



Universidad
Zaragoza

TRABAJO FIN DE GRADO

CALCULADORA DE CO₂ EN LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE PARQUES EÓLICOS ONSHORE

CO₂ calculator in the construction and operation of onshore wind farms

Autor:

David Sancho Belenguer

Director:

Lucas Sanso Navarro

Ingeniería en Tecnologías Industriales

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2023

Universidad de Zaragoza

Resumen

Este trabajo de fin de grado pretende definir un escenario básico correspondiente a la construcción y operación de un parque eólico *onshore*, sobre el que se calculará la producción de toneladas de CO₂ durante su construcción y operación. Así mismo, se realizará una comprobación para ver cuándo se alcanza el “break-even point” o momento en el que se compensan las emisiones de CO₂ respecto a las que se producirían con el uso de fuentes de energía no renovable para obtener la misma energía. Como resultado final del presente trabajo, se obtendrá una herramienta de cálculo genérica capaz de resolver, en los mismos términos, cualquier escenario de parque eólico *onshore*.

Abstract

This final minor Thesis aims to define a basic scenario corresponding to the construction and operation of an onshore wind farm. Additionally, the production of tons of CO₂ during construction and operation will be calculated, and finally a check will be done to see when the "break-even point" is reached. That is, the moment in which the CO₂ emissions will be offset with respect to those that would be produced with the use of non-renewable energy sources to obtain the same energy. As a final result of this work, a generic calculation tool capable of solving, in the same terms, any onshore wind farm scenario will be obtained.

Índice de contenidos

0. Resumen ejecutivo	8
1. Estado actual de la industria eólica onshore en España.	9
1.1 Generalidades de la energía eólica.....	9
1.2 Parques eólicos en España.....	9
2. Emisiones de CO ₂ en España	14
2.1 Historia de emisiones de CO ₂	14
2.2 Concepto de huella de carbono.....	16
2.3 Ventajas del cálculo de huella de carbono.	19
3. Definición de Infraestructura y operación de PPEE.....	20
3.1 Definición de un aerogenerador.....	20
3.2 Funcionamiento	21
3.3 Teoría de aerogeneradores	23
3.4 Modelo teórico de Betz	23
3.5 Curva de potencia	26
3.6 Construcción de un parque eólico	26
4. Desarrollo del algoritmo de cálculo de huella de carbono	36
4.1 Emisiones asociadas a la producción de los materiales empleados en la obra ...	37
4.2 Emisiones asociadas al transporte de materiales.....	39
4.3 Emisiones asociadas al empleo de maquinaria y otras instalaciones auxiliares en el emplazamiento de la obra	41
5. Estudio de caso	45
5.1 Datos de producción de materiales.....	46
5.2 Datos de transporte de materiales	53
5.3 Datos de uso de maquinaria	66
5.4 Huella de carbono.....	67
6. Comparativa con fuentes de energía no renovables	69
7. Conclusiones.....	74
8. Bibliografía.....	75

Índice de figuras

<i>Figura 1. Estructura de la generación eléctrica en 2022. Fuente: [7]</i>	10
<i>Figura 2. Instalaciones eólicas en España en el año 2021. Fuente:[2]</i>	10
<i>Figura 3. Potencia eólica instalada por CC. AA en 2022 y potencia acumulada. Fuente: [2].</i>	11
<i>Figura 4. Evolución anual y acumulada de la potencia instalada en España. Fuente: [3]</i>	13
<i>Figura 5. Evolución de emisión de gases de efecto invernadero. Fuente: elaboración propia con datos de [5,69].</i>	14
<i>Figura 6. Ventajas e inconvenientes de parques eólicos onshore y offshore. Fuente: [8]</i>	16
<i>Figura 7: La huella de carbono de una organización a lo largo de su cadena de valor. Fuente: [16].</i>	18
<i>Figura 8. Aerogeneradores en parque eólico onshore en Aragón. Fuente: [17]</i>	20
<i>Figura 9. Partes de un aerogenerador. Fuente: [12]</i>	21
<i>Figura 10. Sustentación aerodinámica. Fuente: [20].</i>	22
<i>Figura 11. Teoría de la cantidad de movimiento. Límite de Betz. Fuente: [24].</i>	24
<i>Figura 12. Presión del fluido en un aerogenerador. Fuente: [20].</i>	24
<i>Figura 13. Máxima potencia teórica extraíble de un aerogenerador. Fuente:[20].</i>	25
<i>Figura 14. Curva de potencia de un aerogenerador de 2000 kW. Fuente: [20].</i>	26
<i>Figura 15. Montaje de aerogeneradores. Fuente: [27].</i>	27
<i>Figura 16. Viales Parque Eólico Ballestas y Casetona, Vallejera, Burgos. Fuente: [40].</i>	28
<i>Figura 17. Plataforma de montaje aerogeneradores. Fuente: [33].</i>	28
<i>Figura 18. Jaula de pernos pretensados (centro) y armadura de acero de zapata. Fuente: [41].</i>	29
<i>Figura 19. Cimentación de un aerogenerador del parque eólico de San Román, Texas. Vista del entramado de armadura y los encofrados. Fuente: [31].</i>	30
<i>Figura 20. Transporte por carretera de una pala eólica de grandes dimensiones. Fuente [28].</i>	31
<i>Figura 22. Excavación de una zanja de electricidad por cable grande para un parque eólico, Países Bajos. Fuente: [39]</i>	33
<i>Figura 23. Subestación eléctrica en parque eólico, Honduras. Fuente:[38].</i>	34
<i>Figura 24. Esquema de instalación eléctrica de un parque eólico. Fuente: [35].</i>	35
<i>Figura 25. Transformador de 50 MVA. Fuente:[76]</i>	39
<i>Figura 26. Localización del PE. Fuente: Propia con datos de [45].</i>	45

<i>Figura 27. Dimensiones de la zapata empleada. Fuente: Elaboración propia.</i>	47
<i>Figura 28. Cuneta de sección triangular de sistema de drenaje. Fuente: [80].</i>	49
<i>Figura 29. Edificio prefabricado de hormigón para centro transformación. Fuente: [79]</i>	53
<i>Figura 30. Trayecto para llevar áridos y hormigón hasta el parque eólico. Fuente:[51]</i>	54
<i>Figura 31. Trayecto para llevar acero de armadura hasta el parque eólico. Fuente: [60].</i>	55
<i>Figura 32. Trayecto para llevar tierra sobrante al vertedero. Fuente: [61]</i>	57
<i>Figura 33. Trayecto para el transporte terrestre de las palas de aerogenerador por China. Fuente: [87]</i>	58
<i>Figura 34. Trayecto para el transporte terrestre de los tramos de las torres de aerogenerador por China. Fuente: [89]</i>	58
<i>Figura 35. Trayecto para el transporte terrestre de las góndolas de aerogenerador por China. Fuente: [93]</i>	59
<i>Figura 36. Barco carguero transportando palas de aerogenerador por vía marítima. Fuente: [85].</i>	60
<i>Figura 37. Trayecto para el transporte terrestre de las partes del aerogenerador. Fuente: [65].</i>	61
<i>Figura 38. Trayecto para el transporte terrestre de los bujes de aerogenerador. Fuente: [92].</i>	61
<i>Figura 39. Trayecto para el transporte del transformador. Fuente: [82].</i>	62
<i>Figura 40. Bobina empleada para el transporte de los cables. Fuente: [74].</i>	63
<i>Figura 41. Trayecto necesario para transporte de cobre y aluminio. Fuente: [66].</i>	64
<i>Figura 42. Trayecto necesario para transporte de arena tamizada. Fuente: [90].</i>	65
<i>Figura 43. Trayecto necesario para transporte de edificios prefabricados. Fuente: [79].</i>	66
<i>Figura 44. Aproximación de curva de potencia del aerogenerador de 5MW utilizado en este trabajo. Fuente: Elaboración propia</i>	70
<i>Figura 45: Gráfica comparativa de las emisiones de CO₂ y la energía producida: Fuente: Elaboración propia.</i>	72
<i>Figura 46: Gráfica comparativa de las emisiones de CO₂ y tiempo: Fuente: Elaboración propia.</i>	73

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Ranking de provincias por generación en 2021. Fuente: [3].</i>	12
<i>Tabla 2. Emisiones de gases de efecto invernadero en 2021, en miles de toneladas de CO₂ equivalente. Variación: Porcentaje sobre el año anterior. Fuente [5].</i>	14
<i>Tabla 3. Factores de emisión de los diferentes materiales utilizados en la construcción del parque eólico. Fuente: Elaboración propia con datos de [43,47,48,49,70].</i>	38
<i>Tabla 4. Emisiones asociadas al transporte de materiales. Fuente: Elaboración propia con datos de [43,44,50,83].</i>	41
<i>Tabla 5. Maquinas necesarias para la instalación de zavorra. Fuente: Elaboración propia con datos de [52,54,55,56].</i>	42
<i>Tabla 6. Maquina necesarias para movimiento de tierras. Fuente: Elaboración propia con datos de [52,54,55].</i>	42
<i>Tabla 7. Maquina necesarias para instalación de los aerogeneradores. Fuente: Elaboración propia con datos de [73].</i>	43
<i>Tabla 8. Maquina necesarias para instalación de arena final. Fuente: Elaboración propia con datos de [52,55].</i>	43
<i>Tabla 9. Maquina necesarias para instalación subestación. Fuente: Elaboración propia con datos de [73].</i>	44
<i>Tabla 10. Características del aerogenerador de 5MW. Fuente: Elaboración propia con datos de [45].</i>	46
<i>Tabla 11. Volumen de zavorra necesaria para los viales y las plataformas de montaje. Fuente: Elaboración propia con datos de [45].</i>	46
<i>Tabla 12. Volumen de hormigón necesario para las zapatas de los aerogeneradores. Fuente: Elaboración propia con datos de [45].</i>	47
<i>Tabla 13. Masa de acero empleada para las armaduras de las zapatas. Fuente: Elaboración propia con datos de [57].</i>	48
<i>Tabla 14. Masa de acero empleada para las jaulas de pernos y bridas de anclaje. Fuente: Elaboración propia con datos de [71].</i>	48
<i>Tabla 15. Volumen de hormigón blando necesario para obra de drenaje. Fuente: Elaboración propia con datos de [45].</i>	49
<i>Tabla 16. Volumen de arena tamizada necesaria en zanjas. Fuente: Elaboración propia con datos de [45].</i>	49
<i>Tabla 17. Masa de poliéster reforzado con fibra de vidrio necesaria para las palas. Fuente: Elaboración propia con datos de [63].</i>	50
<i>Tabla 18. Masa de acero forjado necesaria para las góndola, torre y buje. Fuente: Elaboración propia con datos de [75].</i>	50
<i>Tabla 19. Volumen de aluminio necesario para los cables de MT. Fuente: Elaboración propia con datos de [45].</i>	51

<i>Tabla 20. Volumen de cobre necesario para cables de puesta a tierra. Fuente: Elaboración propia con datos de [45].</i>	51
<i>Tabla 21. Masa de hormigón para edificios prefabricados. Fuente: Elaboración propia con datos de [79].</i>	52
<i>Tabla 22. Elementos necesarios para construcción de subestación. Fuente: Elaboración propia con datos de [45].</i>	53
<i>Tabla 23. Recorrido total para transporte de áridos. Fuente: Elaboración propia con datos de [51].</i>	54
<i>Tabla 24. Recorrido total para transporte de hormigón armado. Fuente: Elaboración propia con datos de [51].</i>	54
<i>Tabla 25. Recorrido total para transporte de hormigón en masa para la obra de drenaje. Fuente: Elaboración propia con datos de [51].</i>	55
<i>Tabla 26. Recorrido total para transporte acero de armadura de zapatas. Fuente: Elaboración propia con datos de [60].</i>	55
<i>Tabla 27. Recorrido total para transporte de pernos pretensados y bridas de anclaje. Fuente: Elaboración propia con datos de [60].</i>	56
<i>Tabla 28. Balance del movimiento de tierras en m³. Fuente: Elaboración propia con datos de [45].</i>	56
<i>Tabla 29. Masa de tierra sobrante. Fuente: Elaboración propia con datos de [45].</i>	56
<i>Tabla 30. Recorrido total para transporte tierra sobrante al vertedero. Fuente: Elaboración propia con datos de [61].</i>	57
<i>Tabla 31. Recorrido total para transporte de partes de aerogenerador hasta el Parque eólico. Fuente: Elaboración propia.</i>	62
<i>Tabla 32. Recorrido para transporte de transformador. Fuente: Elaboración propia con datos de [82].</i>	62
<i>Tabla 33. Recorrido total para transporte de cobre y aluminio. Fuente: Elaboración propia con datos de [66].</i>	64
<i>Tabla 34. Recorrido total para transporte de arena tamizada. Fuente: Elaboración propia con datos de [90].</i>	65
<i>Tabla 35. Maquinaria necesaria para la construcción del parque eólico. Fuente: Elaboración propia.</i>	67
<i>Tabla 36. Huella de carbono en la construcción del parque eólico. Fuente: Elaboración propia.</i>	68
<i>Tabla 37. Velocidades por meses en 2022 en el municipio de Ejulve. Fuente: Elaboración propia con datos de [67].</i>	69
<i>Tabla 38. Funciones lineales de emisiones para cada fuente de energía. Fuente: Elaboración propia.</i>	72

0. Resumen ejecutivo

Debido al uso de las fuentes de energía no renovables y su consecuente impacto medioambiental, ha habido un incremento desmedido de la contaminación en la Tierra. Por ello, se están introduciendo en los últimos lustros fuentes de energía inagotables y limpias, como la energía eólica, para reducir las emisiones y evitar los gases de efecto invernadero.

