



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Instituto
Ingeniería
Energética



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

TECNOLOGÍA ENERGÉTICA PARA DESARROLLO SOSTENIBLE

“ESTUDIO DE NUEVA APLICACIÓN EÓLICA SIN USO DE ELECTRICIDAD PARA LA DESALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR”

AUTOR: PEREZ MAIZTEGUI, JON ANDER

TUTOR: ESCRIVÁ CASTELLS, FACUNDO ALBERTO

Curso Académico: 2018-19

“Fecha 07/2019”



Agradecimientos

“A mi familia, amigos y tutor.”



Resumen

Las desalinizadoras suponen una solución necesaria para aquellas zonas que sufren escasez hídrica, pero, a su vez, representan consumos y costes específicos elevados a la hora de producir agua desalada. Este proyecto propone una nueva solución renovable para dar apoyo a estas instalaciones, basándose en la energía eólica. La idea consiste en un acople mecánico entre el eje central de un aerogenerador y el sistema de bombeo de la planta, con la ayuda de un multiplicador y un sistema de transmisión mecánico para acondicionar la velocidad de giro del aerogenerador al caudal requerido por el sistema de bombeo. La eficiencia de la fuente energética en el sistema propuesto se ve optimizada frente al uso de un aerogenerador convencional, ya que en esta propuesta no se generarían pérdidas al convertir la energía mecánica en electricidad y viceversa. Entre los pasos llevados a cabo para desarrollar el proyecto, se encuentran un análisis del recurso eólico de la costa valenciana-alicantina y el diseño y modelado en 3D de las palas del aerogenerador, desarrollando programas en Excel y Matlab para facilitar futuros cálculos en caso de querer diseñar un nuevo aerogenerador con diferentes condiciones de funcionamiento. A su vez, se ha analizado el diseño de los demás componentes del aerogenerador de manera orientativa, aportando información para que en un futuro se pueda seguir desarrollando y estudiando esta tecnología. Por último, en el proyecto se realizan distintos estudios para determinar, por una parte, si la solución propuesta supondría ahorros en la factura eléctrica de la planta desalinizadora, además de una reducción de las pérdidas generadas en la red eléctrica por el efecto joule, y por otra parte se analizan el nivel de competitividad que obtendría el sistema frente a las demás tecnologías de generación y la rentabilidad del sistema propuesto.

Palabras Clave: *Energías Renovables, Desalinizadoras, Sostenibilidad, Aplicaciones de la energía eólica, Aerodinámica.*



Resum

Les desalinitzadores suposen una solució necessària per a aquelles zones que pateixen dèficit hídric, però, al mateix temps, representen elevats consums i despeses específiques a l'hora de produir aigua dessalada. Aquest projecte proposa una nova solució renovable per a donar suport a aquestes instal·lacions, basat en l'energia eòlica. La idea consisteix en un acoblament mecànic entre l'eix central d'un aerogenerador i el sistema de bombeig de la planta, amb l'ajuda d'un multiplicador de cabal requerit pel sistema de bombeig. L'eficiència de la font energètica en el sistema proposat es veu optimitzada en comparació a l'ús d'un aerogenerador convencional, ja que en aquesta proposta no es generarien pèrdues al convertir l'energia mecànica en electricitat i viceversa. Entre les passos duts a terme per a desenvolupar el projecte, trobem l'anàlisi del recurs eòlic de la costa valenciana-alacantina i el disseny i modelat en 3D de les pales de l'aerogenerador, desenvolupant programes en Excel i Matlab per a facilitar futurs càlculs en el cas de voler dissenyar un aerogenerador amb diferents condicions de funcionament. Al mateix temps, s'ha analitzat el disseny de la resta de components de l'aerogenerador, de manera orientativa, aportant informació per a que en un futur siga possible seguir desenvolupant i estudiant aquesta tecnologia. Per últim, en el projecte es realitzen diversos estudis per a determinar, per una banda, si la solució proposada suposaria un estalvi en la factura elèctrica de la planta desalinitzadora, a més d'una reducció de les pèrdues generades en la xarxa elèctrica per l'efecte joule. Per altra banda, s'analitzen el nivell de competitivitat que obtindria el sistema en comparació amb altres tecnologies de generació, així com la rendibilitat del sistema proposat.

Paraules clau: *Energies renovables, Desalinitzadores, Sostenibilitat, Aplicacions de l'Energia Eòlica, Aerodinàmica*



Abstract

Desalination plants are crucial for those areas suffering lack of water, yet, at the same time, these installations use up huge amount of energy, increasing the specific cost of the production of fresh water. This project suggests a new renewable solution to support the energy consumption of these water desalination plants, based on wind energy. The idea consists on a mechanic connection between the base shaft of the wind turbine and the pumping system by a gearbox and a mechanical transmission system, by the way, adjusting the rotating speed of the wind turbine shaft to the required rotating speed of the pumping system thanks to these equipments. The efficiency of the energy source is optimized in comparison to the use of a conventional wind turbine, taking into account that in this project there are not energy loses when converting mechanical power into electrical power and vice versa. Among the different steps carried so as to develop this project, the analysis of the wind resource in the valencian coast is found as well as the design and modelling of the wind turbine blade in 3D, developing Excel and Matlab programs to make easier further calculations in different working conditions. Moreover, the design of the other components of the wind turbine have been analyzed, giving information so as to being possible to continue developing and studying this technology. Finally, in this project, several studies have been done to determine, on the one hand, if the proposed solution would suppose savings in the desalination plants' electric bill, as well as a decrease in loses generated in the electric network due to the joule's effect. On the other hand, the competitiveness level that the system would obtain in comparison to other generation technologies and the profitability of the proposed system are analyzed.

Key Words: *Renewable Energy, Desalination Plants, Sustainability, Wind Energy Applications, Aerodynamics.*



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Justificación	4
1.3.1. Optimización del diseño de las palas según ubicación	4
1.3.2. Reducción de la demanda de la red eléctrica	4
1.3.3. Pérdidas en la transmisión	4
1.3.4. Optimización de la tarifa eléctrica	5
1.4. Alcance	5
1.5. Estructura del proyecto.....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Funcionamiento de una Planta Desalinizadora.....	7
2.1.1. Procesos de desalinización.....	7
2.1.2. Fases de una desalinizadora.....	9
2.1.3. Procesos post-desalación	10
2.2. Aerogeneradores.....	11
2.2.1. Definición.	11
2.2.2. Aplicaciones.....	11
2.2.3. Parámetros básicos de una pala de un aerogenerador.	12
2.2.4. Potencial Disponible en un Aerogenerador	15
2.2.5. Distribución de Weibull.....	21
2.2.6. Influencia de la Altura sobre el Suelo.....	22
2.2.7. Estimación de la Producción Energética	23
2.2.8. Tipos de Aerogeneradores	24
2.2.9. Sistemas de Regulación.....	25
2.2.10. Estrategias de Control	25
2.3. Mercado Eléctrico	26
3. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO	29
3.1. Situación de las plantas desalinizadoras	29
3.2. Diseño de las palas de un aerogenerador	31
3.2.1. Análisis del recurso eólico.....	31
3.2.2. Analizar los perfiles de pala o airfoils.....	35
3.2.3. Definir el aerogenerador (características y materiales).....	37

3.2.4.	Dimensionado de las palas del aerogenerador.....	40
3.2.5.	Realización en 3D en Autocad.....	43
3.3.	Descripción de los componentes adicionales	45
3.3.1.	Buje.....	45
3.3.2.	Góndola	46
3.3.3.	Torre	47
3.3.4.	Cimentación.....	50
3.3.5.	Multiplicadora	51
3.3.6.	Sistema de transmisión mecánica multiplicadora-bomba de agua	52
3.4.	Propuestas de control	52
3.5.	Estimación de la generación.....	54
4.	ANÁLISIS ECONÓMICO	57
5.	ANÁLISIS DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	61
6.	CONCLUSIONES	65
7.	LÍNEAS FUTURAS	69
8.	BIBLIOGRAFÍA	71
	ANEXOS	75



Índice de Gráficas

Gráfica 1: Evolución de la distribución de las fuentes renovables.....	2
Gráfica 2: Definición gráfica del Límite de Betz	19
Gráfica 3: Coeficiente de empuje frente al factor de inducción axial.....	21
Gráfica 4: Precios OMIE y su comparativa con el año actual	27
Gráfica 5: Distribución de Weibull para diferentes localidades valencianas y alicantinas	34
Gráfica 6: Distribuciones de Weibull promedio para diferentes alturas en la costa valenciana y alicantina	34
Gráfica 7: Curvas C_p - TSR para cada perfil de pala	37
Gráfica 8: Potencial de generación de un aerogenerador de 10m de radio.....	39
Gráfica 9: Variación de los ángulos de los perfiles de la pala	41
Gráfica 10: Variación de la cuerda del perfil de la pala a diferentes longitudes de la pala	42
Gráfica 11: Variación de la fuerza normal sobre la pala a diferentes longitudes de la pala.....	42
Gráfica 12: Generación anual para cada velocidad del viento y para cada caso analizado.....	56
Gráfica 13: Variación del factor de emisiones del mix eléctrico.....	62
Gráfica 14: Distribuciones de Weibull promedio para diferentes alturas en la costa valenciana y alicantina	65
Gráfica 15: Curva de potencia resultante del sistema propuesto.....	66



Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Proceso de osmosis inversa[6]	7
Ilustración 2: Proceso de electrodiálisis[7]	8
Ilustración 3: Proceso de destilación[8]	8
Ilustración 4: Proceso de congelación[9]	9
Ilustración 5: Sistema de captación de una desalinizadora [10]	9
Ilustración 6: Sistema de ultrafiltrado de una desalinizadora [11]	10
Ilustración 7: Sistema intercambiador de presión (SIP) [13].....	10
Ilustración 8: Líneas de presión sobre un aerogenerador [14]	11
Ilustración 9: Aplicaciones de sistemas eólicos [14]	12
Ilustración 10: Aerogeneradores sistema centralizado y distribuido [14]	12
Ilustración 11: Vectores de velocidad	13
Ilustración 12: Ángulos sobre el perfil de la pala	13
Ilustración 13: Vectores de las fuerzas sobre la pala	14
Ilustración 14: Curva Cp-TSR para diferentes tipologías de aerogeneradores [15].....	15
Ilustración 15: Transformación del tubo de flujo antes y después del aerogenerador [15].....	17
Ilustración 16: Áreas, velocidades y presiones sobre el tubo de flujo	17
Ilustración 17: Distribución de Weibull	21
Ilustración 18: Distribución de Weibull para diferentes factores de forma	22
Ilustración 19: Variación de la velocidad del viento según la altitud.....	22
Ilustración 20: Liberalización del mercado eléctrico [20]	26
Ilustración 21: Plantas desalinizadoras en España.....	29
Ilustración 22: Planta desalinizadora de Torrevieja (Alicante) [28]	30
Ilustración 23: Captura del mapa eólico en la costa valenciana/alicantina [34]	31
Ilustración 24: Tabla resumen de las fuentes de datos sobre el recurso eólico de la página web de Enair [35]	32
Ilustración 25: Aerogeneradores monopala, bipala y tripala [37]	38
Ilustración 26: Vibraciones y cambio de inclinaciones en aerogeneradores bipala [37]	38
Ilustración 27: Sección transversal de la pala del aerogenerador	43
Ilustración 28: Modelado de los perfiles de la pala para cada sección	43
Ilustración 29: Visualización final de las palas del aerogenerador	44
Ilustración 30: Visualización final del aerogenerador en 3D en AutoCad.....	44
Ilustración 31: Acoplamiento completo del sistema propuesto (aerogenerador-sistema de bombeo)	45
Ilustración 32: Estructura del buje [42].....	46
Ilustración 33: Sistema de anemómetros en un aerogenerador Vestas [45]	47
Ilustración 34: Torres de un aerogenerador [46].....	47
Ilustración 35: Torre de celosía	48
Ilustración 36: Torre de mástil tensado con vientos.....	48
Ilustración 37: Torre tubular de acero	49
Ilustración 38: Torre tubular de hormigón.....	49
Ilustración 39: Cimentación de un aerogenerador [48].....	50
Ilustración 40: Cimentación y anclaje de un aerogenerador en el fondo [49].....	51
Ilustración 41: Multiplicadora [50].....	51
Ilustración 42: Definición gráfica de la lubricación por barboteo [51]	52

Ilustración 43: Accionamiento para el control del ángulo de las palas [52] 53
Ilustración 44: Cambio del ángulo de las palas del aerogenerador [53]..... 53
Ilustración 45: Comparativa de las curvas de potencia ideal y la del sistema propuesto..... 54
Ilustración 46: Comparativa curvas de potencia ideal, propuesta y de un aerogenerador
convencional 55



Índice de Tablas

Tabla 1: Evolución de la potencia instalada en España en MW	2
Tabla 2: Precios regulados para el término de potencia para una tarifa 6.2.....	5
Tabla 3: Factor de forma para cada morfología de terreno.....	22
Tabla 4: Coeficiente de rugosidad del terreno [18]	23
Tabla 5: Plantas desalinizadoras en España	30
Tabla 6: Resumen de los factores de escala y forma para diferentes localidades valencianas y alicantinas	33
Tabla 7: Características de los perfiles de pala analizados	35
Tabla 8: Resumen de los resultados del análisis de los perfiles de pala	37
Tabla 9: Resumen de la generación de los diferentes casos analizados.....	55
Tabla 10: Distribución de la inversión de un aerogenerador convencional.....	57
Tabla 11: Precios regulado del término de potencia para una tarifa 6.2.....	58
Tabla 12: Resumen de los casos económicos analizados.....	60
Tabla 13: Distribución de ecopuntos por tecnología de generación	61



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

A finales del siglo XX, la sociedad empezó a concienciarse de la necesidad de fuentes alternativas de energía que fuesen de origen natural, sostenible y renovable. De esta manera, poder reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, y conservar las reservas de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural...). En el caso de España, estas fuentes de energía fueron impulsadas a través del Plan de Fomento de las Energías Renovables 2000-2010, donde se estableció como objetivo que el 30% de la generación eléctrica proviniese de fuentes renovables.[1]

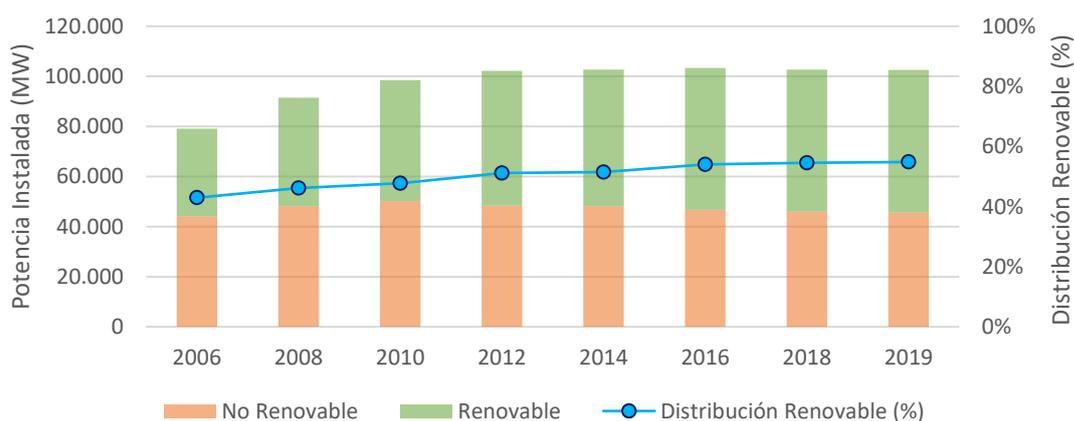
Además de este plan estratégico, se han desarrollado varios más actualizando los objetivos determinados anteriormente. El Plan de Energías Renovables en España (PER) 2005-2010 constituyó la revisión del Plan de Fomento de las Energías Renovables 2000-2010. Esta actualización, incorpora al plan estratégico nuevos objetivos, como el 29,4% de la generación eléctrica renovable y el 5,75% de biocarburantes en transporte, indicativos para el año 2010.[2]

Agotado el periodo de vigencia del PER 2005-2010, se desarrolló un nuevo plan energético acorde a los objetivos establecidos con la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (23 de abril de 2009). En este Consejo se establecieron los objetivos relativos al fomento del uso de energía renovable procedente de fuentes renovables, determinando objetivos mínimos vinculantes para el conjunto de la Unión Europea y para cada estado miembro. Para alcanzar los requisitos mínimos impuestos se debe llegar a producir el 20% del consumo final bruto de la Unión Europea de forma renovable (mismo requisito para España) y se debe superar una contribución del 10% de las fuentes renovables en el sector del transporte para el año 2020.[3]

En la siguiente tabla se muestra la evolución de la potencia de generación instalada en España en MW.[4] Se le ha añadido una gráfica para poder visualizar de forma más clara la distribución entre las tecnologías renovables y no renovables:

Tabla 1: Evolución de la potencia instalada en España en MW

	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2019
No Renovable	44.107	48.092	50.129	48.412	48.174	46.737	45.922	45.588
<i>Carbón</i>	11.393	11.325	11.342	11.064	10.936	10.004	10.030	9.683
<i>Fuel + Gas</i>	8.900	6.659	4.698	3.106	2.996	2.490	2.490	2.503
<i>Ciclo Combinado</i>	16.358	22.653	26.573	26.670	26.670	26.670	26.284	26.284
<i>Nuclear</i>	7.456	7.456	7.515	7.573	7.573	7.573	7.117	7.117
Renovable	35.013	43.442	48.390	53.817	54.489	56.543	56.805	57.023
<i>Hidráulica</i>	17.018	17.087	17.107	17.338	17.348	20.362	20.378	20.378
<i>Eólica</i>	11.416	16.133	19.707	22.758	23.028	23.050	23.507	23.605
<i>Solar FV</i>	125	3.351	3.829	4.532	4.646	4.686	4.714	4.869
<i>Solar Térmica</i>	11	61	532	1.950	2.299	2.304	2.304	2.304
<i>Cogeneración</i>	6.442	6.810	7.215	7.238	7.169	5.979	5.741	5.705
<i>Residuos Renovables</i>	-	-	-	-	-	162	162	162
Otros	2.389	2.632	2.852	3.014	3.094	1.367	1.368	1.378
TOTAL	81.509	94.166	101.371	105.243	105.758	104.647	104.094	103.988



Gráfica 1: Evolución de la distribución de las fuentes renovables

Como se puede observar en la gráfica anterior, la potencia instalada en España ha incrementado 22.480 MW desde 2006, de los cuales 22.010 MW son de origen renovable. La distribución renovable ha aumentado de esta manera un 12% frente a la potencia total instalada.

Hay que tener en cuenta que estos valores son de potencia instalada, lo que significa que la generación de electricidad no irá acorde con esta distribución, puesto que las fuentes de energías

renovables son la gran mayoría intermitentes, debido a que su generación está ligada a los recursos naturales (viento, radiación solar...). Uno de los mayores generadores de energía serán las plantas nucleares, las cuales funcionan de manera continua, ya que requieren de muchas actuaciones y tiempo para su parada y puesta en marcha.

Parte de la demanda eléctrica de la red, proviene de las centrales desalinizadoras. Estas plantas han sido desarrolladas para abastecer con agua dulce zonas con escasez hídrica. Al ser plantas con grandes consumos energéticos, se han desarrollado varios proyectos para abastecer esta demanda mediante energías renovables.

Uno de los ejemplos de este tipo de instalaciones es el proyecto Energías y Aguas del Pacífico (ENAPAC)[5], el cual desarrolla una planta desalinizadora autosustentable para la región de Atacama en Chile. La generación de base en un sistema fotovoltaico de 100 MW, con el cual es posible llegar a alcanzar una producción de 2.500 l/s.

Existen varias otras instalaciones parecidas a la anterior descrita, pero todas estas tienen algo en común. Estas instalaciones generan energía eléctrica para después convertirla en energía mecánica para los sistemas de bombeo de la planta, generando diversas pérdidas tanto en la transmisión como en la conversión de la energía.

A lo largo de la historia, la sociedad ha utilizado los recursos naturales para producir energía mecánica, como es el caso de las forjas, donde aprovechaban el potencial de la corriente de los ríos, o los molinos de viento que aprovechaban la velocidad del viento para moler el grano. Todas estas aplicaciones se basan en aprovechar de forma directa la energía mecánica, ya sea del río, del viento u otra fuente natural.

Teniendo en cuenta toda esta información, en este proyecto se propone una nueva aplicación de las fuentes renovables, en este caso la eólica, para aprovechar de forma directa la energía mecánica del viento en el sistema de bombeo de una desalinizadora.

1.2. Objetivos

La finalidad de este proyecto es proponer una instalación renovable, de fuente eólica, para dar aporte al sistema de bombeo de una desalinizadora. Los objetivos del proyecto se describen individualmente en la siguiente lista:

- Optimizar el diseño de las palas del aerogenerador para unos parámetros específicos de generación, teniendo en cuenta el recurso eólico de la zona de la costa valenciana y alicantina.
- Reducir la demanda de la red eléctrica. El conjunto de todas las instalaciones de autoconsumo o generación distribuida reduce considerablemente la demanda total de la red. Además, las pérdidas generadas en la transmisión eléctrica, desde la generación hasta el consumidor, se reducirían considerablemente, disminuyendo aún más la demanda de la red y mejorando la eficiencia del sistema eléctrico.
- Reducir la tarifa eléctrica de la desalinizadora. Estos sistemas son grandes consumidores de energía eléctrica y demandan potencias muy elevadas. Tanto con la idea propuesta, como con cualquier otro sistema de autoconsumo, se puede reducir la tarifa eléctrica. Por una parte, rebajando la potencia contratada de la planta se reduciría el término de potencia. Por otra parte, se reduce el consumo de la energía proveniente de la red, reduciendo el término de energía.

- Potenciar el uso de las fuentes renovables, para poder reducir el impacto medioambiental generado por las emisiones de gases de efecto invernadero. De esta manera se evita el uso de combustibles fósiles manteniendo las reservas energéticas de fuentes no renovables, frenando el cambio climático.

1.3. Justificación

1.3.1. Optimización del diseño de las palas según ubicación

La idea consiste en diseñar un aerogenerador adaptado al recurso eólico de la ubicación analizada. Esta optimización permitirá al aerogenerador actuar con más rapidez que los aerogeneradores ordinarios. Los aerogeneradores necesitan una velocidad mínima de 3-4 m/s para poder empezar a generar energía. El aerogenerador se diseñará de manera que en el caso de que el recurso eólico sea escaso, la generación esté optimizada.

1.3.2. Reducción de la demanda de la red eléctrica

Al reducir la demanda en el punto del suministro, se reduce la demanda de generación debido a dos factores. Por un lado, la propia demanda de la red eléctrica se reduce gracias al sistema propuesto (autoconsumo). Por otro lado, se reducen las pérdidas en la red de transmisión eléctrica equivalentes a la reducción de la demanda.

1.3.3. Pérdidas en la transmisión

Las pérdidas en la transmisión son un factor importante a tener en cuenta en los sistemas de autoconsumo, puesto que, teniendo en cuenta la ley de Ohm, al reducir la corriente que circula por las líneas eléctricas, las pérdidas por efecto Joule se reducen al cubo:

$$P_{perdida} = R \cdot I^2 \quad (1)$$

Un ejemplo para poder considerar la magnitud de estas pérdidas se describe a continuación.

La potencia eléctrica instalada en el sistema peninsular a día de 31 de diciembre de 2018 era de 98.593 MW, siendo la energía eólica la segunda fuente de energía con la mayor potencia instalada. Su contribución es del 23,4%, equivalente a 23.070 MW.

Hay que tener en cuenta que la mayoría de estas instalaciones consisten en grandes campos eólicos, normalmente lejos de los consumidores. Debido a las distancias del sistema de transmisión y de la distribución de la energía eléctrica, aproximadamente el 16,3% de la energía generada se perderá, teniendo en cuenta una eficiencia del sistema de transmisión del 90% y un 93% para el sistema de distribución.

Fijando el precio de la energía en 7,8 c€/kWh y teniendo en cuenta un caso hipotético en el que todos los sistemas eólicos del país estén generando a su potencia nominal, a la hora se perderían 3.760 MWh, equivalente a 293.311,98 €. Llevando estos valores a la unidad, por cada megavatio generado se pierden 163 kWh, lo que supone un coste de 12,71 €.

Por ello, se sugiere promover el autoconsumo o la generación distribuida. De esta manera, se conseguirá reducir considerablemente las pérdidas eléctricas desde la generación al consumidor, optimizando el uso de la energía y reduciendo las sobrecargas de las redes eléctricas, reduciendo a su vez su mantenimiento.

1.3.4. Optimización de la tarifa eléctrica

Como se ha descrito anteriormente, el proyecto propuesto reducirá el término de potencia y de energía de la tarifa eléctrica, junto con el impuesto eléctrico (5,1127%) aplicable a los anteriores términos y también el IVA (21%). Para el cálculo del IVA, hay que considerar todos los conceptos de la factura eléctrica, incluyendo el impuesto eléctrico.

Para el cálculo del ahorro, se ha tenido en cuenta una tarifa eléctrica 6.2, puesto que la potencia instalada en la planta será suficientemente alta como para tener una conexión directa con la red de alta tensión, entre 36kV y 72,5kV. Esta tarifa está regulada por el estado mediante la *Orden TEC/1366/2018*, que a su vez se referencia a la *Orden IET/107/2014* en el *Capítulo II / Artículo 2* para determinar los términos de energía y de potencia. Esta legislación se actualiza el último mes de cada año.

En la siguiente tabla figura el término de potencia para cada periodo para una tarifa 6.2:

Tabla 2: Precios regulados para el término de potencia para una tarifa 6.2

Periodo	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Precio (€ / kW /año)	22,158	11,088	8,115	8,115	8,115	3,702

Por cada kilovatio reducido por el nuevo sistema implantado, al año el término de potencia se reduciría en 61,29 €, siendo 64,42 € al incluir el impuesto eléctrico y 77,95 € incluyendo todos los impuestos (eléctrico y IVA). En caso de que la tarifa eléctrica del punto de suministro sea una 6.1, la reducción de la factura sería de 137,70 € por cada kilovatio reducido.

Además, también se ahorrará en el término de energía. Para calcular el ahorro se debería tener en cuenta el periodo en el que se ha ahorrado la energía y cuanta energía se ha ahorrado. Aproximadamente se podría llegar a ahorrar 9,92 c€/kWh, teniendo en cuenta tanto el impuesto eléctrico como el IVA.

1.4. Alcance

El proyecto se basa en la propuesta de una nueva aplicación de la energía eólica para el apoyo del sistema de bombeo de una planta desalinizadora. Para ello, antes de la fase de diseño, se ha realizado un estudio sobre el recurso eólico en la costa valenciana/alicantina.

