

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de la Energía

Evaluación preliminar del uso de energías fotovoltaica y eólica en tratamientos de agua en explotaciones mineras de Ecuador y Chile

Autor: Blanca Petit Miranda

Tutor: Lourdes García Rodríguez

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

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Evaluación preliminar del uso de energías fotovoltaica y eólica en tratamientos de agua en explotaciones mineras de Ecuador y Chile

Autor:

Blanca Petit Miranda

Tutor:

Dra. Lourdes García Rodríguez

Catedrática de Universidad

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Carrera: Evaluación preliminar del uso de energías fotovoltaica y eólica en tratamientos de agua en explotaciones mineras de Ecuador y Chile

Autor: Blanca Petit Miranda

Tutor: Lourdes García Rodríguez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

A Alejandro

Agradecimientos

Quiero empezar por agradecer a mis padres y mi hermana, por brindarme tanto todos estos años y porque gracias a ellos he llegado a ser quién soy. También a Alejandro, por ser un apoyo esencial, por animarme a jamás rendirme y simplemente escuchar cuando más lo he necesitado.

A todos los amigos de la infancia y nuevos que me han acompañado durante esta etapa universitaria.

A todos aquellos profesores, desde Primaria a la Universidad, que han despertado en mí la curiosidad por la ciencia y la ingeniería gracias a su pasión por sus materias.

Por último, no puedo acabar sin dar gracias a mi tutora Lourdes, por su disponibilidad, su eterna paciencia y sus palabras de ánimo, porque su guía ha sido fundamental a la hora de llevar a cabo este proyecto.

Blanca Petit Miranda

Sevilla, 2019

Resumen

El agua es el elemento más abundante en el planeta, pero tan sólo un pequeño porcentaje es agua dulce, lo que convierte ésta última en un bien escaso y hace que la desalación se convierta en la mejor opción para utilizar una fuente de agua, que de otra manera no podría aprovecharse.

Las tecnologías renovables abren un nuevo paradigma, puesto que ofrecen una alternativa libre de recursos fósiles para la producción energética en regiones en las que se dispone de los recursos solar o eólico en abundancia y brindan la posibilidad del consumo in situ.

El objetivo de este proyecto es evaluar la producción de agua desalada mediante la utilización de tecnología fotovoltaica y eólica en las cuencas mineras de Ecuador y Chile.

Abstract

Water is the most plentiful element in the planet Earth, but only a small percentage of it is freshwater, which makes this last one become a scarce commodity and desalination the best option in order to utilize a source of water, that otherwise could not be used.

Renewable technologies open a new paradigm, since they offer a fossil sources free alternative for energy production in regions which are rich in solar and wind sources and provides the possibility of on-site consumption.

The aim of this Project is to evaluate the production of desalinated water using photovoltaic and wind technologies in mining areas in Ecuador and Chile.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	xxi
1 Introducción	1
2 Conceptos básicos del modelado de sistemas de energías renovables	4
2.1.1 Radiación solar directa	4
2.1.2 Energía solar fotovoltaica	6
2.2.1 Componentes de un aerogenerador	8
2.2.2 Rugosidad del terreno y variación de la velocidad con la altura	8
2.2.3 Potencial y modelado	9
3 Cálculo de producción de Sistemas Fotovoltaicos y Eólicos	12
3.1.1 Bases de datos	12
3.1.2 Herramientas	12
3.1.3 Pre-dimensionado	12
3.1.4 Diseño del proyecto	13
4 Consumo específico de desalación de agua de mar por Ósmosis Inversa	24
4.1.1 Presión	24
4.1.2 Densidad	25
4.1.3 Capacidad térmica isobárica específica	26
4.1.4 Entalpía	26
4.1.5 Entropía	27
4.1.6 Temperatura	27
4.2.1 Concepto de salinidad	28
4.2.2 Ecuador	30
4.2.3 Chile	31
4.3.1 Ósmosis Inversa	33
4.3.2 Desalación mediante Ósmosis Inversa	34
4.4.1 Software ROSA	35
4.4.2 Cálculo del consumo de la bomba principal	40
5 Perfil de operación de la planta fotovoltaica	42
6 Perfil de operación de la planta eólica	49
6.1.1 Aerogenerador de 3.3 MW	50
6.2.1 Aerogenerador de 3.3 MW	52
7 Comparación de resultados eólicos y fotovoltaicos	55

8 Conclusiones

59

Referencias

61

Índice de Tablas

Tabla 3–1 Tabla de inputs PVsyst	16
Tabla 3–2 Tabla de outputs PVsyst	18
Tabla 3–3. Tabla de Inputs para la instalación eólica	21
Tabla 3–4. Tabla de Outputs para la instalación eólica	21
Tabla 3–5. Tabla de datos	23
Tabla 4–1 Tabla temperaturas máximas y mínimas en Machala [°C].	30
Tabla 4–3 Tabla salinidades máximas y mínimas a lo largo del año en Machala [g/kg].	30
Tabla 4–4 Tabla valores parámetros en Machala.	31
Tabla 4–5 Tabla temperaturas máximas y mínimas a lo largo del año en Antofagasta[°C].	31
Tabla 4–6 Tabla salinidades máximas y mínimas en la región de Antofagasta [g/kg].	32
Tabla 4–7 Tabla valores parámetros en Antofagasta [°C].	32
Tabla 4–8 Tabla Outputs programa ROSA.	39
Tabla 4–9 Tabla de datos conocidos	40
Tabla 4–10 Tabla de datos conocidos	40
Tabla 4–11 Tabla de resultados	41
Tabla 5–1 Localizaciones bajo estudio.	42
Tabla 5–2 Casos tecnología fotovoltaica.	42
Tabla 5–3 Producción de agua desalada.	44
Tabla 5–4 Rendimiento fotovoltaico.	44
Tabla 5–5. Producción eléctrica (MWh) para cada mes del año, para un campo de 3 MWp.	44
Tabla 5–6 Rendimiento fotovoltaico.	46
Tabla 5–7. Producción eléctrica (MWh) para cada mes del año, para un campo de 3 MWp.	47
Tabla 6–1 Localizaciones bajo estudio.	49
Tabla 6–2 Casos tecnología eólica.	49
Tabla 6–3 Producción de agua desalada.	49
Tabla 6–4. Producción eólica (MWh) para cada mes del año, para un aerogenerador de 3.3 MW.	50
Tabla 6–5. Producción de agua desalada (m ³) anual para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación, para un aerogenerador de 3 MW.	52
Tabla 6–6. Producción eólica (MWh) para cada mes del año, para un aerogenerador de 3.3 MW.	53
Tabla 7–1 Producción media de agua desalada con 3.3 MWp de PV o 3.3 MW de eólica para salinidad máxima (agua de mar, consumo específico considerado 2.14 kWh/m ³).	57
Tabla 7–2 Producción media de agua desalada con 3.3 MWp de PV o 3.3 MW de eólica para aguas salobres de altas salinidades [20] - 5881ppm - (consumo específico considerado 0.79 kWh/m ³).	58
Tabla 7–3 Producción media de agua desalada con 3.3 MWp de PV o 3.3 MW de eólica para aguas salobres de bajas salinidades [20] – 647 ppm - (consumo específico considerado 0.23 kWh/m ³).	58

Índice de Figuras

Figura 1-1. Diagrama de distribución agua en el mundo.	1
Figura 2-1. Ilustración tipos de radiación solar.	4
Figura 2-2. Representación gráfica de los ángulos que definen la posición del Sol.	5
Figura 2-3. Ejemplo de instalación aislada de la red.	6
Figura 2-4. Esquema unifilar instalación conectada a la red.	6
Figura 2-5. Curva I-V.	7
Figura 2-6. Esquema componentes aerogenerador.	8
Figura 2-7 Variación de la velocidad del viento en función del terreno.	9
Figura 2-8. Ejemplo de Distribución de Weibull.	11
Figura 3-1. Pestañas de resultados en el pre-dimensionado.	13
Figura 3-2. Esquema granja.	14
Figura 3-3. Pestañas de designación del proyecto.	15
Figura 3-4. Pestaña de definición de la orientación de los módulos.	15
Figura 3-5. Pestaña de elección de los módulos y el inversor.	16
Figura 3-6. Pestaña de ejecución de la simulación.	17
Figura 3-7. Primera interfaz de visualización de resultados.	17
Figura 3-8. Gráficas de energía nominal (kWh/kWp/día) y de factor de rendimiento (%).	18
Figura 3-9. Tabla de principales variables en base mensual.	18
Figura 3-10. Diagrama de pérdidas del sistema.	18
Figura 3-11. Ejemplo de gráfica de las velocidades del viento recogidas por la estación meteorológica a lo largo del mes de enero.	19
Figura 3-12. Curva potencia aerogenerador.	20
Figura 3-13. Ejemplo de producción de energía en el primer día del año en Cañar.	20
Figura 3-14. Producción de energía a lo largo del año en Cañar.	21
Figura 3-15. Clasificaciones del IEC (<i>Intternacional Electrotechnical Comission</i>).	21
Figura 3-16. Mapa de concesiones mineras en Ecuador.	22
Figura 3-17. Mapa de concesiones mineras en Chile, entre Antofagasta y Santiago.	23
Figura 4-1. Temperaturas de la superficie oceánica.	28
Figura 4-2. Salinidad de la superficie oceánica, NASA, Aquarius 2014.	28
Figura 4-3. Salinidad de la superficie oceánica mes de marzo, NASA, SMAP 2018.	29
Figura 4-4. Salinidad de la superficie oceánica mes de agosto, NASA, SMAP 2018.	29
Figura 4-5. Temperaturas medias máximas y mínimas del agua de mar en Ecuador, Machala, a lo largo del año.	30
Figura 4-6. Temperaturas medias máximas y mínimas del agua de mar en Chile, región de Antofagasta, a lo largo del año.	31

Figura 4-7. Proceso de difusión de soluciones con concentraciones diferentes.	32
Figura 4-8. Elemento de membrana de OI.	33
Figura 4-9. Esquemas de sistemas de desalación de 1 y 2 etapas.	34
Figura 4-10. Esquema conceptual de un proceso de desalación por OI.	34
Figura 4-11. Proceso de desalación por OI cámara isobárica.	35
Figura 4-12. Ventana inicial de ROSA; <i>Project Information</i> .	36
Figura 4-13. Ventana <i>Feed Water Data</i> .	36
Figura 4-14. Ventana <i>Feed Water Profile</i> .	37
Figura 4-15. Ventana <i>Scaling Information</i> .	37
Figura 4-16. Ventana <i>System Configuration</i> .	38
Figura 4-17. Ventana <i>Report</i> .	38
Figura 4-18. Esquema de desalación por OI con cámara isobárica).	40
Figura 5-1. Diagrama pérdidas, PVsyst, Cañar.	43
Figura 5-2. Producción energética con fotovoltaica a lo largo del año.	44
Figura 5-3. Producción de agua desalada a lo largo del año para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación, para un campo fotovoltaico de 3 MWp.	45
Figura 5-4. Producción de agua desalada anual para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación, para un campo fotovoltaico de 3 MWp.	46
Figura 5-5. Producción energética con fotovoltaica a lo largo del año.	46
Figura 5-6. Producción de agua desalada a lo largo del año para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación, para un campo fotovoltaico de 3 MWp.	48
Figura 5-7. Producción de agua desalada anual para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación, para un campo fotovoltaico de 3 MWp.	48
Figura 6-1. Producción eólica a lo largo del año, para un aerogenerador de 3.3 MW.	50
Figura 6-2. Producción de agua desalada a lo largo del año para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación, para un aerogenerador de 3.3 MW.	51
Figura 6-3. Producción de agua desalada anual para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación, para un aerogenerador de 3.3 MW.	51
Figura 6-4. Producción eólica a lo largo del año, para un aerogenerador de 3.3 MW.	52
Figura 6-5. Producción de agua desalada a lo largo del año para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación, para un aerogenerador de 3.3 MW.	54
Figura 7-1. Producción energética (MWh) a lo largo del año para los casos más favorables en Ecuador por MW nominal.	55
Figura 7-2. Producción de agua desalada anual para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación para los casos más favorables en Ecuador.	56
Figura 7-3. Producción energética (MWh) a lo largo del año para los casos más favorables en Chile por MW nominal.	56
Figura 7-4. Producción de agua desalada anual para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación para los casos más favorables en Chile.	57

Notación

α	Altura solar
θ_z	Ángulo cenital del Sol
Ψ	Azimut solar
β	Inclinación de la superficie receptora
Υ	Ángulo azimutal de la superficie receptora
θ	Ángulo de incidencia
λ	Longitud
φ	Latitud
δ	Declinación
ω	Ángulo horario
G_d	Radiación difusa
G_R	Radiación directa
k	Factor de forma
v	Velocidad
z	Altura
z_0	Altura de rugosidad del terreno
P	Potencia
p	Presión
T	Temperatura en Kelvin
t	Temperatura en °C
S	Salinidad g/kg
$S_{kg/kg}$	Salinidad kg/kg
ρ	Densidad
h	Entalpía
s	Entropía
SWRO	Sea Water Reverse Osmosis
HPP	High Pressure Pump
BP	Booster Pump
ICH	Isobaric Chamber
q_v	Caudal volumétrico
SEC	Consumo específico

1 INTRODUCCIÓN

“El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza.”

- Leonardo Da Vinci -

En este primer capítulo se pretende contextualizar el proyecto, así como exponer los objetivos a conseguir mediante su realización y la estructura que se seguirá.

El agua y la energía son innegablemente dos de los motores fundamentales de la sociedad. El crecimiento demográfico y el cambio climático han provocado un desequilibrio entre el agua útil y la demanda de ésta misma, ya sea para consumo, el sector agropecuario o la industria.[1]

El agua es el elemento más abundante en el planeta, pero no toda es útil ya que del 100% del agua existente, tan sólo el 2.5% es dulce y el 97.5% restante es salada. De esta agua dulce el 69.7% está retenida en casquetes polares un 30% son aguas subterráneas de difícil acceso y sólo un 0.3% está disponible para el consumo humano, lo que hace esencial comprender la trascendencia del proceso de desalación.

En muchas zonas existen recursos de agua con una mineralización que no las hace adecuadas para el uso industrial. El agua dulce es un recurso escaso y la desalación de agua de mar permite producir agua apta para cualquier tipo de consumo a partir de agua salobre, lo que ofrece la posibilidad de aprovechar una fuente de agua, que de otra manera no sería explotable.



Figura 1-1. Diagrama de distribución agua en el mundo¹.

¹Fuente <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>

El desarrollo de las tecnologías renovables en las últimas décadas se ha visto favorecido por la creciente demanda energética, el creciente interés por la búsqueda de independencia de los recursos fósiles y de la preservación del medioambiente. Este tipo de tecnologías son especialmente favorables para su aplicación a la desalación, puesto que ofrecen una alternativa sostenible en regiones en las que se dispone de los recursos solar o eólico en abundancia y son fuentes que permiten el consumo en el mismo lugar que su generación, lo que disminuye las pérdidas de energía y, en consecuencia, los costes que éstas suponen. [3]

El hecho de que el marco de trabajo de este proyecto busque ser ecológico hace que este tipo de tecnologías se posicionen como primera opción para su desarrollo. Estas fuentes de energía no convencionales han demostrado hasta la fecha ser competitivas para proyectos de desalación, se estudiará por tanto la viabilidad de diferentes casos de fotovoltaica y eólica.

1.1 Contexto. Proyecto REMIND

Este Trabajo Fin de Grado se encuentra englobado dentro del Proyecto REMIND (Renewable Energies for Water Treatment and Reuse in Mining Industries), cuyo objetivo general es proporcionar un marco innovador en la relación entre Fuentes de Energía Renovables y las tecnologías novedosas para el tratamiento de agua en la línea del crecimiento sostenible de las industrias mineras.

Se espera que los nuevos paradigmas explorados reduzcan drásticamente el impacto ambiental debido al consumo extensivo de agua y energía, y para la liberación de agua residual sin tratar durante el ciclo de producción del cobre y el oro.

La red colaborativa del proyecto REMIND entre la Unión Europea, Chile y Ecuador está en línea con la política de la UE y la estrategia para el suministro de materias primas; es más, esta colaboración apoya los esfuerzos económicos y de investigación de los países latinoamericanos en busca de un desarrollo más ecológico y promovido por fuentes de energía renovables.

Las actividades de transferencia de conocimientos bidireccionales implementadas en REMIND buscan:

- Implementar el uso racional de las fuentes de agua en la lógica de la economía circular.
- Promover un acercamiento tecnológico libre de carbón (nexo entre agua y energía) para reducir los requerimientos de las fuentes de energía convencionales.
- Mitigar los factores ambientales de riesgo para la salud en dos emplazamientos de demostración (los distritos mineros de Antofagasta en Chile y la provincia del Oro en Ecuador).
- Explotar la cooperación intersectorial entre academia e industria determinando las mejores prácticas para la transferencia de conocimientos en contextos analógicos.

REMIND reúne ocho instituciones de enseñanza superior líderes y grandes compañías de cuatro países (España, Italia, Chile y Ecuador) e implementa una red multisectorial y transdisciplinaria.[2]

1.2 Objetivos del Trabajo Fin de Grado

Este Trabajo Fin de Grado expande el objetivo del Proyecto REMIND considerando otro tratamiento de agua de gran importancia como es la desalación de agua, mediante la consecución de los siguientes objetivos:

- Valorar la aplicación de energía fotovoltaica y eólica a la desalación de agua en las cuencas mineras de Chile y Ecuador.
- Establecer rangos de kW_p (kilovatios pico) de energía fotovoltaica instalado por $\text{m}^3/\text{día}$ nominal instalado de desalación.
- Establecer rangos de kW (kilovatios) de energía eólica instalado por $\text{m}^3/\text{día}$ nominal instalado de desalación.

1.3 Estructura

Capítulo 1 Introducción.	Con este capítulo se pretende ofrecer una visión general de la motivación del proyecto, su contexto, así como los objetivos que persigue.
Capítulo 2 Conceptos básicos del modelado de sistemas de energías renovables.	Este capítulo presenta las tecnologías que se utilizarán en el proyecto, repasando todos los conceptos fundamentales que las definen y que serán necesarios a la hora de comprender el desarrollo del proyecto, así como las ecuaciones que las modelan.
Capítulo 3 Cálculo de producción de sistemas fotovoltaicos y eólicos.	Se calcula y analiza la producción energética anual de cada uno de los sistemas objeto de este estudio (fotovoltaico y eólico). Se introducen el software o metodología y describen los procesos llevados a cabo mediante dos ejemplos.
Capítulo 4 Consumo específico de desalación de agua de mar por Ósmosis Inversa.	Se describen las propiedades del agua de mar, la salinidad, conceptos básicos de la desalación por ósmosis inversa y se calcula el consumo de la bomba principal del sistema mediante el software ROSA.
Capítulo 5 Perfil de operación de la planta fotovoltaica.	Se realiza un análisis de la producción de energía fotovoltaica en las localizaciones más desfavorables y más favorables en Ecuador y Chile. Se determinan qué condiciones son más convenientes para producir agua.
Capítulo 6 Perfil de operación de la planta eólica	Se realiza un análisis de la producción de energía eólica en las localizaciones más desfavorables y más favorables en Ecuador y Chile. Se determinan qué condiciones son más convenientes para producir agua.
Capítulo 7 Comparación de resultados eólicos y fotovoltaicos.	En este capítulo se comparan y valoran las producciones energéticas fotovoltaica y eólica y la producción de agua de desalación para los diferentes consumos nominales de plantas desaladoras en los emplazamientos más favorables de Ecuador y Chile. Se establecen los rangos de kW de energía fotovoltaica y eólica instalados por m ³ /día nominal instalado de desalación.
Capítulo 8 Conclusiones.	Se analizan los resultados y se llega a una serie de conclusiones tras el estudio completo.

2 CONCEPTOS BÁSICOS DEL MODELADO DE SISTEMAS DE ENERGÍAS RENOVABLES

El objetivo de este capítulo consiste en introducir las tecnologías renovables, solar y eólica, definiendo los conceptos básicos de las mismas y las ecuaciones que las modelan para conocer cuáles serían las variables que nos competen en el área de estudio.

2.1 Modelado del recurso solar

La radiación solar es una radiación de naturaleza térmica procedente de un foco, el Sol, a alta temperatura, 5780 K aproximadamente. La atmósfera, la cual es un medio semitransparente, modifica la magnitud y dirección de dicha radiación solar extraterrestre, provocando una disminución de la radiación solar que incide en la superficie terrestre, fenómeno conocido como atenuación atmosférica.

La radiación solar total que llega a la Tierra (global) es la suma de la directa, la difusa y reflejada:

- La radiación solar directa es aquella recibida sin modificar su dirección al atravesar la atmósfera terrestre.
- La radiación solar difusa es la recibida después de modificar su dirección al atravesar la atmósfera como consecuencia de la dispersión atmosférica. En los modelos isótropos se considera que se dispersa en todas las direcciones de igual manera.
- La radiación solar reflejada es la recibida tras reflejarse en una superficie, tal y como ocurre con la difusa, se considera distribuida por igual en todas las direcciones.

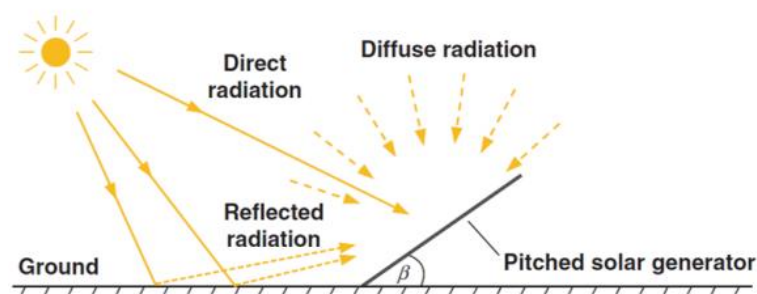


Figura 2-1. Ilustración tipos de radiación solar.²

La irradiancia G [W/m^2] es la potencia radiante incidente en una superficie por unidad de superficie.

2.1.1 Radiación solar directa

Para conocer la radiación solar directa es necesario definir una serie de parámetros que permiten caracterizarla:

- Altura solar (α): Ángulo entre la horizontal y la dirección de la radiación solar directa.
- Ángulo cenital del Sol (θ_z): Ángulo entre la vertical y la dirección de la radiación solar directa.

² Fuente <https://pdfs.semanticscholar.org/e702/9a14d9cf4fe98d31e88b0d08998098425d46.pdf>

- Azimut solar (Ψ): Desviación de la proyección de la radiación solar directa sobre el plano horizontal frente al meridiano local.
- Inclinación de la superficie receptora (β): Ángulo entre el plano de la superficie y el plano horizontal.
- Ángulo azimutal de la superficie receptora (Υ): Desviación de la proyección de la normal a la superficie sobre el plano horizontal frente al meridiano local.
- Ángulo de incidencia (θ): Ángulo entre la radiación solar directa y la normal a la superficie receptora.
- Longitud (λ): Distancia entre localidad y meridiano de referencia.
- Latitud (ϕ): Distancia angular de la localidad en relación al ecuador.
- Declinación (δ): Ángulo que forma la línea que une el centro de la Tierra y el del Sol con el plano del ecuador celeste. Se puede hallar mediante la ecuación de Cooper:

$$\delta = 23.45 \text{sen} \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2-1)$$

Existen también una serie de valores tabulados que permiten simplificar los procedimientos.

- Ángulo horario (ω): Desplazamiento angular del sol al este o al oeste en relación al meridiano local, debido a la rotación de la Tierra en torno a su eje a una velocidad de $15^\circ/\text{hora}$.

