctricos): 96%
- Presurización del agua: 88%
- Pérdidas de rozamiento y en tubos de presión: 2,5% (rendimiento 97,5%)
- Obtención de permeado y generación de salmuera: 45%
- Recuperación de energía de las salmueras:
 - 79,2% es la recuperación optima
 - Con un rendimiento de 95% de las cámaras isobáricas
 - Total, rendimiento recuperación: 75,2%

Aplicando estos factores de rendimiento, por cada 100 unidades de electricidad, 37,06 se utiliza para la desalinización, mientras que las 62,29 unidades se quedan en la salmuera o pasan al circuito de recuperación. Si de estas 'pérdidas' se pueden recuperar un 75,2%. Nos daría un rendimiento total de:

$$\text{Rendimiento (\%)} = 37,06 + (62,29 \times 0,752) = 83,9\%$$

En consecuencia, esta planta de desalinización tendría un consumo energético de:

$$\text{Consumo energético (kWh/m}^3\text{)} = \frac{W_t}{\text{Rendimiento}} = \frac{1,9705 \text{ kWh}}{0,839} = 2,35 \text{ kWh/m}^3$$

Que es un poco más del consumo energético, de las plantas de desalinización de Osmosis Inversa con recuperación de energía de la bibliografía actual. En nuestro caso al tener que desalinizar 201.200 m³/día, se necesitarían 472.820kWh/día para abastecer la planta desalinizadora. A continuación, se investigará los diferentes recursos renovables de la zona de Almería, para suministrar esta electricidad. La energía solar y los residuos agrícolas.

5.3 Estudio Solar

La energía fotovoltaica está siendo una tecnología disruptiva, con un crecimiento exponencial para el futuro. Según un informe de la Agencia Internacional de Energías renovables (o IRENA por sus siglas en ingles), entre el 2010-2019, el precio por potencia instalada se redujo un 82% (Lempriere, M , 2020) y esta tendencia no se para aquí. Debido a mejoras en el diseño de los paneles, la mejora de tecnología y menores costos de fabricación, la Agencia Internacional de la Energía (o IEA) previene que la capacidad total de energía renovable del mundo crecerá un 50% entre 2019 y 2024. Y la energía fotovoltaica representará el 60% de este aumento (IEA, 2019) Por esta razón será clave incorporar la energía fotovoltaica en la construcción, desde industrias hasta viviendas. Conjuntamente, Almería es una de las zonas con más irradiación de toda Europa, por eso este estudio tratará de investigar la posibilidad de abastecer una parte del consumo energético de la planta desalinizadora con energía solar fotovoltaica.

5.3.1 Radiación, Orientación e Inclinación de los paneles

El estudio solar se ubicó en la zona de Roquetas de Mar, Almería, con una latitud de 36.76°N y una longitud de -2.61°O , la cantidad de radiación disponible en la ubicación dictará la capacidad solar disponible. Los datos de irradiación se obtuvieron de la base de datos de PVsyst, Meteonorm 7.3, a un acimut de 0° y una inclinación de 35° . Los paneles se orientaron a estos parámetros para maximizar la producción de electricidad. En la figura 15 se puede observar una comparación de la irradiación en plano horizontal contra la irradiación a una inclinación de 35°

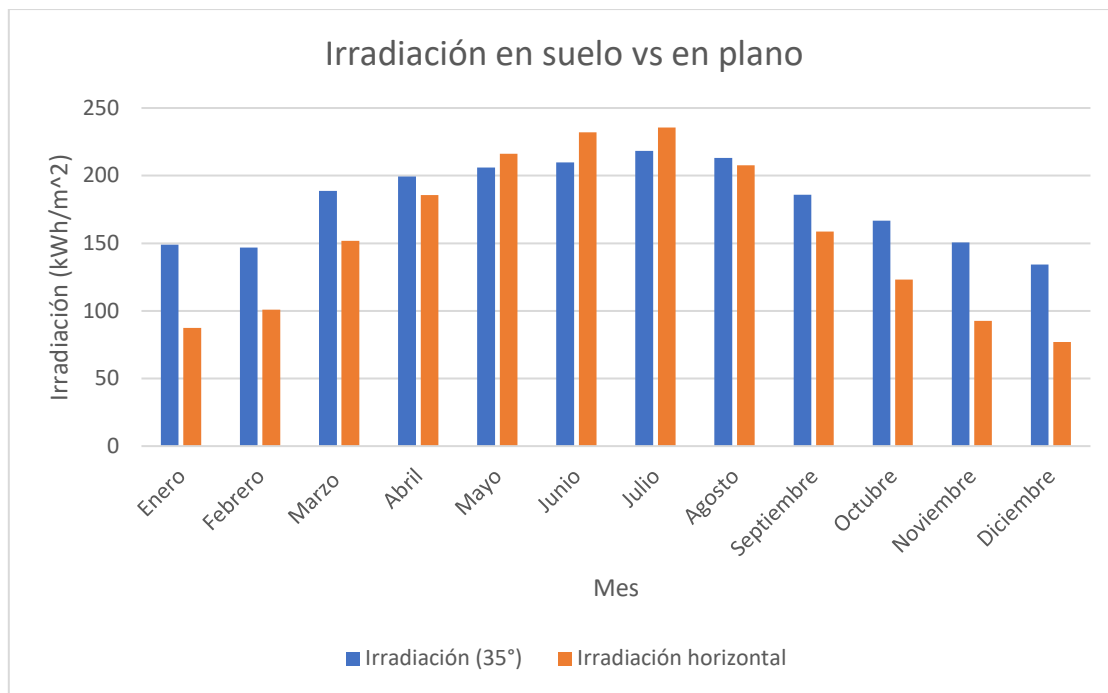


FIGURA 15. IRRADIACIÓN SUELO VS EN PLANO [ELABORACIÓN PROPIA]

La irradiación global anual en el suelo es de 1868.4 kWh/m² y en el plano de 2167.8 4 kWh/m². También se puede observar que la irradiación es más constante a un ángulo de 35°, lo que significa una generación más estable a lo largo de las estaciones. En el plano horizontal se maximiza la generación de energía en los meses de invierno, cuando el sol está más bajo en el cielo, por lo tanto, la generación de electricidad será más variable. Debido a que la irradiación es más estable a 35°, además de maximizar la producción de energía, esta será la configuración escogida para el planteamiento de este estudio.

5.3.2 Selección del módulo y numero de paneles

Como se mencionó anteriormente el consumo de la planta de desalinización es de 472.820kWh/día. Pero uno de los problemas de la energía solar es que requiere bastante espacio para producir grandes cantidades de electricidad, por esta razón la mayoría de esta demanda no vendrá del sol. Para abastecer el 20% de esta electricidad con energía fotovoltaica, es decir 94.564 kWh diarios, hay que tener en cuenta que la granja fotovoltaica solo va a poder generar electricidad por el día, entonces el consumo diurno de la planta sería de 52.010,2 kWh/día, (asumiendo 13 horas de sol diarias) que sería alrededor del 11% del

consumo de la planta. Esto nos da un consumo mensual de alrededor de 1560 MWh. La siguiente ecuación fue utilizada para calcular la cantidad de potencia a instalar.

$$Potencia (kW) = \frac{Consumo (kWh) \times G_{stc} \left(\frac{kW}{m^2}\right)}{Irradiación 35^\circ \left(\frac{kWh}{m^2}\right)} \times Factor \text{ dimensionamiento}$$

Como se puede ver en la figura 15, el valor de la irradiación a 35° varía durante los meses del año, así que se tomó un valor promedio anual de 180 kWh/m². Entonces la potencia a instalar sería de:

$$Potencia (kW) = \frac{1.560.000(kWh) \times 1 \left(\frac{kW}{m^2}\right)}{180 \left(\frac{kWh}{m^2}\right)} \times 1.15 = 9.968 kW \approx 10 MWp$$

Para abastecer esta potencia nominal, el panel CS1U-410 HiDM Monocristalino de alta densidad, con 410Wp y una eficiencia del 19.89% del fabricante CanadianSolar. Estos módulos han sido elegidos debido a que tienen una gran resistencia a fuertes vientos y un mayor rendimiento contra los 'hot spots'. Resultando en tener menores riesgos de daños estructurales, reduciendo los costos de mantenimiento (Canadian Solar, 2018). Además, tiene una tensión en circuito abierto de 50,4V y una longitud de 2.108mm, con una garantía de 25 años en la producción de electricidad (5 años más que la vida estimada del proyecto) aumentando la productividad económica de la planta fotovoltaica. Para abastecer la planta desalinizadora con energía solar se necesitarán 24.384 paneles y una superficie total de 50.265m² (50,2 hectáreas) para llegar a una potencia nominal de 10MWp.

5.3.3 Selección del Inversor y configuración

El inversor escogido es del fabricante Siemens, modelo Sinacon PV5000, con una potencia nominal unitaria de 5.000kWac, se necesitarán 2 para llegar a una potencia nominal de 10MWac, cada inversor tiene dos MPPT, teniendo un total de 4. Este inversor tiene una

tensión de funcionamiento entre 1006-1500V, este valor es necesario para calcular el número de paneles fotovoltaicos a instalar en serie, ya que el total no puede exceder 1500V, teniendo en cuenta que la tensión de los paneles en serie se va sumando para obtener la tensión del conjunto, en paralelo la tensión es la misma. Un valor conservador para no llegar a 1500V sería quedarnos en no superar una tensión de funcionamiento de 1200V. La siguiente ecuación se puede utilizar para calcular los números de paneles en serie a instalar.

$$N^{\circ} \text{paneles serie} = \frac{V_{inv}}{V_{oc}} = \frac{1200V}{50,4V} = 23,8 \approx 24$$

Lo que significa que se tendrán que instalar 1016 paneles en paralelo para llegar a 24.384 paneles necesarios para llegar a la potencia nominal de 10MW.

5.3.4 Pérdidas del sistema

Hay muchos factores que influyen en la producción de energía de una instalación solar, que varían entre las características de los módulos al diseño del sistema y como se instalan, pasando por los factores ambientales como sombreado y nieve. Una estimación de las pérdidas es esencial para satisfacer las demandas de la planta. En la tabla 7 se puede ver los factores de pérdidas que se introdujeron en el programa manualmente.

Factor	Cantidad (%)
<i>Suciedad</i>	-2
<i>Perdida calidad del modulo</i>	-0.3
<i>Envejecimiento en año 20</i>	-5
<i>Perdidas del inversor</i>	-6.83
<i>Perdidas debido a la temperatura</i>	-8.08

TABLA 7. PÉRDIDAS DEL SISTEMA [ELABORACIÓN PROPIA]

Como se puede ver en la tabla 7, se asumió que no había pérdidas por sombreados, un estudio de las pérdidas del sistema detallado se puede encontrar en el Anexo I, incluyendo los valores que calcula el programa PVsyst por defecto.

5.3.5 Distancia entre filas

Como se mencionó anteriormente las pérdidas por sombras se asumieron como inexistentes así que para evitar las sombras producidas entre filas y minimizar el espacio de la planta solar, hay que calcular la distancia entre módulos. La figura 16 muestra la ecuación utilizada para encontrar este valor.

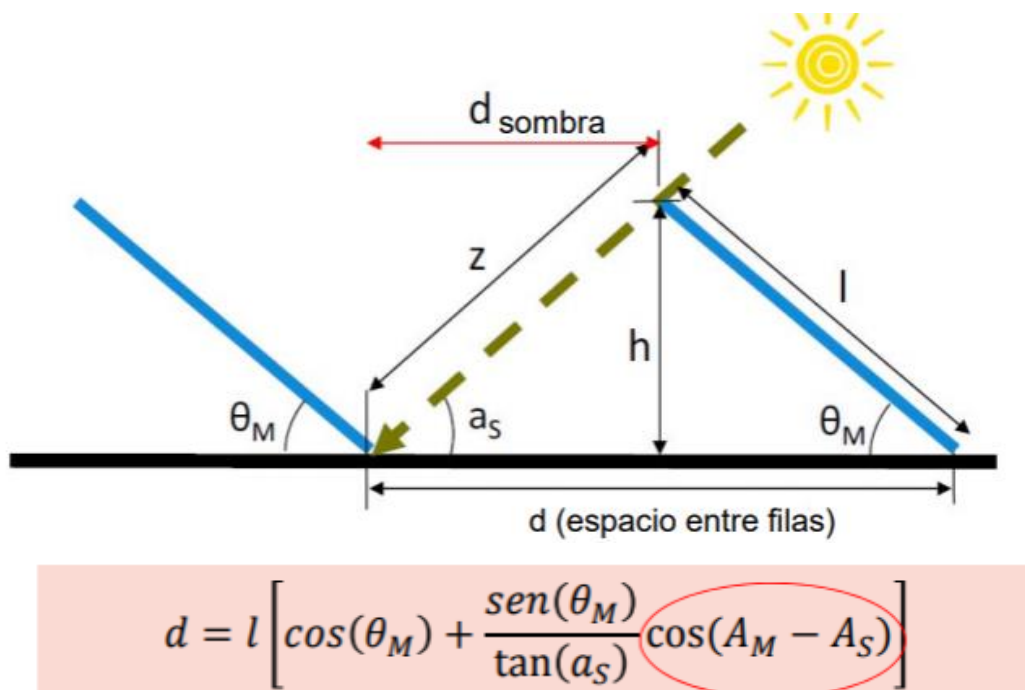


FIGURA 16. DISTANCIA ENTRE FILAS

Siendo A_M el Azimut del módulo ($S=180^\circ$) y A_S el azimut del sol. El día de referencia de estos datos, sería el 21 de diciembre, que es cuando el sol está más bajo en el cielo, para obtener la altitud y el azimut del sol en este día se consulta la web de suncalc.org. A las 13:08:45 el sol alcanza su altura máxima ese día, para asegurarnos de que no se incidan sombras en las horas con más producción, tomaremos 2 horas antes y 2 horas después de este punto.

