

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Herramienta para el modelado de sistemas de
desalación de agua de mar eólicos

Autor: Carlos Tomás Toledo García

Tutor: Lourdes García Rodríguez

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

Sevilla, 2023



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial

Herramienta para el modelado de sistemas de desalación de agua de mar eólicos

Autor:

Carlos Tomás Toledo García

Tutor:

Lourdes García Rodríguez

Catedrática de Universidad

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

Sevilla, 2023

Proyecto Fin de Carrera: Herramienta para el modelado de sistemas de desalación de agua de mar eólicos

Autor: Carlos Tomás Toledo García

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, 2023

El Secretario del Tribunal

A mi mujer y mi familia, por el incondicional apoyo e infinita paciencia durante tantos años.

A mi tutora Lourdes, por no darme por perdido.

Y a Martín, por el empujón final.

El objetivo de este trabajo es analizar el uso de un sistema de energía renovable (eólica), que produzca la energía necesaria para el funcionamiento de una planta de osmosis inversa para la producción de agua potable procedente de agua de mar. Para ello se usa la herramienta de programación 'Matlab' para crear los scripts necesarios para valorar diferentes modelos de aerogeneradores a partir de una base de datos que el usuario provea en una ubicación de estudio. De igual manera se modelan las funciones necesarias para obtener el funcionamiento del sistema de bombeo de la planta de ósmosis inversa. Se usa también el software 'Q+' con el que obtener el funcionamiento del bastidor de membranas.

Con ese conjunto de herramientas, el usuario puede valorar el funcionamiento de un aerogenerador, bombas y membranas dadas, para una ubicación elegida, y obtener resultados con los que crear comparaciones y análisis dada la flexibilidad de su uso.

Abstract

The goal of this study is to analyze the use of a renewable energy source (wind), which produces the necessary energy output for the operation of a reverse osmosis plant for the production of drinking water from seawater. For this, 'Matlab' programming tool is used to create the necessary scripts to assess different models of wind turbines from a database that the user provides in a particular location. In the same way, the necessary functions are modeled to obtain the operation of the pumping system of the reverse osmosis plant. The 'Q+' software is also used to obtain the performance of the membrane frame.

With this set of tools, the user can evaluate the performance of a given wind turbine, pumps and membranes, for a chosen location, and obtain results with which to create comparisons and analyzes given the flexibility of the tool.

Índice

Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xii
Índice de Tablas	xiv
Índice de Figuras	xv
Notación	xix
1 introducción	1
2 Subsistema eólico. Descripción y estado actual	3
2.1 <i>Descripción de la tecnología</i>	3
2.2 <i>Descripción del subsistema eólico</i>	5
2.2.1 Rotor	5
2.2.2 Góndola	5
2.2.3 Torre	5
2.3 <i>Descripción de la potencia generada por el aerogenerador.</i>	6
2.4 <i>Estado actual</i>	6
2.5 <i>Aplicación a la desalinización de agua marina</i>	9
3 Datos del viento y aerogeneradores	11
3.1 <i>Análisis de los datos del viento y representación de la curva del Aerogenerador</i>	11
3.1.1 Datos del viento por ubicación de estudio	12
3.1.2 Datos de los aerogeneradores	14
4 Descripción de la herramienta para el sistema eólico	23
4.1 <i>Introducción a la herramienta</i>	23
4.2 <i>Gestión de los datos del viento</i>	23
4.3 <i>Gestión de los datos de los aerogeneradores</i>	25
5 Subsistema de desalinización.	31
5.1 <i>Origen y estado actual</i>	31
5.1.1 situación en España	32
5.2 <i>Descripción de las diferentes tecnologías de desalinización</i>	35
5.2.1 Desalinización térmica	35
5.2.2 Destilación por membranas	36
6 Modelado del sistema de osmosis inversa (en desarrollo)	39
6.1 <i>Obtención del punto de operación</i>	39
6.2 <i>Obtención de conclusiones a partir de las gráficas</i>	52
6.3 <i>Simulación para una ubicación y aerogenerador dados</i>	54
6.3.1 Conclusiones del caso real	¡Error! Marcador no definido.
7 Conclusiones (sin hacer)	61
8 Anexos	62
8.1 <i>Anexo 1: Carga de datos en matlab</i>	62
8.1 <i>Anexo 1: Modelado del sistema de bombeo</i>	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Distribución por provincias de la capacidad acumulada en Andalucía (MW) a fecha 30 de junio de 2022 (12)	7
Tabla 3-1: Tabla datos generales del aerogenerador Gamesa G128-4.5MW. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.	16
Tabla 3-2: Tabla datos generales del aerogenerador Eno energy eno 126 3.5. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.	17
Tabla 3-3: Tabla datos generales del aerogenerador Gamesa G132/3300. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.	18
Tabla 3-4: Tabla datos generales de los aerogeneradores Vestas de 3.3 MW para bajas, medias y altas velocidades de viento respectivamente. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.	19
Tabla 3-5: Tabla datos generales del aerogenerador Enercon E-82 E2 2.300. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.	21
Tabla 3-6: Tabla datos generales del aerogenerador Danwin 23/180. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.	22
Tabla 6-3: Tabla de consumos típicos de los diferentes equipos (55).	39
Tabla 6-4: Tabla con los pesos correspondientes para cada equipo en porcentaje. Elaboración propia a partir de los datos de la tabla 6-1.	39
Tabla 6-5: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 ES con un 50% de recovery.	42
Tabla 6-6: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 R con un 50% de recovery.	42
Tabla 6-7: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 GR con un 50% de recovery.	42
Tabla 6-8: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 SR con un 50% de recovery.	43
Tabla 6-9: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 ES con un 45% de recovery.	43
Tabla 6-10: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 R con un 45% de recovery.	43
Tabla 6-11: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 GR con un 45% de recovery.	44
Tabla 6-12: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 SR con un 45% de recovery.	44
Tabla 6-13: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 ES con un 40% de recovery	44
Tabla 6-14: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 R con un 40% de recovery	45
Tabla 6-15: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 GR con un 40% de recovery	45
Tabla 6-16: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 SR con un 40% de recovery	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-2-1: Consumo operacional de agua por tecnologías de generación de electricidad térmicas y no térmicas (2)	3
Figura 2-2: Predicciones en 2015 del LCOE de diferentes expertos vs costes actuales y predicción (4)	4
Figura 2-3: Distribución del coste en capital para una instalación eólica en tierra típica (5)	4
Figura 2-4: Esquema detallado de los componentes del rotor y góndola. Pueden apreciarse los diferentes tipos de sensores y controladores que contribuyen en el funcionamiento eficiente del aerogenerador. (7)	5
Figura 2-5: Capacidad total instalada mundial, onshore y offshore, entre los principales impulsores. (9)	7
Figura 2-6: Evolución anual de la potencia total instalada y acumulada en España en MW (11).	7
Figura 2-7: Potencia eólica instalada por C.C.A.A en 2021 (14)	8
Figura 3-1: Curva típica del comportamiento de un aerogenerador (21)	12
Figura 3-2: Ubicación de los puntos meteorológicos seleccionados para este estudio ubicados en la península. De izquierda a derecha, Faro, Huelva y Cádiz. Elaboración propia a partir de Google Maps.	13
Figura 3-3: Ubicación de los puntos meteorológicos seleccionados para este estudio ubicados en la Isla de Gran Canaria y descritos anteriormente. Elaboración propia a partir de Google Maps.	13
Figura 3-4: Interfaz de Meteonorm con el ejemplo de Faro para la extracción de los datos correspondientes. Captura propia de la interfaz del software.	14
Figura 3-5: Parámetros y unidades de Meteonorm. Aquí se seleccionan las variables que interesan en este estudio. Captura propia de la interfaz del software.	14
Figura 3-6: Top 15 de fabricantes de aerogeneradores en el mercado global anual en 2021 (24).	15
Figura 3-7: Potencia generada por el modelo Gamesa G128/4500 en función de la velocidad del viento. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.	16
Figura 3-8: Potencia generada por el modelo Eno energy eno 126 3.5 en función de la velocidad del viento. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.	17
Figura 3-9: Potencia generada por el modelo Gamesa G132/3300 en función de la velocidad del viento. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.	18
Figura 3-10: Potencia generada por el modelo Vestas V105/3300 en función de la velocidad del viento. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.	20
Figura 3-11: Potencia generada por el modelo Vestas V112/3300 en función de la velocidad del viento. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.	20
Figura 3-12: Potencia generada por el modelo Vestas V126/3300 en función de la velocidad del viento. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.	20
Figura 3-13: Potencia generada por el modelo Enercon E-82 E2 2.300 en función de la velocidad del viento. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.	21
Figura 3-14: Potencia generada por el modelo Darwin Danwin 23/180 en función de la velocidad del viento. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.	22
Figura 4-1: Ejemplo de una extracción de Meteonorm de la ubicación Cádiz.	24
Figura 4-2: Captura del archivo 'Curvas Aerogeneradores.xlsx'.	25
Figura 4-3: Curva de potencia generada por Matlab con el ejemplo seleccionado	28
Figura 4-4: Distribución mensual de la potencia generada por el ejemplo seleccionado, extraída de Matlab.	

Figura 5-1: Precipitación acumulada (mm) desde el 1 de octubre de 2022 al 31 de marzo de 2023 (35).	32
Figura 5-2: Agua embalsada en España en referencia al total disponible en los embalses a fecha de mayo de 2023 (36).	33
Figura 5-3: Ubicación de las principales plantas desaladoras en servicio y en construcción en España en 2021 (38).	33
Figura 5-4: Situación de las principales desaladoras y desalobradoras andaluzas (2015) (40)	34
Figura 5-5: Consumo por provincia según el origen del agua a fecha 2015 (44).	34
Figura 5-6: Esquema del proceso de destilación multiefecto (46).	35
Figura 5-7: Esquema del proceso de destilación flas (47).	36
Figura 5-8: Esquema del proceso de destilación por compresión de vapor (48).	36
Figura 5-9: Proceso de filtrado de agua a través de la técnica de nanofiltración (50).	37
Figura 5-10: Esquema del proceso de desalinización por electrodiálisis (52).	37
Figura 5-11: Esquema de una planta de desalinización de agua de mar mediante ósmosis inversa (54).	38
Figura 6-1: Interfaz del software Q+. En zona circular se muestra donde modificar los parámetros de trabajo. Fuente: Q+ projection software (56).	41
Figura 6-2: Ventana para especificar las características del agua a tratar en el software Q+ (56)	41
Figura 6-3: Parámetros energéticos SEC y pF en función de la qF para los 3 tipos de recovery (50, 45, 40) para la membrana LG SW 440 ES	46
Figura 6-4: Parámetros energéticos sobre el consumo auxiliar de la membrana LG SW 440 ES. Se representa el qF analizado para cada valor de recovery estudiado: 50% verde, 45% azul, 40% rojo.	46
Figura 6-5: Parámetros de calidad del agua y riesgo de fouling para la membrana LG SW 440 ES	47
Figura 6-6: Parámetros energéticos SEC, %PW, pF en función de la qF para los 3 tipos de recovery (50, 45, 40) para la membrana LG SW 440 R	47
Figura 6-7: Parámetros energéticos sobre el consumo auxiliar de la membrana LG SW 440 R. Se representa el qF analizado para cada valor de recovery estudiado: 50% verde, 45% azul, 40% rojo.	48
Figura 6-8: Parámetros de calidad del agua y riesgo de fouling para la membrana LG SW 440 R	48
Figura 6-9: Parámetros energéticos SEC, %PW, pF en función de la qF para los 3 tipos de recovery (50, 45, 40) para la membrana LG SW 440 GR	49
Figura 6-10: Parámetros energéticos sobre el consumo auxiliar de la membrana LG SW 440 GR. Se representa el qF analizado para cada valor de recovery estudiado: 50% verde, 45% azul, 40% rojo.	49
Figura 6-11: Parámetros de calidad del agua y riesgo de fouling para la membrana LG SW 440 GR	50
Figura 6-12: Parámetros energéticos SEC, %PW, pF en función de la qF para los 3 tipos de recovery (50, 45, 40) para la membrana LG SW 440 SR	50
Figura 6-13: Parámetros energéticos sobre el consumo auxiliar de la membrana LG SW 440 SR. Se representa el qF analizado para cada valor de recovery estudiado: 50% verde, 45% azul, 40% rojo.	51
Figura 6-14: Parámetros de calidad del agua y riesgo de fouling para la membrana LG SW 440 SR	51
Figura 6-15: Zoom en la evolución del qF y %Pw al fijar una presión constante	52
Figura 6-16: Zoom en la evolución de la concentración de boro vs caudal pF de la membrana LG SW 440 SR. Aquí se establece el límite de 0.95 ppm para el boro y su correspondiente caudal	53
Figura 6-17: Valoración del límite de operación de la planta para cumplir la normativa de calidad descrita.	53
Figura 6-18: Evaluación del caudal qF en su correspondiente recovery	56

Figura 6-19: Distribución del permeado obtenido para las horas del mes de enero para este ejemplo en Cádiz
57

Figura 6-20: Divisiones necesarias del caudal q_F para cumplir con los límites de diseño. Se observa que 58

Figura 6-21: Distribución del permeado obtenido para las horas del mes de enero para Playa de Vargas (Gran
Canaria)
58

Notación

#DW	Número de errores de diseños que presenta el software Q+
% PW	Porcentaje de potencia de funcionamiento de la planta en referencia a su valor nominal
A	área barrida por el rotor de la turbina (m ²)
Bar	Unidad de medida de la presión
BP	Booster pump o bomba de apoyo
E	energía generada por el aerogenerador (J)
ERD	Pressure Exchanger energy recovery device o dispositivos de recuperación de energía
GW	Gigavatios
HPP	High pressure pump o bomba de alta presión
kW	Kilovatios
lmh	Unidades del Average flux o flujo medio
m ³ /h	metros cúbicos por hora
MED	Destilación multiefecto
mm	milímetros
MSF	Evaporación Instantánea Multietapa
MVC	Destilación por compresión de vapor
MW	Megavatios
NF	Nanofiltración
°C	Grados centígrados
OI	Ósmosis inversa
P	Potencia generada por el aerogenerador (W)
pF	Presion del caudal de entrada (bar)
pH	Medida del grado de acidez o alcalinidad de una sustancia o una solución

ppm	Partes por millón, medida de concentración
Pw	Potencia disponible en la planta (W)
Q+	Q+ Projection Software - para la estimación del rendimiento de membranas de desalinización
qC	Caudal de concentrado (m ³ /h)
qF	Caudal de entrada (m ³ /h)
qP	Caudal de producto o permeado (m ³ /h)
SEC	specific energy consumption o consumo específico de energía (kWh/m ³)
SW	Sea water o agua de mar
T ^a	Temperatura
TDS	Total dissolved solids o sólidos disueltos totales (ppm)
v	velocidad del viento (m/s)
ρ	Densidad del aire en la ubicación en la que se encuentra la turbina (kg/m ³)

1 INTRODUCCIÓN

LA necesidad de contar con un suministro de agua potable estable es una preocupación cada vez mayor, especialmente en zonas aisladas o áridas. La disponibilidad de agua es fundamental para abastecer a la población, la agricultura y la industria, lo que se traduce en crecimiento y evolución. Por ello se buscan soluciones que permitan asegurar dicho abastecimiento, siendo la desalinización de agua de mar unas de las tecnologías más usadas y eficaces, especialmente en zonas costeras.

Sin embargo, el alto consumo energético que conlleva el uso de esta tecnología, y la creciente concienciación en el uso adecuado de los recursos disponibles, promueven el interés en buscar soluciones más sostenibles para el medio ambiente, siendo las energías renovables las mejores posicionadas para esta tarea. Esto ha hecho que se impulse el uso de la energía eólica para dicha tecnología, y es su uso parte del objeto de estudio de este documento.

El auge de la desalinización de agua marina ha impulsado también el desarrollo de estas tecnologías, siendo la de filtración por membranas una de las más usadas, sobre la cual se profundiza en el documento.

De esta manera, el documento trata proveer de las herramientas necesarias para el estudio de una planta de desalinización asistida por energía eólica exclusivamente. La herramienta que se presenta en el informe trata de suministrar de manera sencilla y automatizada, datos de interés para seleccionar correctamente las membranas necesarias en un emplazamiento en concreto, que se apoye en un aerogenerador en particular.

Si bien el estudio no es exhaustivo, éste abre la puerta a futuras modificaciones sobre la herramienta, que permita no solo comparar diferentes equipos, ubicaciones y bastidores de membranas, si no también incluir diferentes aerogeneradores, crear una planta modelo, y obtener conclusiones cada vez más precisas y personalizadas.

2 SUBSISTEMA EÓLICO. DESCRIPCIÓN Y ESTADO ACTUAL

El subsistema eólico lo conforman los aerogeneradores, equipos que convierten energía eólica en energía eléctrica. La energía eólica tiene origen, como la mayoría de las energías renovables, en el Sol. Ésta irradia de manera continua la Tierra, calentando las masas de aire del globo y junto a la rotación terrestre genera desplazamientos de aire necesarios para mover las turbinas.

2.1 Descripción de la tecnología

La tecnología utilizada para generar energía eléctrica a partir de energía eólica consiste en utilizar turbinas eólicas, estructuras verticales con aspas que giran con el paso del viento en torno a un eje horizontal. Al hacerlo, las turbinas accionan generadores que producen electricidad. Ésta entonces, puede distribuirse mediante la red eléctrica a sus usuarios.

Esta forma de energía presenta varias ventajas. La más importante es que se trata de una forma de energía renovable y limpia, comparada con otras formas de generación basadas en combustibles fósiles, los cuales son principales contribuyentes de emisiones a la atmósfera y creación de gases de efecto invernadero. (1)

Por ello, la energía eólica es una opción atractiva en la reducción de emisiones y lucha contra el cambio climático, además al contrario que las plantas de potencia tradicionales, su uso de agua es nulo.

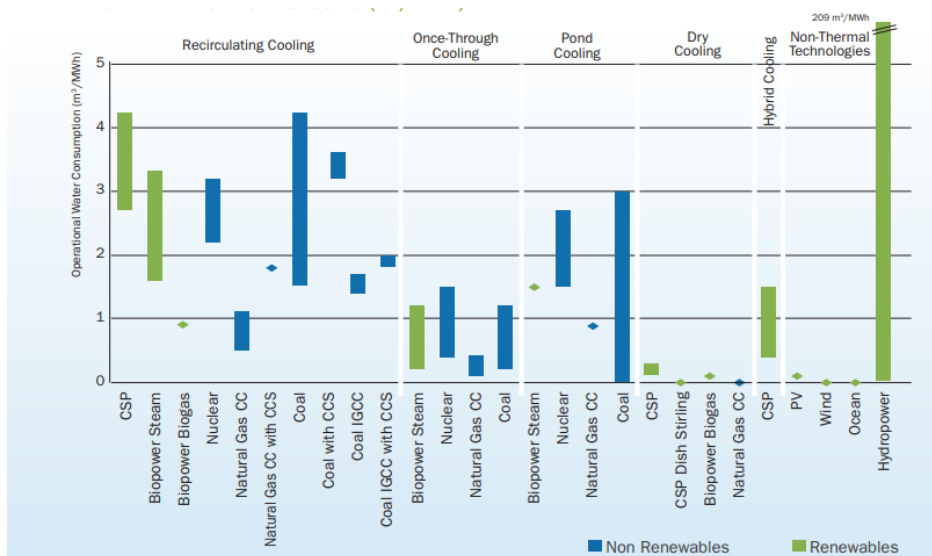


Figura 2-2-1: Consumo operacional de agua por tecnologías de generación de electricidad térmicas y no térmicas (2)

El coste de esta energía limpia es otra de sus ventajas, al no depender de otros combustibles o exportaciones, ésta se ha ido reduciendo significativamente los últimos años (3), haciéndola más competitiva en el mercado. Su flexibilidad es notable, ya que puede dimensionarse para proyectos de gran envergadura o para autoconsumo, así como en lugares remotos aislados de la red eléctrica, como para apoyo de la misma en parque eólicos.

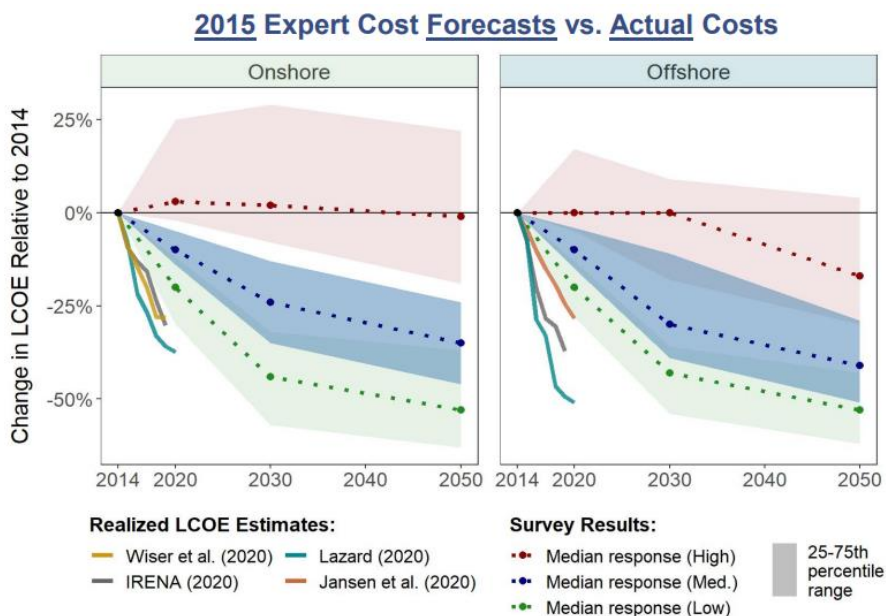


Figura 2-2: Predicciones en 2015 del LCOE de diferentes expertos vs costes actuales y predicción (4)

También cuenta con varias desventajas, entre las más notables son la dependencia meteorológica y su consiguiente intermitencia. El viento puede variar de una hora a otra, influenciado por el clima en un instante preciso, que es difícil de predecir con exactitud y constituye un reto el integrarlo a la red eléctrica con consistencia. Por otro lado, los impactos ambientales y la gran cantidad de área necesaria para su generación presentan otro punto negativo. Zonas protegidas de gran valor ambiental limitan su instalación, y aquella que permite su construcción y es adecuada, necesita de preparación y mantenimiento. La fauna puede verse afectada, especialmente las rutas migratorias, pero también las zonas pobladas por humanos, que de estar situadas cerca del parque eólico puede verse contaminada acústicamente. Y de nuevo el coste, aunque descendiente sigue siendo más caro que métodos tradicionales de generación de energía con combustibles fósiles, especialmente en instalaciones en alta mar con altos costes de capital.

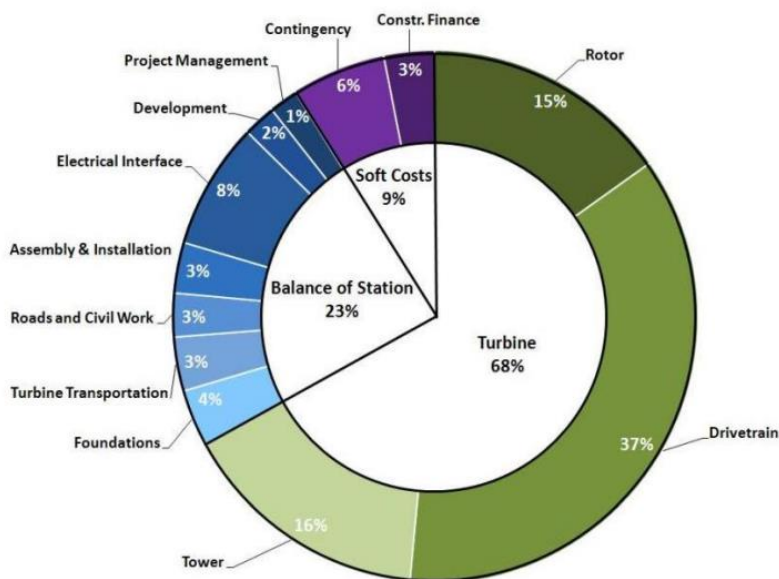


Figura 2-3: Distribución del coste en capital para una instalación eólica en tierra típica (5)

2.2 Descripción del subsistema eólico

Los aerogeneradores integran este sistema, los cuales están conformados por:

2.2.1 Rotor

Normalmente consta de 2 o 3 palas unidas en el buje, la parte que rota y captura la energía cinética del viento para luego ser transformada en electricidad. Está conectado a la caja de engranajes en el interior de la góndola, la cual aumenta el ratio de giro y alimenta el generador de electricidad.

La forma de las palas y buje es tal que maximizan la captura de la energía del viento. Las palas se fabrican de materiales ligeros como fibra de vidrio o de carbono y la longitud de las mismas depende del tamaño del aerogenerador, siendo el radio del mismo un factor importante para determinar la potencia generada por la turbina. Además, para mantener la rotación a velocidad constante el rotor puede girar mediante un mecanismo de orientación de manera que encare al viento, y las aspas pueden variar también su ángulo de paso respecto a éste (6). El correcto diseño y los materiales elegidos para el rotor desempeñan un papel clave a la hora de definir la eficiencia y energía generada.

2.2.2 Góndola

Es la carcasa que encierra los componentes mecánicos del aerogenerador y provee de protección a los mismos frente a los elementos. También permite el acceso para su mantenimiento y reparación, esencial para el correcto funcionamiento de la turbina en su vida útil.

Dentro se encuentra la mencionada caja de engranajes o caja de cambio. También el generador conectado a ésta, encargado de la transformación de la energía cinética del rotor en energía eléctrica. Asimismo, el sistema de control, orientación y conexión con la red eléctrica, se encuentran dentro de la góndola, junto con los controladores y sensores que alimentan de información a los sistemas. El sistema de refrigeración se encarga de mantener todo ello a las temperaturas adecuadas para su funcionamiento.

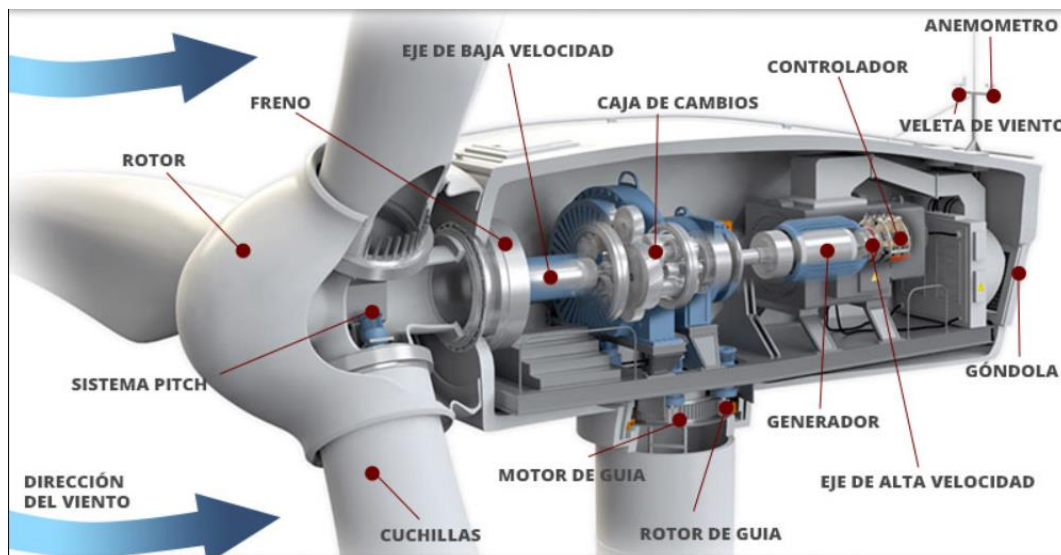


Figura 2-4: Esquema detallado de los componentes del rotor y góndola. Pueden apreciarse los diferentes tipos de sensores y controladores que contribuyen en el funcionamiento eficiente del aerogenerador. (7)

2.2.3 Torre

Encargada de dar soporte al rotor y góndola y por la cual se accede a esta última mediante un sistema de escaleras o ascensores. Normalmente está fabricada en acero u hormigón, materiales resistentes para soportar tanto el peso del aerogenerador como la fuerza del viento. Para las aplicaciones de este estudio, no se usan torres tensadas mediante líneas, si no que se alzan sobre ellas mismas sin apoyos.

La torre es una parte esencial en el diseño de un aerogenerador, a mayor altura mejor será el rendimiento de éste, donde los vientos son más fuertes y la energía generada mayor, pero tiene un impacto en el coste, por lo que su

diseño es crucial ya que puede suponer hasta el 20% del coste total del aerogenerador.

2.3 Descripción de la potencia generada por el aerogenerador.

Para el cálculo de la potencia generada por una turbina eólica, se usa el llamado coeficiente de Betz, y la fórmula se define como:

Ecuación 2-1: Potencia generada por un aerogenerador

$$P = \frac{1}{2} v^3 \rho A$$

donde:

ρ define la densidad del aire en la ubicación en la que se encuentra la turbina (kg/m^3).

A representa el área barrida por el rotor de la turbina (m^2).

v es la velocidad del viento en la ubicación en la que se encuentra la turbina (m/s)

Mientras que la potencia descrita es teórica, la generada realmente por el aerogenerador viene condicionada por diferentes factores como son la eficiencia de la turbina, la dirección y turbulencia del viento, altitud, además de otros factores atmosféricos como temperatura y humedad del ambiente.