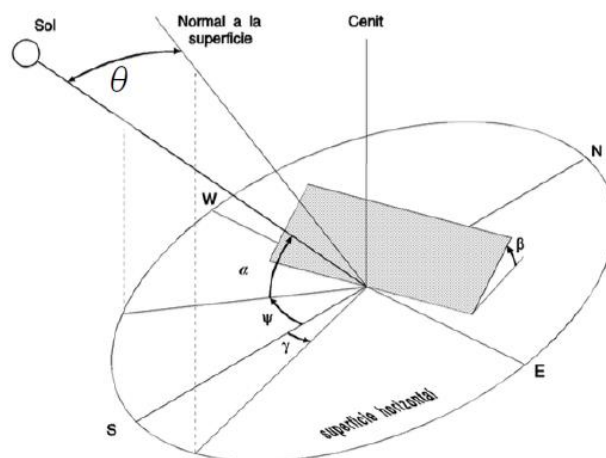


Figura 2-2. Representación gráfica de los ángulos que definen la posición del Sol.³

El procedimiento comienza con el cálculo del ángulo de incidencia de la radiación directa, que es función de la localidad, día, hora, inclinación y azimut de la superficie receptora, tal y como expresa la ecuación:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \omega + \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (2-2)$$

El ángulo cenital del Sol (θ_z) se halla mediante la ecuación:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \quad (2-3)$$

El ángulo solar de salida del Sol y puesta (ω_s) se define como:

$$\cos \omega_s = -\tan \delta \tan \phi \quad (2-4)$$

³ Fuente apuntes Energía Solar en la Edificación. Grado de Ingeniería de Energía. Tema 1: Energía Solar

Por último, el número teórico de horas de Sol (N) viene dado por:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \phi) \quad (2-5)$$

2.1.2 Energía solar fotovoltaica

Una instalación fotovoltaica produce electricidad directamente de la radiación solar. Los dispositivos responsables de la conversión de la radiación solar en energía eléctrica son las células fotovoltaicas, las cuales se encuentran asociadas entre sí mediante lo que conocemos como módulos fotovoltaicos.

Las instalaciones fotovoltaicas se dividen en dos grupos en función de su finalidad:

- Aisladas de la red: Cubren las necesidades de energía eléctrica de un lugar aislado de la red convencional.

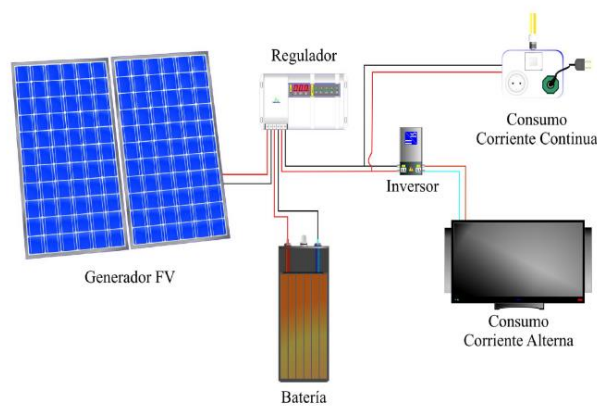


Figura 2-3. Ejemplo de instalación aislada de la red.⁴

- De conexión a red: Inyectan la energía a la red de la compañía eléctrica obteniendo ingresos con su venta.

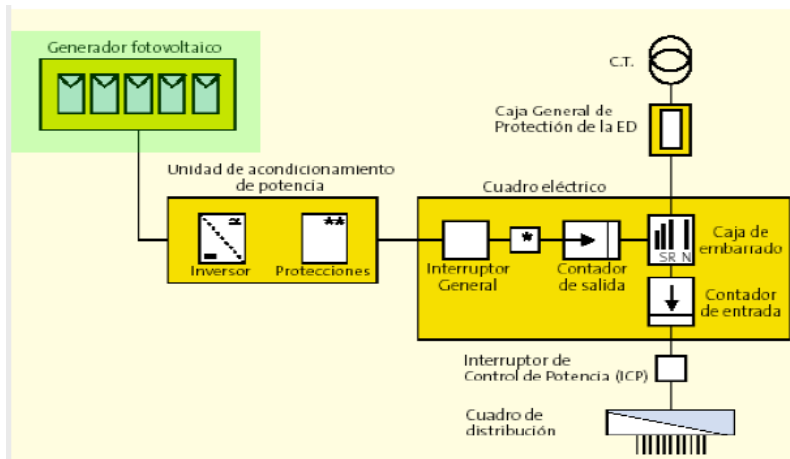


Figura 2-4. Esquema unifilar instalación conectada a la red.⁵

2.1.2.1 Componentes

- Generador fotovoltaico: Consiste en una asociación de módulos (serie/paralelo), que son agrupaciones de células solares.
- Célula solar: Dispositivo que transforma la radiación solar en energía eléctrica (efecto fotovoltaico).

⁴ Fuente Isidoro Lillo Bravo

⁵ Fuente Isidoro Lillo Bravo

- Baterías: Dispositivo capaz de transformar cierta cantidad de energía química en eléctrica y viceversa, de manera que permiten almacenar la energía.
- Reguladores de tensión: Dispositivos que evitan la sobrecarga o descarga profunda de las baterías.
- Inversor o convertidor CC/CA: Dispositivos que convierten la corriente continua en alterna.

La energía eléctrica obtenida mediante la tecnología fotovoltaica proviene del mismo recurso que la energía solar térmica; el Sol. Por tanto, las variables que la definen son las mismas. Los parámetros que definen una célula son:

- La intensidad de cortocircuito (I_{cc}) es la intensidad que genera la célula solar cuando se somete a una tensión nula.
- La tensión a circuito abierto (U_{ca}) es la tensión a la cual la célula no produce electricidad.
- La potencia pico (P_{mp}) es la máxima potencia que puede suministrar una célula, y corresponde al punto de la curva intensidad- tensión donde el producto de la tensión por la corriente es máximo.
- La intensidad a máxima potencia (I_{pmp}) es la que la célula proporciona a máxima potencia bajo unas condiciones de temperatura y radiación, y se utiliza como corriente nominal.
- La tensión a máxima potencia (U_{pmp}) es la que la célula proporciona a máxima potencia bajo unas condiciones de temperatura y radiación, y se utiliza como tensión nominal.

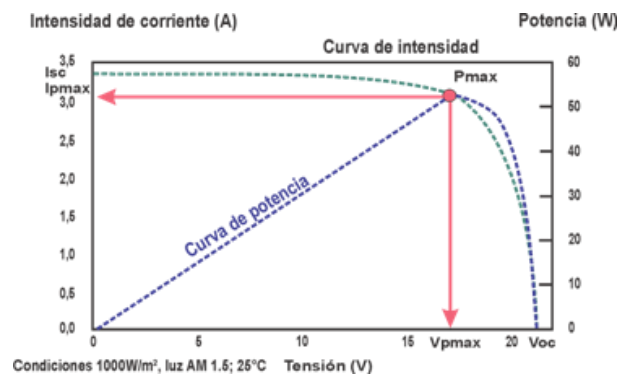


Figura 2-5. Curva I-V.⁶

La intensidad de cortocircuito que genera la célula aumenta con la irradiancia, mientras que la tensión no sufre variaciones. La tensión disminuye con el aumento de temperatura en la célula, lo que provoca a su vez una disminución del rendimiento.

La curva intensidad- tensión de un módulo se obtiene a partir de las curvas de las células que lo componen. Para conocer los parámetros del módulo se halla:

- Intensidad de cortocircuito del módulo

$$I_{CC \text{ MÓDULO}} = I_{CC \text{ CÉLULA}} N_{PP} \quad (2-6)$$

- Temperatura de operación

$$T_{op} = T_a + \frac{TONC(^{\circ}C) - 20}{800} \cdot G \quad (2-7)$$

- Tensión

$$\begin{aligned} V_{MÓDULO} &= V_{CC \text{ CÉLULA}} N_{PS} \\ V_{PMP \text{ MIN}} &< V_{MIN \text{ P}} N_{PS} \\ V_{PMP \text{ MAX}} &> V_{MAX \text{ P}} N_{PS} \end{aligned} \quad (2-8)$$

⁶ Fuente Isidoro Lillo Bravo

Donde N_{pp} hace referencia al número de paneles en paralelo y N_{ps} , al número de paneles en serie. Conocidos dichos datos se pueden elegir los módulos necesarios para la instalación en cuestión.

2.2 Modelado del recurso eólico

La energía eólica puede considerarse producto de la energía solar también. La Tierra está expuesta al calor del Sol, pero su inclinación y geometría hacen que dicho calentamiento no se produzca de manera uniforme, sino que sea mucho más acentuado en la región ecuatorial que en los polos, y dichos gradientes de temperatura originan la circulación del aire por el globo terráqueo.

Todas las energías renovables presentan variación en su disponibilidad a lo largo del tiempo, ya sea diaria, horaria o puntual. El emplazamiento de un parque eólico puede influenciar la intermitencia del suministro, esto hace que se busque un lugar que cumpla tres requisitos:

- Elevada velocidad media, buena exposición y sin obstáculos al viento.
- Variaciones de la velocidad aceptables.
- Niveles de turbulencia y vientos extremos aceptables, puesto que mermarán la vida útil del aerogenerador.

2.2.1 Componentes de un aerogenerador

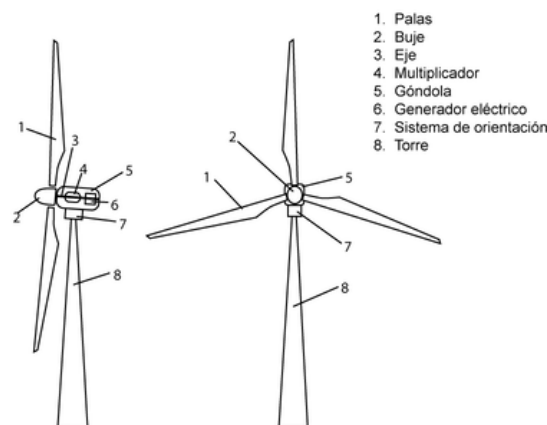


Figura 2-6. Esquema componentes aerogenerador.⁷

- Las palas del rotor capturan la energía del viento y transfieren la potencia al rotor en el buje.
- El buje se encuentra anclado al eje de baja velocidad de la aeroturbina.
- El eje de baja velocidad conecta el buje del rotor con el multiplicador.
- El multiplicador permite que el eje de alta velocidad gire más rápido que el de baja velocidad.
- La góndola contiene algunos componentes del aerogenerador como el multiplicador o el generador eléctrico.
- El generador suele ser asíncrono.
- El sistema de orientación permite modificar la orientación del aerogenerador en función de la dirección del viento.
- La torre soporta la góndola y el rotor. [4]

2.2.2 Rugosidad del terreno y variación de la velocidad con la altura

La velocidad del viento se ve afectada por la fricción con la superficie terrestre, es decir, la topografía. A mayor rugosidad del terreno, menor será la velocidad del viento, puesto que éste se habrá ralentizado debido a los obstáculos, tal y como se puede observar en la ilustración inferior.

⁷ Fuente apuntes Energía Eólica, Grado en Ingeniería de la Energía. Capítulo 1 Introducción, grado Ingeniería de la Energía.

Los valores de altura de rugosidad se encuentran tabulados en función del tipo de terreno, pero no deben superar el valor 0.4 m para la instalación de un aerogenerador sea viable.

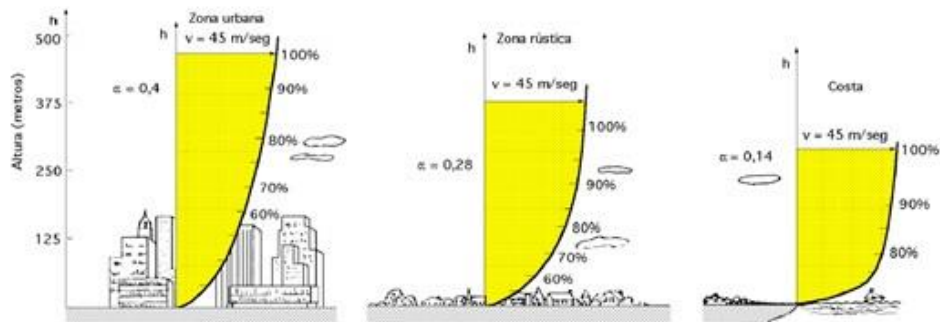


Figura 2-7 Variación de la velocidad del viento en función del terreno.⁸

2.2.3 Potencial y modelado

El potencial de la energía que se puede obtener mediante la explotación del recurso eólico se puede llegar a conocer gracias a la distribución de Weibull, puesto que la fluctuación de la velocidad del viento es una característica de la energía eólica que requiere ser abordada desde el punto de vista estadístico.

La distribución de Weibull es una herramienta matemática que permite conocer la distribución estadística de las velocidades del viento en un emplazamiento, puesto que éstas varían constantemente.

La distribución de Weibull modela la velocidad del viento como una variable aleatoria mediante dos parámetros; el factor de forma k adimensional, el cual debe superar la unidad para que se dé una distribución Gaussiana, y el factor de escala c (m/s) con las mismas unidades que la velocidad, puesto que está relacionado directamente con la velocidad anual media del viento. Cabe destacar, que la función de Weibull tiene una función de densidad de probabilidad y una función de distribución acumulativa en función de los parámetros ya mencionados, las cuales son, respectivamente [5 [6]] [7]:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2-9)$$

$$F(v) = \int_{-\infty}^v f(u) d(u) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Para el estudio de los parámetros k y c se definen el valor medio del viento v_m (m/s) y la desviación estándar σ :

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_m}\right)^{-1.086} \quad (2-10)$$

$$c = \frac{v_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2-11)$$

El factor de escala se puede aproximar mediante la ley de Lysen mediante:

$$c = \left(0.586 + \frac{0.433}{k}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (2-12)$$

Donde $\Gamma(x)$ es la función gamma definida mediante la ecuación:

⁸ Fuente UPV.

$$\Gamma(x) = \int_0^{\alpha} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (2-13)$$

La descripción de la variación de la velocidad del viento es imprescindible a la hora de optimizar el diseño de la aeroturbina y sus costes de generación. Son de especial importancia la velocidad de viento más probable (v_{mp}) y la velocidad de viento de mayor energía (v_{maxE}):

$$v_{mp} = c \left(\frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (2-14)$$

$$v_{maxE} = c \left(\frac{k+2}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (2-15)$$

La potencia disponible en el viento viene dada por la ecuación:

$$P = \frac{1}{2} A \rho v^3 \quad (2-16)$$

Donde P sería la potencia [W] la cual es proporcional al área A [m²], ρ la densidad del aire [kg/ m³] y v la velocidad del viento [m/s] de donde se puede observar la gran influencia de la velocidad del viento en la potencia generada por la turbina. La potencia que genera una turbina se define mediante su curva de potencia, la cual suele facilitar el fabricante y se determina en función de una serie de ensayos normalizados.

La altura tiene una gran influencia en la velocidad del viento, por ello es imprescindible conocer el comportamiento del viento a la altura del buje. El efecto de cizallamiento del viento hace que a medida que aumente la altura, la velocidad del viento incremente.

Conocida la velocidad del viento $v(z_r)$, a una altura de referencia z_r , se puede obtener cualquier velocidad a una altura diferente $v(z)$, a través del modelo logarítmico del viento (también conocido como modelo de Prandtl), donde z_0 es la longitud de rugosidad del terreno cuyos valores se encuentran tabulados [8]:

$$v(z) = v(z_r) \cdot \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_r/z_0)} \quad (2-17)$$

$$v(z) = v(z_{ref}) \cdot \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_{ref}/z_0)} \Rightarrow \begin{cases} k \neq f(z) \\ c(z) = c(z_{ref}) \cdot \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_{ref}/z_0)} \end{cases}$$

Conocidos la dirección, longitud de rugosidad del terreno y los datos de velocidad, se puede obtener una función de Weibull para la altura del buje en cuestión.

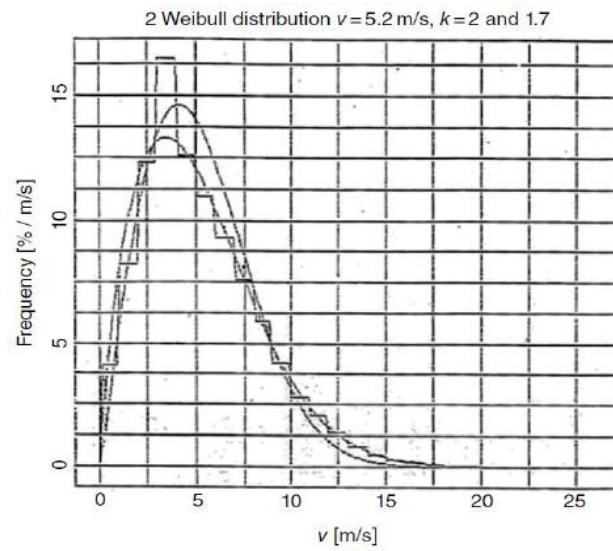


Figura 2-8. Ejemplo de Distribución de Weibull.⁹

⁹ Fuente apuntes Energía Eólica, Grado en Ingeniería de la Energía. Capítulo 1 Introducción, grado Ingeniería de la Energía.

3 CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS Y EÓLICOS

En este capítulo se calculará la producción energética (potencia) de cada uno de los sistemas bajo estudio en el proyecto, es decir, fotovoltaico y eólico, frente al tiempo. Para cada uno de ellos se utilizará un Software o metodología diferente, que se detalla a continuación y los cuales se presentarán mediante dos ejemplos.

3.1 Metodología de trabajo para sistemas Fotovoltaicos

En el caso de los sistemas fotovoltaicos, el estudio se desarrollará por medio del Software PVsyst, un programa que permite el estudio, simulación y análisis de datos de instalaciones fotovoltaicas. [9]

La simulación del sistema calcula la distribución de energía a lo largo del año y los principales resultados que se obtendrán serán:

- Energía total producida [MWh/año].
- Performance ratio (PR [%]), el cual describe la calidad del propio sistema.
- La energía específica [kWh/kWp], la cual es un indicador de la producción basado en la radiación disponible (en función de la localización y la orientación).

El procedimiento que se lleva a cabo se puede resumir fácilmente en tres pasos principales:

- Especificar la potencia deseada o el área de la que se dispone.
- Elegir un módulo fotovoltaico de la base de datos interna de la que dispone el programa.
- Elegir un inversor de la base de datos.

PVsyst entonces propondrá una configuración que nos otorgará la posibilidad de llevar a cabo una simulación preliminar.

La interfaz que el usuario puede ver una vez se ejecuta el programa consta de cuatro pestañas, que se describen a continuación [10].

3.1.1 Bases de datos

En esta sección encontramos una base de datos del recurso solar y los componentes de la planta (paneles, inversor, baterías) los cuales se pueden utilizar para la simulación. En caso de que los componentes que se quieran utilizar en el proyecto tengan especificaciones concretas, se pueden introducir nuevas librerías de datos.

3.1.2 Herramientas

Esta ventana proporciona herramientas adicionales para estimar y visualizar el comportamiento de la instalación. Contiene, además, un conjunto de herramientas específicamente diseñado para importar datos de instalaciones solares existentes para comparar con la simulación.

3.1.3 Pre-dimensionado

Permite realizar un análisis rápido de la viabilidad, potencial y limitaciones del proyecto, ofreciendo una primera aproximación a éste y sin pretender ser de uso en los informes al cliente.

En el caso del pre-dimensionado de sistemas aislados o de bombeo es una herramienta de gran utilidad, en el caso de sistemas conectados a la red, permite a los arquitectos evaluar el potencial fotovoltaico de un edificio.

- Se especifica el tipo de sistema (conectado a red, aislado o de bombeo).
- Elegimos la localización del emplazamiento de nuestra planta.
- Definimos el perfil de obstáculos.
- A continuación, especificamos el área de la que disponemos, la potencia, o la producción nominal de la planta en función del dato del que dispongamos, así como los datos de orientación e inclinación de nuestro módulo.
- Elegimos los componentes; tipo de módulo, configuración, tipo de tecnología y ventilación.

Tendremos una pestaña con los resultados, donde podremos ver gráficas del recurso solar a lo largo del año y la energía de salida, una tabla con los resultados y el análisis de costes.

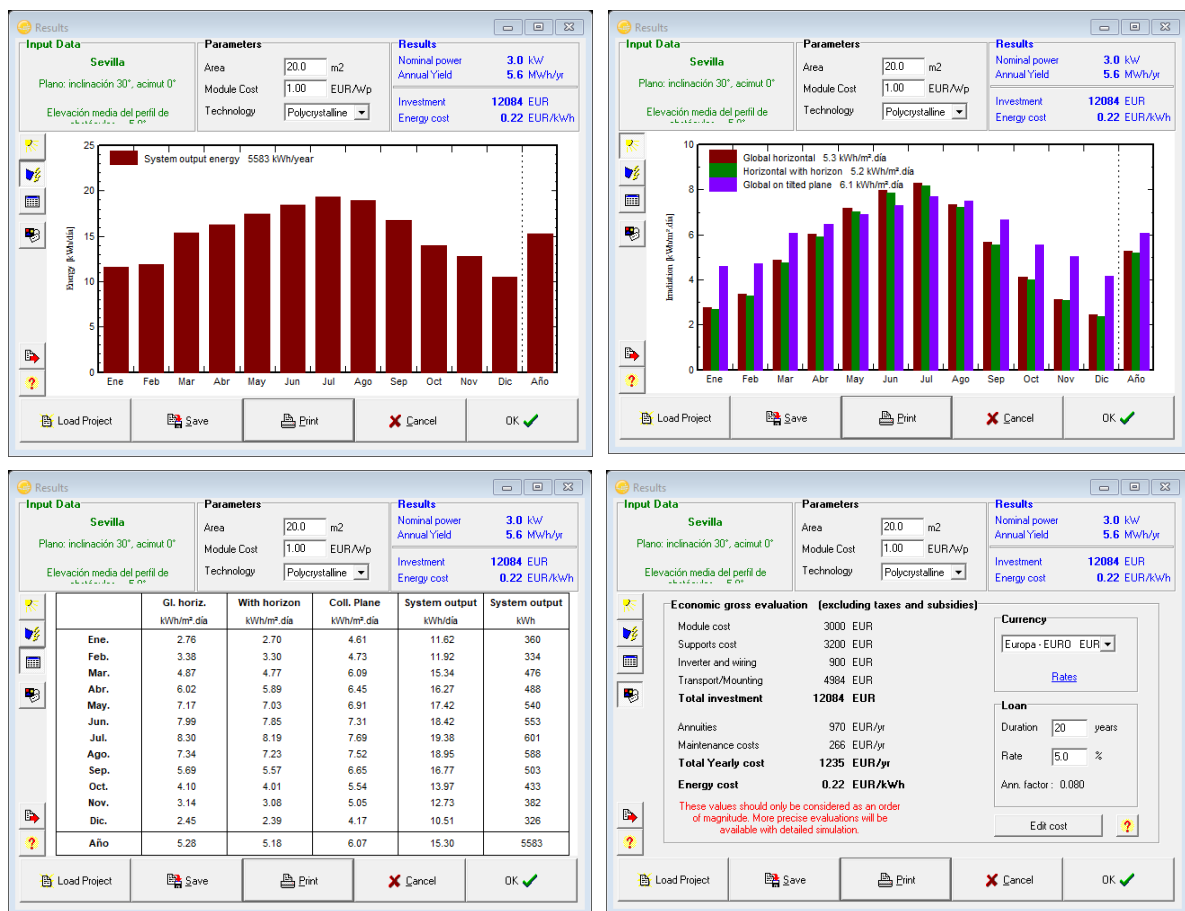


Figura 3-1. Pestañas de resultados en el pre-dimensionado.

3.1.4 Diseño del proyecto

Se trata de la parte principal del programa y permite realizar el estudio completo del proyecto.

3.1.4.1 Ejemplo de proyecto

Para la introducción del desarrollo del diseño de un proyecto en PVsyst, se presentará un ejemplo paso a paso, diferente al de objeto de estudio del Proyecto REMIND; se considerará una granja emplazada en Francia, cerca de Marsella, un sistema conectado a la red. El edificio en cuestión presenta el siguiente esquema:

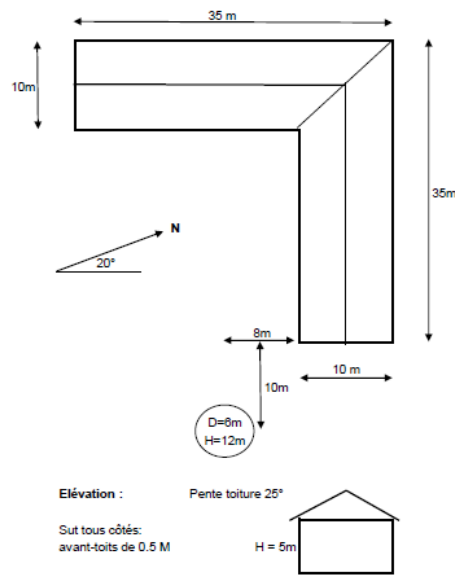


Figura 3-2. Esquema granja.