- En la hora 11:08:45 el azimut del sol es $149,83^\circ$ y a_S (ángulo de incidencia) es $23,45^\circ$, lo que nos da una distancia de:

$$d = 2,108 \text{ m} \times \left[\cos 35^\circ + \frac{\text{sen } 35^\circ}{\tan 23,45^\circ} \cos(180^\circ - 149,83^\circ) \right] = 4,13 \text{ m}$$

- En la hora 15:08:45 el azimut del sol es $179,80^\circ$ y a_s (ángulo de incidencia) es $29,83^\circ$

$$d = 2,108 \text{ m} \times \left[\cos 35^\circ + \frac{\text{sen } 35^\circ}{\tan 29,83^\circ} \cos(180^\circ - 179,80^\circ) \right] = 3,83 \text{ m}$$

Por esta razón se elegirá el valor más restrictivo, en este caso 4,13 metros, que sería la distancia mínima entre las filas de módulos, en base de este valor se debería escoger un valor mayor o igual, dependiendo de la disponibilidad de despacio en la ubicación.

5.3.6 Resultados

En conjunto el sistema generaría un total de 16.128 MWh anuales, con un mínimo de producción en el mes de diciembre, solo generando 1098 MWh y un máximo en mayo con 1523 MWh. Estos datos se pueden observar en la figura 17.

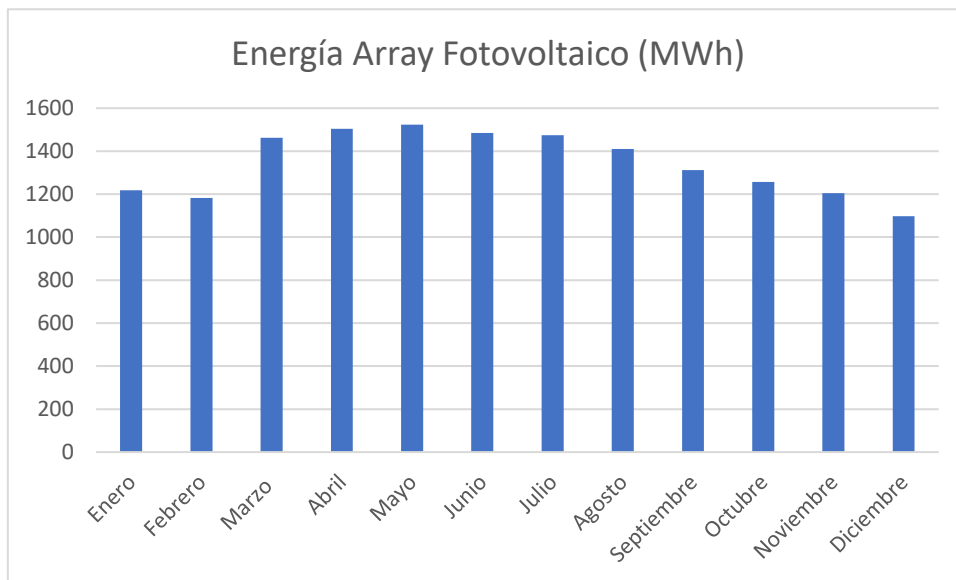


FIGURA 17. ENERGÍA ARRAY FV [ELABORACIÓN PROPIA]

El array fotovoltaico es capaz de cubrir un promedio anual del 9,35% del consumo mensual de la planta desalinizadora. Como se puede ver en la figura 18, más del 10% del consumo se abastecerá con energía solar en los meses de abril, mayo, junio y julio.

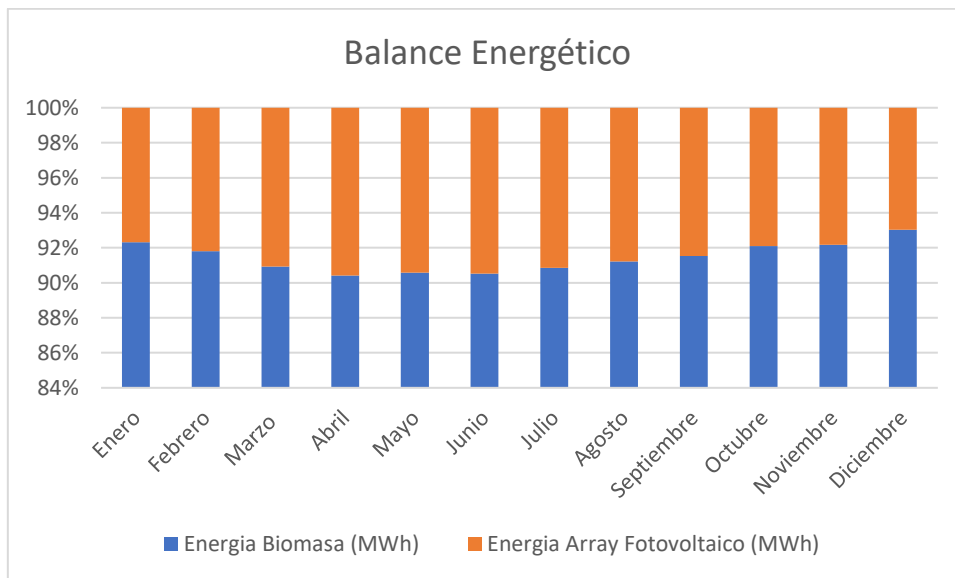


FIGURA 18. BALANCES ENERGÉTICOS [ELABORACIÓN PROPIA]

Además, como muestra la figura 18, la energía restante será producida con biomasa, que sumaría un total de 172,5 GWh anuales. A continuación, se estudiará la capacidad y rentabilidad de los residuos agrícolas almerienses para abastecer esta energía restante.

5.4 Estudio biomasa

Los cultivos vegetales bajo invernadero, como toda actividad industrial, generan residuos, en este caso 3 clases diferentes: De origen orgánico, generados al final de cada campaña en la retirada del cultivo (residuos agrícolas), los de origen inorgánicos (plásticos, metales, cartón) y los químicos (pesticidas). El correcto reciclaje y uso de estos residuos es fundamental para este sector y la sociedad en su conjunto. Ya que la acumulación sin control de estos residuos implica una problemática ambiental y social grave. Por norma (según la Ley de Sanidad Vegetal) los agricultores son responsables de que sus propios residuos tengan un tratamiento adecuado al final de cada cosecha, lo que implica un coste adicional. Por esta razón podemos encontrar consecuencias de la actual gestión de estos residuos agrícolas, como, por ejemplo (GEM, 2017):

- Impactos en el entorno: Donde los residuos con ayuda del viento (y la mano anónima) acaban en playas, parajes naturales, ramblas, caminos etc.)

- Contaminación atmosférica: Causa de la quema de estos residuos (CO₂ y CH₄)
- Difusión y ampliación de las plagas: Causadas por el abandono de los residuos vegetales en el entorno
- Contaminación de aguas subterráneas
- Llenado incontrolado de vertederos

Toda materia orgánica que se haya generado mediante un proceso biológico se denomina biomasa, aunque a veces se denomina como “residuo” tiene un gran potencial energético para generar electricidad, calor o bioproductos. El aprovechamiento de este recurso será clave para llegar a la visión que tiene Europa de un futuro verde, basada en una economía circular próspera, competitiva y carbón neutral. Y Almería tiene un gran potencial para aportar su parte en esta transición energética.

5.4.1 Residuos hortícolas de la zona de Almería

La estimación de residuos hortícolas de la provincia de Almería (sin contar con restos de arena, tierra, rafia etc.) se puede ver en la tabla 8. Siendo los residuos del tomate y pimiento los mayoritarios, generando el 55% del total.

Cultivos	Residuos		Periodo	Superficie	Residuos	
	t/ha	m ³ /ha	meses	(ha)	m ³	t
Tomate	35	140	ene/mayo	10345	1448300	362075
Berenjena	25	90	feb/jun	2446	220140	61150
Calabacín	22.5	90	ene/mayo	7369	663210	165802
Pepino	22.5	94.5	ene/mayo	4979	470516	112027
Pimiento	25	110	ene-feb/dic	9326	1025860	233150
Melón	23	80	jun	2946	235680	67758
Judías verdes	27.4	75	feb/jun	1439	107925	39428
Sandía	17	50	mayo	8378	418900	142426
TOTAL					4590531	1183818

TABLA 8. RESIDUOS AGRICOLAS ALMERIA (CAJAMAR, 2016) Y (NIETO, 2016)

La superficie total de los cultivos de Almería son 35.904 hectáreas, este dato se ha calculado sumando todas las superficies - menos las de Melón y Sandía - ya que estas frutas se plantan en verano, normalmente cuando termina la temporada de primera en invernaderos de pimiento o pepino. Entonces, no añaden una superficie adicional. Pero este dato es solo una

estimación a la realidad, debido al crecimiento exponencial de la superficie de cultivos, ya que ha pasado de las 11.000 ha en la campaña 1984/85 a los 35.904 ha en el 2016, un incremento de casi 700 hectáreas cada año. Así que no se puede saber con exactitud la cantidad de residuos o hectáreas de cultivo que se encuentran en la localidad en la actualidad. Los resultados de la tabla 7, son la estimación de los residuos en fresco (hojas, tallos y frutos de destrío) que se generan cada temporada en los invernaderos de Almería, y suman un total de 1.183.818 toneladas o 4.590.531 m³. Por otro lado, se generan alrededor de 100.000 toneladas de residuos inorgánicos (AENVERDE, 2020). Como se puede ver en la tabla 8 la generación de residuos es estacional, teniendo picos en enero y febrero, y luego otro en mayo y junio.

5.4.2 Aprovechamiento energético

Según un estudio de la Junta de Andalucía sobre la 'Bioenergía en Andalucía' los restos de las cosechas de invernaderos tienen un Poder Calorífico Inferior de 3.000 kcal/kg a una humedad del 60% (Junta de Andalucía , 2020). Siendo estos residuos ideales para degradarse en procesos de digestión anaeróbica, para la generación de biogás. Además, Andalucía tiene el liderazgo nacional en el sector de la energía de la biomasa eléctrica, con 17 plantas que suman 274 MW, la mayoría provenientes de residuos urbanos.

El factor de conversión de kcal a kWh es de 0,001162 por consecuencia el P.C.I de los residuos agrícolas en invernadero en (kWh/kg) es:

$$P.C.I (kWh/kg) = 0,001162 \times 3000kcal/kg = 3,486 kWh/kg$$

Si multiplicamos este valor por el total de los residuos generados por el sector hortícola agrícola, podemos calcular el potencial máximo de generación térmica mediante la biomasa:

$$E_{max}(kWh/año) = 1.183.818.000 kg \times 3,486 kWh/kg = 4.126.789.548 kWh$$
$$= 4.127 GWh/año$$

Como se puede observar la cantidad de energía térmica máxima que se puede generar de los residuos hortícolas agrícolas es de 4.127 GWh anualmente o 11,3 GWh/día. Por lo que para encontrar la cantidad de electricidad que se podría sacar habría que multiplicar esta cifra por el rendimiento de la central.

5.4.3 Digestores Anaeróbicos para la producción de Biogás

La digestión anaeróbica es el proceso en el cual bacterias descomponen materia orgánica – como los residuos agrícolas – en la ausencia de oxígeno. Este proceso se lleva a cabo en un recipiente sellado, también conocido como el reactor. Produciendo como resultante biogás y digestato.

El biogás está compuesto mayoritariamente por metano (CH₄), Dióxido de Carbono (CO₂), Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) y vapor de agua. La energía química del biogás se puede utilizar como el gas natural, para la generación de calor, electricidad o frío. El digestato es la materia residual del proceso, que puede ser líquido o sólido, con un tratamiento adecuado estos restos se pueden utilizar en forma de fertilizantes, para la creación de plásticos biológicos y como compost orgánico. Estos productos son una forma de ahorrar los costes de las plantas, incrementando los beneficios económicos y medioambientales. Además de disminuir la dependencia que tienen los agricultores en los pesticidas, ya que el digestato de las plantas de digestión anaeróbica, es un gran fertilizante natural.

La digestión anaeróbica tiene una eficiencia del 90%, consumiendo solo un 10% de la energía en el crecimiento bacteriano frente al 50% que se consume en un sistema aeróbico, en el cual se demanda oxígeno. (María Teresa Varnero Moreno , 2011).