La huella de carbono es un indicador medioambiental que representa el volumen total de dichos gases de efecto invernadero (GEI) que son emitidos por una determinada actividad. Es una herramienta importante que cada día toma más relevancia, ya que permite evaluar y hacer un seguimiento sobre el impacto que tiene una organización, además de tener ventajas organizacionales, medioambientales y mejorar la imagen de ésta. Así mismo, se trata de un indicador clave, cada día más importante en el estudio de viabilidad de proyecto e inversiones, cuando se atiende a parámetros de sostenibilidad.

En este trabajo, se ha explicado el estado actual de la energía eólica en España y la importancia que está tomando en los últimos tiempos, siendo la energía renovable que mayor presencia tiene en nuestro país.

Seguidamente, se habla sobre el historial de emisiones de CO₂ y el concepto de la huella de carbono, además de saber cuáles son las grandes ventajas que presenta.

También se ha descrito el funcionamiento y operación de un parque eólico, haciendo énfasis en cómo se construye y todos los elementos que lo componen.

En base a todo lo anterior, se ha preparado una herramienta (o “calculadora”) capaz de estudiar la huella de carbono de un parque eólico y, a continuación, se ha ejemplificado el cálculo de la huella de carbono en el parque eólico Íberos, situado en los términos municipales de Ejulve y Molinos, Teruel.

Finalmente, se ha realizado una comparativa con otras fuentes de energía no renovables que tiene como resultado la rápida rentabilidad medioambiental que tiene la energía eólica.

1. Estado actual de la industria eólica onshore en España.

1.1 Generalidades de la energía eólica

El viento es un curioso fenómeno que existe en todo el mundo con una intensidad y variable, en el que hay algunos lugares que son más aptos que otros para poder realizar una instalación de un parque eólico.

Para poder aprovechar correctamente la energía eólica, deben considerarse las posibles variaciones que presenta la velocidad del viento en distintas zonas. Estos cambios se pueden presentarse en lugares que apenas distan unos kilómetros entre sí.

La generación de energía eléctrica utilizando como fuente la energía procedente del viento depende en gran medida de la velocidad con la que incide el viento que sopla perpendicular al plano de giro de las aspas del aerogenerador. No obstante, ésta es una variable que está sometida al azar que depende de bastantes factores tales como la temperatura, densidad del aire o presión. Una de las grandes características de la velocidad del viento es que puede variar rápidamente en poco tiempo.

Una característica importante del viento son las turbulencias, estas alteran la fuerza que ejerce el viento sobre la turbina, incrementando el desgaste, teniendo como consecuencia la reducción de su vida útil.

1.2 Parques eólicos en España

La energía eólica en España es una de las energías renovables más importantes. Su funcionamiento consiste en obtener electricidad gracias a la fuerza del viento. La energía cinética se transforma en energía mecánica y esta hace girar un rotor que produce la energía eléctrica. De esta manera, se consigue energía a través de una fuente limpia, como es el viento, que no contamina ni emite gases de efecto invernadero, que sustituye a la energía que es producida con combustibles fósiles y que es ideal para poder proteger el medio ambiente. Los aerogeneradores suelen agruparse en parques eólicos, para así lograr un aprovechamiento más eficaz de la energía.

La energía eólica ha registrado un récord de generación en 2022, consolidándose como la primera tecnología renovable en el sistema eléctrico.

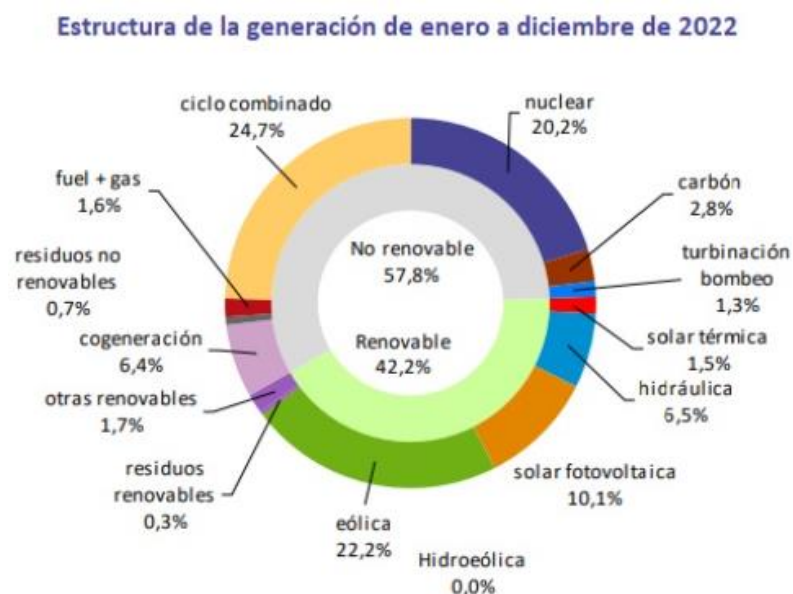


Figura 1. Estructura de la generación eléctrica en 2022. Fuente: [7]

En la Figura 1, se observa que más de la mitad de la generación eléctrica a partir de fuentes renovables procede de la energía eólica. En concreto, la eólica finaliza el año siendo la primera tecnología renovable y alcanzando un récord de generación en el año con más de 61 TWh. La potencia eólica instalada hoy en día en España es de 29.798 megavatios (MW), con un aumento de 1.659 nuevos megavatios eólicos en 2022 [1].

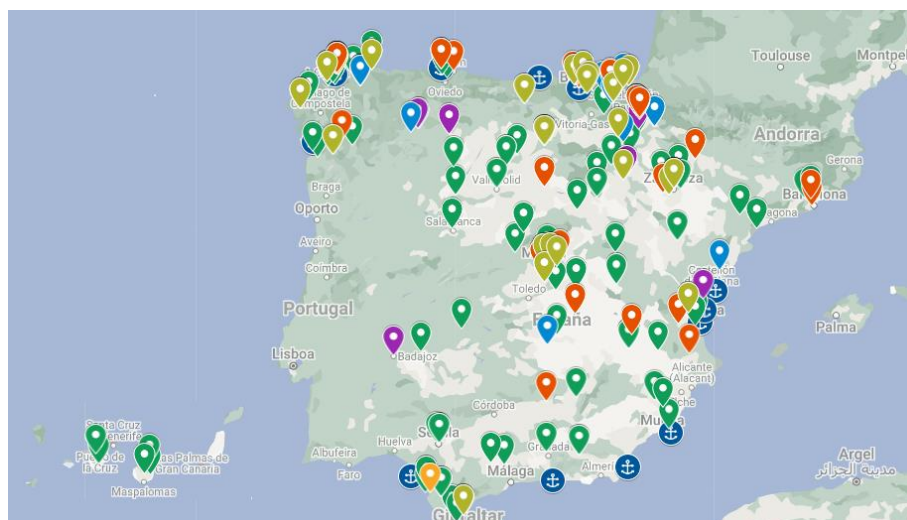


Figura 2. Instalaciones eólicas en España en el año 2021. Fuente:[2]

En cuanto a la potencia eólica instalada por Comunidades Autónomas, los datos del año 2022 muestran que Castilla y León encabeza la lista, con una potencia instalada de 6.507 MW, seguida de Aragón con 4.921 MW, Castilla la Mancha con 3.949 MW, Galicia con 3.863 MW y Andalucía con 3.544 MW. A partir de la figura de a continuación, se observa que estas cinco Comunidades Autónomas representan el 80% de toda la potencia eólica actualmente instalada en España.

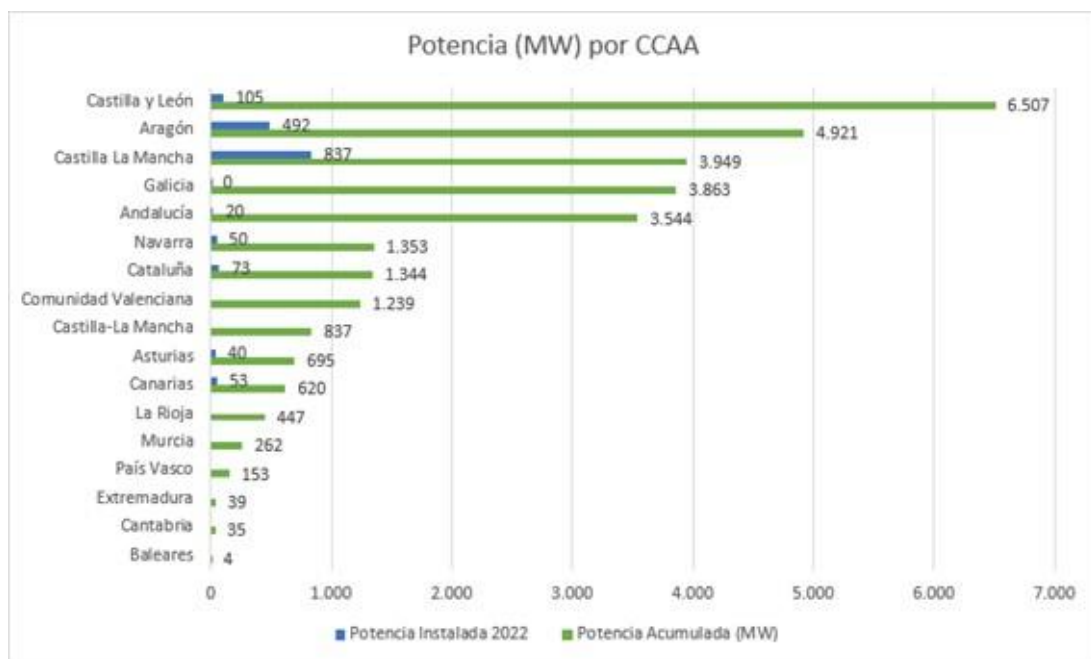


Figura 3. Potencia eólica instalada por CC. AA en 2022 y potencia acumulada. Fuente: [2]

Sobre el ranking de provincias por generación en 2021, Zaragoza es la provincia que inicia la lista, con casi el doble de generación que la segunda provincia, Lugo.

En el país se han incorporado 46 nuevos parques eólicos en 2022. A fecha de recuento, existen 1.345 parques eólicos, se reparten por todos los territorios de España, con 22.042 aerogeneradores, excepto Ceuta, Melilla y Madrid, que no disponen de instalaciones de este tipo.[2]

Ranking de provincias por generación en 2021

Fuente: REE y elaboración AEE

POSICIÓN EN 2021	PROVINCIA	GENERACIÓN 2021	GENERACIÓN 2020	POSICIÓN EN 2020
1º	Zaragoza	8.160	5.494	1º
2º	Lugo	4.674	4.849	2º
3º	Burgos	4.511	4.431	3º
4º	Albacete	4.199	3.799	4º
5º	La Coruña	3.332	3.453	5º
6º	Navarra	3.202	2.869	8º
7º	Cádiz	2.963	2.407	6º
8º	Soria	2.401	2.377	7º
9º	Palencia	1.806	1.685	10º
10º	Cuenca	1.768	1.609	9º

Tabla 1. Ranking de provincias por generación en 2021. Fuente: [3].

Con estos datos, se considera a España líder en generación eólica. La eólica española es la quinta potencia a nivel mundial en el ranking de países con mayor potencia eólica instalada y la segunda a nivel europeo. Además, esta tecnología aporta más de 3.100 millones de euros a la economía española, un 0,49% del Producto Interior Bruto (PIB), con unas exportaciones valoradas en más de 1.740 millones de euros, siendo España el tercer exportador del mundo de aerogeneradores, tras Dinamarca y Alemania [3].

Es evidente que, gracias al gran número de aerogeneradores instalados, se ha producido un crecimiento importante en este sector, sobre todo, en los últimos 4 años. Gracias a esto, el sector eólico en España aporta empleo a 32.000 personas en la actualidad y se estima crear cinco veces más empleados que las tecnologías convencionales. Se estima además que, en 2030, esta industria dará trabajo al doble. Así mismo, como impulso económico para el país, España es el tercer país en Europa en patentes eólicas, ya que el sector invierte alrededor de 108 millones de euros al año en I+D [2].