Como se puede observar, el tamaño de la turbina es también un factor influyente. Una turbina pequeña presenta tanto ventajas como desventajas frente a una de mayor tamaño.

Entre las ventajas destacan que la inversión de capital inicial es menor debido al tamaño de éstas. También el mantenimiento es más sencillo ya que son más fáciles de mantener y reparar debido a su tamaño y simplicidad de diseño. Además, una turbina pequeña tiene un impacto ambiental menor y poseen cierta flexibilidad a la hora de adaptarse mejor a las condiciones específicas del lugar de instalación.

Por otro lado, una turbina pequeña tiene una menor capacidad de generación de energía, afectando directamente a su eficiencia debido a su tamaño y diseño. Por lo cual es preferible un aerogenerador de mayor tamaño para tomando estas consideraciones.

En el diseño del aerogenerador, cabe destacar que el límite de Betz establece el máximo aprovechamiento de la potencia del viento en el aerogenerador, siendo este teóricamente del 59.3%. En la práctica, las turbinas alcanzan el 50% (8). Este límite es un fenómeno que ocurre en los aerogeneradores cuando éste sufre velocidades de viento elevadas, punto en el cual un aerogenerador comienza a perder eficiencia y pueden incluso sufrir daños. A estas velocidades las palas del rotor pueden experimentar cargas aerodinámicas extremas, lo que puede hacer que la estructura del aerogenerador se sobrecargue y se deforme. Si la velocidad del viento sigue aumentando, las palas pueden comenzar a oscilar y vibrar, lo que puede resultar en una falla catastrófica de las mismas. Para evitar este fenómeno es importante diseñar la estructura y las palas del rotor para soportar las cargas aerodinámicas a velocidades de viento más altas, así como implementar el mencionado sistema de control para limitar la velocidad del rotor en situaciones de viento extremo.

2.4 Estado actual

Actualmente, la capacidad total instalada a nivel mundial (2021) es de 837 GW combinando instalaciones onshore y offshore, siendo Asia el mayor impulsor:

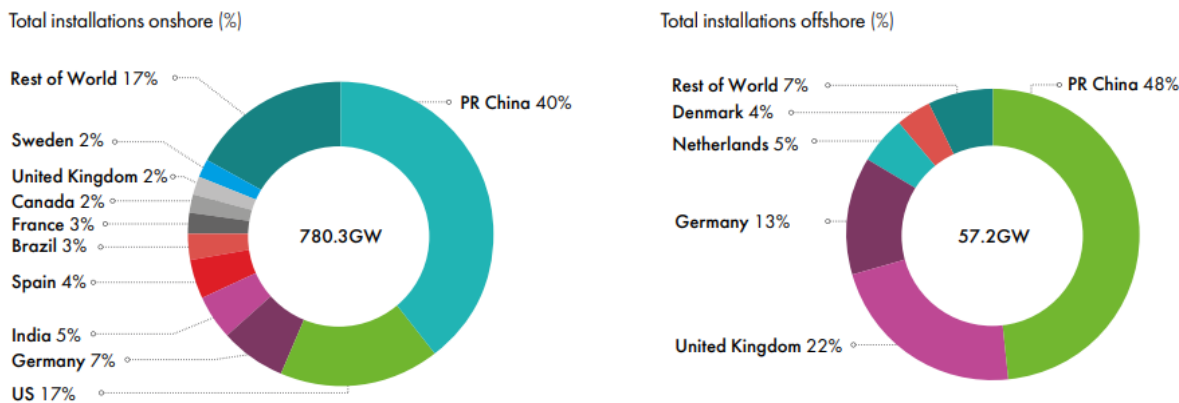


Figura 2-5: Capacidad total instalada mundial, onshore y offshore, entre los principales impulsores. (9)

Respecto a los países que cuentan con mayor capacidad, los 4 mayores son: China (200 GW), EE UU (163 GW), Alemania (74 GW) e India (35 GW).

Por su parte, en 2021 España cierra con 28 GW de capacidad instalada, ocupando el segundo lugar a nivel europeo, siendo la energía eólica el 23% de su suministro energético. Aun así, como se observa en la siguiente gráfica, desde 2020 España se encuentra en un proceso descendente en cuanto a nuevas instalaciones, situándose en la media europea (10).

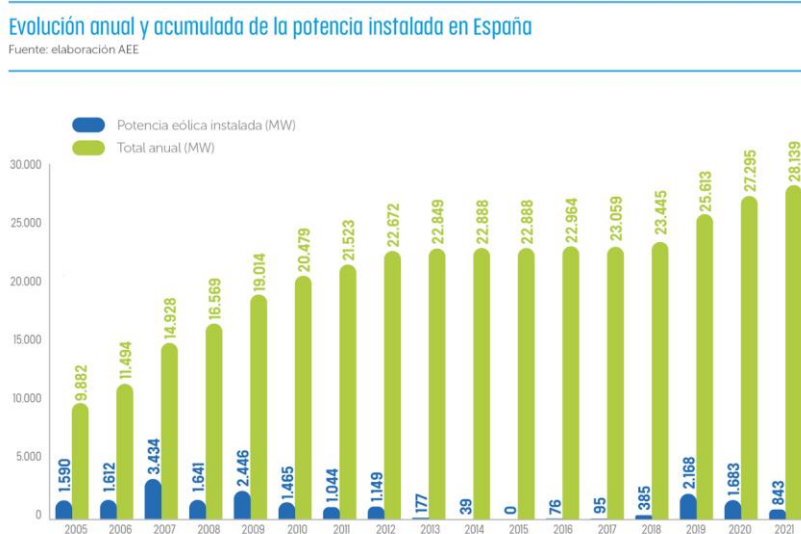


Figura 2-6: Evolución anual de la potencia total instalada y acumulada en España en MW (11).

Así mismo, Andalucía se encuentra en quinta posición con 3.5 GW divididos en 157 parques eólicos:

Tabla 2-1: Distribución por provincias de la capacidad acumulada en Andalucía (MW) a fecha 30 de junio de 2022 (12)

Potencia instalada	Eólica (MW)
ALMERIA	511

CADIZ	1396
CORDOBA	
GRANADA	406
HUELVA	427
JAEN	15
MALAGA	643
SEVILLA	136
TOTAL ANDALUCIA	3534

Cabe destacar también la situación de Canarias siendo un emplazamiento objetivo del presente documento. A cierre de 2021 cuenta con 557 MW instalados, representando un 16,2% (13) de su mix energético.

CCAA	POTENCIA INSTALADA 2021 (MW)	POTENCIA ACUMULADA A CIERRE 2021 (MW)	CUOTA DE MERCADO SOBRE EL ACUMULADO (%)	TOTAL PPEE
Castilla y León	155,45	6.404,43	23%	272
Aragón	275,66	4.435,44	16%	176
Castilla La Mancha	68,7	3.954,84	14%	151
Galicia	68,9	3.866,64	14%	182
Andalucía	43,5	3.521,95	13%	163
Navarra	0	1.302,80	5%	58
Cataluña	0	1.271,20	5%	47
Comunidad Valenciana	0	1.238,78	4%	39
Asturias	126	645,45	2%	25
Canarias	104,4	557,82	2%	100
La Rioja	0	446,62	2%	14
Murcia	0	261,96	1%	14
País Vasco	0	153,25	1%	7
Extremadura	0	39,38	0%	1
Cantabria	0	35,30	0%	3
Baleares	0	3,68	0%	46
TOTAL	842,61	28.139,51		1.298

Figura 2-7: Potencia eólica instalada por C.C.A.A en 2021 (14)

Actualmente España no posee parques offshore (15) aunque el primero cuenta con poder construirse en Gran Canaria (16), y se prevé una capacidad de 50 GW de potencia eólica instalada offshore para 2030 a nivel nacional (17).

Los principales fabricantes de aerogeneradores son Siemens Gamesa, con un 53% de cuota de mercado, seguidos con amplio margen por Vestas y GE, con un 17% cada una (18).

2.5 Aplicación a la desalinización de agua marina

En el contexto de este estudio, la energía eólica puede usarse en procesos de desalinización de agua, siendo éste típicamente un proceso de gran intensidad energética. La energía eólica provee de potencia las bombas que mueven el agua a través de las membranas del sistema de desalinización. Otro enfoque es usar los aerogeneradores para producir electricidad, que juntamente con otras formas de producción de energía (renovables o no), provean la planta de energía de manera consistente y segura para que funcione con normalidad. Bien para usarse como descrita anteriormente o bien para desalinización térmica (19). Este documento se centra en el primer caso, generando la energía necesaria para el funcionamiento de los equipos de bombeo, tanto de las bombas de alta presión, encargadas de hacer pasar el agua marina por las membranas en el proceso de ósmosis inversa, como el del sistema de bombas que hacen circular el agua en los procesos de este. Cabe mencionar también su uso para alimentar el sistema de control y monitoreo de la planta.

Las ventajas son las ya descritas a favor de la energía eólica, pero en el caso de su aplicación de desalinización son notables (20), como la reducción de coste del proceso de desalinización: debido al gran uso de energía requerido para llevar a cabo el funcionamiento de la planta, el uso de energía eólica ayuda a abaratar el proceso. Además de la posibilidad de actuar en zonas alejadas de la red eléctrica. Zonas con menos recursos o bien con dificultad de acceso a la red pueden generar agua potable de manera autosuficiente gracias al uso de energía renovables aplicadas localmente a la planta desalinizadora.

Por ello, el uso y desarrollo de esta tecnología se presenta interesante en los años venideros, cuando la eficiencia de los aerogeneradores en conjunción con las plantas mejores, y el proceso se abarate haciéndose más atractivo y accesible a más cada vez más emplazamientos.

3 DATOS DEL VIENTO Y AEROGENERADORES

3.1 Análisis de los datos del viento y representación de la curva del Aerogenerador

El objetivo de la sección se centra en crear una herramienta automatizada para la generación de información sobre la potencia que genera una turbina dados unos datos meteorológicos en una localización concreta.

Como se ha descrito con anterioridad, para calcular la energía suministrada por el viento en la unidad de tiempo, se necesita conocer la velocidad del viento y el área transversal que atraviesa. Por lo tanto, la fórmula sería:

$$E = 1/2 * \rho * A * V^3$$

Donde:

E es la energía suministrada por el viento (J).

ρ es la densidad del aire (kg/m³).

A es el área transversal que atraviesa el viento al paso por las hélices (m²).

V es la velocidad del viento (m/s).

Para calcular la potencia generada por un aerogenerador se utiliza:

$$P = C_p * 1/2 * \rho * A * V^3$$

Donde:

C_p es el coeficiente de potencia del aerogenerador dependiente de su diseño y eficiencia, adimensional.

Para calcular la energía que produce un aerogenerador conocida su potencia, se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$E = P * t$$

Donde:

t es el tiempo en segundos u horas sobre el que calcular la energía generada.

La curva de potencia del aerogenerador representa la relación entre la velocidad del viento y la potencia eléctrica generada por el aerogenerador. En este caso se trata de un aerogenerador de 600 kW en su punto nominal de funcionamiento, cuando la velocidad del viento es de 15 m/s.

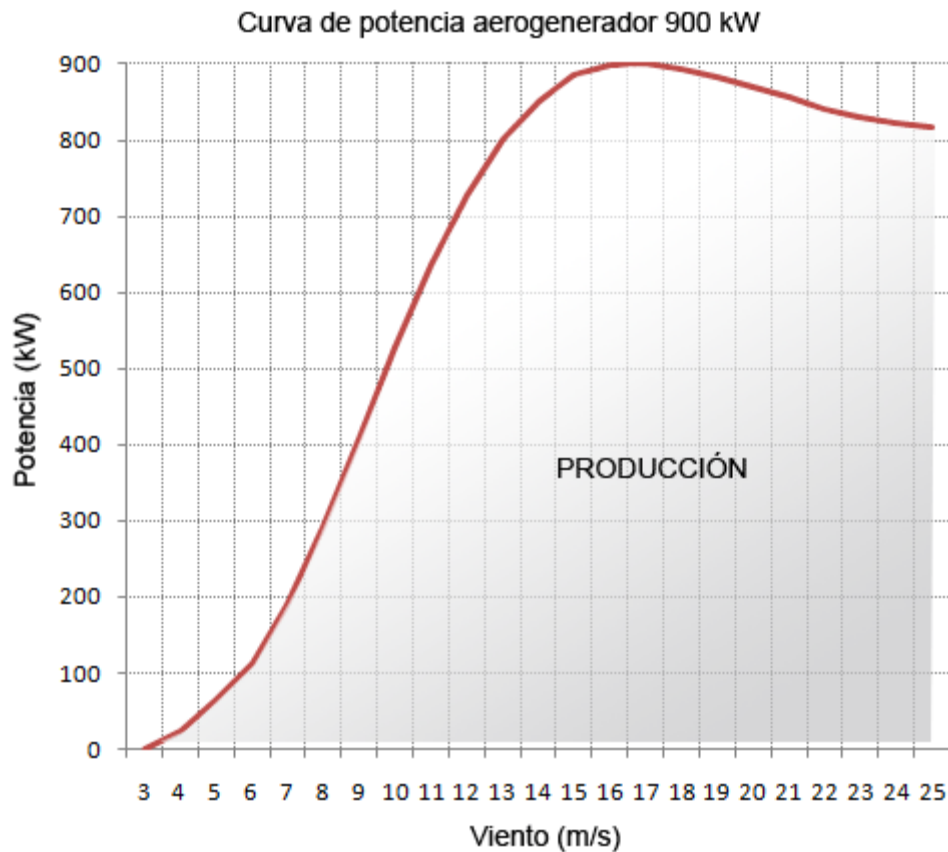


Figura 3-1: Curva típica del comportamiento de un aerogenerador (21)

Para este estudio se valoran una serie de aerogeneradores de distintos fabricantes y potencias con los datos de viento de varias localizaciones, con el objetivo de analizar las diferencias y sacar conclusiones.

3.1.1 Datos del viento por ubicación de estudio

Para obtener los datos del viento, se usa el software '*Meteonorm*'. Es una herramienta que se utiliza para obtener datos climáticos a partir de mediciones meteorológicas y modelos climáticos de diferentes fuentes de datos. Esta herramienta proporciona información sobre diferentes parámetros climáticos, incluyendo la velocidad del viento. Lo hace en diferentes formatos, como promedios anuales, mensuales o diarios, así como información detallada sobre la variabilidad del viento a lo largo del tiempo. Además, el software proporciona información sobre la distribución de la velocidad del viento (entre otras variables), lo que la convierte en una herramienta muy valiosa para este estudio.

Del mismo se seleccionan diferentes localizaciones situadas en el Océano Atlántico para crear la base de datos:

- Cádiz (España)
- Huelva (España)
- Faro (Portugal)
- Puesto de Sardina (Gran Canaria) - Noroeste
- Las Palmas de Gran Canaria - Noreste
- Playa de Vargas (Gran Canaria) - Sureste
- Playa de Mogán (Gran Canaria) – Suroeste

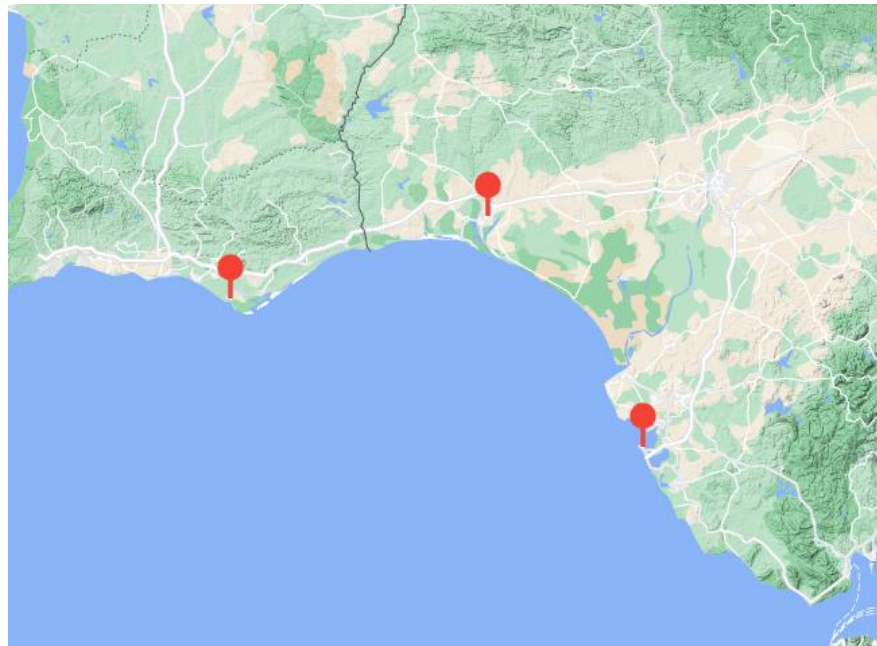


Figura 3-2: Ubicación de los puntos meteorológicos seleccionados para este estudio ubicados en la península. De izquierda a derecha, Faro, Huelva y Cádiz. Elaboración propia a partir de Google Maps.

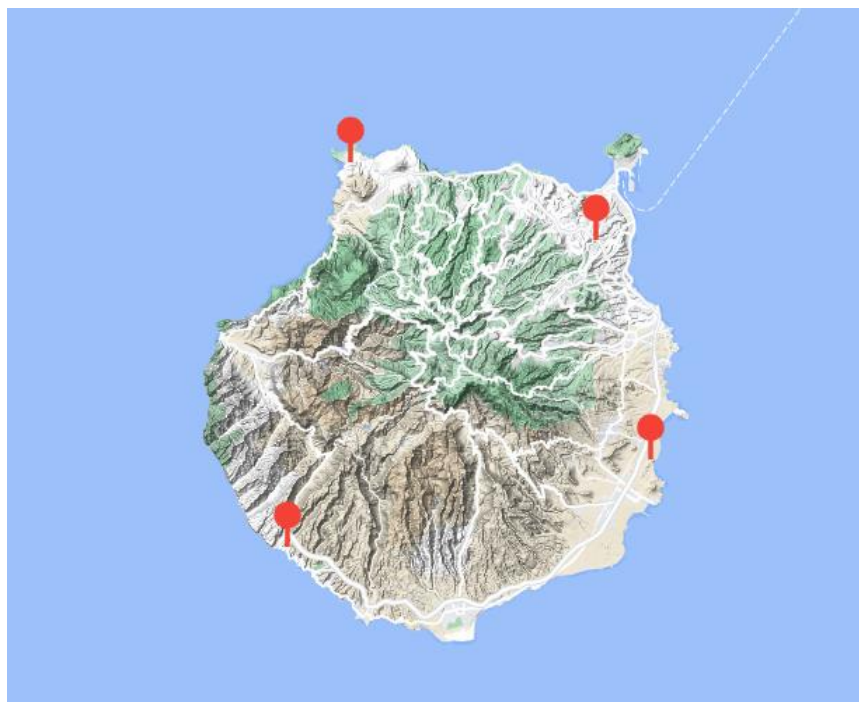


Figura 3-3: Ubicación de los puntos meteorológicos seleccionados para este estudio ubicados en la Isla de Gran Canaria y descritos anteriormente. Elaboración propia a partir de Google Maps.

Estos puntos resultan de especial interés de estudio. Muchas regiones sufren de escasez de agua dulce, y la desalinización respaldada por energía renovable puede ser una solución para obtener agua potable. En el caso de Canarias o el sur de la Península Ibérica, estas regiones tienen un clima árido / semiárido, con recursos hídricos limitados, por lo que la desalinización podría ser una opción viable para abastecer a la población (22). Además, el uso de energía eólica reduciría así la dependencia de combustibles fósiles (la mayoría importados) y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Otro punto favorable son las condiciones climáticas favorables del Atlántico para la generación de energía eólica,

con vientos constantes y fuertes en muchas áreas (23).

Por ello, el estudio y comparación de las diferentes localizaciones resulta interesante.

Introduciendo estas las ubicaciones se extraen los datos del software Meteonorm, con una correspondencia horaria para cada variable de salida. Esto permite disponer de 8760 valores (uno por cada hora del año) para cada variable.

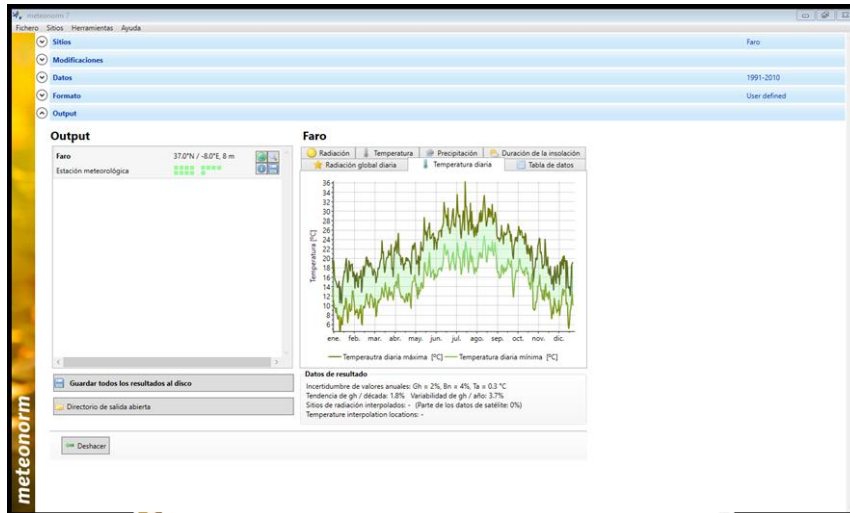


Figura 3-4: Interfaz de Meteonorm con el ejemplo de Faro para la extracción de los datos correspondientes. Captura propia de la interfaz del software.

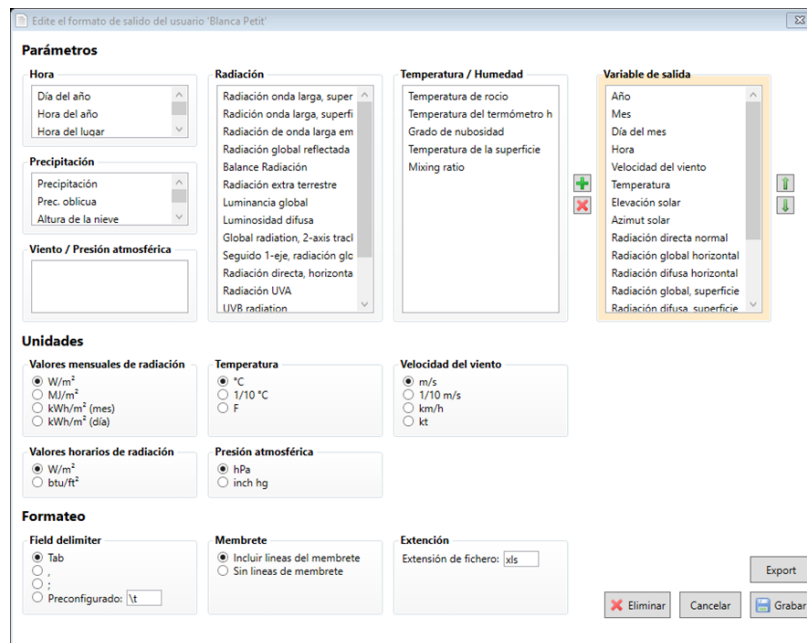
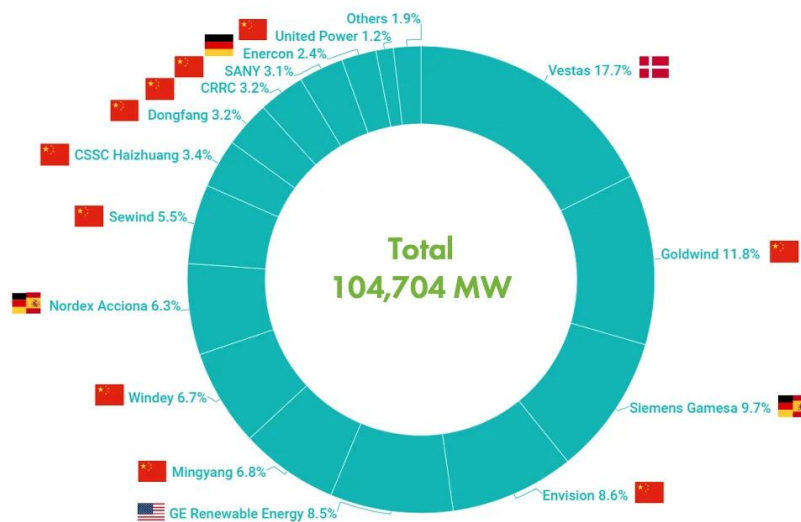


Figura 3-5: Parámetros y unidades de Meteonorm. Aquí se seleccionan las variables que interesan en este estudio. Captura propia de la interfaz del software.

3.1.2 Datos de los aerogeneradores

Para el estudio de los aerogeneradores se seleccionan de distintas potencias y fabricantes, con el objetivo de

obtener una amplia muestra de la que poder sacar conclusiones y datos. Dentro de los fabricantes más importantes (Según el Global Wind Energy Council) destacan Vestas, Goldwind y Siemens Gamesa Renewable Energy las cuales conforman a fecha de 2022 el 39% del total del mercado de proveedores de aerogeneradores a nivel mundial.



Source: GWEC Market Intelligence, May 2022

Figura 3-6: Top 15 de fabricantes de aerogeneradores en el mercado global anual en 2021 (24).

De ellos se seleccionan varios modelos de Vestas y Gamesa, ambos fabricantes europeos que cuentan con una amplia gama de aerogeneradores onshore para todo tipo de emplazamientos. Además de otros modelos de Enercon, Eno y Danwin.

3.1.2.1 Selección de los aerogeneradores para este estudio

Los modelos elegidos para este proyecto parten de Aerogeneradores de gran potencia (4.5 MW) hasta pequeñas turbinas de 180 KW. Además, se analiza un mismo modelo de Vestas-Gamesa de 3.3 MW con diferentes configuraciones dependiendo de los vientos a los que se someten. A continuación, se presentan con detallada información procedente de www.thewindpower.net (25) cada uno de los modelos, de mayor a menor potencia, junto a la curva de potencia elaborada a partir de estos datos:

Tabla 3-1: Tabla datos generales del aerogenerador Gamesa G128-4.5MW. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.

Datos generales
Fabricante: Gamesa (España)
Turbina eólica: G128/4500
Potencia: 4 500 kW
Diámetro: 128 m
Modelo antiguo
Clase de viento: IEC IIa
Compatible offshore: no
Área de barrido: 12 868 m ²
Densidad de potencia: 2.86 m ² /kW
Número de palas: 3
Limitación de potencia: Pitch
Puesta en servicio: 2009
Masas
Masa del rotor: 83,9 toneladas
Rotor
Velocidad máxima del rotor: 12 vuelta/min
Velocidad mínima de viento: 2 m/s
Velocidad nominal de viento: 12,5 m/s
Velocidad máxima de viento: 27 m/s
Fabricante: Gamesa
Caja de cambios
Caja de cambios: Si
Niveles: 2
Ratio 37,88
Generador
Tipo: PM
Número: 1
Velocidad de salida máxima del generador: 448 vuelta/min
Tensión de salida: 690 V
Fabricante: Gamesa
Torre
Altura mínima de la góndola: 81 m
Altura máxima de la góndola: 140 m

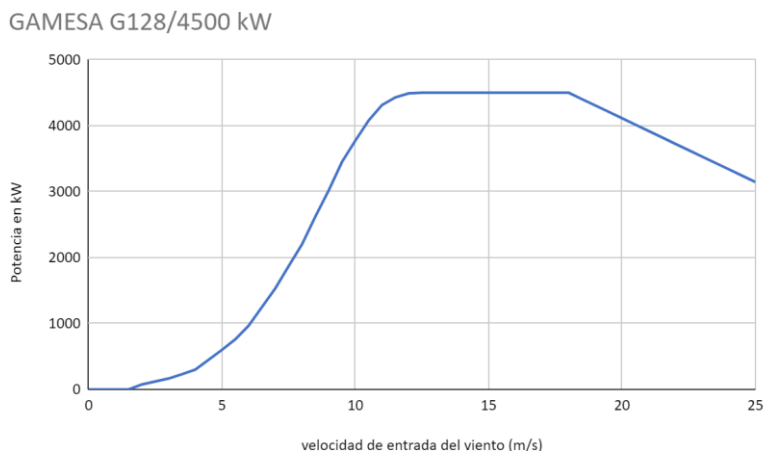


Figura 3-7: Potencia generada por el modelo Gamesa G128/4500 en función de la velocidad del viento. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.

Tabla 3-2: Tabla datos generales del aerogenerador Eno energy eno 126 3.5. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.