El techo de la granja está orientado al sur y se pretende cubrir un área entorno a $5\text{m} \times 25\text{m} = 125\text{m}^2$ con módulos fotovoltaicos monocristalinos.

Cuando se lleva a cabo un proyecto en PVsyst los pasos que se seguirán son los siguientes:

1. Creación del proyecto especificando la localización del emplazamiento y los datos meteorológicos.
2. Definición de una variable básica del sistema; incluyendo la orientación de nuestros módulos, la potencia requerida o el área disponible y el tipo de módulos fotovoltaicos e inversores que se utilizarán. PVsyst propondrá una configuración básica para esta elección y fijará unos valores predeterminados razonables para los parámetros necesarios en el primer cálculo. Será una primera aproximación cuyo resultado se irá refinando en iteraciones sucesivas.
3. Definición de variables sucesivas añadiendo progresivamente diferentes perturbaciones al primer sistema, así como sombras cercanas y lejanas, parámetros de pérdidas específicas, evaluación económica, etc. Se aconseja simular y guardar cada variante para poder comparar y ver el impacto de cada uno de los detalles añadidos a la simulación.

Definición del proyecto

Se puede elegir un emplazamiento de la base de datos, que contiene en torno a 1200 emplazamientos de Meteonorm, o definir un nuevo emplazamiento localizado en cualquier sitio en el globo terráqueo. En nuestro caso, tomaremos Marsella de la base de datos. El emplazamiento del proyecto define las coordenadas (latitud, altitud y zona horaria) y contiene los datos meteorológicos mensuales, dentro de dichos datos serán imprescindibles la irradiación global horizontal y la irradiación difusa horizontal, y como datos opcionales la temperatura ambiente media y la velocidad del viento.

El factor de albedo nunca se modifica por norma general, se toma como estándar un valor de 0.2, aun así, para localizaciones como pueden ser la montaña sí que es preciso definir un factor mayor (en torno al 0.8) para los meses en los que la nieve sea persistente. En nuestro caso, dejaremos los valores predefinidos.

El siguiente paso a llevar a cabo es la definición de las temperaturas de dimensionado, las cuales pueden depender de la localización. La temperatura mínima para el voltaje absoluto depende del emplazamiento, puesto que está relacionada con la seguridad de nuestro sistema (determina el máximo voltaje), por lo que se considerará la mínima temperatura diurna de la localización. Para nuestro ejemplo, no modificaremos los valores predeterminados.

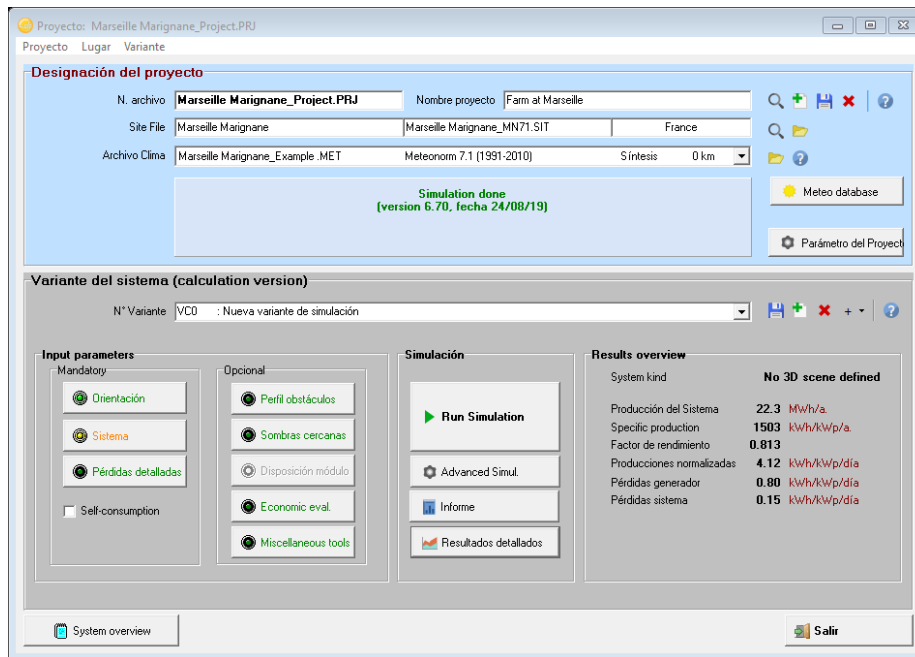


Figura 3-3. Pestañas de designación del proyecto.

Tras haber definido localización y los inputs meteorológicos del emplazamiento, se procede a crear la primera variante. Se definirán ahora la orientación de los paneles solares, el tipo y número de módulos fotovoltaicos y número de inversores que se utilizarán.

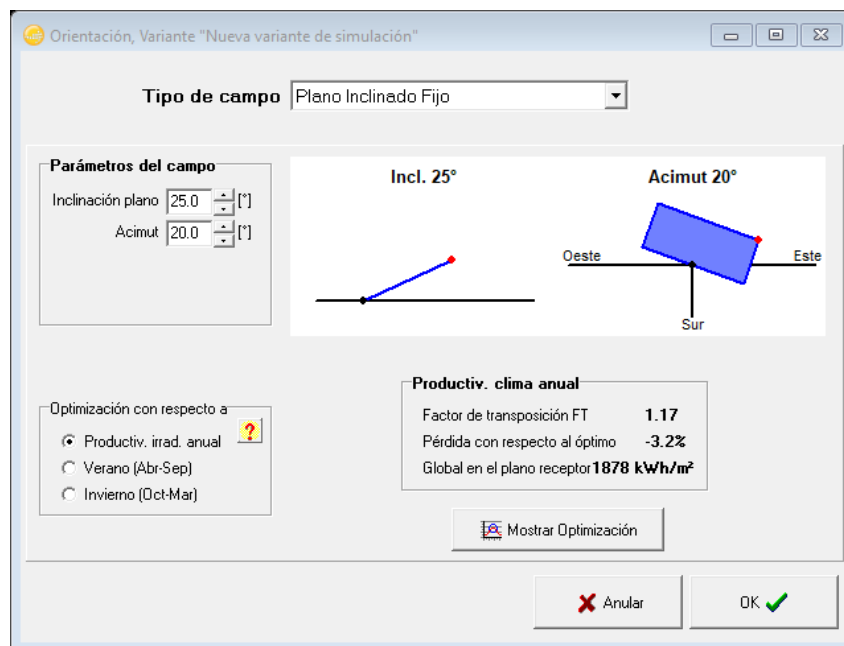


Figura 3-4. Pestaña de definición de la orientación de los módulos.

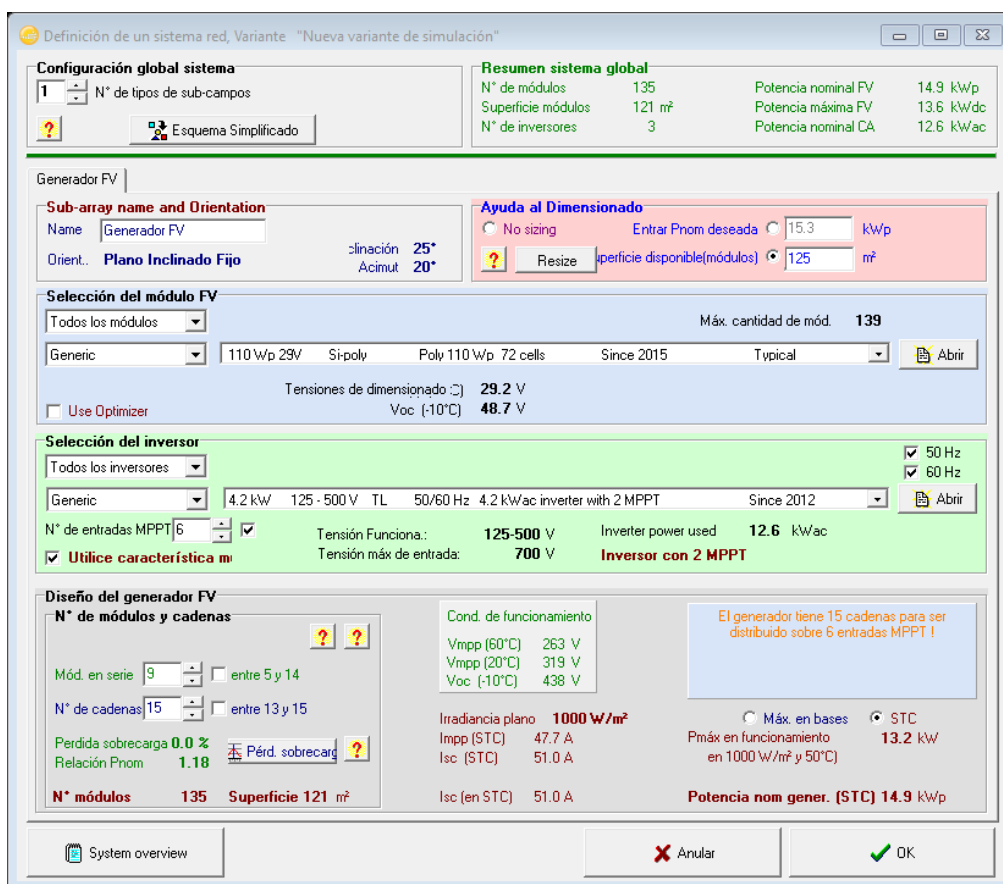


Figura 3-5. Pestaña de elección de los módulos y el inversor.

A continuación, se presenta una tabla con todas las variables de entrada al programa, junto con las hipótesis que se han hecho:

Tabla 3–1 Tabla de inputs PVsyst

Inputs	
1. Localización.	Marsella
2. Factor de albedo y temperaturas de operación.	Hipótesis: Parámetros predeterminados.
3. Orientación de los paneles solares.	Tipo de campo: Plano inclinado fijo Ángulo de inclinación: 25° Ángulo azimutal: 20° al este
4. Ayuda al dimensionado: Dato potencia deseada/ área disponible.	Área disponible: 125 m ² .
5. Selección de módulos fotovoltaicos.	Genérico, 110 W.
6. Selección del inversor.	Genérico de 4.2 kW; PVsyst sugiere una configuración de tres inversores, 15 strings y 9 módulos en serie.
7. Parámetros opcionales: Perfil de obstáculos, sombras cercanas	Hipótesis: Se han considerado despreciables.

Primera simulación

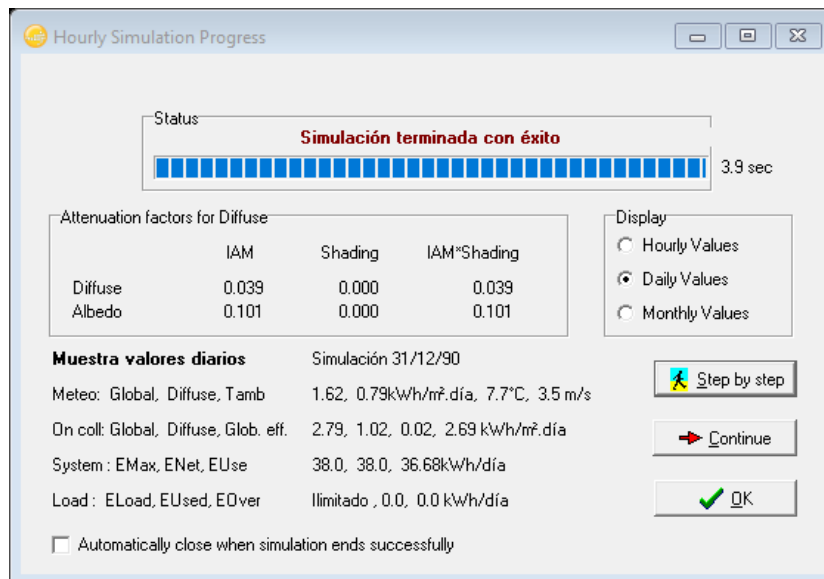


Figura 3-6. Pestaña de ejecución de la simulación.

Tras ejecutar la primera simulación, aparecerá un cuadro donde se puede examinar un diagrama (entrada-salida) que detalla el comportamiento del sistema, muestra la energía inyectada a la red como función de la radiación en el colector plano para cada día simulado.

Se genera así mismo, un informe donde se puede consultar:

- Los parámetros subyacentes en la simulación.
- Los principales parámetros con una tabla mensual y gráficas de los valores normalizados.
- El diagrama de pérdidas, el cual muestra el balance energético y todas las pérdidas a lo largo del sistema y nos permitirá calcular el rendimiento de la planta fotovoltaica.

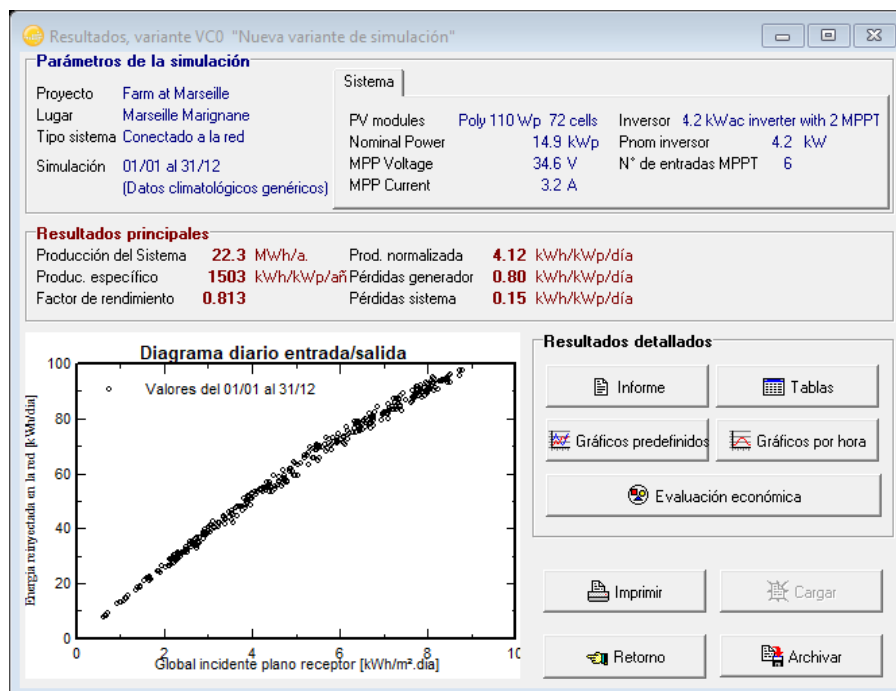


Figura 3-7. Primera interfaz de visualización de resultados.

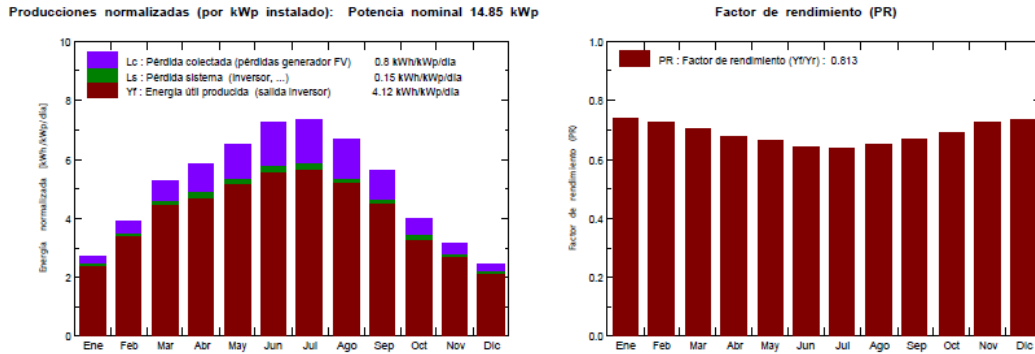


Figura 3-8. Gráficas de energía nominal (kWh/kWp/día) y de factor de rendimiento (%).

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
Enero	53.8	25.63	5.93	84.1	81.1	1.145	1.105	0.885
Febrero	77.7	28.95	7.10	110.0	106.6	1.468	1.418	0.868
Marzo	129.9	48.82	11.07	163.7	159.1	2.122	2.049	0.843
Abril	157.9	59.59	14.55	174.3	169.1	2.184	2.108	0.814
Mayo	198.7	77.63	19.33	202.0	195.8	2.476	2.390	0.797
Junio	219.3	70.37	23.34	216.9	210.3	2.587	2.497	0.775
Julio	226.5	70.96	25.22	228.4	221.5	2.699	2.606	0.768
Agosto	193.1	66.43	24.68	207.8	201.8	2.484	2.399	0.778
Septiembre	141.1	55.29	19.62	168.6	163.6	2.088	2.017	0.806
Octubre	92.9	39.73	16.33	123.9	120.1	1.582	1.526	0.829
Noviembre	60.1	26.87	10.41	94.1	90.9	1.257	1.213	0.868
Diciembre	47.6	23.01	6.52	75.9	73.2	1.030	0.993	0.881
Año	1598.5	593.28	15.39	1849.7	1793.0	23.123	22.321	0.813

Figura 3-9. Tabla de principales variables en base mensual.

Tabla 3-2 Tabla de outputs PVsyst

Outputs	
1.	Irradiancia efectiva en los receptores
2.	Energía nominal del generador
3.	Energía disponible en la salida del inversor
4.	Energía inyectada a la red

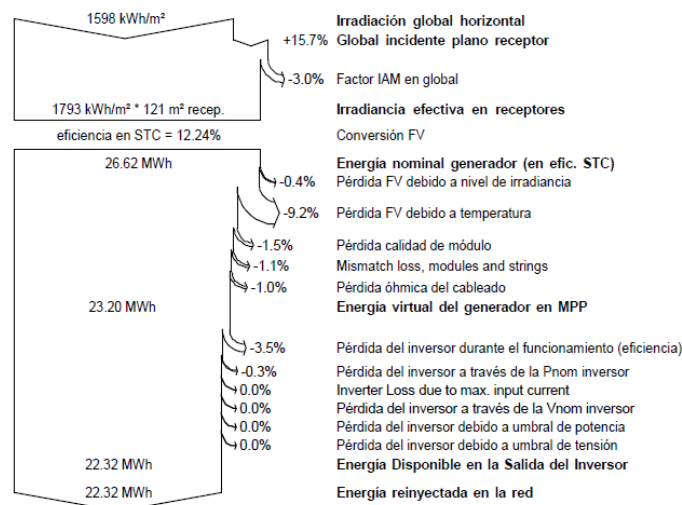


Figura 3-10. Diagrama de pérdidas del sistema.

3.2 Metodología de trabajo para sistemas Eólicos

Para el cálculo de la producción de un sistema eólico trabajaremos con hojas de cálculo Excel, en lugar de valernos de un Software específico.

Recabados los datos de las velocidades del viento para cada hora del día a lo largo de cada uno de los meses del año, podemos así analizar la relación de velocidades que se dan a lo largo de un mes.

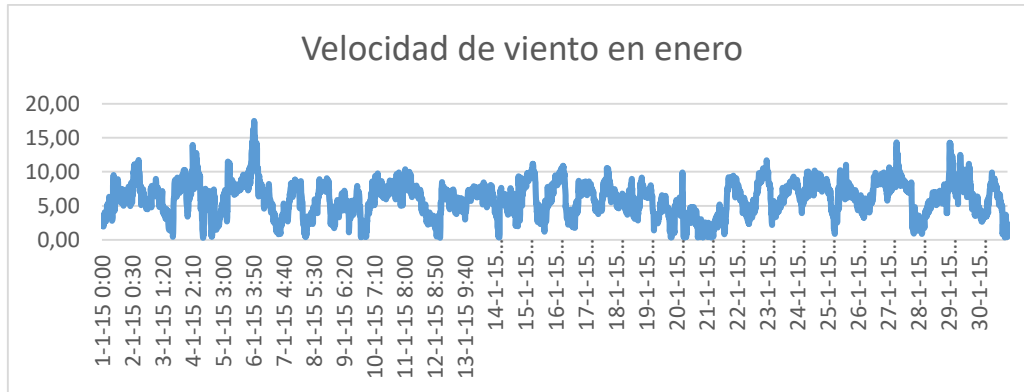


Figura 3-11. Ejemplo de gráfica de las velocidades del viento recogidas por la estación meteorológica a lo largo del mes de enero.

A continuación, obtendremos los valores de la velocidad para la altura del buje, puesto que los datos de las estaciones obtenidos con METEONORM7 son para una altura de 10 m. El aerogenerador que hemos seleccionado (VESTAS, modelo V112 3.3 MWTM IEC IB), tiene el buje a una altura de 80 m, lo que hace que estos datos de los que disponemos no sean los que debemos usar, pero sí nos sirven de partida para nuestro estudio.

Calculamos los valores de la velocidad mediante la ecuación siguiente:

$$v(z) = v(z_{ref}) \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (3-1)$$

Donde:

$v(z)$ = Velocidad del viento a 80 m.

$v(z_{ref})$ = Velocidad del viento a 40 m.

$z=80$ m

$z_0=0.2$ (altura de rugosidad para tierras de cultivo con arbustos)

$z_{ref}=40$ m

Conocidas las velocidades para la altura del buje, hallaremos la potencia que genera el aerogenerador, para cada hora del día teniendo en cuenta:

$$P(v) \begin{cases} P = 0 & v < v_{on} \\ P = mx + n & v_{on} < v < v_a \\ P = cte & v_a < v \end{cases} \quad (3-2)$$

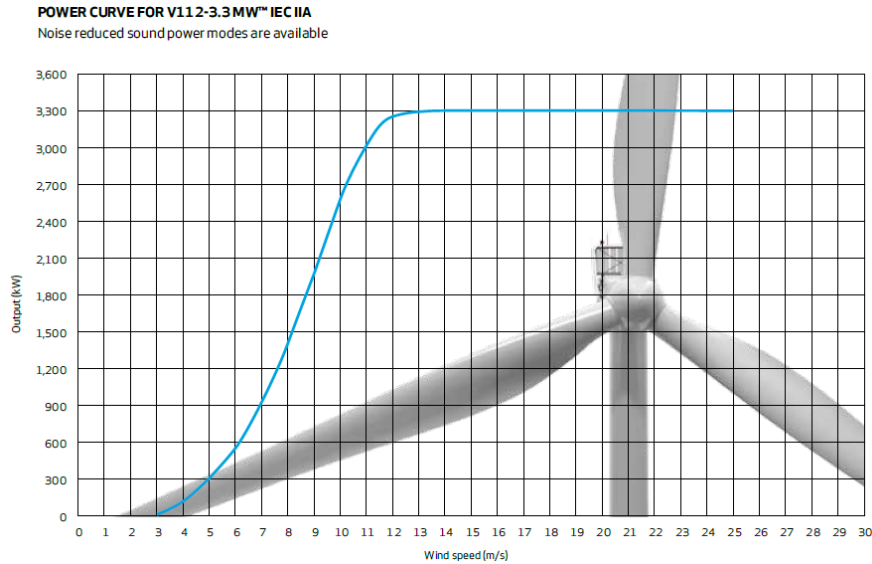


Figura 3-12. Curva potencia aerogenerador.