El proceso bioquímico que ocurre en el reactor es bastante complejo, diferentes tipos de microorganismos interactúan creando reacciones consecutivas, que tienen diferentes ritmos de crecimiento y sensibilidad a las condiciones ambientales. El proceso de digestión anaeróbica esta compuesto por los siguientes pasos (Katerina Stamatelatou , 2011):

1. *Desintegración*: La biomasa se desintegra a polímeros orgánicos como carbohidratos, proteínas y lípidos.
2. *Hidrólisis*: La hidrólisis es una reacción química en la cual el agua reacciona con otra sustancia para crear una o más sustancias nuevas. En este caso los polímeros orgánicos se hidrolizan a sus respectivos monómeros (azúcares y aminoácidos) mediante enzimas extracelulares que facilitan el transporte de nutrientes a través de la membrana celular.
3. *Acidogénesis*: En esta fase diferentes tipos de microorganismos acidógenos hidrolizan los monómeros a ácidos grasos, dióxido de carbono, hidrógeno y otros compuestos

orgánicos, si la producción de hidrógeno es alta (dependiendo del contenido del carbohidrato en el sustrato), el gas se puede recolectar y utilizar directamente como biocombustible.

4. *Acetogénesis*: En este proceso los ácidos grasos y otras moléculas orgánicas se metabolizan en acetato, CO₂ e hidrógeno. Este proceso es lento debido al crecimiento de las bacterias, que tienen tiempos de duplicación largos (orden de duplicación de días).
5. *Metanogénesis*: Finalmente se produce el metano, gracias a dos grupos de microbios: Los metanógenos acetoclásticos, que son de crecimiento lento (con el orden de duplicación en días), sensibles a parámetros como el pH y nutrientes. El segundo grupo son los metanógenos que utilizan el hidrógeno y el CO₂ para producir metano. El contenido de metano en el biogás depende de la composición del sustrato, pero está en torno al 50-70%. En la figura 19 se puede ver los diferentes flujos de procesos de un digestor anaeróbico

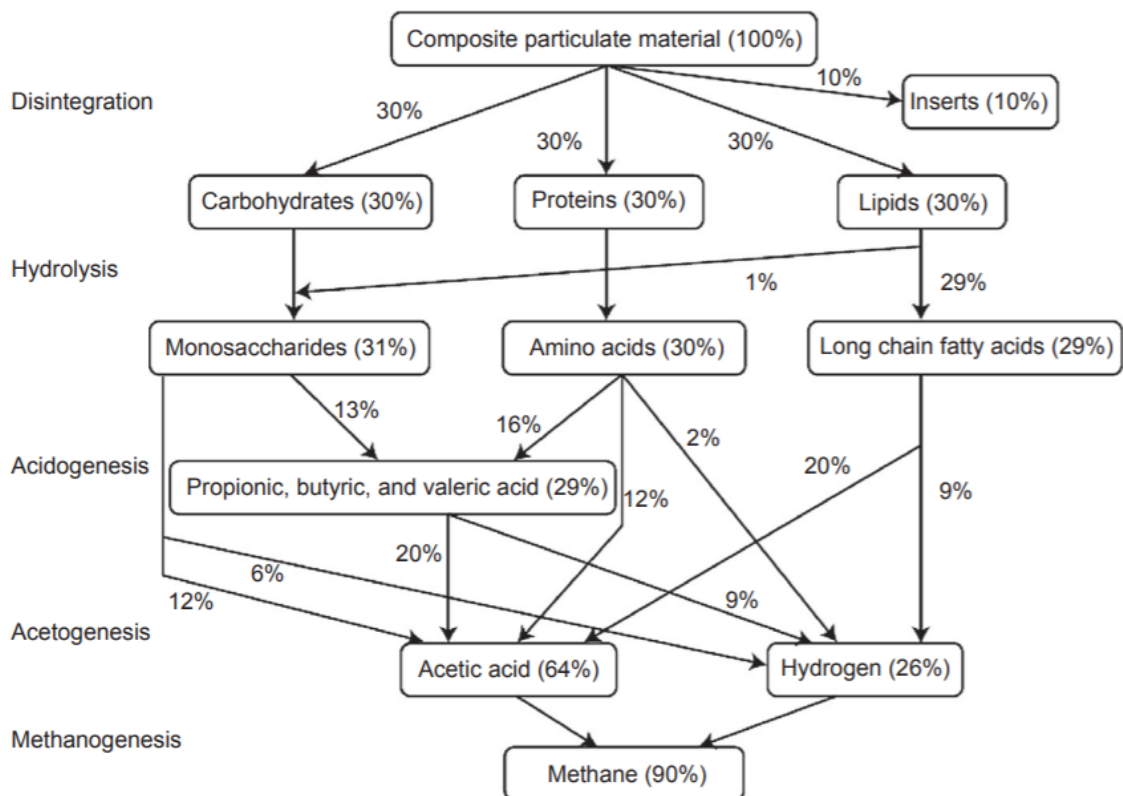


FIGURA 19. FLUJO DE PROCESOS DE UN DIGESTOR ANAEROBICO (KATERINA STAMATELATOU , 2011)

Con el fin de maximizar la producción de biogás y no cesar las reacciones bacterianas es esencial controlar las diferentes variables ambientales que afectan a cada proceso, tal como:

- **Temperatura:** Altas temperaturas mejoran significativamente el ritmo de crecimiento de los microbios, secreción de enzimas y la difusión del sustrato. La temperatura también afecta a la solubilidad del gas, influenciando la toxicidad del amoníaco.
- **pH:** El pH es uno de los parámetros más importantes ya que depende del grupo microbiano presente en el proceso. El pH óptimo para la hidrólisis y la acidogénesis esta entre 5,5 y 6,5. Por otro lado los metanógenos tienen un rendimiento pico entre el rango 7,8-8,2.
- **Tamaño de partículas:** Para aumentar la producción de biogás e incrementar el rendimiento se puede contar con reducir el tamaño de la partícula, aumentando la superficie disponible.
- **Nutrientes:** Añadir un suplemento de nutrientes es recomendado para aumentar el crecimiento microbiano del proceso.
- **Cantidad de sólidos totales:** Una gran cantidad de solidos totales puede interrumpir la movilidad de las bacterias metanogénicas, y disminuir el rendimiento del proceso.

5.4.3.1 Normativas

La generación de electricidad utilizando como combustible el biogás, se viene reflejada en el Real Decreto 661/2007. Según el artículo 2, la planta propuesta en este estudio corresponde con el Grupo b.7 y subgrupo b.7.2 (centrales que utilicen como combustible principal biomasa procedente de residuos agrícolas).

En el artículo 35 se pueden observar las tarifas y primas para el precio regulado de la venta de electricidad a la red. En los primeros 15 años la tarifa regulada de esta electricidad seria de 9,68 c€/kWh (y 5,36 c€/kWh a partir los primeros 15 años). Siendo la prima de referencia de 5,777 c€/kWh los primeros 15 años. Estos datos se tendrán en cuenta en el análisis económico.

Además, en el anexo I también viene reflejado el Rendimiento Eléctrico Equivalente (REE) mínimo para las centrales de producción, para las instalaciones con un combustible de biogás del grupo b.7 el rendimiento mínimo es del 50% (Ministerio de Industria, 2007). Como se

mencionó anteriormente el PCI de los residuos agrícolas es de 3,486 kWh_{te}/kg, teniendo en cuenta el rendimiento del digestor anaeróbico del 90% y el rendimiento mínimo eléctrico tiene que ser del 50%, por cada kilogramo de residuos se podrá obtener 1,5687kWh eléctricos.

Lo que significa que la electricidad teórica generada al utilizar los restos agrícolas de Almería en un digestor anaeróbico es de:

$$\begin{aligned} E_{teorica}(kWh/año) &= 1,5687kWh/kg \times 1.183.818.000kg \\ &= 1.857.055.296 kWh/año \approx 1.857 GWh/año \end{aligned}$$

Según un estudio realizado por el IDAE (realizando 9.450 encuestas) el consumo medio anual de una vivienda en España es de 3.487kWh (IDAE, 2012), por lo tanto, hipotéticamente hablando, si fuera posible reciclar todos estos restos y llevarlos a una planta suficientemente grande para tratarlos, estos podrían abastecer la electricidad de más de medio millón de viviendas.

5.4.3.2 Dimensionamiento

Debido a las grandes cantidades de restos agrícolas y a su gran potencial energético, la planta de desalinización abastecerá la energía restante, alrededor del 90%. El consumo de energía mensual se calculó multiplicando la demanda diaria por los días del mes, y los residuos necesarios para abastecer esta demanda de electricidad se obtuvieron con la siguiente ecuación:

$$Residuos (kg/mes) = \frac{Consumo (kWh/mes)}{1,5687 kWh/kg}$$

Siendo 1,5687 kWh/kg la cantidad de energía eléctrica que se puede obtener por kilogramo de residuo agrícola. En la figura 20 se puede observar la cantidad de residuos necesarios para abastecer la planta desalinizadora.

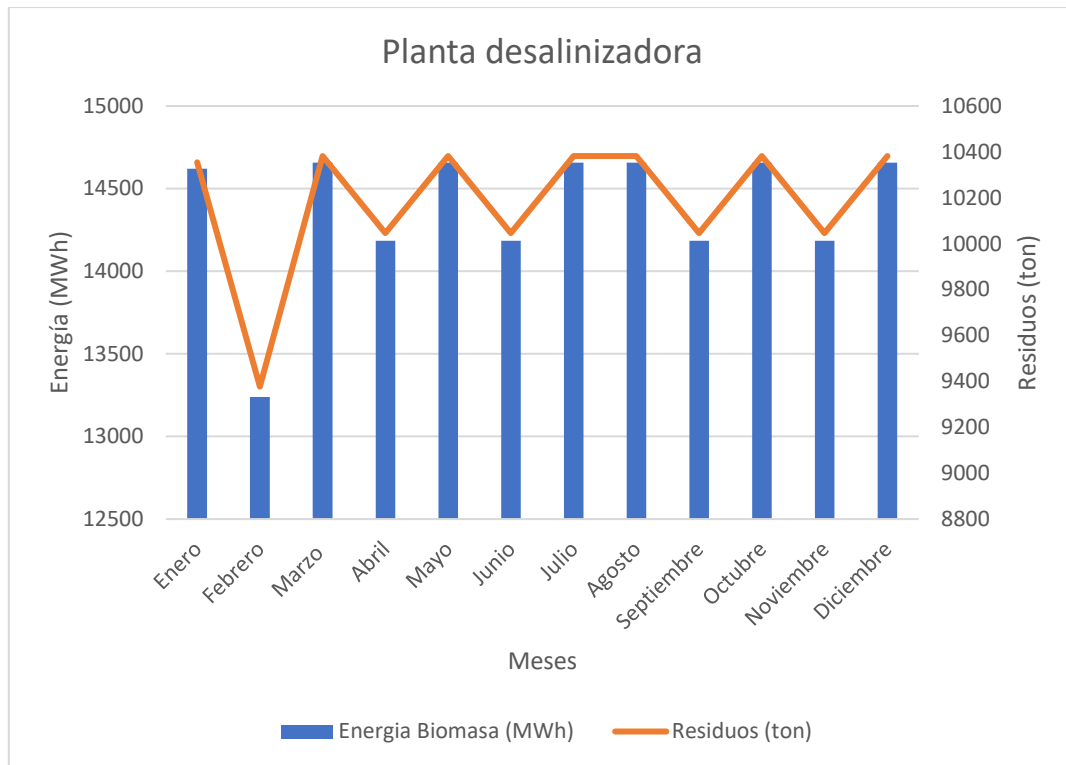


FIGURA 20. COMPARACIÓN DE ENERGÍA BIOMASA Y RESIDUOS [ELABORACIÓN PROPIA]

Cada año se deberán de recoger alrededor de 122.200 toneladas de residuos para abastecer a la planta desalinizadora, que equivalen al 10,3% de los residuos totales anuales de la zona de Almería. Con el potencial de producir 172,5 GWh cada año.

Pero debido a las grandes cantidades de residuos restantes, la planta de biomasa se diseñará con una capacidad mayor, para poder verter la energía restante a la red y abaratar los costes de producción del agua. Además de ser una fuente de generación de electricidad limpia, tiene otros beneficios como:

- Puede servir para cubrir la potencia base de electricidad
- El biogás se puede almacenar para luego utilizar en los picos de demanda
- Reduce la dependencia en los combustibles fósiles, creando un sistema energético seguro y fiable.
- Contribuye a la economía circular
- Se puede generar biometano para su uso en vehículos de combustión o para inyectar en la red de distribución de gas natural

Por estas razones la producción de biogás se intentará maximizar, como se menciona más adelante, la gestión de residuos de los invernaderos de Almería es bastante diversa y el reciclado de estos depende bastante del agricultor, así que no sería realístico diseñar la planta para recolectar el 100% de los residuos agrícolas. Así que por esta razón la planta de biomasa propuesta tendrá una capacidad para poder gestionar el 75% (887.863t/año) de los residuos agrícolas de la zona de Almería:

$$E_{eléctrica}(kWh/año) = 1,5687kWh/kg \times 887.863.000kg = 1.392.791.000 \\ \approx 1.392 \text{ GWh/año}$$

Asumiendo que el digestor anaeróbico esté funcionando 7000 horas anuales, la potencia de la planta de biomasa sería de:

$$Potencia (MW) = \frac{1.392.791 \text{ MWh}}{7.000h} = 198,9 \text{ MW} \approx 200\text{MW}$$

En la figura 21 se puede observar el desglose de la producción de electricidad anual de la central de biomasa, como se puede ver la mayoría de electricidad se vertería a la red, un total de 1220 GWh anuales, a un precio regulado de 9,68 c€/kWh.