Datos generales
Fabricante: e.n.o. energy (Alemania)
Turbina eólica: 126 3.5 MW
Potencia: 3 500 kW
Diámetro: 126 m
Clase de viento: IEC IIIs (DIBt WZ3/4)
Compatible offshore: no
Área de barrido: 12 469 m ²
Densidad de potencia: 3.57 m ² /kW
Número de palas: 3
Limitación de potencia: Pitch
Rotor
Velocidad mínima del rotor: 4 vuelta/min
Velocidad máxima del rotor: 11,2 vuelta/min
velocidad mínima de viento: 3 m/s
velocidad nominal de viento: 10,5 m/s
velocidad máxima de viento: 25 m/s
Fabricante: LM Glasfiber
Caja de cambios
Caja de cambios: Si
Ratio 119
Generador
Tipo: SYNC
Número: 1
Tensión de salida: 690 V
Torre
Altura mínima de la góndola: 97 m
Altura máxima de la góndola: 137 m

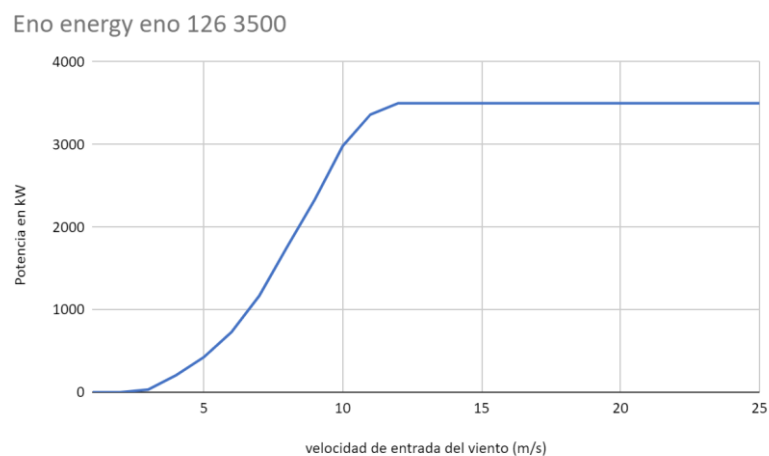


Figura 3-8: Potencia generada por el modelo Eno energy eno 126 3.5 en función de la velocidad del viento. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.

Tabla 3-3: Tabla datos generales del aerogenerador Gamesa G132/3300. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.

Datos generales
Fabricante: Gamesa (España)
Turbina eólica: G132/3300
Potencia: 3 300 kW
Diámetro: 132 m
Modelo antiguo
Clase de viento: IEC IIa
Compatible offshore: no
Área de barrido: 13 685 m ²
Densidad de potencia: 4.15 m ² /kW
Número de palas: 3
Limitación de potencia: Pitch
Puesta en servicio: 2015
Rotor
Velocidad mínima del rotor: 6,82 vuelta/min
Velocidad máxima del rotor: 10,9 vuelta/min
velocidad mínima de viento: 2 m/s
velocidad nominal de viento: 11 m/s
velocidad máxima de viento: 25 m/s
Fabricante: Gamesa
Caja de cambios
Caja de cambios: Si
Niveles: 3
Ratio 103
Generador
Tipo: DFIG
Número: 1
Velocidad de salida máxima del generador: 1120 vuelta/min
Tensión de salida: 690 V
Torre
Altura mínima de la góndola: 84 m
Altura máxima de la góndola: 134 m

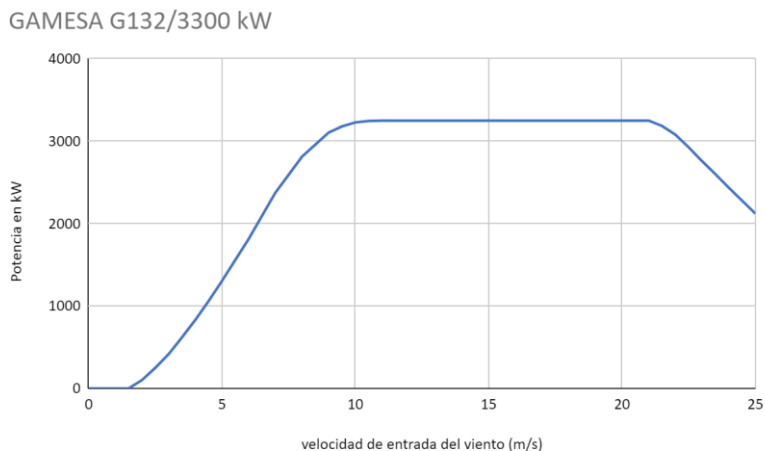


Figura 3-9: Potencia generada por el modelo Gamesa G132/3300 en función de la velocidad del viento. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.

Tabla 3-4: Tabla datos generales de los aerogeneradores Vestas de 3.3 MW para bajas, medias y altas velocidades de viento respectivamente. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.

Datos generales		
Fabricante: Vestas (Danemark)	Fabricante: Vestas (Danemark)	Fabricante: Vestas (Danemark)
Turbina eólica: V105/3300	Turbina eólica: V112/3300	Turbina eólica: V126/3300
Potencia: 3 300 kW	Potencia: 3 300 kW	Potencia: 3 300 kW
Diámetro: 105 m	Diámetro: 112 m	Diámetro: 126 m
Modelo antiguo	Modelo antiguo	Modelo antiguo
Clase de viento: IEC Ia	Clase de viento: IEC Ib/IIa	Clase de viento: IEC IIIa
Compatible offshore: no	Compatible offshore: si	Compatible offshore: no
Área de barrido: 8 659 m ²	Área de barrido: 9 852 m ²	Área de barrido: 12 469 m ²
Densidad de potencia: 2.63 m ² /kW	Densidad de potencia: 2.99 m ² /kW	Densidad de potencia: 3.78 m ² /kW
Número de palas: 3	Número de palas: 3	Número de palas: 3
Limitación de potencia: Pitch	Limitación de potencia: Pitch	Limitación de potencia: Pitch
Puesta en servicio: 2013	Puesta en servicio: 2013	Puesta en servicio: 2013
Rotor		
velocidad mínima de viento: 3,5 m/s	Velocidad mínima del rotor: 6,2 vuelta/min	velocidad mínima de viento: 2,5 m/s
velocidad nominal de viento: 14 m/s	Velocidad máxima del rotor: 17,7 vuelta/min	velocidad nominal de viento: 12 m/s
velocidad máxima de viento: 25 m/s	velocidad mínima de viento: 2,5 m/s	velocidad máxima de viento: 22 m/s
	velocidad nominal de viento: 14 m/s	
	velocidad máxima de viento: 25 m/s	
Caja de cambios		
Caja de cambios: Si	Caja de cambios: Si	Caja de cambios: Si
Niveles: 3	Niveles: 3	Niveles: 3
	Ratio 94,4	
Generador		
	Velocidad de salida máxima del generador: 1550 vuelta/min	Número: 1
	Tensión de salida: 650 V	
Torre		
	Altura mínima de la góndola: 84 m	Altura mínima de la góndola: 117 m
	Altura máxima de la góndola: 140 m	Altura máxima de la góndola: 137 m

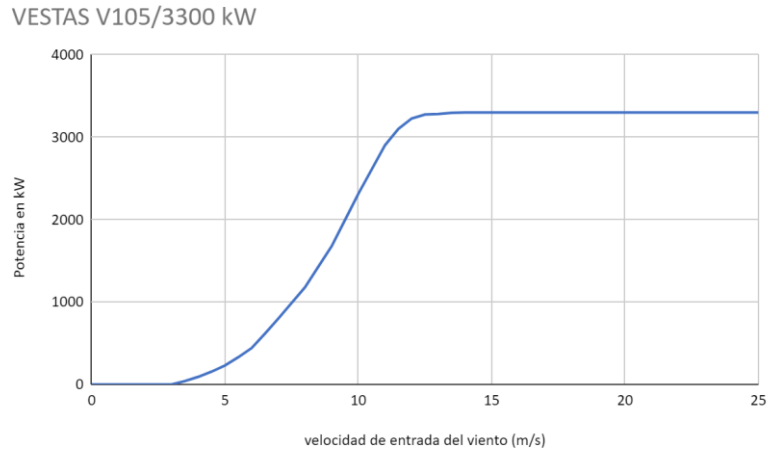


Figura 3-10: Potencia generada por el modelo Vestas V105/3300 en función de la velocidad del viento. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.

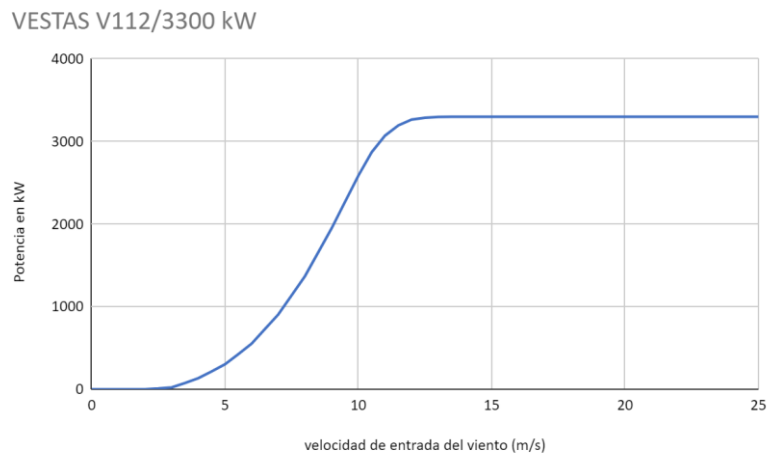


Figura 3-11: Potencia generada por el modelo Vestas V112/3300 en función de la velocidad del viento. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.

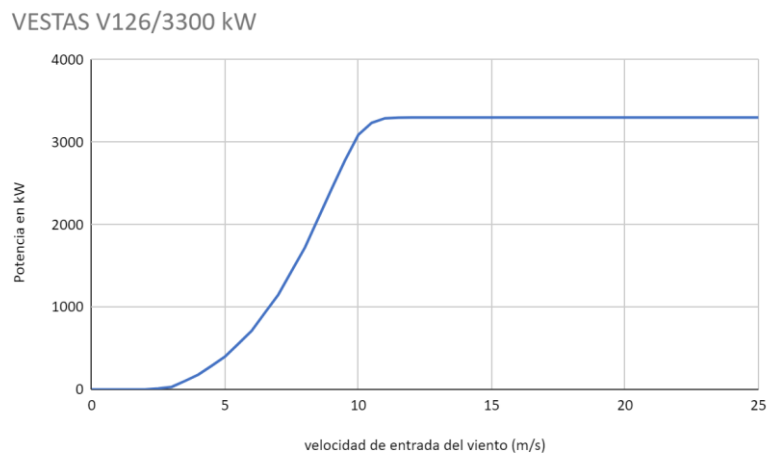


Figura 3-12: Potencia generada por el modelo Vestas V126/3300 en función de la velocidad del viento. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.

Tabla 3-5: Tabla datos generales del aerogenerador Enercon E-82 E2 2.300. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.

Datos generales	
Fabricante: Enercon (Alemania)	
Turbina eólica: E82/2300	
Potencia: 2 300 kW	
Diámetro: 82 m	
Clase de viento: IEC/NVN IIA (WZ III)	
Compatible offshore: no	
Área de barrido: 5 281 m ²	
Densidad de potencia: 2.3 m ² /kW	
Número de palas: 3	
Limitación de potencia: Pitch	
Puesta en servicio: 2009	
Masas	
Masa del rotor: 55 toneladas	
Rotor	
Velocidad mínima del rotor: 6 vuelta/min	
Velocidad máxima del rotor: 18 vuelta/min	
velocidad mínima de viento: 2 m/s	
velocidad nominal de viento: 14 m/s	
velocidad máxima de viento: 25 m/s	
Fabricante: Enercon	
Caja de cambios	
Caja de cambios: No	
Niveles: -	
Ratio -	
Fabricante: -	
Generador	
Tipo: SYNC Wounded	
Número: 1	
Velocidad de salida máxima del generador: 18 vuelta/min	
Tensión de salida: 690 V	
Fabricante: Enercon	
Torre	
Altura mínima de la góndola: 78 m	
Altura máxima de la góndola: 138 m	
Fabricante: Enercon	

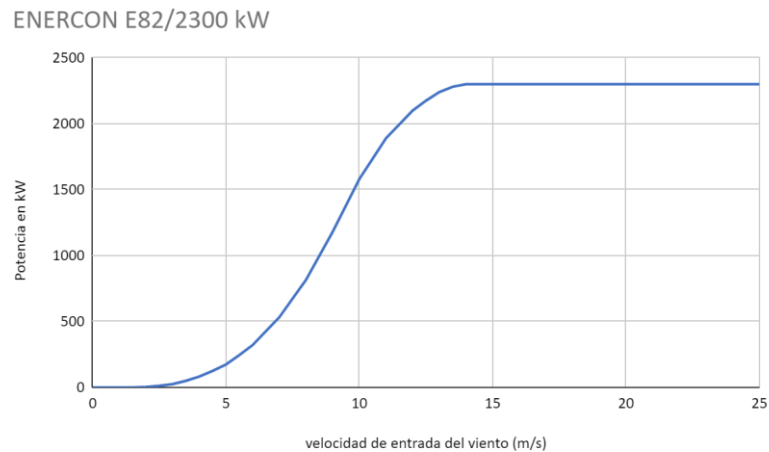


Figura 3-13: Potencia generada por el modelo Enercon E-82 E2 2.300 en función de la velocidad del viento. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.

Tabla 3-6: Tabla datos generales del aerogenerador Danwin 23/180. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.

Fabricante: Danwin (Dinamarca)
Turbina eólica: 23/180
Potencia: 180 kW
Diámetro: 23.2 m
Modelo antiguo
Compatible offshore: no
Área de barrido: 423 m ²
Densidad de potencia: 2.35 m ² /kW
Número de palas: 3
Limitación de potencia: Stall
Rotor
Velocidad mínima del rotor: 28,8 vuelta/min
Velocidad máxima del rotor: 43,2 vuelta/min
velocidad mínima de viento: 3,5 m/s
velocidad nominal de viento: 15 m/s
velocidad máxima de viento: 25 m/s
Caja de cambios
Caja de cambios: Si
Ratio 34,8
Generador
Tipo: ASYNC
Velocidad de salida máxima del generador: 1500 vuelta/min
Torre
Altura mínima de la góndola: 25 m
Altura máxima de la góndola: 30 m

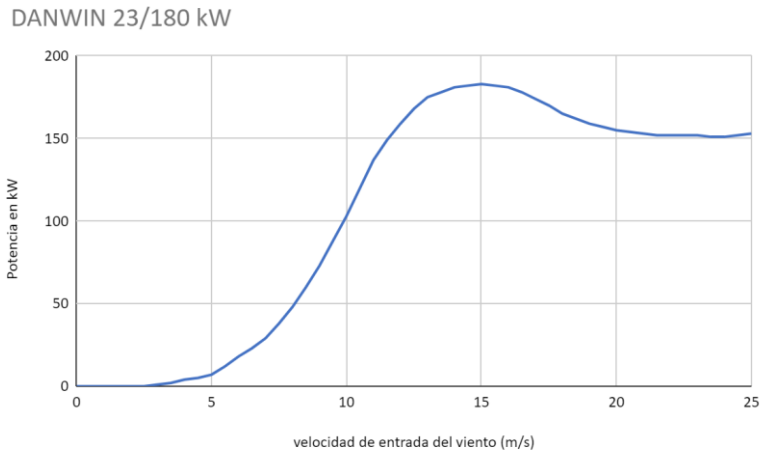


Figura 3-14: Potencia generada por el modelo Darwin Danwin 23/180 en función de la velocidad del viento. Elaboración propia a partir de los datos de thewindpower.net.

4 DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA PARA EL SISTEMA EÓLICO

4.1 Introducción a la herramienta

En este capítulo se presenta una herramienta de cálculo de la potencia generada por un aerogenerador. La herramienta utiliza un modelo de cálculo basado en los datos del viento de cualquier ubicación y las curvas de potencia de un aerogenerador dado. Se basa en una serie de scripts de Matlab que permiten el análisis de cualquier ubicación y aerogenerador siempre que se facilite con el formato correcto. En ésta se introducen los datos y con ello se obtienen los valores de salida referentes a la potencia generada dada una ubicación en un instante del año. El objetivo es automatizar la herramienta para que partiendo de una base de datos de ubicaciones y aerogeneradores se obtengan los debidos resultados que permitan comparar y extraer conclusiones en el estudio completo.

Para su simplificación, se toman los datos del viento y no se tiene en cuenta la dirección de éste, longitudinal y latitudinal.

Para los aerogeneradores las curvas provienen de los propios fabricantes obtenidas mediante análisis de laboratorio y no en condiciones reales.

Respecto a la metodología, a continuación se detalla el procedimiento de obtención de los datos meteorológicos, así como su inclusión a la herramienta y los scripts creados para la obtención de los resultados objetivos de esta parte del estudio.

4.2 Gestión de los datos del viento

Como ya se ha visto anteriormente, la información del viento se obtiene de la herramienta Meteonorm. De ella se extraen los datos meteorológicos de las siete ubicaciones participantes de este estudio. Los datos provienen de manera horaria, por lo que se tienen un total de 8760 puntos que evaluar, uno por cada hora del año.

	y	m	dm	h	FF	Ta	hs	Az	G_Bn	G_Gh	G_Dh	G_Gk	G
4	2005	1	1	1	2.0	13.0	0.0	-178.1	0	0	0	0	0
6	2005	1	1	1	2.16	14.4	0.0	-130.6	0	0	0	0	0
7	2005	1	1	1	3.12	14.1	0.0	-108.4	0	0	0	0	0
8	2005	1	1	1	4.16	14.1	0.0	-96.0	0	0	0	0	0
9	2005	1	1	1	5.14	14.1	0.0	-86.5	0	0	0	0	0
10	2005	1	1	1	6.18	14.1	0.0	-78.4	0	0	0	0	0
11	2005	1	1	1	7.13	13.9	0.0	-70.5	0	0	0	0	0
12	2005	1	1	1	8.22	14.0	0.0	-62.3	0	0	0	0	0
13	2005	1	1	1	9.18	14.2	8.2	-53.1	0	8	8	8	8
14	2005	1	1	1	10.38	14.4	17.1	-42.3	0	33	33	33	33
15	2005	1	1	1	11.29	14.8	24.2	-29.5	0	79	79	79	79
16	2005	1	1	1	12.27	15.8	28.9	-15.2	6	174	171	174	174
17	2005	1	1	1	13.34	16.2	30.4	0.3	0	155	155	155	155
18	2005	1	1	1	14.36	16.7	28.6	16.1	7	183	179	183	183
19	2005	1	1	1	15.31	16.9	23.8	30.4	4	147	145	147	147
20	2005	1	1	1	16.44	16.9	16.6	43.1	13	116	113	116	116

Figura 4-1: Ejemplo de una extracción de Meteonorm de la ubicación Cádiz.

De aquí es interesante extraer la columna 'FF' correspondiente a las velocidades del viento (m/s) totales.

En Meteonorm, se procede a la descarga de los datos meteorológicos de las ubicaciones del estudio. Con todas las extracciones de las ubicaciones se genera un único archivo xlsx que conforma la base de datos de las velocidades del viento y que posteriormente se introduce en Matlab (*Datos ubicaciones.xls*). Cada pestaña de este archivo conforma una ubicación. Así Se obtienen los 8760 valores del viento para una de ellas.

En Matlab, se crea un script (*carga de datos.mlx*) que lee el archivo Excel con cada hoja, y en el que se crea una estructura llamada viento en la cual se puede acceder a los datos de cada ubicación mediante *viento.poblacion*, siendo *poblacion* la ubicación de estudio actual. De esta manera, incluyendo ubicaciones adicionales al libro de Excel procedentes de Meteonorm, la herramienta accederá a ellos de manera sencilla mediante el mismo script, sin tener que modificar el código, lo que abre la puerta a futuros estudios y comparaciones de manera sencilla:

```
% Cargar archivo Excel
filename = 'Datos Ubicaciones.xlsx';
% Obtener nombres de hojas del archivo Excel
ubicaciones = sheetnames(filename);
% Crear estructura para almacenar los datos de viento de cada ubicación
viento = struct();
% Iterar sobre los nombres de las hojas
for u = 1:length(ubicaciones)
% Obtener nombre de la ubicación
ubicacion = ubicaciones{u};
% u será el número total de ubicaciones leídas
% Leer datos de la hoja
data = readtable(filename, 'Sheet', ubicacion);
% Almacenar datos de viento de la ubicación en la estructura viento
viento.(ubicacion) = data(:, 5); % redondear a 2 decimales
end
% Se puede consultar el dato de viento una hora específica del año mediante
viento.P_Vargas(257)
% Se puede imprimir por pantalla la lista de ubicaciones de estudio
fprintf("Las ubicaciones son las siguientes")
```

Aquí se mostrará una lista de las ubicaciones que se hayan incluido en el archivo de carga, lo cual permite comprobar errores y posteriormente tener una lista sobre la cual elegir la ubicación a estudiar.

4.3 Gestión de los datos de los aerogeneradores

De manera similar, se parte del archivo *xlsx* donde se recoge la información de la potencia generada en función del viento de cada modelo de aerogenerador. El archivo se nombra '*Curvas Aerogeneradores.xlsx*'.

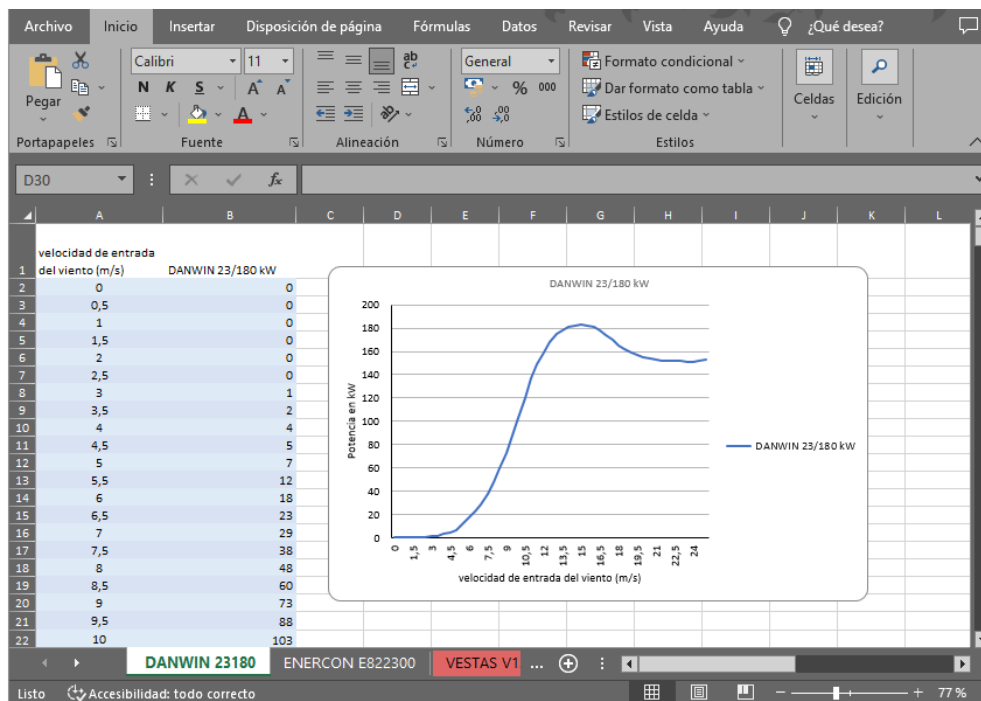


Figura 4-2: Captura del archivo '*Curvas Aerogeneradores.xlsx*'.

Como se observa en la imagen, cada hoja es un aerogenerador distinto. A esta se le pueden añadir tantos como se requieran, respetando el formato de las 2 primeras columnas, velocidad del viento y potencia dada por el fabricante, para que la herramienta funcione de manera universal.

De manera similar a los datos del viento, en Matlab, el mismo script (carga de *datos.mlx*) se encarga de leer el archivo con cada hoja, y se crea una estructura llamada *curvas_potencia* en la cual se puede acceder a los datos de cada aerogenerador contenido en el archivo *xlsx*.

Con el siguiente código se logra leer las hojas del archivo de Excel "*Curvas Aerogeneradores.xlsx*" y almacenar los nombres de las hojas en una variable llamada "aerogeneradores".

Se inicia una estructura llamada "*aerogenerador*" para almacenar los datos de cada aerogenerador y se leen los datos de velocidad del viento y potencia generada correspondiente para cada aerogenerador. Así se podrá acceder a cualquier modelo nuevo que se añada al archivo *xlsx*:

```
% Leer los nombres de las hojas del excel
aerogeneradores = sheetnames('Curvas Aerogeneradores.xlsx');

% Inicializar estructura para almacenar los datos de los aerogeneradores
aerogenerador = struct();

% Recorrer cada hoja y almacenar los datos en la estructura
for i = 1:numel(aerogeneradores)

% Leer datos de la hoja - se leen hasta 100 valores asegurando la
% completa lectura de los datos
```

```

datos      =      readmatrix('Curvas      Aerogeneradores.xlsx',      'Sheet',
aerogeneradores{i}, 'Range', 'A2:B100');
% Eliminar filas con valores NaN en las potencias . sobrantes debido a
% leer 100 líneas
datos(isnan(datos(:, 1)), :) = [];

% Almacenar datos en la estructura
aerogenerador.(aerogeneradores{i}).velocidad = datos(:, 1);
aerogenerador.(aerogeneradores{i}).potencia = datos(:, 2);
end

% Se pueden enseñar los modelos dentro del estudio imprimiendo
fprintf("Los modelos son los siguientes");

```

Aquí también se muestra la lista de aerogeneradores incluidos para subsanar posibles errores y también elegir el equipo a estudiar.

Una vez creada la base de datos se procede al cálculo de la potencia y energía que genera un aerogenerador en concreto en una ubicación a elegir para el estudio. Para ello, en Matlab, se le pide al usuario que seleccione una ubicación del listado:

```

% Pedir al usuario la ubicación y aerogenerador de interés
ubicaciones_disp = fieldnames(viento);
fprintf("Ubicaciones disponibles:\n")
disp(ubicaciones_disp);
ubicacion_actual = input("Seleccione una ubicación de la lista: ", 's');

```

Y de la misma forma, un modelo de aerogenerador de la lista disponible:

```

aerogeneradores_disp = fieldnames(aerogenerador);
fprintf("Modelos de aerogeneradores disponibles:\n")
disp(aerogeneradores_disp);
aerogenerador_actual = input("Seleccione un modelo de aerogenerador de la
lista: ", 's');

```

Con esta selección, se utiliza la función `interp1` de MATLAB para interpolar los datos de potencia del aerogenerador seleccionado en cada valor de velocidad del viento en la ubicación seleccionada. Se calcula la energía generada en un año sumando la potencia generada en cada hora del año y se muestra en pantalla la energía generada en un año por el aerogenerador seleccionado en la ubicación seleccionada:

```

% Obtener datos de viento de la ubicación seleccionada
datos_viento = viento.(ubicacion_actual);

% Obtener datos del aerogenerador seleccionado
datos_aerogenerador = aerogenerador.(aerogenerador_actual);

% Calcular la potencia generada por cada valor de viento
potencia_generada      =      interp1(datos_aerogenerador.velocidad,
datos_aerogenerador.potencia, datos_viento, 'linear', 0);

% Calcular la energía generada en un año
energia_generada = sum(potencia_generada)*8760;

% Mostrar los resultados

```



```
fprintf("La energía generada en un año por el aerogenerador %s en la ubicación
%s es %.2f kWh\n", aerogenerador_actual, ubicacion, energia_generada/1000)
```

Para su uso posterior en la sección 6, se requiere saber la potencia que se genera en un instante del año (en una hora concreta dentro de las 8760 horas anuales). Para ello se introduce el código:

```
% Pedir al usuario el número de hora del año (de 1 a 8760)
hora_actual = input("Seleccione una hora del año (de 1 a 8760): ");

% Obtener la velocidad del viento en la ubicación seleccionada en la hora
seleccionada
velocidad_viento_hora_actual = viento.(ubicacion_actual)(hora_actual);

% Calcular la potencia generada a la velocidad del viento en la hora
seleccionada
potencia_generada_hora_actual = interp1(datos_aerogenerador.velocidad,
datos_aerogenerador.potencia, velocidad_viento_hora_actual, 'linear', 0);

% Mostrar los resultados
fprintf("La potencia generada por el aerogenerador %s en la ubicación %s en
la hora %d es %.2f kW\n", aerogenerador_actual, ubicacion_actual, hora_actual,
potencia_generada_hora_actual/1000)
```

Finalmente, se genera un gráfico que muestra la curva de potencia del aerogenerador seleccionado y correspondiente su interpolación. Para este ejemplo se ha tomado el Aerogenerador DANWIN 23 180 en la ubicación de 'Faro':

```
% Obtener datos del aerogenerador seleccionado
datos_aerogenerador = aerogenerador.(aerogenerador_actual);

% Graficar datos originales del aerogenerador
figure;
plot(datos_aerogenerador.velocidad, datos_aerogenerador.potencia, 'o');
hold on;

% Calcular la potencia generada por cada valor de viento
potencia_generada = interp1(datos_aerogenerador.velocidad,
datos_aerogenerador.potencia, datos_viento, 'linear', 0);

% Graficar datos interpolados
plot(datos_viento, potencia_generada, '-');
legend('Datos originales', 'Interpolación');
xlabel('Velocidad del viento (m/s)');
ylabel('Potencia generada (kW)');
title(sprintf("Potencia generada por %s en %s", aerogenerador_actual,
ubicacion_actual));
```

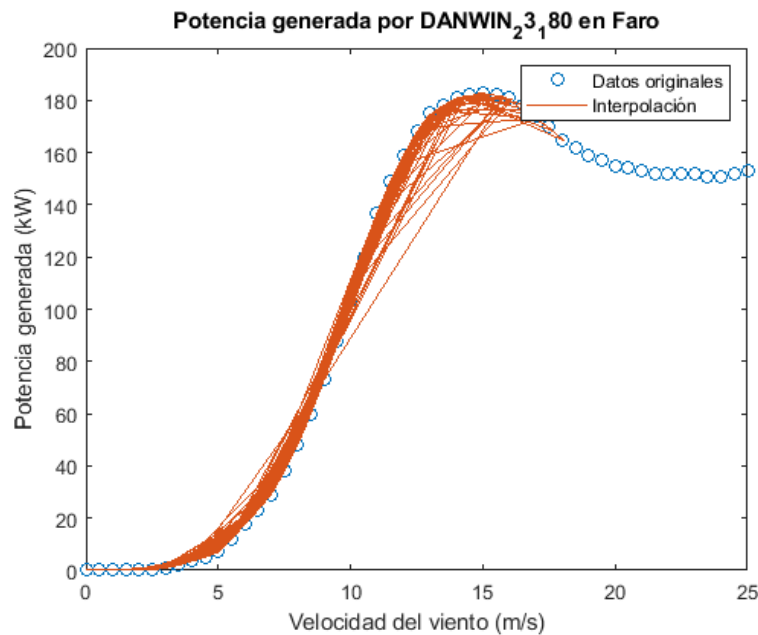


Figura 4-3: Curva de potencia generada por Matlab con el ejemplo seleccionado

Puede resultar interesante para este y posteriores estudios comprobar los meses de mayor generación de potencia dada una ubicación y un aerogenerador. Para ello se calcula la potencia generada por cada hora del año y luego se suman las potencias generadas en cada mes para obtener la potencia generada en cada mes. Finalmente se crea un gráfico de barras con las potencias generadas en cada mes.

```
% Crear vector con la potencia generada por mes
potencia_generada_mes = zeros(1, 12);
for i = 1:12
    potencia_generada_mes(i) = sum(potencia_generada((i-1)*720+1:i*720));
end

% Crear gráfico de barras de la potencia generada por mes
meses = {'Ene', 'Feb', 'Mar', 'Abr', 'May', 'Jun', 'Jul', 'Ago', 'Sep', 'Oct',
'Nov', 'Dic'};
bar(potencia_generada_mes);
set(gca, 'XTick', 1:12, 'XTickLabel', meses);
xlabel('Mes');
ylabel('Potencia generada (kW)');
title(sprintf('Potencia mensual generada por %s en %s ',
aerogenerador_actual, ubicacion_actual));
```

La expresión $m*720-719:m*720$ se utiliza para seleccionar un rango de índices en el vector *potencia_generada* correspondiente a las horas del mes en cuestión. Por ejemplo, si $m=1$, el rango seleccionado será $1:720$, lo que corresponde a las horas del primer mes.

