



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de un parque eólico de 50 MW en Catí,
Alto Maestrazgo, Castellón.

Presentado por

Salazar Chueca, María

Para la obtención del

Grado en Ingeniería Civil

Curso: 2019/2020

Fecha: Julio del 2020

Tutor: Pérez Martín, Miguel Ángel



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Diseño de un parque eólico de 50 MW en Catí, Alto Maestrazgo, Castellón.



RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objeto el diseño de un parque eólico en la zona del Alto Maestrazgo, concretamente en el municipio de Catí, perteneciente a la Provincia de Castellón, que permita avanzar en la consecución de los objetivos establecidos por el *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030* para la transición energética española y que dote al país de una mayor cobertura eléctrica generada por fuentes de energías renovables.

Para ello, se realiza un previo estudio de la zona según unos criterios de viabilidad establecidos que abarcan comprobaciones del tipo energético, ambiental y de ubicación. Posteriormente, se lleva a cabo un estudio del viento que permitirá un posterior análisis productivo y económico para cada uno de los modelos de aerogenerador considerados. Con estos se escoge el tipo de turbina más eficiente.

Finalmente, se procede al diseño del parque que incluye tanto la disposición de los aerogeneradores de la forma más eficiente posible como el presupuesto económico de este.

Palabras clave: parque eólico, energías renovables, transición energética, impacto ambiental y viabilidad económica.

RESUM

El present Treball de Fi de Grau té com a objectiu el disseny d'un parc eòlic en la zona de l'Alt Maestrat, concretament en el municipi de Catí, pertanyent a la Província de Castelló, que permeta avançar en la consecució dels objectius establits al *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030* per a la transició energètica espanyola i que dote al país d'una major cobertura elèctrica generada per fonts d'energies renovables.

Per a això, es realitza un previ estudi de la zona segons uns criteris de viabilitat establits que abasten comprovacions del tipus energètic, ambiental i d'ubicació. Posteriorment, es duu a terme un estudi del vent que permetrà una posterior anàlisi productiva i econòmic per a cadascun dels models d'aerogenerador considerats. Amb aquests es tria el tipus de turbina més eficient.

Finalment, es procedeix al disseny del parc que inclou tant la disposició dels aerogeneradors de la forma més eficient possible com el pressupost econòmic d'aquest.

Paraules clau: parc eòlic, energies renovables, transició energètica, impact ambiental i viabilitat econòmica .

ABSTRACT

The purpose of this Final Degree Project is to design a wind farm in the Alto Maestrazgo area, specifically in the municipality of Catí, belonging to the Province of Castellón, that will allow the future achievement of the objectives established by the *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030* for the Spanish energy transition and to provide the country with greater electricity coverage generated by renewable energy sources.

For this, a previous study of the area is carried out according to established feasibility criteria that include checks of the energy, environmental and location type. Subsequently, a wind study is carried out that will allow a subsequent productive and economic analysis for each of the wind turbine models considered. With these, the most efficient type of turbine is chosen.

Finally, the park is designed, which includes both the arrangement of the wind turbines in the most efficient way possible and its economic budget.

Key words: wind farm, renewable energies, energy transition, environmental impact and economic viability .

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	ANTECEDENTES	7
2.1.	LA EÓLICA EN ESPAÑA.....	7
2.2.	LA EÓLICA EN LA COMUNIDAD VALENCIANA	14
2.3.	ESTUDIOS PREVIOS EN LA COMUNIDAD VALENCIANA	17
3.	METODOLOGÍA.....	22
4.	LOCALIZACIÓN.....	26
5.	DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE ACTUACIÓN	29
5.1.	CRITERIO ENERGÉTICO	29
5.2.	CRITERIO AMBIENTAL	31
5.3.	CRITERIO DE UBICACIÓN	35
5.3.1.	EXISTENCIA DE PARQUES EÓLICOS.....	36
5.3.2.	LÍNEA ELÉCTRICA MÁS CERCANA	37
5.3.3.	IMPACTO VISUAL	42
5.3.4.	CAPACIDAD ENERGÉTICA	43
6.	ESTUDIO DEL VIENTO	45
6.1.	OBTENCIÓN DE DATOS.....	45
7.	ELECCIÓN DEL AEROGENERADOR	48
7.1.	MODELOS DE AEROGENERADORES.....	48
7.2.	ANÁLISIS DE PRODUCTIVIDAD.....	52
7.2.1.	DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA DEL VIENTO	52
7.2.2.	CÁLCULO DE LAS CURVAS DE POTENCIAS CORREGIDAS.....	53
7.2.3.	CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN	53
7.2.4.	APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA.....	54
7.2.5.	FACTOR DE USO Y PRODUCCIÓN.....	56
7.3.	ANÁLISIS ECONÓMICO	57
7.3.1.	FLUJO DE CAJA.....	60



7.3.2.	VALOR ACTUAL NETO (VAN)	61
7.3.3.	TASA INTERNA DE RETORNOS (TIR).....	63
7.3.4.	PAYBACK	64
7.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ELECCIÓN DEL AEROGENERADOR....	65
8.	DISEÑO DEL PARQUE EÓLICO	67
8.1.	NÚMERO Y DISPOSICIÓN DE LOS AEROGENERADORES.....	67
8.2.	ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PARQUE EÓLICO	71
8.2.1.	INVERSIÓN INICIAL, COSTES DE EXPLOTACIÓN E INGRESOS ANUALES	71
8.2.2.	INDICADORES ECONÓMICOS: FLUJO DE CAJA, VAN, TIR Y PAYBACK	74
9.	CONCLUSIONES.....	76
10.	REFERENCIAS	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Importaciones evitadas de combustible fósil en toneladas equivalentes de petróleo (Fuente: AEE)	2
Figura 2- Generación de energía eólica nacional 2017-2019 (Fuente: REE) 3	
Figura 3- Evolución de la potencia instalada eólica terrestre y marina a nivel mundial (Fuente: AEE)	4
Figura 4- Potencia eólica instalada en España del 1998-2019 (Fuente: AEE)	4
Figura 5- Potencia total instalada onshore en 2019 a nivel mundial (Fuente: Global Wind Report)	8
Figura 6- Generación de energía eólica y porcentaje de cobertura de la demanda en España con energía eólica (Fuente: AEE)	9
Figura 7- Potencia eólica instalada en España acumulada e incremento anual (Fuente: AEE)	9
Figura 8- Principales fabricantes de aerogeneradores (Fuente: Global Wind Council)	10
Figura 9- Estructura de la generación por tecnologías nacional en junio-julio 2020 (Fuente: REE)	11
<i>Figura 10-Estructura de la generación por tecnologías (GWh) del Sistema Eléctrico Nacional, 2019 (Fuente: Red Eléctrica de España)</i>	<i>11</i>
Figura 11- Evolución de la contribución al PIB del sector eólico (Fuente: AEE).....	12
Figura 12- Emisiones de CO2 evitadas acumuladas 2000-2018	12
Figura 13- Evolución prevista del sector eólico a nivel mundial (Fuente: AEE).....	13
Figura 14- - Zonas del Plan Eólico de la Comunidad Valenciana (Fuente: Generalitat Valenciana).....	15
Figura 15- Localización de los parques eólicos de la Comunidad Valenciana (Fuente AEE).....	16
Figura 16-Zonas viables en la Provincia de Valencia (Fuente: Elaboración propia)	18
Figura 17-Zonas viables en la Provincia de Castellón (Fuente: Elaboración propia)	19

Figura 18-Zonas viables en la Provincia de Alicante (Fuente: Elaboración propia)	20
Figura 19- Bloque 1: determinación de la zona de actuación (Fuente: elaboración propia)	23
Figura 20- Bloque 2: estudio del viento. (Fuente: elaboración propia)	23
Figura 21- Bloque 3: elección del aerogenerador (Fuente: elaboración propia)	24
Figura 22- Bloque 4: diseño del parque (Fuente: elaboración propia)	25
Figura 23- Zonas potenciales del Alto Maestrazgo. (Fuente: elaboración propia)	26
Figura 24- Ubicación de Catí en la provincia de Castellón (Fuente: Wikipedia)	27
Figura 25-Mapa eólico de Castellón (Fuente: Global Wind Atlas)	29
Figura 26- Ampliación mapa eólico. Zona de estudio (Fuente: Global Wind Atlas)	30
Figura 27- Rosa de vientos del punto de estudio (Fuente: Global Wind Atlas)	30
Figura 28-Lugares de Importancia Comunitario de la Comunidad Valenciana (Fuente: Institut Cartogràfic Valencià)	32
Figura 29-Zonas de Especial Protección para las Aves de la Comunidad Valenciana (Fuente: Institut Cartogràfic Valencià)	33
Figura 30-Zonas Protegidas provincia de Castellón (Fuente: Elaboración propia)	34
Figura 31-Zonas Protegidas provincia de Castellón y subzonas escogidas (Fuente: Elaboración propia)	35
<i>Figura 32- Parques eólicos en la provincia de Castellón, E= 1: 500000 (Fuente: Elaboración propia)</i>	<i>36</i>
Figura 33- Sistema eléctrico ibérico, enero 2015, Comunidad Valenciana	37
Figura 34 -Sistema eléctrico ibérico, enero 2015, zona del Alto Maestrazgo (Fuente. Red Eléctrica Española)	41
Figura 35-Sistema eléctrico ibérico, enero 2015, zona del Alto Maestrazgo. Detalle zona escogida (Fuente. Red Eléctrica Española)	41
Figura 36- Poblaciones colindantes a la zona de estudio (Fuente: Google Earth)	42

Figura 37- Impacto visual en Olocau del Rey, Castellón (Fuente: Google Earth)	43
Figura 38- Zona de estudio, vista lateral (Fuente: Google Earth)	44
<i>Figura 39- Perfil longitudinal de la zona de estudio (Fuente: Google Earth</i>	
<i>.....</i>	<i>44</i>
Figura 40- Distribución del viento para la zona de estudio, altura 135 m (Fuente: elaboración propia)	47
Figura 41- Distribución del viento en función de las horas anuales (Fuente: elaboración propia)	47
Figura 42- Aerogenerador E-126 EP3 (Fuente: Enercon)	48
Figura 43- Curva de potencia E-115 (Fuente: The Wind Turbine)	49
Figura44- Curva de potencia E-138 EP3 (Fuente: The Wind Turbine)	50
Figura 45- Curva de potencia E-126 EP3 (Fuente: The Wind Turbine).....	50
<i>Figura 46- Aerogenerador SG-5.0-1323 (Fuente: Siemens Gamesa)</i>	<i>51</i>
Figura 47- Curva distribución del viento (Fuente: elaboración propia)	51
Figura48-Curva de potencia SG-5.0-1323 (Fuente: Wind Turbine Models)	52
Figura49- Curvas de potencia corregidas (Fuente: elaboración propia)....	53
Figura 50- Curvas de producción para cada aerogenerador en KW*h (Fuente: elaboración propia)	54
Figura 51- Descripción gráfica del límite de Betz (Fuente: Wind Power) ..	55
Figura 52- Distribución de la energía en KWh/m ² (Fuente: elaboración propia)	56
Figuran 53- Producción y factor de uso para cada aerogenerador (Fuente: elaboración propia)	56
Figura54- Porcentaje de cada elemento que compone el parque eólico (Fuente: elaboración propia)	58
Figura 55- Precios medios mensuales en Europa 2019 (Fuente: OMIE) ...	59
Figura 56- Flujo de caja dec cada aerogenerador (Fuente: Elaboración propia)	61
Figura 57- Modelo E-138 EP3 (Fuente: Enercon)	66
Figura 58- Distancias entre aerogeneradores.	68
Figura 59- Distancias para el aerogenerador E-126 EP3	68
Figura 60- Dirección del viento predominante para la zona de estudio (Fuente: Windfinder)	69

Figura 61- Localización aerogeneradores (Fuente: elaboración propia) ...	69
Figura 62- Disposición de aerogeneradores I (Fuente: elaboración propia)	70
Figura 63- Disposición de aerogeneradores (fuente: elaboración propia)	70
Figura 64- Disposición de aerogeneradores II (Fuente: elaboración propia)	70
Figura 65- Flujo de caja parque eólico (Fuente: elaboración propia)	74
Figura 66- Evolución VAN del parque eólico (Fuente; elaboración propia)	75
Figura 67- Capacidad de generación instalada acumulada a nivel global en GW y porcentaje con respecto al total mundial en 2018 (Fuente AEE)	¡Error! Marcador no definido.
Figura 68- Potencia eólica instalada en España por Comunitades Autónomas 2018 (Fuente: AEE).....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 69- Diseño parque eólico (Fuente: elaboración propia)	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1- Potencia eólica por Comunidades Autónomas (Fuente: AEE)	5
Tabla 2- Obtención de parámetros Weibull (Fuente: elaboración propia)	46
Tabla 3- Datos de producción de cada modelo de aerogenerador (Fuente: elaboración propia)	53
Tabla 4- Supuestos de partida, inversión (Fuente: elaboración propia) ...	59
Tabla 5- Valores correspondientes a los supuestos de partida de cada aerogenerador (Fuente: elaboración propia)	60
Tabla 6- Payback modelos aerogeneradores (Fuente: elaboración propia)	65
Tabla 7- Pérdidas consideradas y coeficiente de pérdidas global (Fuente: elaboración propia)	73



ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 1- Ley del perfil logarítmico del viento	46
Fórmula 2- Valor Actual Neto	61
Fórmula 3- Tasa Interna de Retornos	63
Fórmula 4- Payback.....	64



ÍNDICE DE ANEJOS

Anejo I: Análisis productivo.

Anejo II: Análisis económico.

1. INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo Final de Grado tiene como objeto el diseño de un parque eólico en el Alto Maestrazgo, Provincia de Castellón, de 50 MW de potencia.

El diseño y posterior construcción de un parque eólico en la Comunidad Valenciana, permitirá dar un paso más hacia delante en la transición energética española y en la futura independencia del sector eléctrico a partir de fuentes sostenibles como es el caso de la energía eólica.

La energía eólica es una de las principales fuentes de energía para la generación de electricidad. Actualmente, resulta necesaria para hacer frente a la demanda a la vez que se respeta el medio ambiente. Además, al ser una fuente renovable, se asegura su perduración en el tiempo a diferencia de los combustibles fósiles y otros recursos limitados. Esto, hace más necesario, si cabe, el estudio, implementación y desarrollo de las nuevas tecnologías en el sector. Por todo esto, la producción de electricidad a partir de energía eólica contribuye al desarrollo sostenible.

Por otra parte, también se ve necesario recalcar que es una fuente de energía limpia. No emite sustancias tóxicas ni contaminantes del aire que pueden ser peligrosas tanto para el medio ambiente como para el ser humano. Además, no genera residuos ni contamina el agua a diferencia de otras fuentes como son los combustibles fósiles y permite reducir el uso de estos últimos.



Figura 1- Importaciones evitadas de combustible fósil en toneladas equivalentes de petróleo (Fuente: AEE)

En 2018 se instalaron en el mundo por tercer año consecutivo más capacidad de energía eólica y solar que la suma de carbón, gas y centrales nucleares (IVSOLAR, 2018). Esto muestra la tendencia a la implantación de tecnologías que producen energía a partir de fuentes renovables como forma de generación del futuro.

En la siguiente imagen se ve de forma gráfica el aumento de la generación de energía eólica nacional en los últimos tres años que aumenta entre el 2017 y el 2019 en 10.000 GWh aproximadamente.



ESTRUCTURA DE LA GENERACIÓN POR TECNOLOGÍAS (GWh) | SISTEMA ELÉCTRICO: Nacional

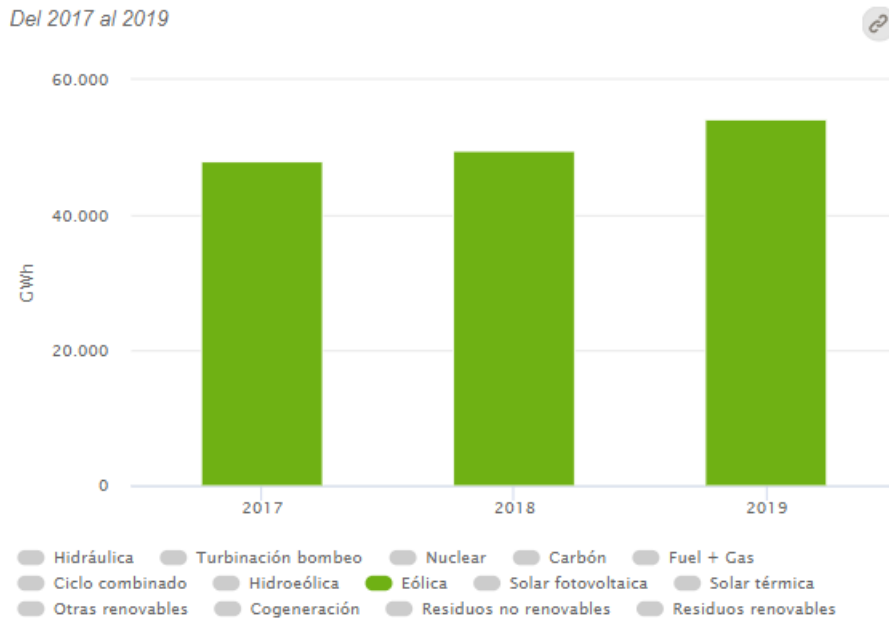


Figura 2- Generación de energía eólica nacional 2017-2019 (Fuente: REE)

Por otro lado, se prevé que en el 2030 el 30% de la energía generada en Europa sea a partir de la energía eólica, lo que muestra la necesidad de la creación de nuevos parques eólicos tanto onshore como offshore.

En la actualidad, la energía eólica suministra más del 3% del consumo mundial de electricidad. Para el 2040, la Agencia Internacional de la Energía estima que pueda cubrir el 9% de la demanda eléctrica global y, en particular, el 20% de la europea. En el siguiente gráfico se muestra el aumento de potencia instalada entre el 1996-2018. Se ve claramente la tendencia creciente.

Fuente: Global Wind Energy Council

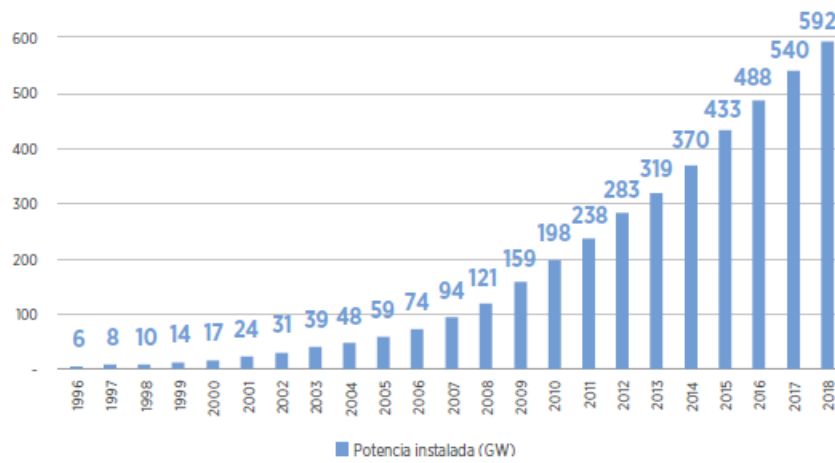


Figura 3- Evolución de la potencia instalada eólica terrestre y marina a nivel mundial (Fuente: AEE)

Existen en estos momentos 621 GW de potencia instalados onshore en todo el mundo y 23,1 GW offshore. (AEE, 2019 a) De esta potencia, España cuenta con 25.704 MW siendo así uno de los países pioneros en energía eólica. En la siguiente imagen se muestra el crecimiento en la implantación de estas tecnologías en el país.

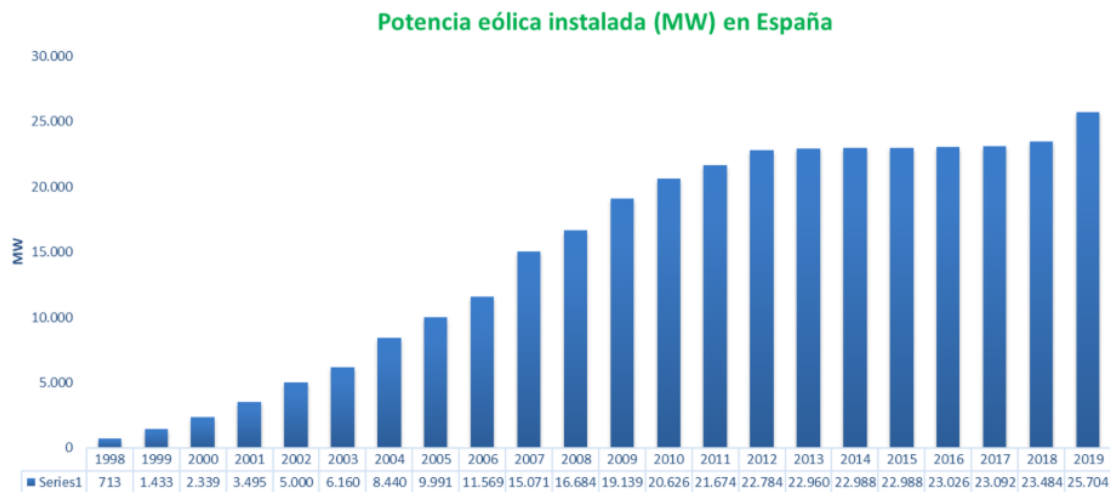


Figura 4- Potencia eólica instalada en España del 1998-2019 (Fuente: AEE)

En España, de toda la potencia instalada, el 23 % proviene de los parques eólicos situados en la comunidad autónoma de Castilla y León. En la siguiente imagen se muestra la potencia instalada por comunidades autónomas. Como se puede observar, la Comunidad Valenciana ocupa el séptimo lugar.