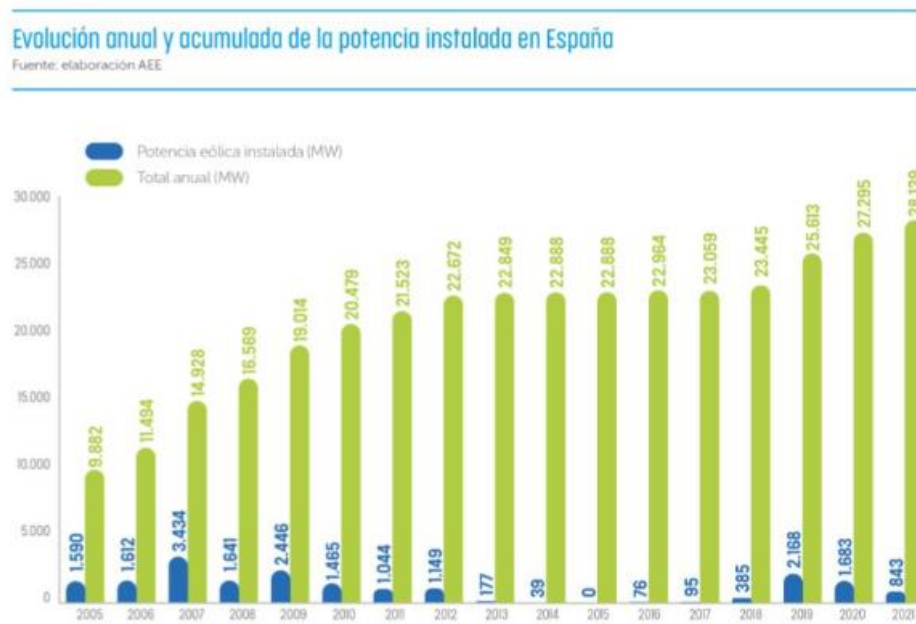


Figura 4. Evolución anual y acumulada de la potencia instalada en España. Fuente: [3]

2. Emisiones de CO₂ en España

2.1 Historia de emisiones de CO₂

En España, la economía emitió 294,9 millones de toneladas de gases de efecto invernadero en 2021, un 5,7% más que en 2020. El 23,0% de las emisiones correspondieron a los hogares [5]. No obstante, estas emisiones han disminuido de manera notable un 29,6% desde 2008.

	Valor	Variación
Total	294.944,4	5,7
Dióxido de carbono	233.699,7	7,1
Metano	38.131,9	1,0
Óxido nítrico	17.694,3	0,0
Otros GEI	5.418,5	-0,2

Tabla 2. Emisiones de gases de efecto invernadero en 2021, en miles de toneladas de CO₂ equivalente. Variación: Porcentaje sobre el año anterior. Fuente [5]

Como se puede observar en la tabla anterior, el dióxido de carbono representa prácticamente el 80% del total de las emisiones, por lo que es un elemento para tener en cuenta de manera importante.

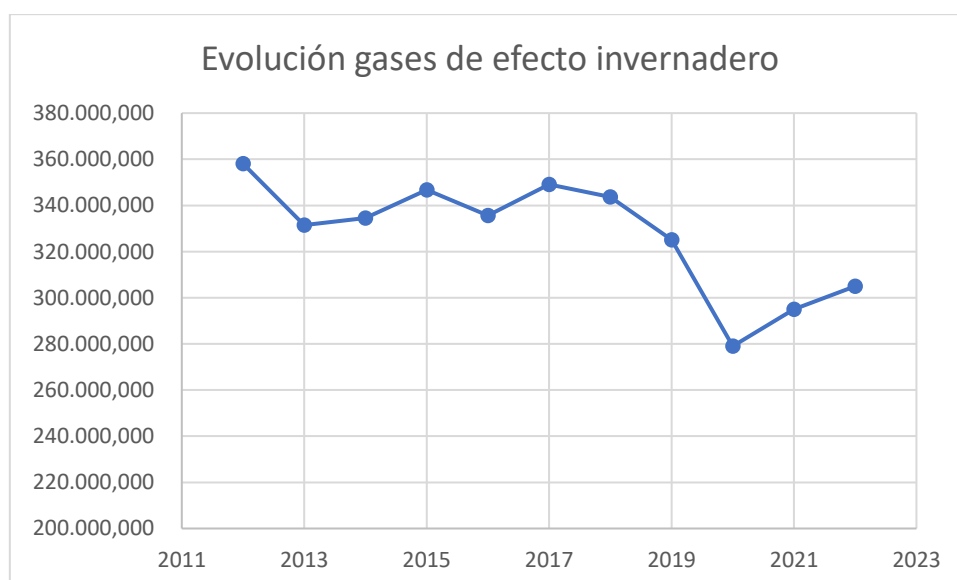


Figura 5. Evolución de emisión de gases de efecto invernadero. Fuente: elaboración propia con datos de [5,69].

La evolución de la emisión de CO₂ ha ido en aumento históricamente en España hasta 2011, momento en el que se España se sumergió en la crisis económica, a partir de entonces, la tendencia es ligeramente negativa, sobre todo existe un gran descenso en 2020, puesto que también comenzó la pandemia que forzó a muchas plantas a no producir. En el año 2022 España ha producido 305 millones de toneladas de CO₂ equivalente, aumentando un 5,7% respecto a 2021. [69]

Para mantener una tendencia positiva en la reducción de emisiones de CO₂, toma mucha importancia las energías renovables, y, por tanto, la energía eólica.

Muchos estudios especializados han demostrado que la energía eólica reduce las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Además, esta energía es la más limpia de todas las renovables, puesto que la emisión de CO₂ es de 5 a 10 veces menor que otras fuentes de energía renovables, como por ejemplo la biomasa.[4].

A la hora de comparar la energía eólica con fuentes de energías convencionales (no renovables), la reducción de emisión de CO₂ se acentúa. En comparación con la energía térmica, supone una reducción del 80% de emisiones de CO₂ por cada MWh térmico. Si lo comparamos con una central de carbón convencional, el parque eólico emite entre 100 y 200 veces menos de CO₂. Comparándolo con una central de gas natural, una instalación eólica emite entre 50 y 100 veces menos [7].

Por tanto, podemos llegar a la conclusión de que la huella ecológica de CO₂ por KWh producido en parques eólicos es muy pequeña.

No obstante, es importante tener en cuenta que los parques eólicos sí que afectan al clima, puesto que la huella es pequeña pero no cero (más adelante se explicará por qué). Así mismo, en el caso de los parques eólicos, los que son marinos, "offshore", generan más CO₂ que los parques eólicos en tierra, "onshore".

Según datos de *Siemens* [4], al fijarse en estudios realizados con diferentes tipos de aerogeneradores, la huella de carbono de los distintos tipos de parques eólicos sobre el clima es la siguiente:

- Parque eólico marino: entre 7 y 10 gCO₂eq/kWh
- Parque eólico terrestre: entre 4 y 5 gCO₂eq/kWh



Figura 6. Ventajas e inconvenientes de parques eólicos onshore y offshore. Fuente: [8]

En este trabajo, nos centraremos en parques eólicos en tierra u onshore.

Las diferentes etapas de la vida (desde la construcción hasta el desmantelamiento) en de las instalaciones eólicas siempre significan una inevitable emisión de gases a la atmósfera, en mayor o menor medida. Entre otras actividades, para producir energía eólica se necesita realizar varias acciones que supondrá, en principio, una serie de emisiones contaminantes al medio:

- Primero de todo, extraer y procesar las materias primas que se necesitan durante dicha fabricación de los aerogeneradores o los materiales auxiliares.
- Fabricar las partes del molino. En esta etapa siempre se emplea maquinaria y materiales que pueden ser pesados como el cemento o el acero.
- La propia construcción del parque eólico y su montaje.
- El desmantelamiento y la gestión de los residuos que se generan al final de la vida útil de los molinos [4].

2.2 Concepto de huella de carbono

Conviene explicar de manera detallada qué es la huella de carbono mencionada anteriormente. Se entiende como huella de carbono *“la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto por un individuo, organización, evento o producto”* [10].

Se puede decir que es un indicador ambiental que muestra la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) expresada como CO₂ equivalente [15], que se emite directa o indirectamente como consecuencia de una determinada actividad.

Además del dióxido de carbono (CO₂), hay que tener en cuenta otros gases que también provocan ese efecto invernadero, tales como metano (CH₄), óxido de nitrógeno (N₂O), hidrofluorocarburos (HFCs), perfluorocarburos (PFCs) y hexafloruro de azufre (SF₆) [16]. Por lo tanto, conviene tener en cuenta la contribución de cada gas.

Para ello, existe un parámetro denominado Potencial de calentamiento Global o GWP, que lo que hace es comparar el poder de calentamiento de una masa de ese gas de efecto invernadero con el poder de calentamiento de la misma masa de CO₂, y de esta manera se puede expresar el efecto conjunto de los gases en la misma base de medida, llamada CO₂ equivalente [15].

La huella de carbono se puede dividir en varios tipos:

- Huella de carbono personal: Esta es la que origina una persona en su vida cotidiana al desplazarse, alimentarse, consumir y utilizar recursos como la energía.
- Huella de carbono de las empresas: Las entidades realizan también actividades que producen gases de efecto invernadero, como puede ser el transporte, la fabricación o el propio consumo energético [16]. Las compañías suelen tener la opción de reducir la huella de carbono invirtiendo en proyecto medioambientales, mejorando la eficiencia energética o consumiendo energía que procede de fuentes renovables, como la energía eólica.
- Huella de carbono de un producto: Los servicios emiten también unos gases de efecto invernadero antes, durante y después de su vida útil. Por tanto, la contaminación se da en la obtención de materias primas, en el procesado, en la producción y la distribución y en la etapa de uso y su transformación en un residuo que se reciclará o bien se desechará en un vertedero [16].

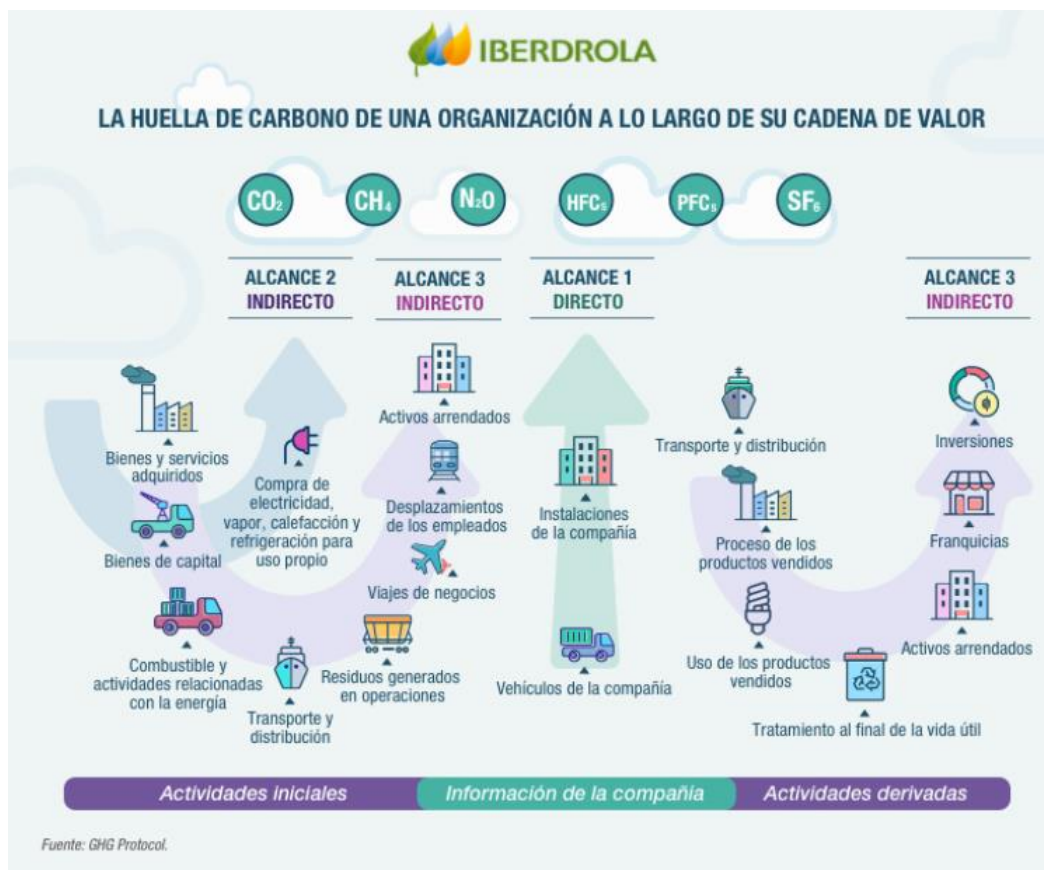


Figura 7: La huella de carbono de una organización a lo largo de su cadena de valor.
Fuente: [16].