Luego, se calcula la energía generada en el mes multiplicando la potencia generada en cada hora del mes por el número de horas en el mes (720), y sumando los resultados. Esto se realiza con la expresión $\text{sum}(\text{potencia_generada}(m*720-719:m*720)) * 720$.

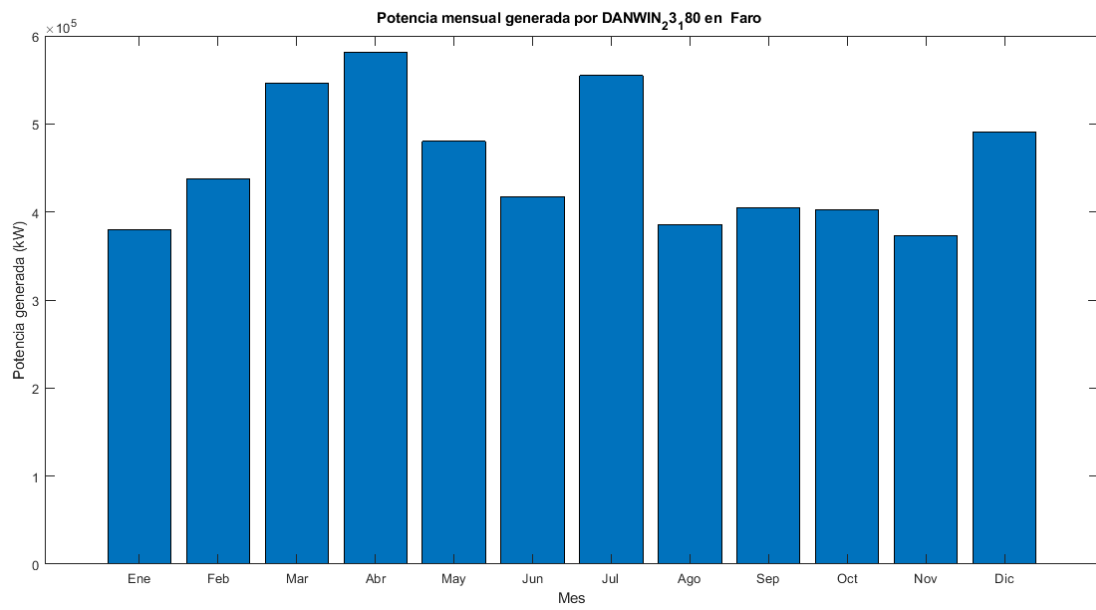


Figura 4-4: Distribución mensual de la potencia generada por el ejemplo seleccionado, extraída de Matlab.

5 SUBSISTEMA DE DESALINIZACIÓN.

5.1 Origen y estado actual

Los orígenes del proceso de separación de la sal del agua marina se remontan a la antigüedad, donde se utilizaba el método de evaporación natural del agua salada en salinas poco profundas para posteriormente obtener la sal disuelta en el agua. Este proceso es el que ha experimentado una fuerte evolución tecnológica para obtener como producto agua potable de manera eficiente y adaptándose a los estándares de calidad impuestos (26).

Ya por el siglo XVI, se comienzan a desarrollar métodos para la desalinización del agua, como la destilación y la evaporación en ollas o mediante el uso del alambique ya en 1717. Sin embargo la ineficiencia de estos métodos producía pequeñas cantidades de agua dulce, insuficiente para un abastecimiento de alta demanda. En 1950 comenzaría el desarrollo una tecnología viable a gran escala para la desalinización y objeto de este estudio: la ósmosis inversa.

Actualmente, la desalinización de agua marina se ha convertido en una tecnología cada vez más importante debido al aumento de la demanda de agua dulce y la escasez de fuentes de agua dulce en todo el mundo. Muchas regiones, especialmente en áreas costeras y áridas, tienen acceso limitado a fuentes de agua dulce, lo que las hace dependientes del agua de mar para su consumo y sus otros usos y aplicaciones. A esto se le suma el efecto del cambio climático sobre la escasez de agua: el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones contribuye a la cantidad y la calidad del agua dulce disponible, lo que hace que la desalinización sea una solución cada vez más viable y atractiva (27).

La desalinización también es importante para la agricultura y la industria, por el alto requerimiento de grandes cantidades de agua dulce para el funcionamiento de las mismas. Con el uso de esta tecnología, las empresas pueden utilizar agua de mar para sus procesos de producción y evitar depender de fuentes de agua dulce limitadas o protegidas.

Muchos países han adoptado la tecnología de desalinización para satisfacer sus necesidades de agua dulce, especialmente aquellos que tienen acceso limitado a fuentes de agua dulce. Los principales apostadores son (28):

- Arabia Saudita: Es uno de los mayores usuarios de la tecnología de desalinización en el mundo, con 35 plantas de desalinización (18% de la producción mundial,). La mayoría de su agua potable se obtiene a través de la desalinización del agua de mar (29).
- Emiratos Árabes Unidos: Debido a su ubicación en el desierto, el país ha invertido significativamente en la tecnología de desalinización para satisfacer sus necesidades de agua dulce, produciendo hasta 4,13 millones de metros cúbicos al día. Dubái es el hogar de la planta de desalinización más grande del mundo, que puede generar 758 millones de litros por día (30).
- Israel: A pesar de que Israel tiene una infraestructura de suministro de agua avanzada, con un alto porcentaje de reutilización de agua residual, es uno de los principales usuarios de la tecnología de desalinización (31). El país cuenta con varias plantas de desalinización que producen el 80% del agua potable de la nación para uso doméstico (32).
- España: la desalinización se ha convertido en una técnica importante para obtener agua dulce en zonas

donde el agua es escasa, especialmente en zonas costeras. Actualmente cuenta con más de 700 plantas y es uno de los líderes europeos en esta tecnología (33).

- Estados Unidos: De manera similar a España, las regiones áridas del oeste de los Estados Unidos han invertido significativamente en la tecnología de desalinización, y ésta ha seguido evolucionando: Se observa que la capacidad instalada global de desalinización ha aumentado constantemente a una tasa del 7% anual desde el año 2010 hasta finales de 2019 (34).

5.1.1 situación en España

En España existen numerosas plantas desaladoras distribuidas por todo el territorio, aunque la mayoría se encuentran en la costa mediterránea debido a la escasez de agua en esta zona del país.

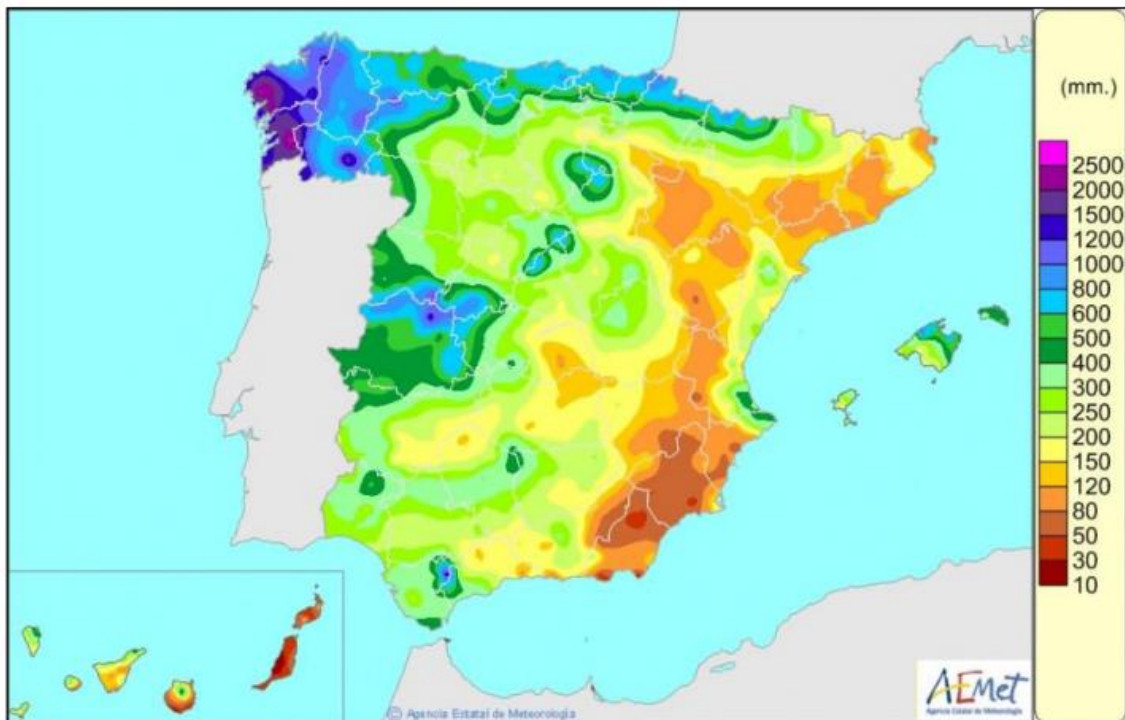


Figura 5-1: Precipitación acumulada (mm) desde el 1 de octubre de 2022 al 31 de marzo de 2023 (35).

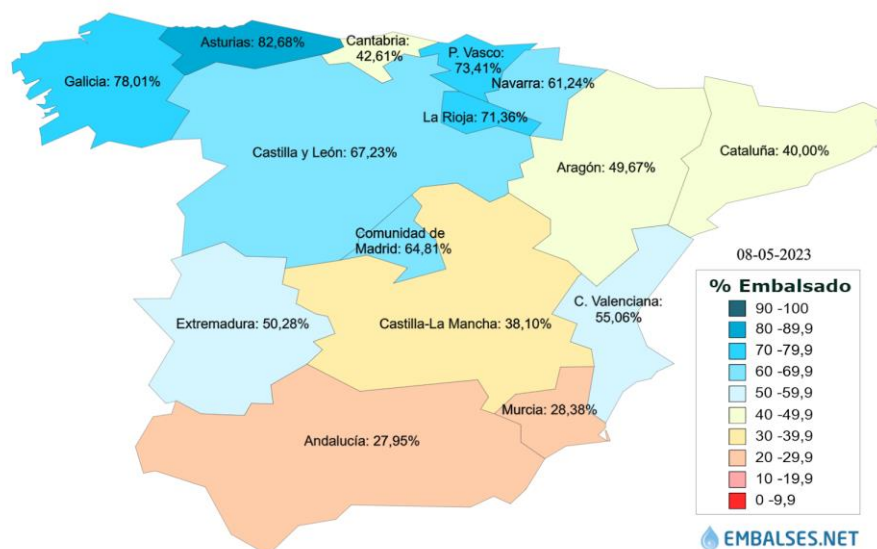


Figura 5-2: Agua embalsada en España en referencia al total disponible en los embalses a fecha de mayo de 2023 (36).

Como se observa en las anteriores figuras, las zonas más áridas de España y las que tienen menor capacidad disponible en embalses son las cercanas al Mediterráneo y las Islas Canarias. A esta escasez se le suma el hecho de que sean zonas de gran atracción turística y alta demanda de agua, tanto para uso recreativo como para consumo y regadíos. Todo ello afecta al déficit de agua disponible, lo que ha impulsado la apuesta por la desalinización (37).

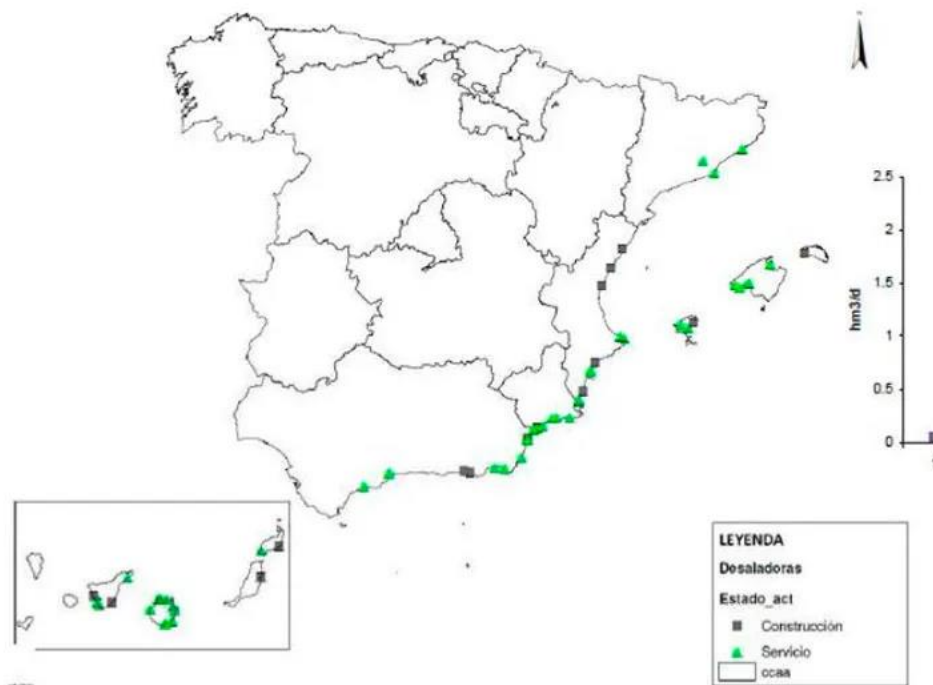


Figura 5-3: Ubicación de las principales plantas desaladoras en servicio y en construcción en España en 2021 (38).

Por ello, como se observa en la anterior figura, la mayoría de las plantas desaladoras del país se distribuyen en estas zonas de acuerdo con este hecho. A fecha de 2021, España cuenta con 765 plantas desaladoras (38), que

se dividen en desaladoras de agua marina (405) y salobre (360).

Concretamente en Andalucía, las principales plantas desaladoras se encuentran en Almería. Estas son las plantas del Bajo Almanzora, de Carboneras y Campo de Dalías, que conjuntamente proporcionan agua para más de 600.000 personas y 30.000 hectáreas de regadío anualmente (38). Cabe mencionar también la planta de agua salobre de El Atabal, en Málaga, una de las más grande de Europa que permite el abastecimiento de agua a 600.000 personas produciendo 165.000 m³/día (39).



Figura 5-4: Situación de las principales desaladoras y desalobradoras andaluzas (2015) (40)

Por otra parte, en Gran Canaria, de clima subtropical y donde la disponibilidad de agua dulce es limitada y la demanda es alta, la desalinización de agua ha sido siempre una técnica importante para abastecer a la población y al turismo en la isla. En Lanzarote se instaló la primera planta desaladora del país en 1964 (41) y desde entonces la capacidad ha ido en aumento, contando a fecha de 2008 con más de 300 desaladoras, la gran mayoría, de osmosis inversa (42). Estas proporcionan a fecha de 2020 el 86% del agua para consumo humano de la isla (43).

Las provincias que hacen mayor uso de esta tecnología son Lanzarote, Fuerteventura y Gran Canaria.

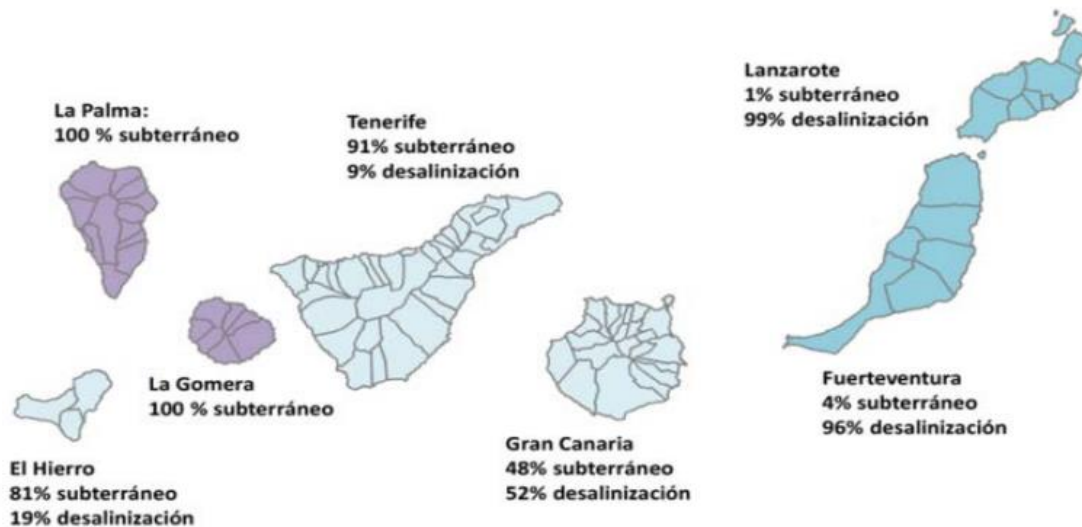


Figura 5-5: Consumo por provincia según el origen del agua a fecha 2015 (44).

5.2 Descripción de las diferentes tecnologías de desalinización

Existen varias tecnologías para la desalinización del agua, las cuales se pueden clasificar en dos categorías principales: la desalinización térmica y la desalinización por membranas.

5.2.1 Desalinización térmica

La desalinización térmica es una tecnología de tratamiento de agua que utiliza el calor para separar el agua salada del agua dulce. Este proceso se basa en el principio de la evaporación y condensación, y se puede realizar mediante diferentes métodos como la destilación multiefecto (MED), Evaporación Instantánea Multietapa (MSF) y la destilación por compresión de vapor (MVC) (45).

5.2.1.1 Destilación multiefecto (MED).

Es la técnica más común de desalinización térmica. En este proceso, el agua de mar se evapora en un conjunto de recipientes cerrados, cada uno con una presión de vapor más baja que el anterior. El vapor producido en cada uno de los recipientes se condensa en un condensador separado y se recoge como agua dulce. El agua de mar que queda en el último recipiente es más concentrada en sales y se descarga como agua salada.

Este proceso aprovecha el calor generado en la etapa previa para el siguiente paso, y así sucesivamente, reduciendo el consumo. Además permite obtener diferentes variaciones de concentración en el producto para aplicar a diversos usos. En la figura siguiente se puede apreciar este proceso y las diferentes etapas o efectos que la componen.

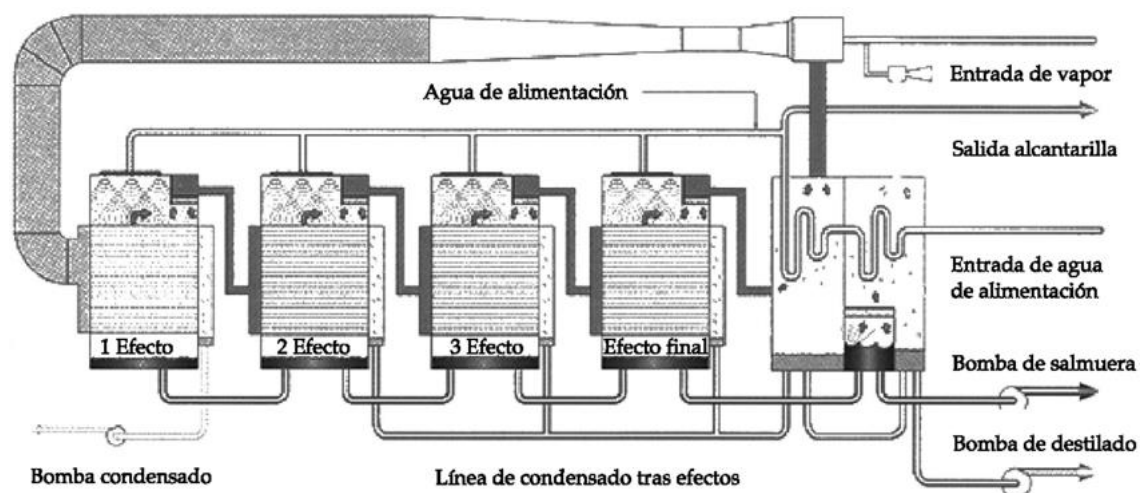


Figura 5-6: Esquema del proceso de destilación multiefecto (46).

5.2.1.2 Destilación flas o Evaporación Instantánea Multietapa (MSF)

Es otro método de desalinización térmica que implica la evaporación instantánea del agua de mar en una cámara al vacío y posterior condensación. El funcionamiento de estos 2 procesos se basa en introducir el agua de mar a alta temperatura, produciendo vapor. Después éste se lleva al condensador donde se obtiene el agua dulce separada del agua de mar residual (47). En la figura se observan las diferentes etapas y mecanismos para la obtención de producto y como la salmuera va reduciéndose a medida que se avanza en las etapas.



Figura 5-7: Esquema del proceso de destilación flas (47).

5.2.1.3 Destilación por compresión de vapor (MVC)

Utiliza vapor comprimido y a alta temperatura (obtenido con energía eléctrica mediante un compresor) para aumentar la temperatura del agua de entrada. El vapor, luego de precalentar el agua salada, pasa por un proceso de condensación para obtener agua destilada, como se observa en el esquema de la figura.

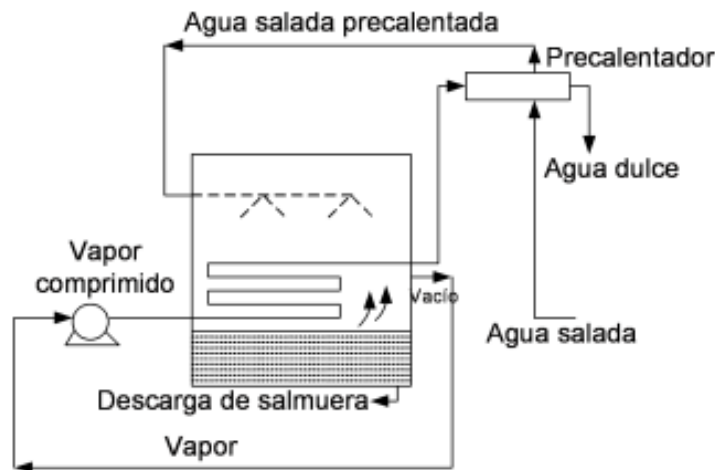


Figura 5-8: Esquema del proceso de destilación por compresión de vapor (48).

5.2.2 Desalación por membranas

Esta técnica de desalinización utiliza membranas semipermeables para separar el agua salada del agua dulce en plantas desaladoras de agua, tanto a pequeña como a gran escala. Las principales tecnologías se detallan a continuación:

5.2.2.1 Nanofiltración (NF)

La porosidad de las membranas de nanofiltración permite retener materia orgánica y moléculas iónicas, mientras que permiten el paso de iones más pequeños y moléculas de agua. Su funcionamiento a baja presión se traduce en un menor coste energético pero también en una menor capacidad de eliminación de iones (49). Aunque su selectividad en la retención de iones le permite enfocar su uso para diferentes aplicaciones: reducir la dureza del agua, filtrado de agua para procesos industriales, riego agrícola...

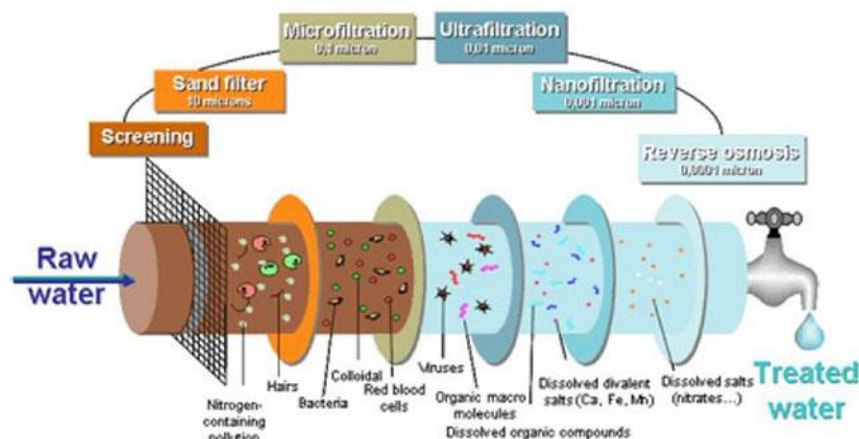


Figura 5-9: Proceso de filtrado de agua a través de la técnica de nanofiltración (50).

5.2.2.2 Electrodiálisis

Esta técnica utiliza campos eléctricos para separar iones y sales del agua permitiendo el paso selectivo de iones positivos (cationes) o negativos (aniones) a través de las membranas configuradas en serie. Éstas funcionan como intercambiadores iónicos (pueden ser catódicas o aniónicas), y cuando los iones pasan a través de ellas, la corriente acaba separándose en dos: una con agua dulce y otra con el concentrado de sales.

Esta tecnología no requiere altas presiones o temperaturas, reduciendo así su consumo energético. Además, su adaptabilidad a la hora de eliminar iones específicos le permite adaptarse a las diferentes necesidades de producción (51).

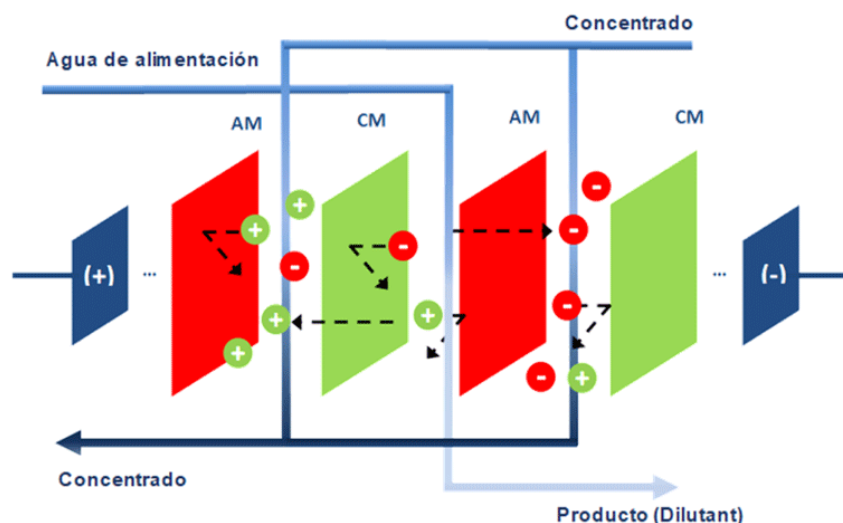


Figura 5-10: Esquema del proceso de desalinización por electrodiálisis (52).

5.2.2.3 Ósmosis inversa

Tecnología en la que se centra este estudio. Aquí se utilizan membranas semipermeables para separar iones, moléculas, sales y otras impurezas del agua de mar. Para ello, el agua se hace pasar por dichas membranas a alta presión y estas retienen los contaminantes y partículas no deseadas en el producto (53).