Observando y estudiando la curva tenemos:

$$P(v) \begin{cases} P = 0 & v < 3 \text{ m/s} \\ P = mx + n & 3 \text{ m/s} < v < 12 \text{ m/s} \\ P = cte & 12 \text{ m/s} < v \end{cases} \quad (3-3)$$

$$P(v) \begin{cases} P = 125v - 325 & 3 \text{ m/s} < v < 5 \text{ m/s} \\ P = 300v - 1200 & 5 \text{ m/s} < v < 7 \text{ m/s} \\ P = 436.36v - 2154.4 & 7 \text{ m/s} < v < 12 \text{ m/s} \end{cases} \quad (3-4)$$

Implementando dicha función y sumando los resultados para cada hora podemos conocer la producción de potencia en cada mes del año, y con ello, obtenemos la producción de energía a lo largo de todo el año:

Year	Month	Day	Hour	v(10m)	v(80m)	P (kW)	E (kWh)
2005	1	1	1	1,9	2,9	0,0	0,0
2005	1	1	2	1,4	2,1	0,0	0,0
2005	1	1	3	1,2	1,8	0,0	0,0
2005	1	1	4	1,5	2,3	0,0	0,0
2005	1	1	5	1,4	2,1	0,0	0,0
2005	1	1	6	1,8	2,8	0,0	0,0
2005	1	1	7	1,4	2,1	0,0	0,0
2005	1	1	8	2,2	3,4	96,2	96,2
2005	1	1	9	1,8	2,8	0,0	0,0
2005	1	1	10	3,7	5,7	500,0	500,0
2005	1	1	11	3	4,6	249,3	249,3
2005	1	1	12	2,8	4,3	211,0	211,0
2005	1	1	13	3,2	4,9	287,6	287,6
2005	1	1	14	3,7	5,7	500,0	500,0
2005	1	1	15	3	4,6	249,3	249,3
2005	1	1	16	4,4	6,7	821,6	821,6
2005	1	1	17	3,2	4,9	287,6	287,6
2005	1	1	18	3,7	5,7	500,0	500,0
2005	1	1	19	2,8	4,3	211,0	211,0
2005	1	1	20	3	4,6	249,3	249,3
2005	1	1	21	3	4,6	249,3	249,3
2005	1	1	22	2	3,1	57,9	57,9
2005	1	1	23	1,5	2,3	0,0	0,0
2005	1	1	24	1,3	2,0	0,0	0,0

Figura 3-13. Ejemplo de producción de energía en el primer día del año en Cañar.

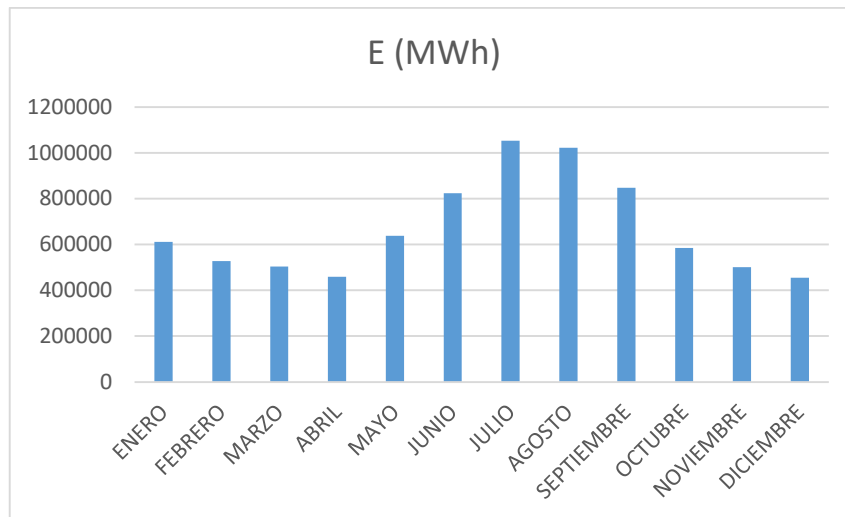


Figura 3-14. Producción de energía a lo largo del año en Cañar.

Wind turbine class	I	II	III	S
V_{ave} (m/s)	10	8.5	7.5	User defined
V_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	
$V_{50,gust}$ (m/s)	70	59.5	52.5	
I_{ref}	A	0.16		
	B	0.14		
	C	0.12		

Figura 3-15. Clasificaciones del IEC (*Internacional Electrotechnical Commission*).¹⁰

Tabla 3–3. Tabla de Inputs para la instalación eólica

Inputs	
Datos de viento horarios	Proporcionados por la estación meteorológica.
Curva de potencia del aerogenerador	Facilitada por el fabricante. ¹¹
Altura del buje del aerogenerador	Hipótesis: 80 m (elección entre 60 y 80 m).
Rugosidad del terreno	Hipótesis: Terreno con rugosidad de 0.2 m.

Tabla 3–4. Tabla de Outputs para la instalación eólica

Outputs
Potencia generada horaria (MWh)
Potencia generada mensual (MWh)
Energía generada mensual (MWh)

¹⁰ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118900116.app2>

¹¹ VESTAS

3.3 Metodología de trabajo para sistemas fotovoltaicos y eólicos basados en datos experimentales horarios

Para la recogida de datos del proyecto se ha estudiado dónde se localiza la mayor concentración de emplazamientos mineros en Ecuador y Chile, según los mapas que se muestran a continuación. Para la obtención de datos se ha utilizado el Software Meteonorm, aprovechando algunas de las estaciones existentes, y creando otras nuevas para otros de los emplazamientos interpolándose de este modo los datos.

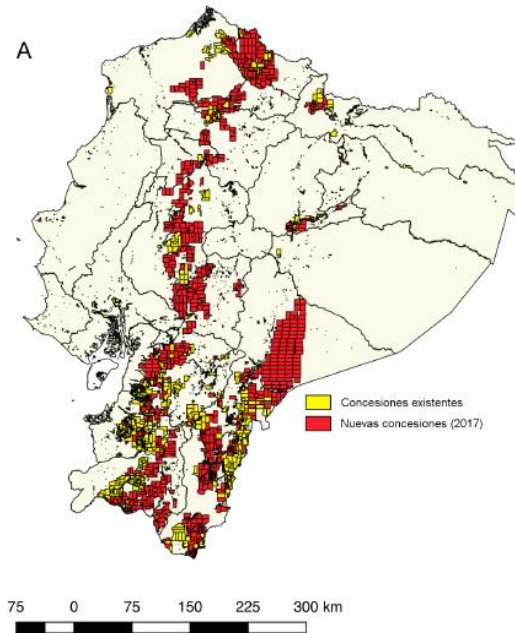


Figura 3-16. Mapa de concesiones mineras en Ecuador. ¹²

En el caso de Ecuador contamos con datos acerca del viento de la región de Machala y sus alrededores; Cañar, Chimborazo, San Gabriel y Riobamba.

¹²https://www.google.com/search?q=concesiones+mineras+ecuador&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKewiG_6zEnbXkAhUI3OAKHcsyAQ0Q_AUIEygC&biw=1366&bih=657#imgrc=6-3kzP1Qom5RHM:



Figura 3-17. Mapa de concesiones mineras en Chile, entre Antofagasta y Santiago. ¹³

En el caso de Chile contamos con datos acerca del Sol y el viento de Antofagasta, La Serena, Copiapó, Valparaíso y Santiago.

Tabla 3–5. Tabla de datos

Datos generados con METEONORM7	
Datos solar	Datos eólica
Radiación global horizontal	Dirección del viento
Radiación difusa horizontal	Velocidad del viento
Radiación directa normal	Presión atmosférica
Radiación global inclinada	
Radiación difusa inclinada	
Temperatura ambiente	

¹³<https://www.cochilco.cl/SIAC/Paginas/Mapa-Minero-de-Chile.aspx>

4 CONSUMO ESPECÍFICO DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA

En este capítulo se lleva a cabo un repaso por las propiedades del agua de mar, estudiando cómo afecta la presión a cada una de las propiedades termodinámicas del agua de mar. Se presentarán, además, las principales propiedades características de las regiones que competen al proyecto y tras repasar los conceptos básicos acerca del proceso ósmosis inversa, se procederá al cálculo del consumo de la bomba principal. Se presenta también el software ROSA, así como su metodología de utilización.

4.1 Propiedades del agua de mar

Millones de personas a lo largo del mundo confían en la desalación del agua de mar para cubrir la necesidad de consumo de agua dulce. El incremento de población y la limitación de las fuentes de agua potable existentes, hacen que la demanda de desalación esté en constante aumento.

Para el diseño y optimización de los sistemas de desalación, los ingenieros requieren correlaciones precisas, simples y fáciles de usar.

Una forma de abordar la problemática es mediante correlaciones que dependan únicamente de la temperatura y la salinidad, despreciando el efecto de la presión en las propiedades.

Las propiedades dependientes de la presión son de gran importancia en la industria de la desalación, puesto que diversas tecnologías de desalación trabajan a presiones elevadas, en concreto, los procesos de Ósmosis Inversa (OI), operan en un rango de 5.5 a 8.5 MPa.

Para el correcto modelaje de las tecnologías de desalación convencionales y no convencionales, es necesario una predicción lo más precisa posible de las propiedades termodinámicas.

El agua de mar tiene como característica notable el hecho de que su composición química relativa es prácticamente uniforme a lo largo del mundo, puesto que varía muy poco, lo cual permite tratar para estas correlaciones el agua de mar como una solución acuosa de una única sal que varía su concentración mediante la “Salinidad Absoluta”, definida como la fracción másica de materiales disueltos en el agua de mar.

Las correlaciones que se presentan a continuación están basadas en la referencia [11] [12] [13] [14] [15] y son válidas para los rangos típicos de operación para desalación:

$$\begin{cases} 10 \leq t \leq 120^{\circ}C \\ 0 \leq S \leq 120 \text{ g/kg} \\ 0 \leq p \leq 12 \text{ MPa} \end{cases} \quad (4-1)$$

4.1.1 Presión

$$\ln\left(\frac{p_{vsw}}{p_{vw}}\right) = -4.58180 \cdot 10^{-4}S - 2.04430 \cdot 10^{-6}S^2 \quad (4-2)$$

$$\ln(p_{vw}) = \frac{a_1}{T} + a_2 + a_3T + a_4T^2 + a_5T^3 + a_6\ln(T) \quad (4-3)$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= -5800 \\
 a_2 &= 1.3915 \\
 a_3 &= -4.864 \cdot 10^{-2} \\
 a_4 &= 4.1765 \cdot 10^{-5} \\
 a_5 &= -1.4452 \cdot 10^{-8} \\
 a_6 &= 6.5460
 \end{aligned}$$

En estas ecuaciones se trabaja con p [Pa], T [K] y S [g/kg].

4.1.2 Densidad

$$\rho_{sw}(t, S, P) = \rho_{sw}(t, S, P_0)F_p \quad (4-4)$$

$$\rho_{sw}(t, S, P_0) = (a_1 + a_2t + a_3t^2 + a_4t^3 + a_5t^4) + (b_1S + b_2St + b_3St^2 + b_4St^3 + b_5S^2t^2) \quad (4-5)$$

$$\begin{aligned}
 F_p = \exp \left((P - P_0)(c_1 + c_2t + c_3t^2 + c_4t^3 + c_5t^4 + c_6t^5 + S(d_1 + d_2t + d_3t^2)) + \frac{P^2 - P_0^2}{2}(c_7 + c_8t + c_9t^3 + d_4S) \right) \quad (4-6)
 \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= 9.999 \cdot 10^2 \\
 a_2 &= 2.034 \cdot 10^{-2} \\
 a_3 &= -6.162 \cdot 10^{-3} \\
 a_4 &= 2.261 \cdot 10^{-5} \\
 a_5 &= -4.567 \cdot 10^{-8} \\
 b_1 &= 8.02 \cdot 10^2 \\
 b_2 &= -2.001 \\
 b_3 &= 1.677 \cdot 10^{-2} \\
 b_4 &= -3.06 \cdot 10^{-5} \\
 b_5 &= -1.613 \cdot 10^{-5} \\
 c_1 &= 5.0792 \cdot 10^{-6} \\
 c_2 &= -3.4168 \cdot 10^{-6} \\
 c_3 &= 5.6931 \cdot 10^{-8} \\
 c_4 &= -3.7263 \cdot 10^{-10} \\
 c_5 &= 1.4465 \cdot 10^{-12} \\
 c_6 &= -1.7058 \cdot 10^{-15} \\
 c_7 &= -1.3389 \cdot 10^{-6} \\
 c_8 &= 4.8603 \cdot 10^{-9} \\
 c_9 &= -6.8039 \cdot 10^{-13} \\
 d_1 &= -1.1077 \cdot 10^{-6} \\
 d_2 &= 5.5584 \cdot 10^{-9} \\
 d_3 &= -4.2539 \cdot 10^{-11} \\
 d_4 &= 8.3702 \cdot 10^{-9}
 \end{aligned}$$

En estas ecuaciones se trabaja con p [MPa], ρ [kg/m³], t [°C] y S [g/kg].

4.1.3 Capacidad térmica isobárica específica

$$Cp_{sw}(t, S, P) = Cp_{sw}(t, S, P_0) + (P - P_0)((a_1 + a_2t + a_3t^2 + a_4t^3) + S(a_5 + a_6t + a_7t^2 + a_8t^3)) \quad (4-7)$$

$$Cp_{sw}(t, S, P_0) = A + B(t + 273.15) + C(t + 273.15)^2 + D(t + 273.15)^3 \quad (4-8)$$

Donde:

$$a_1 = -3.1118$$

$$a_2 = 0.0157$$

$$a_3 = 5.1014 \cdot 10^{-5}$$

$$a_4 = -1.0302 \cdot 10^{-6}$$

$$a_5 = 0.0107$$

$$a_6 = -3.9716 \cdot 10^{-5}$$

$$a_7 = 3.2088 \cdot 10^{-8}$$

$$a_8 = 1.0119 \cdot 10^{-9}$$

$$A = 5328 - 9.76 \cdot 10^1 S + 4.04 \cdot 10^{-1} S^2$$

$$B = -6.913 + 7.351 \cdot 10^1 S + 3.15 \cdot 10^{-3} S^2$$

$$C = 9.6 \cdot 10^{-3} - 1.927 \cdot 10^{-3} S + 8.23 \cdot 10^{-6} S^2$$

$$D = 2.5 \cdot 10^{-6} + 1.666 \cdot 10^{-6} S - 7.125 \cdot 10^{-9} S^2$$

En estas ecuaciones se trabaja con p[MPa], Cp[J/kgK], t[°C] y S[g/kg].

4.1.4 Entalpía

$$h_{sw}(t, S, P) = h_{sw}(t, S, P_0) + (P - P_0)((a_1 + a_2t + a_3t^2 + a_4t^3) + S(a_5 + a_6t + a_7t^2 + a_8t^3)) \quad (4-9)$$

$$h_{sw}(t, S, P_0) = h_w(t) - S_{kg/kg}(b_1 + b_2 S_{kg/kg} + b_3 S_{kg/kg}^2 + b_4 S_{kg/kg}^3 + b_5 t + b_6 t^2 + b_7 t^3 + b_8 S_{kg/kg} t + b_9 S_{kg/kg}^2 t + b_{10} S_{kg/kg} t^2) \quad (4-10)$$

$$h_w(t) = 141.355 + 4202.07t - 0.535t^2 + 0.004t^3 \quad (4-11)$$

Donde:

$$S_{kg/kg} = S/1000$$

$$a_1 = 996.7767$$

$$a_2 = 0 - 3.2406$$

$$a_3 = 0.0127$$

$$a_4 = -4.7723 \cdot 10^{-5}$$

$$a_5 = -1.1748$$

$$a_6 = 0.01169$$

$$a_7 = -2.6185 \cdot 10^{-5}$$

$$a_8 = 7.0661 \cdot 10^{-8}$$

$$b_1 = -2.34825 \cdot 10^4$$

$$b_2 = 3.1518310^5$$

$$b_3 = 2.80269 \cdot 10^6$$

$$b_4 = -1.44606 \cdot 10^7$$

$$b_5 = 7.82607 \cdot 10^3$$

$$b_6 = -4.41733 \cdot 10^1$$

$$\begin{aligned} b_7 &= 2.1394 \cdot 10^{-1} \\ b_8 &= -1.99108 \cdot 10^4 \\ b_9 &= 2.77846 \cdot 10^4 \\ b_{10} &= 9.72801 \cdot 10^1 \end{aligned}$$

En estas ecuaciones se trabaja con p[MPa], h[J/kg], t[°C] y S[g/kg].

4.1.5 Entropía

$$s_{sw}(t, S, P) = s_{sw}(t, S, P_0) + (P - P_0)((a_1 + a_2t + a_3t^2 + a_4t^3) + S(a_5 + a_6t + a_7t^2 + a_8t^3)) \quad (4-12)$$

$$\begin{aligned} s_{sw}(t, S, P_0) &= s_w(t) \\ &- S_{kg/kg}(b_1 + b_2S_{kg/kg} + b_3S_{kg/kg}^2 + b_4S_{kg/kg}^3 + b_5t \\ &+ b_6t^2 + b_7t^3 + b_8S_{kg/kg}t + b_9S_{kg/kg}^2t \\ &+ b_{10}S_{kg/kg}t^2) \end{aligned} \quad (4-13)$$

$$s_w(t) = 0.1543 + 15.383t - 2.996 \cdot 10^{-2}t^2 + 8.193 \cdot 10^{-5}t^3 - 1.37 \cdot 10^{-7}t^4 \quad (4-14)$$

Donde:

$$\begin{aligned} S_{kg/kg} &= S/1000 \\ a_1 &= -4.4786 \cdot 10^{-3} \\ a_2 &= -1.1654 \cdot 10^{-2} \\ a_3 &= 6.1154 \cdot 10^{-5} \\ a_4 &= -2.0696 \cdot 10^{-7} \\ a_5 &= -1.5531 \cdot 10^{-3} \\ a_6 &= 4.0054 \cdot 10^{-5} \\ a_7 &= -1.4193 \cdot 10^{-7} \\ a_8 &= 3.3142 \cdot 10^{-10} \\ b_1 &= -4.231 \cdot 10^2 \\ b_2 &= 1.463 \cdot 10^4 \\ b_3 &= -9.88 \cdot 10^4 \\ b_4 &= 3.095 \cdot 10^5 \\ b_5 &= 2.562 \cdot 10^1 \\ b_6 &= -1.443 \cdot 10^{-1} \\ b_7 &= 5.879 \cdot 10^{-4} \\ b_8 &= -6.111 \cdot 10^1 \\ b_9 &= 8.041 \cdot 10^1 \\ b_{10} &= 3.035 \cdot 10^{-1} \end{aligned}$$

En estas ecuaciones se trabaja con p[MPa], s[J/kgK], t[°C] y S[g/kg].

4.1.6 Temperatura

La temperatura del agua, varía bastante en función de la región. En latitudes como en la que se encuentra España, las temperaturas varían en un rango de 18 a 24°C entre verano e invierno. A medida que se avanza hacia el sur las temperaturas pueden oscilar entre 8 y 18°C, como sucede en Sudáfrica, Namibia o Chile. Por el contrario, a medida que se asciende, en países del Golfo pérsico, las temperaturas pueden llegar a superar los 30°C. []

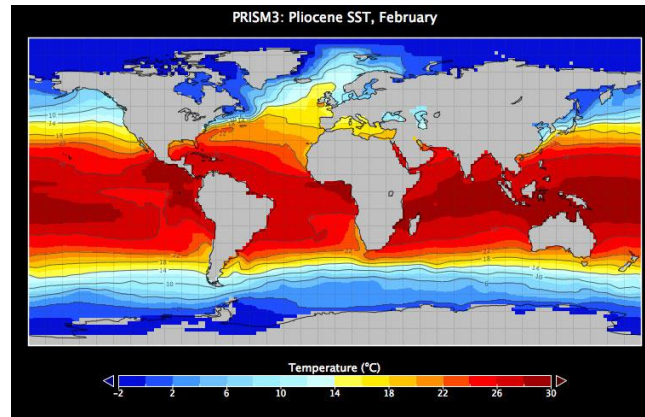


Figura 4-1. Temperaturas de la superficie oceánica¹⁴.

4.2 Salinidad del agua de mar

4.2.1 Concepto de salinidad

Una de las cualidades distintivas del agua de los océanos y los mares es su elevado contenido en sales disueltas. La salinidad se define como el peso en gramos de la materia inorgánica disuelta en un kilogramo de agua (Stumm y Morgan, 1996). Permite, por tanto, medir la cantidad de sólidos disueltos en el agua. Se expresa S [%], en tanto por ciento y el agua de mar tiene una salinidad cuyo valor oscila entre el 32% y el 37%

La salinidad, a pesar de ser prácticamente uniforme a lo largo del globo terráqueo, presenta variaciones en función de la región y los principales procesos responsables de dichos gradientes son la evaporación, precipitación y mezcla.

Las aguas más saladas se hallan en zonas de latitud media donde la evaporación es alta. Por el contrario, las aguas menos saladas se hallan próximas al ecuador, donde las precipitaciones hacen que la concentración de sales disminuya en la superficie y en zonas de alta latitud donde el agua superficial se ve desalinizada por el deshielo durante las estaciones cálidas. [17] [18]

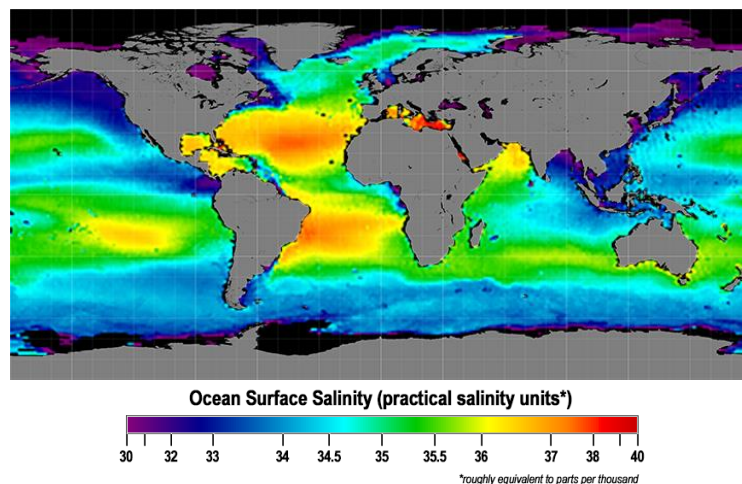


Figura 4-2. Salinidad de la superficie oceánica, NASA, Aquarius 2014¹⁵.

La salinidad y la temperatura del agua, son dos factores cruciales en el estudio de viabilidad de un sistema de desalación de agua mar. A continuación, se analizarán ambas propiedades en las regiones objeto del proyecto REMIND; Ecuador y Chile.

¹⁴<https://thecreationclub.com/why-the-climate-change-debate-is-irrelevant-dr-jack-l-burton/>

¹⁵<https://salinity.oceansciences.org/aq-salinity.htm>

Para estudiar los valores de salinidad en los emplazamientos que nos interesan haremos uso de los siguientes mapas:

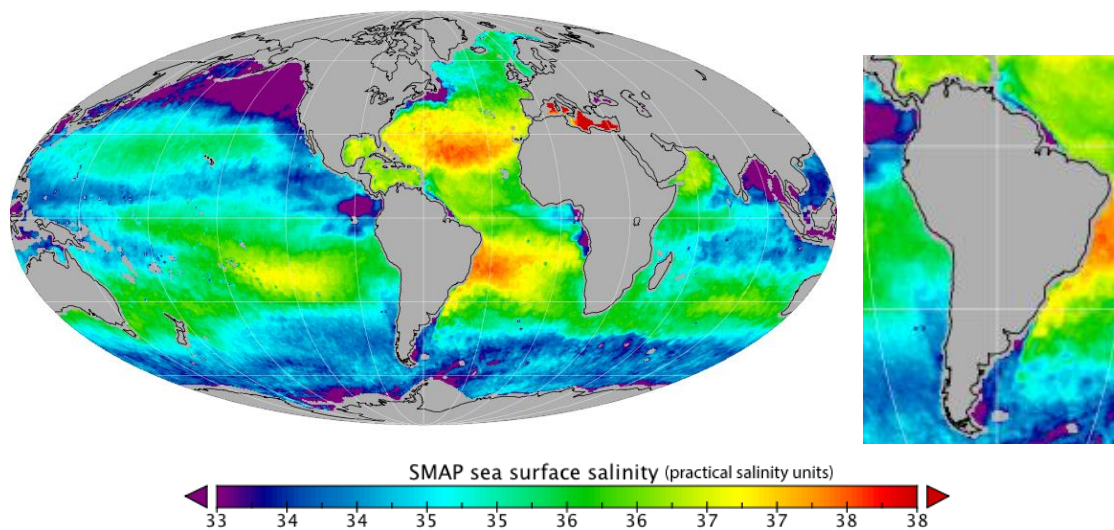


Figura 4-3. Salinidad de la superficie oceánica mes de marzo, NASA, SMAP 2018¹⁶.