COMUNIDAD AUTÓNOMA	Nueva potencia 2019 (MW)	Potencia a 31/12/2018 (MW)	Potencia a 31/12/2019 (MW)
Castilla y León	461	5.595	6.056
Castilla-La Mancha	0	3.817	3.817
Galicia	416	3.422	3.814
Andalucía	124	3.331	3.455
Aragón	1.102	2.002	3.104
Cataluña		1.271	1.271
C. Valenciana		1.189	1.189
Navarra	85	1.004	1.089
Asturias		518	518
La Rioja		447	447
Murcia		262	262
Canarias	16	431	447
País Vasco		153	153
Cantabria		38	38
Baleares		4	4
Extremadura	39	0	39
TOTAL	2.243	23.484	25.704

Tabla 1- Potencia eólica por Comunidades Autónomas (Fuente: AEE)

En cuanto a las fases a seguir para el diseño del parque eólico del que trata el trabajo, se comenzará con la elección de la zona conforme al *Plan Eólico de la Comunidad Valenciana* y se comprobará el cumplimiento de los criterios energético, ambiental y de ubicación establecidos.

Posteriormente, para determinar el modelo de aerogenerador óptimo, se llevará a cabo un estudio del viento que permitirá conocer la producción y el aprovechamiento de la energía para cada modelo de turbina. Además, se realizará un análisis económico con el fin de determinar el modelo de aerogenerador más rentable, es decir, aquel que genere mayores beneficios. Para ello se calculará el flujo de caja,



el Valor Actual Neto, la Tasa Interna de Retorno y el Payback para cada uno de ellos.

Por último, se llevará a cabo el diseño del parque eólico. Para ello será necesario determinar el número de aerogeneradores necesarios para conseguir la capacidad energética necesaria. Su disposición debe respetar el intervalo de distancias derivado del diámetro rotor, que minimiza las pérdidas ocasionadas por una proximidad excesiva entre estos, y optimiza el aprovechamiento del espacio. También se realizará el presupuesto del parque eólico en su conjunto con los parámetros ya citados en el análisis económico.

2. ANTECEDENTES

En este apartado se expondrá la situación actual del sector eólico tanto a nivel nacional como la situación de la Comunidad Valenciana en particular y los estudios previos realizados por otros alumnos de la *Escuela de Caminos de la UPV* que servirán de base para este proyecto.

Estos trabajos determinan las zonas viables en la Comunidad Valenciana con potencia eólico aún por explotar. Cada trabajo se centra en una provincia.

El trabajo realizado en la provincia de Valencia lleva por título : *Estudio de alternativas para un parque de energía eólica en la Comunidad Valenciana. Provincia de Valencia* y tiene como autor a Rafael Ramón-Llin Pla (Ramon-Llin Pla, 2016).

Por otro lado, en la provincia de Alicante se encuentra: *Estudio de viabilidad para la instalación de un parque de energía eólica en la Comunidad Valenciana. Provincia de Alicante* (Chust-Martínez, 2018) donde el autor es Claudio Chust Martínez.

En tercer lugar, en la provincia de Castellón está el *Estudio de alternativas para un parque de energía eólica en la Comunidad Valenciana. Provincia de Castellón* (Arnal-Palacios, 2017) y tiene por autor a Ignacio Arnal Palacios.

2.1. LA EÓLICA EN ESPAÑA

En primer lugar, hacer mención de que la energía eólica es actualmente la energía renovable más desarrollada. Permite generar electricidad a partir de la fuerza del viento mediante un sistema mecánico que hace girar el rotor de un generador.

En la actualidad, España cuenta con 1.203 parques eólicos y más de 20.000 aerogeneradores en funcionamiento. Esto equivale a 25.704 MW de potencia instalada situando a España en el número 4 del ranking de potencia instalada onshore después de China, Estados Unidos e India. (AEE, 2019 a)

Total installations onshore [%]

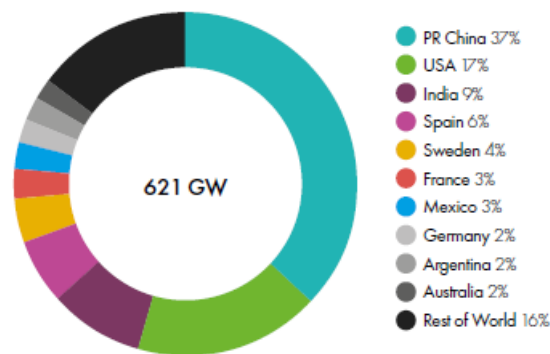


Figura 5- Potencia total instalada onshore en 2019 a nivel mundial (Fuente: Global Wind Report)

Esta potencia instalada permite en el país la cobertura del 20,8% de la demanda eléctrica, lo que equivale al abastecimiento de 14,3 millones de hogares.

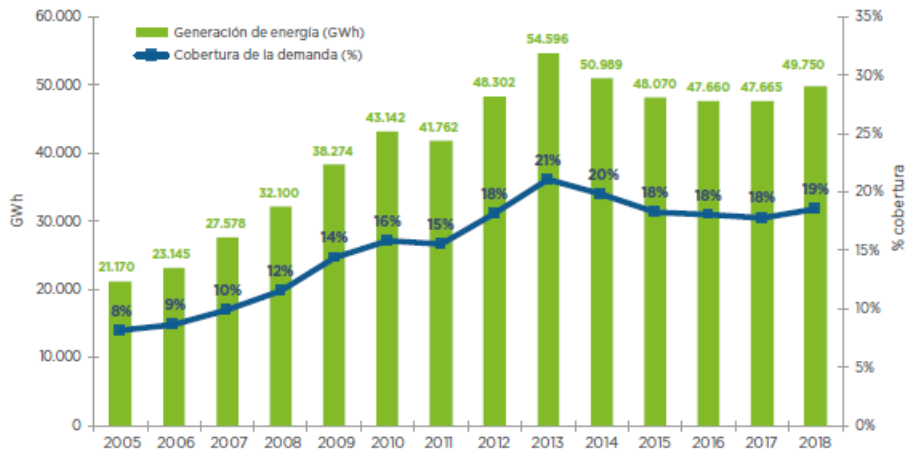


Figura 6- Generación de energía eólica y porcentaje de cobertura de la demanda en España con energía eólica (Fuente: AEE)

Por otro lado, la potencia instalada en España continúa creciendo. Como se puede observar en el siguiente gráfico, los años en los que se desarrolló más fue en el 2007. No obstante, sigue en aumento.

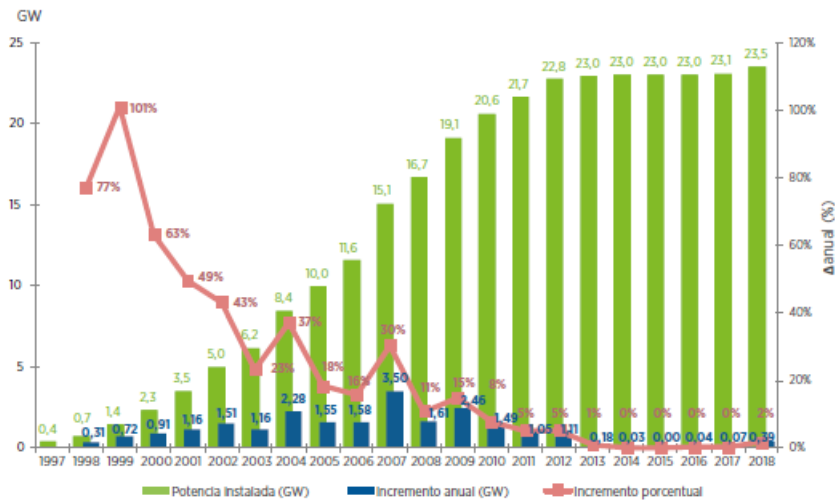


Figura 7- Potencia eólica instalada en España acumulada e incremento anual (Fuente: AEE)

Cabe destacar, que entre los 10 fabricantes de aerogeneradores con mayor potencia instalada en todo el mundo se sitúa la empresa multinacional española Siemens Gamesa. Esta cuenta con parques eólicos instalados en 90 países, lo que equivale a 99 GW de potencia instalada, incluyendo tanto onshore como offshore, y que posiciona a España en el tercer país que más exporta en tecnología eólica con un valor de 2.391 millones de €, solamente precedido por Dinamarca Y Alemania. (AEE, 2019 b)

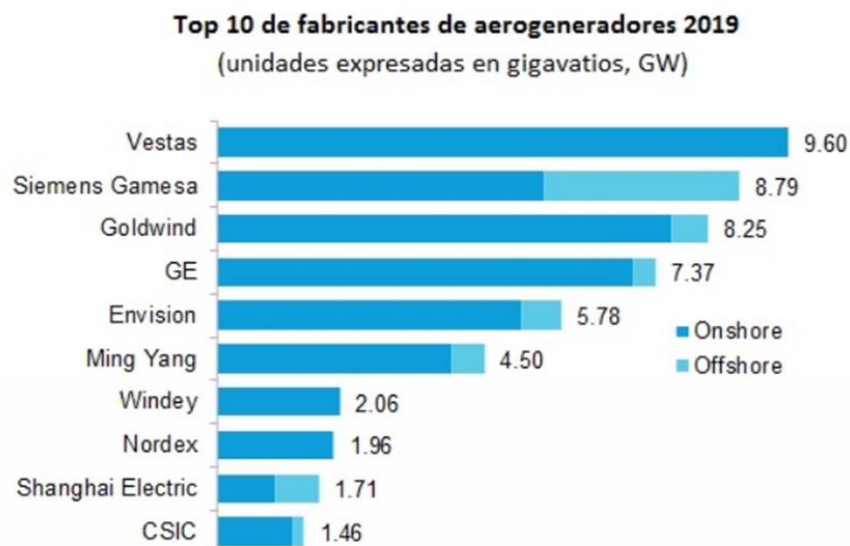


Figura 8- Principales fabricantes de aerogeneradores (Fuente: Global Wind Council)

Por otro lado, la eólica, que generó 54.238 GWh en 2019 (REE,2019), es la tercera tecnología de generación en el sistema eléctrico nacional, representando el 20,8% de la total generada y el 55,4% de la producción a partir de fuentes renovables, detrás de la nuclear el ciclo combinado que produjeron en el año citado 55.824 GWh y 55.239 GWh respectivamente.

La siguiente imagen muestra de forma gráfica las distintas fuentes de generación de energía del país. En esta, se ve ,sombreado de color verde, la energía eólica y su papel esencial en la consecución de la electricidad. . (REE;2020)

ESTRUCTURA DE LA GENERACIÓN POR TECNOLOGÍAS NACIONAL

Del 29/06/2020 al 06/07/2020

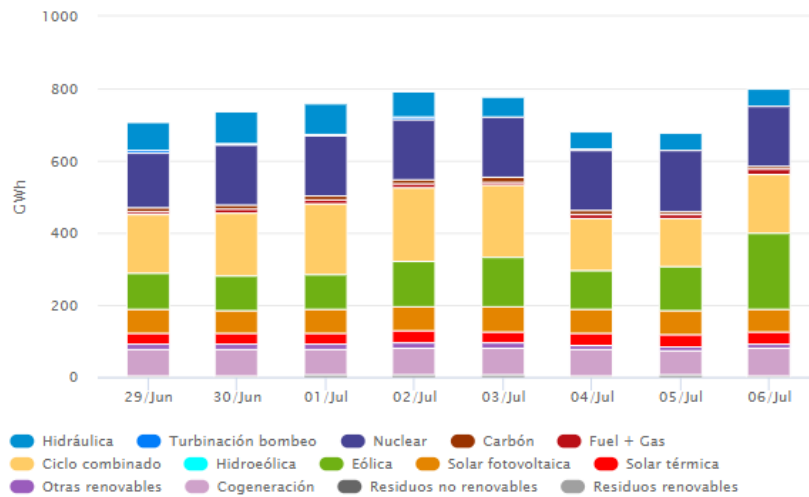


Figura 9- Estructura de la generación por tecnologías nacional en junio-julio 2020 (Fuente: REE)

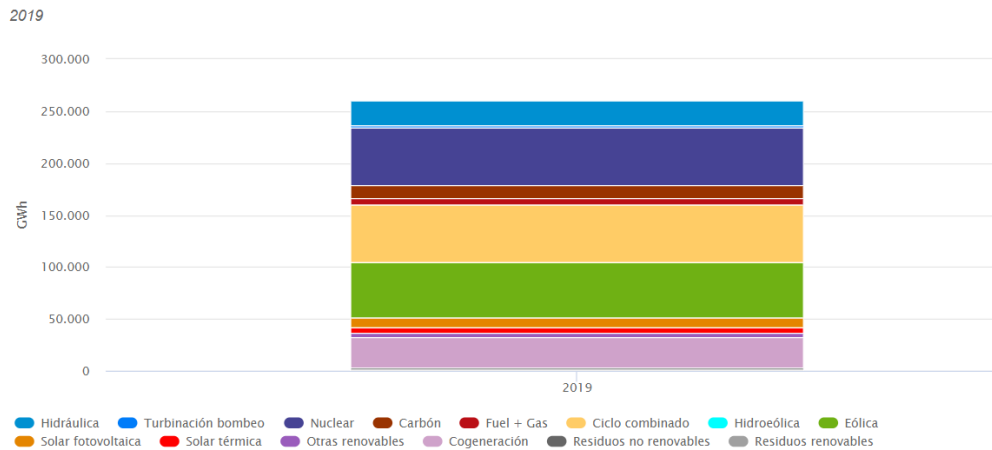


Figura 10-Estructura de la generación por tecnologías (GWh) del Sistema Eléctrico Nacional, 2019 (Fuente: Red Eléctrica de España)

En cuanto a los beneficios económicos que este sector aporta al país, cabe destacar que la eólica genera 24.000 puestos de trabajo y representa el 0,31% del PIB español.

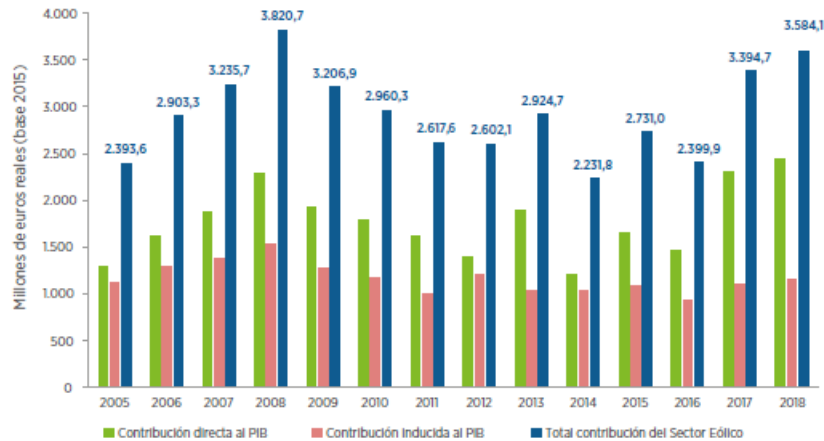


Figura 11- Evolución de la contribución al PIB del sector eólico (Fuente: AEE)

La eólica representa también una garantía en lo referente a la sostenibilidad ambiental. En 2018 evitó la importación de 9,5 millones de toneladas equivalentes de petróleo y la emisión de 28 millones de toneladas de CO₂ en el 2019.

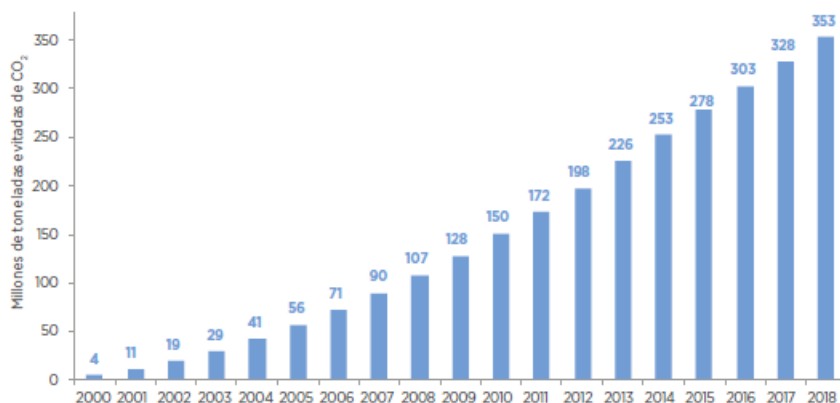


Figura 12- Emisiones de CO₂ evitadas acumuladas 2000-2018

El Plan Eólico de la Comunidad Valenciana tiene carácter de plan de acción territorial sectorial según lo previsto con la Ley 6/1989 de



Ordenación del Territorio de la Generalitat Valenciana, de 7 de julio y en el Decreto 201/1198, de 15 de diciembre, del Gobierno Valenciano, por el que se aprueba el Reglamento de Planeamiento de la Comunidad Valenciana. (RD, 2007) El Plan mencionado divide a la Comunidad Valenciana en 15 zonas en las que, gracias a sus características, se pueden construir parques eólicos. Todas estas otorgan un potencial por explotar de 1.695 MW se estima que tiene capacidad para albergar 2.720 aerogeneradores. Siendo la energía generada por esta fuente limpia e inagotable y junto con todas las ventajas ya citadas, la eólica resulta imprescindible para alcanzar la transición energética mundial deseada.

La transición energética viene definida por las Naciones Unidas, tras la Cumbre sobre la Acción Climática de 2019, como: “la aceleración del cambio de combustibles fósiles hacia la energía renovable , además de la obtención de considerables ganancias en eficiencia energética”. Además, los objetivos 7 y 13 del desarrollo sostenible (UN, 2020) están relacionados con esta: “energía asequible y no contaminante” y “ acción por el clima”. Mostrando así su relevancia y urgencia a nivel mundial. ’

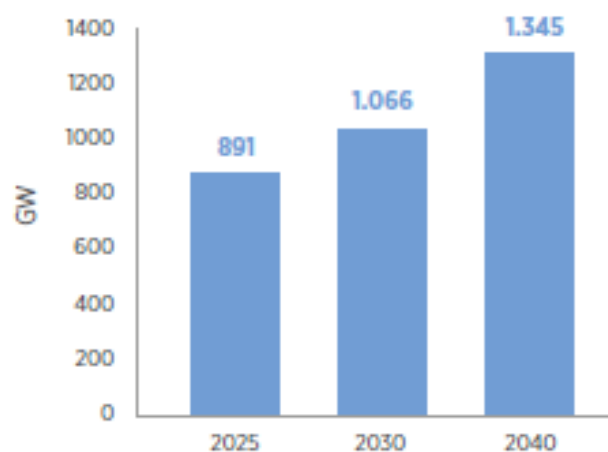


Figura 13- Evolución prevista del sector eólico a nivel mundial (Fuente: AEE)

En lo que se refiere a España, el documento legal más reciente que sienta las bases de esta transición energética en el país es el *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030* (MITECO, 2020) que está pendiente de su aprobación por parte de la Comisión Europea, prevista para finales de este año, 2020. En este se establecen los siguientes objetivos: la reducción en un 23% de los gases de efecto invernadero respecto a 1990, la generación del 42% de la energía y el 74 % de la electricidad a partir de fuentes renovables para el 2030 frente al 15% y 40% actual respectivamente. Además, se ambiciona la neutralidad de carbono para el 2050.

La consecución de las metas mencionadas en el Plan resulta inseparable del desarrollo del sector eólico. Para alcanzarlas, se estima que la potencia eólica en el 2025 debe ser de 40.258 MW y para el 2030 de 50.258 MW.

2.2. LA EÓLICA EN LA COMUNIDAD VALENCIANA

El sector eólico en la Comunidad Valenciana se rige por el *Plan Eólico de la Comunidad Valenciana*. (DOGV, 2001; DOGV, 2017; DOGV 2019) Este fue aprobado en 2001 y modificado en 2017 y 2019. Tiene como objeto regular la instalación de parques eólicos en las zonas calificadas como aptas según lo establecido en el capítulo III “Clasificación del Territorio de la Comunitat Valenciana”. Además, impulsa el desarrollo de esta energía y permite la optimización del potencial eólico de determinadas zonas geográficas de la Comunidad

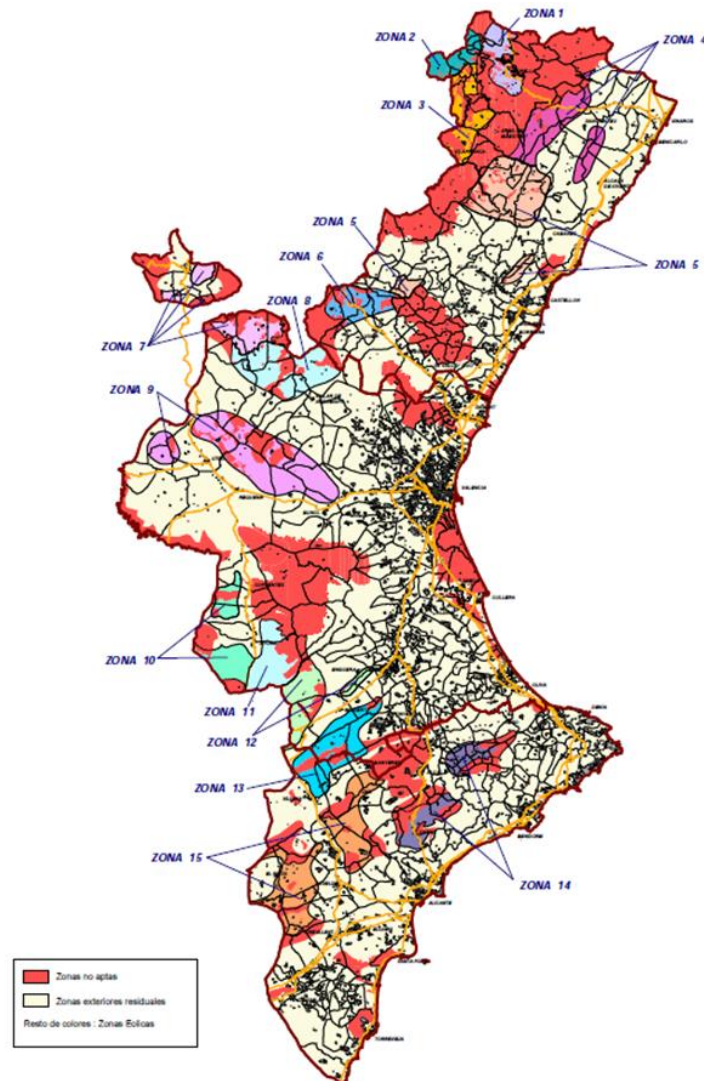


Figura 14- - Zonas del Plan Eólico de la Comunidad Valenciana (Fuente: Generalitat Valenciana)

Cabe destacar, que en la actualidad ya hay 38 parques instalados, lo que implica 1.189 MW de potencia que representa el 5,06% de la total nacional y permite cubrir el 8,9% de la demanda eléctrica de la comunidad.