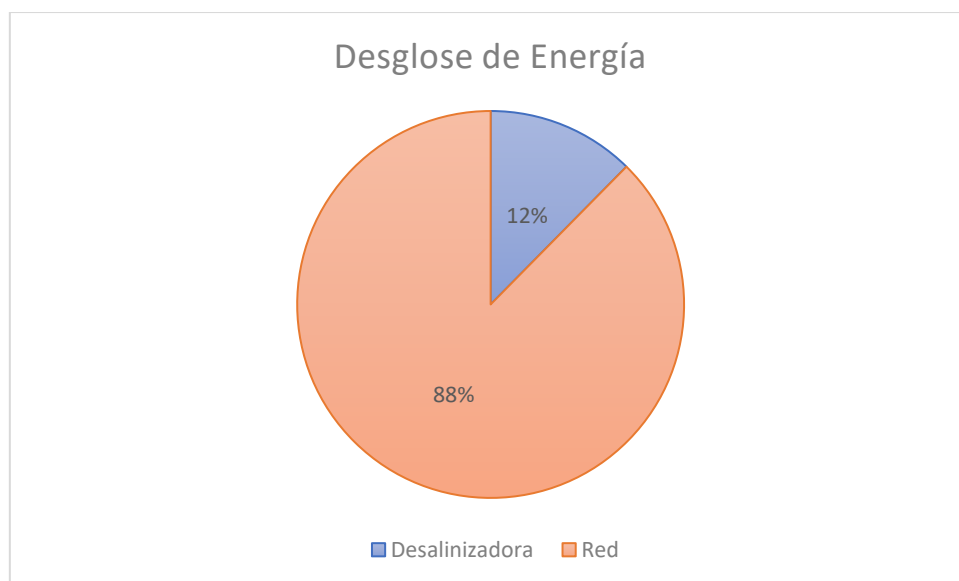


FIGURA 21. DESGLOSE DE ENERGÍA CENTRAL DE BIOMASA [ELABORACIÓN PROPIA]

En comparación, la planta de biomasa más grande de España se encuentra en Huelva, y es capaz de producir 46 MW a partir de residuos agrícolas y forestales. Capaz de generar 299.000 MWh anuales (Ruiz, 2020). Internacionalmente, la planta de biomasa más grande del mundo se sitúa en Ironbridge (Reino Unido), con una capacidad de 740MW, usando de combustible pellets de madera, esta planta era una antigua central eléctrica de carbón que se rehabilitó en 2013 (José A. Roca , 2016). Pero globalmente el digestor anaeróbico más grande se ubica en San José, California, capaz de procesar 270.000 t de residuos sólidos cada año.

5.4.3.3 Postratamiento del biogás

El biogás como se mencionó anteriormente contiene CO₂, vapor de agua, partículas sólidas y trazas de otros gases, una buena purificación de estas impurezas aumentara el Poder Calorífico del combustible.

El CO₂ no aporta ningún valor energético al biogás, y suele eliminarse en aplicaciones más complejas como en vehículos que requieren un combustible de mayor densidad, y genera un gas con un valor energético similar al Gas Natural. El CO₂ se puede remover gracias a procesos de absorción o adsorción. Por otro lado, también existen la separación por membranas y criogénicas (María Teresa Varnero Moreno , 2011). La eliminación del CO₂ no es necesaria para la mayoría de las aplicaciones como calentadores, motores o sistemas generadores, pero siempre es recomendable si está fácilmente disponible y a bajo coste.

5.4.3.4 Almacenamiento del biogás

Según las características del influente, el proceso de digestión anaeróbica produce alrededor de 400 a 700 litros de gas por cada kg de materia orgánica degradada. (María Teresa Varnero Moreno , 2011). Con grandes cantidades de restos agrícolas y con picos de producción, es esencial almacenar el gas cuando se encuentra en cantidad para su uso en meses de poca producción. Con el fin de compensar las fluctuaciones en la producción y consumo. Es recomendable instalar tanques de almacenado de volumen variable, ya que, por motivos de seguridad, si la presión en el tanque es superior a la establecida, se debería de quemar el

biogás para estabilizar la presión en el tanque, aunque no hubiera demanda de este. Para reducir los costes asociados al almacenamiento siempre es aconsejable consumir el biogás a la misma velocidad a la que se produce.

5.4.4 Gestión de residuos

Ya que el reciclado de estos restos vegetales puede estar expuestos a restos de productos fitosanitarios, la mezcla de estos químicos con los residuos dificulta la reutilización de estos. Y los principales destinos de estos restos suelen ser los siguientes (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente , 2012):

Destino	Observaciones
<i>De vuelta al suelo</i>	Aporta materia orgánica
<i>Compostaje</i>	Dificultado en cultivos hortícolas que utilizan un atado sintético
<i>Alimentación animal</i>	Practica no controlada
<i>Quema controlada</i>	Existen restricciones según municipios
<i>Valoración energética</i>	Como plantas de biomasa
<i>Vertederos</i>	Se debe reducir lo máximo posible
<i>Abandono</i>	Práctica incorrecta
<i>Quema no controlada</i>	Práctica incorrecta

TABLA 9. DESTINOS DE LOS RESIDUOS AGRICOLAS ALMERIENSES [ELABORACIÓN PROPIA]

Según la Ordenanza Reguladora de la Gestión de Residuos y Sanidad Medioambiental en el Medio Agrario la incineración de los residuos agrarios y su abandono lleva prohibida desde el 1998. Siendo los agricultores responsables de canalizar los residuos que generen hacia su destino final. Pero en la actualidad los destinos más comunes de estos restos siguen siendo: la quema (controlada o no), la reincorporación al suelo, la alimentación animal y el abandono. Ya que comparando datos de autogestión (hecha por el agricultor) con los costes de gestión de residuos, se puede ver una diferencia de 550 €/ha (Jose Manuel Torres Nieto , 2016)

Sin embargo, existen empresas públicas y privadas para el tratamiento de estos restos, donde gestionan, transforman y reciclan los diferentes tipos de residuos. Siendo el Ayuntamiento de El Ejido pionero en el tratado y recogida de estos. Implementando puntos de recogida, servicios de contenedores (prestados por el ayuntamiento) y servicios en fincas. Con el único

destino final el de la planta de gestión. La infraestructura está en pie para hacer un uso correcto de estos residuos desde hace décadas, pero algunos agricultores siguen apostando por formas más tradicionales de deshacerse de estos en vez de pagar una tarifa a una empresa de gestión, normalmente destinados para la generación de compost vegetal.

El precio de la gestión de restos de cultivo depende de la empresa que lo gestione, pero haciendo una encuesta a agricultores de la zona, se obtuvo un precio medio de recolecta de 3,5 €/m³, pero para incentivar el reciclado de los residuos y frenar la mala gestión por parte de los agricultores, no se cobrará por la recolecta de estos residuos. Estas plantas de gestión suelen estar disponibles todo el año, pero tienen picos de llegada de residuos agrícolas a lo largo de las estaciones. Con picos en enero-febrero, que es cuando termina el ciclo de otoño (con un 25% de los residuos vegetales), y otro pico en mayo-junio cuando termina los cultivos de primavera y de ciclo largo (representando el 75% de los residuos) (CAJAMAR, 2015). El mes de arranque de los cultivos depende de varios factores como: el tipo de cultivo, la productividad del cultivo y la salud del cultivo. Debido a la variabilidad de llegada y disposición de los residuos vegetales, será clave maximizar el rendimiento de la planta con otra tecnología que se acople bien a la biomasa. Como se puede ver uno de los picos de llegada suele ser en los meses de enero-febrero, que coinciden con los meses que menos irradiación hay en el hemisferio norte, por lo que la energía solar sería un gran apoyo, para aplanar la curva de carga de la planta.

5.4.5 Reciclado de residuos

Como se mencionó anteriormente, el proceso de digestión anaeróbica genera compost, y como se puede ver en la figura 19, el 10% de los residuos agrícolas no llega a producir biogás, asumiendo que por cada tonelada de residuos se van a generar 0,1 toneladas de compost, la planta de digestión anaeróbica produciría alrededor de 5.544 toneladas anuales. Según un estudio de los mercados del compost, realizado por la Junta de Andalucía (Ministerio de Medio Ambiente, 2011) el precio del compost en peso es de 49 €/tonelada. Por consecuencia, los beneficios de la planta propuesta por la venta de este compost son de:

$$\text{Beneficios compost (€/año)} = 5.544 \text{ ton} \times 49 \text{ €/ton} = 271.656 \text{ €/año}$$

Además de generar beneficios para el proyecto, abaratando los costes del agua, haciendo la planta más atractiva económicamente, este compost/fertilizante se devolverá a la misma tierra de donde vino, incrementando el uso del compost orgánico y disminuyendo el consumo de fitosanitarios químicos, cerrando el círculo natural e incentivando la económica circular. Además de reducir CO₂ de la atmósfera.

5.5 Diseño combinado

En la figura 22 se puede observar el esquema final de la planta desalinizadora, abastecida principalmente por el digester anaeróbico y la planta desalinizadora, utilizando los recursos locales de la zona. Teniendo a la red eléctrica para verter electricidad en tiempos con mucha generación y de forma de back-up en conjunto con el almacenamiento del biogás, por si falta electricidad en épocas de poca irradiación.

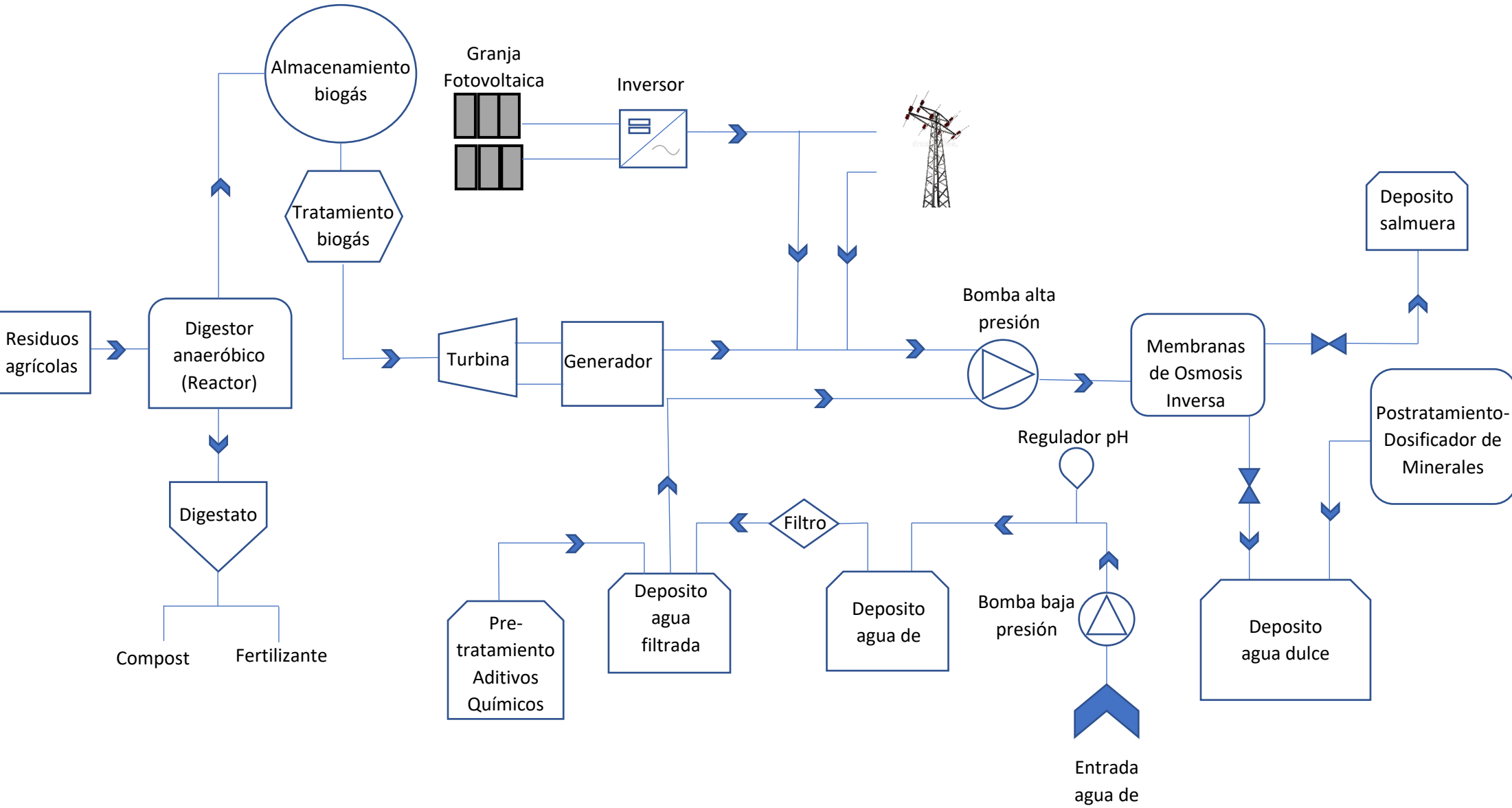


FIGURA 22. ESQUEMA FINAL PLANTA [ELABORACIÓN PROPIA]

6. ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado se realizará un estudio económico con el objetivo de encontrar el rendimiento monetario de este proyecto, calculando el presupuesto de la fase de construcción y explotación, los costes del agua y electricidad, un índice de rentabilidad económica.