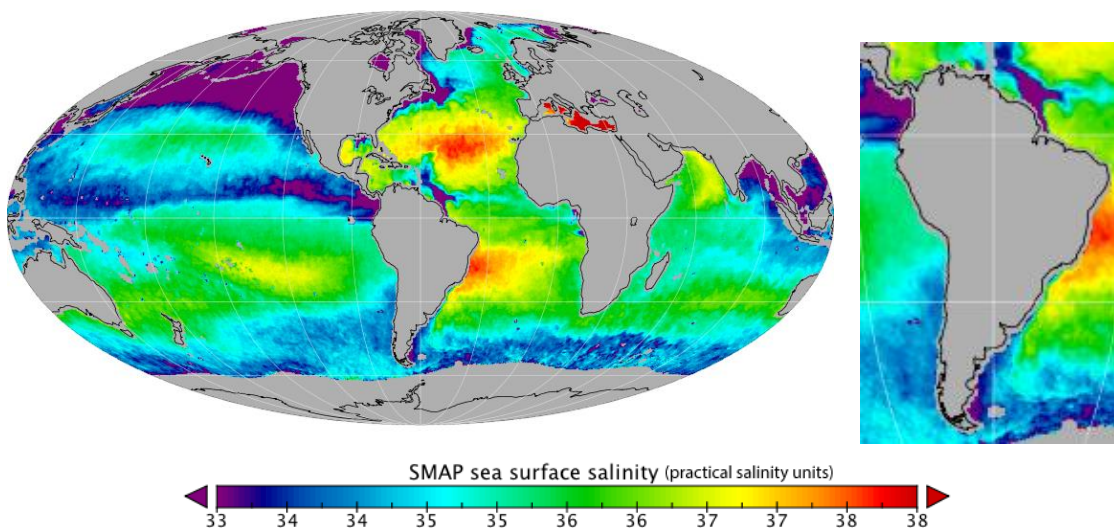


Figura 4-4. Salinidad de la superficie oceánica mes de agosto, NASA, SMAP 2018¹⁷.

Tal y como veremos posteriormente, los meses de marzo y agosto son aquellos para los que se alcanzan las máximas y mínimas temperaturas respectivamente, por ello nos basaremos en los mapas de estos meses para la obtención del valor medio de salinidad que utilizaremos en el estudio.

¹⁶ <https://salinity.oceansciences.org/smap-salinity.htm>

¹⁷ <https://salinity.oceansciences.org/smap-salinity.htm>

4.2.2 Ecuador

La primera zona bajo a estudio es Ecuador, a continuación, se muestran los datos de la temperatura media del agua de mar, su salinidad y su composición.

Para conocer la temperatura, se ha calculado la media entre las temperaturas máximas y mínimas a lo largo de un año en la provincia del Oro.

La composición se ha tomado como referencia la del océano Pacífico, recalculando los aniones que la conforman en función de la salinidad. Cabe destacar que el pH se ha considerado constante con la temperatura, de un valor de 8.

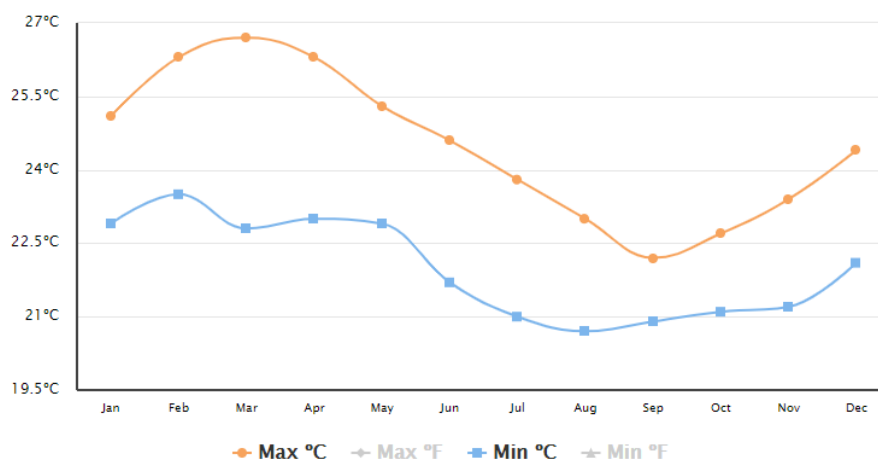


Figura 4-5. Temperaturas medias máximas y mínimas del agua de mar en Ecuador, Machala, a lo largo del año¹⁸.

Tabla 4-1 Tabla temperaturas máximas y mínimas en Machala [°C].

En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic	
Mín.	22,9	23,5	22,8	23	22,9	21,7	21	20,7	20,9	21,1	21,2	22,1
Máx.	25,1	26,3	26,7	26,3	25,3	24,6	23,8	23	22,2	22,7	23,4	24,4

Para conocer la salinidad contamos con los mapas de salinidad de las misiones de la NASA SMAP (Soil Moisture Active Passive) y Aquarius mostrados con anterioridad. A continuación, vemos la salinidad para mayo de 2019 y diciembre de 2019, puesto que, tal y como se aprecia en la Tabla 4-2, son los meses para los que encontramos las temperaturas mínima y máxima. El estudio se realizará para cada uno de los casos.

Tabla 4-3 Tabla salinidades máximas y mínimas a lo largo del año en Machala [g/kg].

Salinidad	
Mín.	33.5
Máx.	34

Para el cálculo de la composición se ha partido de la composición para el océano Pacífico, supuesta una salinidad de 34 g/kg, y a partir de ésta se ha interpolado para los valores de salinidad máximo y mínimo del año.

¹⁸ <https://www.seatemperature.org/south-america/ecuador/machala.htm>

Tabla 4-4 Tabla valores parámetros en Machala.

	Mínima	Máxima
Salinidad	33.5 g/kg	34 g/kg
Temperatura	20.7 °C	26.7 °C
Composición	pH 8.0 Ca ⁺ 433.53 ppm Mg ⁺ 1280.88 ppm Na ⁺ 10050 ppm K ⁻ 374.41 ppm CO ₃ ⁻ 1.97 ppm HCO ₃ ⁻ 167.5 ppm S O ₄ ²⁻ 2955.88 ppm Cl ⁻ 18227.94 ppm B ⁺ 4.43 ppm	pH 8.0 Ca ⁺ 440 ppm Mg ⁺ 1300 ppm Na ⁺ 10200 ppm K ⁻ 380 ppm CO ₃ ⁻ 2.0 ppm HCO ₃ ⁻ 170 ppm S O ₄ ²⁻ 3000 ppm Cl ⁻ 18500 ppm B ⁺ 4.5 ppm

4.2.3 Chile

La segunda región bajo estudio es Antofagasta y el procedimiento para la obtención de datos que se ha seguido es el mismo que para Ecuador.

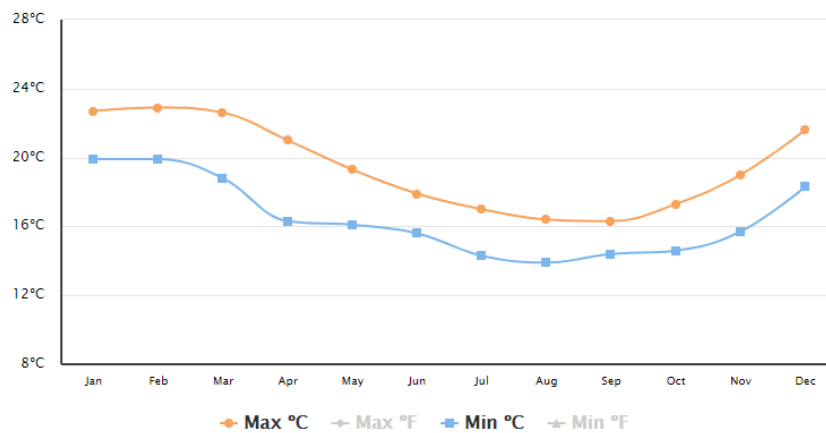


Figura 4-6. Temperaturas medias máximas y mínimas del agua de mar en Chile, región de Antofagasta, a lo largo del año¹⁹.

Tabla 4-5 Tabla temperaturas máximas y mínimas a lo largo del año en Antofagasta[°C].

	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
Mín.	19,9	19,9	18,8	16,3	16,1	15,6	14,3	13,9	14,4	14,6	15,7	18,3
Máx.	22,7	22,9	22,6	21	19,3	17,9	17	16,4	16,3	17,3	19	21,6

¹⁹ <https://www.seatemperature.org/south-america/chile/antofagasta.htm>

Tabla 4–6 Tabla salinidades máximas y mínimas en la región de Antofagasta [g/kg].

Salinidad	
Mín.	34
Máx.	36

Tabla 4–7 Tabla valores parámetros en Antofagasta [°C].

	Mínima	Máxima
Salinidad	36 g/kg	34 g/kg
Temperatura	22.6 °C	33.5 °C
Composición	pH 8.0 Ca ⁺ 465.88 ppm Mg ⁺ 1376.47 ppm Na ⁺ 10800 ppm K ⁻ 402.35 ppm CO ₃ ⁻ 2.12 ppm HCO ₃ ⁻ 180 ppm S O ₄ ²⁻ 3176.47 ppm Cl ⁻ 19588.24 ppm B ⁺ 4.76 ppm	pH 8.0 Ca ⁺ 440 ppm Mg ⁺ 1300 ppm Na ⁺ 10200 ppm K ⁻ 380 ppm CO ₃ ⁻ 2.0 ppm HCO ₃ ⁻ 170 ppm S O ₄ ²⁻ 3000 ppm Cl ⁻ 18500 ppm B ⁺ 4.5 ppm

4.3 Conceptos básicos de desalación por Ósmosis Inversa

El proceso de ósmosis convencional es un fenómeno que se da en la naturaleza. En él, dos soluciones con concentraciones de sólidos disueltos diferentes entran en contacto; el solvente de la solución más diluida migra hacia el fluido con menor concentración, a su vez el agua se mueve en sentido contrario buscando el equilibrio y que la concentración de ambas soluciones sea uniforme. Este es el sentido espontáneo de la transferencia de disolvente cuyo estado final es el equilibrio osmótico.

Tal y como se aprecia en la siguiente ilustración, el contenido de agua en uno de los lados es mayor, y a esta diferencia se denomina presión osmótica.

Figura 4-7. Proceso de difusión de soluciones con concentraciones diferentes²⁰.

²⁰ Fuente Lourdes García Rodríguez

4.3.1 Ósmosis Inversa

Cuando se aplica una presión mayor que la osmótica, se produce un flujo de disolvente contrario al sentido espontáneo de la transferencia de disolvente debido a la aplicación de presión externa, es decir, el proceso se invierte gracias al aporte de energía, y ahora es el agua pura lo que pasa a través de la membrana. Esto es lo que conocemos como Ósmosis Inversa.

Presenta una serie de ventajas frente a otros procesos como el intercambio iónico y la electrodiálisis reversible, y estos son:

- Flexibilidad del proceso.
- Gran efectividad.
- Ahorro de energía
- Coste de inversión competitivo

4.3.1.1 Membrana de ósmosis inversa

Las membranas de ósmosis inversa se emplean fundamentalmente para la separación de iones de las. Atendiendo a la forma que presenta la membrana fabricada se clasifican en: planas, tubulares, fibra hueca y arrollamiento en espiral.

SWRO desalination: Membrane element

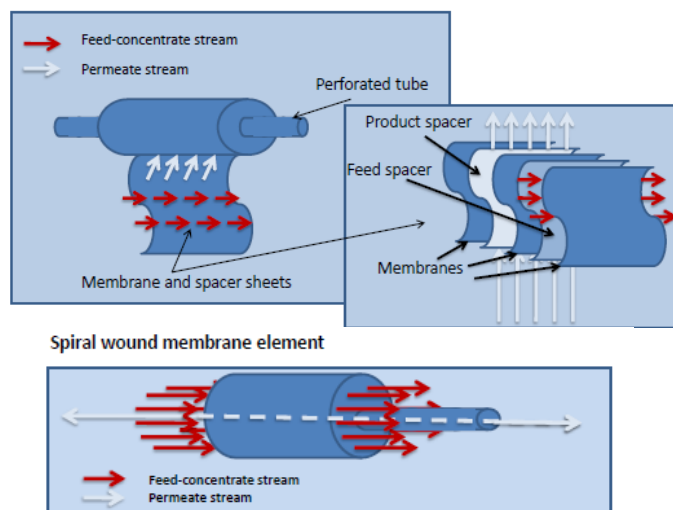


Figura 4-8. Elemento de membrana de OI²¹.

4.3.1.2 Etapa y paso

Los conceptos de etapa y paso son cruciales para entender el proceso de desalación de agua, a lo largo del trabajo se hace referencia a ellos, de ahí este apartado expresamente dedicado a su significado.

El término etapa, hace alusión al número de bastidores por los que se hace pasar el agua a tratar y a la cantidad de permeado que se obtiene. En un sistema de una etapa, el agua se trata en un bastidor, de donde sale el permeado, el concentrado simplemente se desecha. En un sistema de doble etapa, el concentrado del primer bastidor que antes se desechó, se trata en un segundo bastidor, obteniéndose de este modo mayor cantidad de permeado. Al aumentar el número de etapas, se eleva el caudal recuperado como producto, pero el flujo de sales también se eleva y lo que hace que la calidad del agua producto disminuya.

El término paso, hace alusión también al número de bastidores por el que pasa el agua, sólo que esta

²¹ Fuente Lourdes García Rodríguez

vez, influye en la calidad de permeado obtenido y no en su cantidad. En un sistema de doble paso, el permeado que sale del primer bastidor, pasa por un segundo donde se trata en mayor profundidad, obteniéndose un permeado con menor cantidad de sales disueltas. [17] [19]

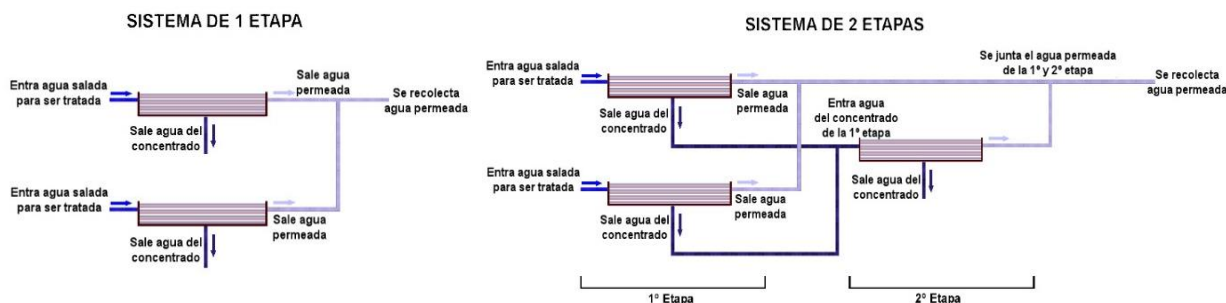


Figura 4-9. Esquemas de sistemas de desalación de 1 y 2 etapas²².

4.3.2 Desalación mediante Ósmosis Inversa

La Ósmosis Inversa es un proceso de desmineralización o deionización del agua mediante la aplicación de una presión mayor a la osmótica a través de una membrana semipermeable, la cual separa las soluciones con distinta concentración.

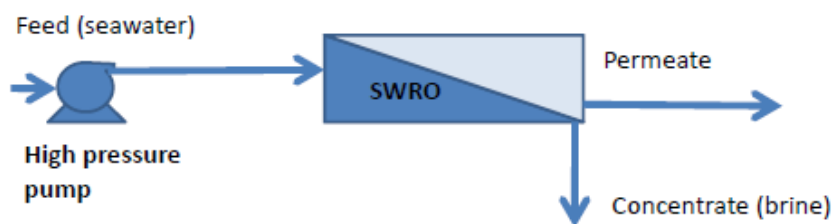


Figura 4-10. Esquema conceptual de un proceso de desalación por OI²³.

En el proceso de desalación el agua salada a tratar es impulsada por una bomba hacia el interior de los tubos de desalación que conforman el sistema. El agua salada circula por el elemento tubular de forma paralela a la membrana. Debido a la presión (superior a la presión osmótica) que genera la bomba sobre el agua salada, una parte del agua atraviesa a la membrana semipermeable hacia la vía por donde circula el permeado.

Las moléculas de iones de sales disueltas quedan atrapadas en la membrana, ya que tienen un tamaño mayor al de los poros de la membrana semipermeable y no pueden atravesarlos. Sin embargo, unos pocos iones de menor tamaño, debido al gran empuje proporcionado por la bomba, tienen energía suficiente para lograr atravesar a la membrana semipermeable.

La concentración de iones disueltos en el permeado es muy baja. Si el sistema funciona bien, las partículas que quedaron atrapadas en la membrana son arrastradas por la corriente de agua salada entrante, quedando, así como parte del agua concentrada que se desecha. Se tiene así un efecto de autolimpieza de la membrana, que ayuda a conservar su funcionalidad. A pesar de ello, este efecto no es totalmente efectivo y con el tiempo, las partículas de sal se van acumulando en las membranas haciendo que se pierda el rendimiento, debiendo ser limpiadas periódicamente. [*]

²² <https://www.youbioit.com/en/article/image/28176/diferencia-entre-etapas-y-pasos-en-la-osmosis-inversa>

²³ Fuente Lourdes García Rodríguez.

4.4 Consumo de la bomba principal

El proceso de Ósmosis Inversa está motivado por la presión y los principales equipos consumidores de energía son las bombas de alta presión. Por tanto, el siguiente paso lógico en el estudio, es el cálculo del consumo de la bomba en el sistema.

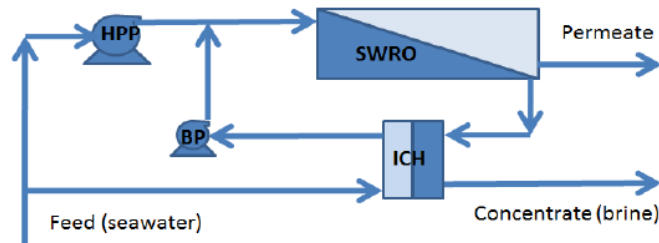


Figura 4-11. Proceso de desalación por OI cámara isobárica²⁴.

Los componentes que vemos son:

- SWRO (Sea Water Reverse Osmosis).
- HPP (High Pressure Pump).
- BP (Booster Pump).
- ICH (Isobaric Chamber).

4.4.1 Software ROSA

Para ello nos ayudaremos de software ROSA (Reverse Osmosis System Analysis), una herramienta asistida por ordenador desarrollada por Dow Chemical que permite diseñar sistemas de Ósmosis Inversa.

Para comprender el funcionamiento del programa, primero veremos qué variables y parámetros de interés afectan a un sistema de Ósmosis Inversa.

- *Feed pressure* (presión de alimentación): Presión comunicada a la corriente de alimentación.
- *Back pressure* (contrapresión): Presión a la que se encuentra el flujo de permeado en una etapa de ósmosis inversa. La diferencia entre la presión de alimentación y ésta es la conocida como *net driving pressure* y es la fuerza impulsora que permite el paso del agua a través de la membrana.
- *Boost pressure* (presión de impulso): Aumento de presión debido a la instalación de una bomba.
- Temperatura
- *Flow*: Volumen por unidad de tiempo (m^3/h)
 - *System feed flow*: Caudal total de agua de alimentación que entra al sistema.
 - *Feed flow*: Caudal de agua que entra al paso seleccionado.
 - *System permeate flow*: Caudal total de permeado que sale del sistema.
 - *Permeate flow*: Caudal de permeado que sale del paso seleccionado.
- *Flux* (flujo específico): Volumen por unidad de tiempo y unidad de sección (l/m^2h).
- *Silt Density Index* (SDI): Grado de presencia de partículas coloidales en el agua.
- *pH*: Indica la concentración de iones de hidronio presentes en la solución acuosa.
- *Total Dissolved Solids* (TDS): Concentración (mg/l) de sólidos disueltos en el agua.
- *Langelier Saturation Index* (LSI): Grado de saturación del agua respecto al carbonato cálcico.

Al ejecutar el programa aparece una ventana en la que se puede observar que la interfaz del programa se divide en seis ventanas:

- 1) *Project Information*: En esta ventana el usuario debe rellenar los datos y preferencias del

²⁴ Fuente Lourdes García Rodríguez.

Proyecto.

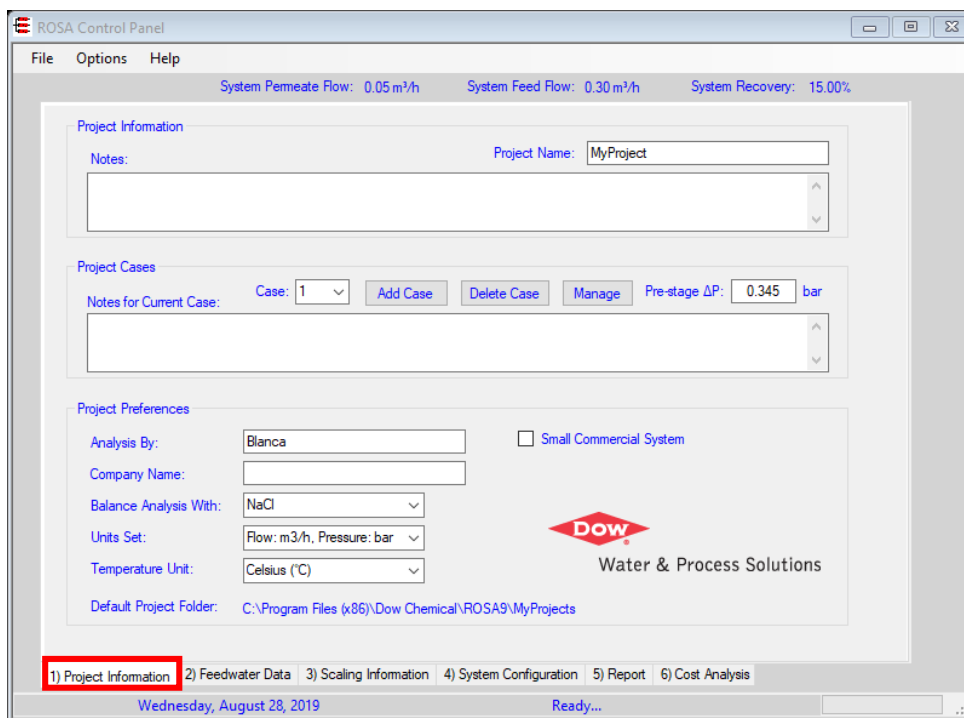


Figura 4-12. Ventana inicial de ROSA; *Proyect Information*.

- 2) *Feedwater Data*: En este paso se recogen los datos relacionados con las características del agua de alimentación. Se especificarán el tipo de agua (procedencia, tratamiento previo y SDI), las corrientes de alimentación, número de corrientes de alimentación, porcentaje de alimentación, se ofrece acceso a la biblioteca de tipos de aguas, se especifican los solutos individuales mediante la tabla de composiciones, se introducen los parámetros de alimentación (temperatura, caudal y pH) y se especifica el balance de cargas.