En concreto, la provincia de Castellón, donde se va a centrar el estudio, cuenta con 596,55 MW de potencia instalada en 16 parques eólicos. Lo que equivale al 49,3% del total instalado en la Comunidad. Lo que muestra que el viento es más favorable en esta zona. (AEE, 2020).

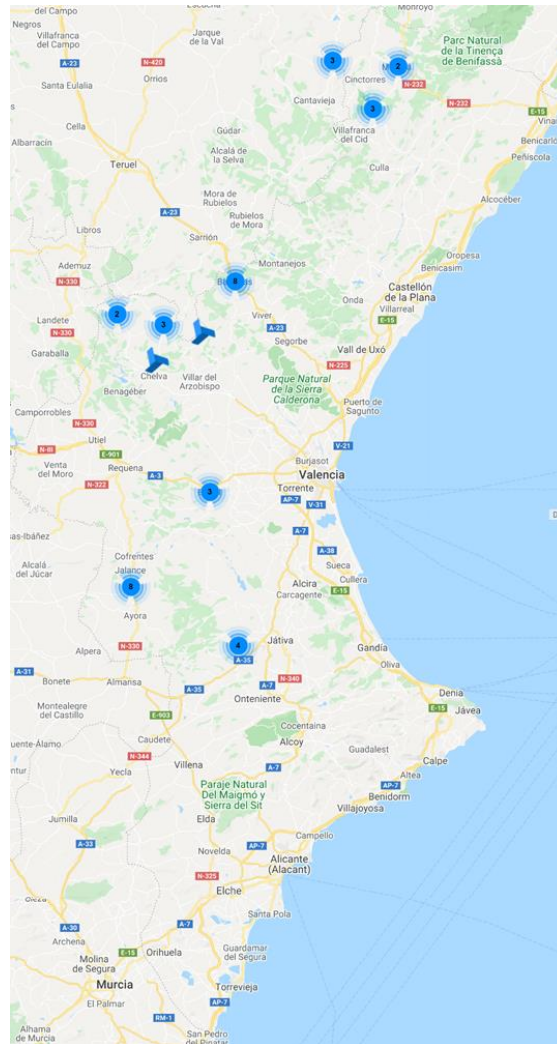


Figura 15- Localización de los parques eólicos de la Comunidad Valenciana (Fuente AEE)

De este apartado se deduce la necesidad de desarrollar la energía eólica en la Comunidad Valenciana puesto que, como se muestra en el porcentaje de cobertura eléctrica alcanzada, todavía se encuentra por detrás de la media nacional y, además, ayudaría a contribuir con el desarrollo a nivel general del país para conseguir esa transición energética tan anhelada.

2.3. ESTUDIOS PREVIOS EN LA COMUNIDAD VALENCIANA

En este apartado se van a exponer los tres Trabajos Final de Grado que han servido de base para este. En ellos se determina, a partir de unos criterios que se comentarán a continuación, el potencial eólico aún por explotar de cada una de las provincias de la Comunidad Valenciana.

Los criterios seguidos para para la determinación de las zonas susceptibles de albergar un parque eólico son: el criterio energético, basado en la velocidad del viento, en el que se establece que esta debe ser superior a 6,5 m/s para asegurar que la posible explotación resulte eficiente en un futuro; el criterio ambiental por el que se descartan todas aquellas zonas que ocupan o están a menos de 1 km de distancia de aquellos espacios definidos como protegidos como so el caso de los Lugares de Importancia Comunitaria (LICs) , las Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPAs) así como todas las establecidas por Red Natura 2000. Por último, se encuentran los criterios logísticos. Estos abarcan la comprobación de la ausencia de parques eólicos en la zona a estudiar, la capacidad para instalar una potencia mínima de 20 MW, la proximidad a líneas eléctricas ya que son indispensables para el transporte de la energía y su posterior distribución y el respeto a lo ya establecido en el *Plan Eólico de la Comunidad Valenciana*.

El trabajo realizado en la provincia de Valencia, con título: *Estudio de alternativas para un parque de energía eólica en la Comunidad Valenciana. Provincia de Valencia* , tiene como autor a Rafael Ramón-Llin Pla (Ramon-Llin Pla, 2016) . En este se determinan como viables las zonas de Andilla, Lliria y el Rincón de Ademuz. Entre todas suman un potencial para explotar de 1210 MW para el modelo de aerogenerador Gamesa G-132 de 3,3 MW.



Figura 16-Zonas viables en la Provincia de Valencia (Fuente: Elaboración propia)

En segundo lugar, el estudio realizado en Castellón lleva por título *Estudio de alternativas para un parque de energía eólica en la Comunidad Valenciana. Provincia de Castellón* (Arnal-Palacios, 2017) y tiene por autor a Ignacio Arnal Palacios. En este se determinan como viables las zonas de Toro y Alto Palancia, Benasal, Alto y Bajo Maestrazgo. Entre todas suman un potencial para explotar de 1133 MW para el modelo de aerogenerador Gamesa G-132 de 3,3 MW.



Figura 17-Zonas viables en la Provincia de Castellón (Fuente: Elaboración propia)

Por último, está el estudio de Alicante: *Estudio de viabilidad para la instalación de un parque de energía eólica en la Comunidad Valenciana. Provincia de Alicante (Chust-Martínez, 2018)*. El autor es Claudio Chust Martínez. Las siguientes zonas son las que finalmente resultaron viables: Marina Alta, Interior de Alicante y Medio de Vinalopó cuyo potencial por explotar es de 976,5 MW para el modelo



de aerogenerador Siemens Gamesa SG-145 de 4,5 MW.

Figura 18-Zonas viables en la Provincia de Alicante (Fuente: Elaboración propia)



Finalmente, cabe destacar que, se decide como zona de estudio para el diseño del parque eólico en el presente trabajo la perteneciente al Alto Maestrazgo, determinada como viable en el trabajo de Ignacio Arnal Palacios. Esto es debido a su alto potencial eólico y la gran superficie de actuación. Pertenece a la zona 4 del Plan Eólico de la Comunidad Valenciana y está situada en la provincia de Castellón que presenta unas condiciones de viento más favorables que aquellas zonas aún por explotar en Valencia y Alicante.

3. METODOLOGÍA

En este punto se pretende dar una visión general del trabajo a partir de la explicación de los pasos que se van a seguir para llegar al fin de este: el diseño del parque. Para ello, se ha dividido el trabajo en cuatro bloques: determinación de la zona de actuación, estudio del viento, elección del aerogenerador y diseño del parque.

En primer lugar, se llevará acabo la determinación de la zona. Para ello, al igual que en los trabajos ya mencionados, se seguirán unos criterios para comprobar que el Alto Maestrazgo resulta viable para la construcción de un parque eólico en él y acotar al máximo la superficie de actuación.

Los criterios son: criterio energético en el que la comprobación será que la velocidad media sea superior a 6,5 m/s, para ello se hará el correspondiente estudio del viento; el criterio ambiental, por el que se limita la zona a aquellos lugares no clasificados como espacios protegidos (incluye los LICs, ZEPAs y Red Natura 2000) y separados al menos por 1 km de estos y el criterio de ubicación, por el que se acota la zona a construir según la proximidad de esta a la línea eléctrica y la existencia de otros parques eólicos. Además, se considera necesario un estudio del impacto visual respecto a las poblaciones más cercanas y un aumento de la capacidad energética mínima a 50 MW.

El aumento en 30 MW de capacidad energética con respecto a los estudios previos realizados en los que se establecía un valor de 20 MW es consecuencia del avance en las nuevas tecnologías y las altas ambiciones en lo que al desarrollo en energía eólica se refiere.

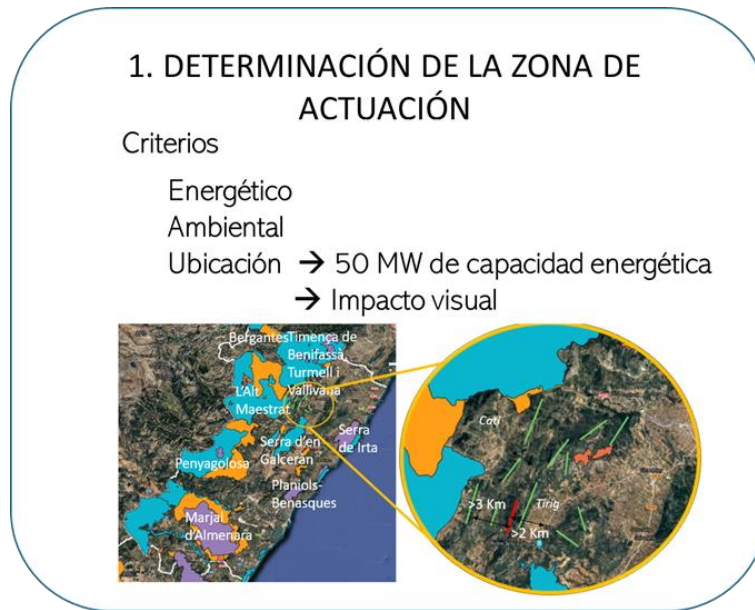


Figura 19- Bloque 1: determinación de la zona de actuación (Fuente: elaboración propia)

Posteriormente, se procederá al estudio del viento, indispensable para la elección del aerogenerador. Se comenzará calculando la distribución del viento en función de la probabilidad en la que se dan para cada velocidad a partir de la distribución de Weibull. También se calculará en función del número de horas anuales.

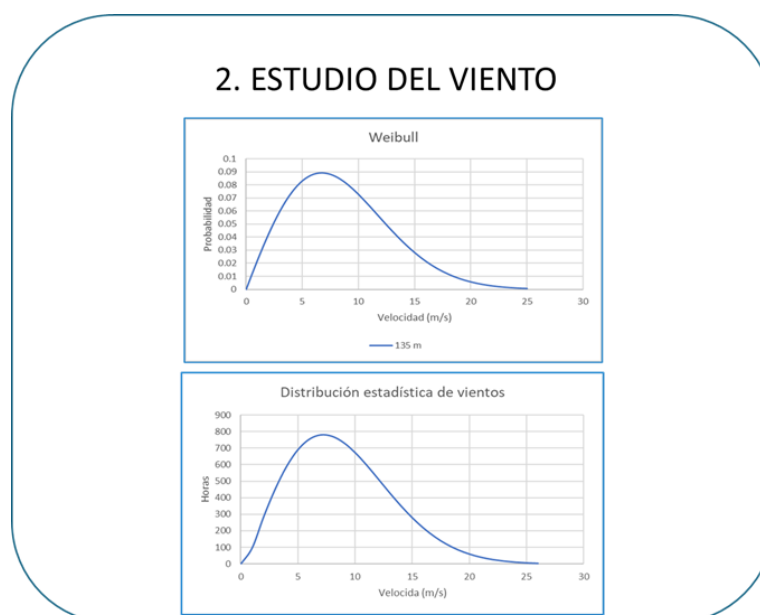


Figura 20- Bloque 2: estudio del viento. (Fuente: elaboración propia)

Para la elección del aerogenerador, se va a comparar tanto su eficiencia productiva como económica. En esta fase, se escogerán cuatro modelos diferentes: Enercon E-115, Enercon E-126 EP3, Enercon E-138 EP3 y Siemens Gamesa SG-5.0. Estos poseen una potencia de 3 MW, 3,5 MW, 4 MW y 5 MW respectivamente

Se calcula la distribución del viento para cada modelo en función del número de horas anuales en las que se da cada velocidad. Esto, junto con las correcciones de las curvas de potencia para cada modelo en función de la densidad del viento permitirán el cálculo de la producción y del consecuente factor de uso.

En segundo lugar, se llevará acabo la determinación del límite de Betz y el aprovechamiento de la energía para cada modelo de aerogenerador.

En cuanto al análisis económico se refiere, se calculará el flujo de caja, el Valor Actual Neto, la Tasa Interna de Retorno y el Payback para cada turbina y se comprobarán sus rentabilidades.



Figura 21- Bloque 3: elección del aerogenerador (Fuente: elaboración propia)

En último lugar, con la zona ya delimitada y el aerogenerador escogido, se llevará acabo el diseño del parque. Para ello se determinarán el número de aerogeneradores y su disposición cumpliendo los intervalos de distancias recomendados para maximizar su eficiencia y buscando aprovechar al máximo el viento colocándolos de forma perpendicular a la dirección dominante de este.

El diseño concluirá con el estudio del presupuesto económico del parque eólico con los indicadores utilizados para el análisis económico.

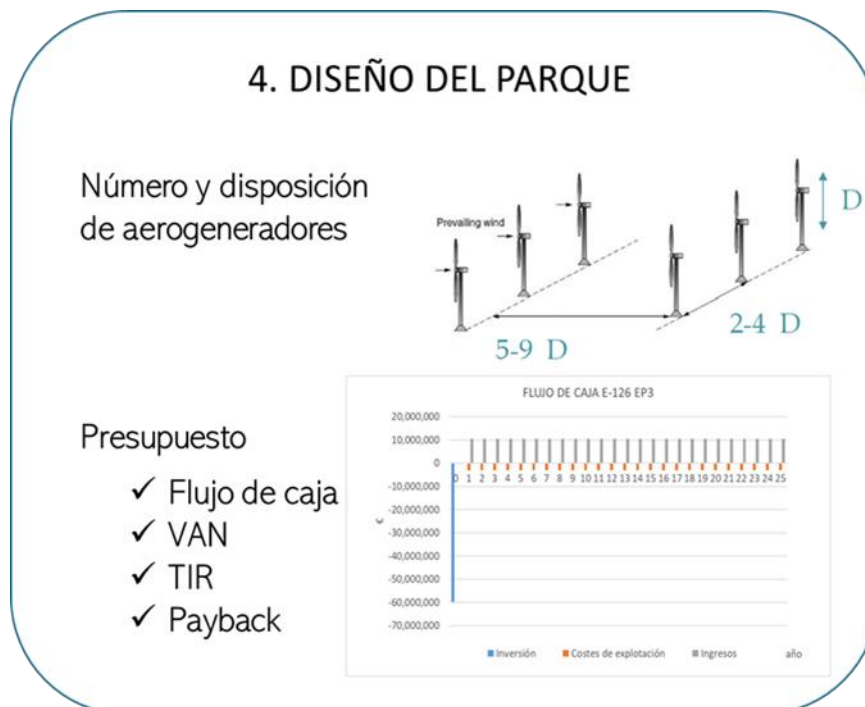


Figura 22- Bloque 4: diseño del parque (Fuente: elaboración propia)

4. LOCALIZACIÓN

El trabajo se va a centrar en la provincia de Castellón, en la Comunidad Valenciana. En concreto, en la zona 4 del *Plan Eólico de la Comunidad Valenciana* perteneciente a la comarca del Alto Maestrazgo.

Conforme al estudio realizado por Ignacio Arnal Palacios, (Palacios Arnal, 2017) se escoge las subzonas sombreadas en roja en la siguiente imagen pertenecientes al municipio de Catí.

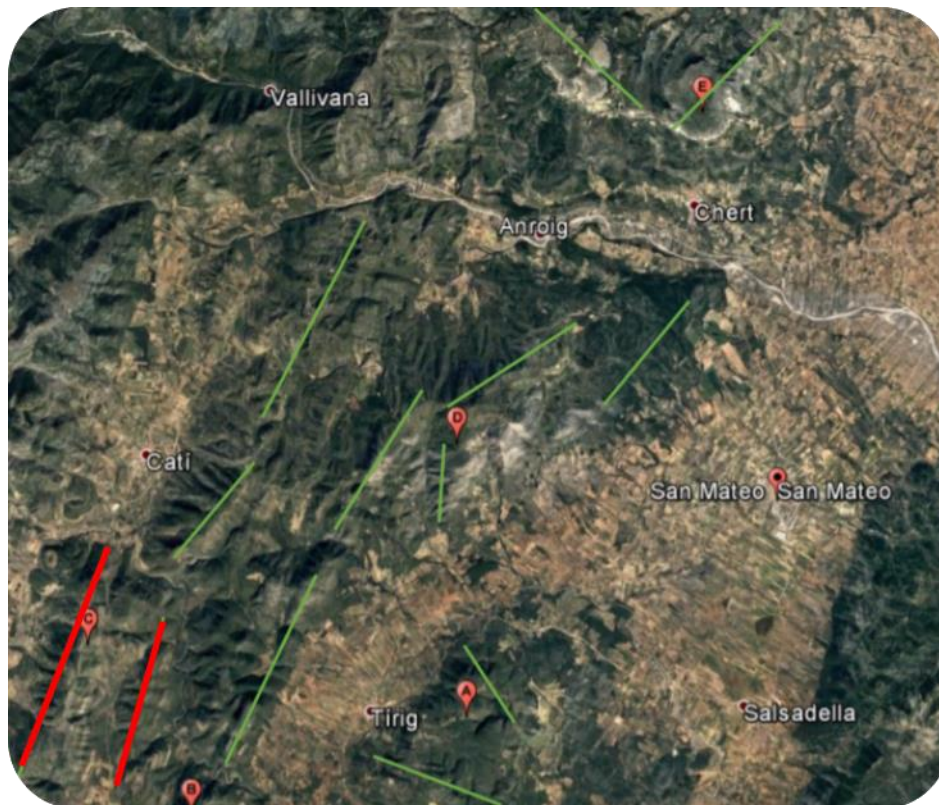


Figura 23- Zonas potenciales del Alto Maestrazgo. (Fuente: elaboración propia)

Catí es un municipio de la provincia de Castellón, en la Comunidad Valenciana, en la comarca de Alto Maestrazgo. Cuenta con una superficie total de 102,3 km² y una población de 721 habitantes.



Figura 24- Ubicación de Catí en la provincia de Castellón (Fuente: Wikipedia)

Se ha considerado la elección de ambas subzonas dentro del municipio citado ya que capacitan al parque eólico de estudio de una mayor superficie para su instalación que si solo fuera una subzona y , por tanto, de una mayor capacidad energética. Cabe destacar, que, al encontrarse al sur de Alto Maestrazgo , está más alejado de los núcleos de población y por tanto, como se expondrá más adelante, su impacto visual es menor.

Por otro lado, cabe destacar que el suelo de la zona de actuación (cretácico inferior) está compuesto de arenas, areniscas, arcillas, margas y calizas bioclásticas haciéndolo así apto para albergar dicho parque. (IGME, 2020)

En cuanto al perfil longitudinal de la zona, como se verá más adelante, alcanza una altitud de 744 msnm, lo que permite alcanzar vientos de alrededor de 8,3 m/s en esas zonas.

Por último, se ha escogido la subzona en cuestión al no poseer todavía ningún parque eólico así como por encontrarse próxima a las líneas eléctricas para el posterior transporte de la energía.

5. DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE ACTUACIÓN

En este apartado, ahondando en los criterios ya expuestos, se va a comprobar la viabilidad de la zona de Alto Maestrazgo, y acotar, dentro de esta, la superficie de estudio.

5.1. CRITERIO ENERGÉTICO

El estudio del viento resulta imprescindible para el diseño de un parque eólico. Este determinará el modelo de aerogenerador, su disposición una vez ya escogidos y permitirá conocer la posible producción de energía. Los datos se han obtenido de la página web *Global Wind Atlas*. (Global-Wind-Atlas, 2020.)

En primer lugar, se ha escogido un punto representativo. En este caso, las coordenadas que lo definen son: 40, 462º; 0,03983º.