6.1 Presupuesto

6.1.1 Costes fase de construcción

Los costes de la fase de construcción se pueden observar en la tabla 10. Los datos del presupuesto de la planta desalinizadora se estimaron con la ayuda de los parámetros de la tabla 5. Un precio de 1400 €/m³/día fue escogido, debido a las economías de escala y ser esta una planta de desalinización de gran capacidad.

Los paneles fotovoltaicos se establecieron a un precio de 0,3 €/Wp, con una potencia nominal de 410 Wp, que resultaría en un precio por unidad de 123€, el resto de los costes del sistema solar fotovoltaico fueron estimados mediante porcentajes de los costes de los paneles, basados en precios del mercado actuales.

Los costes de construcción de plantas de biomasa son muy variables, ya que dependen bastante de la tecnología utilizada y la potencia instalada, de un modo muy aproximado se podría estimar que una central termoeléctrica que produce electricidad a partir de biomasa tiene un coste de 2.500.000 €/MW (Garrido, 2015). Para ser más conservadores, el dato escogido para estimar los costes de la planta de biomasa fue de 3.000.000 €/MW. A partir de este dato y la potencia instalada de la planta de biomasa se estimaron los costes restantes.

Área	Concepto	Coste (€)
Desalinizadora	Instalaciones	267,596,000.00 €
	Mano de obra	14,084,000.00 €
	SUBTOTAL	281,680,000.00 €
Planta Solar	Paneles	2,999,232.00 €

<i>Planta Biomasa</i>	Estructura	599,846.40 €
	Inversores	959,754.24 €
	Cableado	164,957.76 €
	Protección CC	197,949.31 €
	Protección CA	230,940.86 €
	Mano de obra	299,923.20 €
	SUBTOTAL	5,152,680.58 €
	Instalaciones	600,000,000.00 €
	Mano de obra	120,000,000.00 €
	SUBTOTAL	720,000,000.00 €
	TOTAL	1,006,832,680.58 €

TABLA 10. COSTES DE CONSTRUCCIÓN [ELABORACIÓN PROPIA]

6.1.2 Costes fase de explotación

Los costes de la fase de explotación se dividen en tres partes, los costes de personal, costes de mantenimiento de las instalaciones y otros costes, donde se incluyen seguros, reemplazamiento de membranas y los químicos utilizados para el tratamiento del agua.

- Costes de personal

Área	Personal	Numero	Coste (€/año)	Total (€/año)
<i>Desalinizadora</i>	Jefe de Planta	1	60,000.00 €	60,000.00 €
	Subjefe de Planta	1	40,000.00 €	40,000.00 €
	Jefe de Laboratorio	1	30,000.00 €	30,000.00 €
	Operarios	15	15,000.00 €	225,000.00 €
	Auxiliares	10	14,000.00 €	140,000.00 €
	Administrativos	5	12,000.00 €	60,000.00 €
		SUBTOTAL		
<i>Planta Solar</i>	Jefe de Planta	1	40,000.00 €	40,000.00 €
	Operarios	1	15,000.00 €	15,000.00 €
	Administrativos	5	10,000.00 €	50,000.00 €
		SUBTOTAL		
<i>Planta Biomasa</i>	Jefe de Planta	1	60,000.00 €	60,000.00 €
	Subjefe de Planta	1	40,000.00 €	40,000.00 €
	Operarios	15	15,000.00 €	225,000.00 €
	Auxiliares	5	14,000.00 €	70,000.00 €

Administrativos	5	12,000.00 €	60,000.00 €
	SUBTOTAL		455,000.00 €
	TOTAL		1,115,000.00 €

TABLA 11. COSTES DE PERSONAL [ELABORACIÓN PROPIA]

- Costes de mantenimiento

Los costes de mantenimiento se estimaron por porcentajes de los costes de la fase de construcción y se dividieron, por el número de años del proyecto, en este caso 20, para encontrar los costes anuales.

Área	Concepto	Porcentaje (%)	Inversión (€)	Total (€/año)
<i>Desalinizadora</i>	Instalaciones	1.50%	4,225,200.00 €	211,260.00 €
<i>Planta Solar</i>	Instalaciones	2.00%	103,053.61 €	5,152.68 €
<i>Planta Biomasa</i>	Instalaciones	1.50%	10,800,000.00 €	540,000.00 €
	TOTAL		15,128,253.61 €	756,412.68 €

TABLA 12. COSTES DE MANTENIMIENTO [ELABORACIÓN PROPIA]

- Otros costes

Los costes debido a la compra de productos químicos y reemplazamiento de membranas se estimaron con ayuda de la figura 8.

Concepto	Coste (€/año)
<i>Oficina</i>	20,000.00 €
<i>Seguros</i>	50,000.00 €
<i>Seguridad</i>	20,000.00 €
<i>Productos químicos</i>	563,360.00 €
<i>Reemplazamiento de membranas</i>	704,200.00 €
TOTAL	1,357,560.00 €

TABLA 13. OTROS COSTES [ELABORACIÓN PROPIA]

6.1.3 Resumen costes

Fase	Área	Concepto	Costes (€/año)
<i>Construcción</i>	Desalinizadora	CAPEX	281,680,000.00 €
	Planta Solar	CAPEX	5,152,680.58 €
	Planta Biomasa	CAPEX	720,000,000.00 €
		SUBTOTAL	1,006,832,680.58 €
<i>Explotación</i>	Desalinizadora	Personal	555,000.00 €
		Mantenimiento	211,260.00 €
		Otros	1,267,560.00 €
		SUBTOTAL	2,033,820.00 €
	Planta Solar	Personal	105,000.00 €
		Mantenimiento	5,152.68 €
		Otros	30,000.00 €
		SUBTOTAL	140,152.68 €
	Planta Biomasa	Personal	455,000.00 €
		Mantenimiento	540,000.00 €
		Otros	45,000.00 €
		SUBTOTAL	1,040,000.00 €
		SUBTOTAL EXPLOTACIÓN	3,213,972.68 €
		TOTAL	1,010,046,653.26 €

TABLA 14. RESUMEN DE COSTES [ELABORACIÓN PROPIA]

6.2 Precios

6.2.1 Precios de electricidad

Para comparar el precio de la electricidad producida por las plantas de biomasa y solar fotovoltaica, se calculó los Costes Nivelados de la Energía (LCOE por sus siglas en Ingles), para verificar y valorar los costos de los sistemas de generación de electricidad, y averiguar si los precios son competitivos con otros proyectos similares. En la figura 23 se puede observar la ecuación utilizada para encontrar el valor del LCOE para los dos sistemas de generación eléctrica de este proyecto.

$$\frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

FIGURA 23. ECUACIÓN LCOE

Donde:

I_t = Gastos de inversión en el año t

M_t = Gastos de operación y mantenimiento en el año t

F_t = Gastos de combustible en el año t

E_t = Electricidad generada en el año t

r = Tasa de interés = 5%

n = Vida del sistema = 20 años

- LCOE Planta Solar

Como se puede observar en la tabla 15 el LCOE del proyecto solar está en 24,66 €/MWh, este valor varía dependiendo del lugar donde se instale la planta solar. En el sur de España (concretamente en Málaga) el LCOE de la energía generada por proyectos fotovoltaicos a gran escala (con una tasa de descuento del 7%) esta actualmente alrededor de 24 €/MWh (Bellini, 2019), lo que se acerca bastante al valor calculado en este estudio, por lo que se puede concluir que los datos obtenidos representan bien la realidad.

LCOE PLANTA SOLAR	
<i>Costes Capital (€)</i>	5,152,680.58 €
<i>Costes Mantenimiento y Operación (€)</i>	2,803,053.61 €
<i>Tasa de descuento</i>	5%
<i>Vida útil planta (años)</i>	20
<i>Energía generada (MWh)</i>	322580
<i>LCOE (€/MWh)</i>	24.66282531
<i>LCOE (€/kWh)</i>	0.024662825

TABLA 15. LCOE PLANTA SOLAR [ELABORACIÓN PROPIA]

- LCOE Planta de Biomasa

Como se puede ver en la tabla 16 el LCOE de la planta de BIOMASA es de 0,026 €/kWh, y según un informe de la IRENA, el LCOE de las tecnologías de generación de energía mediante la biomasa, producen electricidad a un coste de entre 0,025 €/kWh y 0,11 €/kWh (IRENA, 2017). Esta planta se sitúa en ese rango, aunque muy cerca del límite, debido a que los gastos del combustible son cero. Además, de aprovechar la biomasa local y las economías de escala.

<i>Costes Capital (€)</i>	720,000,000.00 €
<i>Costes Mantenimiento (€)</i>	1,040,000.00 €
<i>Tasa de descuento</i>	5%
<i>Vida útil planta (años)</i>	20
<i>Energía generada (MWh)</i>	27855813.76
<i>LCOE (€/MWh)</i>	25.88472217
<i>LCOE (€/kWh)</i>	0.025884722

TABLA 16. LCOE PLANTA BIOMASA [ELABORACIÓN PROPIA]

6.2.2 Precios del agua

Con los costes relacionados a la producción del agua calculados, lo siguiente sería calcular el precio del agua. Que se puede obtener con un cálculo sencillo. Primero se calcula la producción anual de agua.

$$\text{Producción anual de agua} = 201.200 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 365 \text{ días} = 73.438.000 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

Sabiendo que los costes anuales de la producción del agua (costes de explotación) son de 3.213.972,68 € anuales, consecuentemente los costes del agua son:

$$\begin{aligned} \text{Coste del agua (€/m}^3\text{)} &= \frac{\text{Coste anual}}{\text{Producción anual de agua}} = \frac{3.213.972,68 \text{ €}}{73.438.000 \text{ m}^3} \\ &= 0,0437 \text{ €/m}^3 \end{aligned}$$

Como se puede observar en la tabla 3, el agua más barata que los agricultores pueden comprar proviene de los pozos de Almería, a un precio de 0,09€/m³. Siendo el coste del agua de la planta desalinizadora propuesta casi dos veces más barata. Así que, con el fin de parar

la sequía de los pozos de la provincia, beneficiar a los agricultores y a los inversores del proyecto, el precio de venta de esta agua estará sujeta un poco más barata que el precio del mercado del agua de regadío de la provincia, en el siguiente apartado de este estudio se estimó un precio de venta de 0,08 €/m³. Siendo este un precio justo, ya que la planta aprovecha los residuos de los propios invernaderos, incentivando la economía circular y el desarrollo sostenible. Además, teniendo un precio de venta mayor al de producción deja un margen de seguridad para prevenir averías o costes añadidos no incluidos en este estudio.

6.3 Rentabilidad económica

Ya calculados los ingresos por la venta de agua, electricidad y compost. Y los costes de capital y explotación, se puede hacer un estudio de rentabilidad económica para averiguar los flujos de caja, el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) y el Índice de Rentabilidad (IR).

- El VAN se calcula para encontrar el valor actual de futuros pagos. Como se puede ver en la figura 24 depende de una tasa de interés 'k' que se estableció al 5%. Siendo Q_h el flujo neto de caja al final del año 'h' (en este caso 20) y G₀ el desembolso inicial.

$$VAN = -G_0 + \sum_{h=1}^n \frac{Q_h}{(1+k)^h}$$

FIGURA 24. ECUACIÓN VAN

Si el VAN de cualquier proyecto es positivo, se puede concluir que la inversión empezaría a ser atractiva para los inversores públicos o privados. Para calcularlo se necesita saber los flujos de caja de cada año, como se puede ver en la tabla 17. Y se encuentran en millones de euros.

- La Tasa Interna de Rentabilidad es el valor de la tasa de interés que hace el VAN cero, generalmente cuanto mayor sea la TIR, la inversión será más atractiva. Y si puede definir como la tasa de crecimiento anual que se espera que genere el proyecto. Otra

condición de efectividad de un proyecto, es cuando la TIR está por encima de la tasa de interés.

$$VAN = -G_0 + \sum_{h=1}^n \frac{Q_h}{(1+k)^h} = 0$$

FIGURA 25. ECUACIÓN TIR

Como se puede observar en la tabla 17 para calcular los flujos de caja y la amortización del proyecto se hicieron las siguientes suposiciones.