La parte del diseño del aerogenerador se ha centrado específicamente en el diseño de las palas del aerogenerador, optimizando el diseño según los resultados obtenidos desde el análisis del recurso eólico. En el proyecto no se diseñan los demás componentes del aerogenerador como el buje, la góndola o la torre, pero se hace una breve descripción de cada una y se especifican las condiciones de diseño de cada una. Futuros proyectos podrían complementar este trabajo para que se pueda llegar a poner en práctica.

Finalmente, se ha realizado un estudio económico estimando el presupuesto del proyecto y analizando su viabilidad económica. También se ha realizado un estudio sobre la reducción de emisiones de gases invernadero y sus beneficios ecológicos.

1.5. Estructura del proyecto

En este apartado se describe la estructura de los siguientes apartados de este proyecto. El trabajo comienza con la presentación de un marco teórico, donde se describen por una parte las desalinizadoras (funcionamiento y procesos), por otra los aerogeneradores (propiedades físicas, tipologías de aerogeneradores, cálculos para calcular la generación, límites físicos...) y por otra el mercado eléctrico. Este último aporta información para los cálculos a la hora de estudiar los ahorros económicos y la rentabilidad del proyecto.

Una vez descrito el marco teórico, se define la situación de las plantas desalinizadoras y la importancia de estas instalaciones, puesto que, en zonas con escasez hídrica, como puede ser la costa valenciana-alicantina, resultan extremadamente necesarias.

Una vez descrita la situación de las plantas desalinizadoras, se desarrolla el diseño del aerogenerador, realizando diversos estudios como el del recurso eólico o el de los perfiles de las palas. Gracias a estos estudios y definidos las necesidades y las características que se le quieren imponer al sistema, se realiza el cálculo de las dimensiones de las palas del aerogenerador y se modela, mediante un modelo 3D en AutoCad.

Además de las palas, también se analizan otros componentes adicionales y necesarios para el correcto funcionamiento y acople de la instalación, como el buje, la góndola, la torre, la multiplicadora o el sistema de transmisión mecánica.

Al definir todos los componentes, se desarrolla un sistema de control y se estima la generación anual del sistema eólico mediante la curva de potencia y la distribución de Weibull de las velocidades del viento.

Teniendo en cuenta esta estimación y la inversión de la instalación, se ha desarrollado un análisis económico y se ha analizado la competitividad que podría alcanzar esta nueva aplicación eólica en el mercado frente a las demás fuentes de generación energética.

Antes de analizar las conclusiones del trabajo, se ha desarrollado un análisis sobre el impacto medioambiental que puede generar la instalación de la turbina propuesta.

El trabajo concluye con las conclusiones del proyecto, junto con un último apartado donde se definen las líneas futuras del proyecto hasta que pudiese ser implantada en una planta desalinizadora.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Funcionamiento de una Planta Desalinizadora.

Las plantas desalinizadoras son industrias dedicadas al tratamiento de agua salada con el fin de reducir y eliminar su contenido en sal, es decir, desalinizar. Según la Real Academia Española (RAE), “la desalación consiste en la actividad tendente a quitar toda o la mayor parte de la sal disuelta en agua para convertirla en potable, o en todo caso, susceptible de uso productivo o recreativo”.

2.1.1. Procesos de desalinización

Actualmente existen diversas técnicas para llevar a cabo el proceso de desalinización y algunas otras están en proceso de estudio y desarrollo. En los siguientes apartados se describen varios sistemas existentes de desalinización, mediante membrana, destilación o congelación.

Procesos de membrana

Son procesos de desalación que necesitan membranas para filtrar y poder reducir el nivel salino de la disolución. Los procesos más conocidos que requieren membranas son la osmosis inversa y la electrodiálisis.

- **Osmosis Inversa**

Es la técnica más utilizada para llevar a cabo la desalinización. Consiste en hacer fluir el agua desde zonas con mayor concentración de sales a zonas con menor concentración, proceso que se consigue gracias a la aplicación de una presión externa mayor a la presión osmótica de la disolución, debido a que por naturaleza el proceso es inverso (osmosis).

Para el proceso, se requiere la participación de una membrana semipermeable de acetato de celulosa que divide la zona salina a la zona desalinizada, permitiendo el intercambio de forma selectiva.

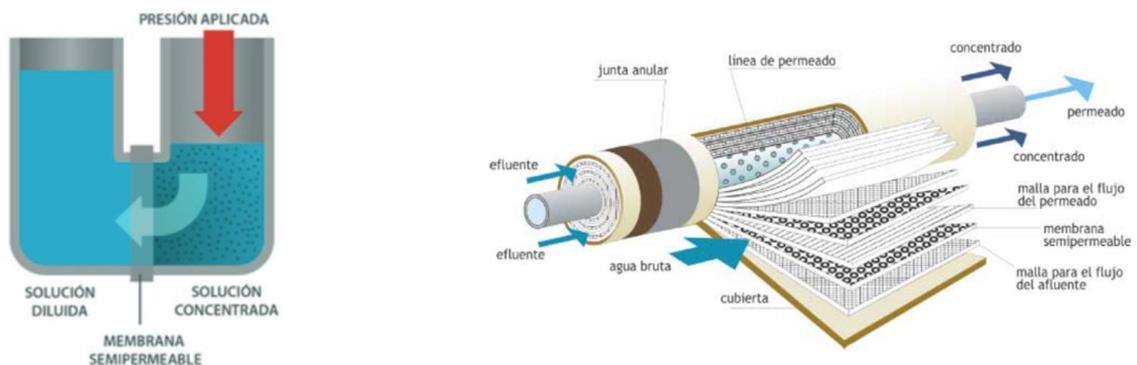


Ilustración 1: Proceso de osmosis inversa[6]

- **Electrodiálisis**

A diferencia de la técnica anterior, esta no precisa de presión para su funcionamiento, sino que requiere electricidad. Mediante la aplicación de campos eléctricos, se consigue que los iones de la disolución iónica (agua salada) migren hacia el ánodo o hacia el cátodo, según su carga. Las membranas se utilizan como selectores, según las dimensiones de los poros, consiguiendo apartar las partículas salinas como se puede observar en la siguiente imagen.

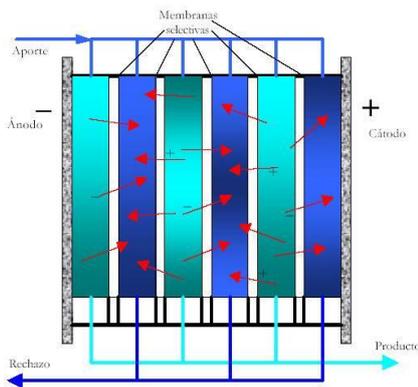


Ilustración 2: Proceso de electrodiálisis[7]

Procesos de destilación

Estos procesos se basan en el cambio de fase del agua. Consisten en calentar la disolución de manera que se extrae el agua de la disolución al evaporarse, gracias a la diferencia entre las temperaturas de ebullición del agua (100°C a presión de una atmósfera) y de la sal (punto de fusión 801°C a presión de una atmósfera).

Una vez el agua evaporada, se vuelve a condensar, obteniendo agua con un contenido reducido de sales. Hoy en día, gracias al desarrollo de las tecnologías renovables, se consigue realizar estos procesos mediante la energía proveniente del sol, directamente mediante las tecnologías termo-solares o mediante la energía eléctrica procedente de placas fotovoltaicas.

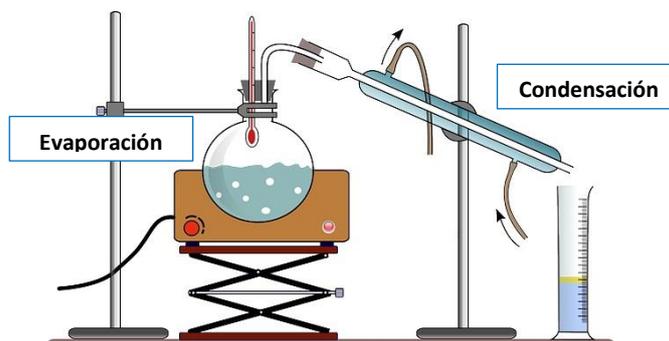


Ilustración 3: Proceso de destilación[8]

Estos procesos se suelen realizar en cascada y por etapas, de manera que se aumenta la eficiencia del sistema mediante el aprovechamiento de la energía extraída del vapor para la condensación.

Procesos de congelación

Estos procesos consisten en pulverizar agua salada en una cámara refrigerada y con unas condiciones de presiones específicas. De esta manera, se generan cristales de agua sobre las sales. Estos cristales de agua pura se extraen para después fundirlos. Este proceso requiere menos energía que el proceso de destilación, pero necesita un control constante y exacto de la temperatura y presión en el ambiente. Este hecho, lo hace menos competitivo a nivel industrial ante los demás procesos.

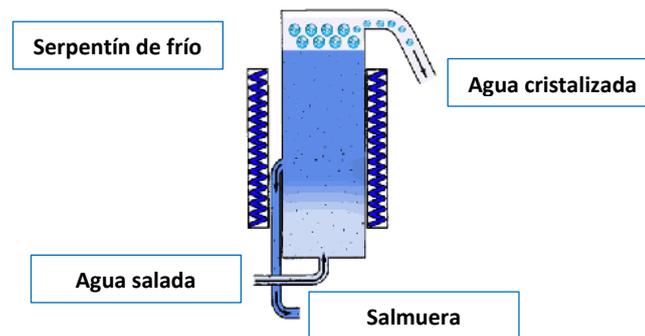


Ilustración 4: Proceso de congelación[9]

Como se ha descrito anteriormente, el método más utilizado para desalinizar agua es la osmosis inversa. Este es el método que utilizan la mayoría de las plantas desalinizadoras para conseguir agua desalada.

2.1.2. Fases de una desalinizadora

En los siguientes apartados se describirán las diferentes secciones de una planta desalinizadora y la funcionalidad de cada una de ellas.

Captación

Consiste en la primera fase del proceso de desalación. Este sistema está compuesto por una torre de toma, utilizada para evitar la entrada de objetos (arena o algas) u otras sustancias del fondo marino; por un inmisario submarino, estructura que comunica la torre con la cámara de captación, y la propia cámara de captación, donde se almacena el agua para su posterior bombeo.

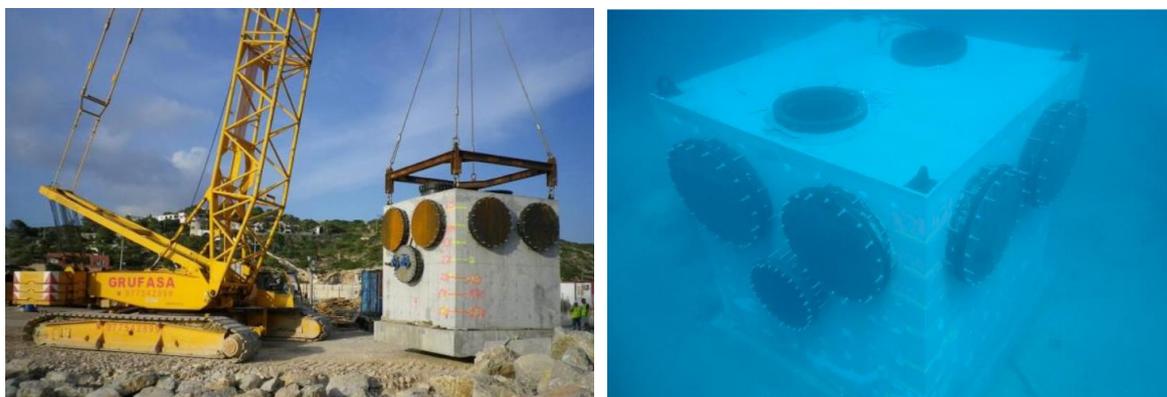


Ilustración 5: Sistema de captación de una desalinizadora [10]

Hay que tener en cuenta, que estas bombas tienen que estar diseñadas para aportar potencia suficiente como para poder bombear el agua desde la zona de captación hasta la planta (una altura superior a la del nivel del mar), haciendo frente también a todas las pérdidas localizadas, generadas ya sea bien por cambios de dirección, juntas, desviaciones...

La finalidad de este proyecto es integrar un sistema de generación de energía mediante un sistema eólico para apoyar a este sistema de bombeo.

Pretratamiento

Cuando el agua llega a la planta, se le realiza un pretratamiento. Durante este proceso el agua se desinfecta mediante hipoclorito sódico (NaClO), se le añade anticoagulante y se regula el pH. Una vez tratado químicamente, la disolución pasa por un primer filtro (filtro de anillas) para extraer parte de las partículas. A la salida de este filtro está el sistema de ultrafiltrado, donde se asegura

que la mayoría de las partículas no pasen al tanque intermedio. Estos sistemas de filtrado son necesarios para no dañar las membranas del sistema de osmosis inversa, ya que estas membranas son muy frágiles.



Ilustración 6: Sistema de ultrafiltrado de una desalinizadora [11]

El tanque intermedio mencionado en el párrafo anterior proporciona al sistema de osmosis la cantidad de agua necesaria. Entre este tanque y la propia desalinización, existe un tercer filtro, conocido como filtro de seguridad, donde se le añaden diferentes componentes químicos para reducir oxidantes y para proteger el sistema de desalinización. Gracias a este sistema de pretratamiento se retiran todas las partículas superiores a 5 μm de diámetro.

Desalación mediante osmosis inversa

Es proceso consiste en dividir el flujo de agua (aporte) en dos, un flujo libre de sales (permeado) y otro con alta concentración en sales (rechazo). Para ello bombea el agua a alta presión, superior a la presión osmótica a través de una membrana semipermeable dispuestas en bastidores.[12] Mediante este método se consigue desalar el 45% del agua de aporte.

Para mejorar la eficiencia del sistema y aprovechando la presión del fluido con alta concentración en sales, se le puede aplicar otra vez el mismo proceso, generando sistemas de varios pasos, en cascada.

Además, se suelen instalar sistemas de recuperación de energía, de manera que mediante un sistema intercambiador de presión (SIP) se aprovecha la presión residual del flujo de rechazo, transfiriendo la presión de salida al flujo de aporte.



Ilustración 7: Sistema intercambiador de presión (SIP) [13]

2.1.3. Procesos post-desalación

Al finalizar el proceso de desalación se generan dos productos. Por una parte, se obtiene el agua desalada, la cual se almacena en un tanque de agua para su futura distribución. El producto restante consiste en salmuera, con alto contenido en sal. Esta disolución recibe un tratamiento de

neutralización para después poder verterla de vuelta al mar, de manera que se minimicen los efectos en la fauna y flora acuática en las cercanías de la planta desalinizadora.

2.2. Aerogeneradores

2.2.1. Definición.

La *Asociación Empresarial Eólica* define los aerogeneradores como “*las máquinas empleadas para transformar la fuerza del viento en electricidad*”. Estas instalaciones giran gracias a la fuerza ejercida por el viento, una fuerza generada por la diferencia de velocidades de viento alrededor del perfil de la pala.

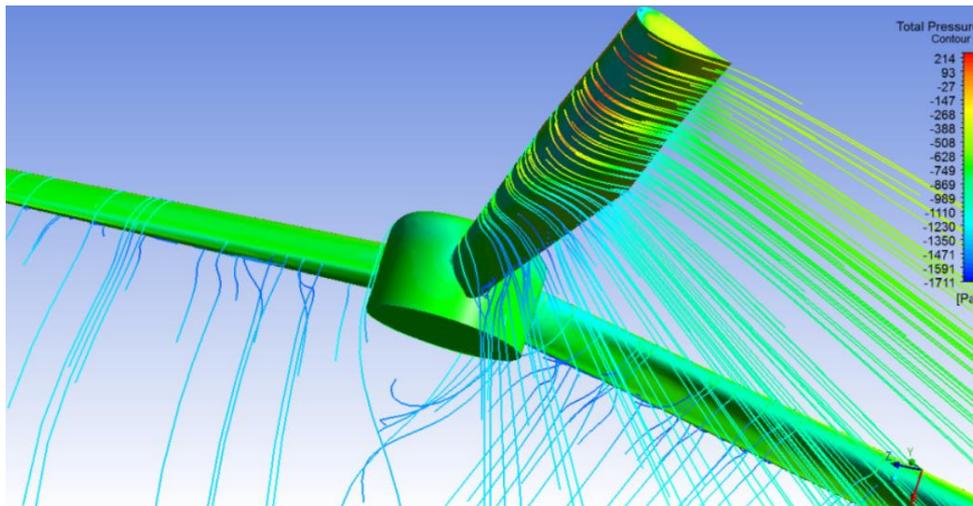


Ilustración 8: Líneas de presión sobre un aerogenerador [14]

Una vez el rotor en giro, se transmite la energía cinética a una multiplicadora, la cual acondiciona la velocidad de giro para el funcionamiento del generador eléctrico. En este proyecto el generador se reemplaza por un sistema de transmisión para poder transmitir la energía directamente al eje central del sistema de bombeo. Por lo tanto, usaremos el término “aerogenerador” para referirnos al sistema propuesto, aunque su finalidad no sea generar electricidad sino transferir energía mecánica directamente a un sistema de bombeo.

2.2.2. Aplicaciones.

Durante la historia se han desarrollado diferentes sistemas de aprovechamiento de la energía eólica, utilizados mayormente para obtener movimiento a partir de la velocidad del viento mediante aspas. Claros ejemplos de este tipo de aplicaciones son los molinos para el bombeo del agua de pozos subterráneos (accionados mediante el movimiento de un pistón), los molinos de viento para la molienda de granos, aserraderos, producción de papel...[14]



Ilustración 9: Aplicaciones de sistemas eólicos [14]

Hoy en día, la mayoría de estas instalaciones se han quedado obsoletas, y se utiliza una energía más fácil de transmitir a largas distancias, la energía eléctrica. Actualmente, los aerogeneradores transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica para poder después transmitirla a cualquier punto de suministro de la red eléctrica, con la posibilidad de después reconvertirla en la energía final requerida.

La generación, hoy por hoy, es a gran escala con grandes parques eólicos instalados lejos de los consumidores. Con el tiempo, el sistema eléctrico se está descentralizando, dando paso a la generación distribuida. La capacidad de generación se reduce, pero las instalaciones se sitúan más cerca de las cargas finales, reduciendo las pérdidas en la transmisión de la energía.



Ilustración 10: Aerogeneradores sistema centralizado y distribuido [14]

De esta manera cabe la posibilidad de volver a los sistemas completamente mecánicos, como la idea que se propone en este proyecto. Cabe recordar que el sistema no será completamente mecánico, ya que se requerirán sistemas electrónicos para llevar a cabo el control del sistema.

2.2.3. Parámetros básicos de una pala de un aerogenerador.

Antes de empezar con el desarrollo de las teorías y cálculos sobre el viento, aerogeneradores y la interacción entre ambos, es conveniente conocer los diversos parámetros que se pueden encontrar a la hora de analizar una pala de un aerogenerador.

Partiendo de un perfil aerodinámico aleatorio de una pala de un aerogenerador, se definen las velocidades, fuerzas y ángulos sobre el perfil:

- **Velocidades:** vectores de las velocidades de viento.
 - \vec{v}_1 : velocidad del viento paralelo al eje del aerogenerador.
 - \vec{v}_t : velocidad de arrastre, perpendicular a \vec{v}_1 .
 - \vec{v} : velocidad del viento resultante, velocidad total del flujo.

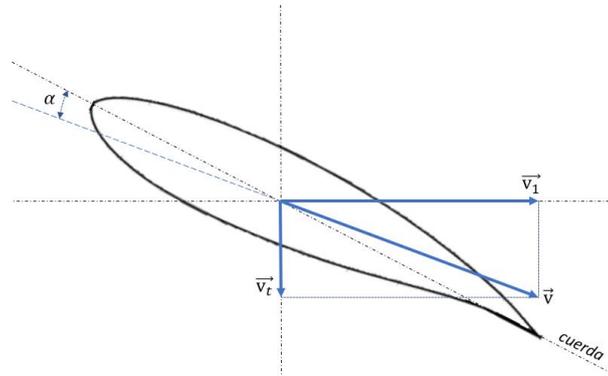


Ilustración 11: Vectores de velocidad

- **Ángulos:** parámetros necesarios para llevar a cabo relaciones geométricas entre las diferentes velocidades o fuerzas.
 - α : ángulo de ataque o incidencia. Diferencia angular entre la dirección del flujo del aire resultante y la cuerda de la sección de la pala.
 - θ : ángulo de paso o "pitch angle", diferencia angular entre el eje vertical y la cuerda ("chord").
 - φ : ángulo constructivo, suma de los ángulos anteriores.

$$\theta = \varphi - \alpha \quad (2)$$

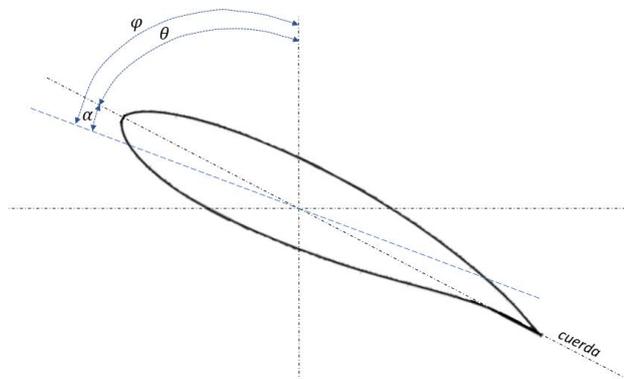


Ilustración 12: Ángulos sobre el perfil de la pala

- **Fuerzas:** el viento interactúa con la pala del aerogenerador mediante su paso por la estructura, generando variaciones en la velocidad, variando presiones y por ello ejerciendo diversas fuerzas sobre la pala.
 - \vec{F}_s : fuerza de sustentación, perpendicular a la dirección del flujo de aire (\vec{v}).

$$F_s = \frac{1}{2} C_a A \rho v^2 \quad (3)$$

C_a : coeficiente de sustentación

- \vec{F}_r : fuerza de resistencia, paralela a la dirección del flujo del aire (\vec{v}).

$$F_r = \frac{1}{2} C_b A \rho v^2 \quad (4)$$

C_b: coeficiente de resistencia

- \vec{F}_m : fuerza motriz, genera un par en el eje principal del aerogenerador.

$$F_m = F_s \sin \delta - F_r \cos \delta \quad (5)$$

- \vec{F}_a : fuerza axial, no genera ningún par útil sobre el generador, pero genera una tensión sobre el rotor. Por ello no hay que menospreciar este parámetro, puesto que es muy importante a la hora del diseño del aerogenerador.

$$F_a = F_s \cos \delta - F_r \sin \delta \quad (6)$$

- \vec{F} : fuerza resultante, suma vectorial de la fuerza de sustentación y resistencia o fuerza motriz y axial.

$$\vec{F} = \vec{F}_s + \vec{F}_r = \vec{F}_m + \vec{F}_a \quad (7)$$

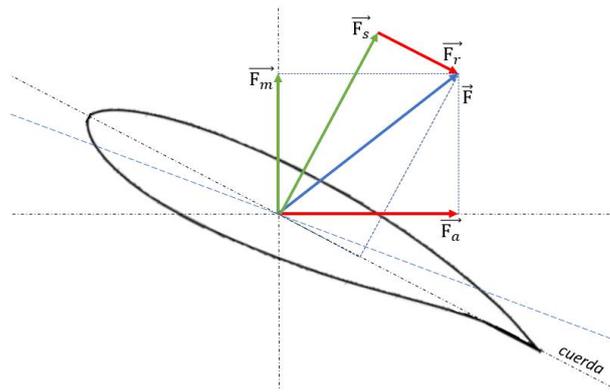


Ilustración 13: Vectores de las fuerzas sobre la pala

- Eficiencia de la pala (E): definida como la relación entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre.

$$E = \frac{C_a}{C_b} \quad (8)$$

- "Tip Speed Ratio" (TSR, λ): define la relación entre la velocidad tangencial en el extremo de la pala ($\Omega \cdot R$) y la velocidad del viento a la entrada al tubo de flujo (v_1).

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R}{v_1} \quad (9)$$

Este parámetro se utiliza para reconocer el funcionamiento del aerogenerador a diferentes velocidades, teniendo en cuenta la relación con el coeficiente de potencia de la turbina ($\lambda-C_p$). Esta relación está sujeta al ángulo de paso (β). En el caso de que se pudiera controlar este ángulo y mantenerlo constante, sólo existiría un único valor de TSR para una eficiencia máxima del aerogenerador (C_p), teniendo diferentes curvas $\lambda-C_p$ para diferentes tipos de aerogeneradores.

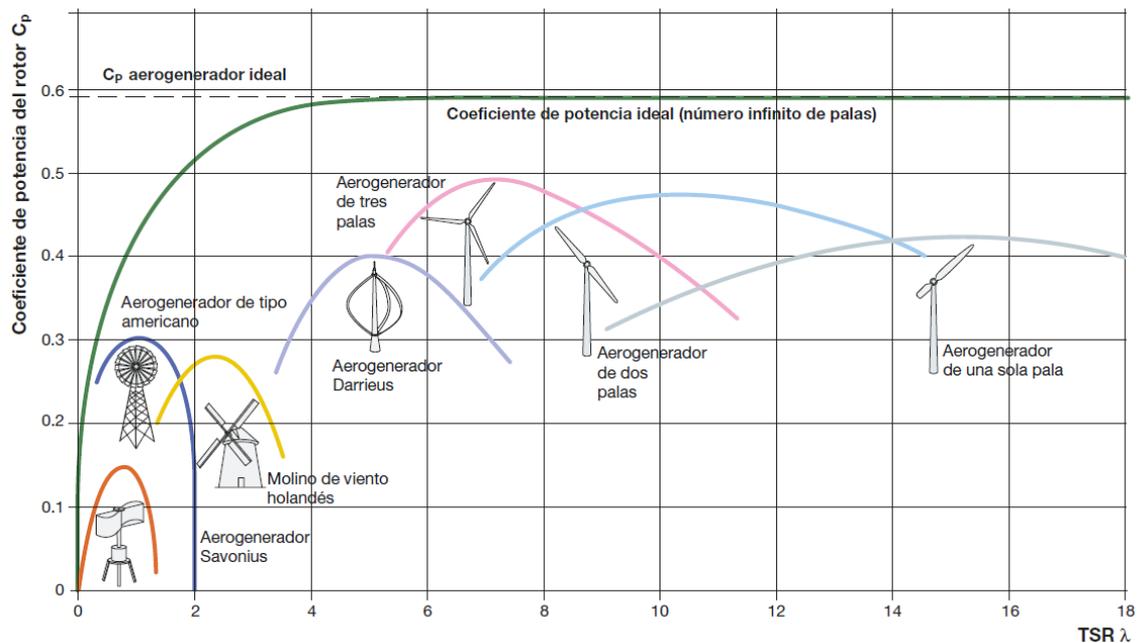


Ilustración 14: Curva C_p -TSR para diferentes tipologías de aerogeneradores [15]

Como se puede ver en la gráfica anterior, todos los tipos de aerogeneradores, tanto de eje vertical como horizontal, tienen un punto de funcionamiento óptimo a un valor de Tip Speed Ratio (TSR) específico para cada tipología. Para poder gestionar un funcionamiento eficiente del aerogenerador, conviene controlar la velocidad de rotación de las palas teniendo en cuenta la velocidad del viento, de forma que el TSR se mantiene en el valor óptimo.