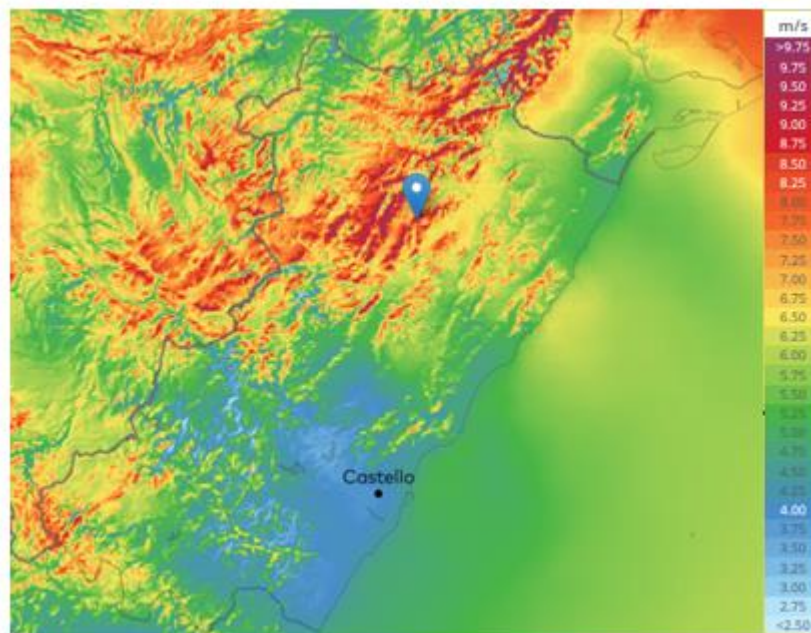


Figura 25-Mapa eólico de Castellón (Fuente: Global Wind Atlas)

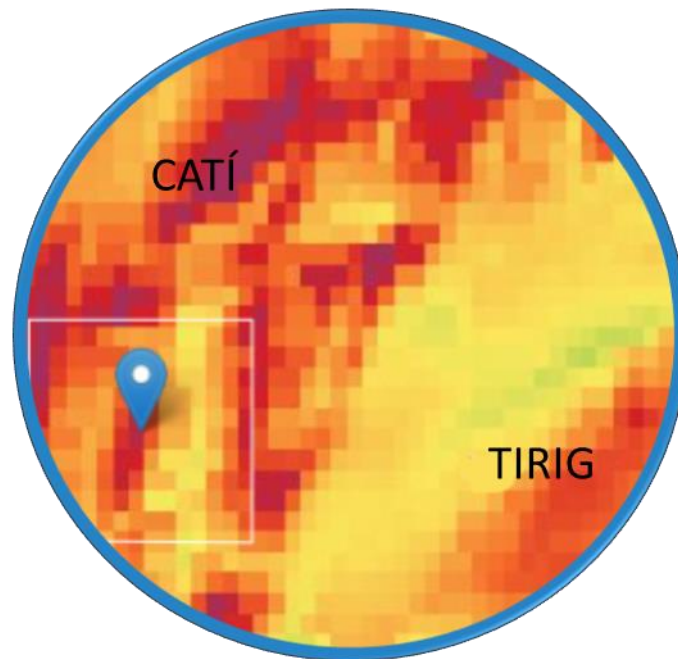


Figura 26- Ampliación mapa eólico. Zona de estudio (Fuente: Global Wind Atlas)

La zona de estudio posee una velocidad media de 8,3 m/s por lo que cumple holgadamente el criterio energético de superar los 6,5 m/s. Además. Cabe destacar que la dirección del viento predominante procede noroeste como se muestra en la rosa de vientos.

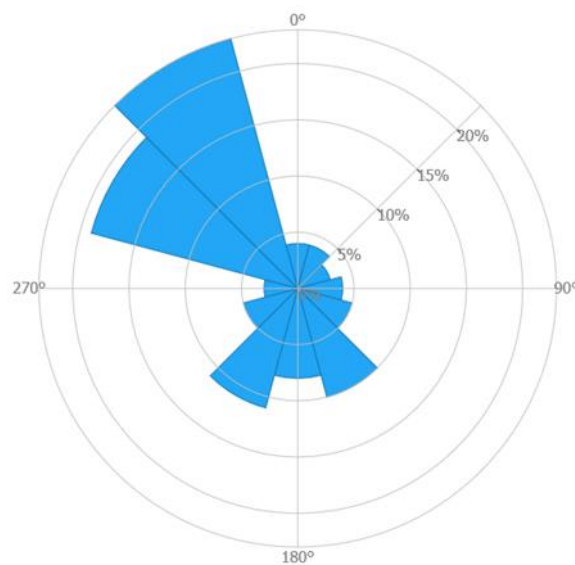


Figura 27- Rosa de vientos del punto de estudio (Fuente: Global Wind Atlas)

5.2. CRITERIO AMBIENTAL

En este apartado se procederá a acotar la zona de estudio descartando de esta aquellas que sean consideradas espacios protegidos. En el caso de la Comunidad Valenciana y conforme al Plan Eólico de esta, se encuentran los parajes municipales, parques naturales los Lugares de Importancia Comunitarios y las Zonas de Especial Protección para las Aves.

Cabe destacar, que los datos se han obtenido del *Institut Cartogràfic Valencià*. (GVA,2020)

En concreto, los Lugares de Importancia Comunitario son definidos por la Ley 42/2007 como “aquellos espacios del conjunto del territorio nacional o de las aguas marítimas bajo soberanía o jurisdicción nacional, que contribuyen de forma apreciable al mantenimiento o, en su caso, al restablecimiento del estado de conservación favorable de los tipos de hábitat naturales y los hábitat de las especies de Importancia comunitario (...) en su área de distribución natural”.

En su caso, las Zonas de Especial Protección para las Aves son, según la Unión Europea, “zonas naturales de singular relevancia para la conservación de la avifauna amenazada de extinción.

En España hay un total de 1467s LICs y 657 ZEPAs extendidos en más de 222.000 km² que constituyen la Red Natura 2000. De los Lugares de Importancia Comunitaria, 93 se encuentran en la Comunidad Valenciana así como 40 Zonas de Especial Protección para las Aves .

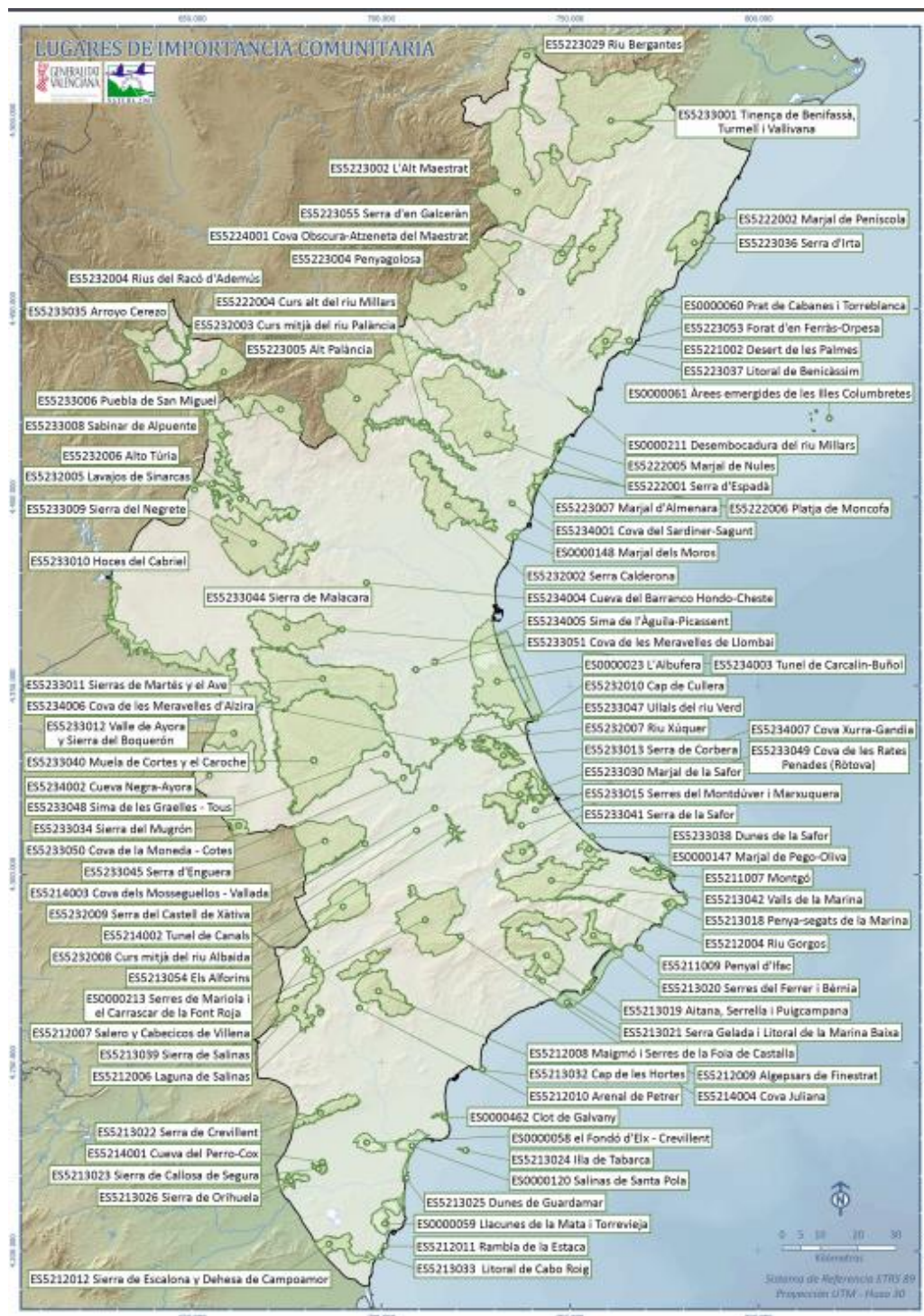


Figura 28-Lugares de Importancia Comunitario de la Comunidad Valenciana (Fuente: Institut Cartogràfic Valencià)

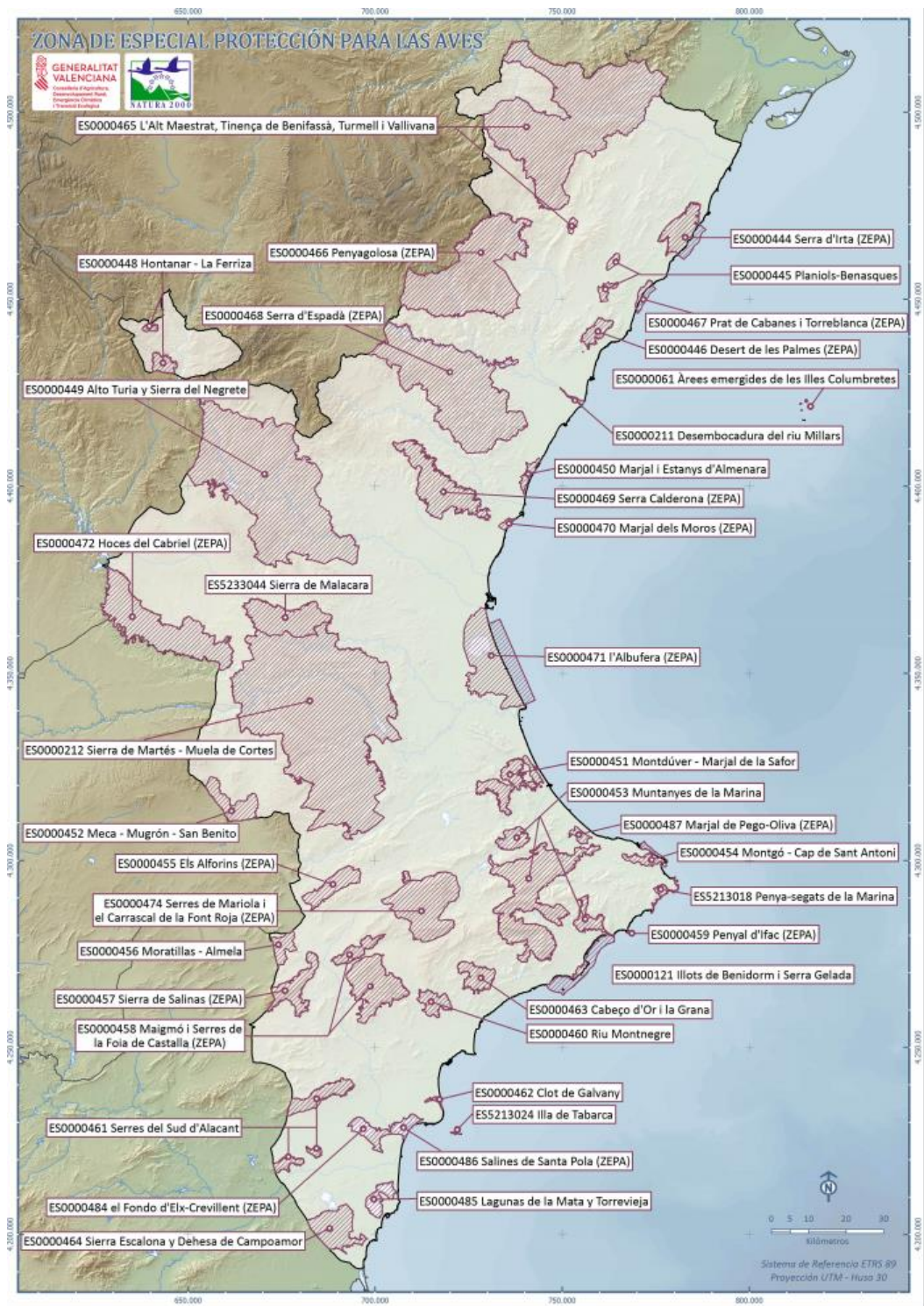


Figura 29-Zonas de Especial Protección para las Aves de la Comunidad Valenciana (Fuente: Institut Cartogràfic Valencià)

Por último, además de las zonas designadas por Red Natura 200, también se han respetado, siendo así objeto de estudio, los parajes municipales y los parques naturales. Con todo esto, hemos obtenido las zonas libres según el criterio ambiental. En la siguiente imagen, obtenida a partir del software *QGIS*, permite ver de forma clara las zonas en las que no es posible actuar.

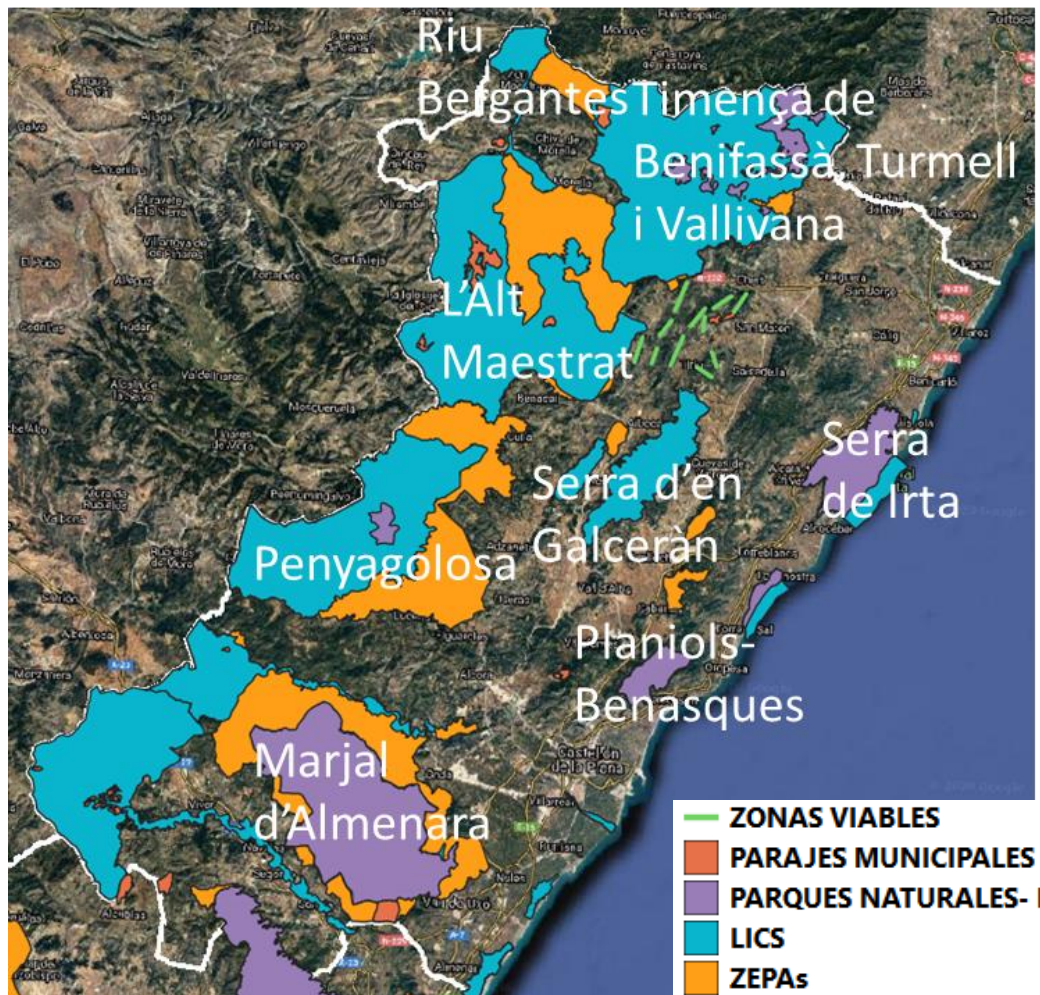


Figura 30-Zonas Protegidas provincia de Castellón (Fuente: Elaboración propia)

De la anterior imagen hay que destacar que las zonas consideradas como viables son las que aparecen en verde, de las cuales se van a escoger para el emplazamiento del parque las que aparecen sombreadas de rojo, pertenecientes al municipio de Catí, en la Figura 21.

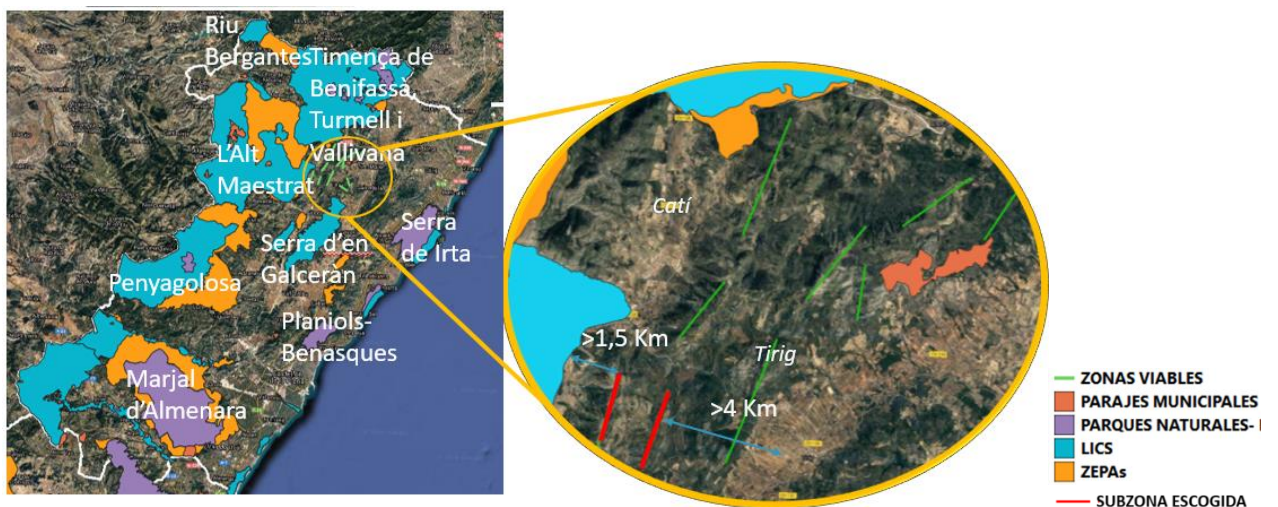


Figura 31-Zonas Protegidas provincia de Castellón y subzonas escogidas (Fuente: Elaboración propia)

Como se observa en la Figura 21, las subzonas escogidas están libres de espacios protegidos y se encuentran a más de 1 km de distancia de la zona protegida de L'Alt Maestrat que como se comprueba en dicha imagen es la más cercana.

5.3. CRITERIO DE UBICACIÓN

El criterio de ubicación abarca varias comprobaciones para su validación. Estas permiten ir limitando el espacio disponible para el parque.

5.3.1. EXISTENCIA DE PARQUES EÓLICOS

En primer lugar, se comprueba que no hay parques eólicos existentes en la zona de estudio (Aemer, 2020) . Como se ha mencionado anteriormente, en Castellón hay un total de 16 parques con una potencia total de 586,55 MW y con una potencia mínima instalada para cada uno de 15 MW, de los cuales, la mitad se encuentran al sur de la provincia y la otra mitad, que es la más cercana al Alto Maestrazgo, al norte.

Como se puede observar, existen parques eólicos construidos sobre zonas designadas como protegidas. En este caso, tanto los parques eólicos que se encuentran en Portell de Morella, como los que se sitúan entre Castellfort y Villafranca del Cid (Pla d’Embalagué y Arriello) se encuentran en Lugares de Importancia Comunitario.

En el caso del Alto Maestrazgo, no existe ningún parque eólico en la actualidad perteneciente a las subzonas escogidas.

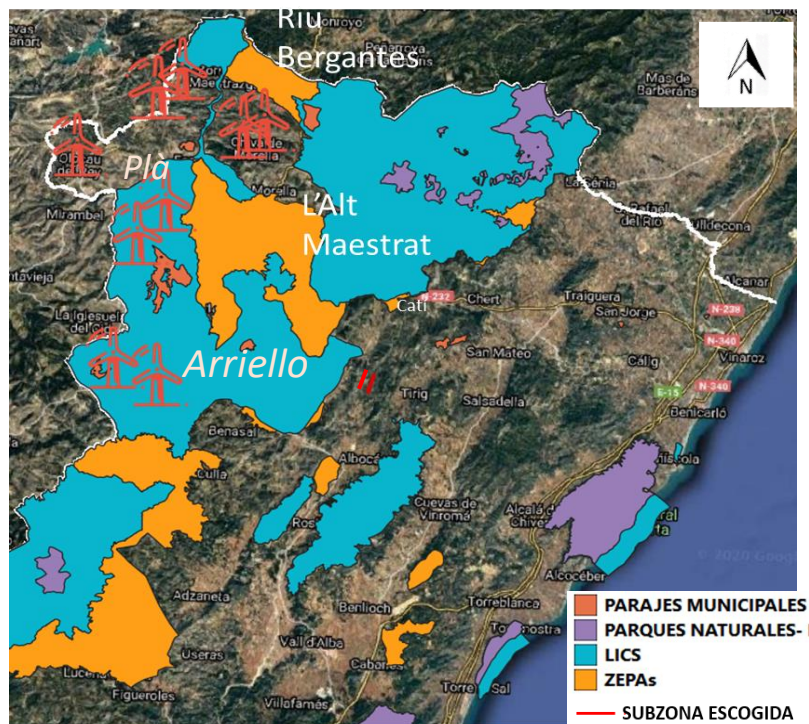


Figura 32- Parques eólicos en la provincia de Castellón, E= 1: 500000 (Fuente: Elaboración propia)

5.3.2. LÍNEA ELÉCTRICA MÁS CERCANA

En este apartado se procedido al estudio las líneas eléctricas ya construidas que pasan por la provincia con el fin de asegurar la distribución de la energía eléctrica generado.