La huella de carbono de una actividad de construcción se puede calcular como la suma de [37]:

- Emisiones *cradle-to-gate*: asociadas a la producción de los materiales empleados en la obra.
- Emisiones *well-to-wheel*: derivadas del transporte de estos materiales desde su lugar de producción hasta el emplazamiento de la obra y demás movimientos de estos. Y del transporte a vertedero si existiese.
- Emisiones *well-to-wheel* producidas por el empleo de maquinaria y/o instalaciones en el emplazamiento de la obra durante su ejecución.

2.3 Ventajas del cálculo de huella de carbono.

La base metodológica de cálculo de la huella de carbono se explicará de manera detallada en el apartado 4 de esta memoria.

La huella de carbono una vez calculada se convierte en una gran herramienta para dos finalidades: La primera de ellas es reducir los costes que implica el consumo de energía para la climatización, iluminación, calefacción y transporte. La otra es la contribución a la reducción de los gases de efecto invernadero y una mayor concienciación medioambiental [10].

Por tanto, la organización que calcula la huella de carbono, además de contribuir a la lucha contra el cambio climático tiene otras ventajas:

- La identificación de oportunidades de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. La gran parte de ellas procederán de la reducción de consumos energéticos y como resultado, se conseguirán importantes ahorros económicos.
- Formar parte de esquemas voluntarios nacionales, regionales o privados.
- Mejorar la reputación corporativa y el posicionamiento de la empresa.
- Obtener un reconocimiento externo por el hecho de realizar acciones voluntarias tempranas de reducción de emisiones y, por tanto,
- Identificar nuevas oportunidades de negocio, como atraer inversionistas y clientes que estén sensibilizados con el medio ambiente y el cambio climático.

3. Definición de Infraestructura y operación de PPEE.

3.1 Definición de un aerogenerador.

Como se ha indicado anteriormente, un aerogenerador es un dispositivo que transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica.



Figura 8. Aerogeneradores en parque eólico onshore en Aragón. Fuente: [17]

Hoy en día los aerogeneradores se pueden dividir en dos grandes familias según su construcción:

- Aerogeneradores de eje horizontal.
- Aerogeneradores de eje vertical.

El más usado es el de eje horizontal, que este compuesto por una góndola, una torre y un rotor, en cuyo extremo se pueden colocar 1, 2, 3 o múltiples palas. La potencia de salida es mayor que en los aerogeneradores de eje vertical, ya que tienen un mayor coeficiente de potencia.

La mayoría de las palas se fabrican con poliéster reforzado con fibra de vidrio o epoxi. También se utiliza fibra de carbono o aramida como posible material de refuerzo [12].

La torre tiene una altura que habitualmente oscila entre 30 y 120 m y, en su final, tiene la góndola que es el chasis principal del aerogenerador. En su interior se encuentran

los elementos mecánicos (multiplicadora o multiplicador) y eléctricos (generador) que son necesarios para poder convertir el giro del rotor en electricidad. Este rotor tiene un diámetro muy variado en función de la potencia de la máquina, pudiendo llegar fácilmente hoy en día hasta los 150 m de diámetro [14].

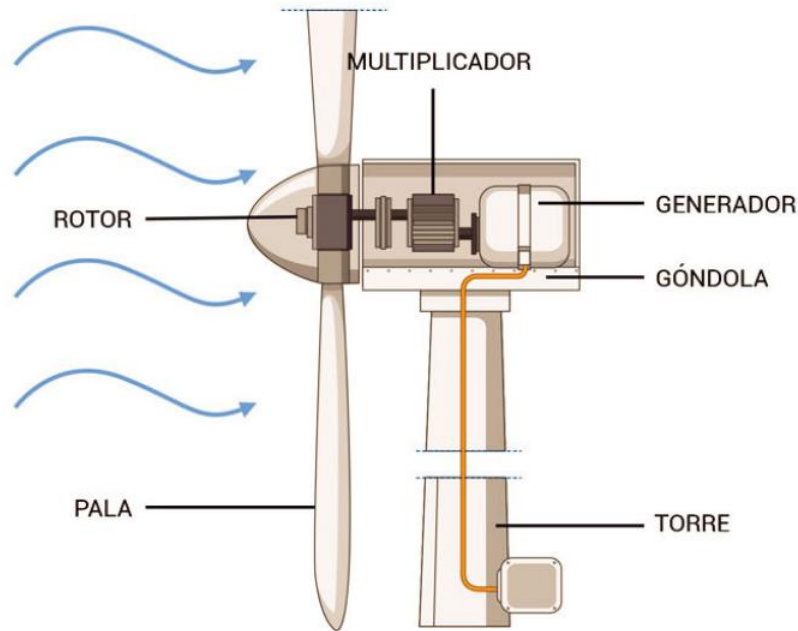


Figura 9. Partes de un aerogenerador. Fuente: [12]

Otra de las partes importantes del aerogenerador es el sistema de giro y angulación que presenta. Estos sistemas de control aprovechan el máximo de la fuerza del viento mediante orientación y protegen el aerogenerador antes posibles velocidades que poner en riesgo la instalación.

Así mismo, los aerogeneradores disponen de un sistema de refrigeración cuya función es evacuar el calor que ha producido el generador y todos los demás sistemas eléctricos [12].

3.2 Funcionamiento

En el desempeño del aerogenerador, su potencia de salida estará determinada por las fuerzas aerodinámicas que son producidas por el propio viento. Estas fuerzas pueden ser de resistencia o sustentación, dependiendo de qué fuerza sea utilizada como fuerza motriz [20]. El viento circula por ambos lados de la pala, la cual contiene perfiles

aerodinámicos y geométricos diferentes. Esto hace que el aire que circula por la parte que está más curvada (que tiene más superficie) tenga más velocidad que el aire en la parte inferior. La diferencia de presión producida generará una fuerza que se denomina “fuerza de sustentación aerodinámica”, la cual actuará sobre la superficie de la pala. Esto mismo sucede, por ejemplo, en las alas de un avión.

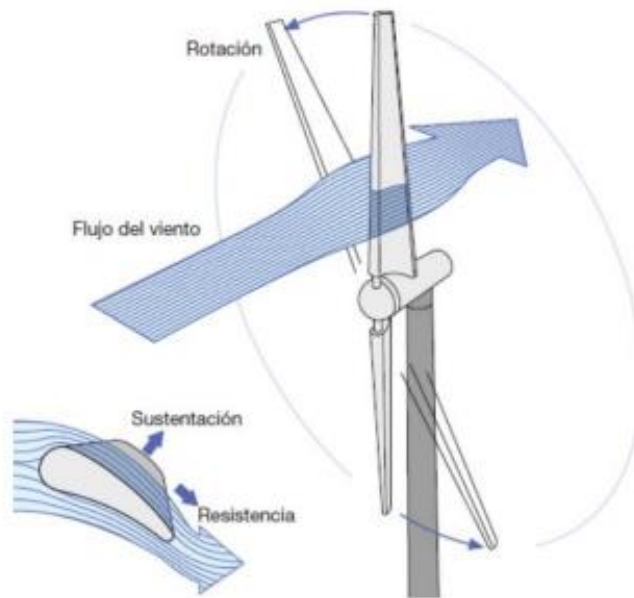


Figura 10. Sustentación aerodinámica. Fuente: [20].

El viento crea una fuerza giratoria al transcurrir por las aspas que rotan el eje (denominado buje) del que parten, ubicado en la góndola. Dicho buje está unido al eje lento, que tiene nombre por girar efectivamente a la misma velocidad que las palas. Para poder producir electricidad, tiene que existir un aumento de velocidad respecto a la del eje lento. Debido a esto, la multiplicadora eleva hasta en 100 veces la velocidad del eje lento y la transfiere al eje rápido. Este eje puede llegar a girar a 2.000 revoluciones por minuto (rpm) [34].

El generador se vale de campos magnéticos y transforma la energía mecánica en eléctrica mediante inducción electromagnética.

Los aerogeneradores comienzan a captar la fuerza del viento a partir de que éste sople a más de 3-4 m/s y, normalmente, consiguen producir la potencia máxima a 15 m/s de velocidad [18]. En el caso de que existan inclemencias meteorológicas, el aerogenerador se frena por motivos de seguridad. En concreto, si hay una velocidad

media de más de 25 m/s, están automatizados para desconectarse. Las palas giran entre 12 y 20 rpm [18].

3.3 Teoría de aerogeneradores

Como ya sabemos, la potencia eléctrica del generador va a depender de cómo interactúan las palas y el viento que incide sobre ellas, convirtiendo la energía cinética en mecánica y seguidamente en energía eléctrica. La energía cinética E_c de una masa de aire m que se mueve a una velocidad v constante es:

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (3.1)$$

Por tanto, la potencia específica disponible P_{disp} para una masa de aire que tiene un caudal $q = \frac{dm}{dt}$ es:

$$P_{disp} = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} * q * v^2 \quad (3.2)$$

Además, sabiendo que el caudal másico se puede expresar como

$$q = \frac{dm}{dt} = \rho * A * v \quad (3.3),$$

se llega finalmente a la formula:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (3.4)$$

En esta última fórmula se intuye que la potencia varía con el cubo de la velocidad del viento y se observa que ρ es la densidad estándar del aire al nivel del mar $\rho=1.225$ kg/m³ y $A = \pi r^2$ es el área de barrido de las palas de aerogenerador. Se concluye por tanto que, al aumentar dicha área de barrido del aerogenerador, se aumentará capacidad de potencia disponible.

3.4 Modelo teórico de Betz

Un modelo desarrollado por el físico alemán Albert Betz en 1919 permite determinar cuánta potencia puede extraer un aerogenerador, denominado Límite de Betz, según el cual un aerogenerador ideal sólo puede convertir un máximo de 59% de la energía cinética en energía mecánica [23].

Dado que la densidad y caudal de aire son considerados constantes, de la ecuación (3.4), se puede apreciar que una reducción de velocidad necesariamente desemboca en un aumento de la sección del tubo de flujo.

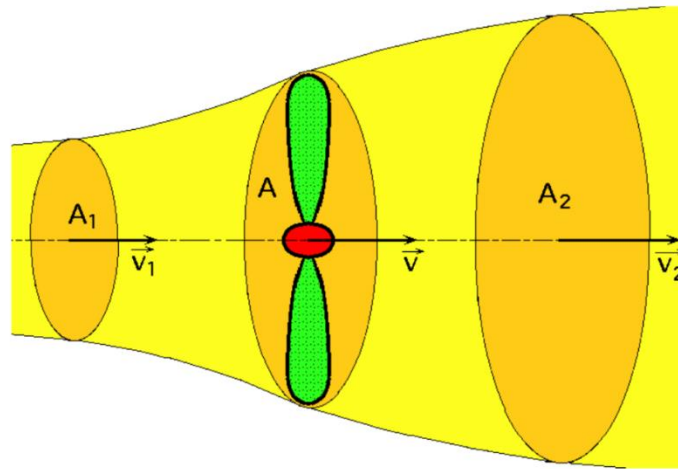


Figura 11. Teoría de la cantidad de movimiento. Límite de Betz. Fuente: [24].

Si hay una presión atmosférica a la entrada del tubo de flujo, el decremento gradual de la velocidad del viento supondrá un incremento de la presión (como se ha explicado anteriormente), disminuyendo bruscamente en el área de barrido, y finalmente habrá un aumento de presión hasta alcanzar la presión atmosférica [23].

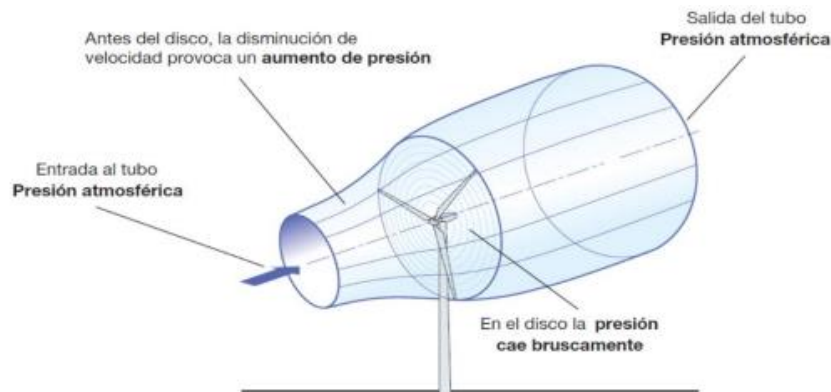


Figura 12. Presión del fluido en un aerogenerador. Fuente: [20].