El valor óptimo de TSR depende del número de palas del aerogenerador, cuanto menor sea la TSR óptimo, más rápido deberán girar las palas para extraer la máxima potencia del viento. [16] El TSR óptimo para los aerogeneradores de eje vertical y aquellos horizontales con elevado número de palas, es inferior a 6. Este valor se supera solo por los aerogeneradores convencionales tripala o los inusuales sistemas bipala o monopala.

Teniendo en cuenta la relación entre la velocidad de giro y la del viento, se distinguen diferentes tipos de turbinas: lentas (TSR óptimo bajo) y rápidas (TSR óptimo alto), siendo la velocidad de giro inversamente proporcional al número de palas. [16] En las turbinas rápidas el componente de sustentación es mayor que el de resistencia.

Al reducir el valor del Tip Speed Ratio, la sustentación se reduciría y aumentaría la resistencia, empeorando el funcionamiento del aerogenerador. En el caso opuesto, donde los valores de TSR se incrementan a valores muy elevados, ambas fuerzas (sustentación y resistencia) se reducen. A este último punto de trabajo se denomina "condición de fuga", donde se generan diversas pérdidas debidas a que la turbina gira tan rápido que se convierte en un obstáculo para el viento.

2.2.4. Potencial Disponible en un Aerogenerador

La potencia eléctrica generada mediante los aerogeneradores varía según la interacción entre el viento y las palas. Estos aerogeneradores se podrían definir como convertidores de energía, ya que transforman la energía cinética (E_c) del viento en energía mecánica, haciendo girar las palas alrededor del eje, y después la transforma en energía eléctrica mediante un generador. La energía generada es acondicionada a los parámetros de la red para poder ser vertida.

La energía cinética (E_c), se define como una energía que tiene un cuerpo al estar en movimiento, incrementando su valor exponencialmente con el incremento de velocidad:

$$E_c = \frac{1}{2} m v_1^2 \quad (10)$$

A partir de la formula anterior, se obtiene la potencia específica disponible (P_{disp}) reemplazando la masa por el caudal másico (q) :

$$P_{disp} = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} q v_1^2 \quad (11)$$

Para simplificar el cálculo de la potencia, se hace uso de la *ecuación de continuidad*. La fórmula se simplifica a una sola variable, puesto que la densidad del aire (ρ), y el área del aerogenerador (A) se mantienen constantes:

$$q = \frac{dm}{dt} = \dot{m} = \rho A v_1 \quad (12)$$

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \quad (13)$$

Analizando la formula anterior, se deduce que, con un aumento unitario de la velocidad del aire, la potencia específica disponible aumenta entre un 60% y un 70%.

Antes de hacer un análisis exhaustivo de la potencia producida por un aerogenerador, se da un primer paso calculando la potencia que puede ser extraída del viento mediante un modelo simplificado conocido como la *teoría de Betz*. Para llevar a cabo esta teoría, se deben tener en cuenta las siguientes hipótesis:

- El aerogenerador se define como un disco de espesor nulo con un número infinito de palas.
- La masa de aire que circula a través del aerogenerador permanece separado del resto del aire que lo rodea (*tubo de flujo*). No interactúa con el ambiente, sin producir ningún efecto rotativo en el aire.
- El aire sólo fluye en dirección paralela al eje del aerogenerador.
- En las secciones del tubo de flujo alejadas al aerogenerador, tanto aguas arriba o abajo, la presión es igual que la atmosférica, siendo el único obstáculo el propio aerogenerador.
- El viento es estacionario y se mantiene constante con la altura.
- Se estudia el flujo de aire como si fuese un fluido incompresible, manteniendo su densidad constante, aunque varíe la temperatura o la presión.

Teniendo en cuenta que el caudal de aire y su densidad se mantienen constantes durante el tubo de flujo, su sección aumenta aguas arriba del aerogenerador, puesto que la velocidad del viento disminuye.

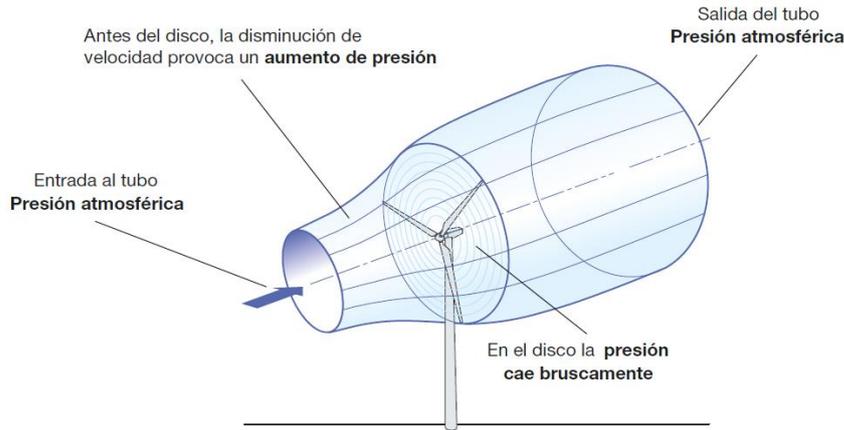


Ilustración 15: Transformación del tubo de flujo antes y después del aerogenerador [15]

Para conseguir la relación entre las presiones y las velocidades en diferentes puntos del tubo de flujo, se puede utilizar la *ecuación de Bernoulli*, teniendo en cuenta que no existe ninguna variación de la energía potencial, extracción de calor ni intercambio de trabajo:

$$P_x + \frac{1}{2} \rho v_x^2 = P_n + \frac{1}{2} \rho v_n^2 \quad (14)$$

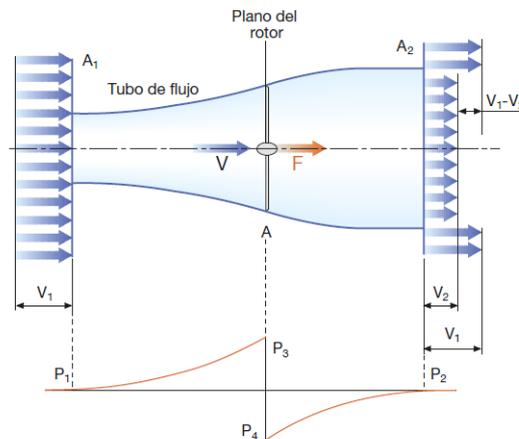


Ilustración 16: Áreas, velocidades y presiones sobre el tubo de flujo

Mediante la siguiente ecuación se puede calcular la diferencia de presión generada por el aerogenerador:

$$\Delta P = P_3 - P_4 = \rho \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \quad (15)$$

A partir de la diferencia de presión, se puede calcular la fuerza axial que ejerce el viento sobre el aerogenerador, ya que el área del aerogenerador es un valor conocido:

$$F = \Delta P \cdot A = A \cdot \rho \cdot \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \quad (16)$$

Esta fuerza también puede ser calculada mediante el *teorema de la cantidad de movimiento*, siendo la fuerza la variación de la cantidad de movimiento de la corriente de aire:

$$F = F_3 - F_4 = \dot{m} (v_1 - v_2) = (\rho A v) (v_1 - v_2) \quad (17)$$

Mediante estas dos últimas formulas, se puede calcular la velocidad del viento en el punto del disco actuador del aerogenerador:

$$v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \quad (18)$$

Como se puede observar en la formula anterior, la velocidad en el disco actuador es un promedio entre la velocidad del flujo de aire aguas arriba y aguas abajo del aerogenerador. La disminución de la velocidad del aire hasta alcanzar el aerogenerador se define mediante el *factor de inducción axial* (a):

$$a = \frac{v_1 - v}{v_1} = 1 - \frac{v}{v_1} \quad (19)$$

Mediante este nuevo factor se pueden obtener las siguientes fórmulas para calcular tanto la velocidad del viento en el disco actuador como para calcular la relación entre la velocidad aguas arriba y aguas abajo del aerogenerador:

$$v = (1 - a)v_1 \quad (20)$$

$$v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \rightarrow (1 - a)v_1 = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \rightarrow v_2 = (1 - 2a)v_1 \quad (21)$$

Teniendo en cuenta este factor de inducción axial y la fórmula de la fuerza (relacionada con las velocidades antes y después del aerogenerador), se puede calcular la potencia captada por las palas (P):

$$P = F v = ((\rho A v) (v_1 - v_2))v = 2 \rho A a (1 - a)^2 \cdot v_1^3 \quad (22)$$

De aquí podemos observar que la potencia extraíble depende de la densidad, el área del rotor, el cubo de la velocidad del viento a la entrada del tubo de flujo y la velocidad de salida (mediante el factor de inducción axial).

La potencia extraíble será menor en climas más calurosos, ya que al incrementar la temperatura se reduce la densidad del aire, reduciendo proporcionalmente la potencia extraíble.

Para calcular la potencia máxima extraíble, se necesita saber cuál es el punto óptimo de funcionamiento del factor de inducción axial. Para ello, se debe derivar la potencia en función del factor de inducción axial:

$$\frac{\partial P}{\partial a} = 2 \rho A (3a^2 - 4a + 1)v_1^3 = 0 \quad (23)$$

Al ser una ecuación de segundo grado, se obtienen dos posibles resultados. El factor de inducción axial puede obtener el valor de 1. En dicho caso, la velocidad del aire a la salida de la turbina sería negativa, por lo que se trata de un valor inviable, por lo tanto, se descarta este valor y se define como único resultado el valor de 1/3.

Siendo el valor óptimo del factor de inducción axial un tercio, la fórmula de la potencia máxima extraíble es la siguiente:

$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho A v_1^3 \quad (24)$$

A partir de la fórmula de la potencia extraída, se puede desarrollar otra fórmula para calcular el coeficiente de potencia (C_p), definida como la relación entre la potencia extraída por el aerogenerador y la potencia disponible en el viento:

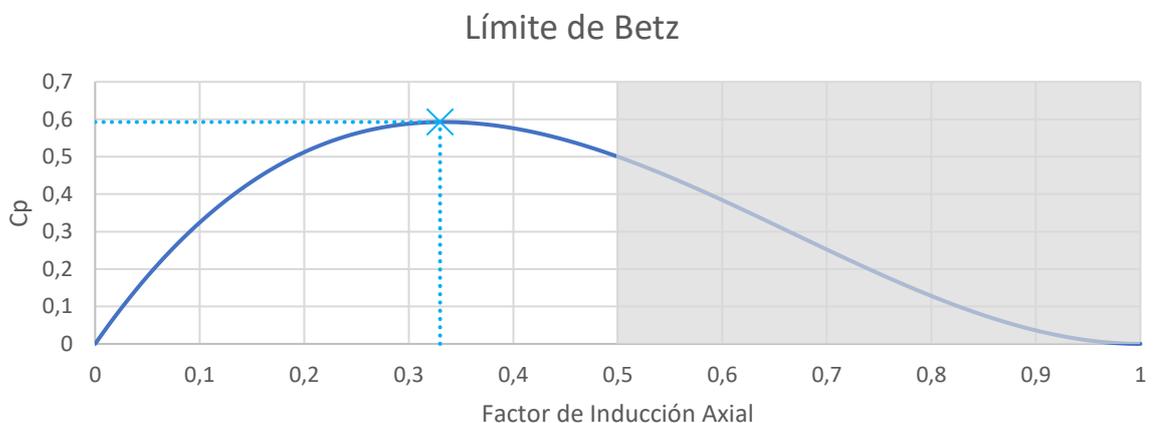
$$C_p(a) = \frac{P}{P_{disp}} = \frac{2 \rho A a (1 - a)^2 v_1^3}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3} = 4a(1 - a)^2 \quad (25)$$

Mediante esta última fórmula, y utilizando el valor óptimo del índice de inducción axial, se obtiene el valor máximo de eficiencia de un aerogenerador:

$$C_p(1/3) = \frac{16}{27} = 0,59 \quad (26)$$

Este valor es conocido como el *Límite de Betz*, la cual define la máxima potencia extraíble de una corriente de aire con un aerogenerador ideal, no pudiendo superar este valor de eficiencia.

El límite de Betz también se podría obtener graficando el coeficiente de potencia a diferentes valores:



Gráfica 2: Definición gráfica del Límite de Betz

Los valores del factor de inducción axial superiores a 0,5 no tienen sentido físico, ya que la velocidad del viento a la salida del aerogenerador debería ser opuesta.

En práctica, el coeficiente de potencia disminuye principalmente por tres factores: la rotación de la estela aguas arriba del rotor, el número finito de palas y la resistencia aerodinámica. En la actualidad la mayoría de los aerogeneradores se acercan al límite de Betz, llegando hasta un coeficiente de potencia de 0,5.

También hay que tener en cuenta las pérdidas generadas en la transmisión de energía desde el rotor hasta el generador, eficiencia mecánica (η_m), y las pérdidas generadas en el generador,

eficiencia del generador (η_e). Teniendo en cuenta estos rendimientos, la potencia eléctrica total generada por el aerogenerador se puede calcular mediante la siguiente formula:

$$P = \eta_m \eta_e \frac{1}{2} C_p \rho A v_1^3 \quad (27)$$

El único parámetro relacionado con el dimensionamiento del aerogenerador es el área del rotor, el cual incrementa exponencialmente con el radio del aerogenerador:

$$P = \eta_m \eta_e \frac{1}{2} C_p \rho A v_1^3 \rightarrow A = \pi R^2 \rightarrow P = \eta_m \eta_e \frac{1}{2} C_p \rho (\pi R^2) v_1^3 \quad (28)$$

Por ello, el diámetro (D) de los aerogeneradores se dimensiona siguiendo la siguiente formula:

$$D = \sqrt{\frac{8 P_e}{\eta_m \eta_e C_p \rho v_1^3}} \quad (29)$$

Para un análisis estricto de un aerogenerador deberíamos tener en cuenta también diversos efectos ajenos a la turbina, como la variación de la densidad debido al cambio de presión y temperatura con la altitud, la interferencia generada por los aerogeneradores instalados alrededor y la suciedad y hielo generado alrededor de la pala, reduciendo la aerodinámica de la pala.

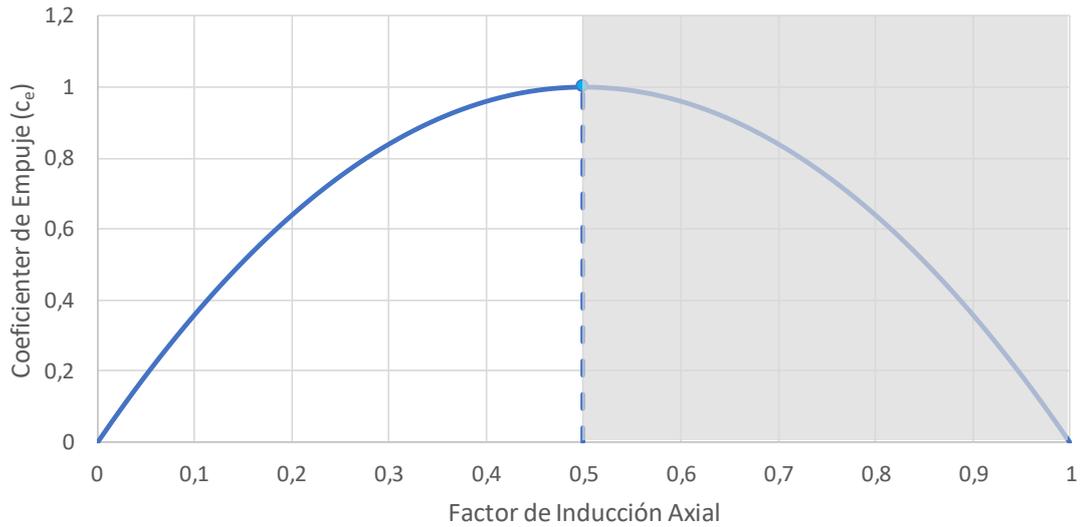
También existe otro coeficiente relacionado con la aerodinámica de los aerogeneradores, conocido como coeficiente de empuje (c_e), definido como el cociente entre la fuerza ejercida sobre el disco actuador y la fuerza disponible:

$$c_e = \frac{F}{F_{disp}} \rightarrow F = \frac{P}{v} \rightarrow c_e = \frac{2 \rho A a (1 - a) v_1^2}{\frac{1}{2} \rho A v_1^2} = 4a(1 - a) \quad (30)$$

El punto máximo del coeficiente de empuje se obtendría en unas condiciones ideales, donde la velocidad del viento aguas arriba del aerogenerador sería nula:

$$\frac{dc_e}{da} = 4(1 - 2a) = 0 \rightarrow a = \frac{1}{2} \quad (31)$$

En la siguiente gráfica se muestra la variación del coeficiente de empuje según el factor de inducción axial.



Gráfica 3: Coeficiente de empuje frente al factor de inducción axial

2.2.5. Distribución de Weibull

Herramienta que se utiliza para caracterizar la velocidad de viento en una zona durante diferentes periodos de tiempo, donde mediante un histograma estadístico se muestra las frecuencias de las velocidades de viento:

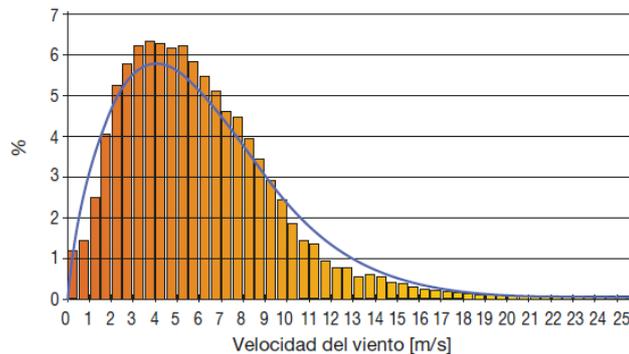


Ilustración 17: Distribución de Weibull

La distribución de Weibull mediante el parámetro de factor de escala (c) y el factor de forma (k), define anemométricamente una localización. El valor de escala está relacionado directamente con la velocidad media de la ubicación, mientras que el factor de forma se relaciona con la simetría de la distribución (dispersión de los valores frente a la velocidad media), donde los valores cercanos a 1 corresponden a distribuciones muy asimétricas y los valores elevados ($k > 2$) a las distribuciones simétricas (similares a las distribuciones Gaussianas). Este último factor se fija en función de la morfología del terreno y el régimen de los vientos.

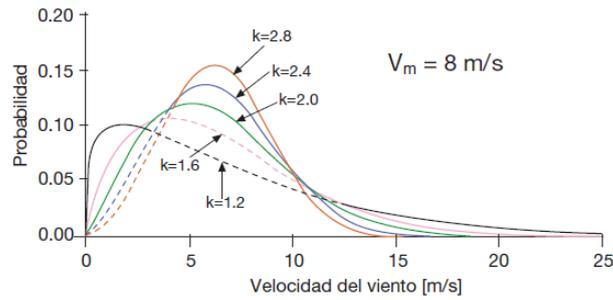


Ilustración 18: Distribución de Weibull para diferentes factores de forma

En la próxima tabla se especifican los rangos del factor de forma para diferentes morfologías de terreno:

Tabla 3: Factor de forma para cada morfología de terreno

Factor de Forma (k)	Morfología de Terreno	Régimen de Vientos
1.2-1.7	Lugares Morfológicos	Muy Variable
1.8-2.5	Grandes Llanuras / Colinas	Variable
2.5-3.0	Campos Abiertos	Bastante Regular
3.1-3.5	Zonas Costeras	Regular
3.5-4.0	Islas	Muy Regular

Conociendo el valor de ambos factores, se puede calcular la probabilidad mediante la siguiente fórmula:

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (32)$$

2.2.6. Influencia de la Altura sobre el Suelo

La velocidad del viento es dependiente del terreno (rugosidad, obstáculos...), puesto que este frena el viento mediante la fricción en las zonas próximas al suelo. A alturas elevadas, el efecto de la fricción es despreciable, siendo la velocidad del viento dependiente de las condiciones meteorológicas (presión, temperatura...):

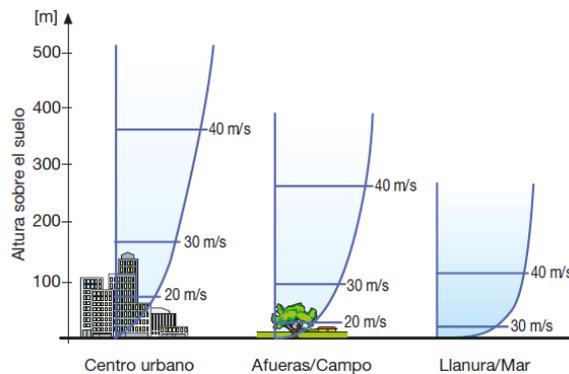


Ilustración 19: Variación de la velocidad del viento según la altitud

Como se puede observar en la imagen anterior, el perfil de la velocidad del viento varía según la zona. Con la siguiente fórmula y tabla de coeficientes de rugosidad se puede calcular el perfil del viento en diferentes zonas:

$$v_i = v_0 \left(\frac{h_i}{h_0} \right)^\alpha \quad (33)$$

El coeficiente α simboliza la rugosidad del terreno. Este coeficiente se ha predefinido teniendo en cuenta diferentes perfiles del terreno. En la siguiente tabla se define el coeficiente para diferentes zonas[17]:

Tabla 4: Coeficiente de rugosidad del terreno [18]

Coeficiente α	Descripción de Zona
0,0002	Superficie de agua / Terreno abierto / Superficie lisa.
0,0024	Pistas de hormigón (aeropuertos) / Césped.
0,0300	Campos abiertos sin cercados/ Edificios dispersos / Colinas suavemente redondeadas.
0,0550	Campo con alguna casa y arbolado de hasta 8m situado como mínimo a 1.250m.
0,1000	Campo con alguna casa y arbolado de hasta 8m situado como mínimo a 500m.
0,2000	Campo con alguna casa y arbolado de hasta 8m situado como mínimo a 250m.
0,4000	Pueblos / Bosques / Terreno accidentado y desigual.
0,8000	Ciudades con edificios altos.
1,6000	Grandes ciudades con edificios muy altos.

En el caso de que se quiera obtener el coeficiente α para una ubicación exacta, se obtendría su valor mediante diferentes mediciones de velocidades de viento a diferentes alturas (método empírico) y despejando el coeficiente α en la siguiente fórmula:

$$\alpha = \frac{\log \left(\frac{v_1}{v_0} \right)}{\log \left(\frac{h_1}{h_0} \right)} \quad (34)$$

2.2.7. Estimación de la Producción Energética

La producción energética anual se puede estimar mediante la distribución de Weibull y la curva de potencia producida por el aerogenerador en función de la velocidad del viento:

$$E = 8760 \int_0^{\infty} P(v) \cdot f(v) \cdot dv \quad (35)$$

*8760: el número de horas en un año

* $P(v)$: curva de potencia del aerogenerador proporcionada por el fabricante.

* $f(v)$: función de la distribución estadística de Weibull.

La productividad de un aerogenerador se suele expresar en horas equivalentes (h_{eq}), en referencia a las horas que debería trabajar el aerogenerador a potencia nominal para producir la energía anual.

No sólo se usa este parámetro para comparar diferentes aerogeneradores, ya que depende de la potencia nominal del aerogenerador. Por ello, se utiliza un criterio de similitud, con el cual dos aerogeneradores se definen parecidos si el cociente entre la potencia nominal y el área del rotor (potencia nominal específica) es la misma.

2.2.8. Tipos de Aerogeneradores

Aerogeneradores de Velocidad de Rotación Fija

El rotor del aerogenerador gira a una velocidad fija establecida por el número de pares de polos del generador, la relación de la multiplicadora y de la frecuencia de la red a la que se conecta, independiente de la velocidad del viento.

El motor que utilizan este tipo de aerogeneradores es de jaula de ardilla que está conectado directamente a la red mediante un arrancador suave que regula la corriente de arranque, y un banco de condensadores para compensar la potencia reactiva.

Estos aerogeneradores están diseñados para trabajar a máxima eficiencia a una determinada velocidad de viento. Por ello, existen variaciones de este tipo de generador donde se instalan dos bobinados diferentes en el estator, dando uso del bobinado con mayor número de polos para velocidades bajas de viento y menor para velocidades medias y altas.

Las ventajas que tienen estos generadores es que son de construcción sencilla, robustos, fiables y de coste moderado, pero a su vez, consumen potencia reactiva, soportan grandes esfuerzos mecánicos y tienen un control limitado de la calidad de potencia inyectada a red. Además, cada variación en la velocidad de viento genera fluctuaciones en la tensión generada por el aerogenerador, ocasionando molestias debido a la generación de *flickers*.

Aerogeneradores de Velocidad de Rotación Variable

Los aerogeneradores de velocidad de rotación variable, a diferencia de los aerogeneradores de velocidad fija, están diseñados para trabajar con una eficiencia óptima en un amplio rango de velocidades, adaptando de forma continua la velocidad de rotación del generador, de manera que mantienen el valor de TSR en el punto máximo.

Además, evitan las fluctuaciones de tensión generados por las fluctuaciones de la velocidad del viento, puesto que mediante la variación de velocidad se absorben las fluctuaciones y mantienen constante el par electromagnético.

Suponen un sistema eléctrico más complejo, ya que incorporan generadores asíncronos o síncronos conectados a red mediante un convertidor de potencia, el cual encarece el sistema e incrementa las pérdidas de potencia.

Aun así, también muestran ciertas ventajas frente a los aerogeneradores de velocidad de rotación fija. Se incrementa la potencia generada en un rango amplio de velocidades de viento, se reduce el ruido aerodinámico a bajas velocidades de viento, se reducen las tensiones mecánicas sobre el aerogenerador y se mejora la calidad de la energía vertida a la red, gracias a la amortiguación de las fluctuaciones del par del motor.

2.2.9. *Sistemas de Regulación*

En los aerogeneradores existen sistemas de regulación para bien optimizar la potencia producida cuando las velocidades del viento son inferiores a la nominal o para mantener el funcionamiento del aerogenerador dentro de condiciones de funcionamiento seguras. De esta manera se asegura la vida útil del sistema y su buen funcionamiento cuando las velocidades del viento superan el valor nominal del aerogenerador.

En los aerogeneradores de velocidad de rotación fija, la única forma de controlar el par generado es actuar sobre el propio par aerodinámico. Mientras que en los de velocidad variable, el par generado puede variar independientemente del par aerodinámico, pudiendo controlar la velocidad del rotor con cualquier tipo de par (generado o aerodinámico).