En el caso de que no existiera ninguna línea eléctrica cercana, sería necesario realizar un estudio económico más profundo para ver si resulta rentable el construir una línea eléctrica para el funcionamiento de dicho parque.

En la siguiente imagen adjunta se muestra la parte del mapa del sistema eléctrico ibérico (REE,2015) que corresponde a la Comunidad Valenciana a fecha de enero de 2015.



Figura 33- Sistema eléctrico ibérico, enero 2015, Comunidad Valenciana



Las líneas rojas, representan tensiones de 400 kV, las verdes de 220 kV, las azules, son para las de valores de entre 150-220 kV y las negras 60-110 kV. Todas ellas conforman el transporte eléctrico de la península.

Ampliando la imagen ,se puede observar que existe dos líneas de corriente alterna de 400kV a menos de 10 km cada una de la zona de construcción del futuro parque.

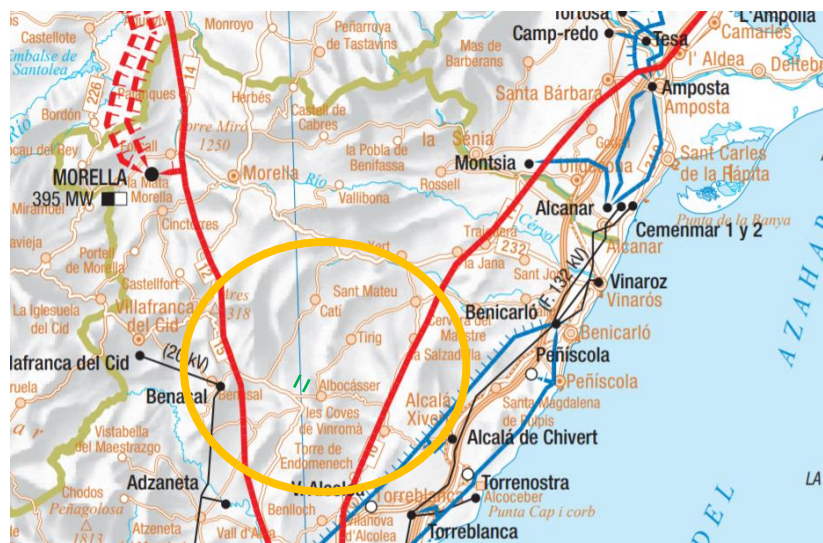


Figura 34 -Sistema eléctrico ibérico, enero 2015, zona del Alto Maestrazgo (Fuente. Red Eléctrica Española)

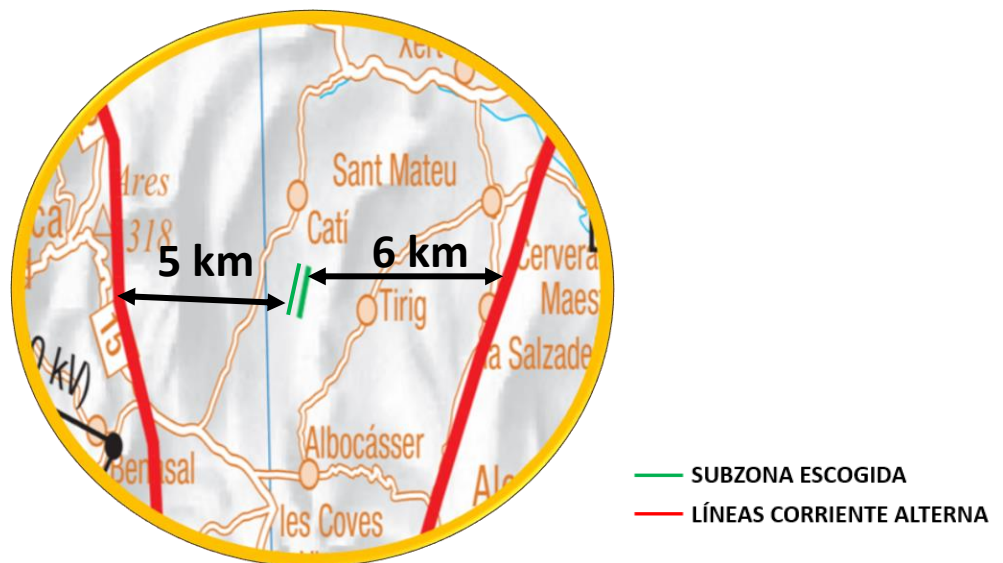


Figura 35-Sistema eléctrico ibérico, enero 2015, zona del Alto Maestrazgo. Detalle zona escogida (Fuente. Red Eléctrica Española)

Como se puede observar más detalladamente en la figura 25, las líneas eléctricas más cercanas están a 5 y 6 km respectivamente de la zona de actuación. Esta última son las dos líneas marcadas de color verde.

5.3.3. IMPACTO VISUAL

La condición de impacto visual busca que haya una integración del parque eólico con el paisaje y que estéticamente sea adecuado. Puesto que esto puede resultar subjetivo, se ha establecido como forma de comprobación, que la población más cercana, siendo esta menor de 1000 habitantes, debe hallarse al menos a 2 km de la futura construcción.

En el presente caso, las poblaciones colindantes son Catí y Tirig, las cuales cuentan con 742 y 435 habitantes respectivamente según el Instituto Nacional de Estadística (2018). Además, ambas superan los dos kilómetros de distancia establecidos. En concreto, para la población más cercana, en este caso Tirig, hay 4,4 km de distancia.

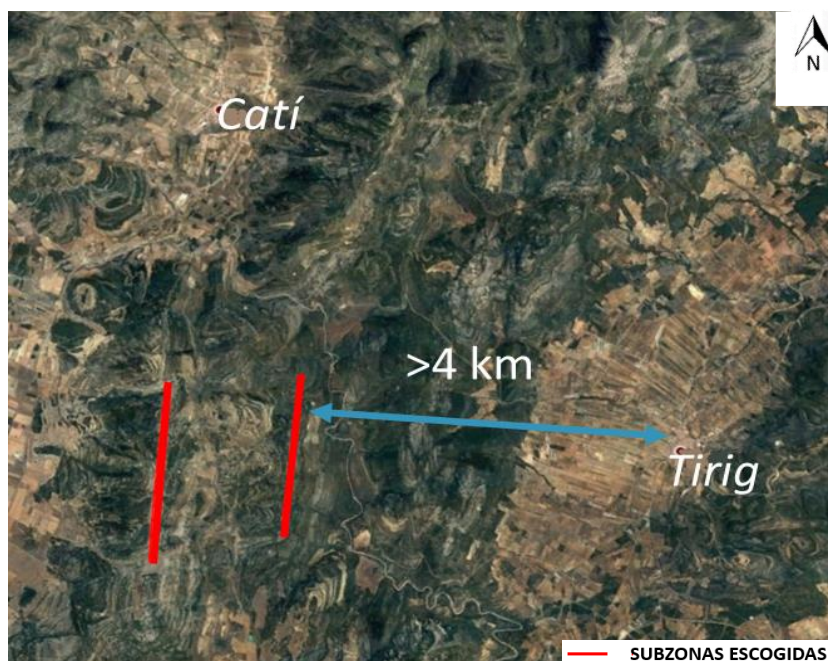


Figura 36- Poblaciones colindantes a la zona de estudio (Fuente: Google Earth)

Se ha visto relevante mencionar que la distancia de mínima de 2 km se ha escogido conforme a construcciones ya existentes como es el



Figura 37- Impacto visual en Olocau del Rey, Castellón (Fuente: Google Earth)

caso del parque eólico situado en Olocau el Rey, Castellón. En las siguientes imágenes se puede observar como la distancia de separación es de apenas un par de kilómetros y que es posible su visibilidad desde dicha población.

5.3.4. CAPACIDAD ENERGÉTICA

Los parques eólicos ya existentes en Castellón poseen como mínimo 15 MW de potencia instalada. En los tres Trabajos Final de Grados que sirvieron como antecedentes a este, se consideraba una potencia mínima de 20 MW. En este, al haber mejorado de una manera tan rápida las tecnologías de los aerogeneradores, y con los objetivos tan ambiciosos establecidos en el Plan Nacional de Energía y Clima, se ha estimado como conveniente que la potencia mínima sea 50 MW.

A partir de *Google Earth* se han obtenido datos del terreno que permiten comprobar esta capacidad energética.

Por un lado, la superficie disponible es de 1 km², lo que nos permite albergar al menos dos filas de 9 aerogeneradores cada una. Suponiendo que estos son de 3 MW y un diámetro de 115 m cada uno, que es la posibilidad considerada más desfavorable, daría una potencia de 54 MW lo que supera la mínima establecida cumpliendo así el criterio.

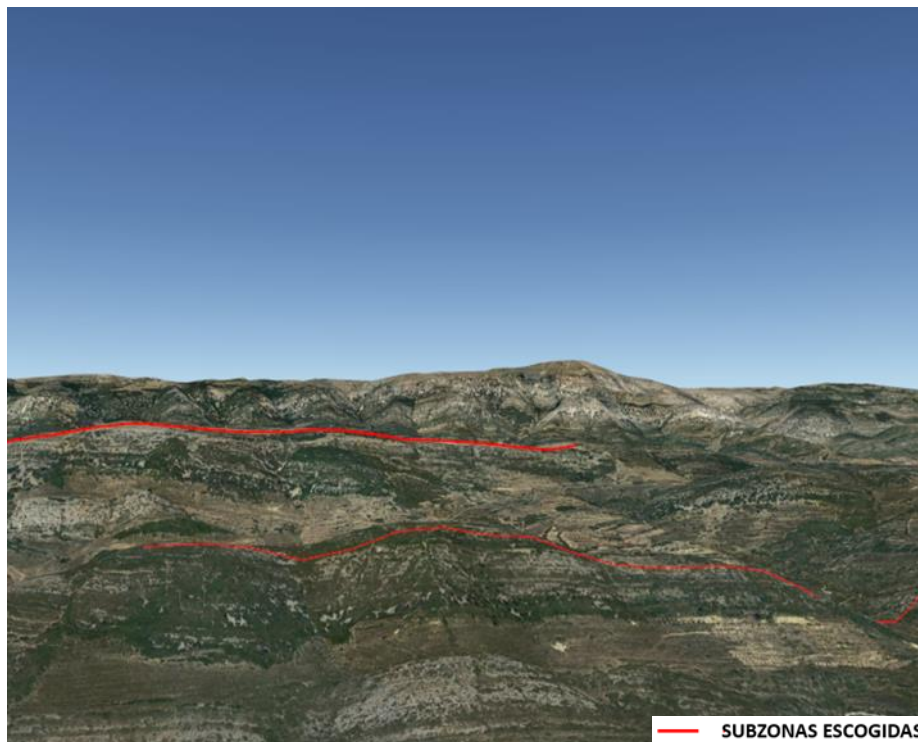


Figura 38- Zona de estudio, vista lateral (Fuente: Google Earth)

Cabe destacar en este apartado, que el perfil longitudinal del terreno seleccionado presenta una altitud máxima de 774 msnm lo que asegura que se van a alcanzar velocidades altas (alrededor de 8,3 m/s) , que permiten el uso de aerogeneradores de una potencia mayor a 3 MW.

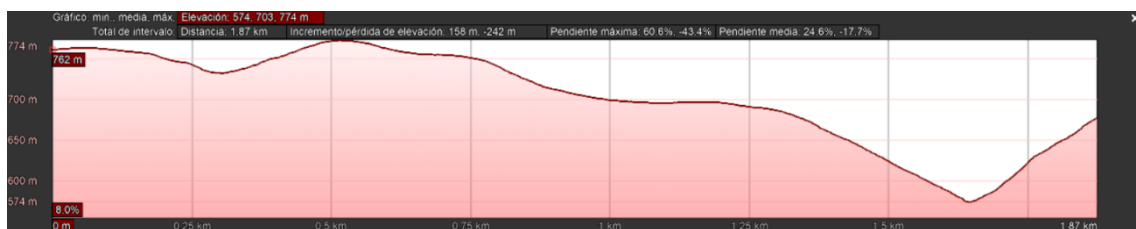


Figura 39- Perfil longitudinal de la zona de estudio (Fuente: Google Earth)

6. ESTUDIO DEL VIENTO

Una vez comprobada la viabilidad de la zona de actuación, se procede con el estudio del viento que permitirá determinar la distribución de velocidades. A partir de estas, se estudiará la producción para cada modelo de aerogenerador y su aprovechamiento de la energía. Es decir, el estudio del viento es el paso previo para la elección del modelo de aerogenerador más eficiente en cuanto se refiere a los factores productivos y técnicos.

Cabe destacar, que los datos se han obtenido de la página web *Global Wind Atlas*. (Global-Wind-Atlas, 2020)

6.1. OBTENCIÓN DE DATOS

Se escoge como punto representativo el 40, 462º; 0,03983º , ya indicado en el apartado “4.1. Criterio energético”. De este, la aplicación determina los parámetros de la distribución Weibull de la que se tratará más adelante.

En el presente caso se han escogido los correspondientes para una altura de 100 m y una rugosidad de 0.1 m (esta se corresponde con un terreno agrícola con algunas casas a distancia > 500 m). A partir de la frecuencia, se obtienen los parámetros de escala y de forma que conforman la distribución siendo $A = 9,2$ m/s y $C = 1,98$ como se muestra en la tabla.

0.10		100 m				
DIRECCIÓN	SECT	FREQ	A	A*f	c	c*f
N	0	3.99	2.81	0.11	1.12	0.04
NNE	30	2.70	3.85	0.10	1.29	0.03
ENE	60	3.17	4.52	0.14	1.37	0.04
E	90	3.34	3.73	0.12	1.44	0.05
ESE	120	4.87	3.26	0.16	2.16	0.11
SSE	150	10.59	3.90	0.41	2.61	0.28
S	180	8.24	4.21	0.35	2.17	0.18
SSSW	210	10.64	5.71	0.61	1.83	0.19
WSW	240	4.29	5.25	0.23	1.42	0.06
W	270	2.71	4.66	0.13	1.05	0.03
WNW	300	22.73	15.87	3.61	2.39	0.54
NNW	330	22.73	14.06	3.20	1.87	0.43
TOTAL		100		9.2		1.98

Tabla 2- Obtención de parámetros Weibull (Fuente: elaboración propia)

Una vez calculados los parámetros para la altura de 100 m se procede a convertirlos a la altura de 135 m ya que es la altura de buje de los aerogeneradores. La fórmula que relaciona ambas es la ley del perfil logarítmico del viento, expresada de la siguiente forma:

$$\frac{v}{v_{ref}} = \frac{\ln(z/z_o)}{\ln(z_{ref}/z_o)}$$

Fórmula 1- Ley del perfil logarítmico del viento

Donde z y z_{ref} representan la cota de la nueva y actual altura respectivamente y z_o la rugosidad. Por su parte, v_{ref} es la velocidad de la altura actual y v la que se desea conseguir para obtener la relación.

En este caso se obtiene que $A=9,6$ m/s y C se mantiene constante. Es decir, $C=1,98$. A partir de estos valores, la distribución del viento para la zona de estudio es la que se muestra en la figura a continuación.

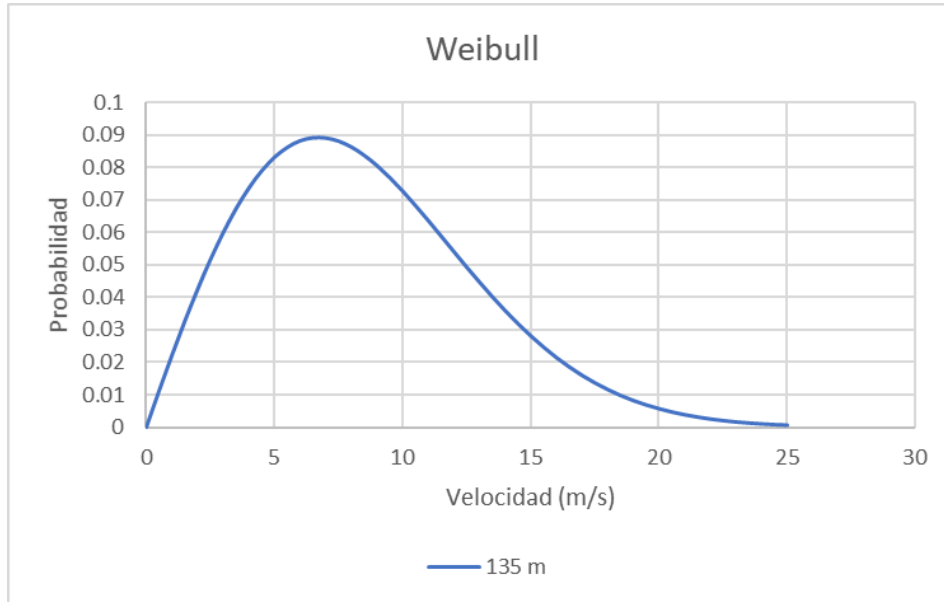


Figura 40- Distribución del viento para la zona de estudio, altura 135 m (Fuente: elaboración propia)

Por otro lado, se procede a calcular la distribución del viento en función del número de horas anuales en las que se da cada velocidad.

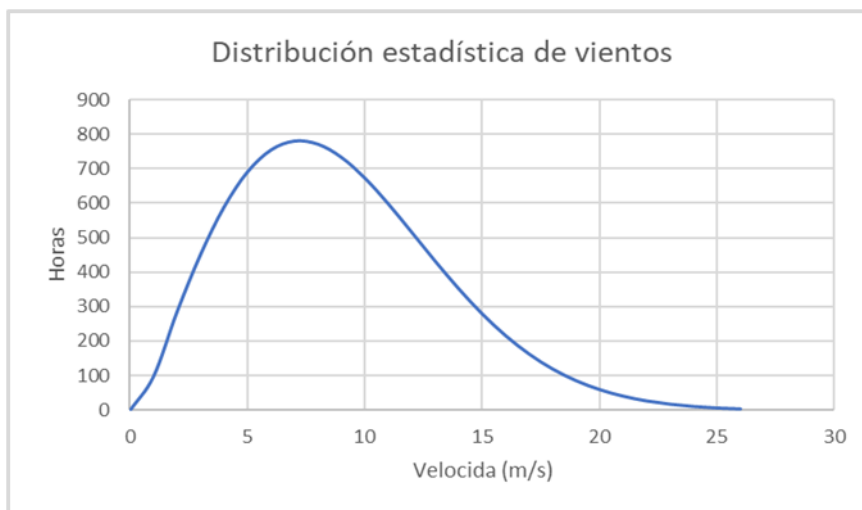


Figura 41- Distribución del viento en función de las horas anuales (Fuente: elaboración propia)

7. ELECCIÓN DEL AEROGENERADOR

En este punto, se exponen de forma detallada las características técnicas de cada modelo de aerogenerador que se estudia. Además, se obtendrá, sus producciones correspondientes y la energía aprovechada por cada uno. Esto, junto con el estudio económico, permitirá determinar cuál es el más conveniente

7.1. MODELOS DE AEROGENERADORES

En primer lugar, se ha optado por escoger modelos de dos empresas pioneras en el sector: Enercon (Enercon, 2020) y Siemens Gamesa (Siemens-Gamesa, 2020). La primera es alemana mientras que la segunda es una multinacional española.

Por otra parte, cabe destacar que el modelo Gamesa G-132 de 3,3 MW escogido por Ignacio Arnal Palacios en el Estudio *de viabilidad para la instalación de un parque de energía eólica en la Comunidad Valenciana. Provincia de Castellón*, se ha quedado obsoleto y, como consecuencia, ya no está disponible, debido al gran avance tecnológico en la rama de la eólica en estos últimos años.



Figura 42- Aerogenerador E-126 EP3 (Fuente: Enercon)

e los modelos Enercon escogidos se encuentran: el E-115, E-138 EP3 y E-126 EP3.

El E-115 es el modelo escogido con menor potencia. En este caso, es de 3 MW. Posee un diámetro de 115 m y una altura de buje de 135m. Cabe destacar, que está diseñado para una clase de viento IIA, es decir, resulta más eficiente en zonas de velocidad media de viento anual de al menos 8,5 m/s. En el figura 2 se muestra su curva de potencia sin corregir que muestra su potencia para distintas velocidades.

Las curvas de potencia (The-Wind-Power, 2020) vienen dadas por el fabricante y se encuentran en función de las velocidades. Esto permite ver, a que valores se alcanzan las distintas potencias.

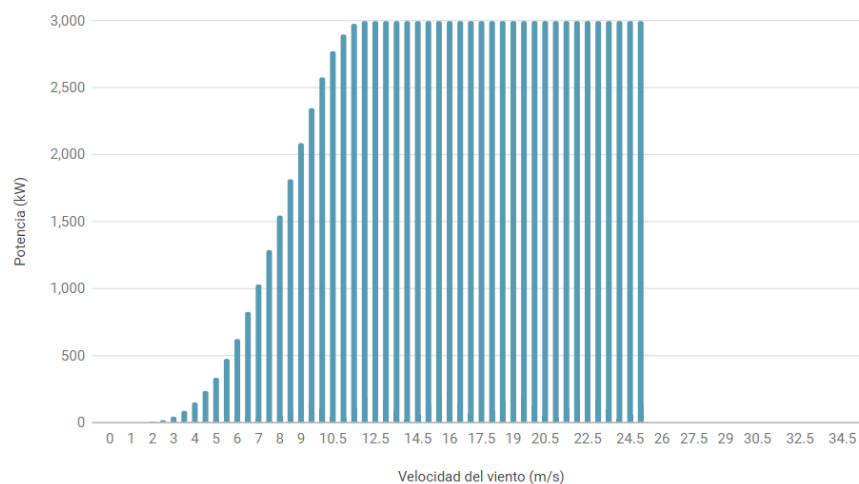


Figura 43- Curva de potencia E-115 (Fuente: The Wind Turbine)

El aerogenerador E-138 EP3 presenta una potencia de 3.5 MW y un rotor de diámetro 138.25 m. En cuanto a la clase de viento le corresponde la IIIA eficiente para una velocidad media de viento de 7,5 m/s.