En la siguiente figura se puede observar que el coeficiente de potencia C_p crece primero con el factor de inducción inicial “a”, hasta alcanzar el máximo en $a = \frac{1}{3}$ y disminuyendo hasta $a = \frac{1}{2}$, momento en el que la velocidad de salida se iguala a cero. Un valor mayor a este último carecería de sentido físico puesto que significaría una velocidad “negativa” en la sección de salida [23]. Este factor de inducción axial se puede definir como “una medida de qué tanto disminuyó su velocidad el viento al salir de la turbina y, por ende, cuantifica cuánta energía entregó el aire al aerogenerador” [25].

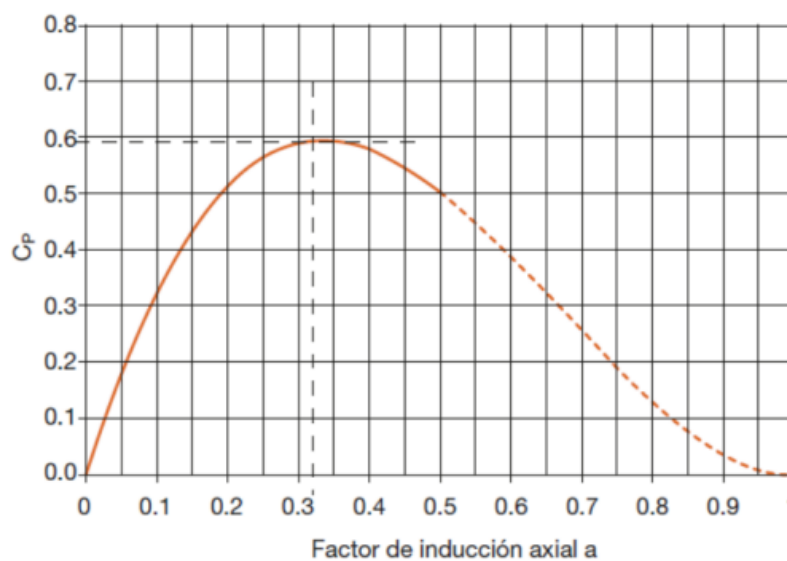


Figura 13. Máxima potencia teórica extraíble de un aerogenerador. Fuente:[20].

Hoy en día, con los aerogeneradores que existen, se pueden obtener valores del coeficiente de potencia $C_p = 0.5$, por lo que no se encuentra tan alejado del valor teórico de Betz. Por tanto, para calcular la potencia que extrae un generador en función del coeficiente de potencia C_p y la potencia disponible del viento se hace de la siguiente manera:

$$P_{disp} = C_p * \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (3.6)$$

Para obtener la potencia eléctrica, habrá que considerar unos rendimientos eléctricos y mecánicos que serán inferiores al 100%.

Es relevante señalar que en la práctica existen efectos que disminuyen el coeficiente máximo alcanzable, como puede ser la rotación de la estela detrás del rotor, la resistencia aerodinámica no nula y el número finito de palas [23].

3.5 Curva de potencia

La curva de potencia del aerogenerador representa la potencia eléctrica que es teóricamente producida a distintas velocidades del viento. Dichas curvas de potencia están basadas en mediciones de zonas de experimentación de campo con una baja intensidad en turbulencias, donde un anemómetro está situado en un mástil que está cerca del aerogenerador, a su misma altura, o en mediciones de laboratorio [20].

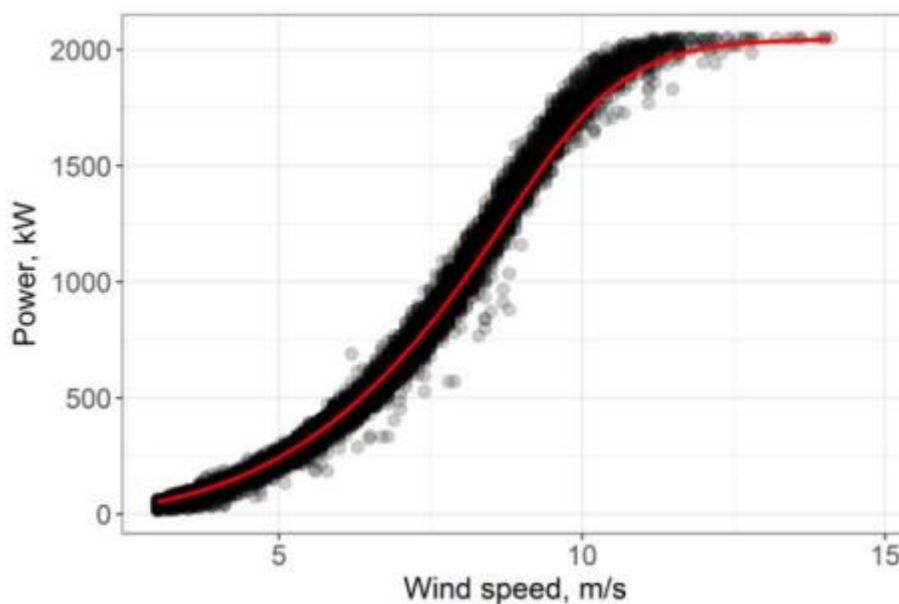


Figura 14. Curva de potencia de un aerogenerador de 2000 kW. Fuente: [20].

3.6 Construcción de un parque eólico

A) Obra civil:

Al empezar construyendo un parque eólico, se debe realizar primeramente el movimiento de tierras, que es el conjunto de actuaciones que se realizan sobre un

terreno para la ejecución de una obra. Se pueden hacer diferentes acciones dependiendo del tipo de terreno en el que se trabaje, pero normalmente las más utilizadas son las siguientes:

- **Desmante:** Este trabajo consiste básicamente en quitar tierras y otros elementos como maleza para poder reducir la cota. Se necesita maquinaria pesada como una retroexcavadora, que pueda excavar y extraer la tierra.
- **Terraplén:** El trabajo en este caso es el contrario al desmante, se trata de poner tierra para poder nivelar el suelo. En este tipo de acción también se necesita una retroexcavadora.

Antes de realizar el montaje de los aerogeneradores es necesario ejecutar los viales de acceso y los interiores. En el diseño de estos viales es muy importante tener en cuenta las necesidades de los transportes especiales, puesto que son los encargados de transportar y realizar el acopio de los elementos del aerogenerador, ya explicados anteriormente.



Figura 15. Montaje de aerogeneradores. Fuente: [27].

El camino para poder acceder se suele construir con material seleccionado, con una capa de 40 cm de zahorra artificial o natural y un acabado con zahorra artificial, que se suele colocar una vez han pasado los transportes especiales. Normalmente, el vehículo que condiciona el peso que deben soportar los caminos suele ser la grúa de cadenas o los transportes especiales que transportan a esta o a los componentes de aerogenerador. El ancho de la vía de acceso lo fija el paso de los camiones que son necesarios y debe ser entre 5 m y 6 m útiles en tramos rectos, y en viales interiores

puede ser de hasta 10-12 m de ancho para que las grandes grúas puedan circular entre los aerogeneradores, si así se ha decidido durante la fase de planificación. En caso contrario, viales de 5-6 m de ancho con zonas de cruce pueden ser suficientes [27].



Figura 16. Viales Parque Eólico Ballestas y Casetona, Vallejera, Burgos. Fuente: [40].

De igual manera que para el transporte de equipos dentro de la parcela, el proceso de montaje de los aerogeneradores requiere de una infraestructura o área que facilite el almacenamiento, posicionamiento para izado y operación de los diferentes componentes. Esto es lo que se denomina plataformas de montaje. Sobre estas plataformas se ubican las grúas encargadas de izar las torres y elevar hasta su posición definitiva la góndola y palas. Por lo tanto, las dimensiones de las plataformas tendrán las dimensiones que solicite el suministrador de la turbina para un correcto acopio, montaje y, por último, operación. Cabe destacar que estas plataformas de montaje también requieren la disposición de capas granulares para soportar las cargas de las grúas de montaje y de los componentes.



Figura 17. Plataforma de montaje aerogeneradores. Fuente: [33].

Sin duda, de todas las fases que existen en el montaje de un aerogenerador y que forma parte de la obra civil, la construcción de las cimentaciones es la más crítica. Estas pueden tener formas variadas, como cuadradas, circulares, octogonales, etc., pueden ser superficiales ancladas o pilotadas y, sus principales fases constructivas son las siguientes:

- I. En primer lugar, se realiza la excavación del terreno donde se ubicará la cimentación.
- II. A continuación, se vierte una capa de hormigón de limpieza (≈ 10 cm de espesor) sobre el fondo de la excavación para protegerlo de agentes externos y trabajar posteriormente sobre una superficie regularizada. Si fuese necesario, debido a una resistencia insuficiente del terreno, en una fase previa, tendría lugar la ejecución de pilotes o sustitución de terreno.
- III. En tercer lugar, se realiza el montaje de la jaula de pernos, es decir, la estructura de acero embebida en el hormigón de la cimentación que asegura la conexión o anclaje de la torre en su base.



Figura 18. Jaula de pernos pretensados (centro) y armadura de acero de zapata.

Fuente: [41].

- IV. Seguidamente, se monta el entramado de barras corrugadas de acero que quedará embebido en el hormigón y se montarán los encofrados que sean necesarios antes de verter el hormigón.
- V. En quinto lugar, se lleva a cabo el vertido de hormigón, con lo que la cimentación toma su forma y, una vez fraguada, pasará a ser una estructura firme. A continuación del vertido del hormigón, se asegurará un curado adecuado del hormigón para que adquiera la resistencia prescrita en proyecto. Esto se llevará a cabo manteniendo durante un periodo suficiente unas condiciones de humedad óptimas.
- VI. Por último, se rellena nuevamente la excavación (con la cimentación ya construida en su interior), dejando a la vista únicamente el pedestal de hormigón con los pernos, para poder acoplar el primer tramo de torre durante el proceso montaje de componentes. Durante esta fase, normalmente, se vierte una capa de mortero de altas prestaciones entre la brida de anclaje en la cimentación y la brida inferior del primer tramo de torre.

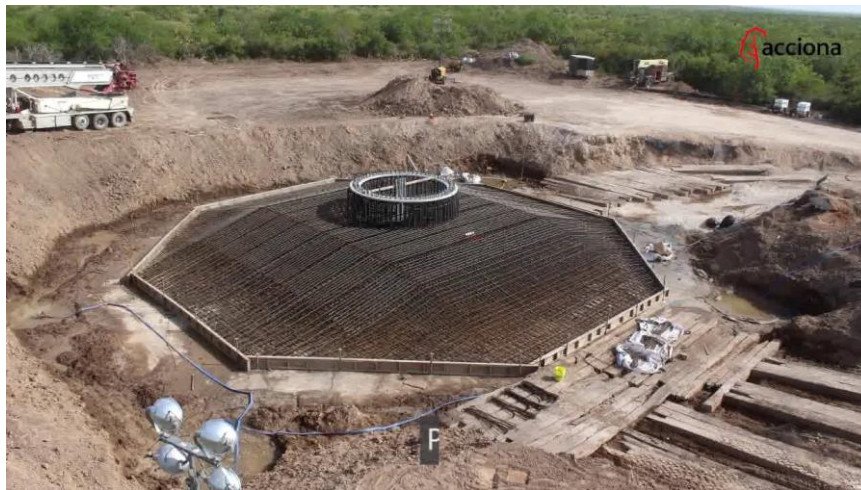


Figura 19. Cimentación de un aerogenerador del parque eólico de San Román, Texas. Vista del entramado de armadura y los encofrados. Fuente: [31].

B) Aerogeneradores:

Para poder iniciar dicho acopio del material que compone el aerogenerador, lo primero que hay que hacer es realizar una petición del permiso para transporte especial. En el caso del transporte de palas, hay que solicitar también un permiso

especial puesto que su longitud supera los 16 m de longitud establecidos por el Reglamento General de Vehículos ([27]). Estos vehículos irán escoltados durante todo el trayecto y habrá que garantizar en todo momento la seguridad vial y evitar daños en infraestructuras que se pudieran ocasionar por una mala planificación en la ruta. Se deberá estudiar la necesidad de retirar barreras o señales y ensanchar arcenes.



Figura 20. Transporte por carretera de una pala eólica de grandes dimensiones. Fuente [28].

Las palas de grandes dimensiones que son transportadas en camiones tienen que ser elevadas para facilitar el transporte y, a su vez, evitar los cables de alta tensión u otros gálibos que pudiera haber.