Control del Par Generado

El control del par generado se lleva a cabo mediante un convertidor de potencia que regula la fase y la frecuencia de las corrientes generadas en los bobinados del generador.

Control del Par Aerodinámico

El par aerodinámico se regula mediante la variación de la geometría del rotor, modificando con ella las fuerzas de sustentación y de resistencia. Para llevar a cabo la variación en la geometría del rotor se puede regular el ángulo de paso o bien cambiar la geometría de una zona de la pala (*flaps*).

El control de ángulo de paso se puede hacer individualmente en cada pala o de forma colectiva (control de paso cíclico), moviendo todas las palas con un ángulo idéntico.

El control individual permite diferentes formas de frenado aerodinámico independiente, pero conlleva un control mucho más preciso al tener que evitar diferencias en los ángulos de las palas.

Para el sistema de control también se utilizan *flaps* para cambiar la geometría de un segmento de la pala. De esta manera se disminuye la sustentación y aumenta la resistencia. Estos elementos también se pueden colocar extremo de las palas para generar un par con sentido contrario al par del motor. Además, se pueden instalar deflectores para perturbar el flujo del aire alrededor de la pala para variar las fuerzas de sustentación y resistencia.

Actualmente se están desarrollando diferentes investigaciones sobre nuevos, inteligentes y más efectivos sistemas para la modulación de las fuerzas de sustentación y resistencia, y para mejorar el agarre del aire en la pala, como el uso de chorros de aire.

2.2.10. *Estrategias de Control*

Se han desarrollado varias estrategias de control para maximizar la producción energética dentro de los límites de velocidad y carga, evitando cargas extremas o transitorias y minimizando efectos de resonancia y de fatiga, garantizando un funcionamiento seguro para el aerogenerador y a la vez para generar e inyectar energía a la red con una calidad aceptable.

Control en Aerogeneradores de Velocidad Fija y Regulación Pasiva

Este tipo de aerogeneradores no tienen posibilidad de un control activo, salvo conmutando la conexión a red del aerogenerador o usando frenos mecánicos sobre el eje principal.

No pueden contar con la aerodinámica de las palas para acelerar el motor hasta la velocidad de funcionamiento, por ello se conectan a red, como si fueran motores de inducción y funcionan en modo motor hasta alcanzar la velocidad de funcionamiento.

Control en Aerogeneradores de Velocidad Fija y Regulación del Ángulo de Paso

Este tipo de aerogeneradores, utilizan el control activo del ángulo de paso para la puesta en marcha y para el control de la potencia por encima de la velocidad nominal del viento.

Dan uso del control del ángulo de paso para poder acelerar el generador hasta conseguir la velocidad de funcionamiento antes de conectarse a red.

Control en Aerogeneradores de Velocidad Variable

Este tipo de aerogeneradores utilizan generalmente el control del ángulo de paso para limitar la velocidad de rotación de las palas cuando la velocidad del viento excede la nominal, y dan uso del control del par del generador en todo el rango de operación para un funcionamiento seguro y óptimo del sistema.

Al igual que los aerogeneradores de velocidad fija y regulación del ángulo de paso, dan uso del control del ángulo de paso para poder acelerar el generador hasta conseguir la velocidad de funcionamiento antes de conectarse a red. La única diferencia es que la conexión a red se hace mediante un convertidor de potencia que regula la fase y la frecuencia de las corrientes en los bobinados.

2.3. Mercado Eléctrico

El mercado eléctrico de España se define como el conjunto de mercados donde se negocia la compra y venta de energía eléctrica de plazo, entre diario... suministrada por la red eléctrica española. Este mercado se estableció como consecuencia de la liberalización del sector eléctrico en 1997 con la promulgación de la Ley del Sector Eléctrico 54/1997, reformulada por la Ley 24/2013.[19]

Debido a esta liberalización, las actividades del sector energético se dividieron y se reglamentó cada una de forma específica para introducir la competencia y aumentar la eficiencia del sector energético. El sector energético está dividido en los siguientes grupos: generación, transporte, distribución y comercialización.



Ilustración 20: Liberalización del mercado eléctrico [20]

Además, la nueva regulación permitió la entrada a nuevos agentes al mercado eléctrico, como las cooperativas energéticas o comercializadoras independientes.

Por un lado, los consumidores pueden adquirir su energía de forma directa (consumidor directo) desde el mercado mayorista mediante los mercados organizados entorno al Operador del Mercado Ibérico Español (OMIE) o al Operador del Mercado Ibérico de la Energía – Polo Portugués (OMIP).

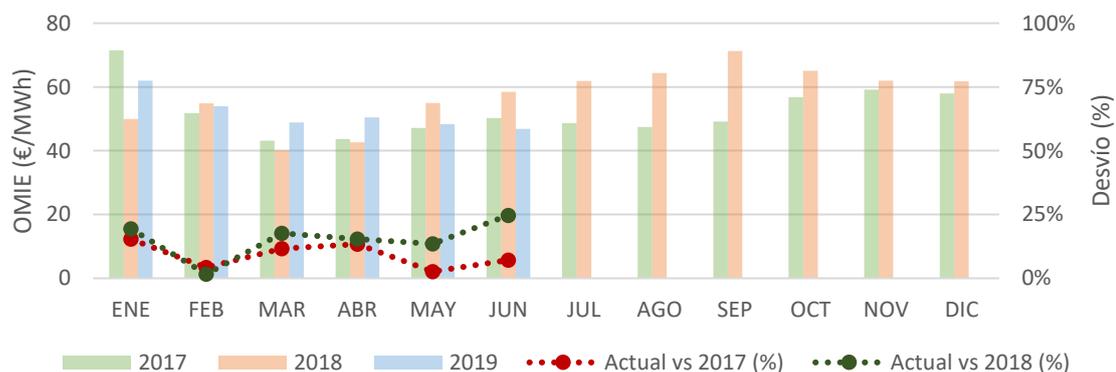
El OMIE negocia la energía a corto plazo (mercado diario o intradiario)[21][22] y el OMIP negocia la energía a futuro[23].

Por otro lado, los consumidores pueden obtener su energía a través de empresas comercializadoras. Estos agentes adquieren la energía del mercado mayorista y la transfieren a los consumidores finales los costes regulados por la administración.

A parte de estos dos mercados nombrados anteriormente, existen otros dos mercados para la compra y venta de la energía a futuro: *Mercado Español de Futuros Financieros* (MEFF) y *European Energy Exchange* (EEX)[24], los cuales también están regulados.

Además, cabe la posibilidad de realizar operaciones fuera de estos mercados regulados, nombrados anteriormente, mediante operaciones conocidas como *Over The Counter* (OTC), los cuales también pueden ser registrados después en los mercados regulados. [23]

Para los futuros cálculos del proyecto, se ha analizado el mercado eléctrico entorno al Operador del Mercado Ibérico Español (OMIE)[21], calculando el valor promedio mensual del coste de la electricidad de los últimos tres años, para poder realizar una comparación anual y analizar la variación del precio de la electricidad. En la siguiente gráfica se muestra el valor promedio mensual del precio de la electricidad de los últimos tres años:



Gráfica 4: Precios OMIE y su comparativa con el año actual

Como se puede observar en la gráfica anterior, a partir de mayo de 2018 el precio promedio de la electricidad ha incrementado considerablemente en comparación del año 2017, llegando a acrecentar el precio de la electricidad en 22,12 €/MWh durante el mes de septiembre (2017 vs 2018).

Para el futuro cálculo sobre el ahorro económico debido a la reducción se determina el precio de la energía según el valor promedio de la electricidad durante el periodo anual desde junio de 2018 hasta mayo de 2019, ambos inclusive. El precio medio de la electricidad es de 58,654 €/MWh.

3. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

La idea principal del proyecto es desarrollar un sistema de generación de energía, mediante una fuente de energía renovable, energía eólica, para dar apoyo al sistema de bombeo de una desalinizadora de agua. El mecanismo de funcionamiento del sistema sería completamente mecánico, evitando las pérdidas internas generadas por componentes eléctricos y convertidores.

La energía cinética del viento se traspasa al eje del aerogenerador mediante las palas. Una vez el eje en movimiento, una multiplicadora incrementa la velocidad de rotación, puesto que la velocidad de giro del aerogenerador será muy lenta para el sistema de bombeo. Finalmente, la energía cinética a la salida de la multiplicadora se trasladará, mediante sistemas mecánicos, hasta la instalación de bombeo de la desalinizadora, de forma que el acople sea directo.

Teniendo todo esto en cuenta, el proyecto se ha dividido en dos análisis. Por un lado, se analiza la situación actual de las plantas desalinizadoras y el cambio que supondría la implementación de este sistema. Por otro lado, se ha realizado el diseño de las palas del aerogenerador, teniendo en cuenta el recurso eólico en la costa valenciana/alicantina.

También se ha añadido un último apartado donde se describen los componentes adicionales que requiere un aerogenerador, como el buje, la torre, la cimentación, la multiplicadora y el sistema de transmisión (multiplicadora-sistema de bombeo).

3.1. Situación de las plantas desalinizadoras

En España según la *Asociación Española de Desalinización y Reutilización* [25] existen 765 plantas desalinizadoras con una producción superior a los 100m³ por día, de las cuales 360 son desalinizadoras de mar y 405 de agua salobre.

El 13% de las plantas desalinizadoras se consideran de gran producción, puesto producen entre 10.000 y 250.000 m³ por día. En el siguiente mapa se muestra la ubicación de algunas de estas instalaciones:



Ilustración 21: Plantas desalinizadoras en España

Como se puede ver en el mapa, las desalinizadoras se localizan en el sureste de la península, cerca del mar mediterráneo y en zonas climáticas con altas temperaturas y con escasez de agua para la población y el sector agrícola.

En la siguiente tabla se encuentra la información proporcionada por la sociedad estatal acuaMed (Aguas de las Cuencas Mediterráneas), donde se resumen las características principales de las desalinizadoras de la cuenca mediterránea; la ubicación seleccionada para el diseño del aerogenerador:[26]

Tabla 5: Plantas desalinizadoras en España

Desalinizadora	Provincia	Potencia Instalada (kW)	Producción (m3/día)	Población beneficiada	Estado
Sagunto	Valencia	5.570	22.900	65.000	En ejecución
Torre Vieja	Alicante	51.200	240.000	440.000	Activo
Marbella	Málaga	20.000	56.400	400.000	Activo
Valdelentisco	Murcia	50.000	137.000	60.000	Activo
Campo de Dalías	Almería	25.000	98.664	300.000	Activo
Oropesa	Castellón	15.000	65.000	150.000	Activo
Carboneras	Almería	30.000	120.000	130.000	Activo
Bajo Almanzora	Almería	18.000	45.000	140.000	En reparación
Águilas	Murcia	56.700	181.000	130.000	Activo
Moncofar	Castellón	6.500	30.000	120.000	Activo

Como se puede ver en la tabla anterior, las desalinizadoras son instalaciones con unas potencias instaladas muy elevadas, la mayoría de las listadas más de 50MW y con una producción de agua que puede beneficiar a más de 60.000 habitantes. Además, hay que tener en cuenta que el agua desalada también se utiliza en grandes cantidades para regadíos.

La desalinizadora de Torre Vieja es la instalación con una de las mayores capacidades a nivel europeo. Para hacerse una idea, el verano de 2018 su consumo equivalía al consumo eléctrico del turismo en la provincia de Alicante[27]. Este proyecto se llevó a cabo para paliar los problemas de insuficiencia de recursos hídricos en el sur de Alicante y el norte de Murcia, para compensar la fuerte presión que está sufriendo la cabecera del río Tajo y el trasvase hacia el Segura.



Ilustración 22: Planta desalinizadora de Torre Vieja (Alicante) [28]

La desalinizadora ha estado funcionando alrededor del 30% de la capacidad [29] hasta el 5 de abril de 2019, debido a que el punto de suministro eléctrico se encuentra en una línea eléctrica que es incapaz de aportar la alta necesidad de potencia que demanda la planta. Debido a la reducción en la generación, el coste de producción de planta se incrementó de 0,3€/m³ a 0,62€/m³. [30]

AcuaMED ha informado que ahora la planta ya produce a un ritmo de 80hm^3 de agua anuales.[31] Han pasado quince años desde que se presentó en 2004 el proyecto de la desalinizadora de Torrevieja hasta que se ha conseguido que la planta pueda trabajar en sus condiciones de diseño. [32]

Para ello, se han requerido nuevas instalaciones eléctricas y una actualización del contrato del suministro eléctrico. Gracias a este cambio, la planta se conecta directamente a la línea de alta tensión (200kV), permitiendo un suministro de mejor calidad, fiabilidad y precio. Para esta conexión se ha tenido que construir una subestación eléctrica en la propia desalinizadora de 220kV/20kV y la línea de conexión entre ambas subestaciones.

Esta ampliación del suministro eléctrico ha aumentado la inversión de la planta en 7,3 millones de euros[33], lo que supone un incremento del 2,4% la inversión inicial, teniendo en cuenta que la inversión inicial fue aproximadamente de 300 millones de euros. Dicha ampliación en la red eléctrica queda en propiedad de Iberdrola, aunque la inversión forme parte de la propia instalación.

3.2. Diseño de las palas de un aerogenerador

La idea de este proyecto, como bien se ha descrito anteriormente, es diseñar un aerogenerador, un sistema mecánico de principio a fin, para dar soporte a las bombas de agua instaladas en plantas desalinizadoras y así poder reducir el coste de explotación de la planta y a su vez reducir la demanda energética de la red eléctrica española. De esta manera también se evitan las pérdidas en generación, transporte y distribución.

3.2.1. Análisis del recurso eólico.

El primer paso para poder diseñar un aerogenerador consiste en analizar el recurso eólico de la zona donde se quiere instalar el sistema. En este caso, se ha analizado el recurso eólico en la costa valenciana y alicantina, puesto que son dos provincias con escasez de agua y tienen un gran potencial para potabilizar agua marina mediante desalinizadoras.



Ilustración 23: Captura del mapa eólico en la costa valenciana/allicantina [34]

El análisis se ha completado usando como marco teórico la función de Weibull, descrita anteriormente en el apartado *Marco Teórico*, el cual se describe por dos parámetros: el factor de forma (k) y el factor de escala (c).

Para obtener dichos parámetros, se ha utilizado la aplicación online “Estimación de producción eólica y solar” de la empresa Enair. Se puede acceder a la aplicación directamente desde la página oficial de la empresa.[35]

La aplicación permite seleccionar la ubicación a analizar desde un mapa interactivo o configurando las coordenadas de forma manual. Una vez seleccionado el objetivo, el programa calcula una aproximación de la energía que se podría producir mediante la instalación de uno de los aerogeneradores de la propia empresa, Enair. Además de esta información, también añade una tabla resumen de diferentes parámetros para poder llevar a cabo un estudio más exhaustivo del recurso eólico:

Fuente de datos	Altura hub (m)	Velocidad media (m/s)	Grado de confianza	Dispersión zona (m/s)	Weibull C	Weibull K	Rosa de vientos	Variación mensual
PROPIA	50	4.7	5.0%	±	5.1918	1.6188		☑
DTU	50	4.8	80.0%	±0.14	5.3524	1.5481		
MERRA-2	50	4.6	50.0%	±0.50	5.1918	1.6188	☑	☑
VAISALA	80	4.8	45.0%	±		2.0000		
CENER	30	3.1	40.0%	±0.00	3.4075	1.6076		
Result	50	4.41	--	±0.14	4.9669	1.6188		

Ilustración 24: Tabla resumen de las fuentes de datos sobre el recurso eólico de la página web de Enair [35]

Como se puede ver en la imagen anterior, la información proviene de diferentes fuentes, por lo que antes de seleccionar los datos de la tabla, se debe estudiar el grado de confianza de la fuente de información.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que, con estos datos, se obtienen unos resultados para una altura de 50 m, punto en el que se registran los datos mediante anemómetros en las estaciones meteorológicas. Se ha desarrollado un análisis de velocidades de viento a diferentes alturas para analizar el incremento de generación que supondría incrementar la altura del aerogenerador, teniendo en cuenta que la inversión aumenta junto con la altura del sistema eólico. Para ello se utiliza la siguiente fórmula para calcular la nueva curva de velocidades:

$$\frac{v}{V_r} = \left(\frac{H}{H_r} \right)^\beta \quad (36)$$

, donde V es la velocidad por estimar a la altura H . V_r es la velocidad del viento a la altura H_r del sensor y es el coeficiente de rugosidad. Este último parámetro depende del relieve y características del suelo sobre la cual fluye el viento.

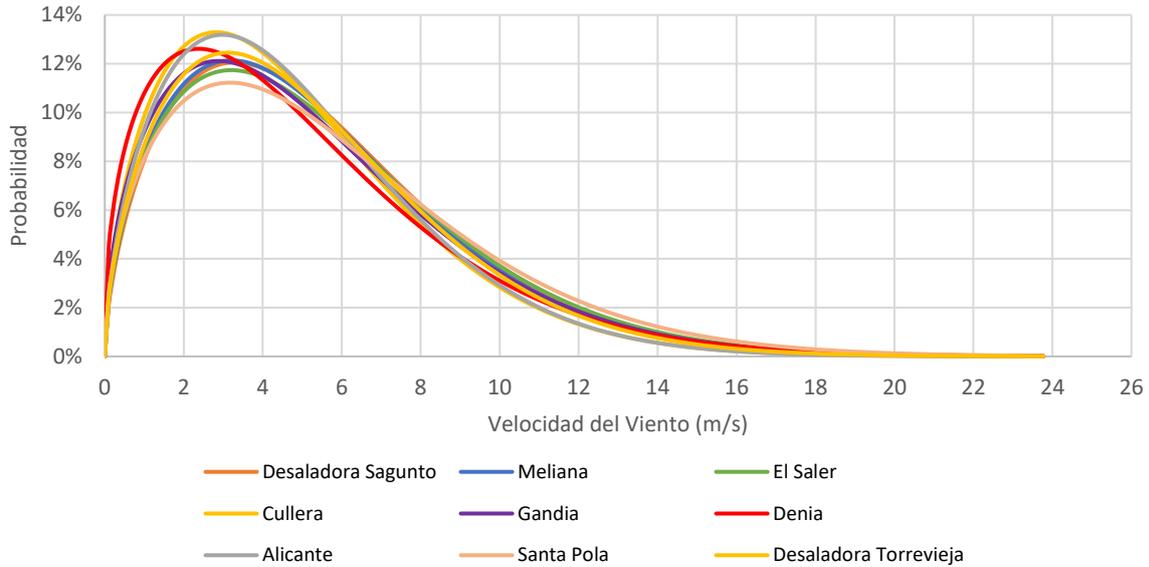
En la siguiente tabla se resumen los puntos geográficos que se han prefijado para llevar a cabo el análisis del recurso eólico en la costa valenciana y alicantina:

Tabla 6: Resumen de los factores de escala y forma para diferentes localidades valencianas y alicantinas

Ubicación	Provincia	Factor de escala	Factor de forma	Rugosidad
Alicante	Alicante	5,7750	1,6012	0,055
Cullera	Valencia	5,6839	1,5673	0,055
Denia	Alicante	5,8443	1,4240	0,055
Desalinizadora de Sagunto	Valencia	6,3285	1,6086	0,055
Desalinizadora de Torrevieja	Alicante	6,1002	1,5918	0,055
El Saler	Valencia	6,4371	1,5679	0,055
Gandia	Valencia	6,1689	1,5149	0,055
Meliana	Valencia	6,2618	1,5936	0,055
Santa Pola	Alicante	6,6759	1,5287	0,055

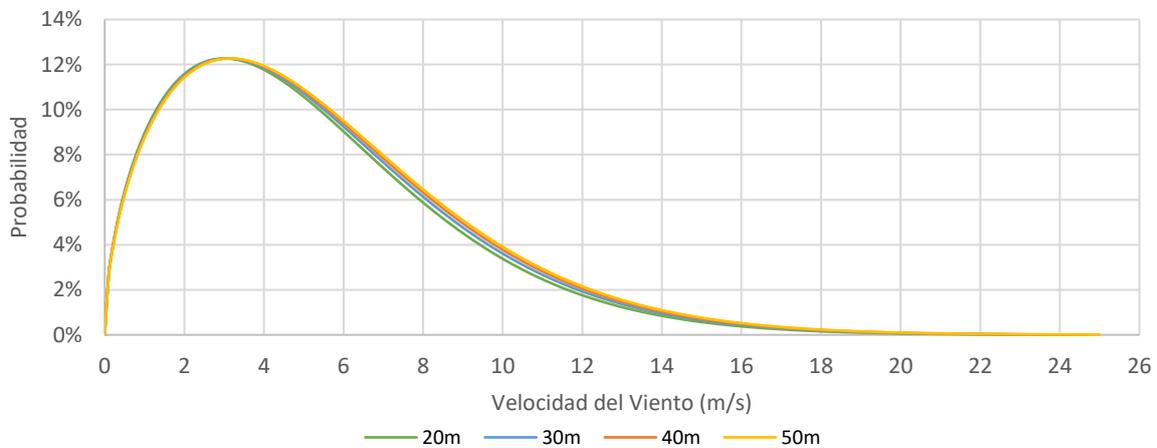
Como se puede ver en la tabla anterior, también se ha analizado el recurso eólico en dos desalinizadoras existentes, para poder ver si el recurso sigue siendo similar al de los puntos restantes. La rugosidad de todas las localizaciones se ha fijado en 0,055 debido a que normalmente las desalinizadoras no se encuentran en terrenos totalmente planos, y como en el caso de la desalinizadora de Torrevieja, se pueden encontrar edificios y árboles de 8m cerca de la instalación.

Mediante los valores de la tabla y las ecuaciones definidas anteriormente, se ha desarrollado la curva de probabilidad de las velocidades de viento para cada punto. Estas curvas se han agrupado en una misma gráfica para poder analizar las variaciones de la probabilidad del viento entre todos los puntos. La siguiente gráfica muestra la probabilidad de viento en estas localizaciones a una altura de 20 m.



Gráfica 5: Distribución de Weibull para diferentes localidades valencianas y alicantinas

Como se observa en la gráfica anterior, todas las curvas son similares con ligeras variaciones entre las velocidades de viento de 2 a 4 m/s. Teniendo en cuenta todas estas curvas, se ha completado una única curva promedio para poder utilizarla en futuros cálculos a la hora de definir la productividad energética del aerogenerador. En la siguiente gráfica se muestra esta curva promedio para las diferentes alturas que podría tener el aerogenerador:



Gráfica 6: Distribuciones de Weibull promedio para diferentes alturas en la costa valenciana y alicantina

Según el estudio desarrollado, las velocidades de viento en la costa de Valencia y Alicante son muy reducidas. La velocidad de viento con mayor probabilidad, alrededor del 12% es de 3 m/s. Como se observa en la gráfica anterior no existe gran variación de velocidades de viento al modificar la altura del aerogenerador, desde los 20 a 50 m de altura. Por ello, la altura del aerogenerador se definirá según el diámetro del aerogenerador, calculado en el diseño.

Después de haber analizado todos estos datos sobre el recurso eólico, se ha decidido fijar la velocidad de viento para el diseño del aerogenerador en 4 m/s, una velocidad promedio, teniendo en cuenta una probabilidad superior al 6%.

A la hora de definir este valor, también se ha tenido en cuenta otros dos factores. Por un lado, no seleccionar una velocidad del viento elevada, puesto que el aerogenerador funcionaría mayormente sobredimensionado, generando por debajo de su potencial. Por otro lado, no se ha determinado la velocidad del viento en un valor menor, puesto que las dimensiones del aerogenerador aumentarían considerablemente.

3.2.2. Analizar los perfiles de pala o airfoils.

Una vez analizado el recurso eólico y seleccionado la velocidad del viento para el diseño de la pala, se han estudiado diferentes tipos de perfiles de palas (airfoils) gracias a la plataforma online de "Airfoil Tools"[36]. En ella se encuentra una base de datos de diferentes tipos de perfiles de palas, mostrando las diferentes características de cada tipología y a su vez, permite compararlas entre sí.

Desde la página se han seleccionado ocho perfiles diferentes de pala, de tipo NACA, y se han analizado mediante un programa en Matlab, generado para calcular el valor del coeficiente de potencia (C_p) para diferentes Tip Speed Ratios (TSR). Los cálculos realizados se describen a continuación y se pueden visualizar en el apartado anexos.

Para cada perfil, se ha descargado el coeficiente de sustentación (lift) y el coeficiente de arrastre (drag) para diferentes ángulos de ataque o incidencia. El ángulo óptimo de ataque se selecciona para el valor máximo de la relación entre el coeficiente de sustentación y arrastre (C_d/C_l).

En la siguiente tabla se nombran los airfoils analizados y se resumen sus características para la posición óptima del ángulo de ataque:

Tabla 7: Características de los perfiles de pala analizados

Perfil de pala	C_l	C_d	C_l/C_d	α (°)
NACA 63A010	0,652	0,011	59,734	5,75
NACA 4412	1,052	0,008	129,373	5,25
NACA 4418	1,091	0,009	115,807	5,75
NACA 23024	0,821	0,014	56,884	8,50
NACA 23112	1,104	0,011	98,580	8,75
NACA 64-008A	0,487	0,010	49,857	4,25
NACA 0012	0,869	0,011	75,596	7,50
NACA 6412	1,285	0,009	142,653	5,75

A priori, vistas las relaciones entre los coeficientes de sustentación y de arrastre, se puede determinar que el perfil más eficiente es el NACA 6412, la fuerza útil resultante es superior a los demás perfiles. Para poder verificar la eficiencia de estos perfiles de pala se ha desarrollado un programa en Matlab para calcular el coeficiente de potencia para diferentes Tip Speed Ratio-s para cada perfil de pala. El cálculo se desarrolla de manera adimensional, de manera que el cálculo se simplifica.

Para el análisis adimensional de cada perfil se ha distribuido el radio de la pala en 50 secciones homogéneas, con la misma longitud. Al aumentar el número de secciones analizadas, los cálculos

son más exactos, pero el tiempo de cálculo aumentará considerablemente. Por ello se ha dividido la pala en un número considerablemente alto para que los resultados sean lo más reales posibles y que el tiempo de análisis no se extienda.

Los parámetros necesarios para el análisis de los perfiles son el coeficiente de sustentación y arrastre, el ángulo de ataque óptimo para cada perfil, el número de palas del aerogenerador y el TSR (Tip Speed Ratio) para el coeficiente de potencia máximo del aerogenerador.