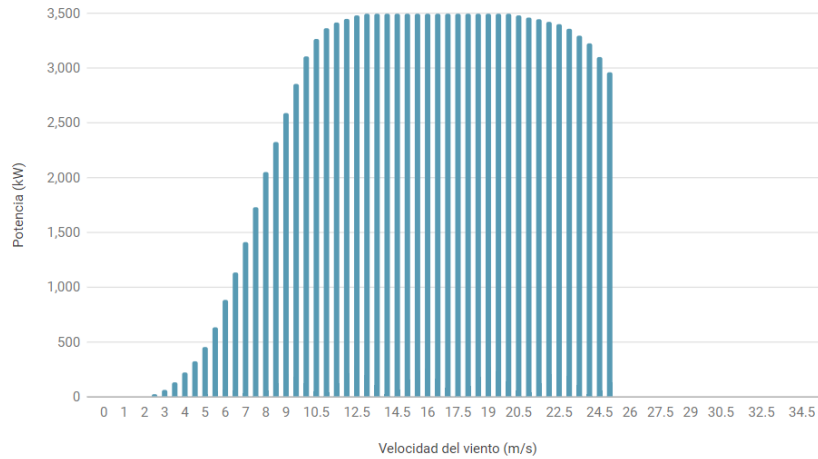


Figura44- Curva de potencia E-138 EP3 (Fuente: The Wind Turbine)

El modelo E-126 EP3, cuenta con 4,5 MW de potencia y un rotor de diámetro 126m . La clase de viento que el corresponde es las IIA al igual que el E-115.

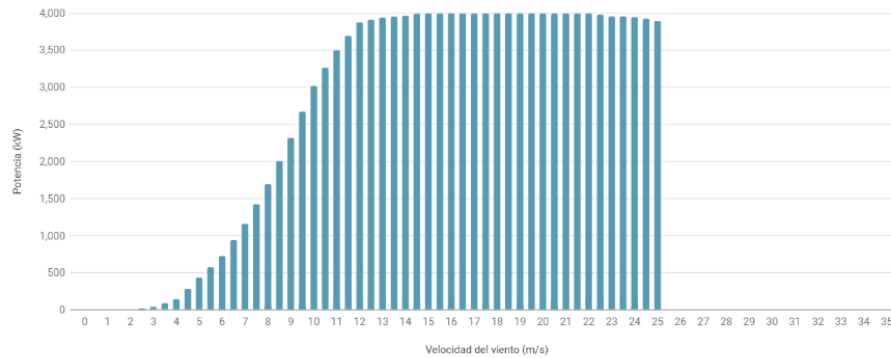


Figura 45- Curva de potencia E-126 EP3 (Fuente: The Wind Turbine)

Por su parte, el modelo Siemens Gamesa es el SG-5.0 de 5 MW con diámetro rotor de 132 m. Sirve para una clase de viento IA, que corresponde a una velocidad media de 10 m/s.



Figura 46- Aerogenerador SG-5.0-1323 (Fuente: Siemens Gamesa)

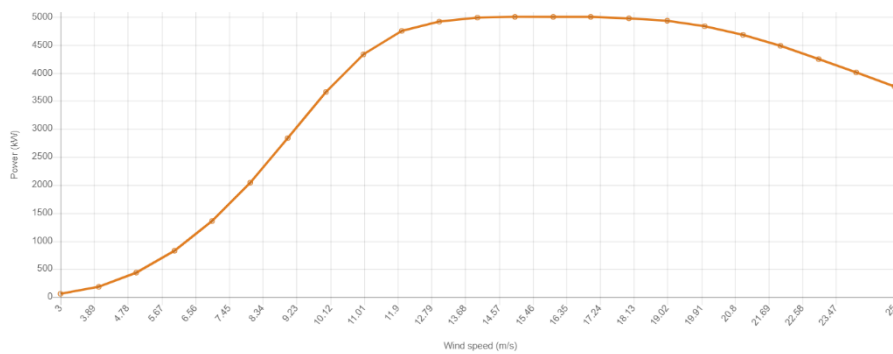


Figura 47- Curva distribución del viento (Fuente: elaboración propia)



7.2. ANÁLISIS DE PRODUCTIVIDAD

En este apartado se describirán los cálculos realizados para valorar la productividad de cada modelo de aerogenerador anteriormente mencionado. Este, junto con el análisis económico, permitirá escoger el aerogenerador más eficiente.

7.2.1. DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA DEL VIENTO

La distribución estadística del viento es el primer paso para realizar para el posterior cálculo de producción. Esta se calcula a partir de la fórmula de Weibull dando las horas correspondientes a cada velocidad en un año y mostrando así la variación del viento en el emplazamiento.

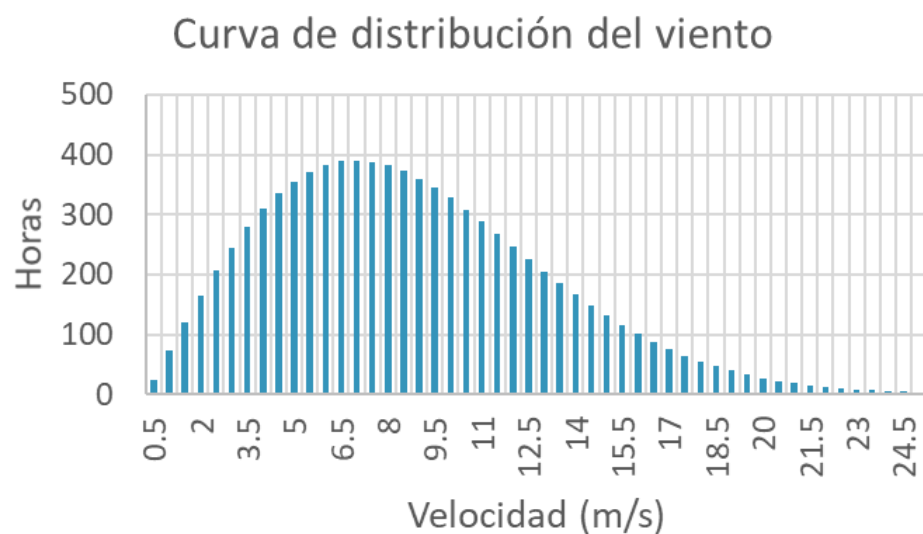


Figura48-Curva de potencia SG-5.0-1323 (Fuente: Wind Turbine Models)

7.2.2. CÁLCULO DE LAS CURVAS DE POTENCIAS CORREGIDAS

Anteriormente se han mostrado las curvas de potencia para cada aerogenerador. Para la estimación de la producción real es necesario corregirlas según la densidad del aire que varía con la altura. Para el lugar de estudio esta es de 1.09 kg/m³.

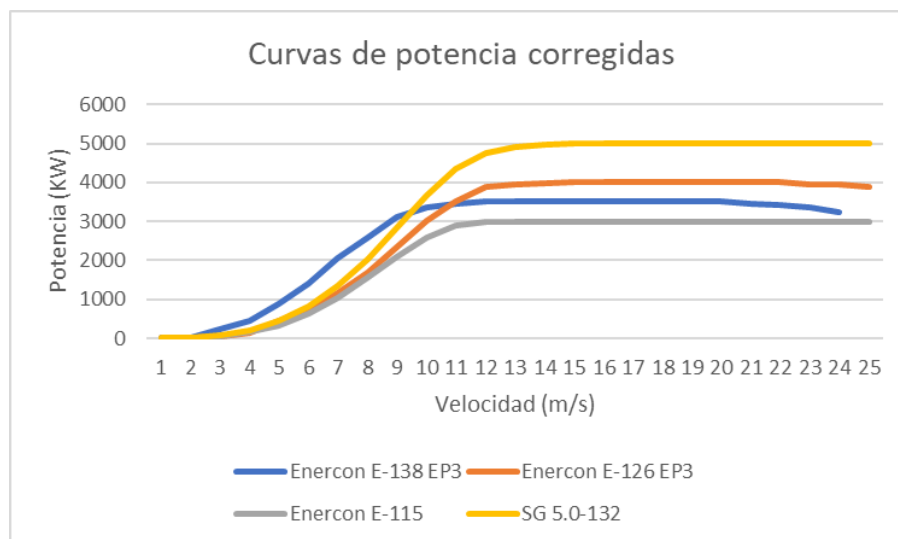


Figura49- Curvas de potencia corregidas (Fuente: elaboración propia)

7.2.3. CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN

Una vez obtenidas las curvas de potencia corregidas junto con el total de horas que se da cada viento, se realiza el cálculo de la producción de cada aerogenerador. En la tabla se muestra la correspondiente a cada modelo.

	Potencia máxima (KW)	Producción máxima (KW*h)	Producción anual (KW*h)	Factor de uso
Enercon E-115	3,000	23,422,395	15,074,312	64%
Enercon E-138 EP3	3,500	27,326,127	17,940,055	66%
Enercon E-126 EP3	4,000	31,229,860	18,690,907	60%
SG 5.0-132	5,000	39,037,325	19,798,018	51%

Tabla 3- Datos de producción de cada modelo de aerogenerador (Fuente: elaboración propia)

Cabe destacar que la producción máxima sería aquella correspondiente a la máxima potencia posible. Esta es teórica, en la realidad se producen pérdidas que impiden su plena producción. El cociente entre ambas recibe el nombre de factor de uso.

En conclusión, se puede observar tanto gráfica como numéricamente que el modelo SG 5.0-132 tiene la producción mayor siendo esta de 19,798,018 KW*h. No obstante, el que mayor factor de uso presenta es el E-138 EP3 con un valor de 66%. Este último, como se muestra en la gráfica, trabaja mejor para velocidades bajas.

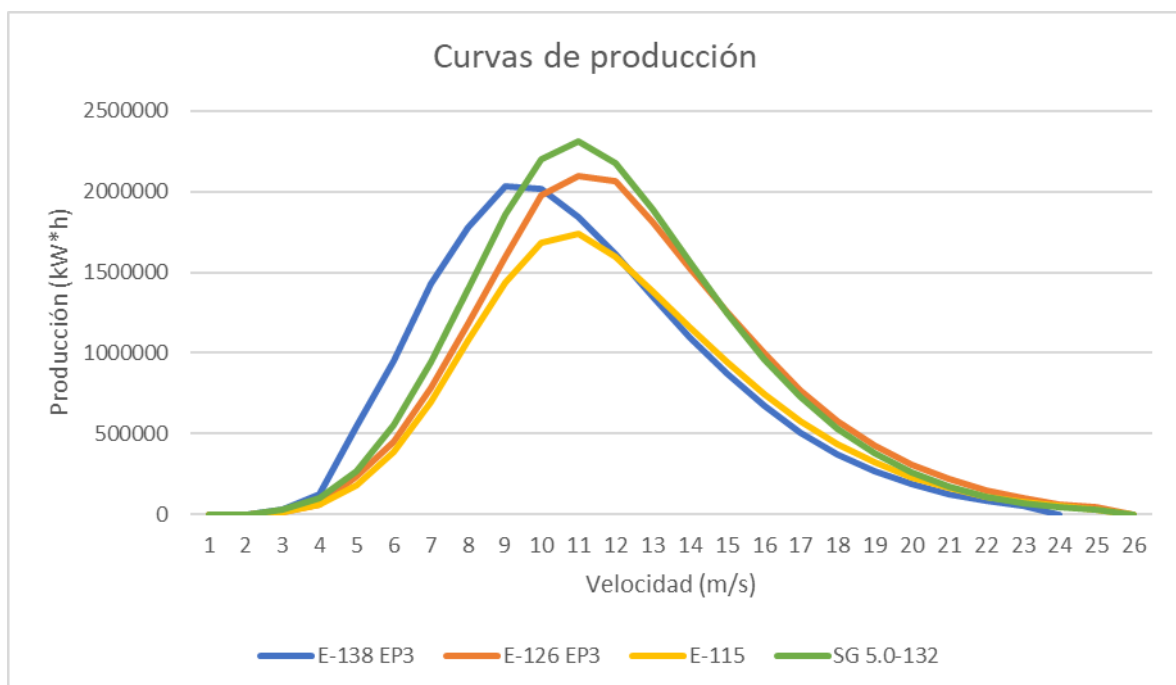


Figura 50- Curvas de producción para cada aerogenerador en KW*h (Fuente: elaboración propia)

7.2.4. APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA

Por último, en cuanto a cálculos de productividad se refiere, se procede a calcular el aprovechamiento de la energía. Para su mejor comprensión, se ve necesario explicar primero el concepto de límite de Betz.

El límite de Betz representa el valor máximo que puede extraerse de la energía cinética del viento por un aerogenerador, posteriormente convertida en energía mecánica en su eje. Es decir, es la máxima energía que se puede aprovechar del viento. Este, es el valor máximo de la potencia contenida en el tubo de corriente del aire que alcanza a extraer el rotor de una aeroturbina.

Numéricamente, una turbina eólica tiene capacidad real para convertir en energía mecánica un máximo de 59,26% de la energía cinética del viento que incide sobre ella.

Cabe destacar, que la teoría de Betz es una simplificación al no tener presente la resistencia aerodinámica de las palas, las pérdidas de energía por turbulencia de la estela, la compresibilidad del aire ni la propia interferencia entre las palas.



Figura 51- Descripción gráfica del límite de Betz (Fuente: Wind Power)

Por otro lado, el cálculo de la distribución de energía de cada aerogenerador es el cociente entre la potencia y el área correspondiente. Se puede observar como el modelo E-138 EP3 es el que menor aprovechamiento de energía alcanza (con un valor porcentual de 16%) mientras que los aerogeneradores E-115 , E-126 EP3 Y SG 5.0-132 presentan curvas muy parecidas a las que les corresponden unos valores de 19,5%, 20%, 19,7% respectivamente.

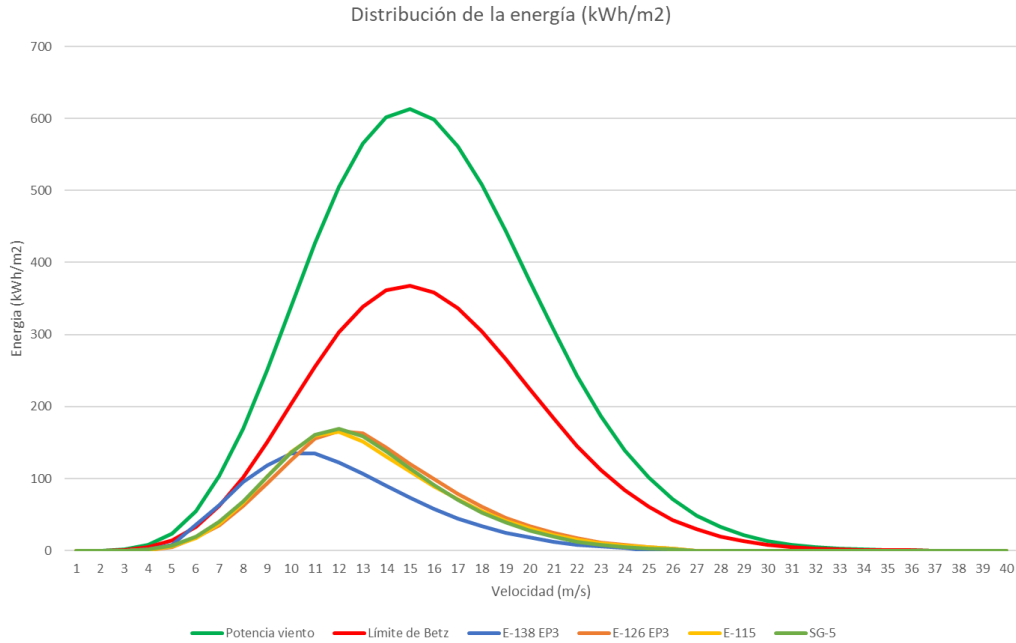
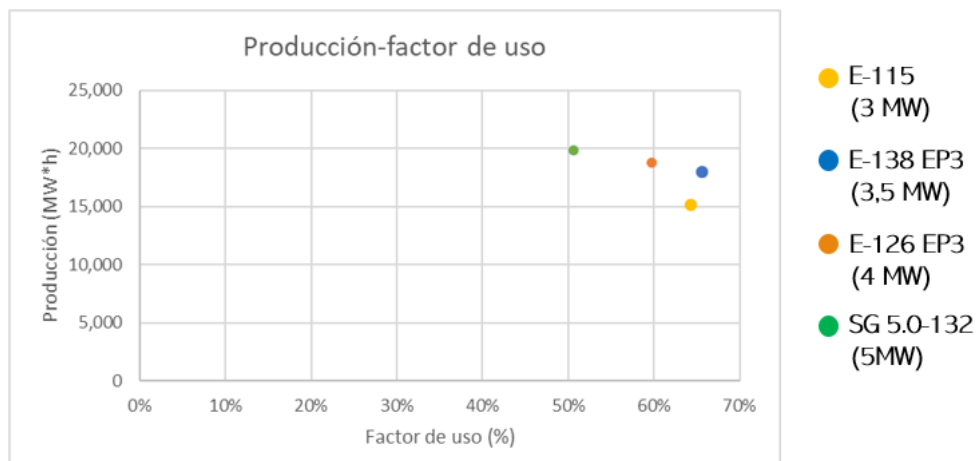


Figura 52- Distribución de la energía en kWh/m² (Fuente: elaboración propia)

7.2.5. FACTOR DE USO Y PRODUCCIÓN

En este apartado se muestra la relación entre el factor de uso y la producción para cada uno de los aerogeneradores en la que se va a mayor producción como consecuencia de una potencia mayor,



Figuran 53- Producción y factor de uso para cada aerogenerador (Fuente: elaboración propia)

menor factor uso. Es decir, se produce más, pero en un menor número de horas funcionando a plena potencia.

7.3. ANÁLISIS ECONÓMICO

Una vez se ha llevado a cabo el análisis productivo se procede al económico. Este permite conocer qué aerogenerador presenta una mayor rentabilidad. Para ello, se van a analizar los siguientes indicadores económicos: flujo de caja, Valor actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Payback. A partir de estos se conocerán los gastos, ingresos y beneficios de cada aerogenerador.

Previo a la realización del estudio es necesario plantear las siguientes hipótesis de partida. Cabe destacar que los datos se han obtenido de la *Evolución Tecnológica y prospectiva de costes de las energías renovables 2010-2020 de IDAE* (IDAE, 2011) y del artículo que lleva por título *El precio medio de las turbinas eólicas baja del millón de dólares por megavatio* publicado en 2017 en *El periódico de la energía*. (EPDE, 2017)

Las proporciones de la inversión total de cada elemento que componen el parque eólico son las que aparecen en el siguiente figura

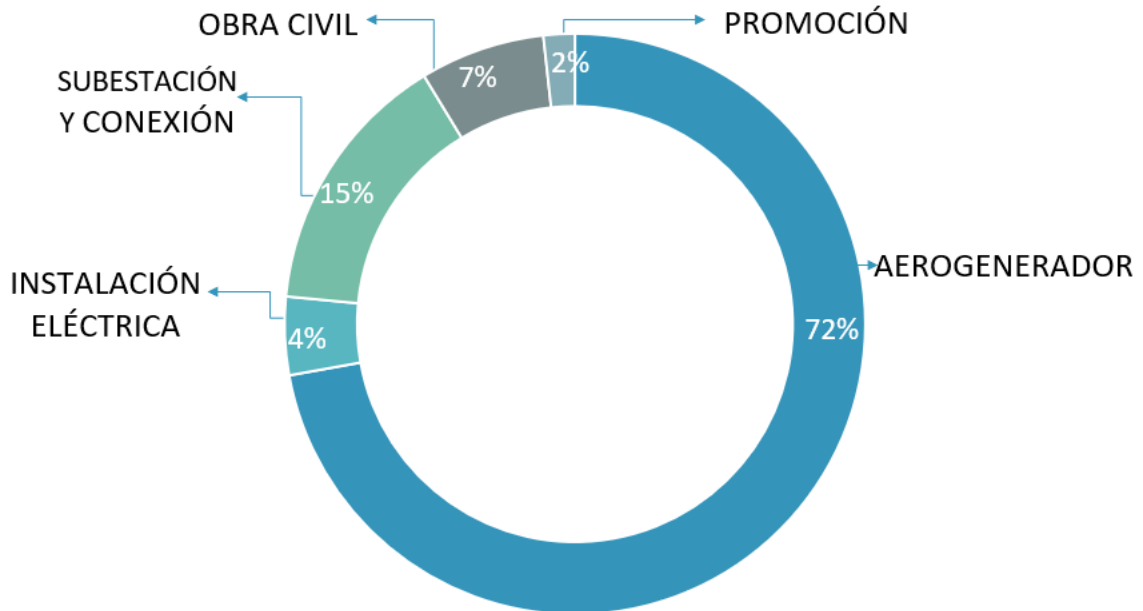


Figura54- Porcentaje de cada elemento que compone el parque eólico (Fuente: elaboración propia)

En cuanto al valor del aerogenerador se ha valorado dos opciones distintas. Por un lugar, en la *Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las energías renovables 2011-2020* de IDEA establece un coste de 0,97 millones de € por MW de potencia mientras que en *El periódico de la energía* se consideró un valor de 0,83 millones de € por MW de potencia. Este último fue publicado en 2017 mientras que el primero es de hace prácticamente una década de antigüedad habiendo sido redactado en 2011. Por esta razón, se ha escogido el último valor para los cálculos como se muestra en la Tabla 6.