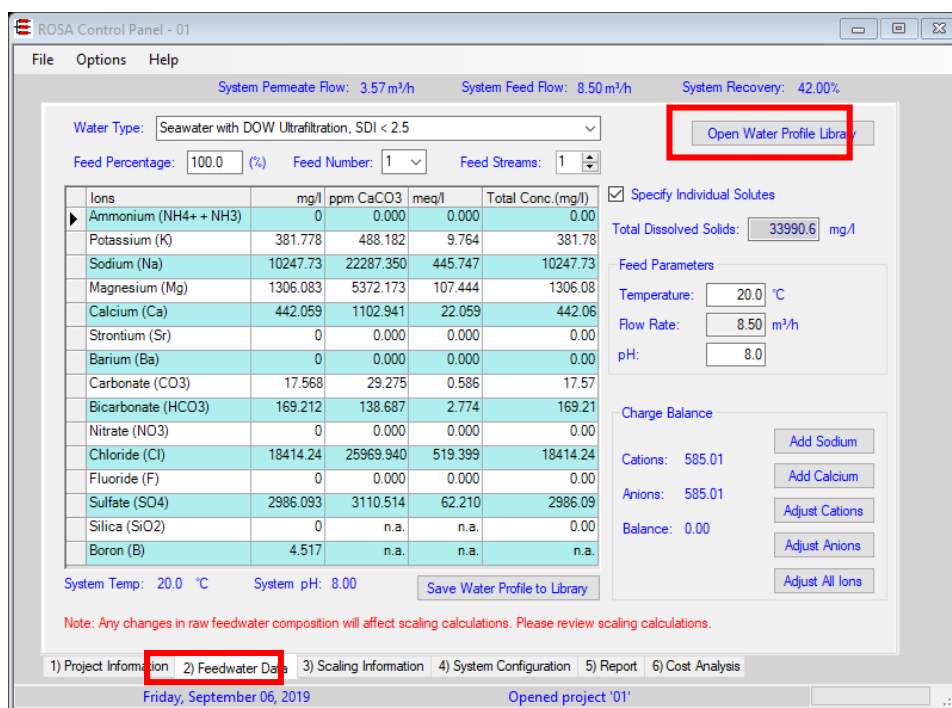


Figura 4-13. Ventana *Feed Water Data*.

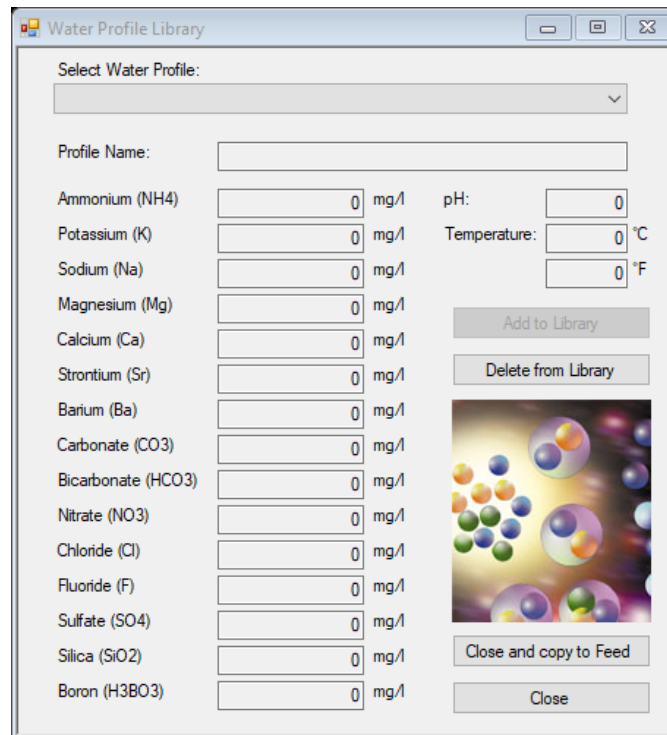


Figura 4-14. Ventana *Feed Water Profile*.

- 3) *Scaling Information*: En esta pestaña el usuario debe ampliar la información acerca de la corriente de alimentación.

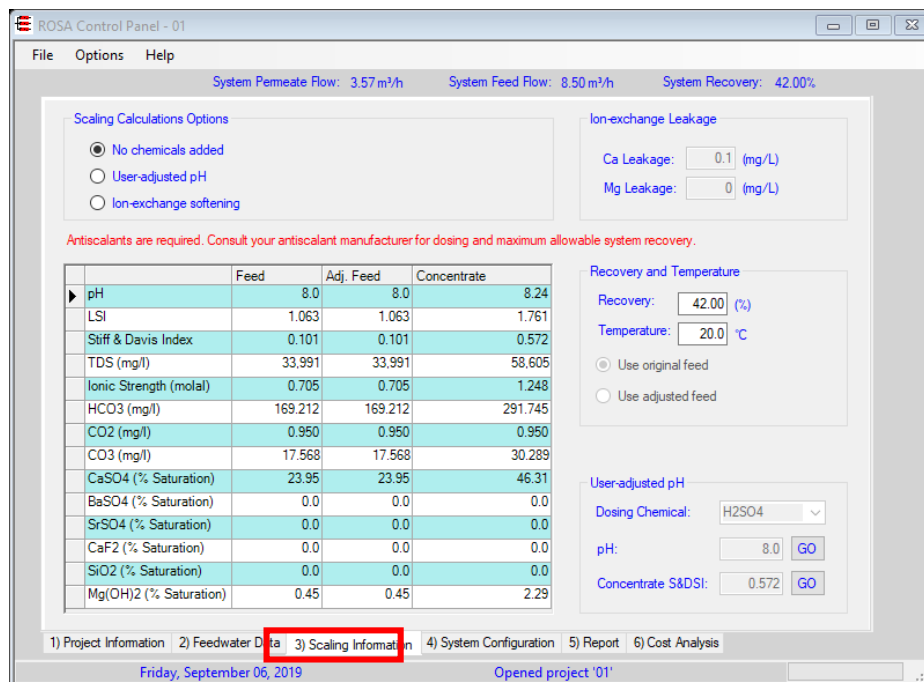


Figura 4-15. Ventana *Scaling Information*.

- 4) *System Configuration*: Permite al usuario definir todas las características del sistema de ósmosis inversa que desee ejecutar (número de pasos, número de etapas, recirculaciones, flujos, temperaturas, tipos de membranas, etc).

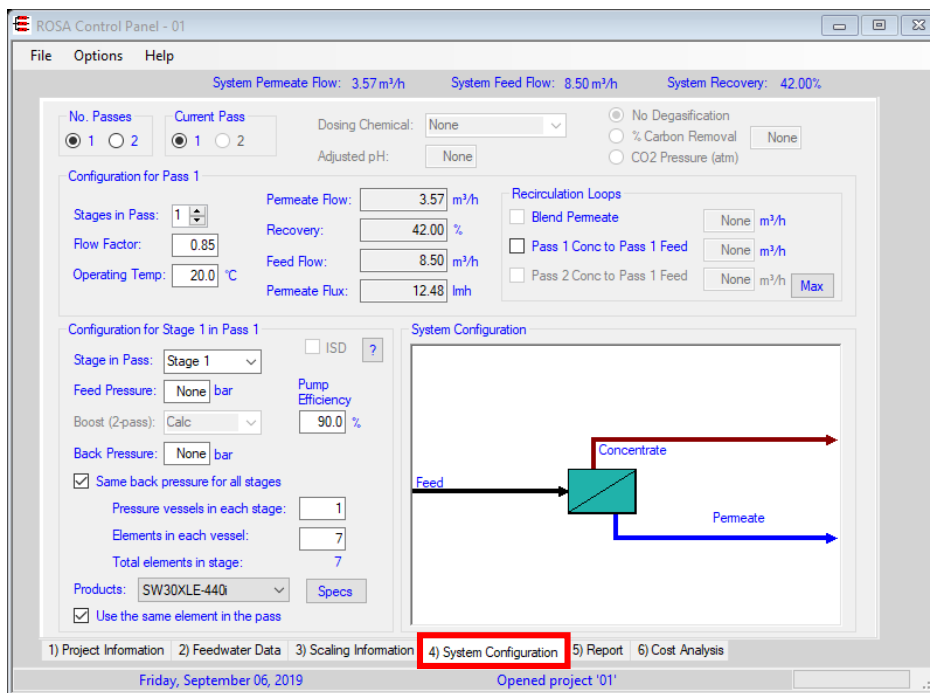


Figura 4-16. Ventana *System Configuration*.

5) *Report*: Esta pestaña ofrece un informe completo y detallado de la instalación resultante.

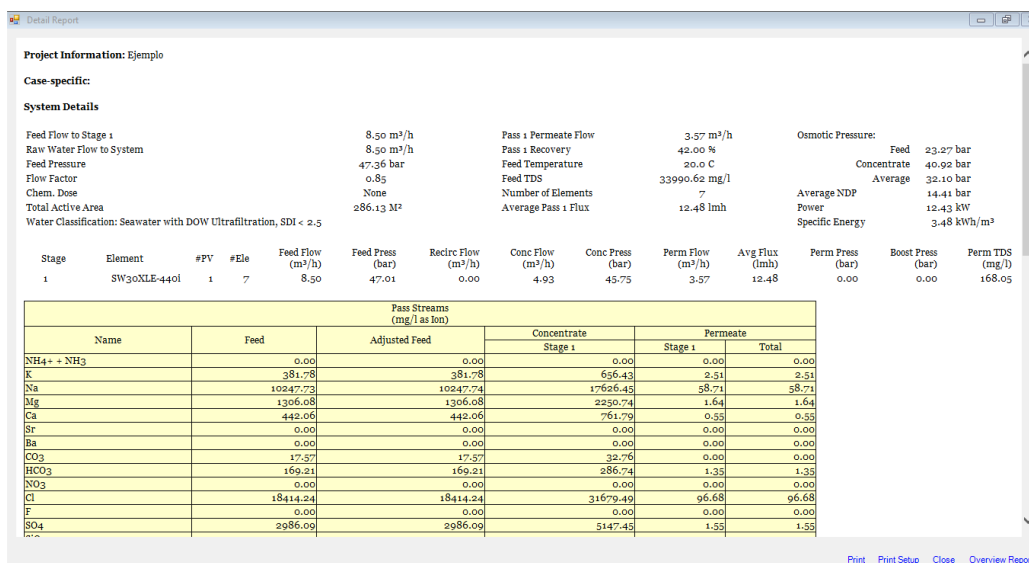


Figura 4-17. Ventana *Report*.

4.4.1.1 Parámetros de entrada

- Temperatura de trabajo del sistema, y en casi de que varíe, las temperaturas máxima y mínima de trabajo, y el número de puntos intermedios deseados.
- Factor de flujo para cada paso.
- En el caso de utilizar membranas para agua marina y que exista un factor de ensuciamiento a largo plazo, habrá activar la casilla *High Temperature Effect On* y especificar el pico máximo de temperatura al que pueda verse sometida la membrana.

Tabla 4-7 Tabla Inputs programa ROSA.

Inputs	
Feed temperature	Temperatura de la alimentación (°C)
Flow Factor	Factor de flujo
High Temperature Effect	Efecto de alta temperatura
Individual Solutes	Solutos individuales
Hipótesis	
No chemicals added	
Feed Flow	8.5 m ³ /h
Recovery	45%
Pump Efficiency	90%
Membrane	SW30XLE-440i, 1 pressure vessel, 7 elements/stage

4.4.1.2 Parámetros de salida

Tabla 4-8 Tabla Outputs programa ROSA.

Outputs	
Feed temperature	Temperatura de la alimentación (°C)
Feed TDS	TDS en la alimentación (mg/l)
Feed Boron	Boro en la alimentación (mg/l)
Permeate Flow	Flujo de permeado (m ³ /h)
Permeate TDS	TDS permeados (mg/l)
Permeate Boron	Boro permeado (mg/l)
System Recovery	% de flujo de la alimentación que permea
Flow Factor	Factor de Flujo
Recovery	% de flujo que permea en el paso 1
Feed Pressure	Presión de la alimentación (bar)
Average Flux	Flujo promedio (l/m ² ·h o lmh)
Feed pH	pH de la alimentación
Permeate Flow	Flujo permeado (m ³ /h)
Permeate TDS	TDS permeados (mg/l)
Permeate Boron	Boro permeado (mg/l)
Front Permeate Flow	Flujo de permeado frontal (m ³ /h)
Front Permeate TDS	TDS permeados frontalmente (mg/l)
Front Permeate Boron	Boro permeado frontal (mg/l)
Rear Permeate Flow	Flujo de permeado trasero (m ³ /h)
Rear Permeate TDS	TDS permeados por la parte trasera (mg/l)
Rear Permeate Boron	Boro permeado por la parte trasera (mg/l)

4.4.2 Cálculo del consumo de la bomba principal

El programa ROSA nos permite conocer el consumo principal de la bomba, pero no considera recuperación energética.

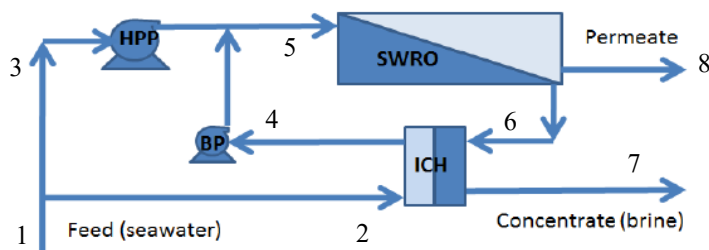


Figura 4-18. Esquema de desalación por OI con cámara isobárica)²⁵.

Tabla 4-9 Tabla de datos conocidos

Datos conocidos	
Eficiencia Recuperador Energético (ϵ_{RE})	97%
Rendimiento bomba alta presión (η_{HPP})	75%
Rendimiento bomba alta presión (η_{ENG})	93%
High Pressure Flow Differential Pressure (HPDP)	0.7 bar
Low Pressure Flow Differential Pressure (LPDP)	0.6 bar

Tabla 4-10 Tabla de datos conocidos

Datos conocidos que dependen del caso de estudio				
	Ecuador, Tmax	Ecuador, Tmin	Chile, Tmax	Chile, Tmin
q_{v5} (m ³ /h)	8.5	8.5	8.5	8.5
p_5 (bar)	49.65	49.76	52.82	49.76
$q_{v6} = q_{v4}$ (m ³ /h)	4.67	4.68	4.68	4.68
p_6 (bar)	48.57	48.56	51.66	48.56
q_{v8} (m ³ /h)	3.83	3.82	3.82	3.82
p_7 (bar)	1	1	1	1

Los cálculos que realizaremos para obtener el consumo del recuperador energético necesario son los siguientes:

High Pressure Flow Differential Pressure (HPDP): Diferencia de presión entre la entrada y la salida de alta presión.

$$HPDP = p_6 - p_4 = 0.7 \rightarrow p_4 \quad (4-15)$$

Low Pressure Flow Differential Pressure (LPDP): Diferencia de presión entre la entrada y la salida de baja presión.

$$LPDP = p_2 - p_7 = 0.6 \rightarrow p_2 \quad (4-16)$$

Conocemos de ROSA las presiones p_1 (presión del agua de alimentación), p_6 (que es la presión del

²⁵ Fuente Lourdes García Rodríguez.

concentrado) y p_7 (presión atmosférica).

Puesto que no conocemos el valor de la presión de entrada a la bomba auxiliar, podemos valerlos de la expresión de la eficiencia (ε) del recuperador energético, para despejar la incógnita, conocidos q_1 (flujo de entrada), $q_7 = q_2$:

$$\varepsilon = 0.95 = \frac{\sum(q \cdot p)_{salida}}{\sum(q \cdot p)_{entrada}} \cdot 100 = \frac{q_{v4}p_4 + q_{v7}p_7}{q_{v2}p_2 + q_{v6}p_6} \cdot 100 \rightarrow q_{v7} \quad (4-17)$$

$$q_{v7} = q_{v2}$$

$$q_{v5} = (q_{v1} - q_{v2}) + q_{v4}$$

Conocidos las presiones y flujos del sistema, podemos pasar al cálculo del consumo de las bombas, así como la potencia total que consume el sistema y el consumo específico (SEC) del recuperador energético:

$$P_{W\ HPP} = \frac{\left(\frac{q_{v5} - q_{v6}}{m^3 \cdot h^{-1} \cdot 3600}\right) (p_5 - p_{amb})}{\eta_{HPP}\eta_{ENG}} \quad (4-18)$$

$$P_{W\ BP} = \frac{\left(\frac{q_{v6}}{m^3 \cdot h^{-1} \cdot 3600}\right) [0.7 + (p_5 - p_6)]}{\eta_{BP}\eta_{ENG}} \quad (4-19)$$

$$P_{W\ TOTAL} = P_{W\ HPP} + P_{W\ BP} \quad (4-20)$$

$$SEC = \frac{P_{W\ TOTAL}}{q_{v\ 8}} \quad (4-21)$$

Implementando las ecuaciones, para nuestros casos tenemos los siguientes valores:

Tabla 4-11 Tabla de resultados

Valores				
	Ecuador, Tmax	Ecuador, Tmin	Chile, Tmax	Chile, Tmin
P_{W, HPP} (kW)	7.57	7.57	8.04	7.94
P_{W, BP} (kW)	0.14	0.16	0.15	0.18
P_{W, TOTAL} (kW)	7.71	7.73	8.19	8.12
CE(kWh/m³)	2.01	2.02	2.14	2.12

5 PERFIL DE OPERACIÓN DE LA PLANTA FOTOVOLTAICA

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos, se realizará un estudio acerca de la producción de la planta fotovoltaica en las diferentes localizaciones elegidas para Ecuador y Chile.

El estudio se ha realizado en diferentes localizaciones según dónde se encontraba la mayor densidad minera, tal y como se comentó en el capítulo 3. Las zonas de las que se han obtenido datos eólicos y solares son:

Tabla 5–1 Localizaciones bajo estudio.

Ecuador	Chile
Cañar	Antofagasta
Chimborazo	Copiapó
Riobamba	La Serena
San Gabriel	Valparaíso
Machala	Santiago

Tras haber realizado un estudio de la producción, se han elegido únicamente cuatro casos para estudiar en profundidad; los casos más desfavorables y los más favorables para Ecuador y Chile

Tabla 5–2 Casos tecnología fotovoltaica.

	Ecuador	Chile
Caso menos favorable	Machala	Valparaíso
Caso más favorable	Cañar	Santiago

En el caso de la tecnología fotovoltaica tenemos en cuenta el cociente entre la energía total producida en un año y la energía solar global total a lo largo del año sobre la superficie inclinada y lo aplicamos a modo de rendimiento de la planta.

Los datos que se han utilizado para el cálculo del rendimiento son los que se aprecian en la figura, del diagrama de pérdidas proporcionado por el report de PVsyst, teniendo en cuenta que los cálculos se han hecho para una planta de 3 MWp, que era la máxima potencia con la que permitía trabajar el software.

Cabe destacar que se han obviado obstáculos y perfiles de sombra en las simulaciones y que los perfiles de orientación e inclinación se encuentran optimizados. En el caso de llevarse a cabo un estudio más exhaustivo y que quisiera asemejarse más a la realidad podría suponerse que las pérdidas debidas a obstáculos y sombras, provocasen una disminución del 2% en los rendimientos. Observando los resultados obtenidos, se puede apreciar que el rendimiento no varía mucho entre unas localizaciones y otras (oscila entre el 15% y el 17%), y que tanto Ecuador como Chile, son emplazamientos idóneos para este tipo de tecnología.

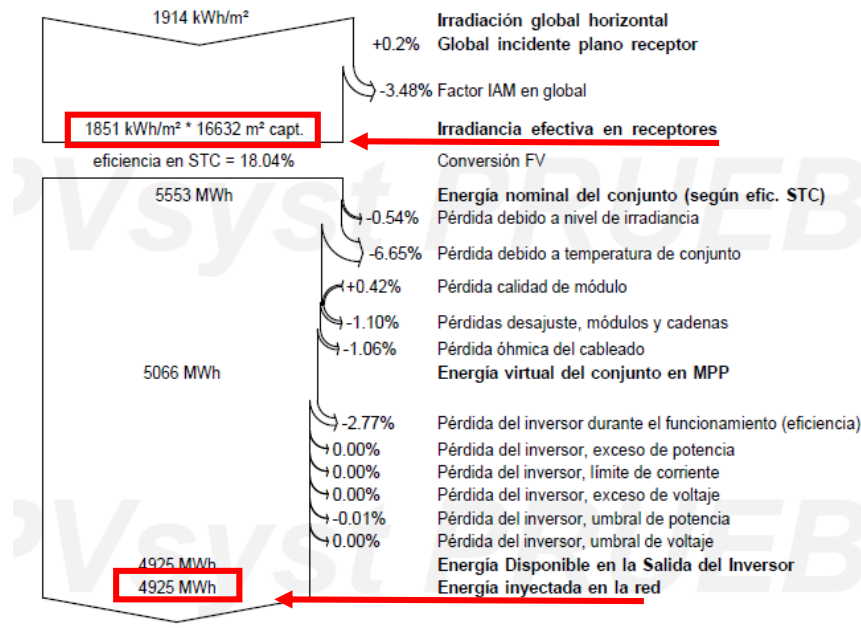


Figura 5-1. Diagrama pérdidas, PVsyst, Cañar.

Los resultados obtenidos con PVsyst no permiten conocer la potencia en promedio horario para cada hora del año. Es imprescindible este dato para el cálculo de la producción de agua, dado que la planta de desalación sólo opera si puede consumir la potencia suficiente. Una planta de desalación puede operar por separado:

- El bombeo de la toma de agua de alimentación, el agua a tratar que sea necesario para el proceso asociado a la minería. Consideramos como máximo una concentración del agua de mar y como mínimo concentración típica del agua salobre de baja concentración. Aguas a tratar que sean efluentes de la minería, en principio las consideraremos con una concentración en este rango.
- el núcleo productivo del proceso de desalación (capítulo 4). Dado que la presión osmótica de las disoluciones acuosas depende fundamentalmente de la concentración, el análisis realizado cubre un amplio rango de concentraciones. El consumo específico máximo del proceso de separación es el del agua de mar, calculado en el capítulo 4. El caso más desfavorable es 2.14 kWh/m³, que será el valor fijado en este capítulo y en el siguiente – análisis del caso eólico -
- el bombeo del producto hasta el punto de consumo. Dado que los puntos primero y tercero son característicos de cada planta en particular.

El análisis preliminar de la producción de agua que se realiza en este trabajo considera que se instala una mínima capacidad de baterías. Si la potencia es suficiente se produce agua, si hay en exceso se emplea para bombeo auxiliar. Si la potencia producida no permite la producción de agua, pero sí alguno de los sistemas auxiliares de bombeo, se operan estos.

Se utilizan los resultados del PVsyst para caracterizar la instalación PV como un todo. Sobre ella se calcula el rendimiento energético con un planteamiento termodinámico. El recurso energético se considera la irradiancia global sobre la superficie inclinada (área efectiva) y el producto es la potencia eléctrica. Con este resultado, se calcula la potencia eléctrica en promedio horario a partir de los datos que proporciona METEONORM7.

Se ha analizado la producción de potencia para una planta de 3MWp y la producción de agua de desalación en función de si la generación eléctrica supera 1.5 MWh, 1 MWh o 0.5 MWh, es decir, si la planta de desalación en cuestión tuviese un consumo nominal (para arrancar el núcleo productivo)

de 1.5 MWh, 1 MWh o 0.5 MWh. Conociendo el consumo eléctrico en potencia nominal de la planta desaladora y suponiendo el consumo específico más desfavorable, 2.14 kWh/m³ (capítulo 4), obtenemos la capacidad nominal de la planta de desalación, expresada en m³ de agua desalada por hora.

Tabla 5–3 Producción de agua desalada.

Condición E> 1,5 MW (planta 1)=	700,9	m ³ /h
Condición E> 1,0 MW (planta 2)=	467,3	m ³ /h
Condición E> 0,5 MW (planta 3)=	233,6	m ³ /h

5.1 Ecuador

Tabla 5–4 Rendimiento fotovoltaico.