Una vez se han acopiado los componentes de aerogenerador comienza su montaje. El sistema de montaje del aerogenerador puede variar dependiendo del emplazamiento en el que se vaya a realizar y también en función del fabricante. Normalmente se emplean dos tipos de grúas, la primera es de 200 toneladas, con la que se montan los dos primeros tramos. La otra grúa podrá ser de hasta, al menos, 500 toneladas, ya que se utilizará para el montaje del rotor (el rotor lo conforman las tres palas y el buje), los últimos tramos de torre y de la góndola, es decir, la parte alta del aerogenerador y de mayor peso específico.

La góndola suele izarse de forma completa, aunque para aerogeneradores que son muy grandes, puede llegar a hacerse de forma modular. Esto último sucede cuando dichos molinos son superiores a 4MW [27].

El rotor se puede izar una vez ya está montado desde el suelo, siendo necesarias dos grúas. También se puede levantar con el buje unido a la góndola y después unir las palas una a una.



Figura 21. Montaje de un aerogenerador de 149 m de altura de buje, Selva Negra (Alemania).

Fuente:[29]

Una vez que se ha montado el aerogenerador, se procede a conectar los sistemas hidráulicos y eléctricos que permiten su puesta en funcionamiento.

C) Obra eléctrica:

El sistema eléctrico de un parque eólico tiene como objetivo la transferencia de la energía producida por cada aerogenerador hacia la red más cercana con capacidad para absorber la nueva capacidad instalada. Dependiendo de las características de la red, se condicionará el diseño de la instalación eléctrica. No obstante, se puede generalizar diciendo que un parque eólico comercial hoy en día este compuesto por diferentes elementos:

- Instalación eléctrica de Baja Tensión (BT): Puede ser interna a cada aerogenerador o externa. En caso de ser interna a la torre, los circuitos circulan por ella hasta llegar al transformador situado en la base de la torre. En caso de que sea externa a la torre, existe un edificio prefabricado situado en la misma

zapata de anclaje del aerogenerador o inmediatamente a su lado. Además, la tipología de construcción será en aceite, por tanto, será necesario un foso de recogida. En este caso puede ser que el edificio reciba la energía de un grupo de aerogeneradores, hasta cinco.

- Red subterránea de Media Tensión: Normalmente conecta los aerogeneradores entre sí y a la subestación colectora del parque eólico. Es recomendable que el cableado sea de forma paralela a los caminos de acceso a los molinos. La profundidad de dichos cables suele ser en torno a 1 m, y la anchura media de las zapatas suele ser 0,60 m.



Figura 22. Excavación de una zanja de electricidad por cable grande para un parque eólico, Países Bajos. Fuente: [39]

- Toma de tierra: Cada aerogenerador debe tener una toma de tierra propia por seguridad. Hay dos objetivos principales de una puesta a tierra en una instalación eléctrica, y son las siguientes:
 - Asegura la seguridad e integridad de las personas que se encuentren en las inmediaciones de dicha instalación.
 - La red de tierra creará un camino de descarga a tierra de las corrientes cuando ocurra una falla en el sistema.
- Subestación colectora: Es la encargada de transformar la media tensión de las diferentes líneas de transmisión del parque a Alta Tensión (AT), de este modo

permite ajustar las medidas de energía eléctrica para incorporarlas a la red eléctrica y distribuirla.



Figura 23. Subestación eléctrica en parque eólico, Honduras. Fuente:[38]

- Salida de Alta Tensión: Es la forma más eficiente de evacuar la energía del parque eólico, ya que se disminuyen las pérdidas por caídas de tensión debidas a resistencia o reactancia. Esta red se conecta a la de transporte y, dependiendo de la distancia de la subestación de distribución, hasta el punto de entronque con la red general. La línea de salida puede ser soterrada, por lo que tendrá una estructura similar a la red interna del parque eólico. También puede ser aérea, en este caso implica la presencia de crucetas y apoyos para el anclaje de la línea [32]. Ver esquema de a continuación.



Figura 24. Esquema de instalación eléctrica de un parque eólico. Fuente: [35].

4. Desarrollo del algoritmo de cálculo de huella de carbono

En el presente capítulo se va a describir la creación de un algoritmo genérico que permita resolver el cálculo de huella de carbono de un parque eólico *onshore* lo más aproximadamente posible. La sostenibilidad de cualquier actuación es un factor a tener cada vez más en cuenta. Dentro de la sostenibilidad, se evalúa la rentabilidad económica, el funcionamiento y la huella medioambiental de las inversiones y, en concreto, en este trabajo se va a generar una herramienta que permite valorar la huella medioambiental a través de la emisión de gases de efecto invernadero.

Como ya se ha comentado en este trabajo en el punto 2, la huella de carbono es un indicador ambiental que muestra la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) expresada como CO₂ equivalente [15], que se emite directa o indirectamente como consecuencia de una determinada actividad. Se mide en toneladas o kilogramos de dióxido de carbono equivalente de gases de efecto invernadero (CO₂eq). Usualmente, y según el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del Gobierno Español, se consigue multiplicando el dato de consumo por su correspondiente factor de emisión, dependiendo del tipo de combustible utilizado [42].

Para calcular las emisiones de kg CO₂eq se necesita el volumen de cada actividad y los factores de emisión. Como se ha mencionado anteriormente, se clasifican en varios tipos:

- Emisiones *cradle-to-gate*: asociadas a la producción de los materiales empleados en la obra.
- Emisiones *well-to-wheel*: derivadas del transporte de estos materiales desde su lugar de producción hasta el emplazamiento de la obra, además del posible transporte a vertedero en caso necesario.
- Emisiones *well-to-wheel*: producidas por el empleo de maquinaria y/o instalaciones en el emplazamiento de la obra durante su ejecución.

De aquí en adelante se van a presentar unas tablas en las que aparezcan valores de emisiones de CO₂eq por unidad de todo lo que se considere asociado a la construcción de un parque eólico (sintetizado en el apartado 3.6).

4.1 Emisiones asociadas a la producción de los materiales empleados en la obra

La Guía metodológica para el cálculo de huella de carbono en puertos del CEDEX ([43]) dice lo siguiente, en relación con las emisiones asociadas a la producción de los materiales:

Las emisiones asociadas a la producción de los materiales empleados en la obra se obtendrán de multiplicar la cuantía de cada material que se prevé utilizar en la misma, por el factor de emisiones cradle-to-gate (Emisiones calculadas desde la extracción de las materias primas necesarias para la fabricación del material hasta la salida del material de la factoría de producción para su utilización en obra) asociado a la producción de cada unidad de material. La valoración de las emisiones podrá hacerse considerando un número limitado de materiales cuyas emisiones resultan habitualmente significativas. La determinación de las cantidades empleadas de cada material se realizará normalmente con ayuda de las mediciones y secciones tipo incluidas en el proyecto. Para estimar el factor de emisiones asociado a la producción de cada material se recurrirá a alguna/s de las bases de datos.[43]

Así pues, según la guía Huella de carbono se pueden obtener las siguientes emisiones medias cradle-to-gate por unidad de material consumido.

TIPO DE MATERIAL	EMISIONES
Zahorra artificial en formación de base para viales y acceso	24,2 kgCO ₂ eq/m ³
Hormigón para armar	330 kgCO ₂ eq/m ³
Hormigón en masa	285 kgCO ₂ eq/m ³
Acero para armadura	1,4 kgCO ₂ eq/kg
Acero estructural para jaula de pernos y bridas	2,8 kgCO ₂ eq/kg
Acero forjado	1,81 kgCO ₂ eq/kg
Poliéster reforzado con fibra de vidrio para palas	11,5kgCO ₂ eq/kg
Arena tamizada para zanja	13,6 kgCO ₂ eq/m ³
Aluminio 6063 para Cable	34.425 kgCO ₂ eq/m ³
Cobre	28.582,4 kgCO ₂ eq/m ³

TIPO DE MATERIAL	EMISIONES
Acero al silicio para transformador	1,81 kgCO ₂ eq/kg

Tabla 3. Factores de emisión de los diferentes materiales utilizados en la construcción del parque eólico. Fuente: Elaboración propia con datos de [43,47,48,49,70].

Los diferentes valores obtenidos de emisiones se encuentran en sus referencias bibliográficas.

Se considera que el acero al silicio (acero especial para transformadores debido a sus propiedades magnéticas) tiene el mismo factor de emisión que el acero forjado.

El acero forjado es empleado para góndola, buje y tramos de torre del aerogenerador.

A modo de ejemplo, para poder obtener las emisiones unitarias en la producción de cobre, se obtiene de dato de fuente [47], en la que aparece que por cada tonelada de cobre fino producido se emite 3,19 toneladas de CO₂. Y se realiza la siguiente transformación:

$$\frac{3,19 \text{ toneladas } CO_2}{1 \text{ tonelada cobre}} * \frac{1 \text{ tonelada cobre}}{1.000 \text{ kg}} * \frac{9.860 \text{ kg cobre}}{1 \text{ m}^3 \text{ cobre}} * \frac{1.000 \text{ kg } CO_2}{1 \text{ tonelada } CO_2}$$

$$= 28.582,4 \frac{\text{kg} CO_2}{\text{m}^3} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Para el transformador, se asume que el 90% de su peso es acero empleado en el núcleo (que es el centro del transformador) y el 10% restante el cobre, que se emplea para los hilos de cobre, que son los que producen los cambios de voltaje y se emplean en las dos bobinas (devanado primario y devanado secundario). En los transformadores también se encuentran aislantes que separan los demás elementos, pero se asume que la cantidad es despreciable y por tanto no se tiene en cuenta.



Figura 25. Transformador de 50 MVA. Fuente:[76]

4.2 Emisiones asociadas al transporte de materiales

La Guía metodológica para el cálculo de huella de carbono en puertos del CEDEX [43] dice lo siguiente, en relación con las emisiones producidas durante el transporte de los componentes hasta la obra:

A las emisiones cradle-to-gate se sumará las emisiones well-to-wheel que se deriven del transporte de los materiales desde su lugar de producción hasta el emplazamiento de la obra y, en su caso, del transporte de materiales a vertedero. A falta de estimaciones más precisas, se podrá tomar en cuenta los factores de emisión incluidos en la tabla I.17. Dichos factores se han definido para ser aplicados a la distancia que separa los puntos de carga (cantera, préstamo, planta de fabricación, etc.) y descarga (emplazamiento de la obra, etc.) del material, teniendo en cuenta que a un trayecto con carga completa suele corresponderle otro en vacío [43].

- El cálculo de las emisiones por transporte se obtiene a partir de la misma guía ([43]), de la que se derivan los siguientes factores de emisión: Factor de emisión de transporte de áridos y tierras, por carretera, en camión basculante de 225 kW y 10 m³: 0,52 kg CO₂eq/m³*km. Este valor es utilizado en el cálculo de emisiones del transporte de la zahorra hasta el parque.

- Factor de emisión de transporte de hormigón desde planta, por carretera, en camión hormigonera de 300 kW y 9 m³: 0,77 kg CO₂eq/m³*km [43]. Empleado en el cálculo de emisiones del transporte del hormigón hasta el PE.

Estos dos últimos factores ya tienen en cuenta el viaje de vuelta vacío. Para los siguientes factores el valor no se tiene en cuenta en un principio, por lo que se multiplica por un factor de 2.