Como supuestos de partida, para el cálculo de la inversión inicial se han considerado los valores que aparecen desglosados en la Tabla 6 dando un total de 1,15 millones de € por MW de potencia a instalar.

COSTES DE INVERSIÓN

Aerogenerador	0.83	M€/MW
Instalación eléctrica	0.05	M€/MW
Subestación y conexión eléctrica	0.17	M€/MW
Obra civil e ingeniería	0.08	M€/MW
Promoción	0.02	M€/MW
Total	1.15	M€/MW

Tabla 4- Supuestos de partida, inversión (Fuente: elaboración propia)

Por otro lado, los ingresos corresponden al precio medio de la energía eléctrica en España entre los datos para los años 2017, 2018 y 2019. Este valor es de 52,7 €/MWh y se ha obtenido de la página web de *OMIE*. (OMIE 2017; OMIE 2018; OMIE 2019).

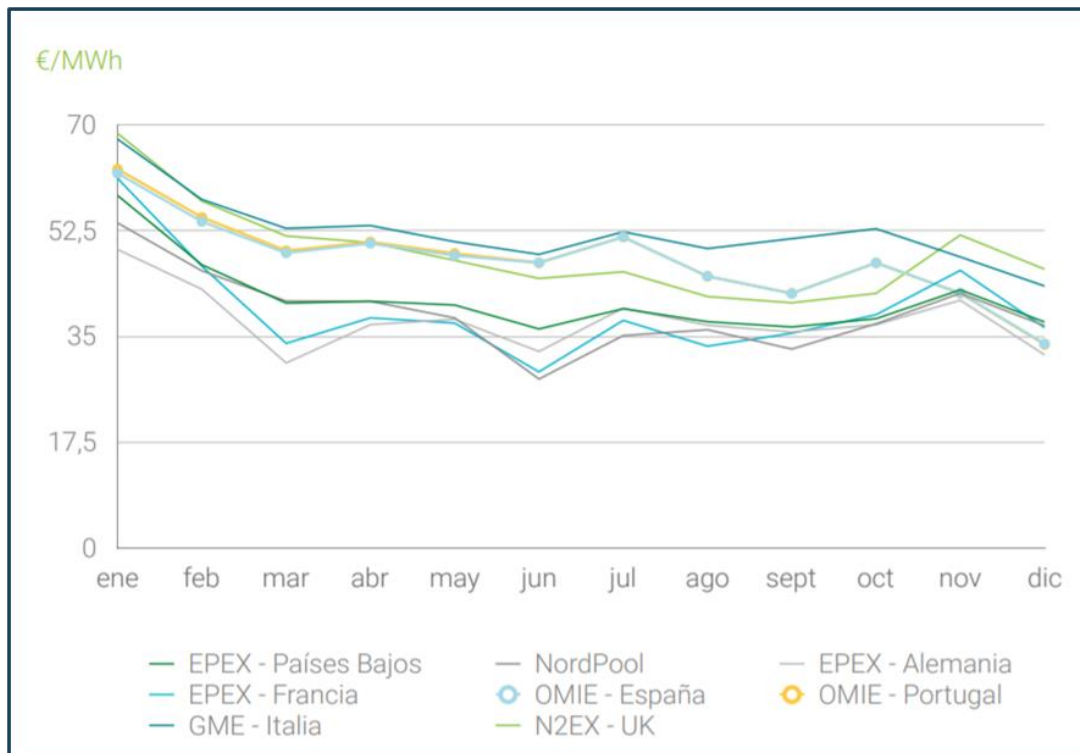


Figura 55- Precios medios mensuales en Europa 2019 (Fuente: OMIE)

En cuanto a los costes de explotación, se ha considerado conforme al *Anuario Eólico 2019 de AEE* que suponen el 5% de los ingresos anuales.

La vida útil considerada para los aerogeneradores es de 25 años. Con todo esto, se muestran los valores obtenidos de forma individualizada para cada aerogenerador:

	ENERCON E-115	ENERCON E-138 EP3	ENERCON E-126 EP3	SG-5.0
Potencia nominal (MW)	3	3.5	4.0	5
Producción (MW*h)	15,074	17,940	18,691	19,798
Costes de inversión (M€)	3.45	4.025	4.6	5.75
Costes de explotación (€)	40,098	47,721	49,718	52,663
Ingresos(€)	801,953	954,411	994,356	1,053,255

Tabla 5- Valores correspondientes a los supuestos de partida de cada aerogenerador (Fuente: elaboración propia)

7.3.1. FLUJO DE CAJA

Se entiende por flujo de caja la acumulación neta de activos líquidos en un periodo determinado. Aporta información sobre los ingresos y gastos permitiendo determinar la solvencia y liquidez del negocio. Es un estado financiero dinámico y acumulativo.

A continuación, se muestran los flujos de caja para cada modelo de aerogenerador.

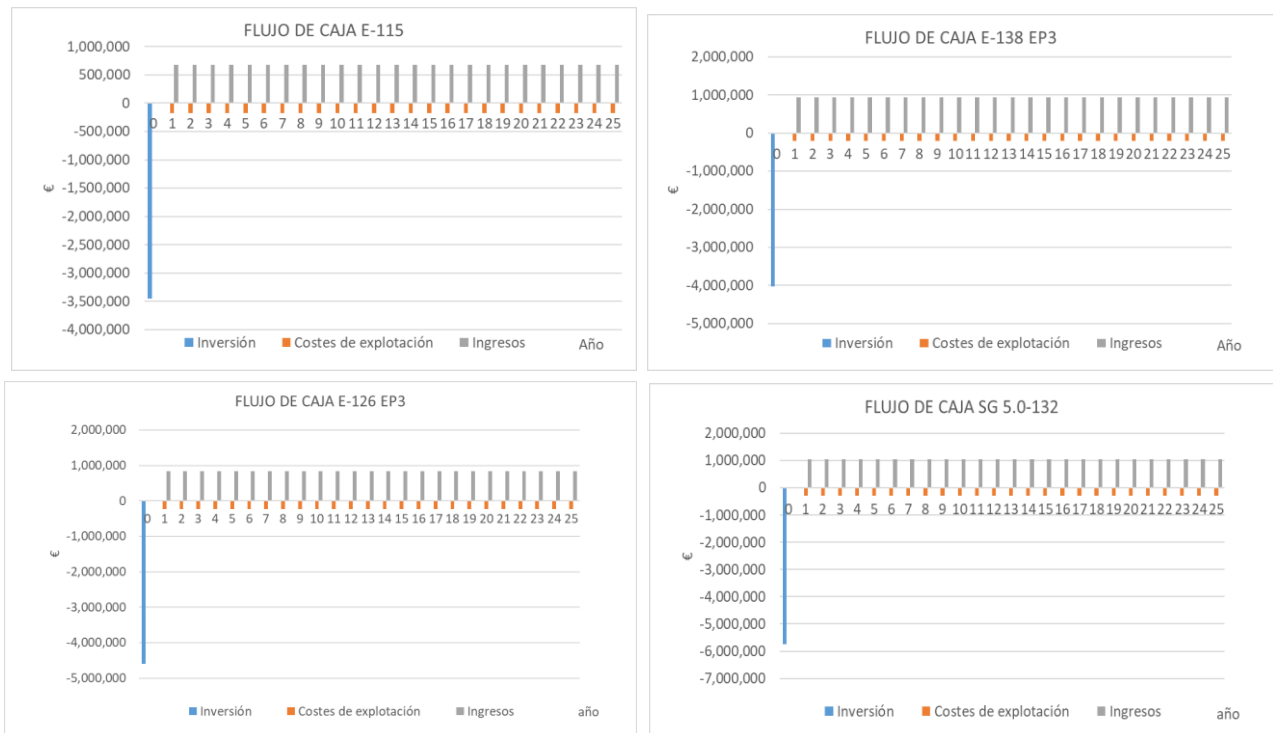


Figura 56- Flujo de caja dec cada aerogenerador (Fuente: Elaboración propia)

Con estas figuras se puede observar que el SG 5.0-132 es el aerogenerador que mayor inversión presenta.

7.3.2. VALOR ACTUAL NETO (VAN)

El Valor actual neto o VAN se define como aquel procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión.

El cálculo se realiza conforme la siguiente expresión:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+r)^t} - I$$

Fórmula 2- Valor Actual Neto

Donde, V_t son los flujos netos de caja correspondientes a cada periodo; r es el tipo de interés (en este caso se ha tomado un valor del $r=4\%$); t el número de años (se ha calculado para una vida útil de $t=25$ años); e / la inversión inicial realizada.

- Enercon E-115 (3 MW)
 - VAN= 6,804,587€

- Enercon E-138 EP3 (3,5 MW)
 - VAN= 8,229,598 €

- Enercon E-126 EP3 (4 MW)
 - VAN= 7,91,4555€

- Siemens Gamesa SG 5.0-132 (5 MW)
 - VAN= 6,956,305€

Cabe destacar que para que el negocio sea rentable, el Valor Actual Neto, expresado en unidades monetarias, debe ser mayor a cero. En el presente estudio, todos los valores superan ampliamente el 0 y

aquel con VAN superior es el E-138 EP3 seguido del aerogenerador E-126 EP3.

7.3.3. TASA INTERNA DE RETORNOS (TIR)

La Tasa Interna de Retornos o TIR es la rentabilidad que ofrece una inversión. Se expresa como el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá dicha inversión para las cantidades que no se han retirado el proyecto.

Se calcula despejando el tipo de interés r que iguala el VAN a cero. Viene expresado mediante la siguiente ecuación:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1 + TIR)^t} - I = 0$$

Fórmula 3- Tasa Interna de Retornos

Al igual que para el VAN, se han tomado para los cuatro modelos de aerogenerador un valor de $t=25$ años.

- Enercon E-115 (3 MW)
 - TIR= 17,8%

- Enercon E-138 EP3 (3,5 MW)
 - TIR= 18,3%

- Enercon E-126 EP3 (4 MW)
 - TIR= 15,8%

- Siemens Gamesa SG 5.0-132 (5 MW)
 - TIR= 11,5%

En el caso del indicador TIR, a mayor valor, mayor rentabilidad presenta el negocio. En este caso, el valor más alto es el que le corresponde al E-138 EP3.

7.3.4. PAYBACK

El Payback es un criterio estático de variación de inversiones que determina cuánto tiempo se tardará en recuperar la inversión inicial a partir de los flujos de caja. Para determinarlo, en el caso de que los flujos de caja no sean iguales, se debe restar a la inversión inicial los flujos de caja de cada año. Si son iguales, se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{PAYBACK} = I/V$$

Fórmula 4- Payback

Donde I es la inversión inicial y V el valor del flujo de caja.

AÑO	PAYBACK			
	E-115	E-138 EP3	E-126 EP3	S.G 5.0-132
	€			
0	-3,450,000	-4,025,000	-4,600,000	-5,750,000
1	-2,818,831	-3,270,730	-3,829,797	-4,967,927
2	-2,211,937	-2,545,470	-3,089,218	-4,215,934
3	-1,628,385	-1,848,105	-2,377,122	-3,492,864
4	-1,067,278	-1,177,562	-1,692,415	-2,797,605
5	-527,752	-532,809	-1,034,042	-2,129,086
6	-8,976	87,146	-400,992	-1,486,279
7	489,846	683,257	207,711	-868,196
8	969,483	1,256,440	793,001	-273,885
9	1,430,672	1,807,578	1,355,781	297,568

Tabla 6- Payback modelos aerogeneradores (Fuente: elaboración propia)

Se puede observar que el modelo E-138 EP3 es el que menor número de años necesita para empezar a obtener beneficios . En este caso, se dan partir del séptimo año desde su puesta en marcha. Por el contrario, el modelo de Siemens Gamesa necesita 9 años.

7.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ELECCIÓN DEL AEROGENERADOR

Por una parte, el criterio productivo muestra que pese a que el Siemens Gamesa SG 5.0-132 presente un factor de uso inferior al resto y que por tanto sus horas de funcionamiento a plena potencia son menores a los otros, tiene una producción mayor a estos.

En el caso de aprovechamiento de la energía, como se ha mencionado en su apartado correspondiente, los aerogeneradores E-115, E-126 EP3 y el SG 5.0-132 presentan valores muy parecidos, los tres entre el 19-20%.

Por otro lado, del análisis económico se deduce que el modelo Enercon E-138 EP3 es el que antes se amortiza y más ingresos genera, seguido en este aspecto por el E-126 EP3.

En conclusión ,se opta por escoger el aerogenerador E-138 EP3 ya que, pese a que su producción sea inferior a los otros modelos resulta más rentable el poner un mayor número de aerogeneradores que permitirán alcanzar una mayor producción y sobrepasar la mínima capacidad de 50 MW de potencia deseada



Figura 57- Modelo E-138 EP3 (Fuente: Enercon)

8. DISEÑO DEL PARQUE EÓLICO

Una vez escogido el modelo de aerogenerador se procede al diseño del parque. En este apartado se expondrán tanto los criterios logísticos como económicos necesarios para que su futura explotación sea lo más eficiente posible.

8.1. NÚMERO Y DISPOSICIÓN DE LOS AEROGENERADORES

Como se ha comentado anteriormente, se desea proyectar un parque eólico con una capacidad energética mínima de 50 MW. Para ello, al tratarse de un modelo de aerogenerador de 3,5 MW, se necesitan como mínimo 15 aerogeneradores.

Por otro lado, se procede a la disposición de estos. Como se muestra en la figura, es necesario cumplir un distanciamiento. Estos configuran la geometría del parque y determinan las pérdidas aerodinámicas o derivadas de su configuración. Estas pérdidas están ocasionadas por la sombra que un aerogenerador provoco sobre otro. En consecuencia, una turbina que se encuentre detrás de otra extraerá menor en seguida al formarse la conocida estela aerodinámica por la que la velocidad que llega es menor.

En el caso de decidir establecer los aerogeneradores en un espacio muy cercano, se consigue un mayor número de aerogeneradores a instalar, pero se verá reducida la energía promedio captada por cada turbina del parque.

Por otra parte, se deben disponer los aerogeneradores siempre que sea posible en la dirección del viento predominante. Además, se recomienda una distribución en filas alineadas, con separación transversal (perpendicular al viento dominante) entre turbinas de dos a cuatro veces el diámetro de rotor, y de cinco a nueve veces el

diámetro del rotor en dirección del viento dominante como aparece indicado en la Figura 24 . En el caso de que el viento tenga frecuentes cambios de dirección con respecto a la velocidad predominante, los aerogeneradores se dispondrán en tresbolillo.

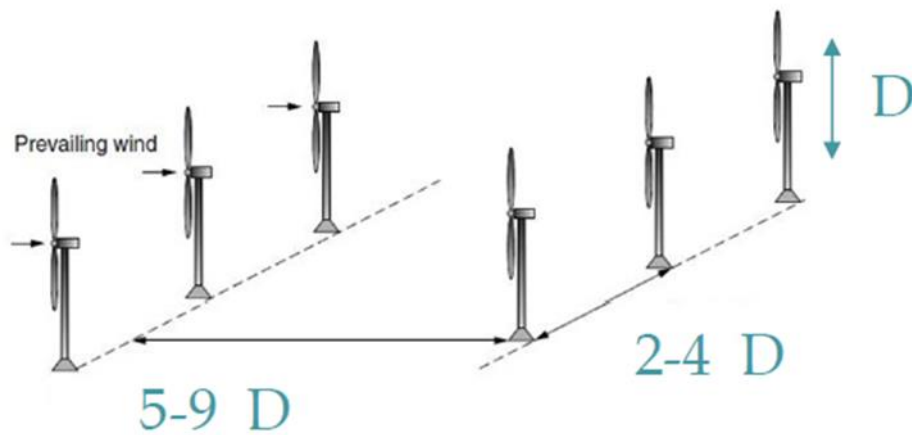


Figura 58- Distancias entre aerogeneradores.

En concreto, los intervalos para el aerogenerador de E-138 EP3 con diámetro $D=138,25$ m son las siguientes:

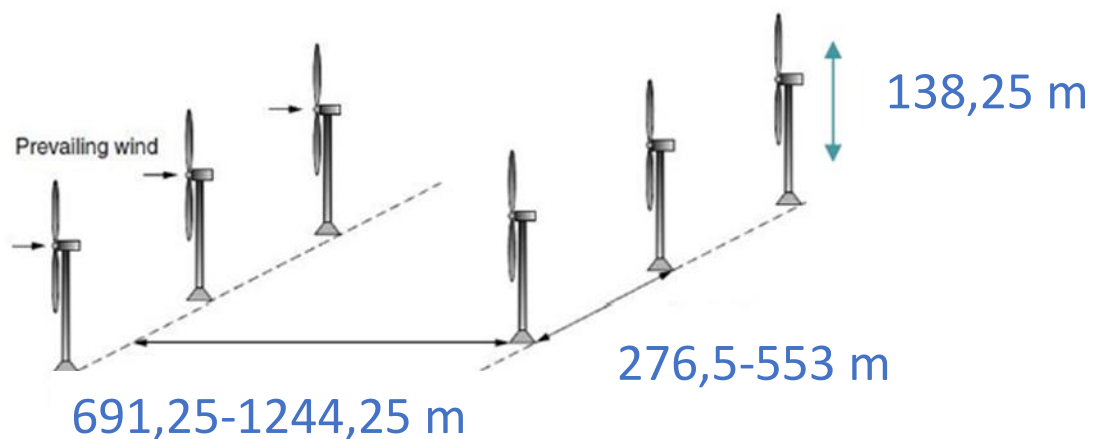


Figura 59- Distancias para el aerogenerador E-126 EP3

La dirección del viento predominante, como se ha comentado ya en el apartado 4.1. *Criterio energético* es el proveniente del noroeste. Por lo que los aerogeneradores se dispondrán perpendiculares a este. En la siguiente imagen se muestra un mapa eólico de vientos de la zona (Windfinder, 2020)

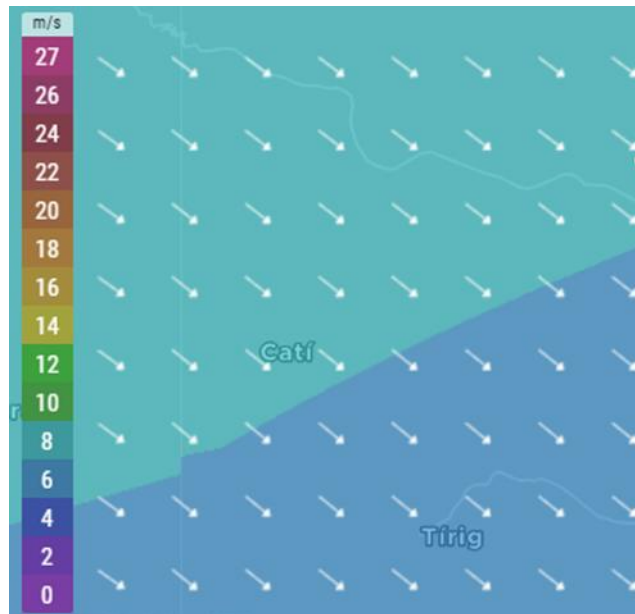


Figura 60- Dirección del viento predominante para la zona de estudio (Fuente: Windfinder)

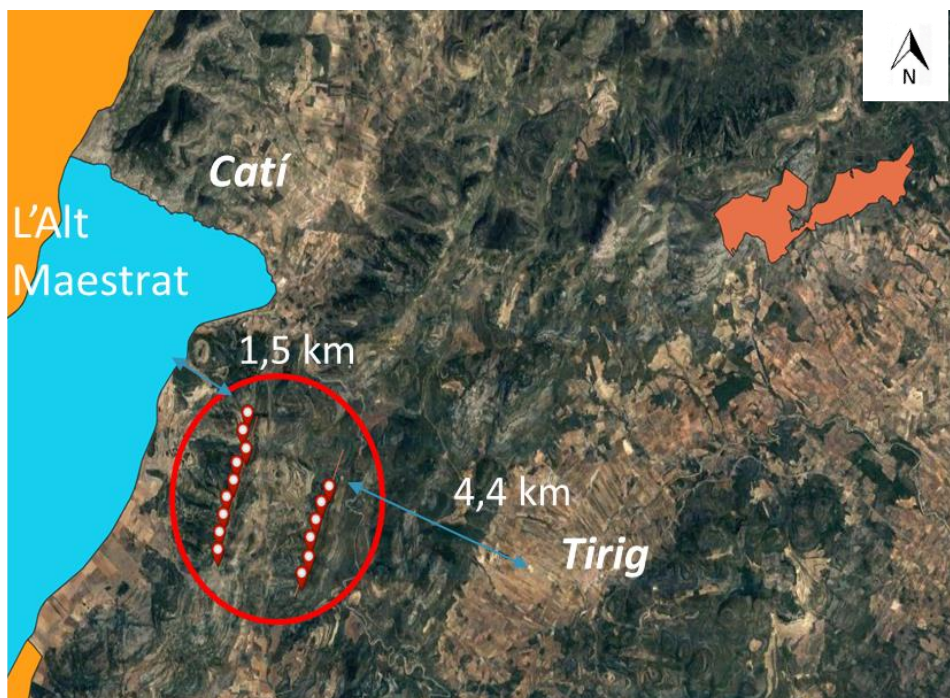


Figura 61- Localización aerogeneradores (Fuente: elaboración propia)

Finalmente, se deciden colocar 15 aerogeneradores. Estos aparecen determinados por las señales rojas a partir de la aplicación QGIS. Cabe destacar, que se encuentran a 4,5km de la población más cercana (Tirig) y a 1,2 km al menos de las zonas protegidas cumpliendo los criterios ya citados.