El primer paso para el análisis consiste en calcular el ángulo constructivo (φ) y el ángulo *pitch* (θ) para cada parte de la pala. Para ello se utilizan las siguientes fórmulas:

$$\varphi_i = \frac{2}{3} \operatorname{atan}\left(\frac{1}{\lambda_i}\right)$$

$$\theta_i = \varphi_i - \alpha$$

λ_i consiste en el reparto promedio del TSR (λ) entre las secciones de la pala del aerogenerador:

$$\lambda_i = \lambda \cdot r_i$$

Después hay que calcular el factor de corrección (F_i). Este factor también se calcula para cada sección de la pala:

$$F_i = \left(\frac{2}{\pi}\right) \operatorname{acos} e^{\left(\frac{-(\frac{B}{2})(1-r_i)}{r_i \cdot \sin(\varphi_i)}\right)}$$

*B es el número de palas del aerogenerador
r_i es el radio adimensional de cada sección*

Una vez calculados todos estos parámetros se calcula el coeficiente de potencia (C_p) para cada sección de la pala:

$$C_{p_i} = \left(\frac{8 \cdot d\lambda}{\lambda^2}\right) \cdot F_i \cdot \sin^2(\varphi_i) \cdot [\cos(\varphi_i) - \lambda_i \cdot \sin(\varphi_i)] \cdot [\sin(\varphi_i) + \lambda_i \cdot \cos(\varphi_i)] \left(1 - \frac{C_d}{C_l} \cdot \cot(\varphi_i)\right) \cdot \lambda_i^2 \quad (37)$$

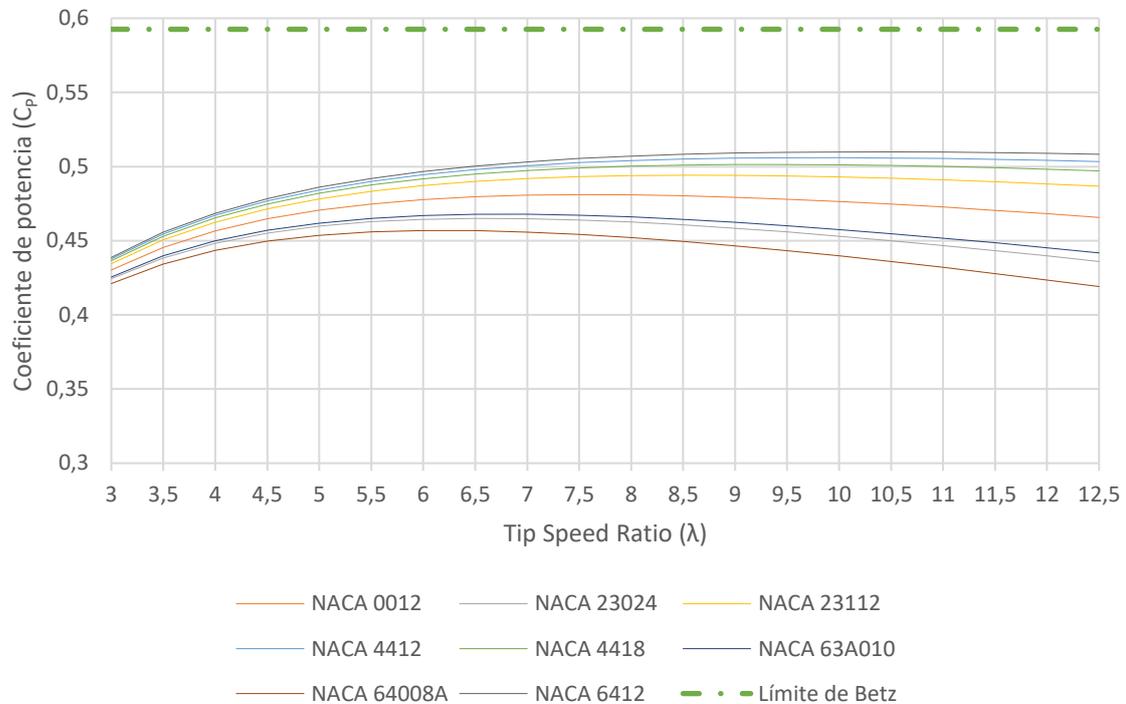
El último paso consiste en sumar el coeficiente de potencia de cada sección de la pala para conseguir el valor general del aerogenerador:

$$C_p = \sum C_{p_i} \quad (38)$$

Este proceso se ha realizado en cada perfil de pala, obteniendo para cada perfil el valor de coeficiente de potencia máximo y la curva de C_p vs TSR. En la siguiente gráfica se muestra la curva C_p -TSR para cada perfil de pala:

Tabla 8: Resumen de los resultados del análisis de los perfiles de pala

	NACA 0012	NACA 23024	NACA 23112	NACA 4412	NACA 4418	NACA 63A010	NACA 64008A	NACA 6412
C_p (max)	48,10%	46,50%	49,42%	50,60%	50,14%	46,79%	45,69%	50,99%
TSR (opt)	7,5	6,5	8,5	10	9,5	7	6	10,5



Gráfica 7: Curvas C_p - TSR para cada perfil de pala

Como se puede observar en la gráfica, la desviación entre los coeficientes de potencia de cada perfil de pala aumenta a medida que aumenta el TSR. Se debe tener en cuenta que ambos ejes han sido modificados para poder visualizar la diferencia entre las diferentes curvas. El perfil óptimo calculado es el NACA6412, obteniendo un valor máximo de 50,9% a un TSR de 10,5. Este será el perfil que se utilizará para el diseño del aerogenerador.

Este análisis se ha llevado a cabo para el caso en el que se utilice el mismo perfil NACA para todas las secciones de las palas. Cabe la posibilidad de analizar un diseño de las palas del aerogenerador con perfiles mixtos, seleccionando diferentes perfiles según el ángulo de ataque óptimo para cada sección. De esta manera, se podría llegar a optimizar más el diseño del aerogenerador para poder aumentar su producción, aumentando el ahorro energético y económico, y reduciendo el periodo de amortización.

3.2.3. Definir el aerogenerador (características y materiales)

Antes de comenzar con los cálculos del dimensionamiento de las palas, hay que definir el número de palas del aerogenerador y la potencia que se desea producir a una cierta velocidad de viento.

El aerogenerador diseñado es tripala. Los aerogeneradores bipala o monopala suponen un ahorro económico, debido al ahorro en el coste de la pala, una reducción en el peso del aerogenerador e incluso son sistemas que trabajan a mayores velocidades. [37]



Ilustración 25: Aerogeneradores monopala, bipala y tripala [37]

Este último aspecto es muy interesante para la aplicación de bombeo propuesto, ya que se reduciría la relación de transmisión necesaria en la multiplicadora o sistema de transmisión para conseguir la misma rotación en la bomba de agua. Los aspectos negativos de estos dos sistemas (monopala y bipala) son el ruido, generado por el aumento de velocidad de giro, y el aspecto visual. Además, estos peculiares sistemas requieren un diseño más complejo que los aerogeneradores tripala, puesto que el rotor debe ser basculante, con buje oscilante debido a al movimiento de las palas y las vibraciones.



Ilustración 26: Vibraciones y cambio de inclinaciones en aerogeneradores bipala [37]

Por otro lado, la velocidad del viento para el diseño del aerogenerador se ha definido teniendo en cuenta las curvas de velocidad obtenidas en el análisis del recurso eólico, fijando la velocidad de diseño en 4 m/s. Este valor se ha determinado debido a la probabilidad de las velocidades del viento en la costa valenciana/alicantina analizado anteriormente. Hay velocidades de viento con mayor probabilidad, pero se ha definido este valor de manera de que no se incrementen las dimensiones del aerogenerador.

La potencia se ha fijado en 20kW, teniendo en cuenta las pérdidas mecánicas que pueden generarse en el sistema mecánico interno en el aerogenerador, mediante un 90% de eficiencia en el sistema mecánico.

De esta manera estaría asegurado una potencia de generación de 20kW siempre que el viento sea superior a 4 m/s, pudiendo incrementar esta potencia siempre y cuando la velocidad de viento incremente, puesto que la potencia disponible aumenta al cubo en relación con la velocidad del viento:

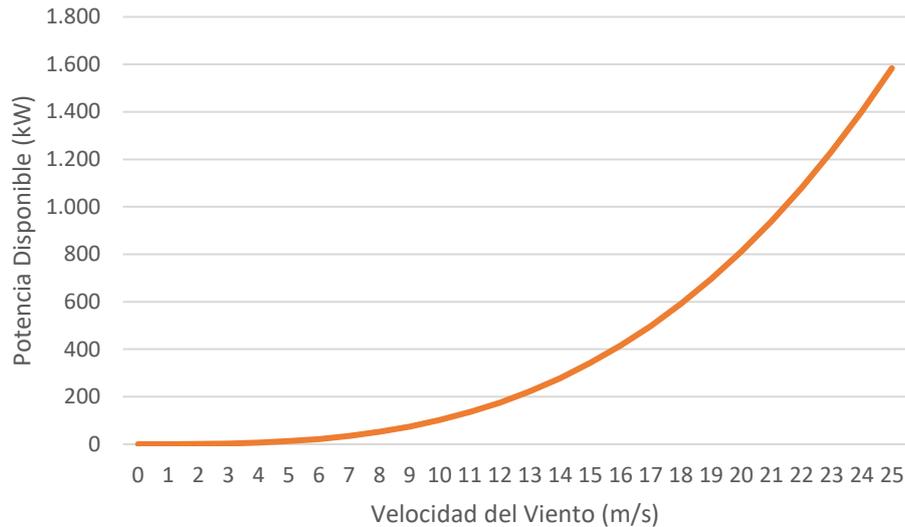
$$P = \eta_m \frac{1}{2} C_p \rho A v_1^3 \quad (39)$$

η_m es la eficiencia mecánica del sistema

ρ es la densidad del aire

A es el área del aerogenerador

v_1 es la velocidad del viento al llegar al aerogenerador



Gráfica 8: Potencial de generación de un aerogenerador de 10m de radio

La curva mostrada en la gráfica anterior se ha calculado para un radio del aerogenerador de 10 m y un sistema eólico ideal, igualando el coeficiente de potencia al límite de Betz. Como se puede ver en la gráfica, teóricamente, a los 25 m/s de viento (velocidad de corte de los aerogeneradores) la potencia disponible en la entrada del aerogenerador llegaría hasta 1,6 MW.

En cuanto a la elección del material para las aspas del aerogenerador hay que tener en cuenta que se busca un material resistente, tanto a las fuerzas ejercidas por el viento como a las condiciones climáticas de la zona (temperatura, humedad...), maleable, ligero y con el menor coste posible. En la siguiente lista se describen diferentes materiales utilizados para la fabricación de las palas de los aerogeneradores:[38] [39]

- Aleaciones de acero y de aluminio: utilizadas en aerogeneradores pequeños debido al problema de peso y de fatiga.
- Fibra de vidrio reforzado con resina poliéster (PRFV): a la capa de fibra de vidrio se le añade resinas de poliéster como barrera química y capa mecánica. Este material permite aumentar la resistencia de la fibra de vidrio y a su vez reduce la corrosión procedente del ambiente.[40]
- Fibra de vidrio reforzada con resina epoxy ("GRP"): material ligero, con gran flexibilidad, con baja deformación a temperaturas extremas y con alta resistencia a la absorción del agua.
- Fibra de carbono o aramidas (Kevlar): material con buenas propiedades mecánicas, con alta resistencia específica y baja densidad. No es un material competitivo para grandes aerogeneradores por su alto coste.
- Fibra mixta de fibra de vidrio y carbono: utilizado para mejorar las propiedades mecánicas de la estructura. Desarrollada con la intención de mejorar la estructura con el mínimo aumento del coste.
- Materiales compuestos (composites) de madera, madera-epoxy o madera-fibra-epoxy: estos materiales están siendo investigados y desarrollados para su futura introducción en el mercado de la energía eólica.

El rendimiento energético de las turbinas eólicas disminuye considerablemente debido al desgaste de las palas, provocado por la colisión con las partículas de polvo suspendidas en el ambiente, la

acumulación de suciedad y el crecimiento de microorganismos en las palas, ya que todos estos factores afectan a la aerodinámica del perfil de las palas.

Para afrontar estos problemas, el IUTC (Instituto Universitario de Tecnología Cerámica Agustín Escardino de la Universitat Jaume I de Castellón) está estudiando el desarrollo de un nuevo material con una resistencia superior a los materiales utilizados actualmente, basándose en recubrimientos fotocatalíticos y antifouling (pintura antiincrustante), con una elevada durabilidad.[41]

Teniendo en cuenta toda esta información, se ha decidido que se utilizará la fibra de vidrio y carbono para las palas del aerogenerador, gracias a su baja densidad, maleabilidad y resistencia. Se le añade fibra de carbono a la fibra de vidrio para poder mejorar las propiedades mecánicas de las aspas, de manera que se aumenta la vida útil del aerogenerador y reduce los costes de mantenimiento, manteniendo la eficiencia del sistema.

3.2.4. Dimensionado de las palas del aerogenerador.

El primer paso para el dimensionado del aerogenerador una vez seleccionado el perfil, es calcular el radio del aerogenerador (R). Para ello utilizaremos la siguiente fórmula:

$$R = \sqrt{\frac{2 \cdot P}{C_p \cdot \eta_{mec} \cdot \rho_{aire} \cdot \pi \cdot v_{aire}^3}} \quad (40)$$

donde R es el radio del aerogenerador, P es la potencia de diseño, C_p el coeficiente de potencia, η_{mec} la eficiencia del sistema mecánico, ρ_{aire} la densidad del aire y v_{aire} la velocidad del viento para el diseño del aerogenerador.

La eficiencia mecánica del sistema se ha determinado en un 90 % y la densidad del aire en 1,21 kg/m³. Hay que tener en cuenta que estos valores son aproximados, puesto que la densidad del aire variará según la presión y temperatura.

Teniendo en cuenta que la eficiencia del aerogenerador es de 50,9 %, y que la potencia generada por el aerogenerador a 4 m/s de viento debe de ser de 20 kW, el radio del aerogenerador tiene que ser de 18,93 m.

Una vez calculado el radio del aerogenerador, se debe calcular las dimensiones de la cuerda (c_i) del perfil de la pala de cada sección. A diferencia del cálculo adimensional realizado para el análisis de los perfiles de pala, estos cálculos se realizan de manera dimensional:

$$c_i = \frac{8 \cdot \pi \cdot r_i}{B \cdot C_l} \cdot (1 - \cos(\varphi_i)) \quad (41)$$

Otro parámetro necesario para el cálculo del sistema es la velocidad relativa del viento (U_{rel_i}). Para calcular este parámetro se tienen que llevar a cabo los siguientes cálculos:

$$\theta_i' = \frac{B \cdot c_i}{2\pi \cdot r_i} \quad (42)$$

θ_i' es la solidez local

$$U_{rel_i} = \frac{U}{\left(\frac{\theta_i' \cdot C_l}{4 \cdot F_i}\right) \cdot \cot(\varphi_i) + \sin(\varphi_i)} \quad (43)$$

El último paso consiste en calcular las fuerzas (dF_i) y el momento (dM_i) generado en cada sección de las palas:

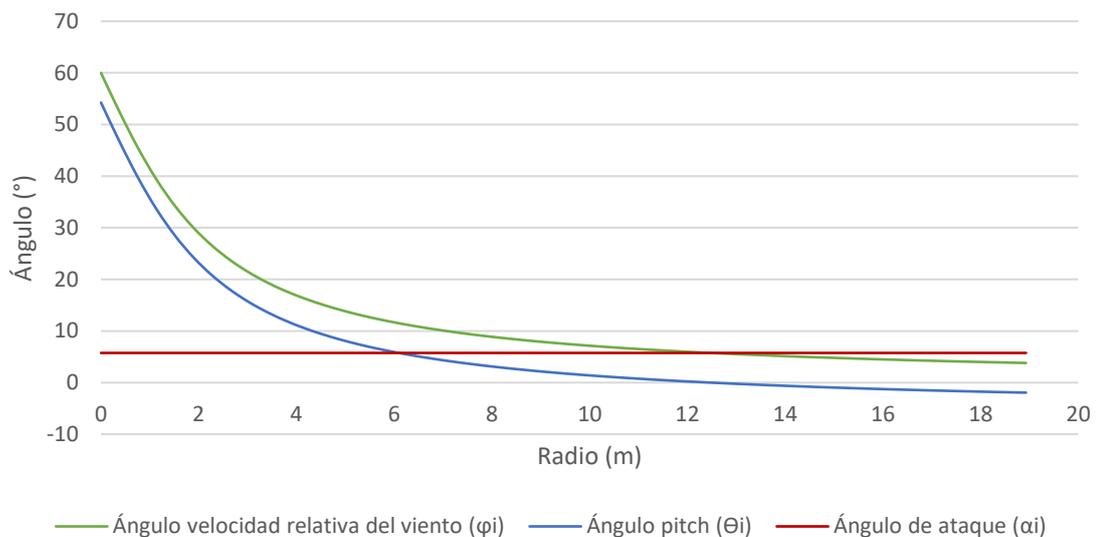
$$dF_i = \frac{B}{2} \cdot \rho \cdot U_{rel_i}^2 \cdot (C_l \cdot \cos(\varphi_i) + C_d \cdot \sin(\varphi_i)) \cdot c_i \cdot dr \quad (44)$$

dr es la longitud de cada sección de la pala.

$$dM_i = dF_i \cdot r_i \quad (45)$$

El par generado por una pala será igual a la suma del par generado en cada sección de la pala. Esta es la fuerza de par que tienen que soportar la unión de la pala con el buje para que no haya ninguna rotura o deformación en la estructura. Según los cálculos realizados, el par que tienen que soportar cada intersección pala-buje a 4 m/s de velocidad y una generación de 20 kW, es de 113,63 kNm.

Se ha desarrollado un programa en Matlab para el cálculo de todos estos parámetros. La estructura del programa se puede encontrar en el apartado de anexos. En las siguientes gráficas se resumen las características generales de los parámetros de diseño del aerogenerador, comenzando por los ángulos:

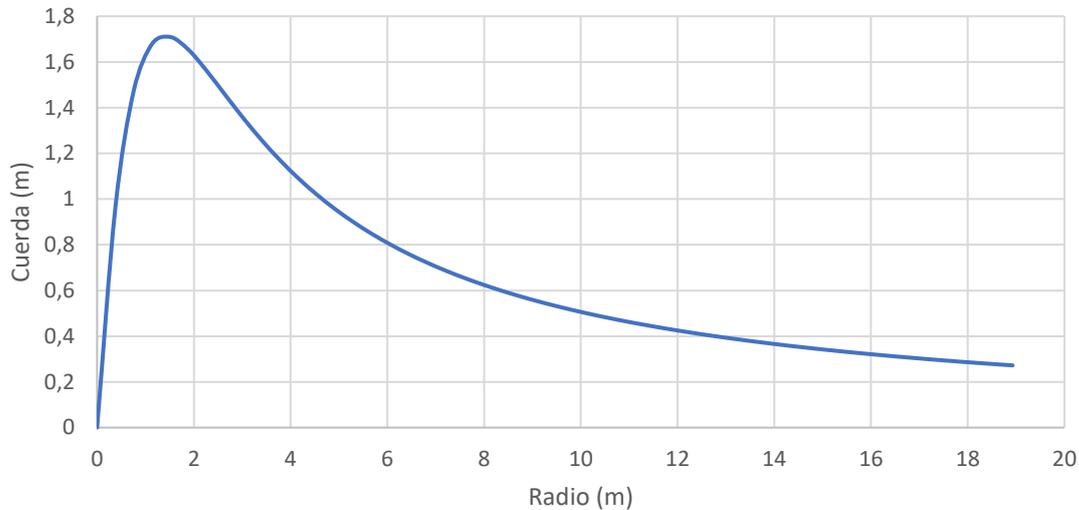


Gráfica 9: Variación de los ángulos de los perfiles de la pala

Como se puede observar en la gráfica anterior, el ángulo *pitch* y de la velocidad relativa del viento se reducen a medida que se aleja la sección hacia la punta de la pala, manteniendo constante el ángulo de ataque del viento, siendo ésta la resta de los dos ángulos anteriores.

Cuanto más cerca del centro del aerogenerador, la velocidad relativa del viento es menor y el aire tiene más dificultades para hacer girar el aerogenerador, puesto que el par generador es menor que en la punta de la pala y se generan más turbulencias. Por ello, son tan elevados los ángulos *pitch* y velocidad relativa del viento durante las primeras secciones de las palas. De esta manera, se incrementa la fuerza de sustentación (*lift*) en comparación de la fuerza de arrastre (*drag*), compensando las perturbaciones generadas cerca del eje del aerogenerador y a su vez distribuyendo de manera uniforme la fuerza normal ejercida sobre las palas.

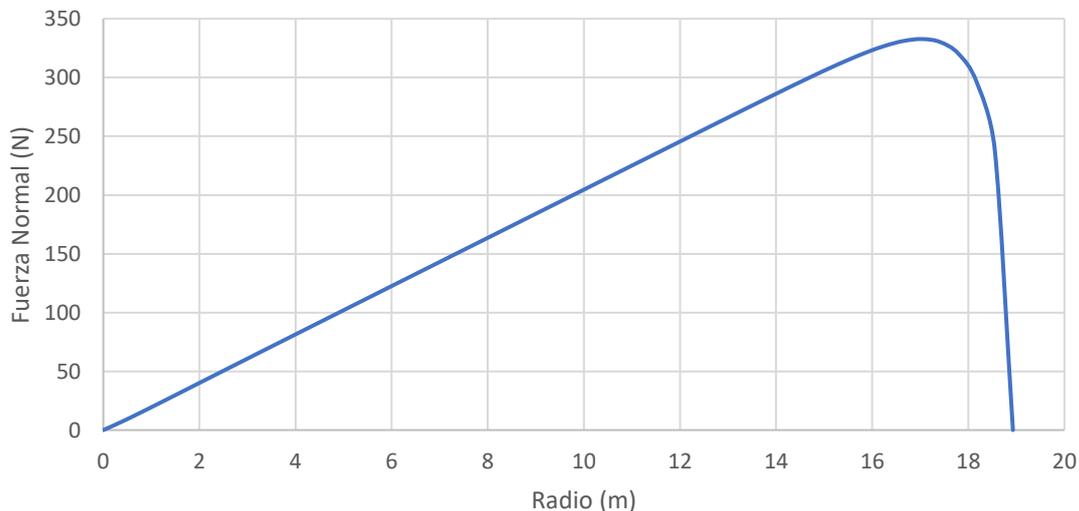
En la siguiente gráfica se muestra la variación de la cuerda de las palas del aerogenerador según el radio de la sección:



Gráfica 10: Variación de la cuerda del perfil de la pala a diferentes longitudes de la pala

De la misma manera, la longitud de la cuerda (distancia entre punta a punta del perfil de la pala) será mayor cerca del buje y se irá reduciendo a medida que la sección de la pala se aleja del centro del eje. Con el aumento del área de contacto se aumenta el aprovechamiento de la fuerza ejercida sobre la pala.

Por último, en la siguiente gráfica se muestra la fuerza normal ejercida sobre las palas debido diferencia de presión generada por las diferentes velocidades de viento sobre la superficie de las palas, a una velocidad del viento a la entrada del aerogenerador de 4 m/s:



Gráfica 11: Variación de la fuerza normal sobre la pala a diferentes longitudes de la pala

El par necesario para hacer girar la punta de la pala es menor que el par necesario para hacer girar las secciones situadas cerca del eje, por ello, a la misma velocidad de aire, la fuerza resultante será mayor en la punta de la pala, ya que necesita menos esfuerzo para hacer girar la pala.

3.2.5. Realización en 3D en Autocad.

Una vez calculadas las medidas y dimensiones del aerogenerador, se ha procedido a diseñar la estructura del aerogenerador en un modelo 3D. Para ello, se han descargado desde la página web de "Airfoil Tools" [36] un total de 50 perfiles de pala, uno para cada sección, con las características de diseño determinadas en el apartado anterior, *Definir el aerogenerador (características y materiales)*, las cuales se han obtenido mediante los cálculos realizados en un programa en Matlab. La programación se encuentra en el anexo de proyecto.

En la siguiente imagen se muestra una sección transversal de la pala del aerogenerador:

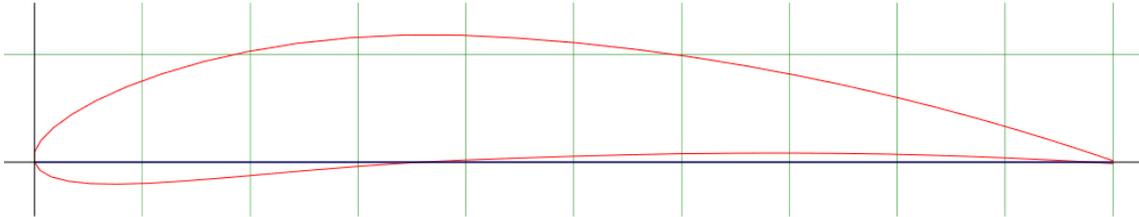


Ilustración 27: Sección transversal de la pala del aerogenerador

Los archivos descargados desde la plataforma son archivos CSV con las coordenadas de los puntos que constituyen el perímetro de la sección.

Una vez descargados todos los perfiles se han importado al programa de Autocad, añadiendo cada perfil a su correspondiente altura (radio de la pala), como se puede observar en la siguiente imagen:



Ilustración 28: Modelado de los perfiles de la pala para cada sección

Una vez añadidas todas las secciones, se han revestido para generar la superficie de la pala y se le ha añadido el elemento de acople para poder conectar la pala al buje.



Ilustración 29: Visualización final de las palas del aerogenerador

Una vez completo el modelo 3D de las palas, se ha generado un modelo 3D para el buje y la torre para obtener una vista preliminar del aerogenerador. En las siguientes imágenes se muestran capturas desde diferentes puntos de vista del modelo 3D del aerogenerador:

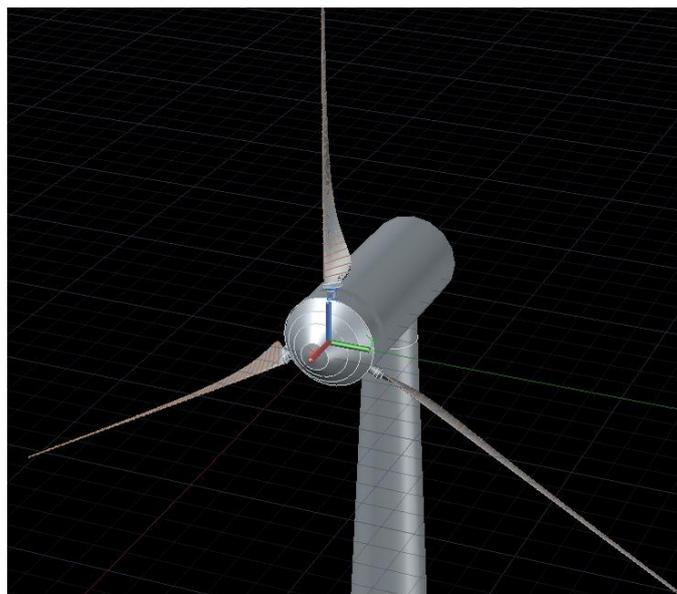
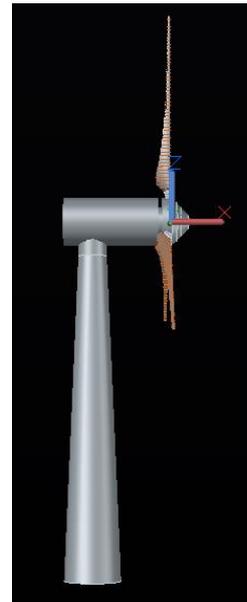


Ilustración 30: Visualización final del aerogenerador en 3D en AutoCad

3.3. Descripción de los componentes adicionales

En este proyecto se diseñan las palas del aerogenerador, pero se necesitarían diseñar diversos complementos y estructuras, como el buje, la góndola, la torre, la multiplicadora, el sistema de transmisión mecánica desde la multiplicadora hasta el eje de bomba de agua y la propia bomba de agua.