- Inflación del 2% anual.
- Impuestos del 25% a los beneficios del proyecto.
- Tasa de interés del 5%.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
GASTOS (Millones de €)																						
Inversión Inicial	1006.8																					
Inflación		2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
Personal		1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6
Mantenimiento		0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1
Otros		1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0
Impuestos (25%)		31.1	31.7	32.3	33.0	33.6	34.3	35.0	35.7	36.4	37.1	37.9	38.6	39.4	40.2	23.6	24.1	24.6	25.0	25.5	26.1	26.1
TOTAL GASTOS	1006.8	34.3	35.0	35.7	36.4	37.1	37.9	38.6	39.4	40.2	41.0	41.8	42.6	43.5	44.4	27.9	28.4	29.0	29.6	30.2	30.8	30.8
INGRESOS (Millones de €)																						
Venta de agua		5.9	6.0	6.1	6.2	6.4	6.5	6.6	6.7	6.9	7.0	7.2	7.3	7.5	7.6	7.8	7.9	8.1	8.2	8.4	8.6	8.6
Venta de electricidad		118.1	120.5	122.9	125.4	127.9	130.4	133.0	135.7	138.4	141.2	144.0	146.9	149.8	152.8	86.3	88.0	89.8	91.6	93.4	95.3	95.3
Venta de compost		0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
BENEFICIO ACUMULADO		124.3	126.8	129.3	131.9	134.5	137.2	139.9	142.7	145.6	148.5	151.5	154.5	157.6	160.8	94.4	96.3	98.2	100.2	102.2	104.2	104.2
FLUJO DE CAJA	-1006.8	90.0	91.8	93.6	95.5	97.4	99.3	101.3	103.3	105.4	107.5	109.7	111.9	114.1	116.4	66.5	67.9	69.2	70.6	72.0	73.5	73.5
Amortización	-1006.8	-916.9	-825.1	-731.5	-636.0	-538.6	-439.3	-338.0	-234.6	-129.2	-21.7	88.0	199.9	314.0	430.4	496.9	564.8	634.0	704.6	776.7	850.2	850.2

TABLA 17. FLUJOS DE CAJA [ELABORACIÓN PROPIA]

Como se puede ver en la figura 26 el proyecto se amortiza en el año 11, cuando ya empezaría a ganar dinero. Y a finales del año 20 los beneficios sumarán un total de 850,2 M€. Estos beneficios monetarios son más que suficientes para reemplazar o sustituir elementos que se pueden degradar con el tiempo, como son los paneles fotovoltaicos o los inversores, por lo que el rendimiento de la planta aumentaría sin necesidad de realizar otro desembolso económico, teniendo en cuenta que habrá menos ganancias, pero la vida de la planta aumentaría, incrementando los beneficios globales

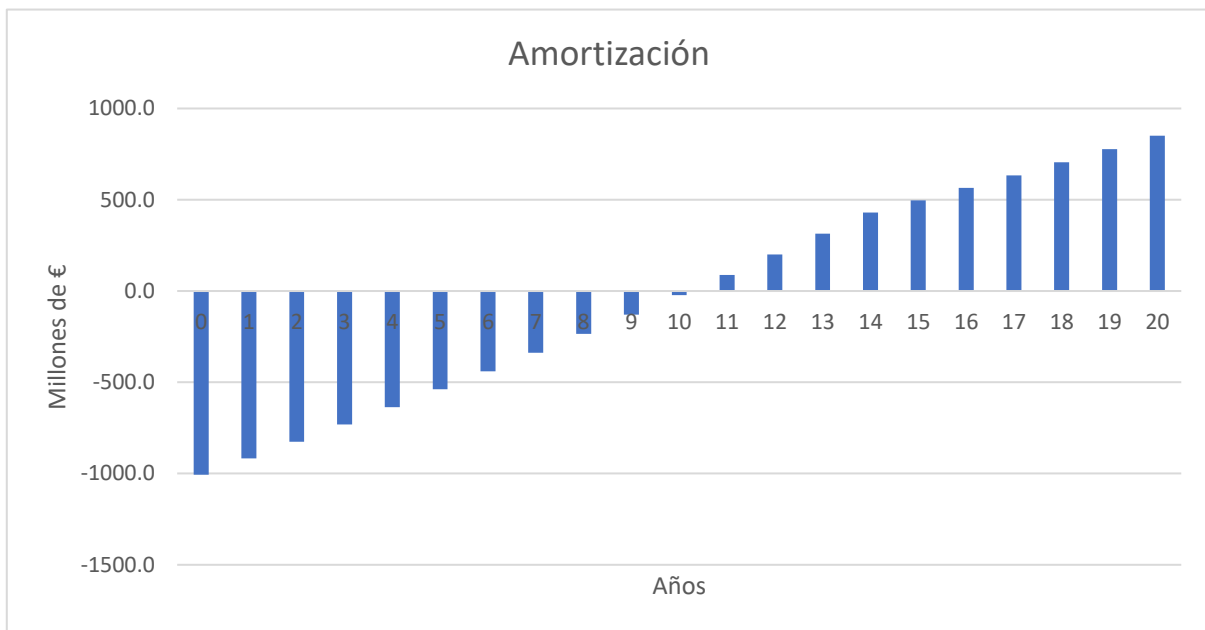


FIGURA 26. AMORTIZACIÓN DEL PROYECTO [ELABORACIÓN PROPIA]

Pero estos proyectos tienen una vida mayor como se mencionó anteriormente el VAN solo se computó hasta el año 20, Así que también se calculó el VAN con un Valor en Continuación (VC), que se puede definir como los flujos de caja que espera obtener el proyecto a lo largo de su vida. Y se puede calcular con la ecuación de la figura 27.

$$VC = \frac{FC_n \times (1 + Tasa\ de\ Crecimiento)}{CMPC - Tasa\ de\ Crecimiento}$$

FIGURA 27. ECUACIÓN VALOR EN CONTINUACIÓN

Donde la tasa de crecimiento se estableció como 0.5% y el Coste Medio Ponderado de Capital (CMPC) al 5%. Esto resultó en un Valor en Continuación de 959,66.

- El Índice de Rentabilidad (IR) se calcula dividiendo el VAN por el Capital Inicial, y se puede considerar que un proyecto es ejecutable si tiene un IR mayor que 1.

- Resultados sin añadir el VC:

$$VAN = 164,21$$

$$TIR = 7\%$$

$$IR = 16\%$$

Un índice de rentabilidad del 16%, significa que este proyecto conseguiría recuperar la inversión y además obtener un 16% del desembolso realizado. Teniendo un VAN positivo que indica que el proyecto es ejecutable e ofrece una rentabilidad elevada.

- Resultados con el VC:

$$VAN = 873,66$$

$$TIR = 11\%$$

$$IR = 87\%$$

Como se puede observar si se añade el VC, los resultados son muy positivos y el proyecto ofrecería una rentabilidad elevada. También, hay que mencionar que este tipo de proyectos innovadores suelen estar financiados con subvenciones del estado o ayudas provenientes de Europa que suelen ir directas a la fase de construcción o explotación, y estas no se han tenido en cuenta en este estudio. Como se puede observar el proyecto tiene una amortización de 11 años, y tiene unos valores positivos muy atractivos para futuros inversores. Además, de tener beneficios económicos, ofrecerá a los ciudadanos de Almería una gran cantidad de nuevos trabajos, un precio reducido del agua desalada con un mayor rendimiento y más barata que el agua proveniente de los pozos de la zona. Finalmente, generará electricidad estable que verterá a la red, desplazando el uso de los combustibles fósiles. Que asimismo ofrecerá unos beneficios medioambientales que se estudiarán en el siguiente apartado.

7. ESTUDIO AMBIENTAL Y RECOMENDACIONES

Este estudio ambiental se enfocará en las emisiones evitadas a la atmosfera gracias a la producción de electricidad mediante el biogás y la energía solar.

7.1 Emisiones evitadas por el digester anaeróbico

La industria del biogás tiene un potencial significativo para contribuir a las metas climáticas de llegar a un nivel de carbón neutral para el 2050. Ya que es capaz de reducir las emisiones de efecto invernadero globales un 10-13% (World Biogas Association , 2019). Además, no solo produce electricidad, si no que el digestato producido en el proceso de digestión anaeróbica es un fertilizante biológico perfecto. Evitando las emisiones atmosféricas intensivas de este sector.

En un estudio sobre la electricidad producida por digestores anaeróbicas en Italia (Jacopo Bacenetti, 2015), especialmente centrado en la huella de carbono de esta electricidad, realizaron análisis de ciclos de vida (de cuna a tumba) para 5 plantas con diferentes capacidades y concluyeron que las emisiones de CO₂ varían entre -0,208 y -1,07 kgCO₂eq/kWh, principalmente relacionado con la sustitución de la producción de electricidad mediante combustibles fósiles del mix energético italiano.

Teniendo en cuenta estos valores, se podría calcular las emisiones máximas y mínimas evitadas a la atmosfera por la producción de electricidad mediante el digester anaeróbico propuesto:

$$\begin{aligned} Emisiones_{min}(tCO_2eq/año) &= -0,208kgCO_2eq/kWh \times 1392790 MWh \\ &= -289.700,5 tCO_2eq/año \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Emisiones_{max}(tCO_2eq/año) &= -1,07kgCO_2eq/kWh \times 1392790 MWh \\ &= -1.490.286 tCO_2eq/año \end{aligned}$$

Por lo cual resultaría en un promedio de 889.993tCO₂eq, pero como se mencionó anteriormente, el biogás esta principalmente formado por metano (CH₄) siendo un gas con

un gran potencial de calentamiento global, y estas emisiones ‘salvadas’ de la atmosfera solo resultarían correctas si la misma electricidad se produjera con combustibles fósiles.

7.2 Emisiones evitadas por la Granja Solar

Las placas solares no solo reducen la factura eléctrica en empresas, pero también su impacto ambiental, cada MWh producido por el array fotovoltaico, desplaza un MWh que podría a ver venido del carbón o el gas natural. Y considerando que tienen una vida útil de alrededor de 25 años, las emisiones evitadas a la atmosfera son significativas.

Un estudio publicado por Nature Energy, estimo que las emisiones durante la vida de una granja solar están por debajo de 0,021 kgCO₂eq/kWh, en comparación las emisiones generadas por el gas natural están por encima de 400 gCO₂eq/kWh (SOLAR BAY, 2020). Y teniendo en cuenta el factor de emisión de CO₂ de la electricidad convencional nacional de 0,357 kgCO₂eq/kWh (IDAE , 2014) se podrían calcular las emisiones evitadas por el desplazamiento de la producción de electricidad mediante la granja solar fotovoltaica.

$$\begin{aligned} \text{Emisiones generadas (tCO}_2\text{eq)} &= 0,021\text{kgCO}_2\text{eq/kWh} \times 16129 \text{ MWh} \\ &= 338,7 \text{ tCO}_2\text{eq} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones desplazadas (tCO}_2\text{eq)} &= 0,357\text{kgCO}_2\text{eq/kWh} \times 16129 \text{ MWh} \\ &= 5.758 \text{ tCO}_2\text{eq} \end{aligned}$$

$$\text{Emisiones ahorradas (tCO}_2\text{eq)} = 5.758 \text{ tCO}_2\text{eq} - 338,7 \text{ tCO}_2\text{eq} = 5.419 \text{ tCO}_2\text{eq}$$

Por lo que la construcción de la granja solar ahorraría un total de 5.419 tCO₂eq durante la vida útil del proyecto. Además de ofrecer otros beneficios medioambientales, como es hacer una buena gestión de los residuos agrícolas y reducir el uso de químicos en la agricultura almeriense.

7.3 Recomendaciones

Este estudio no tuvo en cuenta las emisiones producidas por la extracción de recursos naturales, la construcción de las plantas de biogás, fotovoltaica y la desalinizadora. Además, de las emisiones durante la explotación y el desmantelamiento o reciclado de las instalaciones. Por consecuencia se recomienda hacer un estudio exhaustivo de lo mencionado anteriormente y de los siguientes puntos:

- El uso del suelo y del área requerida para soportar una instalación de este calibre incluyendo zanjas, vías de acceso, edificios auxiliares, subestaciones, etc.
- Las emisiones producidas por la combustión del biogás.
- Las emisiones evitadas gracias al digestato.
- Reciclado o tratamiento de la salmuera.
- Infraestructuras y capacidad para la conexión a la Red Eléctrica.

La realización de estas recomendaciones es aconsejable para valorizar los beneficios ambientales y atacar las posibles barreras tecnológicas del proyecto.