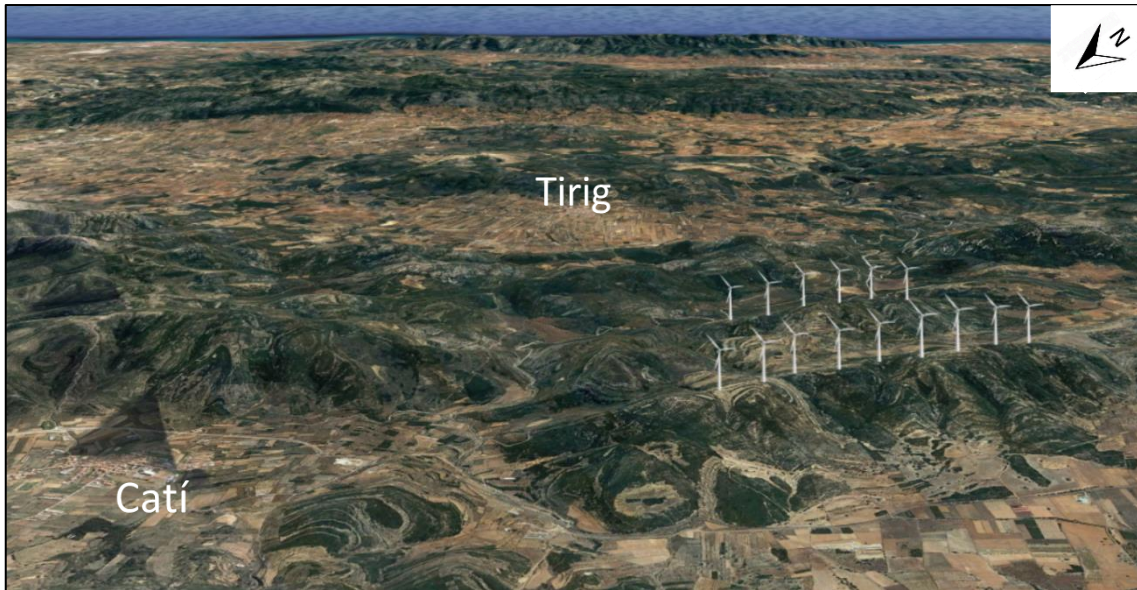


Figura 62- Disposición de aerogeneradores I (Fuente: elaboración propia)



Figura 64- Disposición de aerogeneradores II (Fuente: elaboración propia)

8.2. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PARQUE EÓLICO

Anteriormente, para la elección del modelo de aerogenerador, se realizó un estudio económico. En este apartado, se va a llevar a cabo un análisis económico del parque entero. Esto servirá para comprobar que el número de aerogeneradores escogido resulta viable, así como los beneficios que generará el parque para una vida útil de 25 años.

8.2.1. INVERSIÓN INICIAL, COSTES DE EXPLOTACIÓN E INGRESOS ANUALES

La inversión inicial se determina para un número total de 15 aerogeneradores. Considerando, como se ha expuesto en el apartado 6.3. *Análisis económico*, un valor de 1,15 millones de € por MW y para el modelo de aerogenerador E-138 EP3 de 3,5MW, se calcula un valor inicial de 60.375.000 €

Los costes de explotación representan el 5% de los ingresos anuales. Mientras que estos últimos se calculan para un precio de la electricidad de 52,7 €/MWh.

Cabe destacar, que para el cálculo de los ingresos se ha tenido en cuenta el coeficiente de pérdidas del parque. Este incluye:

- Pérdidas por sombras entre alineaciones

El parque eólico, cuenta con dos alineaciones en el tramo que se encuentra más al norte, En este caso, la primera recibe el más viento y con una velocidad mayor que la segunda, produciendo de esta forma más energía. Por ello, es de relevante importancia cumplir con las distancias mínimas expuestas en el apartado 7.1. *Número y disposición de aerogeneradores*.

Estas pérdidas, como se da en el caso de estudio, con una distancia entre alineaciones de 6 veces el diámetro del rotor, tienen un valor de 0,9.

- Pérdidas por sombra entre turbinas en una misma alineación

Para una separación considerada de 2 veces el diámetro del rotor, se considera un coeficiente de 0,995.

- Pérdidas por disponibilidad

Este punto considera las posibles pérdidas por avería del aerogenerador y tiene un valor de 0,98.

- Pérdidas por transformación y transporte

Estas son consecuencia de los procesos de elevación de la tensión y el transporte hasta la conexión a la red indispensable para su posterior distribución. El coeficiente tiene un valor de 0,97.

- Pérdidas por mantenimiento de la subestación

Esta tiene un valor de 0,999 e incluye los posibles parones en el vertido de energía a la red como causa del mantenimiento de la subestación o de los aerogeneradores.

- Pérdidas por corte de suministro

Estas representan la falta de suministro eléctrico en el momento del arranque de la turbina, No obstante, se consideran despreciables actualmente.

- Pérdidas por ajuste de la curva de potencia

Como se ha comentado anteriormente, la curva de potencia de los modelos de aerogeneradores se ajusta según la densidad del aire en la zona de estudio perdiendo así parte de su capacidad potencial. Este coeficiente toma un valor de 0,98.

El coeficiente global, obtenido a partir de la multiplicación de los anteriores, tiene un valor de 0,83.

PÉRDIDAS	COEFICIENTE
Por sombras entre alineaciones	0,9
Por sombras entre turbina	0,995
Por disponibilidad	0,98
Por transformación y transporte	0,97
Por mantenimiento subestación	0,999
Por corte de suministro	1
Por ajuste de curva de potencia	0,98
	0,83

Tabla 7-Pérdidas consideradas y coeficiente de pérdidas global (Fuente: elaboración propia)

Por tanto, los ingresos anuales, vienen determinados por el precio de la electricidad, la producción anual y el coeficiente de pérdidas para el total de aerogeneradores. Dando así un valor de 11.770.739 € anuales.

8.2.2. INDICADORES ECONÓMICOS: FLUJO DE CAJA, VAN, TIR Y PAYBACK

En este apartado, se procede a comentar el flujo de caja los parámetros económicos VAN, TIR y Payback que servirán para comprobar la viabilidad del presente proyecto.

Cabe destacar, que para su cálculo se ha utilizado una tasa de descuento de un 4% y una vida útil del parque eólico de 25 años.

- Flujo de caja

El flujo de caja muestra de forma gráfica la inversión inicial y los ingresos y costes de explotación de los 25 años de vida útil considerados

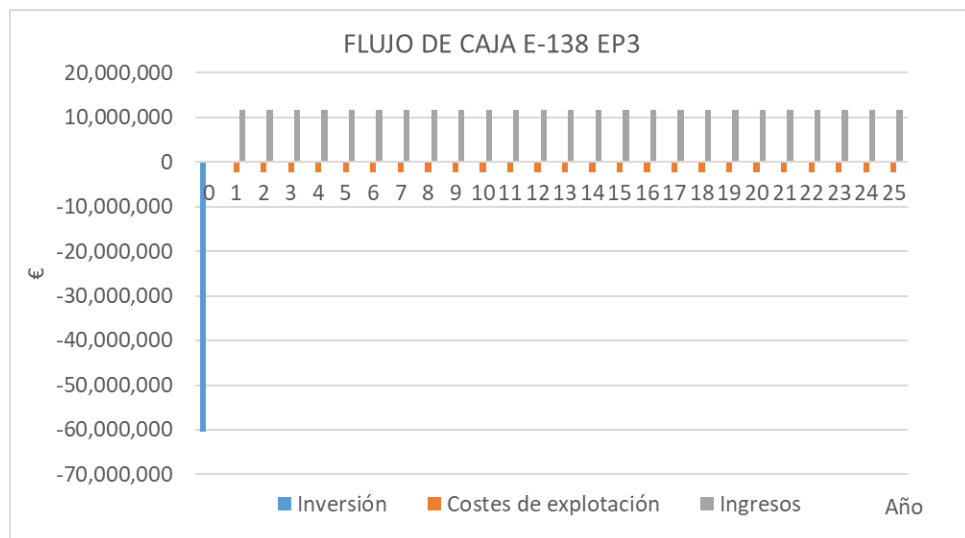


Figura 65- Flujo de caja parque eólico (Fuente: elaboración propia)

Pese a la fuerte inversión inicial de 60.375.000 €, cada año se estiman unos beneficios de 9.355.739€ .

- Valor Actual Neto (VAN)

El VAN que representa el valor actual de los flujos de caja futuros para una tasa de descuento de 4 % tiene un valor de 85.781.102 € indicando así que se trata de un proyecto rentable.

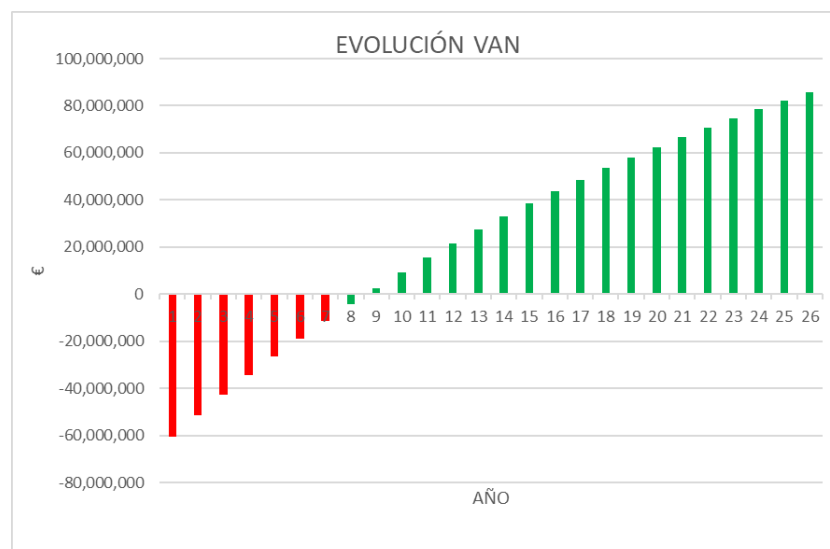


Figura 66- Evolución VAN del parque eólico (Fuente; elaboración propia)

- Payback

El payback muestra el periodo de tiempo que ha de pasar para comenzar a obtener beneficios considerando la tasa de descuento de 4%. Este es de 7 años.

- Tasa Interna de Retorno (TIR)

En este caso, el TIR tiene un valor de 13,3%, es decir, un valor superior a 0. Lo que muestra como factible la realización del proyecto.

9. CONCLUSIONES

El presente trabajo tiene como objetivo el diseño de un parque eólico en la provincia de Castellón. En concreto en Catí, situado en la comarca del Alto Maestrazgo.

En primer lugar, se ha hecho patente como el sector eólico tiene un papel imprescindible en esta transición energética, tanto en España como a nivel mundial y como, las principales potencias invierten en el desarrollo de esta tecnología. Pese a que los Objetivos de Desarrollo Sostenibles y de las Naciones Unidas son ambiciosos, no se tildan de inalcanzables, y una de las maneras de conseguirlos es a partir del desarrollo de la energía eólica.

En concreto en España, siguiendo el *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030* por el que, entre otras metas, se prevé un incremento del 27% respecto a la situación actual en la generación de energía a partir de fuentes renovables, se considera necesario duplicar la potencia eólica existente en el país. En concreto, se estima que esta sea de 50.258 MW para el inicio de la nueva década.

Por otro lado, cabe mencionar la empresa multinacional Siemens-Gamesa que tras su fusión en 2017 es una de las empresas pioneras en el sector generando así en España grandes beneficios económicos siendo el tercer país que más tecnología eólica exporta en con valor de 2.391 millones de €.

En cuanto a la eólica en la Comunidad Valenciana se deduce que todavía queda potencia eólica por explotar. Lo cual, además de ser necesario para la transición energética española, permitirá desarrollar la situación actual de la comunidad puesto que en cuanto a cobertura de demanda eléctrica se encuentra por detrás de la media nacional. Esta es de un 8,9% frente a un 20%.

Cabe destacar, que la provincia de Castellón presenta prácticamente la mitad del potencial eólico instalado en la comunidad por lo que se deduce que consta de unos vientos más favorables que Alicante y

Valencia para la explotación de este tipo de energía ya que tienen una velocidad y frecuencia superiores.

De los estudios previos desarrollados en la Comunidad Valenciana por los alumnos Ignacio Arnal Palacios, Claudio Chust Martínez y Rafael Ramon-Llin Pla que reciben el título de “*Estudio de viabilidad para la instalación de un parque de energía eólica en la Comunidad Valenciana*” en las provincias de Castellón, Alicante y Valencia respectivamente se deduce que todavía es posible instalar una potencia para un aerogenerador medio de 3319,5 MW. De todas las zonas que concluyeron como viables, se ha decidido escoger la del Alto Maestrazgo, en concreto en el municipio de Catí, la cual corresponde a la zona 4 del *Plan Eólico de la Comunidad Valenciana*. Esta elección se ha debido a las condiciones favorables que ya se han mencionado que presenta la provincia de Castellón, así como la amplia superficie que compone la zona que permite sacar un alto rendimiento de ella. EN concreto , se considera que hay 412,5 MW todavía por explotar.

Una vez se han expuesto los antecedentes y los estudios previos realizados por los alumnos de la *ETSICCP de la Universidad Politécnica de Valencia*, se ha procedido a determinar la zona de actuación. Para ello, se han comprobado los criterios energéticos del que se obtiene que la velocidad media anual de la zona de estudio es de 8,3 m/s.

El criterio ambiental, que tiene como fin la protección de los espacios protegidos delimita la zona de actuación asegurando que esta esté libre y al menos a 1 km de distancia de parajes municipales, parques naturales, Lugares de Importancia Comunitario y de Zonas de Especial Protección para las aves. En el presente caso, los espacios a respetar mas cercanos son los Lugares de Importancia comunitario de L’Alt Maestrat y se encuentran a 5 km aproximadamente.

El criterio de ubicación por su parte incluye, la existencia de una línea eléctrica a al menos 10 km de distancia que asegure el transporte de

la energía. En el caso del trabajo se encuentra a 5 km. Además, la superficie de más de 1 km² que compone la subzona que se está comprobando permite albergar 18 aerogeneradores de 3 MW que garantizan la potencia mínima deseada de 50MW.

Por otra parte, se ha procedido a comprobar la condición de impacto visual. Las poblaciones más cercanas se encuentran a más de 4 km de la zona superando los 2 km considerados como condición de distancia mínima que se toman como valor para poblaciones de menos de 1000 habitantes. Estas son las de Catí y Tirig, siendo esta última la más próxima.

Concluidas de esta forma las comprobaciones, se lleva a cabo el estudio del viento por el que, con los parámetros de forma y de escala obtenidos del Global Wind Atlas para una altura de buje de 135 m, se lleva a cabo la curva de distribución de Weibull para cada velocidad de viento tanto respecto a la probabilidad de que suceda como a la traducción en número de horas del año que supone.

El tercer bloque del trabajo consiste en determinar el modelo de aerogenerador óptimo para el trabajo entre los modelos E-115 de 3MW, E-138 EP3 de 3,5 MW, E-126 EP3 de 4 MW y S.G 5.0-132 de 5 MW. Para ello se llevan a cabo dos análisis, el productivo y el económico.

Del análisis productivo se deduce que, a mayor potencia, mayor producción, pero menor factor de uso, como es el caso de S.G 5.0-132. Las producciones anuales para cada modelo de aerogenerador son de 15.074 MW para el E-115, 17.940 MW para el E-138 EP3, de 18.690 MW para el E-126 EP· y de 19,798 MW para el S-G 5.0-132. En cuanto a sus factores de uso se obtienen unos valores de 64%, 66%, 60% y 51% respectivamente.

En cuanto al análisis económico, tras calcular el flujo de caja, el Valor Actual Neto, la Tasa Interna de Retorno y el Payback para cada modelo de aerogenerador, se observa que el modelo más rentable y que por tanto genera más beneficios es el E-138 EP3 ya que presenta un Payback de 6 años y un TIR de 17,8% frente a los valores

correspondientes de 7 años y 18,3% del E-115, 7 años y 15,8% del E-126 EP y 9 años y 11,5 % del modelo de Siemens Gamesa..

Ambos análisis concluyen en la elección del aerogenerador E-138 E3 ya que, pese a tener una producción menor que los modelos 2G 5.0-132 Y E-126 EP3, se comprueba que un mayor número de este alcanza una producción superior siendo aun así el más rentable económicamente.

Por último, una vez escogido el modelo de aerogenerador, se lleva a cabo el diseño del parque eólico. Para ello se determina que el número mínima de aerogeneradores que consiguen una potencia de 50 MW es 15. Además, estos han de estar dispuesto siguiendo el intervalo de distancias concreto que garantiza que no hay excesivas pérdidas asegurando que se aproveche a máximo el espacio. Los aerogeneradores a su vez deben de estar colocado de forma perpendicular a la dirección de viento dominante para aprovechar así la energía que se genera.

En cuanto al presupuesto del parque eólico, se estima una inversión inicial de 51.750.000 €. El Payback de este es de 8 años y su Tasa Interna de Retorno de 12,8% lo que, hace patente la rentabilidad del parque que posee una vida útil de al menos 25 años dando así por finalizado el diseño del parque.

Como conclusión, hay que destacar la necesidad de construcción y desarrollo de los parques eólicos en España para alcanzar así los objetivos de la transición energética establecidos en el país que permitirán una futura independencia en el sector eléctrico a partir de fuentes de energía renovables como es el caso de la eólica.

✓ Maria S C



10. REFERENCIAS

AEE, 2019 a . Agenda sectorial de la industria eólica.

AEE, 2019 b . Anuario eólico 2019, la voz del sector.

AEE, 2020. Mapa eólico. Junio de 2020. Disponible en web:
<https://www.aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-espana/mapa-eolico>

Aemer, 2020 . Mapa Interactivo de la Geolocalización de los Aerogeneradores en España. Mayo 2020. Disponible en web:
<https://aemer.org/documentos-de-interes/mapa-interactivo-de-la-geolocalizacion-de-los-aerogeneradores-en-espana/>

Chust-Martínez, 2018. “Estudio de viabilidad para la instalación de un parque de energía eólica en la Comunidad Valenciana. Provincia de Valencia.” De Claudio Chust Marínez. Trabajo Final de Grado, Grado en Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Valencia.

EPDE, 2017. El periódico de la energía. El precio medio de las turbinas eólicas baja del millón de dólares por megavatio. Disponible en web:
<https://elperiodicodelaenergia.com/el-precio-medio-de-las-turbinas-eolicas-baja-del-millon-de-dolares-por-megavatio/>

Enercon 2020. Modelos de aerogeneradores Enercon. Abril 2020. Disponible en web: <https://www.enercon.de/produkte/>

DOGV, 2001- Núm. 4.054. ACUERDO de 26 de julio de 2001, del Gobierno Valenciano, por el que se aprueba el Plan Eólico de la Comunidad Valenciana. [2001/7601]

DOGV,2017- Num 8096 / 01.08.2017. ACUERDO de 28 de julio de 2017, del Consell, por el que se modifica el acuerdo del Consell de 26 de julio de 2001, de aprobación del Plan eólico de la Comunitat Valenciana [2017/7107]

DOGV, 2019 - Num 8490 / 20.02.2019. ACUERDO de 15 de febrero de 2019, del Consell, de modificación del Acuerdo de 26 de julio de 2001,

de aprobación del Plan eólico de la Comunitat Valenciana, por cambios en la delimitación de la zona 10. [2019/1633]

Global-Wind-Atlas, 2020. Mayo 2020. Disponible en web: <https://globalwindatlas.info/>

GVA, 2020, . Visor de cartografía. Mayo 2020. Disponible en web: <https://visor.gva.es/visor/>

IDAE, 2011. Evolución tecnológica y prospectiva de costes en las energías renovables 2011-2020.

IGME, 2020. Mapa Geológico de Castellón. Disponible en web: <https://igme.maps.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=ed6e7a1ac4f24c39b96e33bd56c5e457>

IVSOLAR, 2018. Situación actual de la energía eólica. Disponible en web: <https://www.ivsolar.com/es/noticias/energia-eolica-presente-futuro/>

MITECO, 2020. Borrador actualizado del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030.

OMIE, 2017. Informe de precios 2017.

OMIE, 2018. Informe de precios 2018

OMIE, 2019. Evolución del mercado de electricidad. Informe Anual 2019.

Pérez Martín, 2020. "T.2 Energías renovables. Energía eólica" en Aprovechamientos hidráulicos y energéticos, asignatura optativa de 4º del Grado en Ingeniería Civil, pp. 1-42. De Miguel Ángel Pérez Martín.

Palacios Arnal, 2017. "Estudio de alternativas para un parque de energía eólica en la Comunidad Valenciana. Provincia de Castellón." De Ignacio Arnal Palacios. Trabajo Final de Grado, Grado en Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Valencia

Ramón-Llin Pla, 2016.. "Estudio de alternativas para un parque de energía eólica en la Comunidad Valenciana. Provincia de Valencia."

de Rafael Ramón-Llin Pla. Trabajo Final de Grado, Grado en Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Valencia.

RD, 2007. RD 661/2007. Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. «BOE» núm. 126, de 26 de mayo de 2007, páginas 22846 a 22886 (41 págs.).

REE, 2015. Sistema eléctrico ibérico.

REE, 2018. El sistema eléctrico español 2018.

REE, 2020. Generación. Junio 2020. Disponible en web:
<https://www.ree.es/es/datos/generacion>

Siemens-Gamesa, 2020. S.G. 5.0-132. Abril 2020. Disponible en web:
<https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/onshore/wind-turbine-sg-5-0-132>

The-Wind-Power,2020. Fabricantes y aerogeneradores. Abril 2020. Disponible en web:
https://www.thewindpower.net/turbines_manufacturers_es.php

UN, 2020. Objetivos del desarrollo sostenible. Disponible en web:
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>

Windfinder,2020. Mapa de vientos. Junio 2020. Disponible en web:
<https://es.windfinder.com/#11/40.5549/0.3291>