- Factor de emisión de transporte de un camión tipo tráiler, con carga media de 25 toneladas: 35l gasoil/100km recorridos [50]. Según [44], un camión con combustible diésel tipo B10 emite 2,407 kgCO₂eq/l. Por tanto, →0,85 kgCO₂eq/km, es decir, 1,7 kgCO₂eq/km. Empleado en el cálculo de emisiones del transporte del acero para armadura, acero para jaula pernos y bridas de montaje, tierras hasta el vertedero, arena tamizada para zanjas, aluminio para cables y cobre para toma de tierra hasta la ubicación del PE.
- Factor de emisión de transporte especial de un camión, con carga media de 50 toneladas. En este caso este tipo de transporte es para poder llevar las palas de los aerogeneradores. Las emisiones de GEI en este caso se obtiene a través de una extrapolación del caso del camión anterior de 25 toneladas. → 3,4 kgCO₂eq/km
- Factor de emisión de transporte especial de un camión, con carga media de 80 toneladas. En este caso este tipo de transporte es para poder llevar los tramos de la torre del aerogenerador y los bujes. Las emisiones de GEI en este caso se obtiene nuevamente a través de una extrapolación del caso del camión anterior de 25 toneladas. → 5,44 kgCO₂eq/km.
- Factor de emisión de transporte especial de un camión, con carga media de 225 toneladas. En este caso, este tipo de transporte es para poder llevar las góndolas, el transformador y los edificios prefabricados. Se considera nuevamente que las emisiones de GEI se obtienen a través de una extrapolación del caso del camión anterior de 25 toneladas. →15,3kgCO₂eq/km.
- Factor de emisión de transporte por mar en buque: En este caso, las partes del aerogenerador proceden de puertos que se encuentran en China, por lo que hará

falta un trayecto por vía marítima, considerando 3g de CO₂ por cada tonelada y kilómetro.[83]

Emisiones asociadas al transporte de materiales	EMISIONES POR UNIDAD (kgCO₂eq/m³*km)	EMISIONES POR UNIDAD (kgCO₂eq/km)	EMISIONES POR UNIDAD (kgCO₂eq/t*km)
Tipo de transporte			
Transporte de áridos y tierras, por carretera, en camión basculante de 225 kW y 10 m ³	0,52		
Transporte de hormigón desde planta, por carretera en camión hormigonera de 300 kW y 9 m ³	0,77		
Transporte de un camión con carga media de 25 toneladas		1,7	
Transporte camión especial 50 toneladas		3,4	
Transporte camión especial 80 toneladas		5,44	
Transporte camión especial 225 toneladas		15,3	
Transporte barco carguero			0,003

Tabla 4. Emisiones asociadas al transporte de materiales. Fuente: Elaboración propia con datos de [43,44,50,83]

4.3 Emisiones asociadas al empleo de maquinaria y otras instalaciones auxiliares en el emplazamiento de la obra

La Guía metodológica para el cálculo de huella de carbono en puertos del CEDEX [43] dice lo siguiente, en relación con las emisiones asociadas al empleo de maquinaria y otras instalaciones auxiliares:

Para el cálculo a nivel de proyecto de las emisiones atribuibles al empleo de maquinaria off-road y al funcionamiento de otras instalaciones auxiliares durante la ejecución de la obra se puede partir, en general, de la definición de un número limitado de unidades de obra cuyas emisiones resulten habitualmente significativas. Las emisiones se obtendrán de multiplicar la cuantía de cada una de estas unidades de obra por un factor de emisiones asociado a su ejecución. Este factor de emisiones se calculará considerando la relación de maquinaria necesaria para la ejecución de la unidad de obra, su potencia y su rendimiento medio por unidad de obra ejecutada [43]. Para simplificar cálculos,

todas las máquinas empleadas utilizan diésel B10, cuyas emisiones son 2,407 kgCO₂eq/l [43].

A modo de ejemplo, en el momento en el que se introduce la zahorra interviene un rodillo vibrante, una motoniveladora, un camión cisterna y un camión basculante. Todos los rendimientos son de 0,02h/m³ de zahorra [52]. El consumo del rodillo vibrante es de 7,5l/h [55]. Para la motoniveladora el consumo es de 15 l/h [56]. Ambos camiones, tanto basculante como cisterna, tienen un consumo de 16 l/h. Para esto último, se ha considera que tienen el mismo consumo que le excavadora hidráulica que se emplea para el movimiento de tierras [54].

Instalación de zahorra	EMISIONES POR UNIDAD (kgCO ₂ eq/m ³)	Rendimiento(h/m ³)	Consumo(l/h)
Camión basculante	0,77	0,02	16
Camión cisterna	0,77	0,02	16
Motoniveladora	0,72	0,02	15
Rodillo vibrante	0,36	0,02	7,5
TOTAL	2,62		

Tabla 5. Maquinas necesarias para la instalación de zahorra. Fuente: Elaboración propia con datos de [52,54,55,56]

En el movimiento de tierras se tiene que utilizar una excavadora para formación de una explanada mejorada, acompañado de un camión basculante, que es utilizado para todo el transporte de materiales de obra. También se le llama camión bañera.

Para una excavadora hidráulica de 144 CV, el consumo es de 16 l/h [54]. Los rendimientos de cada una de las máquinas aparecen en [52]

Movimiento de tierras	EMISIONES POR UNIDAD (kgCO ₂ eq/m ³)	Rendimiento(h/m ³)	Consumo(l/h)
Excavadora hidráulica neumáticos 144CV	1,16	0,03	16
Camión basculante	0,77	0,02	16
Rodillo vibrante	0,36	0,02	7,5
TOTAL	2,29		

Tabla 6. Maquina necesarias para movimiento de tierras. Fuente: Elaboración propia con datos de [52,54,55].

Para el izado del aerogenerador y sus componentes, se emplea una grúa auxiliar y una grúa principal, además de un camión grúa, empleado para trasladar materiales y

volúmenes entre tajos de obras. Con datos de [73], Se estima que, con una vida útil de 10.000h, una grúa de 200 toneladas consume 70.000 litros de combustible, por lo que para la grúa principal de 500 toneladas se realiza una extrapolación y se obtiene finalmente un consumo de 17 litros/hora.

Para poder estimar un valor de cuánto tiempo se tarda en construir un parque eólico, se estima que la primera obra civil (plataformas, cimentaciones y caminería) suele tardar entre 4 y 12 meses. Después se inicial las construcciones para conectar a la red, estimado entre 6 y 18 meses, dependiendo de la complejidad. Y finalmente se traen y montan los aerogeneradores, que se tarda entre 12 y 24 meses dependiendo de la envergadura [74]. Para este trabajo, se considera año y medio (18 meses), puesto que son aerogeneradores de grandes dimensiones, por lo que aparece la siguiente tabla:

Instalación del aerogenerador		Años	Horas al año(h)	Consumo(l/h)
Grúa auxiliar 200t		1,5	2920	7
Grúa principal 500t		1,5	2920	17,5
Camión grúa		1,5	2920	16
TOTAL				

Tabla 7. Maquina necesarias para instalación de los aerogeneradores. Fuente: Elaboración propia con datos de [73]

Se asume que las emisiones producidas por la instalación eléctrica de baja tensión ya van unidas a las emitidas durante la construcción de los aerogeneradores.

Será necesaria además una capa final de arena tamizada para las zanjas sobre la que se disponen los cables.

Instalación de arena		EMISIONES POR UNIDAD (kgCO ₂ eq/m ³)	Rendimiento(h/m ³)	Consumo(l/h)
Camión basculante		0,77	0,02	16
Rodillo vibrante		0,36	0,02	7,5
Camión cisterna		0,77	0,02	16
TOTAL		1,90		

Tabla 8. Maquina necesarias para instalación de arena final. Fuente: Elaboración propia con datos de [52,55]

En cuanto a la maquinaria necesaria para verter el hormigón, se emplea un camión bomba con un rendimiento de 100 m³/h, o lo que es lo mismo, 0,01 h/m³[81]. Se considera que el consumo es el mismo que los demás camiones.

En el caso de la subestación, se necesita la grúa de 200t para poder instalar los edificios prefabricados, la aparamenta necesaria y el transformador, además del uso de un camión grúa para trasladar materiales necesarios. Se asume que la construcción de la subestación se realiza en el mismo tiempo que la instalación de los aerogeneradores, es decir, 1 año.

Instalación de subestación		Años	Horas al año(h)	Consumo(l/h)
Grúa 200t		1	2920	7
Camión grúa		1	2920	16

Tabla 9. Maquina necesarias para instalación subestación. Fuente: Elaboración propia con datos de [73]

5. Estudio de caso

Una vez definida la herramienta, la aplicaremos para resolver un caso concreto, en concreto, el del Parque Eólico “Iberos”, en los términos municipales de Ejulve y Molinos, en provincia de Teruel [45].

El emplazamiento supone la instalación del parque en la sierra situada al norte del núcleo urbano de Ejulve a unos 26,5 km de la SET Mudéjar Promotores [45].



Figura 26. Localización del PE. Fuente: Propia con datos de [45].

Los 10 aerogeneradores que se están instalando actualmente se van a disponer de la mejor manera posible según diferentes alternativas y estudio de impacto medioambiental. Son 10 aerogeneradores, nueve de 5MW y uno de 4,4 MW, pero a efectos de cálculo para obtener la energía producida por año se asume que todos los aerogeneradores son de 5 MW. A continuación, se muestra características del aerogenerador:

Potencia unitaria (kW)	5.000
Tensión de generación (kV)	33
Frecuencia de red (Hz)	50
Altura de Buje (m)	115
Diámetro de Rotor(m)	170
Número de palas	3

Longitud palas (m)	83
---------------------------	----

Tabla 10. Características del aerogenerador de 5MW. Fuente: Elaboración propia con datos de [45]

5.1 Datos de producción de materiales

Los nuevos viales de acceso al parque se realizan siguiendo el trazado de los caminos existentes y tienen una longitud aproximada de 1.888 m y 4.409 m [45]. Según datos reales, la anchura útil del camino serán 6 m y el espesor de la zahorra de 40 cm.

En cuanto a los viales interiores al parque, se accederá a la base de los aerogeneradores que constituyen el parque y a la SET, aprovechando al máximo la red de caminos existentes. La longitud total de los viales interiores es de 5.365 metros [45]. Se estima que la capa de zahorra es mayor ahí donde ya hay firme, por lo que el Autor incluye un factor de 25% más de capa de zahorra en los viales ya existentes.

Además, como ya está comentado anteriormente, el proceso de montaje de los aerogeneradores requiere de las plataformas de montaje que facilite el almacenamiento, posicionamiento para izado y operación sobre los diferentes componentes (torre, góndola y palas). En este caso y según el parque eólico estudiado, se tienen diferentes dimensiones para la plataforma principal, zona de cimentación, plataforma palas y plataforma de grúa.

ZAHORRA PARA VIALES Y PLATAFORMAS	Longitud(m)	Ancho(m)	Espesor(m)	Volumen(m³)
Vial 1 de acceso al parque	1.888,00	6,00	0,40	4.531,20
Vial 2 de acceso al parque	4.409,00	6,00	0,40	10.581,60
Viales interiores al parque	5.365,00	6,00	0,50	16.095,00
	Unidades	Área(m²)	Espesor(m)	Volumen(m³)
Plataforma principal	10	522,00	0,40	2.088,00
Zona cimentación	10	437,50	0,40	1.750,00
Plataforma palas	10	2.829,00	0,40	11.316,00
Plataformas plumas	10	1.749,83	0,40	6.999,30
TOTAL				53.361,10

Tabla 11. Volumen de zahorra necesaria para los viales y las plataformas de montaje. Fuente: Elaboración propia con datos de [45]

En el caso del parque eólico que hemos tomado como referencia, se indica que la zapata es circular y tiene 23,2 m de diámetro y 3,5 m altura máxima [45].

Para poder estimar un valor de volumen (m^3) por cimentación de aerogenerador, se considera que las zapatas tienen una forma troncocónica. Así mismo, se extrae, a partir de otro caso real, Parque Eólico Azafrán II, en el término de Azuara [58], que el radio de la base superior del tronco de cono es un 30% del radio de la base inferior. Por tanto, en el caso real que se emplea en este trabajo →

$$23,2 \text{ m} * 0,3 \approx 7 \text{ m de diámetro base superior}$$

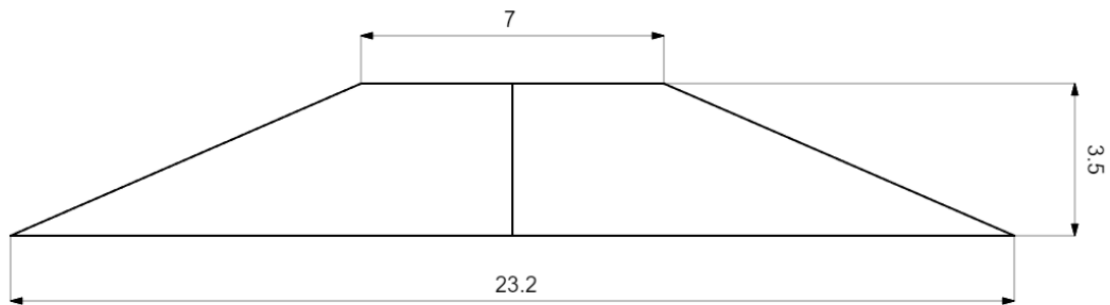


Figura 27. Dimensiones de la zapata empleada. Fuente: Elaboración propia.

Sabiendo que la fórmula del tronco de cono es la siguiente:

$$V = \frac{h\pi}{3} (R1^2 + R2^2 + R1 * R2) \text{ (Ec. 5.1)}$$

Se obtiene que el volumen en m^3 de cada cimentación es de:

$$V = \frac{3,5\pi}{3} (11,6^2 + 3,5^2 + 11,6 * 3,5) = 686,89 \text{ m}^3$$

HORMIGÓN PARA CIMENTACIÓN	Radio inferior (m)	Radio superior (m)	Altura(m)	Nº zapatas	Volumen(m^3)
Hormigón por zapata (forma troncocónica)	11,6	3,50	3,50	10	686,89
TOTAL					6.868,94

Tabla 12. Volumen de hormigón necesario para las zapatas de los aerogeneradores. Fuente: Elaboración propia con datos de [45].