8. CONCLUSIONES

Mediante un estudio bibliográfico se concluyó que la mejor tecnología capaz de producir una gran cantidad de agua diaria a un coste aceptable sería por Osmosis Inversa. La planta desalinizadora propuesta generaría 201.200 m³ de agua cada día a máxima potencia, suficiente para abastecer más del 50% de la demanda de agua de los invernaderos de la zona de Almería. Las instalaciones tendrán un consumo energético de 472.820 kWh/día que se abastecerán con energías renovables. El mayor aporte de electricidad vendrá de una planta de biomasa, utilizando los residuos agrícolas de los invernaderos para abastecer un digestor anaeróbico de 200MWp, gestionando un total de 887.863t/año y produciendo 1.392 GWh/año, de los cuales 172,5 GWh se utilizará para abastecer el 90% de la planta desalinizadora y el restante se venderá a la red a un precio regulado de 9,68 c€/kWh. El LCOE de esta electricidad se calculó a 26,18 €/MWh, un precio muy aceptable para centrales similares. La electricidad restante de la planta desalinizadora (un 10%) proviene de una planta fotovoltaica de 10MWp, capaz de generar 16.1 GWh anuales, a un coste nivelado de la

electricidad (LCOE) de 22,18 €/MWh. Además, se realizó un estudio económico para averiguar la viabilidad del proyecto. Se estimó un coste de capital de 1.006,8 M€, con un precio de producción de 0,043 €/m³ y un precio de venta de 0.08 €/m³, esto resulta en un índice de rentabilidad del 16%, sin contar el valor en continuación del proyecto y de un 87% contándolo. Asimismo, los agricultores se beneficiarán de una variación del precio del agua desalinizada más barata dependiendo de la biomasa que aporten a la planta. Ofreciendo beneficios económicos considerables, además de evitar el vertido de 895.412 tCO₂ anuales a la atmósfera debido a la producción de electricidad, con recursos locales, y un abastecimiento seguro, barato y renovable. Resultando en un proyecto innovador y único en su sector, capaz de resolver un problema muy presente en la comunidad autónoma española, beneficiando a la economía, a la sociedad y al medio natural local y global.

BIBLIOGRAFÍA

- A.Maleki. (2016). *Design of a cost-effective wind/photovoltaic/hydrogen energy system for supplying a desalination unit by heuristic approach*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X16304340?via%3Dihub>
- ACUAMED. (2007). Retrieved from <https://www.acuamed.es/media/publicaciones/desalinizacion-en-espana.pdf>
- Acuamed. (2017). Retrieved from <https://www.acuamed.es/media/publicaciones/desalinizacion-en-espana.pdf>
- AEDyR. (2019). *AEDyR*. Retrieved from <https://aedyr.com/cifras-desalacion-espana/>
- AENVERDE. (2020). Retrieved from <https://www.aenverde.es/radiografia-de-los-residuos-agricolas-en-almeria-primera-parte/>
- Alfredo Tolón Becerra. (2010). La agricultura intensiva del poniente almeriense: Diagnosticos e instrumentos de gestion ambiental . *Revista electronica de medioambiente* , 18-40.
- Antonio Estevan. (2007). Retrieved from El consumo de energía en la desalación: https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo/Ingcivil/2007_148_113.pdf
- Avatar Energía. (2018). Retrieved from <https://avatarenergia.com/energia-geotermica-en-espana/>
- Bahareh Kokabian . (2019). *Science direct* . Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/desalination-technology/pdf>
- Bellini, E. (2019). Retrieved from <https://www.pv-magazine.es/2019/09/02/el-lcoe-de-la-solar-en-el-sur-de-espana-podria-bajar-hasta-e9-mwh-en-2050/>
- BRITANNICA . (2015). Retrieved from <https://www.britannica.com/technology/desalination#ref1120970>
- CAJAMAR. (2015). Retrieved from <https://publicacionescajamar.es/series-tematicas/informes-coyuntura-analisis-de-campana/analisis-de-la-campana-hortofruticola-de-almeria-campana-2019-2020>
- CAJAMAR. (2016). Retrieved from <https://www.cajamar.es/storage/documents/017-restos-vegetales-1466406472-2d5fa.pdf>
- CCAO. (2020). Retrieved from <https://www.usbr.gov/mp/arwec/water-facts-ww-water-sup.html#:~:text=3%25%20of%20the%20earth's%20water,water%20is%20available%20fresh%20water.>
- D.L. Valera, F. Camacho . (2016). *El agua desalada en los invernaderos de Almería: tecnología de regadío*. Retrieved from <http://www2.ual.es/SNIH16/web/Web/7-06.pdf>

- Domingo Zarzo . (2020). Retrieved from <https://documentos.fedea.net/pubs/eee/eee2020-22.pdf>
- Eduardo Zarza Moya. (2006). *Plataforma Solar de Almeria*. Retrieved from [http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-SA-C10/\\$File/SA-C10.pdf](http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-SA-C10/$File/SA-C10.pdf)
- Energetica Futura . (2010). Retrieved from <https://energeticafutura.com/blog/la-desaladora-perfecta-electricidad-agua-a-bajo-coste/>
- Energética Futura . (2010). <https://energeticafutura.com/blog/la-desaladora-perfecta-electricidad-agua-a-bajo-coste/>.
- Energialis . (2018). Retrieved from <https://energialis.com/2018/01/21/la-idea-para-paliar-la-sequia-que-se-quedo-en-un-cajon/>
- Evans, S. (2020). Retrieved from <https://www.carbonbrief.org/solar-is-now-cheapest-electricity-in-history-confirms-iea>
- Fernandez M.D. (2012, Julio). *Cajamar*. Retrieved from <https://www.publicacionescajamar.es/publicacionescajamar/public/pdf/publicacion-es-periodicas/cuadernos-de-estudios-agroalimentarios-cea/3/3-522.pdf>
- Garrido, S. G. (2015). Retrieved from RENOVETEC: <http://energia.renovetec.com/centrales-de-ciclo-combinado/300-presupuesto-de-planta-de-biomasa#:~:text=De%20un%20modo%20muy%20aproximado,considerando%20que%20la%20planta%20se>
- GEM. (2017). Retrieved from https://www.gem.es/documentos/publicaciones/residuos_agricolas.pdf
- Gobierno de Canarias . (2021). Retrieved from <https://www.iagua.es/noticias/gobierno-canarias/gobierno-canarias-subvenciona-23-plantas-potabilizadoras-85-millones>
- GUDE V.G. (2016). Geothermal source potential for water desalination - current status and future prospectives .
- IAGUA . (2017). Retrieved from <https://www.iagua.es/noticias/seobirdlife/problema-no-es-sequia-sino-escasez-y-sobreplotacion-agua-espana>
- IAGUA. (2017). Retrieved from <https://www.iagua.es/noticias/espana/agencia-espacial-europea/17/05/12/como-es-salinidad-mar-mediterraneo>
- IAGUA. (2021). Retrieved from <https://www.iagua.es/noticias/aqualia/desaladora-mar-alboran-nueva-alternativa-creciente-demanda-agua-almeria>
- ICGC. (2020). Retrieved from <https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Servicios/Geotermia/Geotermia-Gradiente-y-flujo-de-calor>
- IDAE . (2014). Retrieved from https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Factores_emision_CO2.pdf

- IDAE. (2012). Retrieved from https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Documentacion_Basica_Residencial_Unido_c93da537.pdf
- IEA. (2019). Retrieved from <https://www.iea.org/reports/renewables-2019>
- IEA. (2019). Retrieved from <https://www.iea.org/reports/renewables-2019>
- IEA. (2020). Retrieved from <https://www.iea.org/reports/bioenergy-power-generation>
- IEA. (2020). Retrieved from <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview>
- INE. (2016). Retrieved from https://www.ine.es/prodyser/espa_cifras/2019/8/#zoom=z
- IQR. (2020). Retrieved from <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/07/destilacion-flash.html>
- IRENA. (2017). Retrieved from <https://www.irena.org/costs/Power-Generation-Costs/Bioenergy-for-Power>
- IRENA. (2020). Retrieved from <https://www.irena.org/geothermal>
- Jacopo Bacenetti. (2015). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/280918605_Carbon_footprint_of_electricity_from_anaerobic_digestion_plants_in_Italy
- Jaime Marcos. (2012). Retrieved from <https://www.emaze.com/@AWCOIZWT/Energ%C3%ADa-Geot%C3%A9mica>
- José A. Roca . (2016, 1 11). Retrieved from <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-de-biomasa-del-mundo/>
- Jose Manuel Torres Nieto . (2016). Retrieved from Research Gate : https://www.researchgate.net/publication/278302016_USO_AGRONOMICO_DE_RESTOS_DE_COSECHA_EN_LOS_INVERNADEROS_ENARENADOS_DE_LA_CUENCA_MEDITERRANEA
- Junta de Andalucía . (2020). Retrieved from https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/Renovables/3_2_0164_20_publicacion_resumen_potencial_renovable_andalucia.pdf
- Junta de Andalucía . (2020). Retrieved from https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/3_2_0068_20_LA_BIOENERGIA_EN_ANDALUCIA.PDF
- Katerina Stamatelatu . (2011). Production of biogas via anaerobic digestion . Atenas : Handbook of Biofuels Production .
- Keefer BG. (1985). Optimized marching of solar photovoltaic power with reverse osmosis desalination. *Desalination* , 89-103.
- Leahy, S. (2018). *National Geographic*. Retrieved from <https://www.nationalgeographic.com/science/article/world-water-day-water-crisis-explained>

- Lempere. (2020). Retrieved from https://www.solarpowerportal.co.uk/news/solar_pv_costs_fall_82_over_the_last_dec
- Lempriere, M. (2020). Retrieved from https://www.solarpowerportal.co.uk/news/solar_pv_costs_fall_82_over_the_last_dec
- Lenntech. (2009). Retrieved from <https://www.lenntech.es/procesos/mar/post-tratamiento/general/desalacion-post-tratamiento.htm>
- LENNTECH. (2009). Retrieved from <https://www.lenntech.es/nanofiltracion-y-osmosis-inversa.htm>
- León, M. (2016). Retrieved from <https://www.lavozdealmeria.com/noticia/12/almeria/105598/las-desaladoras-de-almeria-un-fiasco-de-624-millones-de-euros>
- María Teresa Varnero Moreno . (2011). Retrieved from Manual biogás: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Martinez, D. Z. (2020). *La Desalación del Agua en España*. Retrieved from <https://documentos.fedea.net/pubs/eee/eee2020-22.pdf>
- Maturana, F. (2020). Retrieved from Diario de Almeria : https://www.diariodealmeria.es/finanzasyagricultura/crisis-agua-Almeria-agricultura_0_1508849209.html
- Maturana, F. (2021). Retrieved from https://www.diariodealmeria.es/agriculturadealmeria/Almeria-agua-escasez-problema_0_1555944816.html
- Ministerio de Medio Ambiente . (2011). Retrieved from https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Calidad_Ambiental/Gestion_De_Los_Residuos_Solidos/compost/EstudioMercadoCompleto.pdf
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente . (2012). Retrieved from https://www.miteco.gob.es/images/es/Residuos%20agrarios_tcm30-193059.pdf
- Ministerio de Agricultura, Alimentacion y Medio Ambiente. (2018). Retrieved from https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/sistema-espaniol-gestion-agua/33desalaciondiseñoconstruccionyexplotacion_tcm30-215756.pdf
- Ministerio de Industria. (2007). Retrieved from <https://www.boe.es/boe/dias/2007/05/26/pdfs/A22846-22886.pdf>
- Mohamed A. Eltawil . (2009). A review of renewable energy technologies integrates with desalination systems . *Renewable and sustainable energy reviews* , 2245-2262.
- Mohammad Ali Abdelkareem. (2018). Retrieved from Science direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916417321306>

- Moreno, A. R. (2011). Retrieved from <http://www.mailxmail.com/curso-agua-desalacion-1-4/destilacion-8220-multiple-efecto-8221-med>
- Muhammad Wakil Shahzad . (2015). Retrieved from <https://www.intechopen.com/books/desalination-updates/adsorption-cycle-and-its-hybrid-with-multi-effect-desalination>
- Nieto, J. M. (2016). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/278302016_USO_AGRONOMICO_DE_RESTOS_DE_COSECHA_EN_LOS_INVERNADEROS_ENARENADOS_DE_LA_CUENCA_MEDITERRANEA
- Penate B. Castellano. (2001). Electrodialysis desalination designed for wind energy (on-grid test). *Desalination* , 53-61.
- REE. (2020). Retrieved from https://www.ree.es/sites/default/files/interactivos/como_consumimos_electricidad/como-varia-mi-consumo.html
- Ruiz, A. (2020, Feb 7). Retrieved from TECPA: <https://www.tecpa.es/planta-biomasa-mas-grande-espana/>
- Sandoval, M. (2017). *Indencity*. Retrieved from <https://www.idencityconsulting.com/la-escasez-del-agua-espana-reto-la-sostenibilidad-hidrica/>
- Simón, J. (2017). Retrieved from <https://www.ideal.es/almeria/provincia-almeria/201705/21/primera-planta-geotermia-almeria-20170520220122-v.html?ref=https:%2F%2Fwww.ideal.es%2Falmeria%2Fprovincia-almeria%2F201705%2F21%2Fprimera-planta-geotermia-almeria-20170520220122-v.html%3Fref%3Dhttps>
- SOLAR BAY. (2020, Octubre). Retrieved from <https://solarbay.com.au/portfolio-item/how-much-emissions-does-solar-power-prevent/>
- Stewart Burn, Manh Hoang, Domingo Zarzo . (2015). Desalination techniques — A review of the opportunities for desalination in agriculture. *DESALINATION* , 2-16.
- Torrente, R. G. (2020). Retrieved from <https://www.plataformatierra.es/detalle/analisis-campana-hortofruticola>
- U.Sahoo, R. Kumar. (2015). Scope and sustainability of hybrid solar-biomass power plant with cooling, desalination in polygeneration process in India . *Renewable and Sustainable energy reviews* , 304-316.
- Universidad de Alicante . (n.d.). Retrieved from Desalinización de aguas salobres: <https://web.ua.es/es/leqa/documentos/oferta-tecnologica/desalinizacion-de-aguas-salobres-alimentada-por-energia-solar.pdf>
- Water Professionals . (2017). Retrieved from <https://www.waterprofessionals.com/learning-center/nanofiltration/>