El proceso se lleva a cabo a través de una serie de etapas:

1. Se realiza el pretratamiento del agua de entrada, normalmente procedente del mar, eliminando materia orgánica, partículas suspendidas, bacterias y otros contaminantes.
2. A través de la bomba de alta presión o HPP (High pressure pump) se eleva la presión del agua pretratada hasta la presión de operación del sistema de membranas, alrededor de los 55 bar, para obligar a superar

- la presión osmótica del agua salada y forzar el agua a pasar por las membranas.
3. Paso por el bastidor de membranas: Las membranas retienen las sales y contaminantes, por lo que solo el permeado, o agua filtrada, pase a través de las mismas. Este es el producto que busca el proceso.
 4. Paso por el intercambiador de presión ERD (dispositivos de recuperación de energía): El agua de mar no filtrada en las membranas (salmuera) sale con alta presión y concentración de sales del bastidor. La elevada presión se aprovecha en el intercambiador para elevar la presión del agua de entrada pretratada, reduciendo así el consumo del sistema. Además garantiza un flujo uniforme de agua en el sistema mediante una bomba de apoyo o BP (booster pump) que añade al caudal la presión necesaria para unirse al caudal procedente de la HPP.
 5. Final del ciclo. La salmuera se descarga ya sin la presión remanente, o bien sufre un tratamiento posterior para ser devuelta al mar o ser usada como subproducto. Por otra parte, el permeado pasa también a través de un post-tratamiento donde recupera su mineralización y se adecua acorde a su uso final

Cabe destacar la importancia del sistema de monitoreo de la planta, que permite el correcto funcionamiento de la misma en base a la distinta disponibilidad de energía, calidad del agua de entrada, calidad del permeado requerido...

El alto coste energético de este proceso hace que sea atractivo el uso de fuentes de energías renovables es un funcionamiento, de lo cual trata este estudio. Si bien existen desventajas en el uso de estas fuentes, dado el carácter intermitente de la misma en cuanto a disponibilidad, su uso permite la implementación de esta tecnología en zonas remotas o alejadas de la red, como el caso de las islas o zonas costeras. Además es notable el beneficio ambiental al reducirse las emisiones contaminantes y la huella de carbono del proceso.

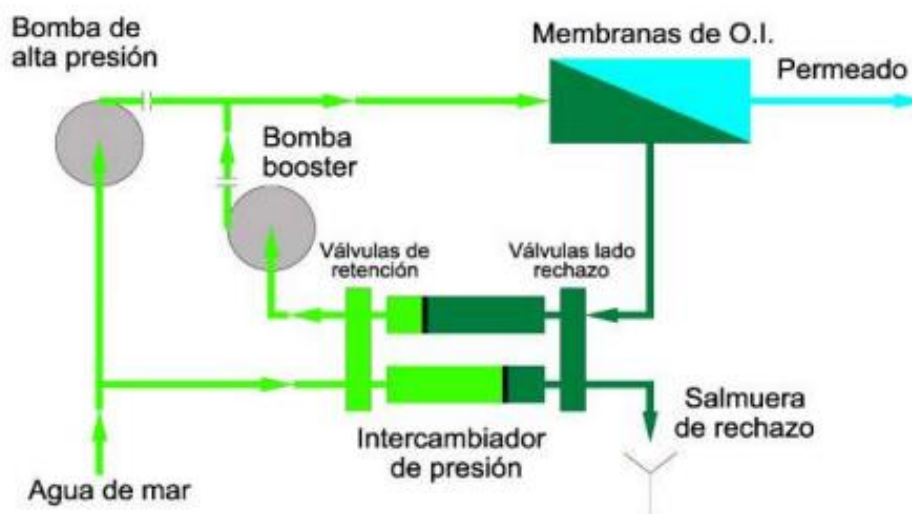


Figura 5-11: Esquema de una planta de desalinización de agua de mar mediante ósmosis inversa (54).

En el esquema anterior pueden verse las etapas mencionadas con anterioridad. Parte del agua de mar se divide para llegar a la Bomba de alta presión, mientras que la parte restante pasa por el intercambiador de presión donde aprovecha el exceso de presión con el que sale la salmuera del sistema de osmosis inversa. Luego confluye con el agua de mar a la salida de la HPP para volver a introducirse en los bastidores de membranas y repetir el ciclo. La salmuera se rechaza/reúsa y el permeado se obtiene como producto.

Debido al alto coste energético que conlleva estos saltos de presiones en las bombas, resulta atractivo el uso de energías renovables como ya se ha mencionado, lo que permite reducir el consumo energético y las emisiones de gases contaminantes, disminuyendo así la huella de carbono de este proceso.

6 MODELADO DEL SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA (EN DESARROLLO)

La herramienta para el modelado del sistema de ósmosis inversa se basa nuevamente en un script de Matlab, que permite obtener de manera automatizada los caudales de trabajo de las bombas conocida la potencia disponible dada por el subsistema eólico. Esto permite conocer el funcionamiento teórico de una planta en un instante dado si solo tuviese el apoyo energético de esta fuente de energía renovable. Se presenta aquí también el software de cálculo Q+, que permite introducir diferentes configuraciones de membranas con los datos de partida conocidos, caudal disponible (función de la potencia generada) y presión de entrada establecida. Esto permite conocer el permeado obtenido.

Se trata de un proceso en el que encontrar el punto de funcionamiento correcto y establecer un rango de funcionamiento que cumpla con los requisitos de viabilidad de diseño y calidad de permeado.

6.1 Obtención del punto de operación

Para la distribución de la potencia consumida entre los equipos que conforman la planta se toma de ejemplo de consumo típico en una planta de desalación de la siguiente tabla:

Tabla 6-1: Tabla de consumos típicos de los diferentes equipos (55).

Capacidad nominal: 1000 m3/d		
Detalle de consumos	kW	kWh/m3
Bomba sumergible de captación	5,56	0,13
Bomba centrífuga de bombeo intermedio	18,72	0,45
Bombas lavado filtro arena	4,97	0,12
Bomba alta presión	97,2	2,33
Bomba booster	8,71	0,21
Bombeo de permeado	6,25	0,15
Control, instrumentación y varios	2	0,05

Se calcula los porcentajes correspondientes para aplicarlos a la potencia que se obtiene del aerogenerador elegido:

Tabla 6-2: Tabla con los pesos correspondientes para cada equipo en porcentaje. Elaboración propia a partir de

los datos de la tabla 6-1.

Detalle de consumos	kW	% total consumo de la planta
Bomba sumergible de captación	5,56	4
Bomba centrífuga de bombeo intermedio	18,72	13
Bombas lavado filtro arena	4,97	3
Bomba alta presión HPP	97,2	68
Bomba booster BP	8,71	6
Bombeo de permeado	6,25	4
Control, instrumentación y varios	2	1
Total	143,41	100

Con esto se puede calcular la capacidad nominal de una planta estándar en m³/h:

$$Capacidad\ nominal = \frac{1000m^3}{día} * \frac{1\ día}{24\ h} = 41.7 \frac{m^3}{h}$$

Para obtener un valor de consumo específico típico, se calcula:

$$Consumo\ específico = 143.41 \frac{kW}{41.7 \frac{m^3}{h}} = 3.44\ kWh/m^3$$

Ahora, mediante la herramienta mencionada, Q+, se busca un punto de operación correcto. El primer paso es colocar el software con las unidades de trabajo (Celsius, m³/h, bar y lmh) como se muestra en la siguiente figura:

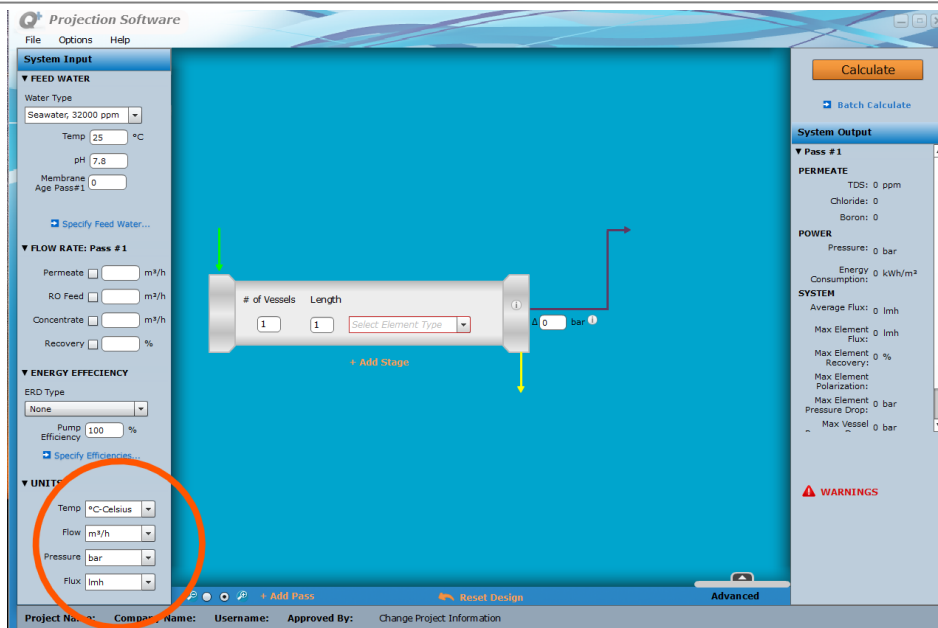


Figura 6-1: Interfaz del software Q+. En zona circular se muestra donde modificar los parámetros de trabajo.
Fuente: Q+ projection software (56).

Seguidamente se edifican las características del agua de entrada. Se elige la procedencia de un pozo playero, con una ppm de 36000 típicas para nuestra zona de estudio.

La temperatura será de 25°C, que permanecerá constante en este estudio, y el pH de 7.8.

Además se establece en 3 años los años de operación para obtener así un valor del factor de ensuciamiento (*fouling factor*) entre el 0.85-0.86 % - valores típicos de funcionamiento:

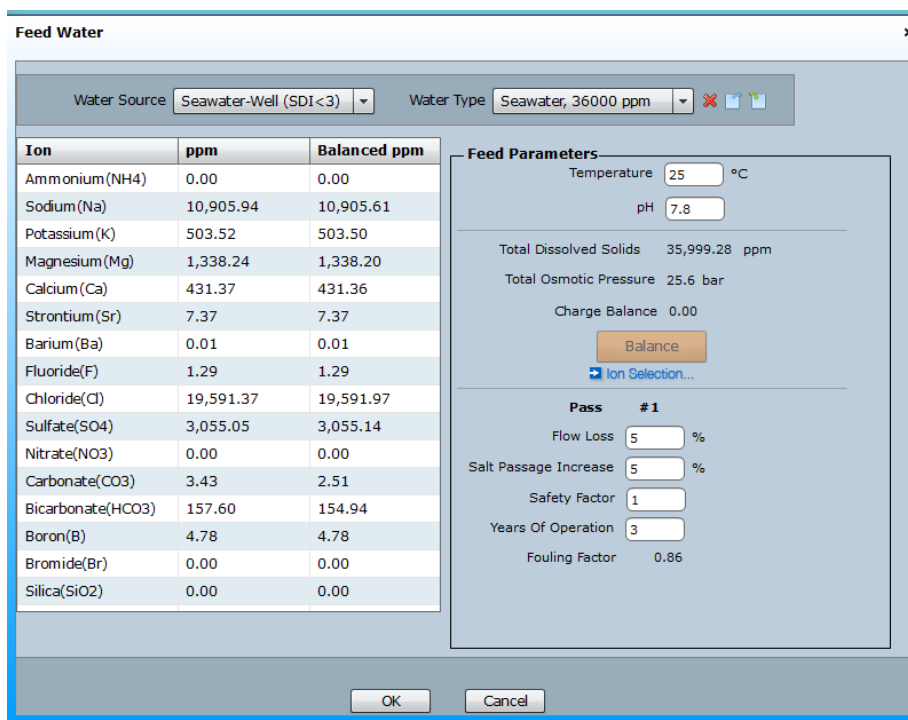


Figura 6-2: Ventana para especificar las características del agua a tratar en el software Q+ (56)

Una vez establecidas las características necesarias para operar el programa, se busca los rangos de funcionamientos de diferentes membranas, para así obtener un rango de operación según la potencia disponible. Las membranas a estudiar, específicas para agua de mar (*Sea Water*) son las siguientes:

- LG SW 440 ES

- LG SW 440 R
- LG SW 440 GR
- LG SW 440 SR

Para cada una de ellas se busca los rangos de operación que ofrece, según el porcentaje de conversión (*recovery rate*). Importante cumplir los valores de la TDS (≤ 470 ppm), el boro (≤ 0.95 ppm para tener un margen de seguridad respecto a la normativa de 1 ppm a fecha 2022 (57)) y un valor en unidades de l/mh de alrededor de 14 l/h/m² normalmente. Aunque para potenciales modificaciones de la normativa, este estudio también reporta datos fuera de la normativa vigente para profundizar en el análisis de los datos que pudiesen ser de utilidad.

Se construyen por tanto 3 tablas con los *recovery* de 40, 45 y 50 % respectivamente. El límite de diseño de estas membranas se busca variando para cada *recovery* el flujo de permeado obtenido, con lo que se obtienen 3 tablas para cada membrana. Para la creación de las tablas se ha tenido en cuenta los problemas y los errores de diseño que el propio software advierte, que se reflejan en la última columna #DW (Number of Design Warnings). Así se encuentran los límites superiores e inferiores para cada una de ellas, y de igual manera se establece el punto nominal de operación, aquel indicado con un 100% en el parámetro %Pw, en el cual se cumple las mejores condiciones de operación:

- Para un 50% de *recovery*:

Tabla 6-3: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 ES con un 50% de *recovery*.

7 membranas LG SW	pF, bar	qF, m ³ /h	qP, m ³ /h	recovery %	TDSP, ppm	BoronP, ppm	Average flux l/mh	SEC, kWh/m ³	T, °C	Pw, kW	% Pw	#DW
440 ES	71,06	24,5	12,25	50	140,88	0,95	42,87	2,58	25	31,61		3
	67,19	21,2	10,6	50	163,33	1,06	37,09	2,41	25	25,55		3
	64,45	18,8	9,4	50	184,73	1,15	32,89	2,3	25	21,62		2
	60,86	15,6	7,8	50	223,82	1,3	27,3	2,15	25	16,77		1
	57,82	12,8	6,4	50	274,5	1,45	22,4	2,03	25	12,99		1
	54,93	10	5	50	353,81	1,65	17,5	1,91	25	9,55		2
	52,93	8	4	50	444,19	1,82	14	1,83	25	7,32		3

Esta membrana presenta en estas condiciones problemas de diseño (columna #DW), por lo que no resultaría una buena opción.

Tabla 6-4: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 R con un 50% de *recovery*.

7 membranas LG SW	pF, bar	qF, m ³ /h	qP, m ³ /h	recovery %	TDSP, ppm	BoronP, ppm	Average flux l/mh	SEC, kWh/m ³	T, °C	Pw, kW	% Pw	#DW
440 R	60,37	10,4	5,2	50	165,04	0,91	18,2	2,1	25	10,92	108,18	1
	59,41	9,8	4,9	50	175,66	0,95	17,15	2,06	25	10,09	100,00	
	58,51	9,2	4,6	50	187,46	0,99	16,1	2,02	25	9,29	92,05	
	57,61	8,6	4,3	50	201,06	1,04	15,05	1,99	25	8,56	84,77	
	56,72	8	4	50	216,8	1,09	14	1,96	25	7,84	77,67	
	53,89	7	3,5	50	249,1	1,19	12,25	1,9	25	6,65	65,88	1

Tabla 6-5: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 GR con un 50% de *recovery*.

7 membranas LG SW	pF, bar	qF, m ³ /h	qP, m ³ /h	recovery %	TDSP, ppm	BoronP, ppm	Average flux l/mh	SEC, kWh/m ³	T, °C	Pw, kW	% Pw	#DW
440 GR	65,31	11,4	5,7	50	124,08	0,73	19,95	2,27	25	12,94	156,61	1
	63,39	10,4	5,2	50	136,44	0,79	18,2	2,2	25	11,44	138,47	

	61,48	9,4	4,7	50	151,53	0,85	16,45	2,13	25	10,01	121,17	
	60,03	8,6	4,3	50	166,19	0,91	15,05	2,07	25	8,90	107,73	
	59,06	8,1	4,05	50	176,88	0,95	14,17	2,04	25	8,26	100,00	
	58,93	8	4	50	179,16	0,96	14	2,03	25	8,12	98,28	
	57,13	7	3,5	50	205,88	1,05	12,25	1,96	25	6,86	83,03	
	55,75	6,2	3,1	50	233,66	1,14	10,85	1,91	25	5,92	71,67	1

Tabla 6-6: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 SR con un 50% de recovery.

7 membranas LG SW	pF, bar	qF, m3/h	qP, m3/h	recovery %	TDSP, ppm	BoronP, ppm	Average flux lmh	SEC, kWh/m3	T, °C	Pw, kW	% Pw	#DW
440 SR	73,33	12,6	6,3	50	88,89	0,56	22,05	2,55	25	16,07	186,80	1
	69,46	11	5,5	50	102,16	0,63	19,25	2,41	25	13,26	154,13	
	66,49	10	5	50	112,69	0,68	17,5	2,32	25	11,60	134,88	
	64,63	9	4,5	50	125,66	0,74	15,75	2,23	25	10,04	116,69	
	62,35	8	4	50	141,93	0,81	14	2,15	25	8,60	100,00	
	60,03	7	3,5	50	167,07	0,9	12,25	2,06	25	7,21	83,84	
	58,93	6,5	3,25	50	176,14	0,95	11,37	2,02	25	6,57	76,34	
	56,51	5,4	2,7	50	213,68	1,08	9,45	1,94	25	5,24	60,91	
	55,27	4,8	2,4	50	241,66	1,16	8,4	1,89	25	4,54	52,74	1

- Para cada un 45% de recovery:

Tabla 6-7: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 ES con un 45% de recovery.

7 membranas LG SW	pF, bar	qF, m3/h	qP, m3/h	recovery %	TDSP, ppm	BoronP, ppm	Average flux lmh	SEC, kWh/m3	T, °C	Pw, kW	% Pw	#DW
440 ES	66,2	25,6	11,5	45	139,3	0,95	40,24	2,51	25	28,87		3
	61,43	21,1	9,5	45	169,06	1,09	33,24	2,29	25	21,76		2
	55,72	15,6	7	45	230,7	1,33	24,5	2,03	25	14,21		1
	50,34	10,0	4,5	45	362,07	1,69	15,75	1,79	25	8,06		1
	49,31	8,9	4	45	408	1,78	14	1,75	25	7,00		
	48,2	7,8	3,5	45	467	1,89	12,25	1,7	25	5,95		1

Esta membrana no tiene un punto nominal de funcionamiento al no cumplir los requisitos de diseño ni calidad del agua.

Tabla 6-8: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 R con un 45% de recovery.

7 membranas LG SW	pF, bar	qF, m3/h	qP, m3/h	recovery %	TDSP, ppm	BoronP, ppm	Average flux lmh	SEC, kWh/m3	T, °C	Pw, kW	% Pw	#DW
440 R	58,81	12,9	5,8	45	136,14	0,79	20,3	2,11	25	12,24	138,64	1
	56,83	11,6	5,2	45	152,33	0,86	18,2	2,03	25	10,56	119,59	
	54,82	10,1	4,55	45	174,6	0,95	15,92	1,94	25	8,83	100,00	
	53,1	8,9	4	45	199,47	1,04	14	1,88	25	7,52	85,19	
	51,31	7,6	3,4	45	235,93	1,16	11,9	1,8	25	6,12	69,33	
	49,58	6,2	2,8	45	289,94	1,3	9,8	1,74	25	4,87	55,19	
	47,86	4,9	2,2	45	368,54	1,48	7,7	1,67	25	3,67	41,62	1

Tabla 6-9: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 GR con un 45% de recovery.

7 membranas LG SW	pF, bar	qF, m3/h	qP, m3/h	recovery %	TDSP, ppm	BoronP, ppm	Average flux l/mh	SEC, kWh/m3	T, °C	Pw, kW	% Pw	#DW
440 GR	64,15	14,0	6,3	45	103,75	0,64	22,05	2,3	25	14,49	185,77	1
	60,64	12,0	5,4	45	121,41	0,72	18,9	2,16	25	11,66	149,54	
	57,98	10,4	4,7	45	139,94	0,81	16,45	2,06	25	9,68	124,13	
	55,33	8,9	4	45	165,18	0,91	14	1,95	25	7,80	100,00	
	54,62	8,4	3,8	45	174,11	0,95	13,3	1,92	25	7,30	93,54	
	51,72	6,7	3	45	222,19	1,11	10,5	1,81	25	5,43	69,62	
	50	5,6	2,5	45	268,17	1,25	8,75	1,75	48,61	4,38	56,09	
	47,58	4,0	1,8	45	375,74	1,49	6,3	1,65	25,20	2,97	38,08	1

Tabla 6-10: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 SR con un 45% de recovery.

7 membranas LG SW	pF, bar	qF, m3/h	qP, m3/h	recovery %	TDSP, ppm	BoronP, ppm	Average flux l/mh	SEC, kWh/m3	T, °C	Pw, kW	% Pw	#DW
440 SR	72,41	15,1	6,8	45	76,4	0,49	23,8	2,59	25	17,61	212,71	
	68,95	13,6	6,1	45	85,29	0,54	21,35	2,46	25	15,01	181,23	
	65,5	12,0	5,4	45	96,56	0,6	18,9	2,33	25	12,58	151,96	
	65,64	10,4	4,7	45	111,25	0,68	16,45	2,2	25	10,34	124,88	
	58,8	8,9	4	45	131,21	0,77	14	2,07	25	8,28	100,00	
	54,38	6,8	3,05	45	173,47	0,95	10,67	1,9	25	5,80	69,99	
	51,51	5,3	2,4	45	222,19	1,12	8,4	1,8	25	4,32	52,17	
	49,45	4,2	1,9	45	282,73	1,29	6,65	1,72	25	3,27	39,47	
	47,31	3,1	1,4	45	386,65	1,51	4,9	1,64	25	2,30	27,73	1

- Para un 40% de recovery:

Tabla 6-11: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 ES con un 40% de recovery

7 membranas LG SW	pF, bar	qF, m3/h	qP, m3/h	recovery %	TDSP, ppm	BoronP, ppm	Average flux l/mh	SEC, kWh/m3	T, °C	Pw, kW	% Pw	#DW
440 ES	62,26	27	10,8	40	138,66	0,95	37,79	2,5	25	27,00		3
	59,56	24,25	9,7	40	154,66	1,03	33,94	2,36	25	22,89		2
	56,87	21,5	8,6	40	174,66	1,12	30,1	2,22	25	19,09		2
	54,07	18,5	7,4	40	203,43	1,24	25,9	2,08	25	15,39		2
	51,51	15,75	6,3	40	239,03	1,37	22,05	1,95	25	12,29		1
	49,01	13	5,2	40	290,3	1,53	18,2	1,83	25	9,52		1
	47,63	11,5	4,6	40	328,97	1,63	16,1	1,76	25	8,10		
	46,32	10	4	40	378,85	1,75	14	1,7	25	6,80		
	44,81	8,25	3,3	40	459,65	1,9	11,55	1,63	25	5,38		
	43,5	6,75	2,7	40	561,22	2,06	9,45	1,57	25	4,24		
			2,1									

De nuevo, esta membrana no tiene un punto nominal de funcionamiento para este valor del recovery, al no cumplir los requisitos de diseño ni calidad del agua.

Tabla 6-12: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 R con un 40% de recovery

7 membranas LG SW	pF, bar	qF, m3/h	qP, m3/h	recovery %	TDSP, ppm	BoronP, ppm	Average flux lmh	SEC, kWh/m3	T, °C	Pw, kW	% Pw	% qF	#DW
440 R	58,1	16	6,4	40	115,06	0,69	22,4	2,18	25	13,95	175,55		1
	56,46	14,75	5,9	40	124,88	0,74	20,62	2,11	25	12,45	156,64		
	54,75	13,5	5,4	40	136,71	0,8	18,9	2,03	25	10,96	137,93		
	52,83	12	4,8	40	153,98	0,87	16,8	1,95	25	9,36	117,77		
	51,06	10,625	4,25	40	174,31	0,95	14,87	1,87	25	7,95	100,00		
	50,24	10	4	40	185,49	1	14	1,83	25	7,32	92,10		
			1,3										

Tabla 6-13: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 GR con un 40% de recovery

7 membranas LG SW	pF, bar	qF, m3/h	qP, m3/h	recovery %	TDSP, ppm	BoronP, ppm	Average flux lmh	SEC, kWh/m3	T, °C	Pw, kW	% Pw	% qF	#DW
440 GR	61,93	16	6,4	40	95,54	0,6	22,4	2,32	25	14,85	194,35		1
	58,74	14	5,6	40	109,34	0,67	19,6	2,18	25	12,21	159,79		
	55,62	12	4,8	40	129,97	0,76	16,8	2,04	25	9,79	128,17		
	52,5	10	4	40	153,9	0,87	14	1,91	25	7,64	100,00		
	50,81	8,875	3,55	40	173,8	0,95	12,42	1,84	25	6,53	85,50		
	48,36	7,25	2,9	40	213,74	1,1	10,15	1,74	25	5,05	66,05		
	45,91	5,5	2,2	40	283,41	1,3	7,7	1,64	25	3,61	47,23		
	43,77	4	1,6	40	392,08	1,55	5,6	1,58	25	2,53	33,09		
		1,2											1

Tabla 6-14: Datos obtenidos para la membrana LG SW 440 SR con un 40% de recovery

7 membranas LG SW	pF, bar	qF, m3/h	qP, m3/h	recovery %	TDSP, ppm	BoronP, ppm	Average flux lmh	SEC, kWh/m3	T, °C	Pw, kW	% Pw	% qF	#DW
440 SR	67,71	16	6,4	40	76,19	0,46	22,4	2,52	25	16,13	198,62		1
	63,77	14	5,6	40	87,15	0,55	19,6	2,35	25	13,16	162,07		
	59,63	12	4,8	40	101,87	0,63	16,8	2,19	25	10,51	129,46		
	55,96	10	4	40	122,58	0,73	14	2,03	25	8,12	100,00		
	50,58	7,125	2,85	40	173,15	0,95	9,97	1,82	25	5,19	63,88		
	47,22	5,25	2,1	40	236,63	1,17	7,35	1,68	25	3,53	43,45		
	44,67	3,75	1,5	40	333,63	1,43	5,25	1,58	25	2,37	29,19		
			0,8										

Puede observarse que la mayoría poseen un rango de funcionamiento que evita errores de diseño aunque puedan incumplir la normativa de calidad actual en dicho rango, lo que puede resultar interesante revisar si en el futuro existe un cambio de normativa. Con estos datos se pueden elaborar gráficas que permitan valorar la aplicación de cada una de ellas dado un punto de operación, analizando un rango de funcionamiento acorde con las características del proyecto a estudio.