	Cañar	Chimborazo	Riobamba	San Gabriel	Machala
Welec (MWh)	4925	5605	5277	4943	4037
Qsol (MWh)	30785,83	32981,26	33130,94	30985,42	26095,61
η (%)	0,16	16,99	15,93	15,95	15,47

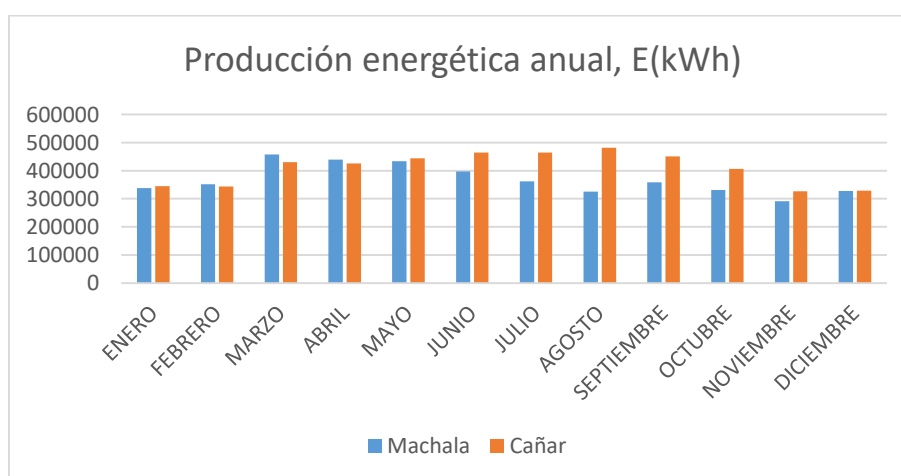


Figura 5-2. Producción energética con fotovoltaica a lo largo del año.

El perfil de producción eléctrica a lo largo del año es prácticamente el mismo para Machala y Cañar, pero vemos como en el caso de Cañar la producción es mucho mejor en los meses más desfavorables, que son los respectivos al invierno en el hemisferio sur. A continuación, vemos con más detalle la producción mensual:

Tabla 5–5. Producción eléctrica (MWh) para cada mes del año, para un campo de 3 MWp.

MES	Machala	Cañar
ENERO	338.44	345.49

FEBRERO	351.94	344.26
MARZO	458.14	430.45
ABRIL	439.42	425.57
MAYO	434.20	444.36
JUNIO	397.01	464.46
JULIO	362.44	465.04
AGOSTO	325.34	482.19
SEPTIEMBRE	358.85	450.89
OCTUBRE	330.94	406.37
NOVIEMBRE	291.56	327.23
DICIEMBRE	327.86	329.51

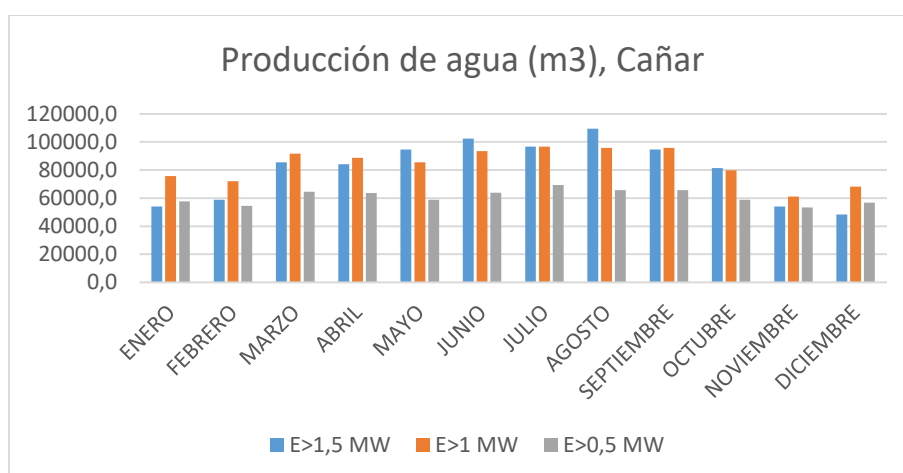
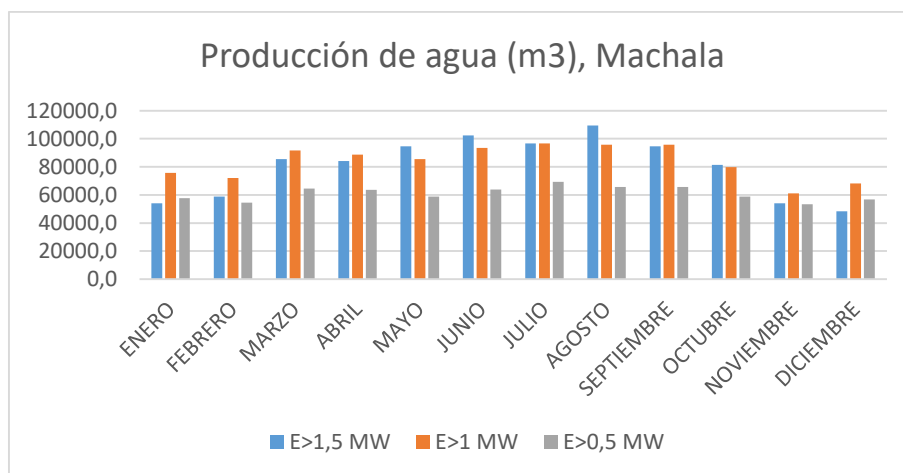


Figura 5-3. Producción de agua desalada a lo largo del año para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación, para un campo fotovoltaico de 3 MWp.

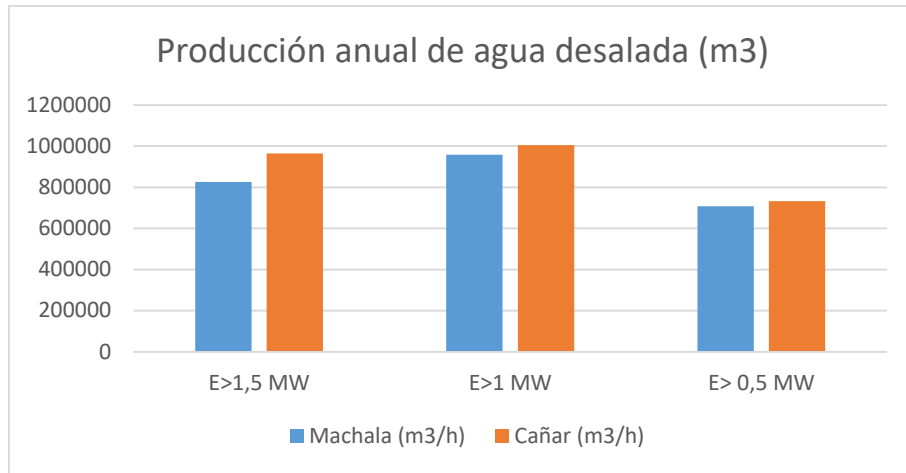


Figura 5-4. Producción de agua desalada anual para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación, para un campo fotovoltaico de 3 MWp.

La producción de agua desalada no varía mucho a lo largo del año ni entre ambos emplazamientos, pero es drásticamente mejor cuando el consumo nominal de la planta de desalación es mayor a 1 MW tanto en Machala como en Cañar, para la mayor parte del año.

5.2 Chile

El procedimiento llevado a cabo en Chile es exactamente el mismo:

Tabla 5-6 Rendimiento fotovoltaico.

	Antofagasta	Copiapó	Santiago	La Serena	Valparaíso
Welec (MWh)	4312	3838	4766	4637	3795
Qsol (MWh)	26694,36	23950,08	30303,50	28789,99	24049,87
η (%)	16,15	16,02	15,73	16,11	15,78

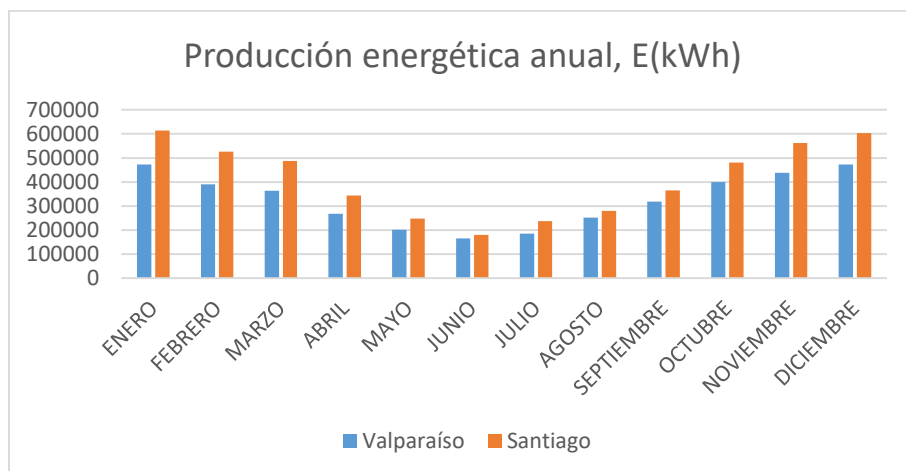
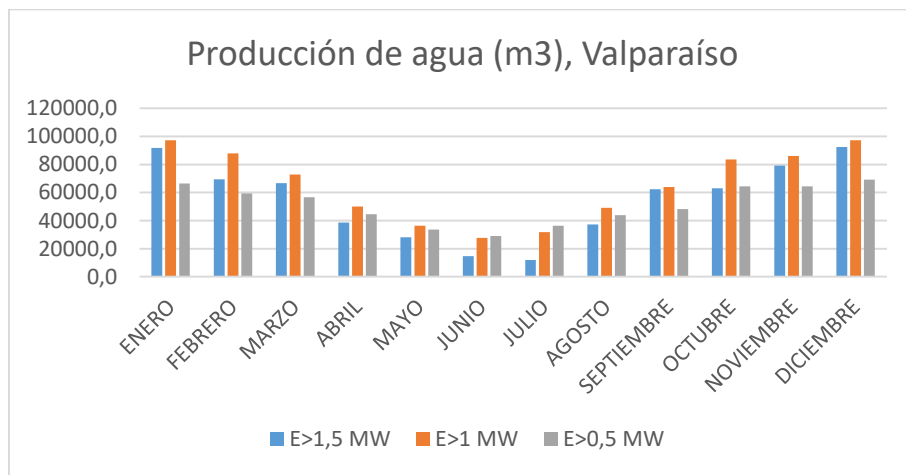


Figura 5-5. Producción energética con fotovoltaica a lo largo del año.

Tabla 5–7. Producción eléctrica (MWh) para cada mes del año, para un campo de 3 MWp.

MES	Valparaíso	Santiago
ENERO	473.10	613.98
FEBRERO	389.79	526.04
MARZO	363.64	487.33
ABRIL	267.65	343.83
MAYO	202.01	248.57
JUNIO	166.09	180.62
JULIO	185.14	237.40
AGOSTO	251.86	280.54
SEPTIEMBRE	318.36	365.28
OCTUBRE	399.18	480.67
NOVIEMBRE	437.59	562.42
DICIEMBRE	472.63	602.71



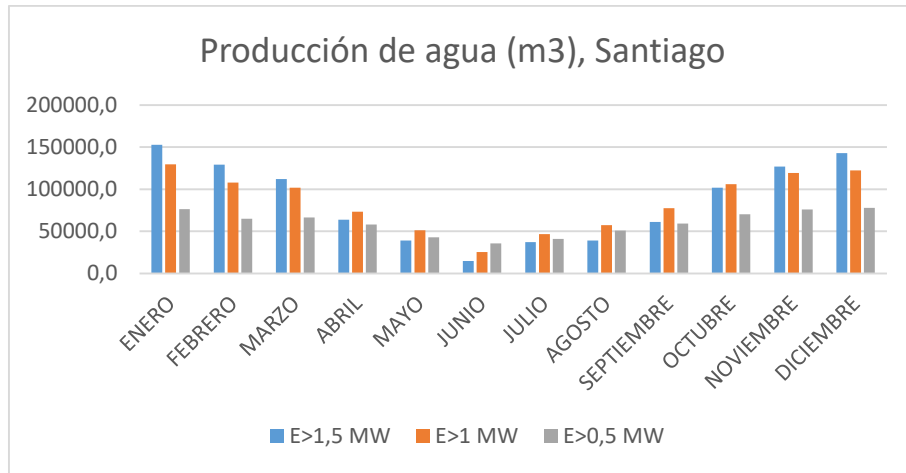


Figura 5-6. Producción de agua desalada a lo largo del año para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación, para un campo fotovoltaico de 3 MWp.

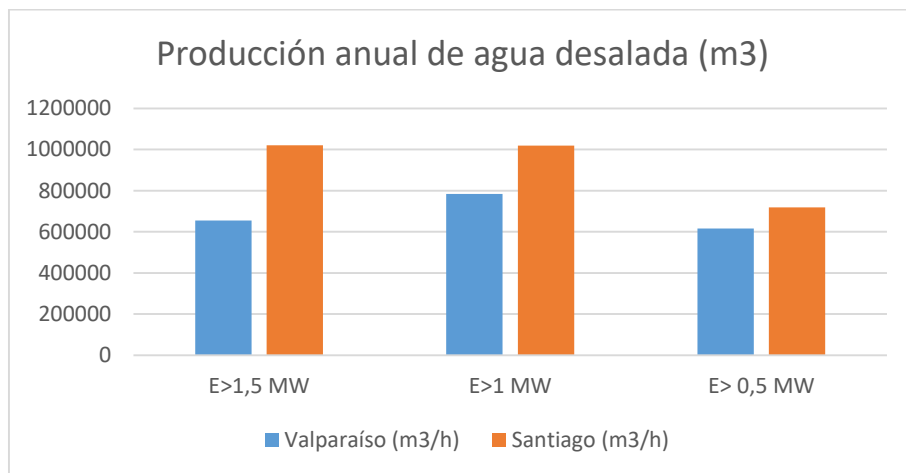


Figura 5-7. Producción de agua desalada anual para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación, para un campo fotovoltaico de 3 MWp.

En esta casuística, para el caso más favorable (Santiago) la producción de agua no varía mucho entre una planta de consumo nominal 1.5 MW y una de 1 MW, pero sí que en el caso más desfavorable (Valparaíso) mejora mucho para un consumo nominal de 1 MW. Esto os da a entender que realmente compensaría invertir en una planta desaladora menor, puesto que no solo se produciría más agua, sino que se abaratarían los costes de inversión, etc, debido a su menor tamaño.

6 PERFIL DE OPERACIÓN DE LA PLANTA EÓLICA

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos, se realizará un estudio acerca de la producción de la planta eólica en las diferentes localizaciones elegidas para Ecuador y Chile.

Tal y como en el capítulo anterior, el estudio se ha realizado en diferentes localizaciones según dónde se encontraba la mayor densidad minera. Las zonas de las que se han obtenido datos eólicos y solares son:

Tabla 6–1 Localizaciones bajo estudio.

Ecuador	Chile
Cañar	Antofagasta
Chimborazo	Copiapó
Riobamba	La Serena
San Gabriel	Valparaíso
Machala	Santiago

En el caso de la tecnología eólica, después de realizar el estudio para todos y cada uno de los emplazamientos, dada la gran cantidad de datos manejados en Excel, se presentarán los resultados para únicamente cuatro casos; aquellos con mejores y peores resultados tanto en Chile como en Ecuador.

Tabla 6–2 Casos tecnología eólica.

	Ecuador	Chile
Peor caso	Machala	Valparaíso
Mejor caso	Cañar	Antofagasta

El estudio se ha realizado para la producción de potencia para aerogeneradores de VESTAS 3.3 MW IEC IIA y la producción de agua de desalación para cada uno de ellos en función de si la generación eólica eléctrica supera 1.5 MWh, 1 MWh o 0.5 MWh, es decir, si la planta de desalación en cuestión tuviese un consumo nominal (para arrancar) de 1.5 MWh, 1 MWh o 0.5 MWh.

Tabla 6–3 Producción de agua desalada.

Condición E > 1,5 MW (planta 1)=	700,9	m ³ /h
Condición E > 1,0 MW (planta 2)=	467,3	m ³ /h
Condición E > 0,5 MW (planta 3)=	233,6	m ³ /h

6.1 Ecuador

6.1.1 Aerogenerador de 3.3 MW

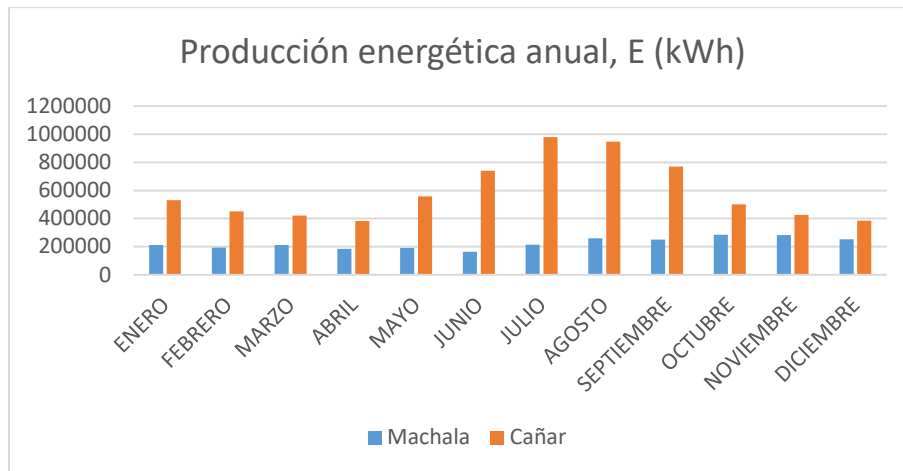


Figura 6-1. Producción eólica a lo largo del año, para un aerogenerador de 3.3 MW.

Se puede observar como para Cañar, el caso más favorable, la producción energética prácticamente duplica la de Machala durante los meses más desfavorables, y durante los meses que pertenecen al invierno en el hemisferio sur (junio, julio, agosto y septiembre) llega incluso a triplicarla, tal y como se aprecia en la siguiente tabla con más detalle.

Tabla 6-4. Producción eólica (MWh) para cada mes del año, para un aerogenerador de 3.3 MW.

MES	Machala	Cañar
ENERO	212.32	531.00
FEBRERO	194.37	451.39
MARZO	212.12	422.35
ABRIL	185.05	383.34
MAYO	191.75	557.52
JUNIO	164.30	741.52
JULIO	213.71	980.14
AGOSTO	259.05	947.91
SEPTIEMBRE	250.33	769.67
OCTUBRE	284.31	500.45
NOVIEMBRE	282.19	425.40
DICIEMBRE	252.76	385.76

La producción de agua se calculará utilizando el caso de consumo específico más desfavorable, es decir 2.14.

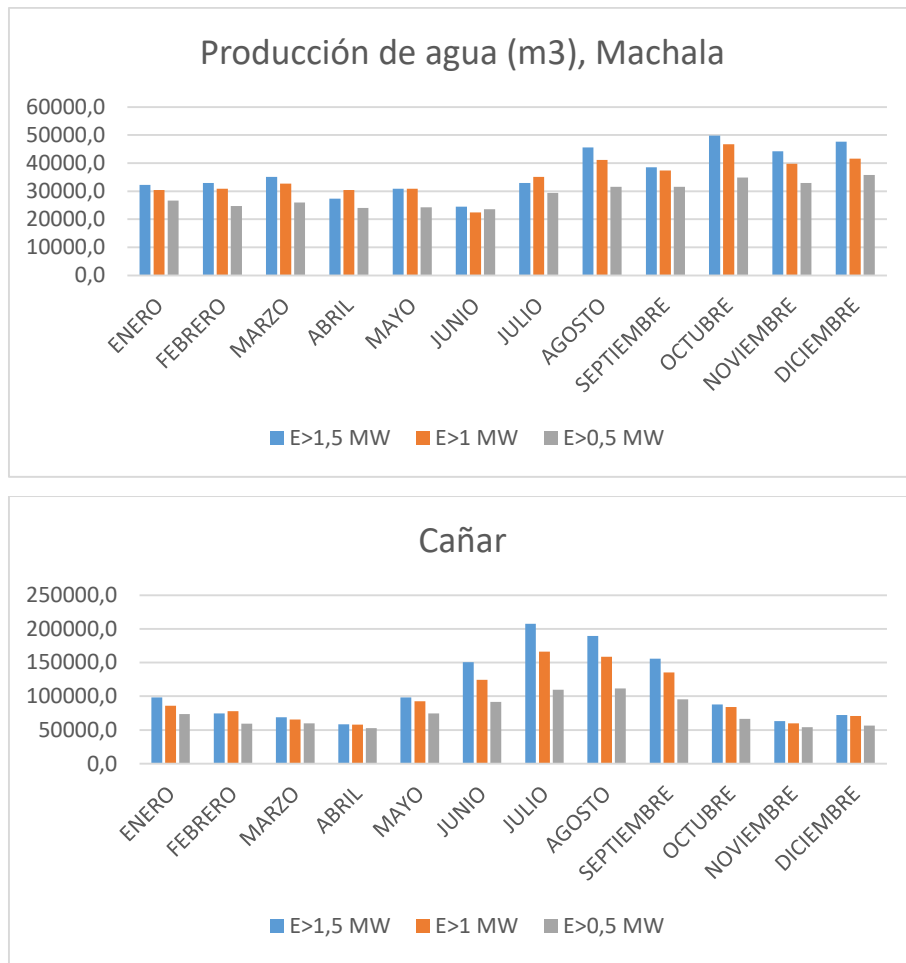


Figura 6-2. Producción de agua desalada a lo largo del año para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación, para un aerogenerador de 3.3 MW.

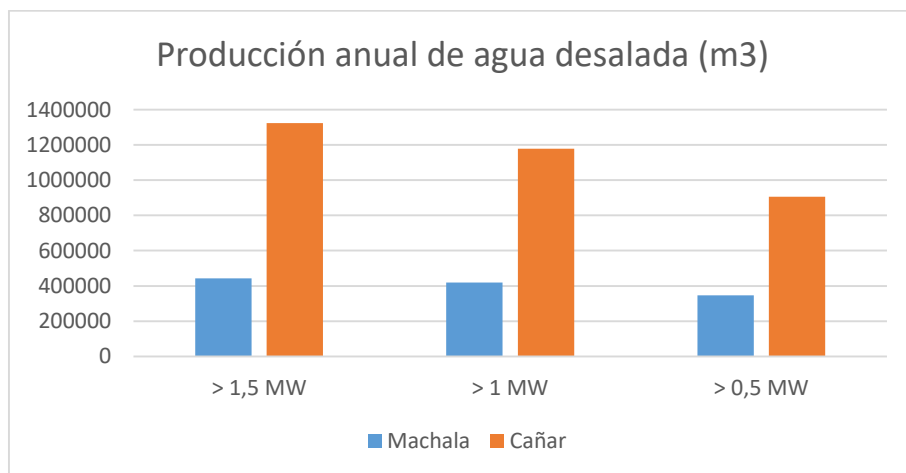


Figura 6-3. Producción de agua desalada anual para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación, para un aerogenerador de 3.3 MW.

Tabla 6–5. Producción de agua desalada (m³) anual para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación, para un aerogenerador de 3 MW.

Producción eólica horaria	Machala (m ³ /h)	Cañar (m ³ /h)
> 1,5 MW	442267,9	1323299,2
> 1 MW	419635,4	1178063,3
> 0,5 MW	346428,8	905667,2

Tras el análisis de la producción de agua desalada, volvemos a ver como la producción de agua en el caso de Machala no llega a la mitad de la producción obtenida en Cañar.

Otro hecho que se puede observar es que cuando se trata de una planta de desalación de exigencias energéticas 0.5 MWh, la producción de agua disminuye, de manera más considerable durante los meses de invierno.

En caso de que la producción de agua aumentase para las plantas menores, esto no sólo reportaría el beneficio de que el consumo energético fuese menor, sino que la inversión económica que supondría dicha planta también sería menor debido a su menor tamaño.

Siempre y cuando no haya problema con el estancamiento de agua, y se pretenda producir la mayor cantidad de agua de desalación, podría optarse por una planta desaladora de consumo nominal 1 MW o 0.5 MW, puesto que no compensa invertir en una planta mayor para el poco incremento de producción de agua que se tiene, tal y como se puede observar en la figura 6-5.