En la siguiente imagen se muestra el sistema propuesto, donde el aerogenerador está directamente conectado con el sistema de bombeo de agua. Este sistema se puede encontrar bajo agua (tal y como podemos observar en la siguiente imagen), enterrada (camino a la central desalinizadora) o en la propia planta.

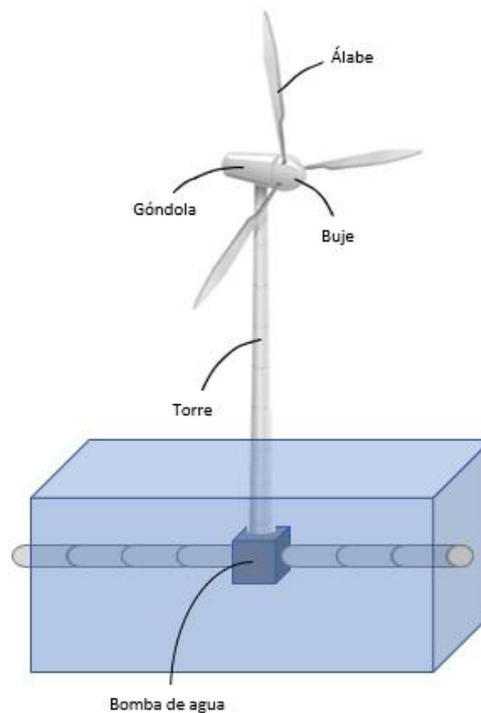


Ilustración 31: Acoplamiento completo del sistema propuesto (aerogenerador-sistema de bombeo)

En este apartado se describe brevemente cada subsistema de manera descriptiva. Para poder llegar a implementar este proyecto en su totalidad, se deberían llevar a cabo diversos estudios de diseño más exhaustivos sobre los siguientes sistemas:

3.3.1. Buje

Se define como el acoplamiento entre las palas y el eje principal del aerogenerador y es el único elemento externo que gira.



Ilustración 32: Estructura del buje [42]

En él se instalan los sistemas para el control del ángulo *pitch* de las palas, con la posibilidad de optimizar la producción del aerogenerador a diferentes velocidades de viento. Este elemento ha de ser diseñado con especial atención, puesto que debe soportar todo el par generado por las aspas.

Este accionamiento también se utiliza para ayudar al frenado del aerogenerador en caso de que las velocidades de viento superen la velocidad de desconexión (*cut-out*) del aerogenerador[43][44]. Este valor, aproximadamente de 25 m/s, define la velocidad máxima de viento a la que el aerogenerador puede funcionar. A partir de esta velocidad de viento se accionan los sistemas de frenado del aerogenerador y se modifica el ángulo de las palas por la seguridad de la estructura.

3.3.2. Góndola

Es la estructura que protege el eje principal, el sistema de frenado, la multiplicadora y el generador. En el caso de este proyecto, no existiría ningún generador eléctrico y se sustituiría este equipo por un sistema de transmisión de energía mecánica desde la salida de la multiplicadora hasta el eje principal de una bomba de agua.

El diseño de la góndola es muy importante debido a las turbulencias que pueda generar a causa del rozamiento generado con el viento procedente de las palas (para el caso de aerogeneradores que trabajen a barlovento).

En las góndolas también se instalan pequeñas estaciones meteorológicas para registrar las velocidades de viento y la dirección (rosa de los vientos). Con estas medidas es posible controlar el ángulo *pitch* y la orientación del aerogenerador en caso de existir mecanismos de control y actuación. Estas estaciones meteorológicas también ayudan a desarrollar estudios para futuras instalaciones en la zona. En la siguiente foto se puede apreciar el sistema de medición a la cola de la góndola en un aerogenerador de la empresa Vestas:



Il·lustració 33: Sistema de anemòmetres en un aerogenerador Vestas [45]

En el sistema de acople entre la góndola y la torre existe un mecanismo de control de orientación en aerogeneradores pequeños para aumentar la producción del aerogenerador. Los aerogeneradores grandes normalmente son fijos debido a su peso y a la dificultad de cambiar la orientación del sistema.

3.3.3. Torre

La torre es la estructura de sustentación del aerogenerador, la base de todo el sistema. A parte de soportar todo el peso del aerogenerador y las fuerzas ejercidas por el viento, también actúa como protección para los operarios a la hora de realizar el mantenimiento de los aerogeneradores y ascender a góndola. Para la realización de este proyecto, se le suma otra finalidad, la de proteger el sistema de transmisión mecánica desde lo alto de la torre hasta su base donde se encuentra la bomba de agua.



Il·lustració 34: Torres de un aerogenerador [46]

La torre se debe diseñar teniendo en cuenta el peso de las palas, el buje y la góndola, junto con las fuerzas generadas por el viento. Estas fuerzas son decisivas a la hora de elegir el material de la torre. Aunque también es decisivo la altura de la estructura, debido al incremento del coste del aerogenerador. En la siguiente lista se definen las diferentes tipologías de torres utilizadas para en aerogeneradores:[46]

- Torres de celosía: basado en perfiles de acero soldados, son estructuras de bajo coste, debido a que requieren la mitad de material que una torre tubular sin sustentación

adicional con la misma rigidez. La desventaja y la razón de su desaparición es la apariencia visual frente a torres tubulares, por ello ya no se utilizan en los nuevos aerogeneradores.



Ilustración 35: Torre de celosía

- Torres de mástil tensado con vientos: es una tecnología basada en delgadas torres de mástil sostenidas por cables tensores, utilizados en aerogeneradores pequeños. La ventaja de estas estructuras es su coste. La desventaja es el difícil acceso al aerogenerador debido a su estructura.



Ilustración 36: Torre de mástil tensado con vientos

- Torres tubulares de acero: utilizado en la mayoría de los aerogeneradores, se fabrican en secciones de 20-30 metros con bridas en cada extremo y unidas con pernos “in situ”. Las torres son principalmente estructuras tronco-cónicas, es decir, con un diámetro creciente hacia la base. De esta manera aumenta la resistencia de la estructura y al mismo tiempo ahorra en material.



Il·lustració 37: Torre tubular de acer

- Torres tubulars de hormigón: son estructures similars a les torres tubulars de acer, pero substitueixen el material base per el hormigón. Gracies a este material se consiguen propuestes más econòmicas para torres de grandes alturas, puesto que la cantidad de hormigón en la cimentación se reduce en dos tercios y reduce el tiempo necesario para la instalación del sistema.[47] Al mismo tiempo, aumenta la producción de la torre al ofrecer unas estructures altas con un coste inferior a las torres de acer, con una solución más robusta y menos susceptible al daño y a la oxidación sin necesidad de pinturas. El aspecto negativo de esta tecnología son las emisiones de carbono generadas a la hora de su producción.



Il·lustració 38: Torre tubular de hormigón

Como analizado anteriormente, con el incremento de la altura del aerogenerador la velocidad del viento aumenta, incrementando la producción de energía. Aunque se incremente la producción energética, también se incrementa el esfuerzo que debe soportar la torre y lo que es más importante para los inversores, el coste de la instalación.

El aumento de la altura de la torre supone un incremento considerable de la inversión total. Generalmente, el precio de la torre de la turbina eólica supone alrededor del 20% del coste total de la turbina. El coste adicional de incrementar en 10 m una torre de 50 m es de aproximadamente 12.500 €. Por ello, es muy importante optimizar la altura de la torre para obtener unos valores de inversión atractivos y no exceder el presupuesto.[46]

Teniendo en cuenta el análisis de recurso eólico realizado en el apartado *Análisis del recurso eólico* (Gráfica 5) y el coste que supone el incremento de la altura del aerogenerador, la altura de la torre se ha fijado en 30 m. De esta manera se define un margen de altura entre el suelo y la pala para evitar las turbulencias y a su vez optimizar los costes.

3.3.4. Cimentación

Para la sustentación de todo el aerogenerador se suele desarrollar una cimentación (superficial/especial). En ocasiones también con algún tipo de tratamiento profundo del terreno para mejorar las características de agarre del aerogenerador.



Ilustración 39: Cimentación de un aerogenerador [48]

En el caso de una desalinizadora, el diseño de la cimentación variará según la posición del sistema de bombeo a la que se le acople el aerogenerador. En el caso de que el sistema de bombeo sea subterráneo, el diseño de la cimentación se deberá llevar a cabo teniendo en cuenta la profundidad y las características del terreno.

En cambio, si el sistema de bombeo se encuentra bajo agua, la cimentación deberá ser totalmente diferente, puesto que necesitará un sistema de anclaje especial para el suelo marino. Esta capa subacuática ejercerá muchísima menos resistencia, y a su vez, la estructura debe de estar preparada ante la corrosión generada por el agua salina.

Estas cimentaciones acuáticas se clasifican en función de la profundidad a la que se vaya a instalar el aerogenerador, utilizando monopilotes hasta los 15 metros de profundidad, sistemas de cimentación de gravedad (grandes plataformas de hormigón o acero de 1.000 toneladas de peso) hasta los 30 metros de profundidad y jackets para mayores profundidades.[49] Estos jackets son estructuras de soporte y sujeción complejas, con tres o cuatro puntos de anclaje al fondo marino y una armadura de celosía, aportando más seguridad de fijación de las torres .

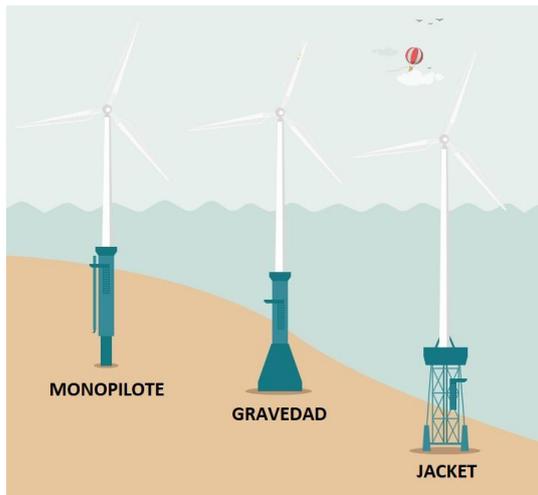


Ilustración 40: Cimentación y anclaje de un aerogenerador en el fondo [49]

3.3.5. Multiplicadora

Es un sistema de transmisión mecánica capaz de aumentar la velocidad de giro del eje principal de la pala, llegando a alcanzar valores superiores de relación de velocidades de 1:50. Para poder aumentar la velocidad de giro reduce de manera proporcional el par proporcionado.



Ilustración 41: Multiplicadora [50]

Estos equipos se utilizan en la actualidad para elevar la velocidad del eje del aerogenerador para el correcto funcionamiento del generador eléctrico. Para este proyecto, la función de la multiplicadora sería aumentar la velocidad de giro del eje para aumentar la velocidad del rotor de la bomba de agua, aumentando a su vez el caudal de agua, optimizando la producción y ajustando el par necesario para bombear el agua.

Para su correcto mantenimiento, estos equipos están equipados con sistemas de lubricación. Este sistema consiste en una combinación racional de bombas y engrase por barboteo[51], de manera que se minimiza el consumo energético, abaratando costes.

Para el sistema propuesto, se debe tener en cuenta que para el sistema de bombeo se requeriría una fuente de alimentación, puesto que no existe generador en el propio sistema. Por ello, se debería desarrollar preferiblemente un sistema que utilice únicamente la lubricación por barboteo. Gracias a este sistema, la lubricación será automática con el giro del eje. A la hora de diseñar este sistema, hay que tener en cuenta que se pueden generar diversas limitaciones técnicas debido a la simplicidad del sistema mecánico de engrase.

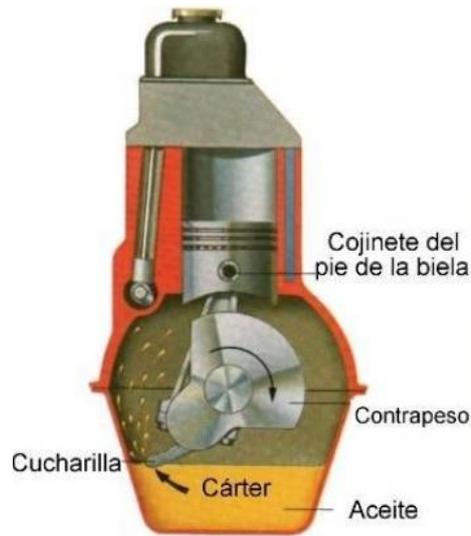


Ilustración 42: Definición gráfica de la lubricación por barboteo [51]

En cuanto al diseño de la multiplicadora, hay que definir la relación de transmisión del sistema. Este valor irá relacionado con el equipo de bombeo y sus necesidades de par, definiendo el caudal nominal de bombeo.

3.3.6. Sistema de transmisión mecánica multiplicadora-bomba de agua

La finalidad de este sistema mecánico es transmitir el movimiento desde la multiplicadora hasta el eje principal de la bomba de agua.

Este sistema se diseña según la posición de la bomba de agua, puesto que la transmisión variará si ambos ejes están en paralelo o son perpendiculares una con la otra. A su vez, también habría que definir si el sistema de transmisión está basado en engranajes, cadenas, cintas...

3.4. Propuestas de control

El sistema de control del aerogenerador para esta aplicación se reduce considerablemente, puesto que su objetivo es generar movimiento y no electricidad. Por ello, la velocidad de giro del aerogenerador no está limitada ni por el generador eléctrico ni por la red eléctrica. Además, hay que tener en cuenta que, mediante este sistema, se ahorra el control de la calidad de la energía suministrada a red (sincronización y energía reactiva).

Para el sistema propuesto se tiene que llevar a cabo un seguimiento de la velocidad de giro del aerogenerador para mantener el sistema en un funcionamiento seguro, asegurando un funcionamiento sin vibraciones.

En los aerogeneradores convencionales, el sistema de cambio de paso regula la potencia generada por el aerogenerador basándose en la curva de potencia, optimizando la posición de las palas para cada velocidad de rotación del sistema, pudiendo variar el ángulo *pitch* para incrementar la velocidad relativa del viento, de manera que se incrementa la fuerza ejercida del viento sobre las aspas.

Este control se puede llevar a cabo mediante un control de lazo cerrado, donde el ángulo de giro de las palas sea controlado mediante la velocidad y dirección del viento obtenidos desde la estación meteorológica y un equipo de medida de la velocidad de giro del aerogenerador, pudiendo ser este un *encoder*.

Se puede actuar independientemente sobre cada pala, o se puede llevar a cabo el mismo control para todas las aspas. El actuador suele consistir en un sistema hidráulico que mediante el aumento o el descenso de la presión del fluido se modifique el giro de las palas. Gracias a este control se optimiza el sistema mediante su precisa regulación al optimizar la aerodinámica de las palas y a su vez aportar mayor seguridad frente a fallos. En la siguiente imagen se muestra el acoplamiento y los sistemas de accionamiento que permiten controlar el giro de las palas:

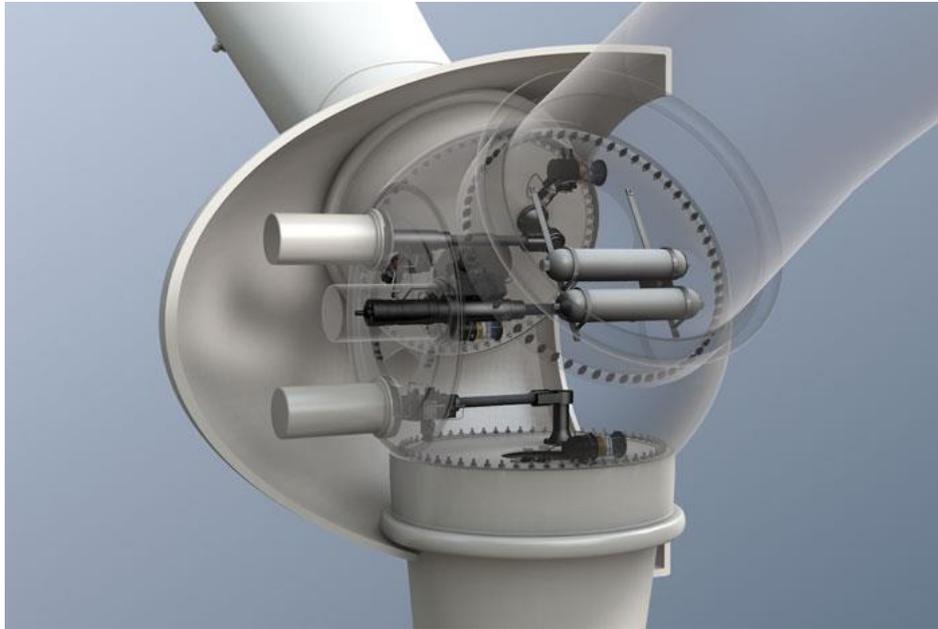


Ilustración 43: Accionamiento para el control del ángulo de las palas [52]

A este control, se le puede añadir un apartado de seguridad limitando la velocidad de giro del aerogenerador, de esta manera el aerogenerador mismo funcionaría de freno al empeorar su aerodinámica, minimizando la necesidad del sistema de frenado, minimizando costes de mantenimiento y ampliando la vida útil de este último sistema.



Ilustración 44: Cambio del ángulo de las palas del aerogenerador [53]

Además, con el control del ángulo de la pala se minimiza también el esfuerzo requerido por el freno a la hora de realizar el mantenimiento del sistema eólico, puesto que el sistema tiene que estar estático para realizar estos trabajos. Se suelen utilizar servo-válvulas para modificar el ángulo de las palas hasta su posición de bandera, reduciendo al máximo las fuerzas de sustentación y como consecuencia, reduciendo la velocidad de giro del aerogenerador.

A su vez, hay que tener en cuenta el par generado en la turbina, puesto que a valores elevados la estructura podría sufrir mecánicamente. Para evitar el aumento del par, habría que aumentar en la medida de lo posible la velocidad del aerogenerador.

Para optimizar el funcionamiento del aerogenerador, también convendría implementar un sistema de control de la orientación del propio aerogenerador. Al igual que para el sistema de control descrito anteriormente, se utilizaría la información recogida por la estación meteorológica para conocer la dirección del viento. Es recomendable no cambiar la posición del aerogenerador para pequeñas variaciones en la dirección del viento, evitando las pérdidas energéticas en el posicionamiento. [54]

3.5. Estimación de la generación

En este apartado se estima la producción del generador teniendo en cuenta el diseño de las palas desarrollado en los apartados anteriores. Para ello, se utiliza la curva de probabilidad de las velocidades de viento en la costa valenciana y alicantina obtenida en el apartado *Análisis del recurso eólico* al analizar el recurso eólico de la zona.

La relación de la potencia y de la velocidad de viento (curva de potencia) del aerogenerador se ha estimado mediante la siguiente fórmula, teniendo en cuenta el radio de la pala, calculada anteriormente en el apartado *Dimensionado de las palas del aerogenerador* y una eficiencia del sistema mecánico del 90%:

$$P = \frac{1}{2} C_p \eta_{mec} \rho_{aire} \pi R^2 v_{aire}^3 \quad (46)$$

Este proceso se ha repetido para obtener la curva de potencia de un aerogenerador ideal, donde las pérdidas mecánicas se han definido al igual que para el caso del aerogenerador propuesto en un 10%, y el coeficiente de potencia se ha determinado según el límite de Betz ($C_p = 16/27$). En la siguiente gráfica se pueden comparar estas dos curvas de potencia:

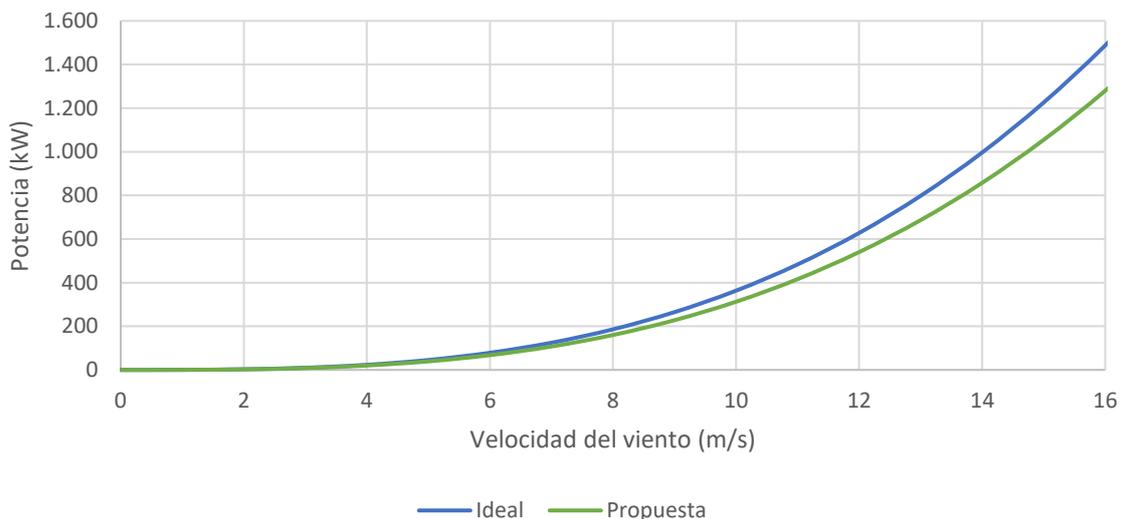


Ilustración 45: Comparativa de las curvas de potencia ideal y la del sistema propuesto

Además, se ha calculado una nueva curva de demanda, para simular la potencia generada por un aerogenerador convencional, suponiendo que el aerogenerador dispone del mismo diseño de las aspas. Esta curva se ha generado mediante el análisis de diversas curvas de carga de diferentes aerogeneradores. [55] Estas curvas reflejan un descenso de la generación a partir de la velocidad

nominal de funcionamiento del aerogenerador, 12 m/s para el caso del aerogenerador graficado. A partir de una velocidad de viento de 14 m/s la generación del aerogenerador se mantiene constante, (puesto que el generador limita el funcionamiento del sistema eólico).

En la siguiente gráfica se pueden comparar las tres curvas:

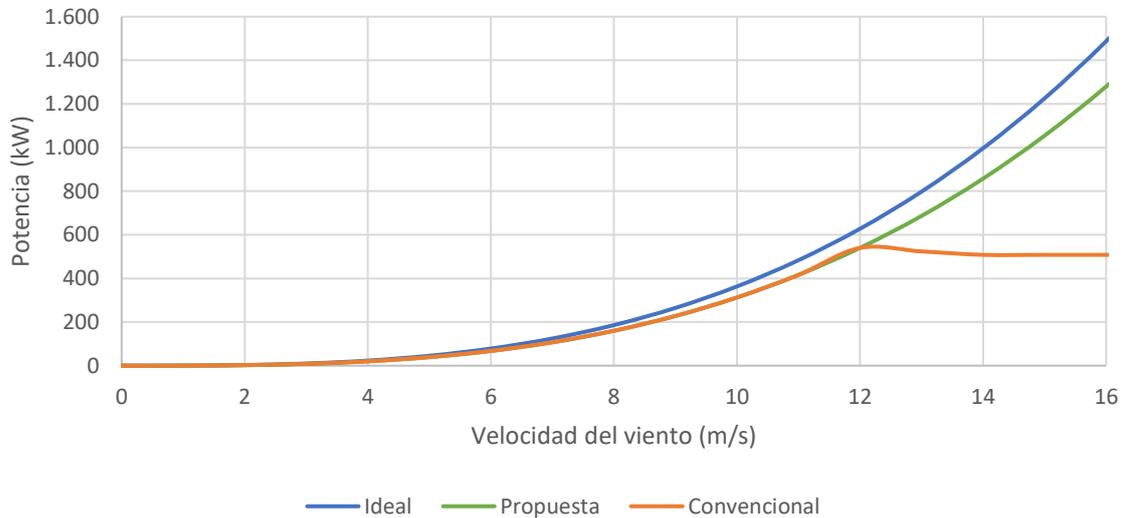


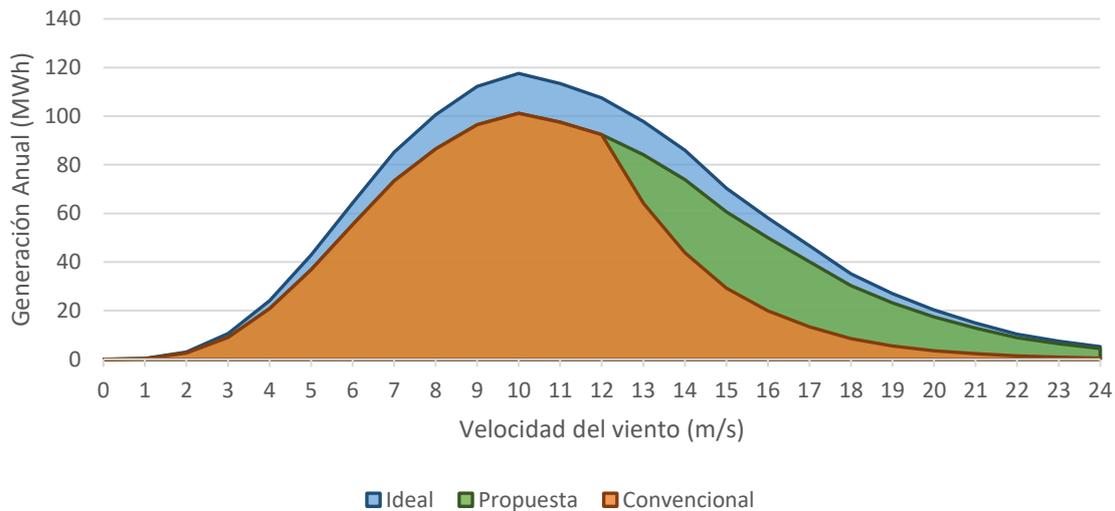
Ilustración 46: Comparativa curvas de potencia ideal, propuesta y de un aerogenerador convencional

La generación anual de cada una de las situaciones anteriores se ha calculado teniendo en cuenta las 8.760 h anuales, la probabilidad de las velocidades de viento y la curva de potencia, tal y como se ha descrito en el apartado *Estimación de la Producción Energética* dentro del *Marco Teórico*. En la siguiente tabla se resumen los valores de generación de cada situación:

Tabla 9: Resumen de la generación de los diferentes casos analizados

Generación Anual (kWh)		
Ideal	Propuesta	Convencional
1.260 MWh	1.084 MWh	865 MWh

Además, para un mejor análisis de la diferencia de generación entre estas situaciones, se ha desarrollado una gráfica que relaciona la generación anual de energía con la velocidad del viento:



Gráfica 12: Generación anual para cada velocidad del viento y para cada caso analizado

Como se puede observar en la gráfica anterior, el sistema propuesto genera más energía que un sistema convencional con las mismas condiciones de diseño, puesto que el sistema no está condicionado a la generación de electricidad.