Para cada membrana se reportan por tanto un análisis de los parámetros energéticos, la comparación de los caudales qF en cada recovery, y un estudio de los parámetros de calidad del agua:

• Membrana LG SW ES

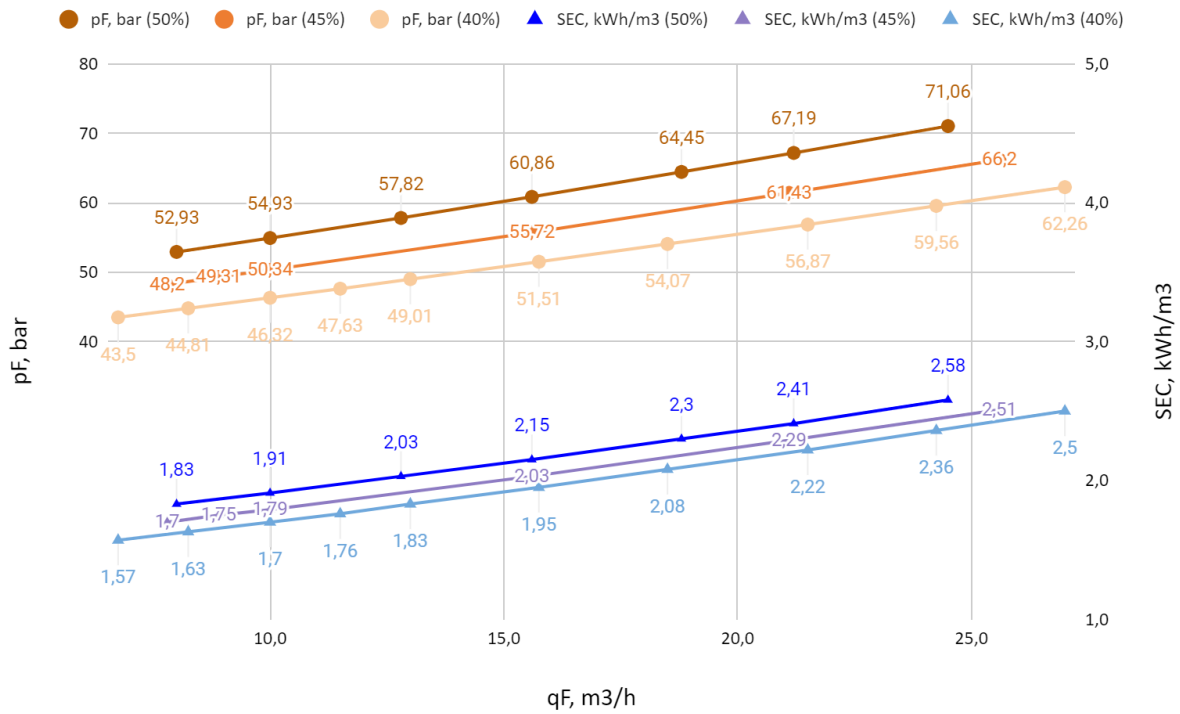


Figura 6-3: Parámetros energéticos SEC y pF en función de la qF para los 3 tipos de recovery (50, 45, 40) para la membrana LG SW 440 ES

qF para los diferentes recovery: 50, 45 y 40 % respectivamente

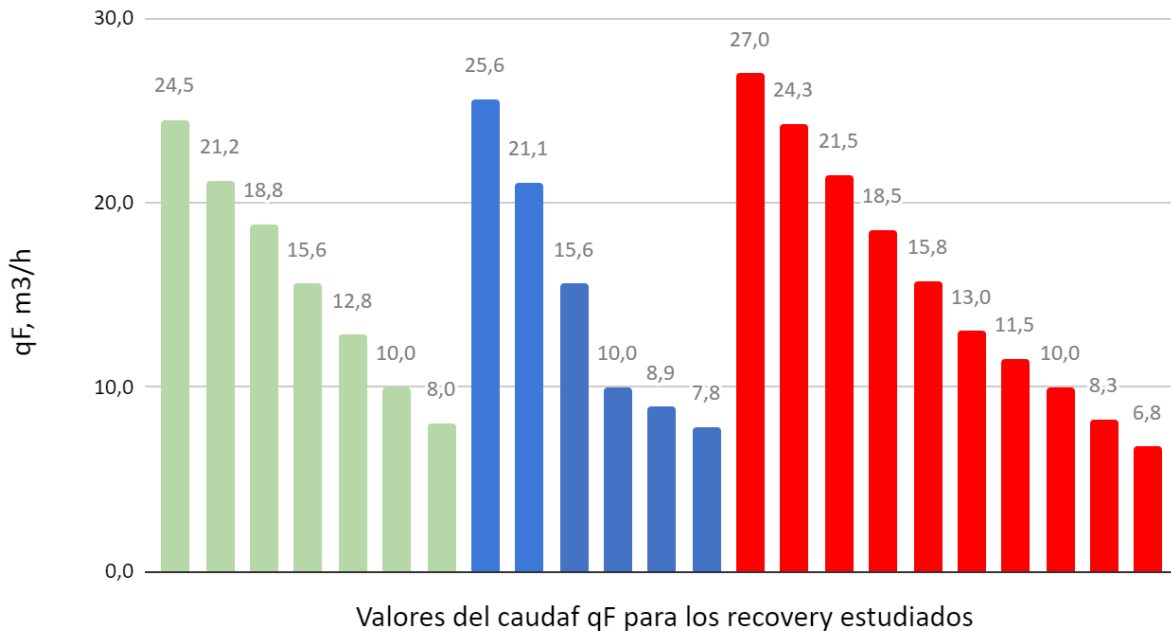


Figura 6-4: Parámetros energéticos sobre el consumo auxiliar de la membrana LG SW 440 ES. Se representa el qF analizado para cada valor de recovery estudiado: 50% verde, 45% azul, 40% rojo.

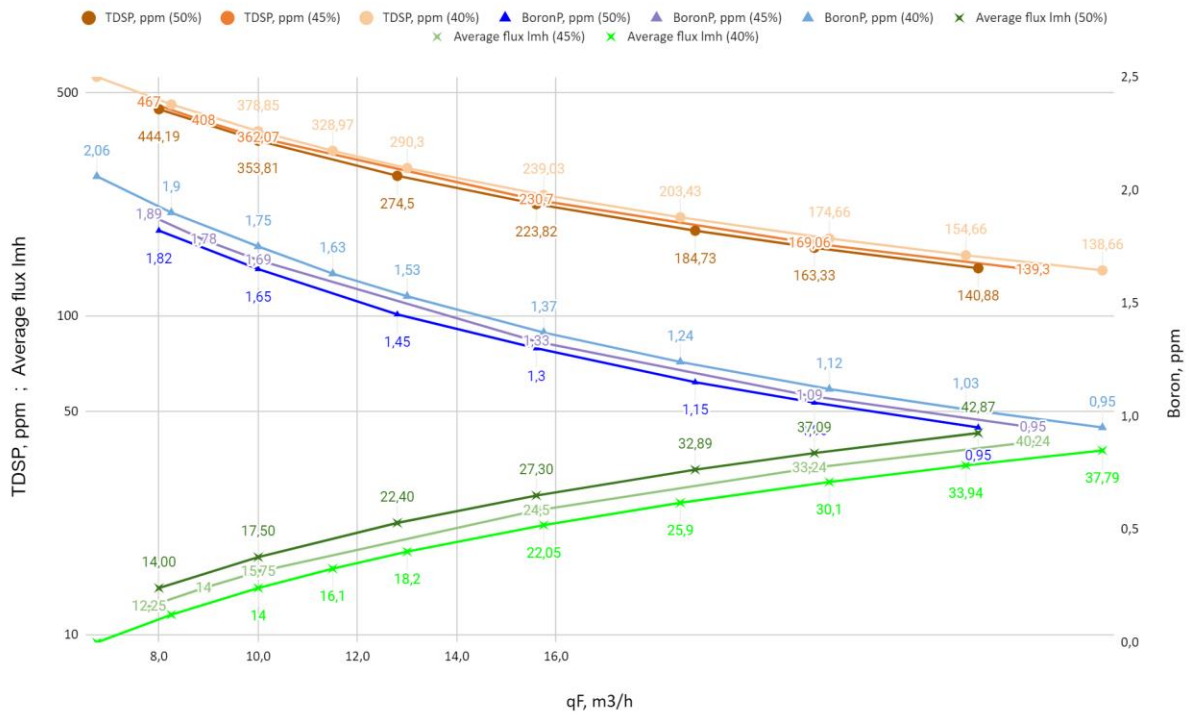


Figura 6-5: Parámetros de calidad del agua y riesgo de fouling para la membrana LG SW 440 ES

- Membrana LG SW 440 R

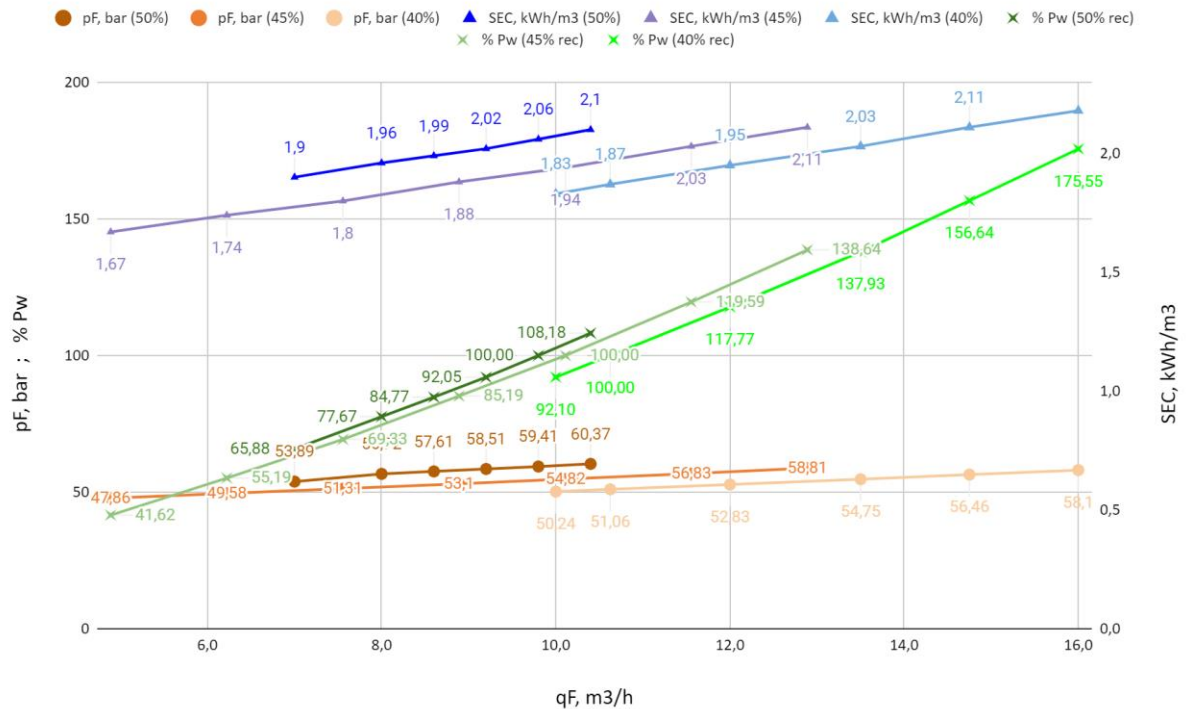


Figura 6-6: Parámetros energéticos SEC, %PW, pF en función de la qF para los 3 tipos de recovery (50, 45, 40) para la membrana LG SW 440 R

qF para los diferentes recovery: 50, 45 y 40 % respectivamente

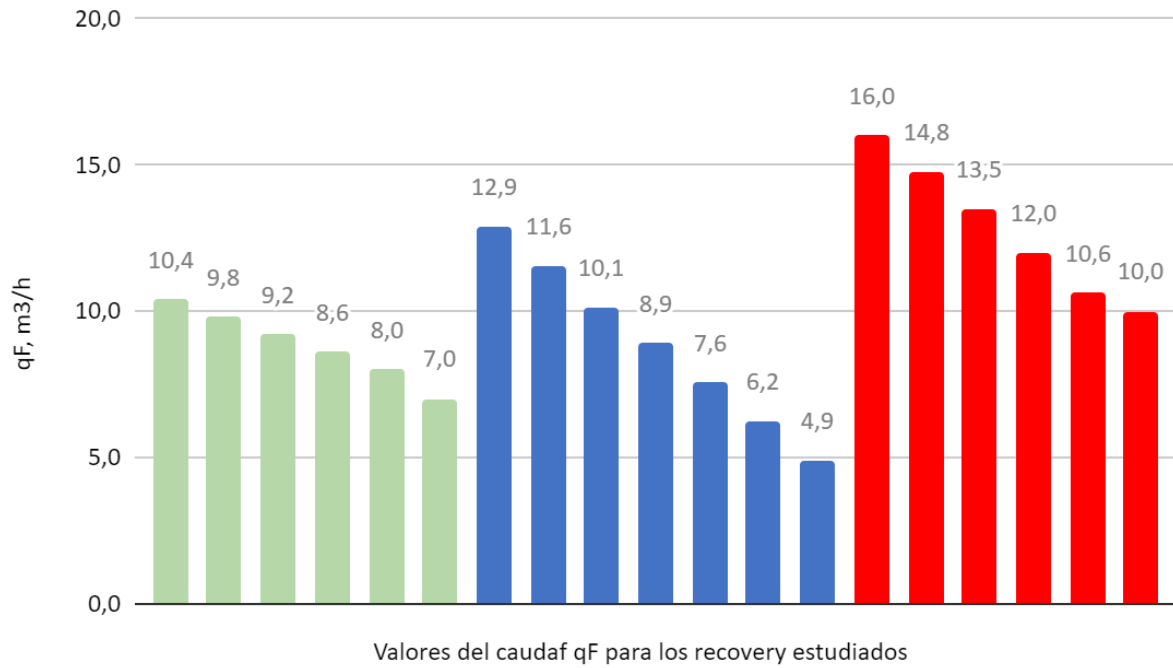


Figura 6-7: Parámetros energéticos sobre el consumo auxiliar de la membrana LG SW 440 R. Se representa el qF analizado para cada valor de recovery estudiado: 50% verde, 45% azul, 40% rojo.

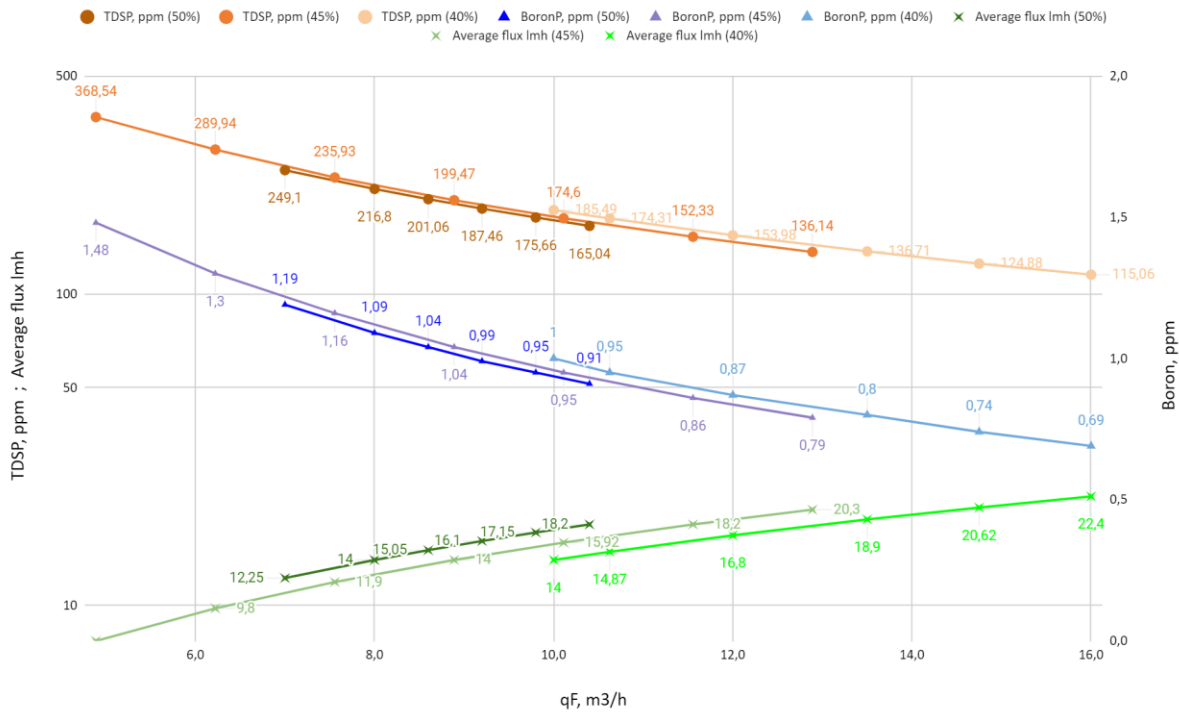


Figura 6-8: Parámetros de calidad del agua y riesgo de fouling para la membrana LG SW 440 R

- Membrana LG SW GR

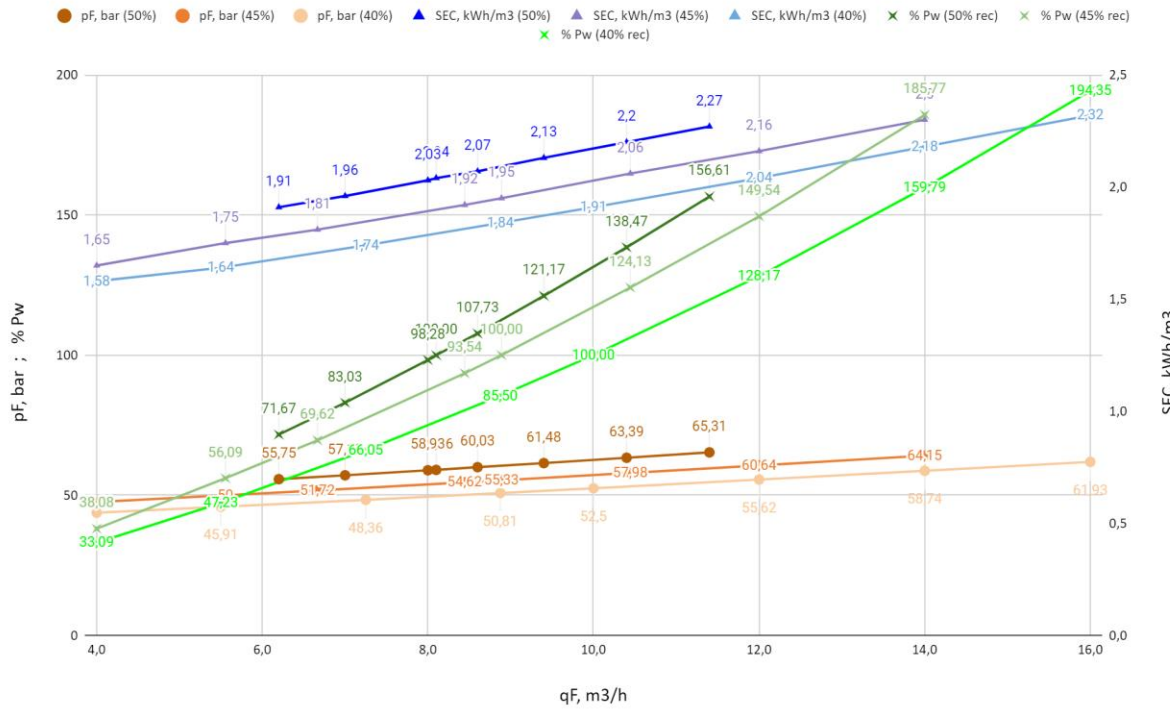


Figura 6-9: Parámetros energéticos SEC, %PW, pF en función de la qF para los 3 tipos de recovery (50, 45, 40) para la membrana LG SW 440 GR

qF para los diferentes recovery: 50, 45 y 40 % respectivamente

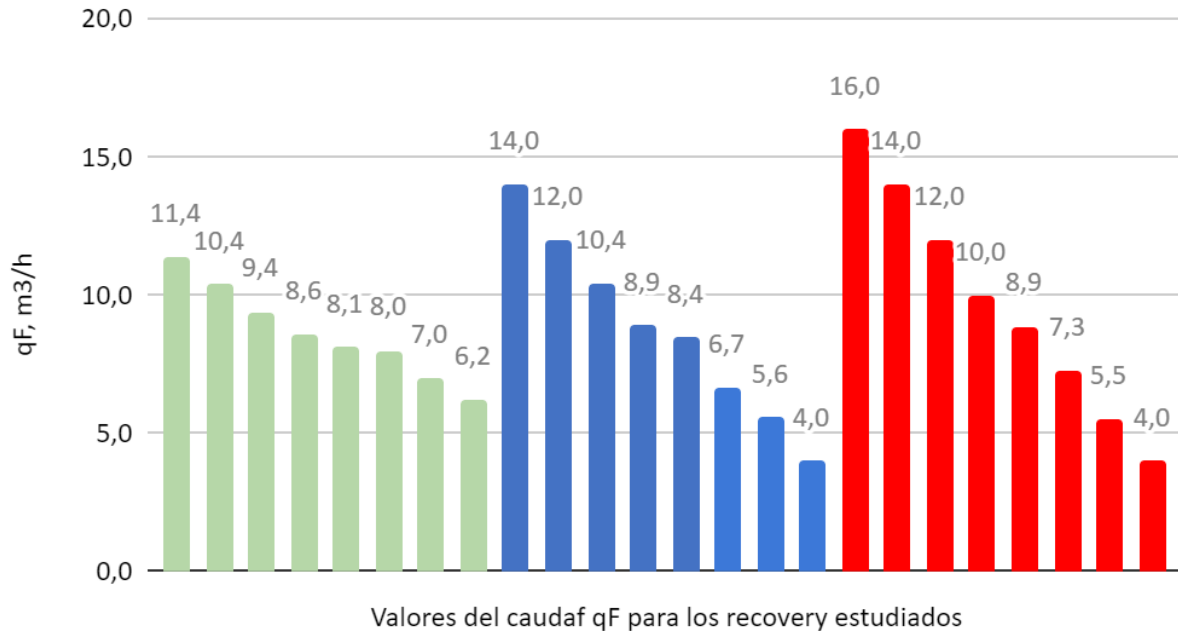


Figura 6-10: Parámetros energéticos sobre el consumo auxiliar de la membrana LG SW 440 GR. Se representa el qF analizado para cada valor de recovery estudiado: 50% verde, 45% azul, 40% rojo.

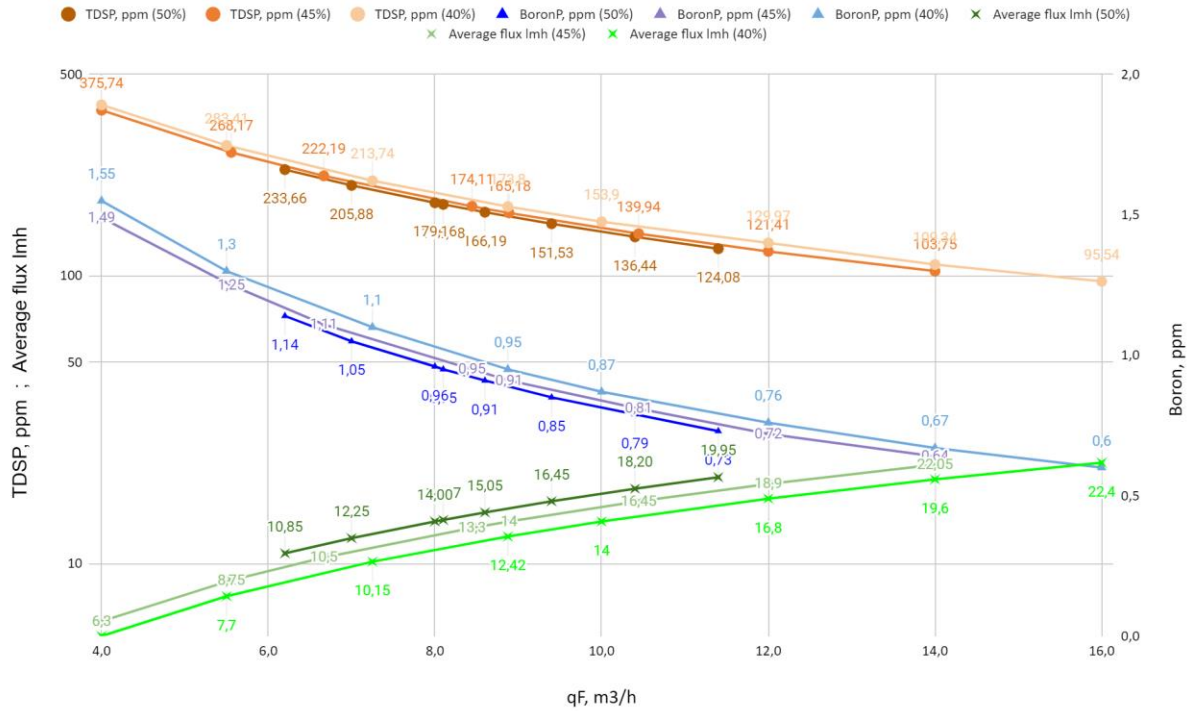


Figura 6-11: Parámetros de calidad del agua y riesgo de fouling para la membrana LG SW 440 GR

- Membrana LG SW SR

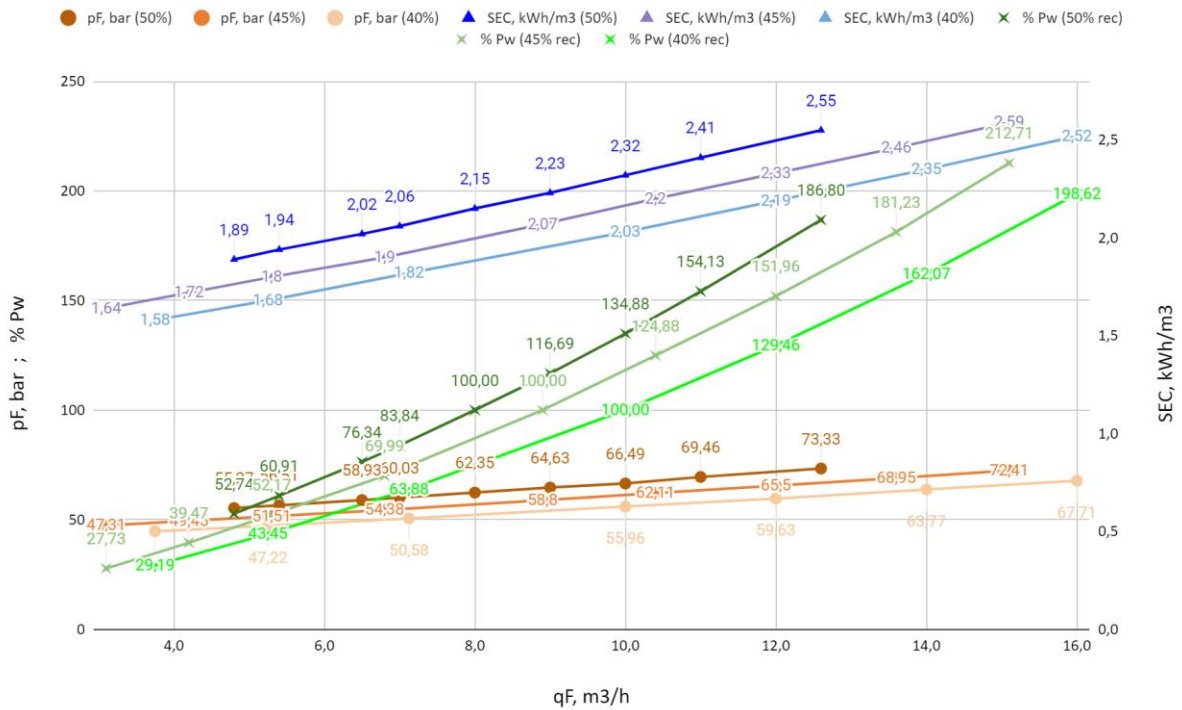


Figura 6-12: Parámetros energéticos SEC, %PW, pF en función de la qF para los 3 tipos de recovery (50, 45, 40) para la membrana LG SW 440 SR

qF para los diferentes recovery: 50, 45 y 40 % respectivamente

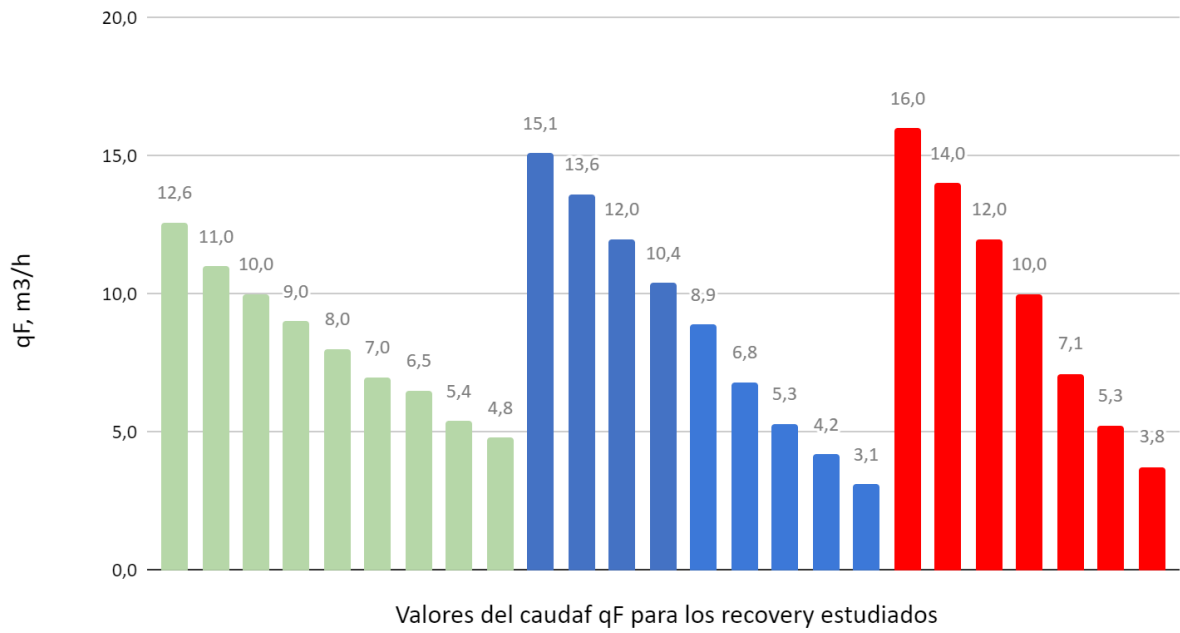


Figura 6-13: Parámetros energéticos sobre el consumo auxiliar de la membrana LG SW 440 SR. Se representa el qF analizado para cada valor de recovery estudiado: 50% verde, 45% azul, 40% rojo.