- World Biogas Association . (2019). Retrieved from https://www.worldbiogasassociation.org/wp-content/uploads/2019/09/WBA-globalreport-56ppa4_digital-Sept-2019.pdf
- World Economic Forum. (2017). Retrieved from <https://www.weforum.org/agenda/2017/08/this-is-the-most-efficient-solar-panel-ever-made#:~:text=The%20solar%20panel%20of%20the%20future&text=Current%20solar%20technology%20only%20converts,efficiency%20of%20about%2025%20percent.>
- WWF. (2012). Retrieved from <https://www.worldwildlife.org/threats/water-scarcity>
- Zarzo, Campos E y Terrero. (2013). "Spanish experience in desalination for agriculture". *Desalination and water treatment*, 53-56.
- Zarzo, D. (2017). *RETAMA*. Retrieved from <https://www.retema.es/noticia/la-desalacion-espanola-ejemplo-mundial-aH6IO>

ANEXO I: ESTUDIO SOLAR (INFORME DE PVSYST)

PVSYST V6.84		06/05/21	Página 1/4
Sistema Conectado a la Red: Parámetros de la simulación			
Proyecto : DESALINIZACION			
Sitio geográfico	Roquetas de Mar	Pais	España
Ubicación	Latitud	36.76° N	Longitud -2.61° W
Tiempo definido como	Hora Legal	Huso horario UT	Altitud 10 m
	Albedo	0.20	
Datos meteorológicos:	Roquetas de Mar	Meteonorm 7.2 (1996-2010), Sat=34% - Sintético	
Variante de simulación : www			
	Fecha de simulación	06/05/21 17h21	
	Simulación para la	20.º año de funcionamiento	
Parámetros de la simulación	Tipo de sistema	No hay escenario 3D, no hay sombreados	
Orientación plano captador	Inclinación	35°	Acimut 0°
Modelos empleados	Transposición	Perez	Difuso Perez, Meteonorm
Horizonte	Sin horizonte		
Sombreados cercanos	Sin sombreado		
Necesidades del usuario :	Carga constante fija	2167 kW	Global 18983 MWh/Año
Características del conjunto FV			
Módulo FV	Si-mono	Modelo	CS1U - 410MS 1500V
Base de datos PVSyst original		Fabricante	Canadian Solar Inc.
Número de módulos FV		En serie	24 módulos
Núm. total de módulos FV		Núm. módulos	24384
Potencia global del conjunto		Nominal (STC)	9997 kWp
Caract. funcionamiento del conjunto (50°C)		U mpp	968 V
Superficie total		Superficie módulos	50265 m²
			En paralelo 1016 cadenas
			Pnom unitaria 410 Wp
			En cond. de funciona. 9087 kWp (50°C)
			I mpp 9393 A
			Superficie célula 48588 m²
Inversor		Modelo	Sinacon PV5000
Base de datos PVSyst original		Fabricante	Siemens
Características		Voltaje de funcionam.	1006-1500 V
Paquete de inversores		Núm. de inversores	4 * MPPT 50 %
			Pnom unitaria 5000 kWac
			Potencia total 10000 kWac
			Relación Pnom 1.00
Factores de pérdida del conjunto FV			
Suciedad del conjunto		Fracción de pérdidas	2.0 %
Factor de pérdidas térmicas	Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (viento) 0.0 W/m²K / m/s
Pérdida óhmica en el Cableado	Res. global conjunto	1.7 mOhm	Fracción de pérdidas 1.5 % en STC
Pérdida Calidad Módulo			Fracción de pérdidas -0.3 %
Pérdidas de "desajuste" Módulos			Fracción de pérdidas 1.0 % en MPP
Pérdidas de "desajuste" cadenas			Fracción de pérdidas 0.10 %
Deterioro promedio de los módulos	Año núm.	20	Factor de pérdidas 0.26 %/año
Desajuste debido al deterioro	Dispersión RMS sobre Imp	0.4 %/año	Dispersión RMS sobre Vmp 0.4 %/año
Efecto de incidencia, perfil definido por el usuario (IAM): Perfil personalizado			
	10°	20°	30°
	1.000	1.000	1.000
	40°	50°	60°
	0.990	0.990	0.970
	70°	80°	90°
	0.920	0.760	0.000

Sistema Conectado a la Red: Resultados principales

Proyecto : DESALINIZACION

Variante de simulación : www

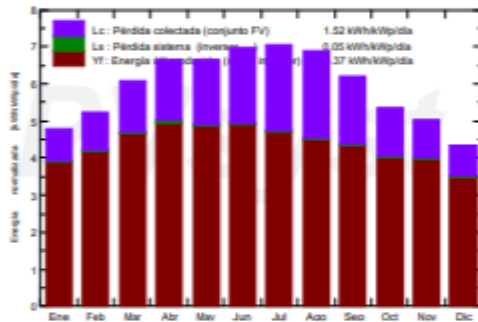
Simulación para la 20.º año de funcionamiento

Parámetros principales del sistema	Tipo de sistema	No hay escenario 3D, no hay sombreados	
Orientación Campos FV	inclinación	35°	acimut 0°
Módulos FV	Modelo	CS1U - 410MS 1500V	Pnom 410 Wp
Conjunto FV	Núm. de módulos	24384	Pnom total 9997 kWp
Inversor	Modelo	Sinacon PV5000	Pnom 5000 kW ac
Paquete de inversores	Núm. de unidades	2.0	Pnom total 10000 kW ac
Necesidades del usuario	Carga constante fija	2167 kW	Global 18983 MWh/año

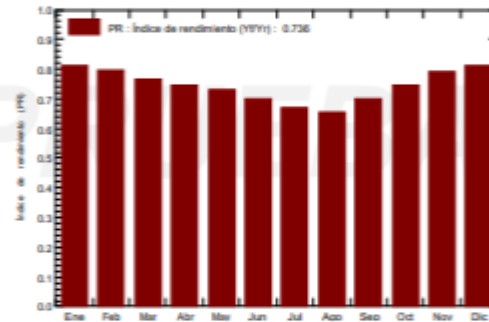
Resultados principales de la simulación

Producción del sistema	Energía producida	15946 MWh/año	Produc. específica	1595 kWh/kWp/año
	Índice de rendimiento (PR)	73.58 %	Fracción solar (SF)	40.32 %

Producciones normalizadas (por kWp instalado): Potencia nominal 9997 kWp



Índice de rendimiento (PR)



www
Balances y resultados principales

	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_User	E_Solar	E_Grid	EFrGrid
	kWh/m²	kWh/m²	°C	kWh/m²	kWh/m²	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh
Enero	87.3	26.78	11.93	148.9	144.2	1218	1612	555.7	648.4	1057
Febrero	100.8	34.38	12.97	146.7	142.0	1182	1456	526.7	641.3	929
Marzo	151.8	48.90	14.94	188.7	182.0	1462	1612	653.5	792.0	959
Abril	185.6	56.80	16.34	199.3	191.6	1504	1560	676.3	811.0	884
Mayo	216.2	73.80	19.57	206.1	197.6	1523	1612	726.2	779.5	886
Junio	232.1	73.09	22.93	209.7	200.9	1484	1560	722.1	745.2	838
Julio	235.5	70.29	25.21	218.2	209.3	1474	1612	740.5	716.5	872
Agosto	207.7	69.69	25.86	213.1	204.9	1410	1612	715.9	678.6	896
Septiembre	158.6	56.88	22.65	185.8	178.8	1312	1560	650.0	646.9	910
Octubre	123.1	48.18	19.73	166.6	160.8	1257	1612	622.0	620.4	990
Noviembre	92.7	30.45	15.11	150.5	145.7	1205	1560	556.5	635.1	1004
Diciembre	77.1	26.89	12.81	134.2	130.0	1098	1612	508.6	576.6	1104
Año	1868.4	616.13	18.37	2167.8	2087.7	16128	18983	7654.2	8291.7	11329

Legendas:	GlobHor	Irradiación global horizontal	GlobEff	Global efectivo, corr. para IAM y sombreados
	DiffHor	Irradiación difusa horizontal	EArray	Energía efectiva en la salida del conjunto
	T_Amb	T amb.	E_User	Energía suministrada al usuario
	GlobInc	Global incidente plano receptor	E_Solar	Energía del sol
			E_Grid	Energía inyectada en la red
			EFrGrid	Energía de la red

Sistema Conectado a la Red: Gráficos especiales

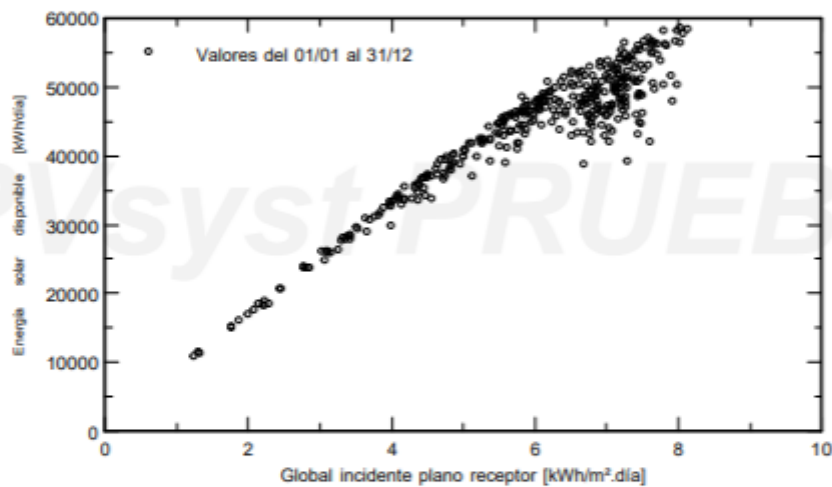
Proyecto : **DESALINIZACION**

Variante de simulación : **www**

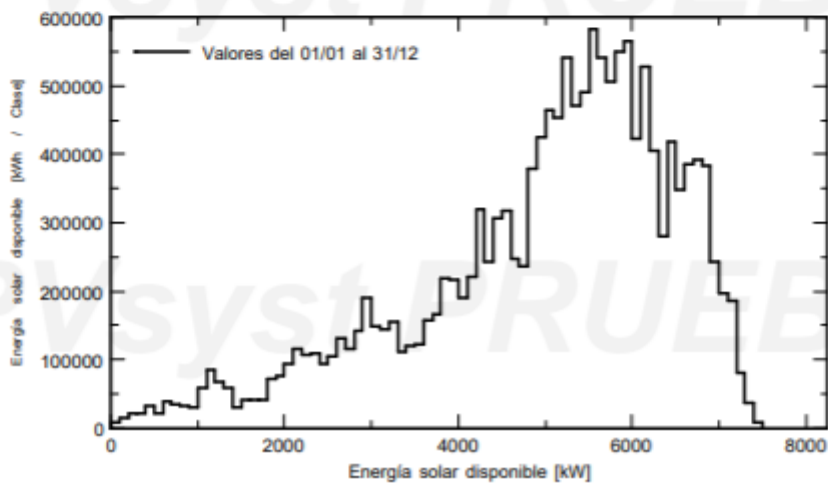
Simulación para la 20.º año de funcionamiento

Parámetros principales del sistema	Tipo de sistema	No hay escenario 3D, no hay sombreados	
Orientación Campos FV	inclinación	35°	acimut 0°
Módulos FV	Modelo	CS1U - 410MS 1500V	Pnom 410 Wp
Conjunto FV	Núm. de módulos	24384	Pnom total 9997 kWp
Inversor	Modelo	Sinacon PV5000	Pnom 5000 kW ac
Paquete de inversores	Núm. de unidades	2.0	Pnom total 10000 kW ac
Necesidades del usuario	Carga constante fija	2167 kW	Global 18983 MWh/año

Diagrama entrada/salida diaria



Distribución de la potencia de salida del sistema



Sistema Conectado a la Red: Diagrama de pérdidas

Proyecto : **DESALINIZACION**

Variante de simulación : **www**

Simulación para la 20.º año de funcionamiento

Parámetros principales del sistema	Tipo de sistema	No hay escenario 3D, no hay sombreados	
Orientación Campos FV	inclinación	35°	acimut 0°
Módulos FV	Modelo	CS1U - 410MS 1500V	Pnom 410 Wp
Conjunto FV	Núm. de módulos	24384	Pnom total 9997 kWp
Inversor	Modelo	Sinacón PV5000	Pnom 5000 kW ac
Paquete de inversores	Núm. de unidades	2.0	Pnom total 10000 kW ac
Necesidades del usuario	Carga constante fija	2167 kW	Global 18983 MWh/año

Diagrama de pérdida durante todo el año