6.2 Chile

6.2.1 Aerogenerador de 3.3 MW

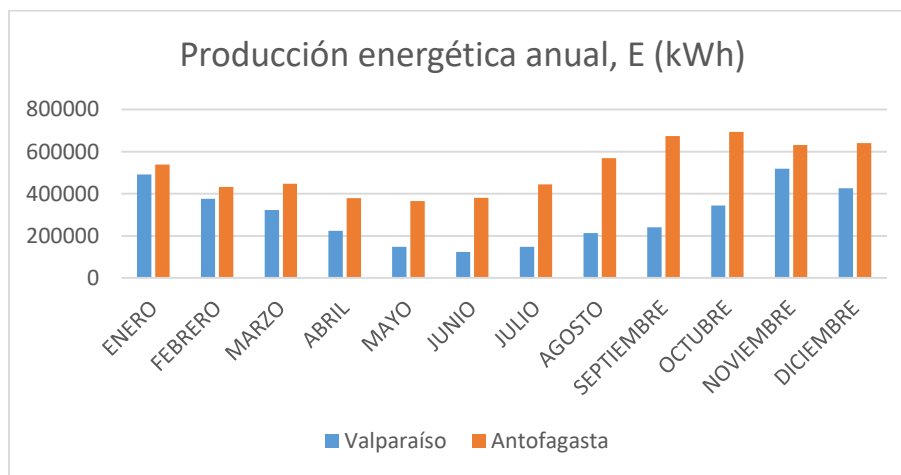
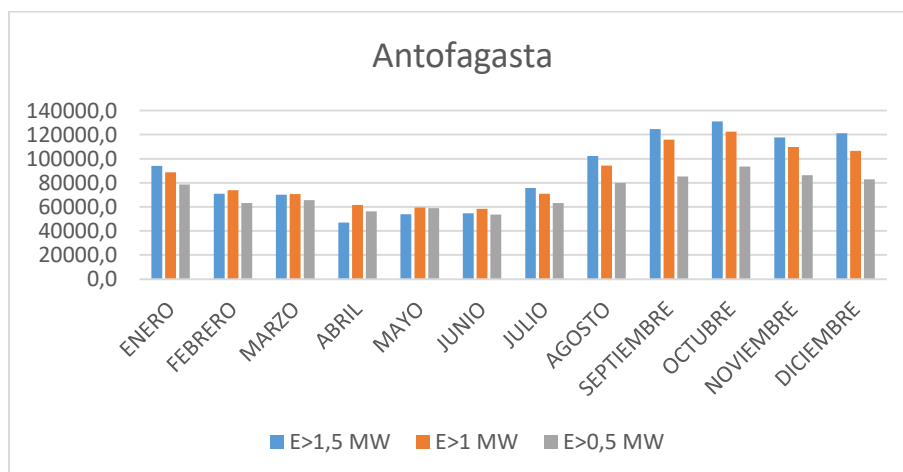
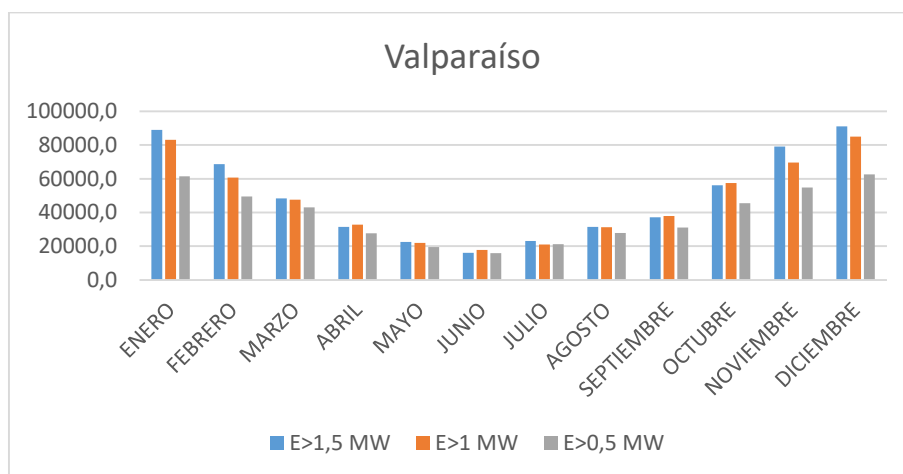


Figura 6-4. Producción eólica a lo largo del año, para un aerogenerador de 3.3 MW.

Se puede observar que a pesar de que, esta vez no con tanta diferencia como los casos de Ecuador, Antofagasta como caso favorable es la mejor opción, la producción energética en este emplazamiento prácticamente supera la de Valparaíso durante los meses más desfavorables (correspondientes al verano del hemisferio sur), y durante los meses favorables sí que llega a duplicarla, tal y como se aprecia en la siguiente tabla con más detalle.

Tabla 6–6. Producción eólica (MWh) para cada mes del año, para un aerogenerador de 3.3 MW.

MES	Valparaíso	Antofagasta
ENERO	490.89	538.16
FEBRERO	375.78	431.65
MARZO	322.68	447.97
ABRIL	223.43	379.44
MAYO	147.32	365.38
JUNIO	124.26	380.82
JULIO	147.96	444.98
AGOSTO	213.47	569.03
SEPTIEMBRE	240.98	673.59
OCTUBRE	344.12	693.05
NOVIEMBRE	518.81	632.06
DICIEMBRE	426.21	640.35



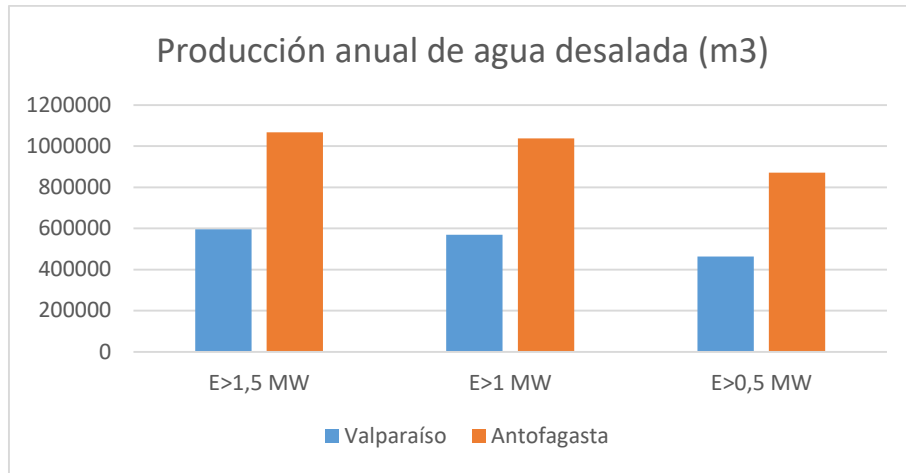


Figura 6-5. Producción de agua desalada a lo largo del año para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación, para un aerogenerador de 3.3 MW.

Después de llevar a cabo el análisis de la producción de agua desalada en Chile, se puede apreciar que la producción de agua no varía mucho entre los diferentes tipos de planta desaladora bajo estudio, la mejor opción sería sin duda Antofagasta.

Otro hecho que se puede observar es que cuando se trata de una planta de desalación de exigencias energéticas 0.5 MWh, la producción de agua disminuye, de manera más considerable durante los meses de invierno.

7 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EÓLICOS Y FOTOVOLTAICOS

En este capítulo se repasarán los objetivos establecidos al principio del proyecto y tras el análisis de datos se presentarán las conclusiones.

7.1 Valoración de la aplicación de energía fotovoltaica y eólica a la desalación en Ecuador y Chile

En primer lugar, realizamos la valoración del uso de energía eólica o fotovoltaica en los emplazamientos seleccionados como más favorables en los países de Chile y Ecuador.

En las figuras 7-1 y 7-2 se presentan los resultados para Ecuador, donde la mayor producción energética para las dos tecnologías la encontramos en Cañar. En primer lugar, se muestra en la Fig. 7-1 la generación mediante energías eólica y solar PV para para cada uno de los meses del año, expresada en el caso de eólica en kWh por MW instalado y en el caso PV en kWh por MWp instalado. En segundo lugar, se comparan las respectivas producciones anuales en m³ para 3.3 MW nominales eólico o solar PV, considerando tres casos distintos del consumo de la planta de desalación, correspondiendo a 1.5 MW, 1.0 MW y 0.5 MW.

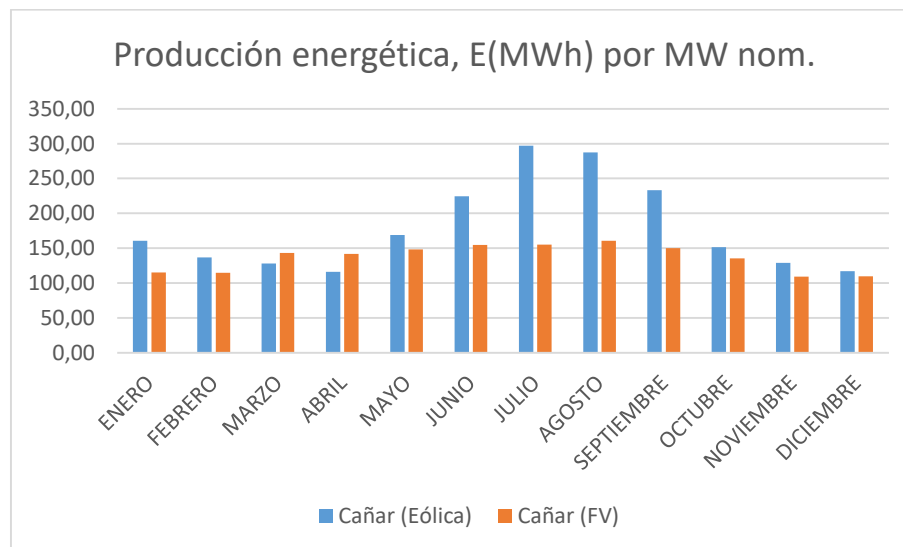


Figura 7-1. Producción energética (MWh) a lo largo del año para los casos más favorables en Ecuador por MW nominal.

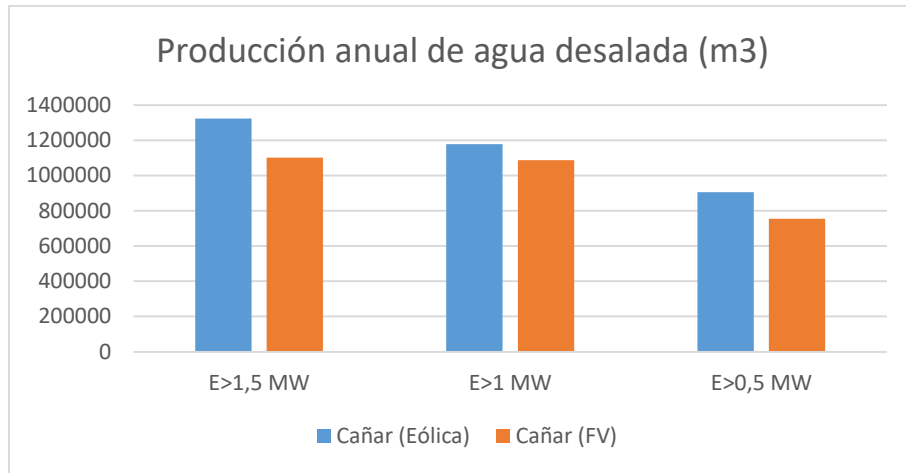


Figura 7-2. Producción de agua desalada anual para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación para los casos más favorables en Ecuador.

Con respecto a la producción fotovoltaica se aprecia como es casi constante a lo largo del año, mientras que la producción eólica sí que llega a sus máximos en los meses de invierno en el hemisferio sur. Sin embargo, la producción de agua desalada es visiblemente mejor en el caso de eólica.

Se descarta la opción de planta desaladora 1 (con consumo nominal 1.5 MW), puesto que no reporta un aumento de la producción de agua desalada suficiente como para que resulte interesante invertir en una planta desaladora de mayor tamaño.

En Chile la mayor producción eólica la encontramos en Antofagasta y Santiago en para fotovoltaica. Se muestran figuras análogas a las anteriores.

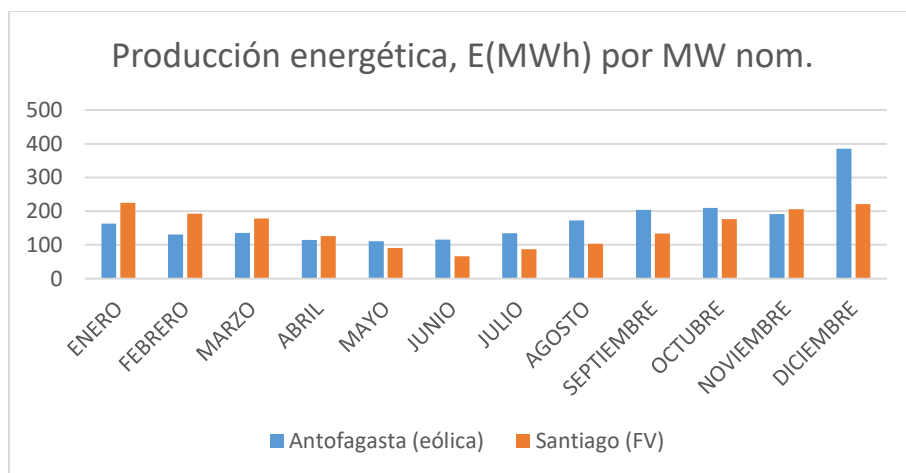


Figura 7-3. Producción energética (MWh) a lo largo del año para los casos más favorables en Chile por MW nominal.

En el caso de los emplazamientos óptimos para fotovoltaica (Santiago) y eólica (Antofagasta) en Chile, a pesar de que los primeros meses de año la producción fotovoltaica supere a la eólica, en los meses comprendidos entre junio y octubre se produce un incremento de la producción eólica notable.

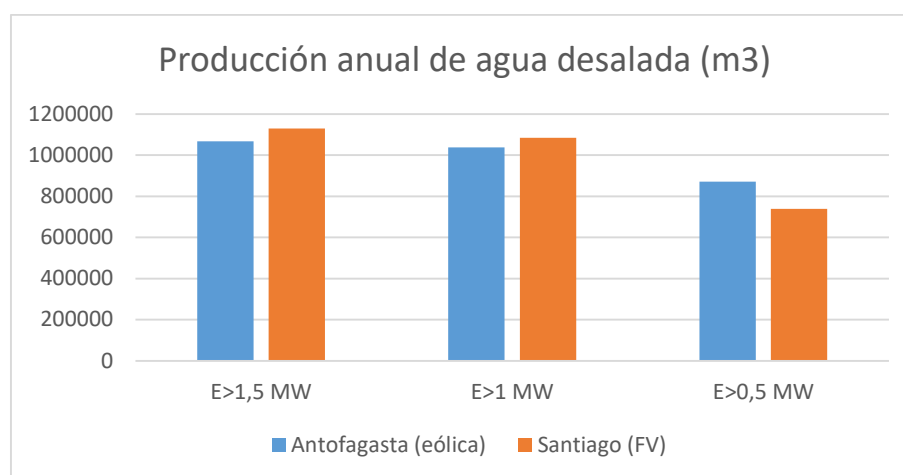


Figura 7-4. Producción de agua desalada anual para diferentes exigencias energéticas por parte de la planta de desalación para los casos más favorables en Chile.

Igual que en el caso de Ecuador, se recomienda la implementación de plantas desaladoras de consumo nominal entre 1 MW y 0.5 MW.

Se puede concluir que ambas tecnologías ofrecen muy buenos resultados puesto que los recursos solar y eólico son abundantes en ambos países, lo que permite obtener gran cantidad de agua desalada, pero el uso de aerogeneradores supone una mejora con respecto a la implementación de campos solares en relación a costes.

7.2 Rangos de kWp de energía fotovoltaica y eólica instalado por m³/día instalado de desalación

Considerando 3.3 MW de energía eólica instalada o 3 MWp de potencia PV instalada: En todos los casos analizados se aprecia un incremento despreciable en la producción de agua al pasar de consumo 1.0 MW a 1.5 MW, por tanto, no se recomiendan consumos de desalación por encima de 1.0 MW.

Tras el estudio anterior se puede establecer, para las salinidades máximas consideradas (agua de mar), las siguientes producciones medias:

Tabla 7-1 Producción media de agua desalada con 3.3 MWp de PV o 3.3 MW de eólica para salinidad máxima (agua de mar, consumo específico considerado 2.14 kWh/m³).

Consumo y producción nominal planta desaladora	Producción de agua desalada con Fotovoltaica con 3.3 MWp	Producción de agua desalada con Eólica con 3.3 MW
1.0 MW (467.3 m ³ /h)	Ecuador: 2975 - 2626 m ³ /d Chile: 2970 - 2147 m ³ /d	Ecuador: 3228 - 1150 m ³ /d Chile: 2841 - 1156 m ³ /d
0.5 MW (233.6 m ³ /h)	Ecuador: 2067 - 1938 m ³ /d Chile: 2025 - 1688 m ³ /d	Ecuador: 2481 - 949 m ³ /d Chile: 2387 - 1268 m ³ /d

Tabla 7–2 Producción media de agua desalada con 3.3 MWp de PV o 3.3 MW de eólica para aguas salobres de altas salinidades [20] - 5881ppm - (consumo específico considerado 0.79 kWh/m³).

Consumo y producción nominal planta desaladora	Producción de agua desalada con Fotovoltaica con 3.3 MWp	Producción de agua desalada con Eólica con 3.3 MW
1.0 MW (1265.8 m ³ /h)	Ecuador: 1098 -969 m ³ /d Chile: 1096 – 793 m ³ /d	Ecuador: 1192 - 425m ³ /d Chile: 1049-427 m ³ /d
0.5 MW (632.9 m ³ /h)	Ecuador: 763 - 715 m ³ /d Chile: 748 - 623 m ³ /d	Ecuador: 916 - 350 m ³ /d Chile: 881 - 468 m ³ /d

Tabla 7–3 Producción media de agua desalada con 3.3 MWp de PV o 3.3 MW de eólica para aguas salobres de bajas salinidades [20] – 647 ppm - (consumo específico considerado 0.23 kWh/m³).

Consumo y producción nominal planta desaladora	Producción de agua desalada con Fotovoltaica con 3.3 MWp	Producción de agua desalada con Eólica con 3.3 MW
1.0 MW (4347.8 m ³ /h)	Ecuador: 320 - 282 m ³ /d Chile: 319 - 231 m ³ /d	Ecuador: 347 - 124 m ³ /d Chile: 305 - 124 m ³ /d
0.5 MW (2173.9 m ³ /h)	Ecuador: 222 - 208 m ³ /d Chile: 218 - 181 m ³ /d	Ecuador: 267 - 102 m ³ /d Chile: 257 - 136 m ³ /d

8 CONCLUSIONES

En este último capítulo se presentarán las conclusiones a las que se han llegado tras analizar todos los datos.

Se puede concluir que las tecnologías fotovoltaica y eólica ofrecen muy buenos resultados puesto que los recursos solar y eólico son abundantes en Ecuador y Chile, lo que permite obtener gran cantidad de agua desalada, pero el uso de aerogeneradores supone una mejora con respecto a la implementación de campos solares en relación a costes.

Las figuras 7-1 y 7.2 junto con las figuras 7.3 y 7.4 del capítulo anterior, muestran que es indispensable analizar no sólo la producción energética, sino también la capacidad nominal de la desaladora para realizar estimaciones, incluso preliminares del agua producida, ya que en las figuras 7-1 y 7-3 es fácilmente apreciable que la tecnología eólica genera una mayor producción eléctrica que la fotovoltaica, pero esta producción no se ve reflejada en una mayor producción de agua desalada.

En base a los capítulos 5-7, el consumo nominal del núcleo productivo de la planta desaladora debe tener un ratio respecto a la potencia nominal instalada eólico o fotovoltaica inferior a 0.50. A partir del análisis realizado se recomienda estudiar el rango 0.15 a 0.33.

En los casos de estudio analizados en Ecuador y Chile se han cuantificado los rangos de producción de agua según se resume en la siguiente tabla.

Tabla 8-1 Producción media de agua desalada (m³/d) por producción eléctrica nominal

Concentración de la alimentación	Ratio consumo nominal/ producción nominal	Producción media en Ecuador, (m ³ /d)/MW _{nom}		Producción media en Chile, (m ³ /d)/MW _{nom}	
		PV	Eólica	PV	Eólica
34000	0.30	901.5	978.2	900	860.9
		795.7	348.5	650.6	350.3
34000	0.60	626.3	751.8	613.6	723.33
		587.3	287.6	511.5	384.24
5881	0.30	332.8	361.21	332.1	317.9
		293.6	128.8	240.3	129.4
5881	0.60	231.2	277.6	226.7	267.0
		216.7	106.1	188.8	141.8
647	0.30	97.0	105.2	96.7 - 70	92.42 - 37.6
		85.5	37.6		
647	0.60	67.3	80.9 - 30.9	66.0	77.9 - 41.2
		63.0		54.8	

REFERENCIAS

- [1] Qingfen Ma, Hui Lu, «Wind Energy technologies integrated with desalination systems: Review and state of the art,» Elsevier, 2011.
- [2] Recuperado de <https://cordis.europa.eu/project/rcn/218321/factsheet/en>.
- [3] José Miguel Veza, «Introducción a la desalación del agua»
- [4] Recuperado de <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/comp/index.htm>
- [5] José Antonio Carta, Penélope Ramírez, «Use of mixture distribution models in the analysis of wind energy in the Canary Archipelago,» Elsevier, 2006.
- [6] Vicente Romero, Ternero Lourdes García Rodríguez, Carlos Gómez Camacho, «Thermoeconomic Analysis of wind powered seawater reverse osmosis desalination in the Canary Islands,» Elsevier, 2005.
- [7] Vicente Romero Ternero, «Influence of the fitted probability distribution type on the annual mean power generated by wind turbines: A case study at the Canary Islands,» Elsevier, 2008.
- [8] José Franklyn Ruiz Murcia, «Estimación de la velocidad del viento a diferentes alturas usando el modelo WRF,».
- [9] Recuperado de <https://www.pvsyst.com/features/>
<http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/kids/index.htm>
- [10] André Mermoud, Bruno Wittner, «PVSYST6,» PVSYST SA, 2017.
- [11] Sharqawy, M. H.; Lienhard, J. H., and Zubair, S. M. *Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlation and data*. Desalination and Water Treatment, 16, 2010, pp. 354-380.
- [12] Millero, F. J.; Feistel, R.; Wright, D. G., McDougall, T. J., *The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale*. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 55(1), 2008, pp. 50-72.
- [13] Nayar, Kishor G., Mostafa H. Sharqawy, Leonardo D. Banchik, and John H. Lienhard V. “Thermophysical Properties of Seawater: A Review and New Correlations That Include Pressure Dependence.” Desalination 390 (July 2016): 1-24
- [14] Sharqawy, Mostafa H., John H. Lienhard, and Syed M. Zubair. “Formulation of Seawater Flow Exergy Using Accurate Thermodynamic Data.” Volume 5: Energy Systems Analysis, Thermodynamics and Sustainability; NanoEngineering for Energy; Engineering to Address

Climate Change, Parts A and B (2010). © 2010 ASME

- [15] Sharqawy, Mostafa H., John H. Lienhard V, and Syed M. Zubair. "*On Exergy Calculations of Seawater with Applications in Desalination Systems.*" International Journal of Thermal Sciences 50, no. 2 (February 2011): 187–196.
- [16] Rabah Gomri Energy and exergy analyses of seawater desalination system integrated in a solar heat transformer
- [17] Medina San Juan, José A. Desalación de aguas salobres y del mar: ósmosis inversa . Madrid [etc: Mundi-Prensa, 2000. Print.
- [18] G Forchhammer. "On he composition of sea-water in the different parta of the ocean". Phil. Trans. R. Soc. Lond (1865) 155
- [19] Recuperado de <https://www.youbioit.com/en/article/image/28169/desalinizacion-de-agua-salada-mediante-osmosis-inversa>
- [20] M. WILF, L. AWERBUCH, C. BARTELS, M. MICKLEY, G. PEARCE y N. VOUTCHKOV, The guidebook to membrane desalination technology, Balaban Desalination Publications, ISBN 97-80866-8906-56, 2007.