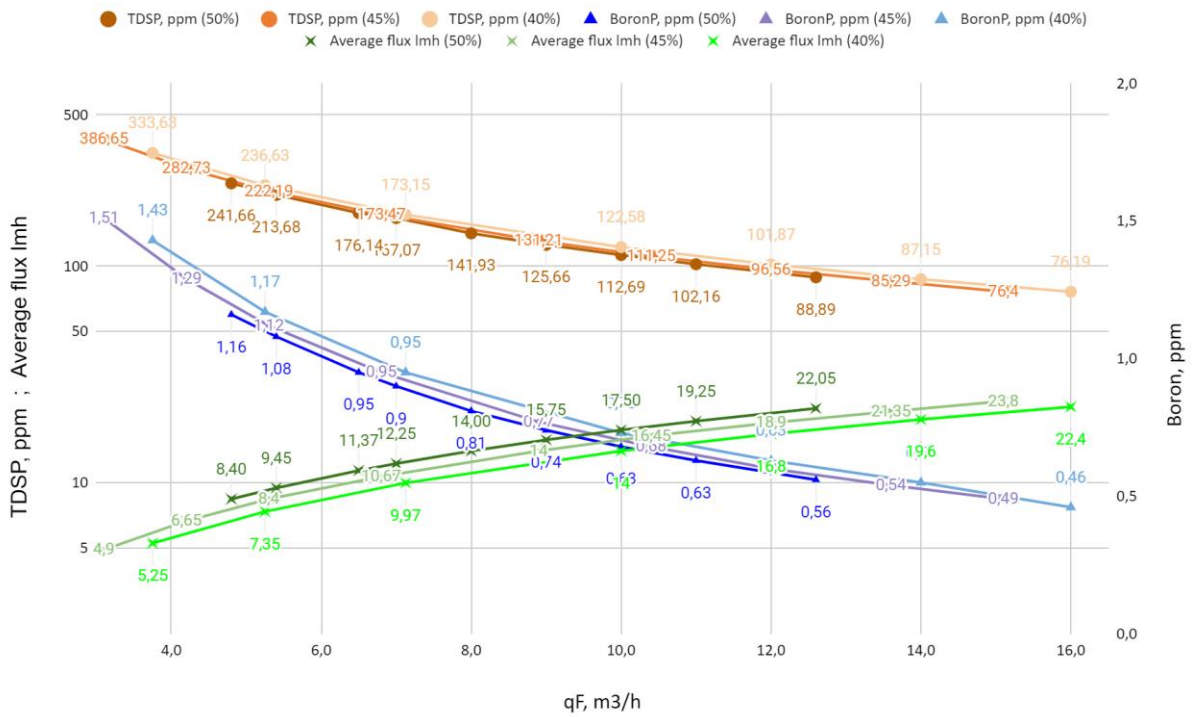


Figura 6-14: Parámetros de calidad del agua y riesgo de fouling para la membrana LG SW 440 SR

6.2 Obtención de conclusiones a partir de las gráficas

Tomando de ejemplo la gráfica de los parámetros energéticos de la membrana LG SW 440 SR, se fija la presión a un valor razonable y realista que cumpla los requerimientos de calidad del permeado con un buen valor de consumo energético específico. Seguidamente se estudia la variación del caudal de operación de manera que la planta siempre esté en funcionamiento en el máximo rango de valores de potencia disponible. Por ejemplo, sería deseable que el bastidor de membranas pueda operar en un rango de potencia eléctrica disponible desde el 100% hasta por ejemplo el 30%. Para conocer los rangos de operación reales se estudian las gráficas de los parámetros energéticos y de calidad del agua.

Por ejemplo, si se sitúa la pF fija en 55 bar para un recovery de 45%, el caudal obtenido es ~7.5 m3/h. Se observa que si se dispone de la potencia necesaria para mover más caudal, el recovery descendería, de manera que al alcanzar el 40% la planta seguiría en funcionamiento con un caudal de ~9.8 m3/h. Se puede observar con la curva %Pw correspondiente que la planta funcionaría al 100% aproximadamente.

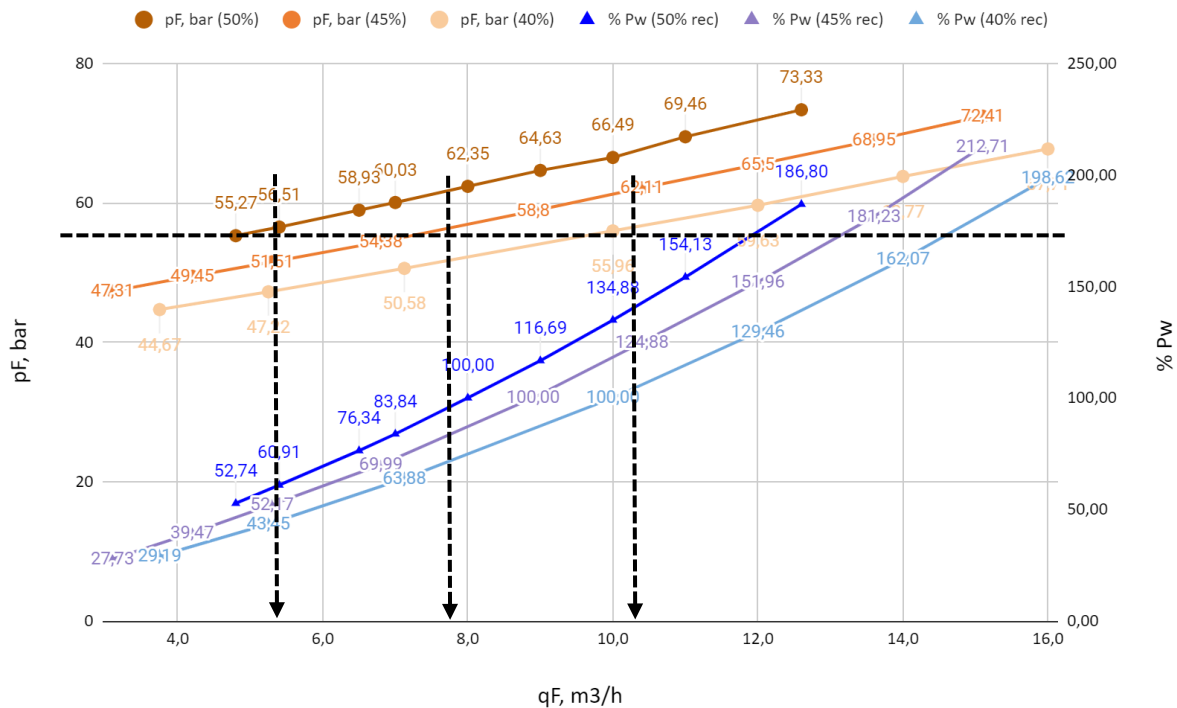


Figura 6-15: Zoom en la evolución del qF y %Pw al fijar una presión constante

De la misma manera, si se dispone de menos potencia, el caudal qF descendería, también a presión constante como se indica, hasta cruzar con la curva del recovery del 50%. Aquí se observa que el caudal producido estaría en torno a los 4.8 m3/h. Aquí la planta funciona con un %Pw del 52%. Justo en el límite inferior para que no ocurran errores de diseño como se observa en la tabla 6-8.

Con este razonamiento se puede elegir que membrana cumple con los requisitos necesarios para el estudio, pero queda por añadir el factor de calidad del agua, y es que es necesario que el permeado cumpla con los niveles regulados de TDS y concentración de boro, para lo cuales hace uso de la tercera grafica generada para cada membrana, la cual estudia los parámetros de calidad del agua. Con ella se establecen los límites a los que realmente puede funcionar la planta cumpliendo la normativa vigente a fecha de este informe.

Para el mismo ejemplo de membrana, las TDS no suponen un problema, pero si el boro, el cual para ciertos caudales (qF) y recovery dados puede situarse por encima del valor limite según normativa (0.95 ppm para el boro). Se estima por simplicidad, que queda limitado a 7 m3/h aproximadamente para cualquier recovery. Bajando de este valor se incumpliría la normativa de boro.

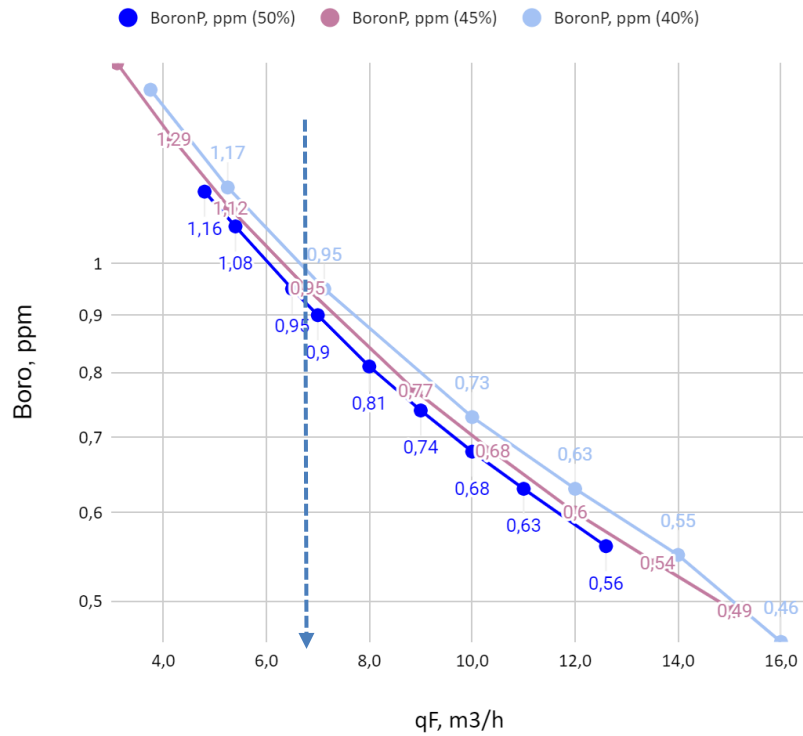


Figura 6-16: Zoom en la evolución de la concentración de boro vs caudal pF de la membrana LG SW 440 SR. Aquí se establece el límite de 0.95 ppm para el boro y su correspondiente caudal

Por tanto si se observan conjuntamente ambas gráficas, se establece que el valor mínimo de qF es de 7 m3/h, y este corresponde a 55 bar a un recovery del 45 % aproximadamente. Para este valor, se observa en la curva del %Pw que se estaría trabajando una capacidad del 70% aproximadamente.

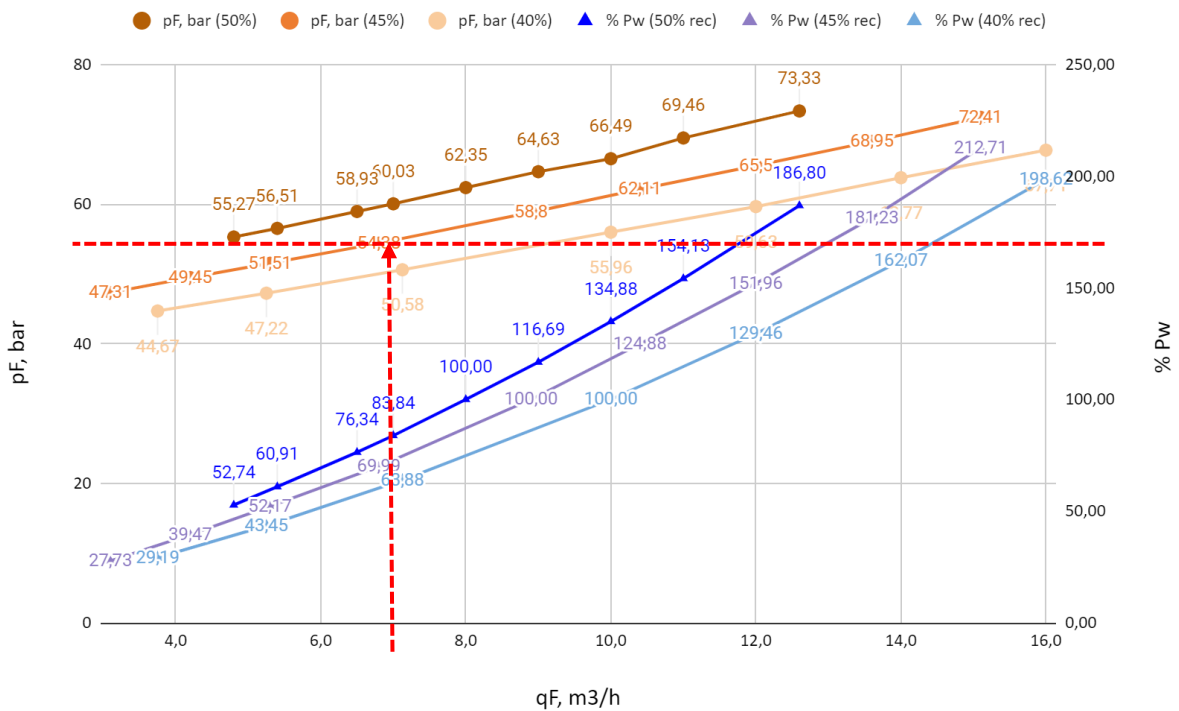


Figura 6-17: Valoración del límite de operación de la planta para cumplir la normativa de calidad descrita. De esta manera se pueden estudiar las diferentes membranas, elegir el punto de diseño que requiera la instalación

a estudiar, fijando la presión en este caso, y delimitar el rango de operabilidad de la misma.

Dada la naturaleza de este estudio, no se requiere buscar el límite superior del rango de operación, el cual se acotaría además de con los 'warnings' de diseño, con un estudio del consumo específico (SEC). Esto se debe a que al ser la fuente de energía un aerogenerador, interesa que se aproveche la máxima potencia disponible, lo cual sería distinto si se abasteciera de la red eléctrica, para ello sí que se debería estudiar que limite se impone en este consumo.

6.3 Simulación para una ubicación y aerogenerador dados

Para simular el comportamiento basado en datos reales, se parte de lo estudiado en la sección 4.3. Se puede conocer la potencia que se genera en una ubicación elegida, por un aerogenerador en particular, llamada *potencia_generada_hora_actual*.

En este ejemplo se elige el generador VESTAS_V112_3300, en Cádiz, en la hora 98 del año. Así la potencia en este instante es de 64.4 kW.

Se puede distribuir dicha potencia entre los equipos que conforman la planta, según la tabla 6-1. Estos son los equipos de bombeo y de control.

Los porcentajes de la tabla con los pesos correspondientes para cada equipo se introducen en la herramienta:

```
Cons_bomba_sumergible_captacion=0.04;
Cons_bomba_cent_bomb_interm=0.13;
Cons_bombas_lavado_filtro_arena=0.03;
Cons_HPP=0.68;
Cons_BP=0.06;
Cons_bomba_permeado=0.04;
Cons_aux=0.01;
```

Con estos datos se puede calcular la potencia que usa cada equipo realmente y proceder a su modelado. Para el caso de la bomba de alta presión (*HPP*):

```
Pot_HPP=potencia_generada_hora_actual*Cons_HPP
```

Con lo que se obtiene que la potencia disponible para la bomba *HPP* es de 43.79 kW.

El siguiente paso es conocer el caudal que mueve dicha bomba para así poder estudiar que membrana y en que rango de funcionamiento de esta interesa colocar la bomba, así como el número de ellas. Con la fórmula de la potencia de una bomba se despeja el caudal que mueve la bomba:

$$P_{W,HPP} = \frac{\left(\frac{q_{V,HPP}}{m^3 \cdot h^{-1} \cdot 3600} \right) \left(\frac{p_{F,HPP} - p^E}{bar \cdot (100)^{-1}} \right)}{\eta_{HPP} \cdot \eta_{eng}} kW$$

Para ello, se establece un valor típico de la presión a la entrada de la *HPP* de 2 bar (procedente del sistema de captación), y que se requiere que la eleve hasta los 55 bar.

```
p_F=2; %presión de entrada a la bomba (bar) - típico
p_HPP=55; %presión a la salida de la bomba de alta presión (bar)
```

También se establecen los rendimientos, con valores típicos para el rendimiento hidráulico y mecánico

proporcionado por el fabricante:

```
rend_HPP_ENG=0.98; % eficiencia del motor
rend_HPP=0.855; % rendimiento hidráulico proporcionado por el fabricante. En
este caso, media de los rendimientos de la bomba Danfoss APP 78/1500 a diferentes
rpm.
```

Reformulando la expresión para calcular el caudal (m³/h) que mueve la bomba a una *Pot_HPP* (potencia suministrada por el aerogenerador) dada en un instante del año:

$$q_{HPP} = (Pot_{HPP} * rend_{HPP} * rend_{HPP_ENG} * 3600) / ((p_{HPP} - p_F) * 100)$$

Obteniendo como resultado un caudal de 25.92 m³/h.

Para el estudio de la Booster Pump (BP), por simplificación, se considera que ésta no depende de la hora elegida, y que siempre aportará un salto de presiones de 2 bar constante.

$$q_C = q_{BP} = q_F - q_P$$

De manera similar a la HPP se calcula:

```
Pot_BP=potencia_generada_hora_actual*Cons_BP;
p_F_ERDout=53; % Presion del concentrado a la salida del bastidor de
membranas, que es qC o bien q_BP
% De nuevo, tomando valores de rendimiento típico
rend_BP=0.885;
rend_BP_ENG=0.98;
delta_p_BP=p_HPP-p_F_ERDout
```

Siendo el delta de 2 bar como se indicaba. Entonces:

$$q_{BP} = (Pot_{BP} * rend_{BP} * rend_{BP_ENG} * 3600) / ((delta_p_{BP}) * 100)$$

Obteniendo como resultado un caudal de 60.32 m³/h.

Por tanto a la batería de tubos de presión entra:

$$q_F = q_{HPP} + q_{BP}$$

Con un caudal total que entra al bastidor de membranas de 85.24 m³/h.

Resultaría ahora interesante conocer cuál es la producción de permeado para un tiempo dado, por ejemplo en el primer mes del año. Para ellos se analizan los datos de las primeras 744 horas del año, de los 31 días de enero. Los datos de la potencia de estas horas se evalúan en la figura 6-17: dada la potencia disponible se conoce el caudal q_F que mueve la bomba HPP, a la presión constante establecida de 55 bar, y con las rectas (asumidas lineales) del recovery, se calcula el permeado generado.

Para ello, siguiendo con el ejemplo de la membrana elegida, se puede evaluar el caudal q_F y su correspondiente recovery. Con los datos de la figura 6-17 sabemos que para 7m³/h el recovery es 45%, y para 10 m³/h aproximadamente 40%. Para el resto de los valores se asume una evolución lineal, por lo que la función de la recta queda:

$$Rec = \frac{10}{3} * q_F + \frac{65}{3}$$

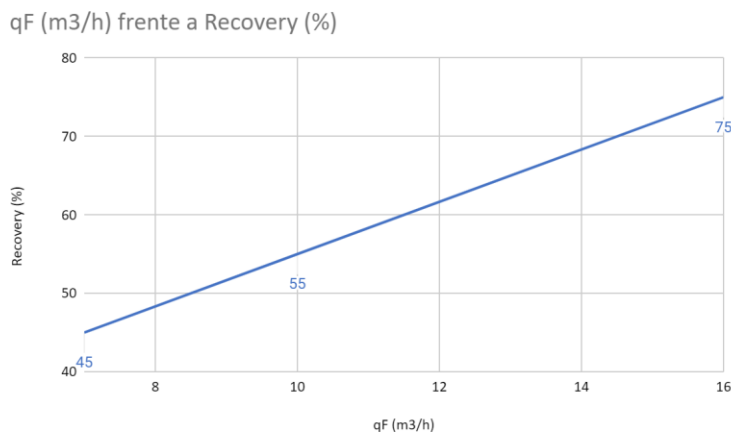


Figura 6-18: Evaluación del caudal qF en su correspondiente recovery

Por tanto si el caudal disponible es menor que 7 m³/h, no se obtiene permeado, mientras que si es mayor que éste se evalúa en la recta. Si el caudal excede los 16 m³/h entonces se abriría otro grupo de tubos de presión reduciendo a la mitad el caudal, y así continuamente hasta mantenerlo en el margen de entre 7 y 16 m³/h. Y se enumeran las veces que se han abierto más de un grupo.

Para obtener la potencia del mes deseado, se introduce en la herramienta el código que permita evaluar cualquier mes del año (del 1 al 12, enero a diciembre), sobre la variable ya conocida *potencia_generada*, la cual incluye los 8760 valores del año. Así:

```
% Se define la duración de cada mes:
dias_por_mes = [31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31];
% Se define el mes a evaluar
mes_deseado = 1; % Correspondiente a enero

% Se calcula la hora de inicio y fin para el mes deseado
inicio_mes = sum(dias_por_mes(1:mes_deseado-1)) * 24 + 1;
fin_mes = sum(dias_por_mes(1:mes_deseado)) * 24;

% Se extraen los valores correspondientes al mes deseado
potencia_generada_mes = potencia_generada(inicio_mes:fin_mes);
```

Esto permite obtener la variable *potencia_generada_mes* con 744 valores, para el caso de enero.

Se calcula entonces los caudales que mueven las bombas HPP y BP, que será el qF que se evaluó en la gráfica:

```
% para la HPP
Pot_HPP_mes=potencia_generada_mes*Cons_HPP;
q_HPP_mes=(Pot_HPP_mes*rend_HPP*rend_HPP_ENG*3600)/((p_HPP-p_F)*100);

% para la BP
Pot_BP_mes=potencia_generada_mes*Cons_BP;
q_BP_mes=(Pot_BP_mes*rend_BP*rend_BP_ENG*3600)/((delta_p_BP)*100)

% Entonces
qF_mes=q_BP_mes+q_HPP_mes;
```

Entonces, se condiciona el valor de *qF_mes*. Si éste es menor de 7 m³/h, no podrá usarse, ya que incumple límites de diseño y para solucionarlo se necesita más potencia, por lo que habría que añadir aerogeneradores adicionales, lo que queda fuera de este estudio.

Si el valor de *qF_mes* está entre 7 y 16 m³/h, se evalúa directamente en la recta de la figura 6-18. Para valores

superiores a 16 se volvería a incumplir límites de diseño y la solución sería dividir el caudal a varios grupos de tubos de presión (variable *divisiones*) con el mismo caudal el cual si se puede evaluar.

```
% Definir el vector de divisiones inicializado con unos (1)
divisiones = ones(size(qF_mes));

% Evaluar cada valor de qF_mes y aplicar las condiciones
for i = 1:numel(qF_mes)
    if qF_mes(i) <= 16
        divisiones(i) = 1; % Asignar cero si el valor es menor a 7
    elseif qF_mes(i) > 16
        divisor = ceil(qF_mes(i) / 16); % Calcular el divisor para que el resultado
        esté por debajo de 16, esto es, el numero de tubos de presión necesarios
        divisiones(i) = divisor; % Asignar el divisor en divisiones
    end
end

% El qF_mes a evaluar en la recta del recovery es por tanto:
qF_mes_ev=qF_mes./divisiones;
```

Estos valores de *qF_mes_ev* ya se encuentran preparados para ser evaluados en la recta del recovery:

```
% se definen los coeficientes de la recta de la figura
coeficientes = [10/3, 65/3];

% Se evalua qF_mes_ev en la recta para obtener recovery_mes
recovery_mes = polyval(coeficientes, qF_mes_ev);

% y se establece recovery_mes en 0 cuando qF_mes sea menor que 7
recovery_mes(qF_mes_ev < 7) = 0;
```

Este código permite obtener el recovery para cada qF introducido. Por tanto, finalmente, para calcular el valor del permeado a cada hora del año, se multiplica el qF horario por el recovery y por el número de divisiones que se han tenido que abrir para trabajar con el flujo adecuado:

```
qP_mes=qF_mes_ev.*divisiones*recovery_mes/100;
```

Así, se obtiene la gráfica siguiente con la distribución del permeado obtenido, que agregado suma 214195 m³/h:

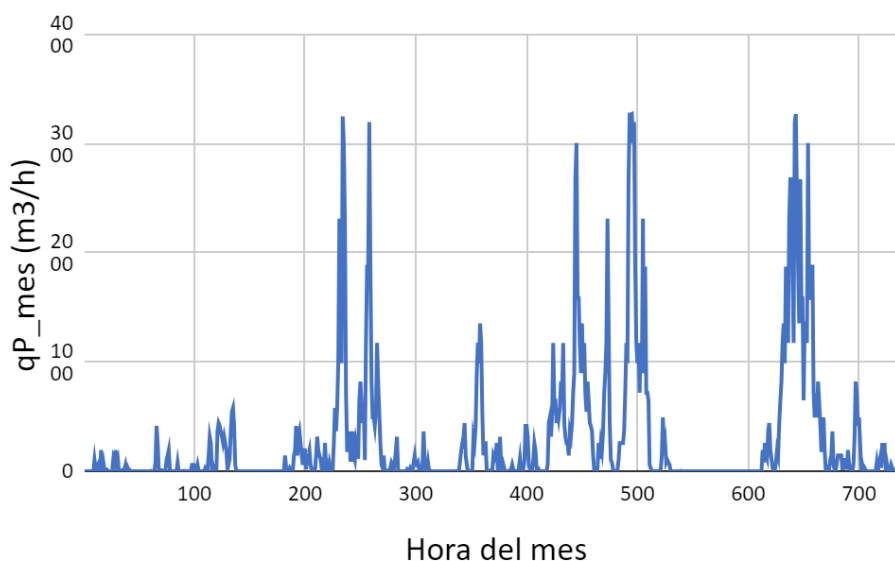


Figura 6-19: Distribución del permeado obtenido para las horas del mes de enero para este ejemplo en Cádiz

Cabe destacar, que en aras de la simplificación, se ha aceptado que podemos dividir libremente el flujo en grupos de tubos de presión, cuando en realidad no se dispone de infinitos tubos. Un análisis real debe tener en cuenta la disponibilidad de equipos, basándose no solo en los parámetros descritos en este estudio, sino también en factores económicos, de terreno, de tiempo... De modo que no es realista obtener divisiones mayores de 200 cuando la realidad, es la media es de 25 tubos de presión. De modo que aquí es primordial tener claro el proceso real de dimensionamiento de la planta.

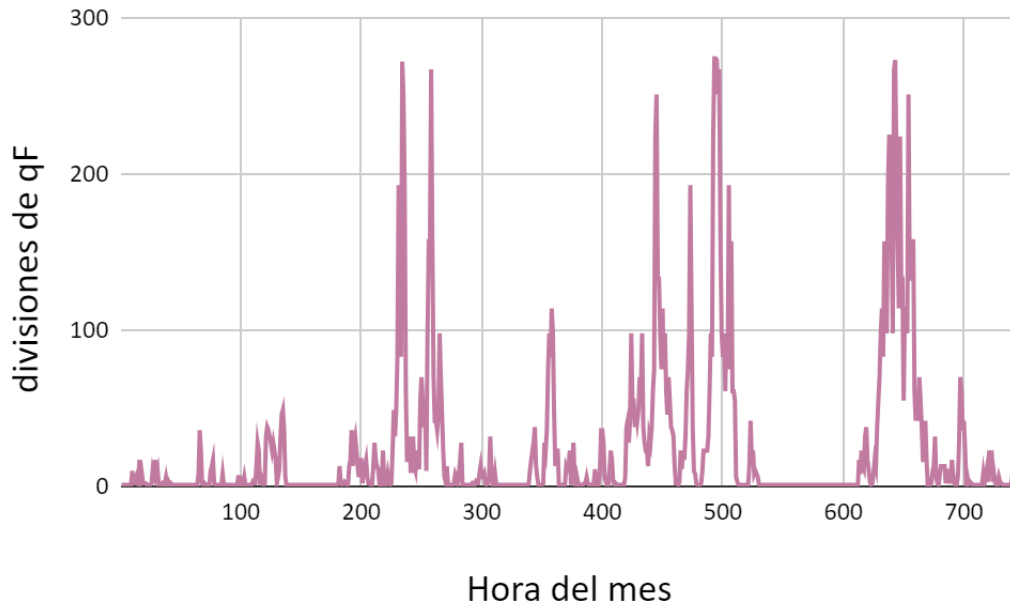


Figura 6-20: Divisiones necesarias del caudal qF para cumplir con los límites de diseño. Se observa que

Valorar otra ubicación con la herramienta es sencillo utilizando el código disponible en los anexos y siguiendo los pasos ya descritos. Resulta interesante el poder comparar diferentes ubicación y también aerogeneradores, como por ejemplo si se cambia de ubicación a la Playa de Vargas, disponible en la base de datos utilizada en este estudio. Esta presente un total de permeado producido de 345855 m^3/h

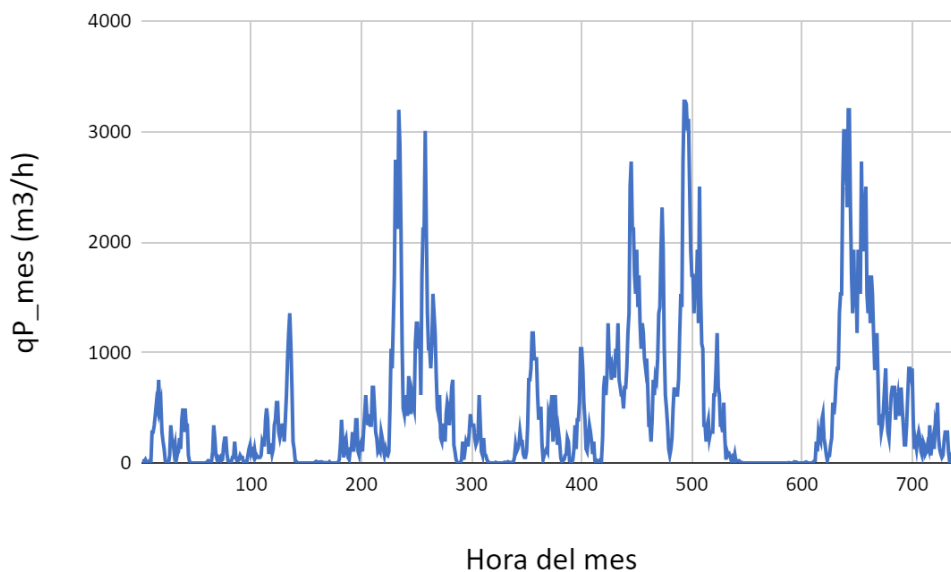


Figura 6-21: Distribución del permeado obtenido para las horas del mes de enero para Playa de Vargas (Gran Canaria)

Comparando ambas gráficas se puede observar ciertas similitudes: Alrededor de las 150h del mes (día 6 de enero) y sobre las 550 (día 22 de enero), ambas ubicaciones tuvieron falta de viento. Este mismo análisis sirve para ver que los picos de viento tuvieron lugar durante los mismo periodos, aunque se puede apreciar como en la segunda ubicación hay más cantidad de producción horaria. Hecho ya constatado si se comparan las producciones mensuales totales.