Todo este análisis se ha llevado a cabo teniendo en cuenta la generación de energía mecánica del sistema. Para poder comparar la instalación propuesta con un aerogenerador convencional habría que tener en cuenta, en el caso del aerogenerador convencional, las pérdidas generadas por el generador eléctrico (aproximadamente del 4%)[56], las pérdidas por efecto joule en la transmisión hasta la carga final (sistema de bombeo) y la reconversión de la energía eléctrica a energía mecánica para el funcionamiento del equipo de bombeo.

Cabe recordar que, aunque el sistema propuesto dependa de las velocidades de viento, se dispone de tanques de agua entre la captación y el propio proceso de desalinización, los cuales pueden actuar como sistemas de acumulación cuando la fuente renovable sea escasa. Se podrían instalar sistemas de bombeo en forma de backup, para hacer frente a aquellas situaciones en las que la escasez del recurso eólico se prolongue.

4. ANÁLISIS ECONÓMICO

Una idea puede resultar muy creativa e interesante al analizar sus características técnicas y su funcionamiento, pero para poder convertir la idea en proyecto es necesario llevar a cabo un análisis sobre su viabilidad económica, puesto que no todas las soluciones son económicamente factibles. En este apartado se realiza un estudio económico sobre el sistema eólico propuesto, analizando primero los costes (inversión y explotación) y después los ahorros generados.

Hoy en día el coste de un sistema eólico ronda los 1.300€ por kilovatio instalado.[57] En el caso de nuestro aerogenerador se ha predefinido la potencia según su generación a los 12 m/s de velocidad de viento, cuando alcanzan la potencia nominal la mayoría de los aerogeneradores convencionales, a 540kW. Teniendo en cuenta este valor, la instalación supondría una inversión de 702.000 €. Se ha desarrollado una previsión del desglose de esta inversión[57], la cual se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 10: Distribución de la inversión de un aerogenerador convencional

Concepto	% sobre inversión	Coste
Diseño e Ingeniería	2 %	14.040 €
Aerogenerador	73 %	512.460 €
<i>Torre</i>	26 %	182.520 €
<i>Palas</i>	22 %	154.440 €
<i>Sistema mecánico</i>	12 %	84.240 €
Generador y transformador	13 %	91.260 €
Obra civil	9 %	63.180 €
Conexión a red	12 %	84.240 €
Otros costes	4 %	28.080 €
TOTAL	100 %	702.000 €

Como se puede observar en la tabla anterior, existen diversos conceptos necesarios para una instalación de un aerogenerador convencional, pero que no son necesarios para el proyecto propuesto, como la inversión del generador, transformador y la conexión a red. Teniendo esto en cuenta, la inversión de la instalación se reduciría un 25%, ahorrando 175.500€ frente a una instalación de un aerogenerador convencional. Gracias a este ahorro, la inversión inicial del sistema queda en **526.500 €**.

Además de la inversión inicial, se debe de tener en cuenta el coste anual de mantenimiento del sistema, puesto que es muy importante para asegurar la vida útil de la instalación. Estos costes rondan el 2% de la inversión, aproximadamente 0,01 € por kilovatio hora generado.[58] Teniendo este valor en cuenta, los costes de mantenimiento se han fijado en **10.530 € anuales**.

Teniendo en cuenta estos costes (inversión y mantenimiento) junto con la producción anual estimada, calculada en el apartado anterior (*Estimación de la generación*), se ha calculado el coste energético nivelado, conocido por sus siglas inglesas LCOE (*Levelized Cost of Energy*).[59] Este parámetro que relaciona todos los costes de la instalación durante su vida útil con la energía

generada. De esta manera se puede comparar la instalación con diferentes fuentes de energía, de forma que se puede analizar su competitividad en el mercado.

Teniendo en cuenta que el aerogenerador tiene una vida útil de 20 años, la inversión total desde la instalación hasta el desmantelamiento, teniendo en cuenta los costes de instalación y mantenimiento, sería de 737.100 € y generaría un total de 21.680 MWh. El LCOE equivalente a estos dos parámetros es de 34 €/MWh.

Este valor se ha comparado con los datos estimados por la U.S. Energy Information Administration (EIA), el cual estima el valor del LCOE en 32,2 € por megavatio hora para las futuras instalaciones eólicas que se pongan en activo el año 2023[60]. Según este registro, la instalación propuesta se situaría por debajo de las fuentes de generación no renovables y con alta competitividad frente a otras fuentes renovables como la geotermia (32,85 €/MWh) o la fotovoltaica (33,47 €/MWh).

Una vez calculados los costes de la instalación y comparada con las demás fuentes de energía mediante el LCOE, se ha calculado la rentabilidad del sistema. Como paso orientativo, primero se ha calculado el periodo de retorno simple de la inversión.

Los ahorros generados por el aerogenerador afectan directamente en la factura eléctrica, bien reduciendo el término de potencia, por la posibilidad de reducir la potencia contratada de la instalación, y por otra parte reduciendo el término de energía del sistema, gracias a la generación de energía.

Para el cálculo de la reducción del término de energía se ha tenido en cuenta el precio promedio de la electricidad obtenido desde el OMIE y analizado en el apartado *Mercado Eléctrico*, 58,654 €/MWh. Teniendo en cuenta que la generación estimada del aerogenerador serían 1.084 MWh anuales, al año se podrían ahorrar 63.580,94 €.

Teniendo en cuenta la generación anual y haciendo un promedio mediante las horas anuales, se puede estimar que la potencia de la desalinizadora se podría reducir en 123,74 kW. Se utiliza este valor para calcular un ahorro aproximado, en la realizada habría que analizar esta optimización de potencia una vez instalado el aerogenerador y verificando el comportamiento de la nueva curva de demanda. Los ahorros relacionados por esta reducción de potencias contratadas se calcularán mediante la siguiente tabla, analizados previamente en el apartado *Optimización de la tarifa eléctrica*:

Tabla 11: Precios regulado del término de potencia para una tarifa 6.2

Periodo	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Precio (€ / kW /año)	22,158	11,088	8,115	8,115	8,115	3,702

Reduciendo la potencia contratada en 123,74 kW en cada periodo tarifario se obtendría un ahorro de 7.584,39 € anuales.

Además, se tienen que añadir el impuesto eléctrico (5,1127%) y el IVA (21%) a estas reducciones, obteniendo un **ahorro total anual de 90.512,60 €**.

Una vez calculados los costes de inversión y mantenimiento y los ahorros generados por la instalación, se debe calcular el periodo de retorno simple de la instalación mediante la siguiente fórmula:



$$PRS = \frac{\text{Inversión} + (\text{Coste}_{\text{mant.}} \cdot \text{Vida útil})}{\text{Ahorro anual}} = \frac{737.100,0 \text{ €}}{90.512,6 \text{ €/año}} = 8,14 \text{ años} \quad (47)$$

Según los cálculos realizados, el proyecto se amortizaría en 8 años y aproximadamente 2 meses, sin tener en cuenta el desarrollo del mercado eléctrico (precios fijos). Por ello, se ha desarrollado un estudio económico teniendo en cuenta el factor tiempo, para un análisis más exhaustivo del periodo de retorno, puesto que un euro en la actualidad no va a tener el mismo valor que en el futuro.

Para este análisis se han barajado diferentes escenarios con diferentes tasas de descuento (3,4 y 5%) e inflación del precio de la electricidad (2,4,6 y 8%) y manteniendo constante el índice de precios al consumidor al 2% (factor que varía el coste de mantenimiento). Como resultado se obtienen el valor actual neto (VAN), el periodo de retorno y el retorno sobre la inversión (en inglés "Return On Investment" (ROI)).

El valor actual neto representa la cantidad de dinero que un inversor ganaría a día de hoy, si decidiese financiar el proyecto. Para que un proyecto sea económicamente factible, este valor tiene que ser positivo, superior a cero, para la vida útil del sistema propuesto, 20 años para el caso del aerogenerador sugerido.[58]

El periodo de retorno se puede obtener a partir de la curva del valor actual neto frente al tiempo. El proyecto generará ahorros a partir de que el valor actual neto sea positivo, determinando el periodo de retorno del proyecto en ese mismo punto en el que se genera el cambio.

El parámetro del retorno sobre la inversión se define como la tasa de descuento del mercado para el caso en el que el valor actual neto para el periodo de la vida útil del proyecto es igual a cero. Mediante este parámetro también se puede conocer la factibilidad del proyecto, al obtener valores superiores a la tasa de descuento del mercado.

Los resultados del análisis económico para el periodo de la vida útil del aerogenerador están resumidos en la siguiente tabla, teniendo en cuenta factor tiempo:

Tabla 12: Resumen de los casos económicos analizados

Tasa descuento del mercado	Inflación precio eléctrico	Índice precios al consumidor	VAN	PRS
3%	2%	2%	891.333,13 €	6,98 años
3%	4%	2%	1.216.318,04 €	6,55 años
3%	6%	2%	1.627.240,36 €	6,20 años
3%	8%	2%	2.148.239,52 €	5,91 años
3%	2%	3%	873.529,21 €	7,01 años
3%	4%	3%	1.198.514,13 €	6,57 años
3%	6%	3%	1.609.436,44 €	6,22 años
3%	8%	3%	2.130.435,61 €	5,92 años
4%	2%	2%	760.557,41 €	7,27 años
4%	4%	2%	1.044.688,28 €	6,80 años
4%	6%	2%	1.402.573,62 €	6,41 años
4%	8%	2%	1.854.709,42 €	6,09 años
4%	2%	3%	744.975,22 €	7,30 años
4%	4%	3%	1.029.106,09 €	6,82 años
4%	6%	3%	1.386.991,42 €	6,43 años
4%	8%	3%	1.839.127,22 €	6,11 años
5%	2%	2%	646.481,88 €	7,59 años
5%	4%	2%	895.706,65 €	7,06 años
5%	6%	2%	1.208.400,76 €	6,64 años
5%	8%	2%	1.602.007,84 €	6,29 años
5%	2%	3%	632.799,39 €	7,63 años
5%	4%	3%	882.024,16 €	7,09 años
5%	6%	3%	1.194.718,27 €	6,66 años
5%	8%	3%	1.588.325,35 €	6,30 años

Observando los resultados resumidos en la tabla anterior, y teniendo en cuenta los cálculos realizados, se concluye lo siguiente:

- El incremento de la tasa de descuento del mercado es desfavorable en cuanto a la amortización del proyecto, debido el peso de la reducción del coste de la electricidad favorece la situación actual.
- El incremento de la inflación del precio de la electricidad favorece a la amortización de la inversión del proyecto, al incrementar los costes de la electricidad ahorrados gracias a la instalación propuesta
- El incremento del índice de precios al consumidor también es desfavorable ante la amortización del proyecto, puesto que incrementa anualmente el coste del mantenimiento, reduciendo los ahorros anuales.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos durante el análisis económico del proyecto, se puede decir que el proyecto es rentable, con un periodo de retorno mínimo de 5 años y 11 meses, obteniendo un valor actual neto de 2.148.239,52 € para un periodo igual a la vida útil del aerogenerador, y un máximo de 7 años y 8 meses, con un valor actual neto de 632.799,39 € en 20 años.

5. ANÁLISIS DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

En este apartado se analizan tanto el impacto medioambiental generado por la instalación y el funcionamiento del aerogenerador, como el impacto evitado debido al desarrollo de una fuente de energía renovable.

Por una parte, se debe realizar un análisis sobre el impacto medioambiental generado durante la vida útil de un aerogenerador (Evaluación del Ciclo de Vida). Al igual que la fotovoltaica, estas instalaciones no emiten sustancias nocivas, como los óxidos de nitrógeno (NO_x) o el dióxido de carbono al ambiente, a la atmosfera durante la producción como las centrales térmicas o de ciclo combinado. Aunque sí que las emiten a la hora de su producción, transporte y puesta en marcha de la instalación. Es verdad que este nivel de contaminación no tiene nada que ver con los que pueda generar una central convencional, pero no se puede decir que los aerogeneradores son fuentes de energía libres de emisiones.

En la siguiente tabla se resumen los impactos medioambientales generados mediante ocho diferentes fuentes de energía según la Asociación de Productores de Energías Renovables.[61] En la primera tabla se analizan las fuentes convencionales no renovables y en la segunda las renovables. Cada impacto se mide a través de ecopuntos, una unidad de penalización ambiental para cuantificar el impacto para después poder comparar las diferentes tecnologías de generación. A mayor puntuación el impacto ambiental es superior:

Tabla 13: Distribución de ecopuntos por tecnología de generación

Impactos Medioambientales	Sistemas Energéticos No Renovables					Sistemas Energéticos Renovables		
	Lignito	Carbón	Petróleo	Gas Natural	Nuclear	Eólico	Minihidráulica	Fotovoltaica
Calentamiento Global	135,00	109,00	97,00	95,80	2,05	2,85	0,41	15,40
Disminución Capa de Ozono	0,32	1,95	53,10	0,86	4,12	1,61	0,05	3,66
Acidificación	920,00	265,00	261,00	30,50	3,33	3,49	0,46	97,00
Eutroficación	9,83	11,60	9,76	6,97	0,28	0,27	0,06	1,97
Metales Pesados	62,90	728,00	244,00	46,60	25,00	40,70	2,58	167,00
Sust. Carcinógenas	25,70	84,30	540,00	22,10	2,05	9,99	0,76	75,70
Niebla de Invierno	519,00	124,00	135,00	3,08	1,50	1,48	0,15	53,30
Niebla Fotoquímica	0,49	3,05	36,90	3,47	0,32	1,25	0,06	3,03
Radiaciones Ionizantes	0,02	0,05	0,02	0,00	2,19	0,01	0,00	0,12
Residuos	50,90	12,90	0,62	0,58	0,28	0,29	0,52	1,84
Residuos Radiactivos	5,28	10,60	7,11	1,34	565,00	1,83	0,32	34,90
Agotamiento de Recursos	5,71	5,47	13,60	55,80	65,70	0,91	0,07	7,06
TOTAL	1.735,15	1.355,92	1.398,11	267,10	671,82	64,68	5,44	460,98

Para poder comparar con mayor facilidad cada sistema de generación con los impactos medioambientales, se ha destacado cada celda con una escala de color, utilizando el color rojo para aquellos sistemas con mayor impacto y el verde para los que menos afecten.

Como se puede observar en la tabla anterior, según color y ecopuntos generales, las instalaciones eólicas son la segunda fuente de generación energética que menos impactos medioambientales genera después de la minihidráulica.

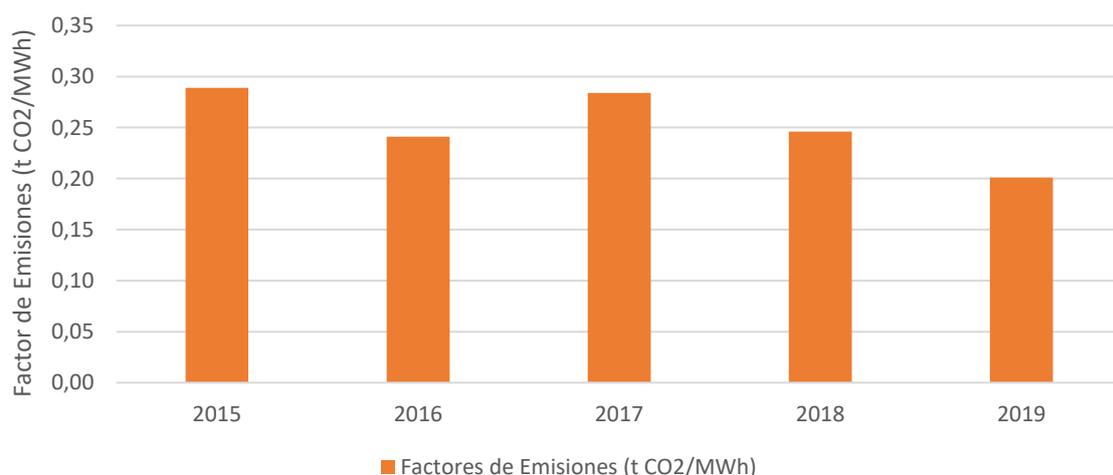
Además, todos los impactos resumidos en la tabla anterior, también hay que tener en cuenta el impacto que generan los aerogeneradores de forma directa en el paisaje, debido a la instalación eléctrica (nuevas líneas, subestación...) y la propia estructura del sistema; y en la fauna de la ubicación de la instalación. Estas estructuras perturban el paisaje y generan impactos significativos por la muerte por colisión de aves (autóctonas o en fase de migración) e insectos. Estos últimos son atraídos por el color blanco de los aerogeneradores y golpeados por las aspas del sistema eólico.[62]

En comparación a una instalación eólica convencional, el impacto visual del proyecto propuesto se reduce considerablemente al trasladar la energía la energía mecánica del viento directamente al sistema de bombeo, sin necesidad de nuevas líneas eléctricas ni subestación.

Además, el impacto sobre la fauna también se reduce, reduciendo la probabilidad del impacto de las aves, debido a la altura propuesta del aerogenerador 30 m, y la ubicación de la instalación, puesto que se ha analizado el aerogenerador para localizarlo en desalinizadoras en la costa valenciana/alicantina, una zona fuera de corrientes de aire, las cuales reducen el esfuerzo del vuelo a las aves migratorias.

Por otra parte, hay que tener en cuenta los ahorros de emisiones generados por el uso de este tipo de instalaciones. Según los cálculos y estimaciones realizadas durante el proyecto, el aerogenerador propuesto generaría un total de 1.084 MWh anuales, evitando que toda esta energía provenga desde la red eléctrica, donde se pierde aproximadamente el 10% de la energía transportada, y sea generada mediante el mix eléctrico de generación.

Debido a este mix eléctrico, la generación de electricidad emite una cantidad de dióxido de carbono a la atmósfera. En la siguiente gráfica se muestra la variación del factor de emisiones durante los últimos cinco años. Estos valores se han obtenido desde la página web de la Red Eléctrica Español (REE)[4].



Gráfica 13: Variación del factor de emisiones del mix eléctrico

Como se puede apreciar en la gráfica, el factor de emisión varía incrementando y reduciendo su valor según el mix energético de cada año. La reducción de este factor está directamente



relacionada con el aumento de la contribución de la generación mediante fuentes renovables. Según el factor de emisiones del año actual, se producen 201 kg CO₂ por cada MWh producidos.

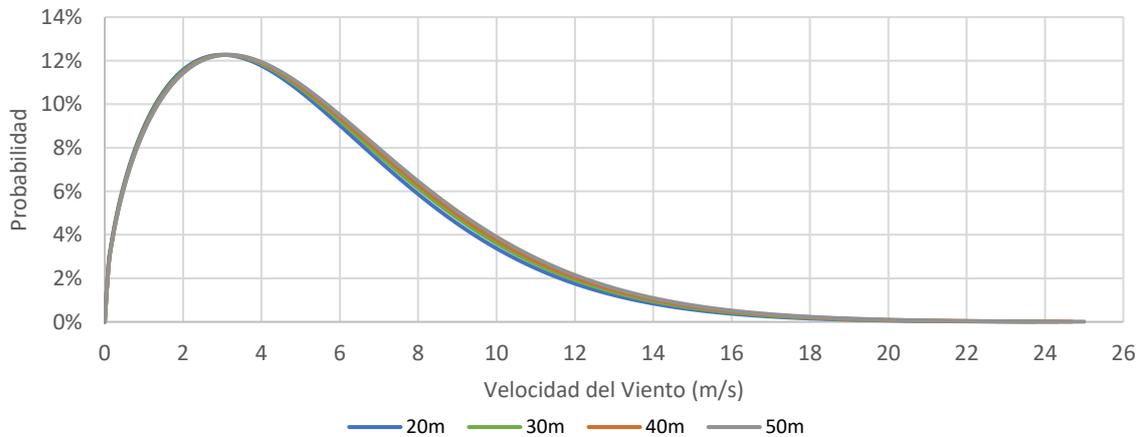
Teniendo en cuenta la energía generada y las pérdidas en la red de transmisión, el sistema debería generar 1.192,40 MWh, los cuales equivaldrían a 239,67 t CO₂ anuales. Teniendo en cuenta que aproximadamente un árbol absorbe 500kg de CO₂ anuales, se necesitarían 479 árboles para eliminar todo el CO₂ emitido.

6. CONCLUSIONES

Este proyecto nació de la idea de poder proponer un nuevo método de generación de energía, competitivo en el mercado, para poder aportar ayuda a las centrales desalinizadoras de agua de la costa valenciana y alicantina, para paliar el alto coste que supone generar agua desalada para una zona con escasez de agua, tanto para el cultivo, el ganado o para la población. Además de dar apoyo a estas instalaciones, se potencia la generación de energía renovable, mediante generación distribuida, reduciendo las pérdidas en la red de transmisión generadas por efecto joule al reducir la demanda de la red eléctrica, de manera que mejora a su vez la eficiencia de la propia red eléctrica.

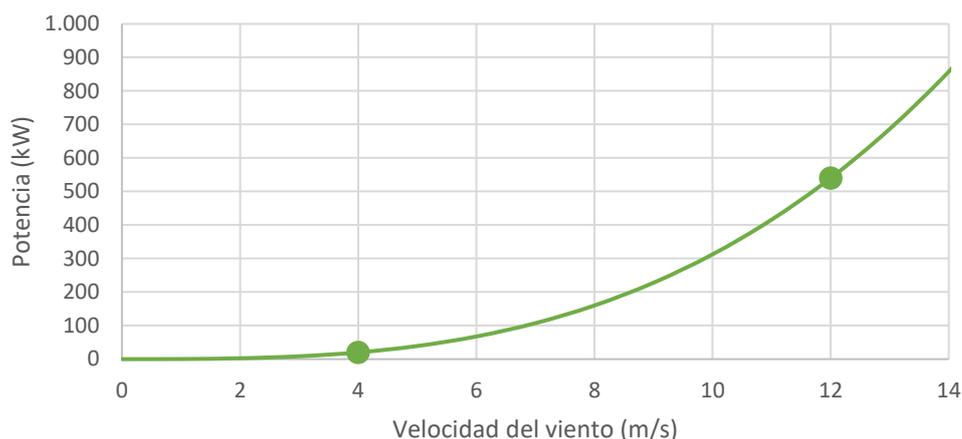
La idea propuesta consiste en un sistema de generación de energía mecánica, basándose en el mismo principio de los aerogeneradores convencionales, pero sin generar electricidad. El aerogenerador se acopla directamente al sistema de bombeo, mediante un sistema de transmisión mecánica y una multiplicadora que aumentará la velocidad de giro para así aumentar el caudal de agua bombeada.

Las palas del aerogenerador se han diseñado de una manera óptima para una generación mínima de 20kW para una velocidad de viento de 4 m/s. Estos parámetros se han determinado teniendo en cuenta el recurso eólico de la costa valenciana y alicantina, de manera que se asegura la generación en la mayoría de los casos. Como se puede ver en la siguiente gráfica, donde se muestra la probabilidad de las velocidades de viento en la costa valenciana y alicantina a diferentes alturas, las velocidades con mayor probabilidad rondan cerca de los 4 m/s:



Gráfica 14: Distribuciones de Weibull promedio para diferentes alturas en la costa valenciana y alicantina

El perfil de la pala seleccionado para el aerogenerador es el NACA6412. Es el perfil que mayor coeficiente de potencia ha obtenido de entre los ocho analizados, 50,99% con un Tip Speed Ratio de 10,5. El radio del aerogenerador es de 18,93 m. Teniendo en cuenta esta distancia y la variación de la probabilidad de las velocidades de viento según la altura, se ha decidido que la torre del aerogenerador tenga una altura de 30 m, de manera que se minimizan los costes de instalación. Teniendo en cuenta todas estas características, se ha calculado la curva de potencia del aerogenerador. El aerogenerador obtiene una capacidad de generación de 540 kW a una velocidad de viento de 12 m/s:



Gráfica 15: Curva de potencia resultante del sistema propuesto

Teniendo en cuenta esta curva de potencia y la probabilidad de las velocidades de viento obtenido mediante el análisis del recurso eólico en la costa valenciana y alicantina se ha calculado la generación anual. El aerogenerador propuesto es capaz de generar 1.084 MWh anuales.

A parte del análisis de la producción también se ha llevado a cabo un análisis económico del proyecto para valorar su factibilidad.

Por un lado, se ha valorado la inversión total de la instalación, obteniendo un valor total de 526.500 €, y los costes de mantenimiento, calculados a partir de la inversión total, fijándolos en un 2% de la inversión total, 10.530€ anuales.

Por otro lado, se han calculado los ahorros generados por el sistema. Mediante un análisis del mercado se han calculado los ahorros generados por la reducción de la potencia contratada (123,74 kW por periodo) del punto de suministro de la desalinizadora, reduciendo el término de potencia de la factura, y por la reduciendo del consumo energético de la red (1.084 MWh anuales), reduciendo el término de energía de la factura. Además de estos términos de la factura, también se han tenido en cuenta los impuestos añadidos, obteniendo un ahorro total anual de 90.512,60 €.

Teniendo en cuenta todos estos valores se ha analizado el periodo de retorno simple, obteniendo un valor de 8 años y 2 meses. A este análisis se le ha añadido el factor de tiempo, desarrollando un nuevo estudio económico teniendo en cuenta la tasa de descuento del mercado, la inflación del precio eléctrico y el índice de precios al consumidor, para obtener un resultado más realista del periodo de retorno.

Según los resultados obtenidos, con el escenario óptimo (3% de tasa de descuento del mercado, 8% de inflación del precio eléctrico y 2% de índice de precios al consumidor) se conseguiría un valor actual neto del proyecto de 2.148.239,52 € para la vida útil del aerogenerador (20 años) y un periodo de retorno de 5 años y 11 meses. Para el peor caso (5% de tasa de descuento del mercado, 2% de inflación del precio eléctrico y 3% de índice de precios al consumidor), en cambio, el valor actual neto cae a 632.799,39 €, y el periodo de retorno aumenta a 7 años y 8 meses.