Estos reportes permiten amplias comparaciones y es el fundamento de la herramienta descrita en el estudio.

7 CONCLUSIONES

La herramienta permite valorar la eficacia del aerogenerador elegido, en la ubicación dada, para una membrana en estudio. Provee una primera interpretación de la dimensión que debe acometer el proyecto y de cierto grado de conocimiento para comenzar con una base.

Sin embargo, como se mencionaba con anterioridad, no es un proceso exhaustivo ya que se han tomado varias consideraciones simplificadoras que no reflejan con integridad cada parámetro que necesita ser iterado para obtener finalmente, datos sumamente precisos.

Un futuro usuario de esta herramienta deberá reportar datos no solo en distintas ubicaciones, si no con distintos modelos de aerogeneradores y número de ellos, no confiándose exclusivamente a la base de datos creada para este estudio, si no que considerará aquellas opciones más interesantes para él, y con dichos reportes podrá crear comparaciones, trabajar con las elecciones que mejor se adapten a su necesidad, y elegir con ellas las membranas que mejor se adapten a la dimensión de su proyecto.

En este estudio, no se ha tenido en cuenta la influencia de la T^a en el cambio de densidad del agua, que ha permanecido constante en aras de la simplicidad. También se ha establecido un porcentaje de la distribución de la potencia en una planta acorde a datos teóricos, pero un potencial usuario deberá realizar un estudio previo de la distribución de su planta en particular. Se ha admitido por simplificación que la presión de la BP es constante. También se ha trabajado para el ejemplo real con un único solo aerogenerador, de un fabricante en concreto, lo cual no refleja la realidad de una instalación eólica, por lo que se deberá tener en cuenta para su uso en una instalación real. Resultaría interesante que al igual que para los caudales que excedían los límites superiores se han agregado nuevos tubos de presión, para aquellos caudales inferiores a los límites del diseño, podría estudiarse la adición de más aerogeneradores.

Además, se han seguido unas pautas para la valoración de la membrana basadas en la normativa vigente a fecha de la realización de este informe. Normativa que puede verse modificada en el futuro y que el usuario debe valorar y tener en cuenta en su diseño.

Las simplificaciones adoptadas han sido implementadas con el propósito de establecer los fundamentos de la herramienta. Mediante el código proporcionado para la creación de bases de datos, interpolación y reportes; junto con la descripción del proceso de elección de membrana, debe servir de base para que la herramienta sea modificada, mejorada, y optimizada. Igualmente para el proceso de dimensionamiento de los bastidores de membranas.

8 ANEXOS

8.1 Anexo 1: Carga de datos en matlab

Carga de los datos del viento para las poblaciones

```
% Cargar archivo Excel
filename = 'Datos Ubicaciones.xlsx';

% Obtener nombres de hojas del archivo Excel
ubicaciones = sheetnames(filename);

% Crear estructura para almacenar los datos de viento de cada ubicación
viento = struct();

% Iterar sobre los nombres de las hojas
for u = 1:length(ubicaciones)
    % Obtener nombre de la ubicación
    ubicacion = ubicaciones{u};
    % u será el numero total de ubicaciones leídas

    % Leer datos de la hoja
    data = readtable(filename, 'Sheet', ubicacion);

    % Almacenar datos de viento de la ubicación en la estructura viento
    viento.(ubicacion) = data(:, 5); % redondear a 2 decimales
end
% Podemos consultar el dato de viento una hora especifica del año mediante
viento.P_Vargas(257)

%podemos imprimir por pantalla la lista de ubicaciones de estudio
fprintf("Las ubicaciones son las siguientes")
```

Carga de los datos de las potencias de los aerogeneradores

Se parte del archivo xlsx donde se recoge la informacion de la potencia generada en funcion del viento de cada modelo de aerogenerador. El archivo se nombra 'Curvas Aerogeneradores.xlsx'

```
% Leer los nombres de las hojas del excel
aerogeneradores = sheetnames('Curvas Aerogeneradores.xlsx');

% Inicializar estructura para almacenar los datos de los aerogeneradores
aerogenerador = struct();

% Recorrer cada hoja y almacenar los datos en la estructura
for i = 1:numel(aerogeneradores)
    % Leer datos de la hoja - se leen hasta 100 valores asegurando la
    % completa lectura de los datos
    datos = readmatrix('Curvas Aerogeneradores.xlsx', 'Sheet',
aerogeneradores{i}, 'Range', 'A2:B100');

    % Eliminar filas con valores NaN en las potencias . sobrantes debido a
    % leer 100 lineas
    datos(isnan(datos(:, 1)), :) = [];
```

```

% Almacenar datos en la estructura
aerogenerador.(aerogeneradores{i}).velocidad = datos(:, 1);
aerogenerador.(aerogeneradores{i}).potencia = datos(:, 2);

end
%podemos enseñar los modelos dentro del estudio imprimiendo
fprintf("Los modelos son los siguientes");
aerogeneradores

```

Obtención de la Potencia generada por cada velocidad del viento al año . Interpolacion

Para el proceso de interpolación se precisa primero tener el modelo de potencia del aerogenerador para cada velocidad de viento, y después aplicar ese modelo a los valores de viento de cada hora del año de la ubicación deseada.

```

% Pedir al usuario la ubicación y aerogenerador de interés
ubicaciones_disp = fieldnames(viento);
fprintf("Ubicaciones disponibles:\n")
disp(ubicaciones_disp);

ubicacion_actual = input("Seleccione una ubicación de la lista: ", 's');

aerogeneradores_disp = fieldnames(aerogenerador);
fprintf("Modelos de aerogeneradores disponibles:\n")
disp(aerogeneradores_disp);

aerogenerador_actual = input("Seleccione un modelo de aerogenerador de la
lista: ", 's');

% Obtener datos de viento de la ubicación seleccionada
datos_viento = viento.(ubicacion_actual);

% Obtener datos del aerogenerador seleccionado
datos_aerogenerador = aerogenerador.(aerogenerador_actual);
% Calcular la potencia generada por cada valor de viento
potencia_generada = interp1(datos_aerogenerador.velocidad,
datos_aerogenerador.potencia, datos_viento, 'linear', 0);

% Calcular la energía generada en un año
energia_generada = sum(potencia_generada)*8760;

% Mostrar los resultados
fprintf("La energía generada en un año por el aerogenerador %s en la ubicación
%s es %.2f kWh\n", aerogenerador_actual, ubicacion, energia_generada/1000)

```

Calcular la potencia generada por el Aerogenerador en la ubicación elegida en una hora concreta del año:

```

% Pedir al usuario el número de hora del año (de 1 a 8760)
hora_actual = input("Seleccione una hora del año (de 1 a 8760): ");

% Obtener la velocidad del viento en la ubicación seleccionada en la hora
seleccionada
velocidad_viento_hora_actual = viento.(ubicacion_actual)(hora_actual);

% Calcular la potencia generada a la velocidad del viento en la hora
seleccionada
potencia_generada_hora_actual = interp1(datos_aerogenerador.velocidad,
datos_aerogenerador.potencia, velocidad_viento_hora_actual, 'linear', 0);

```

```

% Mostrar los resultados
fprintf("La potencia generada por el aerogenerador %s en la ubicación %s en
la hora %d es %.2f kW\n", aerogenerador_actual, ubicacion_actual, hora_actual,
potencia_generada_hora_actual/1000)

```

Calcular la potencia que puede proveer el aerogenerador al 100, 75, 50 y 25 % de su capacidad nominal:

```

% Se genera una estructura que guarde los valores de estas potencias
potencia_generada_porcentaje = struct();
potencia_generada_porcentaje.p100=max(potencia_generada)
potencia_generada_porcentaje.p75=max(potencia_generada)*0.75
potencia_generada_porcentaje.p50=max(potencia_generada)*0.5
potencia_generada_porcentaje.p25=max(potencia_generada)*0.25

```

Y en el caso de que queramos valorar como se distribuye esta potencia en la planta, establecemos que unos de estos valores es la potencia generada_hora_actual:

```
potencia_generada_hora_actual=potencia_generada_porcentaje.p100
```

De lo contrario el usuario proveerá una hora que quiera valorar en la sección justo anterior.

Visualización de la interpolación

Se genera un gráfico que muestra la curva de potencia del aerogenerador seleccionado y su interpolación en la ubicación seleccionada.

```

% Obtener datos del aerogenerador seleccionado
datos_aerogenerador = aerogenerador.(aerogenerador_actual);

% Graficar datos originales del aerogenerador
figure;
plot(datos_aerogenerador.velocidad, datos_aerogenerador.potencia, 'o');
hold on;

% Calcular la potencia generada por cada valor de viento
potencia_generada = interp1(datos_aerogenerador.velocidad,
datos_aerogenerador.potencia, datos_viento, 'linear', 0);

% Graficar datos interpolados
plot(datos_viento, potencia_generada, '-');
legend('Datos originales', 'Interpolación');
xlabel('Velocidad del viento (m/s)');
ylabel('Potencia generada (kW)');
title(sprintf("Potencia generada por %s en %s", aerogenerador_actual,
ubicacion_actual));

```

8.2 Anexo 2: Modelado del sistema de bombeo

Modelado de los equipos del sistema de bombeo

Consumos típicos de los equipos (tanto por 1):

```

Cons_bomba_sumergible_captacion=0.04;
Cons_bomba_cent_bomb_interm=0.13;
Cons_bombas_lavado_filtro_arena=0.03;
Cons_HPP=0.68;

```

```

Cons_BP=0.06;
Cons_bomba_permeado=0.04;
Cons_aux=0.01;

```

Con estos datos se puede calcular la potencia que usa cada equipo:

Pot_HPP=potencia_generada_hora_actual*Cons_HPP

Modelado de la bomba de alta presión o High Pressure Pump - HPP Danfoss APP 78

De la tabla del fabricante, por simplicidad, se calcula el promedio de la eficiencia de la bomba independientemente de las rpm.

```

rend_HPP=0.855; %rendimiento hidráulico proporcionado por el fabricante
y se toma como hipótesis el rendimiento del motor típico:
rend_HPP_ENG=0.98; %eficiencia del motor
Sabido las potencias de entrada y salida de la bomba de alta presión:
p_F=2; %Presión de entrada a la bomba (bar) - típico
p_HPP=55; %Presión a la salida de la bomba de alta presión (bar)- típico

```

Reformulando la expresión para calcular el caudal (m³/h) que mueve la bomba a una Pot_HPP (potencia suministrada por el aerogenerador) dada en un instante del año:

$$q_{HPP} = (Pot_{HPP} * rend_{HPP} * rend_{HPP_ENG} * 3600) / ((p_{HPP} - p_F) * 100)$$

Modelado de la bomba de apoyo o Booster Pump - BP

Tomando el salto de presiones igual a 2 bar como hipótesis, el caudal que mueve con la potencia suministrada por el aerogenerador es:

```

p_F_ERDout=53; % Presión del concentrado a la salida del bastidor de membranas
% De nuevo, tomando valores de rendimiento típico
rend_BP=0.885;
rend_BP_ENG=0.98;

Pot_BP=potencia_generada_hora_actual*Cons_BP;
delta_p_BP=p_HPP-p_F_ERDout
q_BP=(Pot_BP*rend_BP*rend_BP_ENG*3600)/((delta_p_BP)*100)
Por tanto a la batería de bastidores entra:
q_F=q_HPP+q_BP

```

8.3 Anexo 3: Evaluación mensual

```

% Supongamos que potencia_generada es un vector de tamaño 8760 con los valores
de potencia para cada hora del año

% Se define la duración de cada mes (suponiendo 31 días para enero, marzo,
mayo, julio, agosto, octubre y diciembre)
dias_por_mes = [31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31];

% Mes a extraer
mes_deseado = 1; % Por ejemplo, marzo

% Calculo de los índices de inicio y fin para el mes deseado
inicio_mes = sum(dias_por_mes(1:mes_deseado-1)) * 24 + 1;
fin_mes = sum(dias_por_mes(1:mes_deseado)) * 24;

% Extraccion de los valores correspondientes al mes deseado
potencia_generada_mes = potencia_generada(inicio_mes:fin_mes);

% Se sabe que los consumos de HPP y BP son
Cons_HPP=0.68;
Cons_BP=0.06;

% los rendimientos se mantienen al igual que las presiones de entrada
% para la HPP
Pot_HPP_mes=potencia_generada_mes*Cons_HPP;
q_HPP_mes=(Pot_HPP_mes*rend_HPP*rend_HPP_ENG*3600)/((p_HPP-p_F)*100);

% para la BP
Pot_BP_mes=potencia_generada_mes*Cons_BP;
q_BP_mes=(Pot_BP_mes*rend_BP*rend_BP_ENG*3600)/((delta_p_BP)*100);

% Entonces
qF_mes=q_BP_mes+q_HPP_mes;

% Definicion del vector de divisiones inicializado con unos (1)
divisiones = ones(size(qF_mes));

% Se evalua cada valor de qF_mes y aplicar las condiciones
for i = 1:numel(qF_mes)
    if qF_mes(i) <= 16
        divisiones(i) = 1; % Asignamos cero si el valor es menor a 7
    elseif qF_mes(i) > 16
        divisor = ceil(qF_mes(i) / 16); % Se calcula el divisor para que el
resultado esté por debajo de 16
        divisiones(i) = divisor; % Asignacion el divisor en divisiones
    end
end

% El qF_mes a evaluar en la recta del recovery es por tanto
qF_mes_ev=qF_mes./divisiones;

% Se definen los coeficientes de la recta
coeficientes = [10/3, 65/3];

% Se evalua qF_mes_ev en la recta para obtener recovery_mes
recovery_mes = polyval(coeficientes, qF_mes_ev);

% Establecemos que el recovery_mes en 0 cuando qF_mes sea menor que 7
recovery_mes(qF_mes_ev < 7) = 0;

```



```
% Finalmente, el permeado es:
qP_mes=qF_mes_ev.*divisiones.*recovery_mes/100;

% Calculo del total de qP_mes
total_qP_mes = sum(qP_mes);

% Para crear un plot alternativo al de excel
horas_mes = 1:744;

figure;
yyaxis left
plot(horas_mes, qP_mes, 'b', 'LineWidth', 1.5)
hold on
plot(horas_mes, qF_mes, 'g', 'LineWidth', 1.5)
ylabel('Valores (qP_mes, qF_mes)')
ylim([0, max(qP_mes)]) %límite superior del eje izquierdo

% eje derecho
yyaxis right
plot(horas_mes, divisiones, 'r--', 'LineWidth', 1.5)
ylabel('Valores (divisiones)')
ylim([0, max(divisiones)]) % límite superior del eje derecho

xlabel('Hora del mes')
title('Gráfico de qP_mes, divisiones y qF_mes para cada hora del mes')
legend('qP_mes', 'qF_mes', 'divisiones')
```

REFERENCIAS

1. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/>. [En línea] 19 de 12 de 2019. [Citado el: 10 de 01 de 2023.] <https://www.eea.europa.eu/themes/energy/renewable-energy/renewable-energy-in-europe-key>.
2. European Wind Energy Association. Saving water with wind energy. *windeurope.org*. [En línea] 2014. [Citado el: 13 de 01 de 2023.] https://proceedings.windeurope.org/biplatform/rails/active_storage/disk/eyJmcmFpbHMlOmsibWVzc2FnZSI6IkJBaDdDRG9JYTJWNVNTSWhlV2xtWVdScWJ6ZzNlSG8zYUdSNk9HNHdOREpwWlcaWRqYzRiZ1k2QmtWVU9oQmthWE53YjNOcGRHbHZia2tpYltdsdWJHbHVhVHNnWm1sc1pXNWhiV1U5SWxOaGRtbHVAMTk.
3. LAZARD. Levelized Cost of Energy. *lazard.com/*. [En línea] 16, 04 de 2023. [Citado el: 30 de 04 de 2023.] <https://www.lazard.com/research-insights/levelized-cost-of-energyplus/>.
4. Wisner, Ryan, y otros. Expert Predictions about the Future of Onshore and Offshore Wind Energy. *National Renewable Energy Laboratory of the U.S. Department of Energy*. [En línea] 04 de 2021. [Citado el: 13 de 01 de 2023.] https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/expert_survey_results_slides.pdf.
5. National Renewable Energy Laboratory of the U.S. Department of Energy. 2011 Cost of Wind Energy. *National Renewable Energy Laboratory of the U.S. Department of Energy*. [En línea] 2011. [Citado el: 13 de 01 de 2023.] <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56266.pdf>.
6. Asociación danesa de la industria eólica. <http://windpower.org/>. [En línea] 05 de 2003. [Citado el: 23 de 01 de 2023.] <http://xn--drmstre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/powerreg.htm>.
7. WORLD ENERGY TRADE. *worldenergytrade.com*. <https://www.worldenergytrade.com/>. [En línea] 27 de 10 de 2020. [Citado el: 20 de 01 de 2023.] <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/5-componentes-cruciales-para-reducir-las-fallas-en-turbinas-eolicas-en-tierra>.
8. Center for Sustainable Systems, University of Michigan. Wind Energy Factsheet. *css.umich.edu*. [En línea] 09 de 2022. [Citado el: 23 de 01 de 2023.] https://css.umich.edu/sites/default/files/2022-09/Wind_CSS07-09.pdf. CSS07-09.
9. Lee, Joyce y Zhao, Feng. GLOBAL WIND REPORT 2022. *gwec.net*. [En línea] 04 de 04 de 2022. [Citado el: 29 de 01 de 2023.] https://gwec.net/wp-content/uploads/2022/04/Annual-Wind-Report-2022_screen_final_April.pdf.
10. Asociación Empresarial Eólica (AEE) . La eólica en España. *aeolica.org*. [En línea] 06 de 2022. [Citado el: 30 de 01 de 2023.] <https://aeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-espana/#:~:text=Con%2028.139%20MW%20de%20potencia,de%20cobertura%20de%20la%20demanda>.
11. Asociación Empresarial Eólica (AEE). Potencia instalada y generación. <https://aeolica.org/>. [En línea] 2021. [Citado el: 30 de 01 de 2023.] <https://aeolica.org/sobre-la-eolica/potencia-instalada-y-generacion/>.
12. La Energía eólica en Andalucía. *www.agenciaandaluzadelaenergia.es*. [En línea] 12 de 2022. [Citado el: 30 de 01 de 2023.] <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/es/informacion-energetica/energias-renovables/energia-eolica>.
13. Red Electrica de España. Nota de Prensa. *www.ree.es*. [En línea] 18 de 03 de 2022. [Citado el: 01 de 04 de 2023.] https://www.ree.es/sites/default/files/07_SALA_PRENSA/Documentos/2022/1803_NP_Avance_Canarias.pdf.
14. Asociación Empresarial Eólica (AEE). Potencia instalada y generación. *aeolica.org*. [En línea] 2021. [Citado el: 01 de 03 de 2023.] <https://aeolica.org/sobre-la-eolica/potencia-instalada-y-generacion/>.

15. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *miteco.gob*. [En línea] 10 de 12 de 2021. [Citado el: 23 de 01 de 2023.] <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-gobierno-aprueba-la-hoja-de-ruta-de-la-e%C3%B3lica-marina-y-las-energ%C3%ADas-del-mar-para-que-espa%C3%B1a-sea-el-referente-europeo-de-estas-tecnolog%C3%ADas/tcm:30-533937#prettyPhoto>.
16. Greenalia.es. *greenalia.es*. [En línea] 01 de 12 de 2021. [Citado el: 24 de 01 de 2023.] <https://greenalia.es/noticia/greenalia-avanza-en-el-desarrollo-de-gofio-el-primer-parque-eolico-marino-flotante-de-espana-tras-obtener-el-permiso-aeronautico-por-parte-de-aea/>.
17. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *idae.es*. [En línea] [Citado el: 24 de 01 de 2023.] <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/eolica/eolica-marina/eolica-marina-y-energias-del-mar>.
18. Asociación Empresarial Eólica (AEE). *aeolica.org*. [En línea] 30 de 01 de 2023. [Citado el: 30 de 1 de 2023.] <https://aeolica.org/sobre-la-eolica/potencia-instalada-y-generacion/>.
19. *Wind energy technologies integrated with desalination systems: Review and state-of-the-art*. Ma, Qingfen y Lu, Hui. 08 de 2021, *Desalination*, Vol. 277, págs. 274-280.
20. *Integration of Wind Energy and Desalination Systems: A Review Study*. Greco, F., Heijman, S.G.J. y Jarquin-Laguna, A. 2021, *Processes*, Vol. 9, pág. 2181.
21. BladeCleaning. *bladecleaning.com*. [En línea] 2017. [Citado el: 25 de 04 de 2023.] <http://www.bladecleaning.com/problematika.htm>.
22. iagua. El agua en Canarias: desalinización como solución a la escasez de recursos hídricos. [En línea] 17 de 10 de 2018. [Citado el: 27 de 03 de 2023.] <https://www.iagua.es/noticias/gestion-agua-etsii-upm/agua-canarias-desalinizacion-como-solucion-escasez-recursos-hidricos>.
23. La Provincia. Canarias, fuente de energía limpias. [En línea] 28 de 12 de 2018. <https://www.laprovincia.es/economia/2018/12/29/canarias-fuente-energia-limpias-9394244.html>.
24. Barrero F., Antonio. Este es el Top 10 de los fabricantes de aerogeneradores en 2021. [En línea] 26 de 08 de 2022. [Citado el: 27 de 03 de 2023.] <https://www.energias-renovables.com/eolica/este-es-el-top-10-de-los-20220522>.
25. The Wind Power. *thewindpower.net*. [En línea] [Citado el: 01 de 02 de 2023.] <https://www.thewindpower.net/>.
26. Fundación Aquae. Historia de la desalinización del agua. [En línea] 23 de 08 de 2021. [Citado el: 01 de 05 de 2023.] <https://www.fundacionaquae.org/historia-de-la-desalinizacion-del-agua/>.
27. Iberdrola. *iberdrola.com*. [En línea] [Citado el: 01 de 05 de 2023.] <https://www.iberdrola.com/innovacion/desalinizacion>.
28. Fundación Aquae. *fundacionaquae.org*. [En línea] 25 de 08 de 2021. [Citado el: 01 de 05 de 2023.] <https://www.fundacionaquae.org/wiki/cifras-sobre-la-desalinizacion/>.
29. iagua. *iagua.es*. [En línea] 19 de 11 de 2020. [Citado el: 01 de 05 de 2023.] <https://www.iagua.es/noticias/icex-espana-exportacion-e-inversiones/arabia-saudita-garantiza-abastecimiento-agua>.
30. Novo, Cristina. *iagua.es*. [En línea] 13 de 08 de 2020. [Citado el: 01 de 05 de 2023.] <https://www.iagua.es/noticias/redaccion-iagua/desalacion-garantiza-seguridad-hidrica-abu-dhabi>.
31. *water-technology.net*. *water-technology.net*. [En línea] <https://www.water-technology.net/projects/-ras-al-khair-desalination-plant/>.
32. OECD. *oecd.org*. [En línea] 07 de 11 de 2022. [Citado el: 01 de 05 de 2023.] <https://www.oecd.org/climate-action/ipac/practices/israel-s-sustainable-water-management-plans-d81db5f5/>.
33. Asociación Española de Desalación y Reutilización (AEDyR). *aedyr.com*. [En línea] 11 de 02 de 2019. [Citado el: 10 de 05 de 2023.] <https://aedyr.com/cifras-desalacion-espana/>. 1.
34. *The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity*. Joyner, Eke, y otros. 2020, Vol. 495.

35. Aemetblog. aemetblog.es. [En línea] 19 de 03 de 2023. [Citado el: 10 de 05 de 2023.] <https://aemetblog.es/2023/03/30/resumen-de-la-evolucion-de-las-precipitaciones-en-espana-del-22-al-28-de-marzo/>.
36. Ministerio para la Transición Ecológica. Embalses.net. [En línea] 28 de 05 de 2023. [Citado el: 10 de 05 de 2023.] <https://www.embalses.net/>.
37. *Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano*. MINISTERIO DE SANIDAD Y POLÍTICA SOCIAL. 28 de 11 de 2008.
38. Fundación Aquae . fundacionaquae.org. [En línea] 01 de 02 de 2021. [Citado el: 11 de 05 de 2023.] <https://www.fundacionaquae.org/wiki/plantas-desaladoras-en-espana/>.
39. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, MEDIO RURAL Y MARINO. acuamed.es. [En línea] 05 de 2010. [Citado el: 11 de 05 de 2023.] <https://www.acuamed.es/sites/default/files/publicaciones/desalobradoratabal.pdf>.
40. *REFLEXIONES SOBRE LAS PLANTAS DESALADORAS DE ANDALUCÍA*. Pulido, Antonio, Vallejos, Angela y Sola, Fernando. Málaga : s.n., 11 de 2015, Vol. 2.
41. Gobierno de Canarias. gobiernodecanarias.org. [En línea] [Citado el: 11 de 05 de 2023.] <https://www.gobiernodecanarias.org/medioambiente/materias/calidad-del-agua/el-agua-en-canarias/recursos-hidricos/desalacion/>.
42. iagua. iagua.es. [En línea] 07 de 2008. [Citado el: 11 de 05 de 2023.] <https://www.iagua.es/2008/07/canarias-cuenta-con-unas-330-desaladoras-291-de-ellas-por-osmosis-inversa/>.
43. Rubio, Yuri. lpgcsostenible.laspalmasgc.es. [En línea] 10 de 10 de 2020. [Citado el: 11 de 05 de 2023.] <https://lpgcsostenible.laspalmasgc.es/la-necesidad-del-plan-hidraulico-de-canarias-y-otras-formas-de-ahorrar-agua/>.
44. *La desalación de agua de mar en las Canarias Orientales: proceso histórico y condicionantes geográficos en los casos de Lanzarote y Fuerteventura*. González-Morales, Alejandro y Ramón-Ojeda, Antonio Ángel. 13, Jaén : s.n., 13 de 04 de 2019, pág. 20.
45. Asociación Española de Desalación y Reutilización (AEDyR). aedyr.com. [En línea] 03 de 02 de 2019. [Citado el: 14 de 05 de 2023.] <https://aedyr.com/principales-tecnicas-desalacion-cuales/>.
46. *Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México*. Dévora-Isiordia, Germán Eduardo, Gonzalez-Enriquez, Rodrigo y Ruiz-Cruz, Saúl. 08 de 2013, TECNOLOGIA Y CIENCIAS DEL AGUA, Vol. 4, págs. 27-46.
47. Roa, Franco. desalinizaciondelagua.wordpress.com. [En línea] 13 de 07 de 2014. [Citado el: 14 de 05 de 2023.] <https://desalinizaciondelagua.wordpress.com/2014/07/13/evaporacion-subita-por-efecto-flash-msf/>.
48. *Desalación del agua de mar para uso industrial*. Rojas Delgado, Mario, López Sandoval, Eduardo y Zaldívar Peña, Silvia. 25, Perú : s.n., 2007, pág. 188.
49. *Nanofiltration Operations in Nonaqueous Systems*. Peeva, L. G., Sairam, M. y Livingston, A. G. 09 de 07 de 2010, Comprehensive Membrane Science and Engineering, Vol. 2, págs. 91-113.
50. Telwesa. telwesa.com. [En línea] 24 de 02 de 2021. [Citado el: 15 de 05 de 2023.] <https://telwesa.com/ques-nanofiltracion/>.
51. *Electrodialisis: cómo funciona, ventajas, desventajas, usos*. Bolívar, Gabriel. 25 de 08 de 2020, Vol. 25.
52. Charisiadis, Christos. lenntech.es. [En línea] [Citado el: 15 de 05 de 2023.] <https://www.lenntech.es/processes/Brine-Treatment/conventional-brine-treatment/edr.htm>.
53. *Ósmosis inversa: cómo funciona, para qué sirve, ejemplos*. Bolívar, Gabriel. 08 de 06 de 2020.
54. *Aspectos energéticos de la desalación*. Fariñas, Manuel. Zaragoza : s.n., 2008, Ambienta, Vol. 80, págs. 42-48.
55. *DISEÑO DE PLANTAS EÓLICAS DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR: Propuestas de diseño*. García Rodríguez , Lourdes y Peñate , Baltasar. 06 de 05 de 2020.

56. LG Water Solutions. <http://www.lgwatersolutions.com/>. [En línea] 2016. <http://www.lgwatersolutions.com/>.
57. *Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano*. Ministerio de la Presidencia, Gobierno de España. 07 de 02 de 2003.