Asimismo, se ha analizado el impacto medioambiental generador por la instalación del aerogenerador. Según la clasificación realizada por la Asociación de Productores de Energías Renovables mediante ecopuntos, unidad de penalización ambiental para cuantificar el impacto, la energía eólica es la fuente de energía con los menores valores de impacto medioambiental. Esto no significa que no se deba preocupar por la fauna de los alrededores de la desalinizadora, a la hora



de la instal·lació, se debe desarrollar un estudio sobre la fauna de la zona para poder minimizar al máximo los efectos en las aves e insectos de la zona.

Hay que tener en cuenta también que, mediante esta generación renovable, se evitan emisiones de gases efecto invernadero, debido a la sostenibilidad de la tecnología eólica. Según se ha podido calcular, al año se llegarían a ahorrar 239,67 t CO₂ anuales. Teniendo en cuenta que aproximadamente un árbol absorbe 500 kg de CO₂ anuales, se necesitarían 479 árboles para eliminar todo el CO₂ emitido durante un año.

Hay que tener en cuenta que esta instalación ha sido diseñada para dar aporte al sistema de bombeo de una planta desalinizadora. Con ello se quiere decir que aparte de esta fuente de energía se requeriría una toma eléctrica, de backup, de manera que, si el recurso eólico escasea durante un largo periodo, la instalación pueda satisfacer su continuo funcionamiento. Estas situaciones serán muy inusuales en estas instalaciones, puesto que los tanques de acumulación de agua situadas entre la captación y el proceso de desalinización actuarían como sistemas de acumulación, las cuales se irán rellenando con diferentes caudales de agua según la velocidad del viento.

Teniendo todo esto en cuenta, el sistema planteado podría contribuir en una generación renovable de la energía y una reducción de su coste, de una manera competitiva ante los demás sistemas de generación, aportando soporte a las desalinizadoras ante sus inmensos consumos, optimizando la rentabilidad de las estas instalaciones desaladoras de agua, puesto que son instalaciones necesarias en las zonas con escasas hídrica, y sus inversiones y costes de mantenimiento son muy elevados.



7. LÍNEAS FUTURAS

El objetivo de este proyecto ha sido el proponer la idea de una nueva fuente de generación de energía para implementarla en el sistema de bombeo de una planta desalinizadora de agua, analizando su rentabilidad y dar el primer paso hacia el desarrollo y comercialización.

Para poder llevar este proyecto a la práctica y poder implementarlo en una planta desalinizadora se requeriría de un trabajo multidisciplinar, en el cual se desarrollarían estudios más exhaustivos sobre los componentes del aerogenerador además del diseño de las palas realizado en este proyecto. Por ejemplo, se podría llevar a cabo un análisis del diseño de las palas con perfiles mixtos, utilizando el perfil óptimo de pala para cada sección, analizado durante el diseño de las aspas.

Junto con estos análisis también se podría realizar diferentes estudios mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD), con la posibilidad de simular la generación del aerogenerador, la velocidad de giro, los esfuerzos mecánicos generados sobre la propia estructura del aerogenerador...

Para la última fase del desarrollo del proyecto, se debería implementar un prototipo y llevar a cabo diferentes experimentos, para analizar y verificar de forma empírica los resultados teóricos. Una vez superadas satisfactoriamente los ensayos realizados en condiciones de funcionamiento reales de una desalinizadora, se llevaría a cabo la implementación final de la instalación del aerogenerador en la desalinizadora, con el acondicionamiento necesario, introduciendo la tecnología en el mercado y a su vez, verificando su rentabilidad en una instalación real.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] IDAE, “Plan de fomento de las energías renovables en España,” *Planta*, p. 9, 1999.
- [2] IDAE, “Plan de Energías Renovables en España 2005-2010,” 2005. [Online]. Available: <https://www.idae.es/publicaciones/plan-de-energias-renovables-en-espana-2005-2010>. [Accessed: 25-Jun-2019].
- [3] IDAE, “Plan de Energías Renovables 2011-2020.” [Online]. Available: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/plan-de-energias-renovables-2011-2020>. [Accessed: 26-Jun-2019].
- [4] Red Eléctrica Española, “Estadísticas.” [Online]. Available: <https://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/series-estadisticas/series-estadisticas-nacionales>. [Accessed: 18-Jun-2019].
- [5] ENAPAC, “Desaladora Autosustentable para Chile,” 2017. [Online]. Available: <https://www.iagua.es/noticias/chile/enapac/17/08/08/desaladora-autosustentable-chile>. [Accessed: 19-Jun-2019].
- [6] Osmo Info, “¿Que es la osmosis inversa?” [Online]. Available: <http://www.osmosisdomestica.es/que-es-la-osmosis-inversa/>. [Accessed: 04-Jun-2019].
- [7] C. Ribagorda, “Desalación del agua.” [Online]. Available: <http://www.elaguapotable.com/desalacion.htm>. [Accessed: 04-Jun-2019].
- [8] G. Bolívar, “Destilación simple: proceso y ejemplos.” [Online]. Available: <https://www.lifeder.com/destilacion-simple/>. [Accessed: 04-Jun-2019].
- [9] “Desalinización del agua.” [Online]. Available: <http://pfsquimica10g.blogspot.com/p/congelacion.html>. [Accessed: 04-Jun-2019].
- [10] M. De Miguel Bello, “Sistemas de captación en desaladoras de agua de mar (I) Tomas abiertas,” 2016. [Online]. Available: <https://www.iagua.es/blogs/mario-miguel-bello/sistemas-captacion-desaladoras-agua-mar>. [Accessed: 04-Jun-2019].
- [11] BASF’s Ultrafiltration Membrane Business, “Ultrafiltración (UF) en la Desaladora de la Planta Petroquímica ubicada en Jazan, Arabia Saudí,” 2017. [Online]. Available: <https://www.iagua.es/noticias/inge-gmbh-basfs-ultrafiltration-membrane-business/ultrafiltracion-uf-desaladora-planta>. [Accessed: 04-Jun-2019].
- [12] Aguas Residuales Info, “¿Cómo funciona una planta desaladora de agua de mar por ósmosis inversa?” 2019. [Online]. Available: <https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/como-funciona-una-planta-desaladora-de-agua-de-mar-por-osmosis-inversa-C7QU1>. [Accessed: 04-Jun-2019].
- [13] M. Montero, “Optimización energética en plantas desaladoras.” [Online]. Available: <https://www.eoi.es/blogs/mateomontero/2014/02/17/optimizacion-energetica-en-plantas-desaladoras/>. [Accessed: 04-Jun-2019].
- [14] “Cálculo y Diseño de Aerogenerador HAWT,” 2014. [Online]. Available: <https://jasf1961.wordpress.com/category/calculo-aerogenerador/>. [Accessed: 04-Jun-2019].
- [15] ABB, “Cuaderno de aplicaciones técnicas: Plantas eólicas,” pp. 1–109, 2010.
- [16] Struturalia, “Aerogeneradores de eje vertical y horizontal: tipos, ventajas e inconvenientes,”

2018. [Online]. Available: <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>. [Accessed: 04-Jun-2019].
- [17] Danish Wind Industry Association, "Wind Energy Reference Manual Part 1: Wind Energy Concepts." [Online]. Available: <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpowerweb/en/stat/unitsw.htm#roughness>. [Accessed: 10-Jun-2019].
- [18] Danish Wind Industry Association, "Rugosidad y cillamiento del viento." [Online]. Available: <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpowerweb/es/tour/wres/shear.htm>. [Accessed: 15-Jun-2019].
- [19] Total, "La liberalización del mercado eléctrico español," 2018. [Online]. Available: <https://www.electricidad.total.es/liberalizacion-mercado-electrico-espanol>. [Accessed: 15-Jun-2019].
- [20] Onulec, "Funcionamiento del mercado eléctrico y como reducir nuestra factura." [Online]. Available: <https://www.onulec.com/blog/noticias-sector-electrico/217-funcionamiento-del-mercado-electrico-y-como-reducir-nuestra-factura>. [Accessed: 15-Jun-2019].
- [21] OMIE, "Precio horario del mercado diario." [Online]. Available: <http://www.omie.es/files/flash/ResultadosMercado.html#>. [Accessed: 17-Jun-2019].
- [22] OMIE, "Nuestros mercados de electricidad." [Online]. Available: <http://www.omel.es/inicio/mercados-y-productos/mercado-electricidad/nuestros-mercados-de-electricidad>. [Accessed: 17-Jun-2019].
- [23] Energía y Sociedad, "6.2. Formación de precios en los mercados mayoristas a plazo de electricidad." [Online]. Available: <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/6-2-formacion-de-precios-en-los-mercados-mayoristas-a-plazo-de-electricidad/>. [Accessed: 15-Jun-2019].
- [24] European Energy Exchange, "What is the EEX exchange?" [Online]. Available: <https://www.eex.com/en/about/eex/exchange>. [Accessed: 15-Jun-2019].
- [25] Asociación Española de Desalación y Reutilización, "Cifras de desalación en España," 2019. [Online]. Available: <https://www.aedyr.com/es/cifras-desalacion-espana>. [Accessed: 16-Mar-2019].
- [26] Fundación Aquae, "Plantas desaladoras en España." [Online]. Available: <https://www.fundacionaquae.org/wiki-aquae/sostenibilidad/plantas-desaladoras-en-espana/>. [Accessed: 09-Mar-2019].
- [27] J. L. Fernandez, "La desaladora 'estrella' de Narbona ya consume tanta energía como todo el turismo de Alicante.," Alicante, 01-Jul-2018.
- [28] Acciona, "IDAM Torrevieja." [Online]. Available: <https://www.acciona-agua.com/es/areas-de-actividad/proyectos/dc-de-plantas-de-tratamiento-de-agua/idam/torrevieja/>. [Accessed: 16-Jun-2019].
- [29] M. González, "La desaladora de Torrevieja no tira: sólo produce un 30% por falta de potencia eléctrica.," Torrevieja, 04-Aug-2017.
- [30] E. J. Martinez, "La planta de Torrevieja, la vital desaladora para Alicante y Murcia, de nuevo, en el punto de mira," Alicante, 15-Dec-2018.
- [31] "La desalinizadora de Torrevieja ya produce 80 hectómetros cúbicos anuales," *Alicante Plaza*, Alicante, 05-Apr-2019.

- [32] “La desalinizadora de Torrevieja acaba la ampliación sin una red para distribuir agua,” *Las Provincias*, Valencia, 13-Oct-2018.
- [33] La Información, “Iberdrola construirá la subestación y la línea eléctrica de la desaladora de Torrevieja por 7,3 millones.” [Online]. Available: https://www.lainformacion.com/economia-negocios-y-finanzas/iberdrola-construira-la-subestacion-y-la-linea-electrica-de-la-desaladora-de-torrevieja-por-7-3-millones_VEbyqGSHOh0ANIiCCIRgj5/. [Accessed: 01-Jun-2019].
- [34] “Windy.” [Online]. Available: <https://www.windy.com/?39.471,-0.376,5>. [Accessed: 04-Jun-2019].
- [35] Enair, “Cálculo de producción - Aerogenerador estudio.” [Online]. Available: <https://www.enair.es/es/app>. [Accessed: 20-Mar-2019].
- [36] “Airfoil tools.” [Online]. Available: <http://airfoiltools.com/>. [Accessed: 24-Mar-2019].
- [37] Danish Wind Industry Association, “Aerogeneradores: ¿Cuántas palas?” [Online]. Available: <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpowerweb/es/tour/design/concepts.htm>. [Accessed: 03-Mar-2019].
- [38] Opex Energy, “Las palas de los aerogeneradores.” [Online]. Available: http://opex-energy.com/eolica/palas_aerogenerador.html.
- [39] Iberdrola, “Palas Aerogeneradores.” [Online]. Available: <https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/top-stories/palas-aerogeneradores>.
- [40] mafiSAN, “Plásticos reforzados con fibra de vidrio. Resinas de poliéster.” [Online]. Available: [Captura del mapa eólico en la costa valenciana/alicantina](#). [Accessed: 19-Jun-2019].
- [41] Energías Renovables, “Nuevos super materiales para los super aerogeneradores,” 2017. [Online]. Available: <https://www.energias-renovables.com/eolica/nuevos-super-materiales-para-los-super-aerogeneradores-20171221>. [Accessed: 04-Mar-2019].
- [42] Iz@ro, “Incremento de productividad en la fabricación de los aerogeneradores.” [Online]. Available: <https://www.izaro.com/incremento-de-productividad-en-la-fabricacion-de-aerogeneradores/c-1292347430/>. [Accessed: 16-Jun-2019].
- [43] Inocua, “Zona de trabajo en la curva de potencia de un aerogenerador.” [Online]. Available: <http://inocua.es/curva-potencia-aerogenerador/>. [Accessed: 15-Apr-2019].
- [44] Microservicios, “Aerogeneradores parados: hay muchas razones para que esto tan aparentemente absurdo suceda,” 2013. [Online]. Available: <https://www.microservicios.com/archivo/mundoreal/aerogeneradores-parados.html>. [Accessed: 25-Apr-2019].
- [45] “Vestas.” [Online]. Available: <https://www.vestas.com/>. [Accessed: 16-Jun-2019].
- [46] Danish Wind Industry Association, “Torres de aerogeneradores.” [Online]. Available: <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpowerweb/es/tour/wtrb/tower.htm>. [Accessed: 20-Mar-2019].
- [47] Energética Futura, “Bases de hormigón en aerogeneradores para aumentar su altura y rendimiento.” [Online]. Available: <https://energeticafutura.com/blog/bases-de-hormigon-en-aerogeneradores-para-aumentar-su-altura-y-rendimiento/>. [Accessed: 25-Mar-2019].
- [48] Acciona, “Parque eólico San Román.” [Online]. Available: <https://www.eolicosanroman.us/>. [Accessed: 15-Jun-2019].

- [49] Iberdrola, “¿Cómo se sustentan los aerogeneradores en el mar?” [Online]. Available: <https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/top-stories/cimentaciones-aerogeneradores-marinos>. [Accessed: 15-Jun-2019].
- [50] Sphares in Motion, “Multiplicadora Winergy PEAB 4395 para aerogenerador Vestas V66.” [Online]. Available: <https://www.sparesinmotion.com/es/repuestos/multiplicadoras/multiplicadora-winery-peab-4395-para-aerogenerador-vestas-v66>. [Accessed: 16-Jun-2019].
- [51] Fandom, “Lubricación por barboteo.” [Online]. Available: https://mantenimiento-de-sistemas-de-lubricacion.fandom.com/es/wiki/Lubricacion_por_barboteo. [Accessed: 15-Jun-2019].
- [52] IFM, “Sistema pitch hidráulico.” [Online]. Available: http://eval.ifm-electronic.com/ifmmx/web/apps-by-industry/cat_060_010_011.html. [Accessed: 16-Jun-2019].
- [53] Danish Wind Industry Association, “Control de potencia en aerogeneradores.” [Online]. Available: <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpowerweb/es/tour/wtrb/powerreg.htm>. [Accessed: 16-Jun-2019].
- [54] J. Salinas Matínez, “Control de un aerogenerador,” Barcelona, 2011.
- [55] Enair, “Estimación de producción eólica y solar.” [Online]. Available: <https://www.enair.es/es/app>. [Accessed: 04-Jun-2019].
- [56] J. Acuña, “Generadores: montaje, instalación, mantenimiento y reparación.” [Online]. Available: <https://www.stmeu.com/mantenimientos-y-reparaciones/rendimiento-en-los-generadores-electricos/>. [Accessed: 15-Jun-2019].
- [57] R. Di Paolo, “Los costes de instalación de un parque eólico,” 2017. [Online]. Available: <https://www.sololocal.info/index.php/noticias/3224-los-costos-de-instalacion-de-un-parque-eolico>. [Accessed: 19-Jun-2019].
- [58] Danish Wind Industry Association, “Costes de operación y de mantenimiento en aerogeneradores.” [Online]. Available: <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpowerweb/es/tour/econ/oandm.htm>. [Accessed: 19-Jun-2019].
- [59] Proyecto FSE, “¿Qué es el LCOE (Levelized Cost of Energy)?,” 2017. [Online]. Available: <http://www.proyctofse.mx/2017/03/22/lcoe-levelized-cost-of-energy/>. [Accessed: 19-Jun-2019].
- [60] EIA, “Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2015,” *Indep. Stat. Anal.*, no. June, pp. 1–12, 2019.
- [61] M. de ciencia y Tecnología, “Impactos ambientales de la producción de electricidad,” *Asoc. Prod. Energías Renov.*, p. 42, 2014.
- [62] N. J. Flores Ramirez, “La cara b de la energía renovable: aerogeneradores,” 2016. [Online]. Available: <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/medio-ambiente/la-cara-b-de-la-energia-renovable-aerogeneradores/>. [Accessed: 18-Jun-2019].



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ANEXOS



1. Programación para el análisis de los perfiles de las palas.

En este apartado se añade la programación llevada a cabo en el programa Matlab, para agilizar los futuros cálculos que se puedan realizar para comparar diferentes perfiles de pala. La programación es la siguiente:

```
clear all
%Vaciar datos del workspace
clc
%Vaciar la ventana de comandos

%Plantilla para comparar diferentes perfiles de pala

%Parámetros generales:
vis=1.511e-5;
%Viscosidad cinemática del aire (m2/s)
ro=1.21;
%Densidad del aire (1kg/m3)
n_mek=0.9;
%Eficiencia del sistema mecánico (eje, multiplicadora...)
landa=3; %Valor
mínimo de TSR para el análisis

%Parámetros específicos para el diseño del aerogenerador:
a=input('Añadir datos predeterminados [0] o añadirlos manualmente [1]: ');
if a==1
P=input('Potencia del aerogenerador (kW): ');
%Añadir potencia del aerogenerador
P=P/1e3;
B=input('Número de palas del aerogenerador: ');
%Añadir el número de palas del aerogenerador (predef. 3)
U=input('Velocidad del viento: ');
%Añadir la velocidad del viento para diseño
N=input('Número de partes: ');
%Añadir el nº de secciones para el análisis (predef. 50)
else
P=20e3;
B=3;
U=4;
N=50;
end
fprintf('\nEl perfil se ha analizado para las siguientes condiciones: \n')
fprintf(' Potencia deseada: %i kW.\n',P/1e3)
fprintf(' N° de palas del aerogenerador: %i palas.\n',B)
fprintf(' Velocidad del viento para el diseño: %2.0f m/s.\n \n',U)

%Parámetros específicos del perfil de pala a analizar
alpha=5.75;
%Ángulo de ataque para valor máximo de CL/CD
alpha=alpha*pi/180;
%Ángulo en radianes para los cálculos
Cl_d=1.2853; %Coef.
sustentación para el valor máximo de CL/CD
Cd_d=0.00901; %Coef.
resistencia para el valor máximo de CL/CD

%Cálculos
j=1;
for q=1:20
i=1;
%Comienzo del vector por sector

for r=(1/N):(1/N):1
r_i(i)=r; %Radio
de cada sector
```

```

    landa_i(i)=landa*r; %TSR
de cada sector
    phi_i(i)=(2/3)*atan(1/landa_i(i));
%Ángulo pitch de cada sector
    thita_i(i)=phi_i(i)-alpha;
%Ángulo constructivo de cada sector

    dlanda=landa/N;
%Diferencial del TSR

    F_i(i)=(2/pi)*acos(exp(-(B/2)*(1-r))/(r*sin(phi_i(i))));
%Factor de corrección de cada sector
    Cp_i(i)=(8*dlanda/landa^2)*F_i(i)*((sin(phi_i(i)))^2)*(cos(phi_i(i))-
(landa_i(i)*sin(phi_i(i))))*(sin(phi_i(i))+(landa_i(i)*cos(phi_i(i))))*(1-
(Cd_d*cot(phi_i(i)))/(Cl_d))*(landa_i(i))^2; %Valor del coef. de potencia (Cp)
de cada sector
    i=i+1; %Salto
a la siguiente posición del vector
    end

    %Resultados
Cp(j)=sum(Cp_i); %Coef.
de potencia del aerogenerador
R(j)=sqrt((2*P)/(Cp(j)*n_mek*ro*pi*U^3)); %Radio
del aerogenerador

i=1;
for r=(1/N):(1/N):1
c(i)=((8*pi)*(1-cos(phi_i(i)))/(B*Cl_d))*(r_i(i)*R(j));
%Dimensión de la cuerda
RE(i)=U*c(i)/vis; %N°
Reynolds para cada sección
i=i+1;
end

land(q)=landa;
%Cambio de TSR
landa=landa+0.5;
j=j+1;
end

    %Busqueda de parámetros
Cp_opt=max(Cp); %Coef.
de potencia óptimo
Landa_opt=land(find(Cp==Cp_opt)); %TSR
óptimo

fprintf('RESULTADOS \n')
fprintf('    Coef. de potencia óptimo: %2.2f %%. \n',Cp_opt*100)
fprintf('    TSR óptimo: %2.1f.',Landa_opt)

    %Gráficos
figure ()
title('Curva Cp-TSR')
plot(land,Cp,Landa_opt,Cp_opt,'o')
xlabel('Tip Speed Ratio (landa)')
ylabel('Potentzia Koefizientea (Cp)')
grid on

```



2. Programación para el diseño de las palas del aerogenerador.

En este apartado se añade la programación llevada a cabo en el programa Matlab, para agilizar los futuros cálculos que se puedan realizar para el diseño de las palas del aerogenerador. La programación es la siguiente:

```
clear all
%Vaciar datos del workspace
clc
%Vaciar la ventana de comandos

%Plantilla para comparar diferentes perfiles de pala

    %Parámetros generales:
vis=1.511e-5;
%Viscosidad cinemática del aire (m2/s)
ro=1.21;
%Densidad del aire (1kg/m3)
n_mek=0.9;
%Eficiencia del sistema mecánico (eje, multiplicadora...)

    %Parámetros específicos para el diseño del aerogenerador:
a=input('Añadir datos predeterminados [0] o añadirlos manualmente [1]: ');
if a==1
P=input('Potencia del aerogenerador (kW): ');
%Añadir potencia del aerogenerador
P=P/1e3;
B=input('Número de palas del aerogenerador: ');
%Añadir el número de palas del aerogenerador (predef. 3)
U=input('Velocidad del viento: ');
%Añadir la velocidad del viento para diseño
N=input('Número de partes: ');
%Añadir el nº de secciones para el análisis (predef. 50)
else
    P=20e3;
    B=3;
    U=4;
    N=50;
end
fprintf('\nEl perfil se ha analizado para las siguientes condiciones: \n')
fprintf('    Potencia deseada: %i kW.\n',P/1e3)
fprintf('    N° de palas del aerogenerador: %i palas.\n',B)
fprintf('    Velocidad del viento para el diseño: %2.0f m/s.\n \n',U)

    %Parámetros específicos del perfil de pala a analizar
alpha=5.75;
%Ángulo de ataque para valor máximo de CL/CD
alpha=alpha*pi/180;
%Ángulo en radianes para los cálculos
Cl_d=1.2853; %Coef.
sustentación para el valor máximo de CL/CD
Cd_d=0.00901; %Coef.
resistencia para el valor máximo de CL/CD
landa=10.5; %Valor
óptimo de TSR para el coef. de potencia máximo

    %Cálculos
i=1;
for r=0:(1/N):1
    r_i(i)=r; %Radio
de cada sección
    landa_i(i)=landa*r; %TSR
de cada sección
    phi_i(i)=(2/3)*atan(1/landa_i(i));
%Ángulo pitch para cada sección
```

```

    thita_i(i)=phi_i(i)-alpha;
%Ángulo constructivo para cada sección

    dlanda=landa/N;
%Diferencial del TSR

    F_i(i)=(2/pi)*acos(exp(-((B/2)*(1-r))/(r*sin(phi_i(i)))));
%Factor de corrección de cada sección
    Cp_i(i)=(8*dlanda/landa^2)*F_i(i)*((sin(phi_i(i)))^2)*(cos(phi_i(i))-
(landa_i(i)*sin(phi_i(i))))*(sin(phi_i(i))+(landa_i(i)*cos(phi_i(i))))*(1-
(Cd_d*cot(phi_i(i))/(Cl_d)))*(landa_i(i))^2; %Valor del coef. de potencia (Cp)
de cada sector
    i=i+1;
end

Cp=sum(Cp_i); %Coef.
de potencia del aerogenerador
R=sqrt((2*P)/(Cp*n_mek*ro*pi*U^3)); %Radio
del aerogenerador

i=1;
for r=0:(1/N):1
c(i)=((8*pi)*(1-cos(phi_i(i)))/(B*Cl_d))*(r_i(i)*R);
%Dimensión de la cuerda
RE(i)=U*c(i)/vis; %N°
Reynolds para cada sección
thita_prima(i)=(B*c(i))/(2*pi*r*R);
Urel(i)=U./(((thita_prima(i)*Cl_d)/(4*F_i(i)))*cot(phi_i(i))+sin(phi_i(i)));
%Velocidad relativa del viento para cada sección
dr=R/N;
%Longitud de cada sección
dF(i)=B*0.5*ro*(Urel(i)^2)*((Cl_d*cos(phi_i(i)))+(Cd_d*sin(phi_i(i))))*c(i)*dr;
%Fuerza ejercida sobre cada sección
i=i+1;
end

R_i=r_i.*R; %Radio
dimensional del aerogenerador
dM=dF.*R_i; %Par
generado sobre cada sección
dM(1)=0;
M=sum(dM); %Par
total del aerogenerador

%Pasar los ángulos a grados
phi_i=phi_i*180/pi;
thita_i=thita_i*180/pi;

%Cálculo de la velocidad de giro
w=landa*U/R;
w_=w*30/pi;

%Gráficos

figure(1)
plot(R_i,c)
title('Cuerda del aerogenerador para cada radio')
xlabel('Radio (m)')
ylabel('Cuerda (m)')
grid on

figure(2)
plot(R_i,phi_i,R_i,thita_i)
title('Cambio de ángulos según el radio')
xlabel('Radio (m)')
ylabel('Ángulo (rad)')
legend('Ángulo velocidad relativa del viento','Ángulo pitch')
grid on

```



```
figure(3)
plot(R_i,dF)
title('Variación de la fuerza normal según el radio')
xlabel('Radio (m)')
ylabel('Fuerza normal (N)')
grid on

%Display
fprintf('RESULTADOS DEL DISEÑO\n\n')
fprintf('El aerogenerador tiene que tener un radio de %2.2f m.\n',R)
fprintf('El coeficiente de potencia (Cp) del aerogenerador diseñado es de %2.2f\n',Cp*100)
fprintf('El valor óptimo del TSR es de %2.1f.\n',landa)
fprintf('El par generado en el aerogenerador es de %4.2f kNm.\n',M/1e3)
fprintf('La velocidad de giro del aerogenerador es de %4.2f rpm.\n',w_)
```