Para poder obtener el acero necesario para la armadura de la cimentación, se asume como norma una cuantía de acero del orden de 100 kg/ m^3 hormigón. Por tanto, en la

siguiente tabla aparece la masa en kilogramos que se emplea de acero para las armaduras de zapatas de todos los aerogeneradores en el parque eólico tomado como ejemplo:

ACERO PARA ARMADURAS	Nº zapatas	Masa (Kg)
acero armadura zapatas	10	68.689,35
TOTAL		686.893,53

Tabla 13. Masa de acero empleada para las armaduras de las zapatas. Fuente: Elaboración propia con datos de [57]

Para la jaula de pernos, se considera por sugerencia de Director 200 pernos pretensados de 4 m de longitud y dos bridas de anclaje de 6 metros de diámetro medio, 500 mm de ancho y 100 mm de espesor para unos aerogeneradores de estas dimensiones [45].

En el caso de la jaula de pernos, se extrapolan valores obtenidos de [71], en el que 4 pernos de 1 metro son 3,5 kg de acero (0,88kg/m). Para las bridas de anclaje (dos por aerogenerador), se puede sacar en volumen a través de la fórmula de anillo cilíndrico sabiendo el diámetro medio con el ancho y el espesor:

$$V = \pi h (R1^2 - R2^2) \text{ (Ec. 5.2)}$$

Se ilustra la siguiente tabla:

ACERO PARA JAULA PERNOS Y BRIDAS	Pernos	Masa por metro (kg/m)	Longitud(m)	Nº jaula pernos		Masa(Kg)
Pernos pretensados	200	0,88	4,00	10		7.000
	Bridas	Diámetro medio(m)	Ancho(m)	Espesor(m)	Volumen(m3)	Masa(kg)
Bridas de anclaje	20	6,00	0,50	0,10	3,14	24.504,423
TOTAL						31.504,423

Tabla 14. Masa de acero empleada para las jaulas de pernos y bridas de anclaje. Fuente: Elaboración propia con datos de [71]

Para el sistema de drenaje (cuya función principal es permitir la retirada de aguas) se considera una cuneta de sección triangular fabricado de hormigón en masa de 1 m de anchura y 0,33 metros de profundidad, con un espesor de 10 centímetros [80].

Se va a instalar dos líneas en cada uno de los lados de los viales interiores que dan acceso a los aerogeneradores, para que el agua pueda ser retirada en caso de lluvias y así evitar acumulaciones.



Figura 28. Cuneta de sección triangular de sistema de drenaje. Fuente: [80]

HORMIGÓN PARA OBRA DRENAJE	Volumen por metro (m³/m)	Longitud(m)	Nº líneas	Longitud total(m)	Volumen(m³)
Hormigón HM	0,12	5.365,00	2	10.730,00	1.287,60
TOTAL					1.287,60

Tabla 15. Volumen de hormigón blando necesario para obra de drenaje. Fuente: Elaboración propia con datos de [45].

Respecto a las zanjas necesarias, se dispondrá el tendido de las líneas de 33 kV y red de tierra en ellas. Discurrirán por el borde de los viales del parque. La longitud total de zanjas a construir es de 8.514,68 m. En cuanto al ancho de la zanja y el espesor de la arena, se emplean datos reales. [45]. Se emplea arena tamizada de relleno.

ARENA TAMIZADA ZANJA	Longitud(m)	Ancho(m)	Espesor(m)	Volumen(m³)
Nºternas				
1	5.677,02	0,47	0,40	1.067,28
2	2.455,38	0,79	0,40	775,90
Mixta	238,30	1,11	0,40	105,81
B.T.	143,98	0,45	0,00	0,00
TOTAL	8.514,68			1.948,99

Tabla 16. Volumen de arena tamizada necesaria en zanjas. Fuente: Elaboración propia con datos de [45].

En cuanto a los aerogeneradores, la longitud de pala es de 83 m [45]. Se considera que las palas están fabricadas íntegramente con poliéster reforzado con fibra de vidrio,

puesto que probablemente tenga otros muchos pequeños componentes y el estudio de estos puede ser objeto de otro trabajo.

Para obtener el peso de la pala, se asumen valores de [63], en el que se toma como referencia el aerogenerador CSIC de 171 metros de diámetro de rotor, 5 MW y 107 metros de altura de buje. Como el aerogenerador que se emplea en este trabajo es de condiciones iguales, se aplican estos datos, y son los siguientes:

- Peso de una pala: 25.2 toneladas de poliéster reforzado con fibra de vidrio.
- Peso del buje: 79.4 toneladas de acero forjado.
- Peso de la góndola: 217 toneladas de acero forjado.

POLIÉSTER REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO	NºPalas	Masa (Kg)
Pala de 83 metros de aerogenerador	30	25.200
TOTAL		756.000

Tabla 17. Masa de poliéster reforzado con fibra de vidrio necesaria para las palas. Fuente: Elaboración propia con datos de [63].

Para la obtención del acero forjado necesario para la torre se extrapolan valores obtenidos de [72], en el que un aerogenerador de 90 metros de diámetro de rotor tiene 200 toneladas de torre.

Por tanto, para un diámetro de rotor de 170 metros se obtiene:

- Una torre de 375 toneladas, dividida en 5 tramos, por lo que cada tramo tendrá un peso de 75 toneladas.

ACERO GONDOLA, TORRE Y BUJE		NºUds.	Masa por unidad(Kg)
Góndola		10	217.000
Buje		10	79.400
	Nº tramos	Nº torres	Masa por tramo(Kg)
Torre	5	10	75.000
TOTAL			6.714.000

Tabla 18. Masa de acero forjado necesaria para las góndola, torre y buje. Fuente: Elaboración propia con datos de [75].

En cuanto a las líneas internas de interconexión de media tensión, se emplean las siguientes longitudes y secciones de cable:[45]

- 4.150 metros cable RH5Z1 3x1x150 mm² Al 18/30 kV
- 4.415 metros cable RH5Z1 3x1x240 mm² Al 18/30 kV
- 2.750 metros cable RH5Z1 3x1x400 mm² Al 18/30 kV

ALUMINIO PARA CABLE	Longitud(m)	Área(m ²)	Nºfilásticas	Volumen(m ³)
Cable RH5Z1 3X1X150 mm ²	4.150	0,00015	3	1,8675
Cable RH5Z1 3X1X240 mm ²	4.415	0,00024	3	3,1788
Cable RH5Z1 3X1X400 mm ²	2.750	0,0004	3	3,3
TOTAL				8,35

Tabla 19. Volumen de aluminio necesario para los cables de MT. Fuente: Elaboración propia con datos de [45]

Sobre la puesta en tierra, se adopta la solución de realizar un tendido general discurriendo por las zanjas de los cables eléctricos con cobre desnudo de 50 mm² de sección. Por tanto, la longitud necesaria es la misma que el recorrido de zanjas, en este caso, 8.514,68 metros.

COBRE PUESTA A TIERRA	Longitud(m)	Área(m ²)	Nºfilásticas	Volumen total(m ³)
Cable cobre RV 1x50 mm ²	8.514,68	0,00005	1	0,43
TOTAL				0,43

Tabla 20. Volumen de cobre necesario para cables de puesta a tierra. Fuente: Elaboración propia con datos de [45].

Para la subestación “IBEROS”, se considera los siguientes elementos [45]:

- Una posición rígida intemperie de línea-trafo con trafo 220/33 kV, ONAN/ONAF, de 50 MVA de potencia nominal.
- Un conjunto de celdas de 36 kV formado por celdas blindadas aisladas en SF₆ con configuración de simple barra y relés de protección incorporados, en total 8.
- Una (1) batería de condensadores de 6 MVAR.
- Sistema integrado de control y protección (SICOP).
- Un edificio de celdas con la apartament interior, cuadro de protecciones, servicios auxiliares y sala de SCADA de hormigón prefabricado de 104,55 m².

- Un edificio con salas de operación y monitorización de las instalaciones, oficinas y un almacén hormigón prefabricado de 215,90 m².

Una vez se sabe esto, se extrapolan datos de [76], en el que un transformador de potencia 10 MVA tiene un peso total de 28.000 kg, por lo que para este trabajo se considera una masa del transformador empleado de 140 toneladas, de las cuales 126 son acero y 14 toneladas de cobre.

Para el conjunto de celdas de 36 kV, cada unidad con configuración de simple barra tiene una masa de 211 kg de acero inoxidable [77].

Para la batería de condensadores, se extrapola datos obtenidos de [78], en el que una batería de condensadores de 60 KVAR tiene una masa de 23 kg, por lo que la batería de 6MVAR tendrá una masa de 2.300 kg.

Para el caso de los edificios prefabricados con hormigón, se extrapola valores de datos de [79], en el que un edificio prefabricado de hormigón de 8,5 x 2,4 x 2,4 m de dimensiones tiene un peso de 29.000 kg. Para el caso de ambos edificios, se considerará la misma altura, (2,40 metros). El largo por ancho de este caso es 20,4 m².

Haciendo una relación de áreas y pesos→

Área (m ²)	Masa (kg)
20,4	29.000
104,55	148.625
215,9	306.916,6

Tabla 21. Masa de hormigón para edificios prefabricados. Fuente: Elaboración propia con datos de [79]

Se asume que el edificio de celdas prefabricado se llevará directamente con el camión especial anteriormente descrito de 225 toneladas de carga, y para el edificio de operación y oficinas se llevará en 3 partes en este mismo camión y se acoplarán en el mismo lugar donde se ubique.



Figura 29. Edificio prefabricado de hormigón para centro transformación. Fuente: [79]

SUBESTACIÓN	Unidades	Masa acero forjado(kg)	Masa cobre(kg)
Transformador 220kv/33kv 50 MVA.	1	126.000	14.000
celdas de 36 kV formado por celdas blindadas aisladas en SF6	8	1.688	
Batería de condensadores 6 MVar	1	2.300	
TOTAL		129.988	14.000
		Masa hormigón(kg)	Volumen hormigón(m³)
Edificio de hormigón prefabricado de 104, 55 m2		148.625	61,93
Edificio de hormigón prefabricado de 215,9 m2		306.916,60	127,88
TOTAL			189,81

Tabla 22. Elementos necesarios para construcción de subestación. Fuente: Elaboración propia con datos de [45].

5.2 Datos de transporte de materiales

Como se ha comentado anteriormente, todos los productos que se consideran en la construcción de este parque eólico se tienen que transportar desde el lugar correspondiente de producción/almacenaje hasta la ubicación del parque eólico que se toma como referencia. A modo de ejemplo, se llevan los áridos y hormigones necesarios desde la ubicación más cercana posible (32km) hasta el parque eólico.

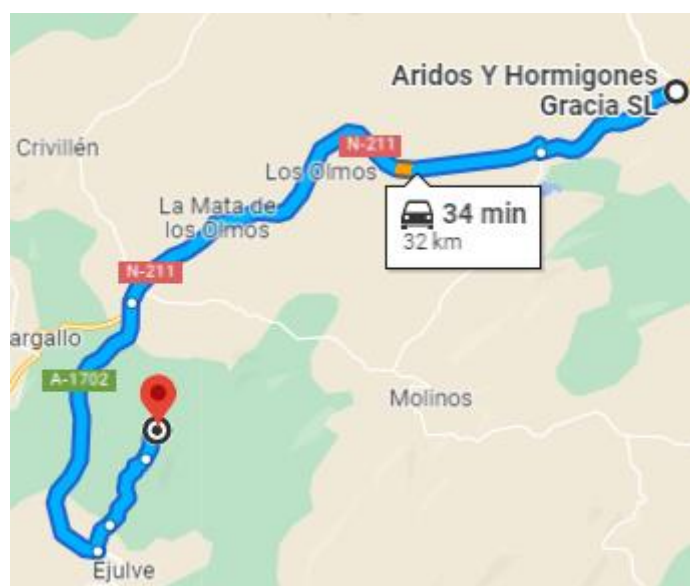


Figura 30. Trayecto para llevar áridos y hormigón hasta el parque eólico. Fuente:[51]

Una vez sabido el trayecto necesario, se puede hallar el número de kilómetros que se han de realizar para poder llevar los volúmenes obtenidos, tanto de hormigón como de zahorra necesarios.

TRANSPORTE DE ZAHORRA	Volumen(m ³)	Trayecto(km)	Nºviajes	Recorrido total(km)
Transporte de áridos y tierras, por carretera, en camión basculante de 225 kW y 10 m ³	10	32	5014	160454,72

Tabla 23. Recorrido total para transporte de áridos. Fuente: Elaboración propia con datos de [51].

TRANSPORTE DE HORMIGÓN PARA ARMAR	Volumen(m ³)	Trayecto(km)	Nºviajes	Recorrido total(km)
Transporte de hormigón desde planta, por carretera en camión hormigonera de 300 kW y 9 m ³	9	32	762	24.384

Tabla 24. Recorrido total para transporte de hormigón armado. Fuente: Elaboración propia con datos de [51].

TRANSPORTE DE HORMIGÓN EN MASA PARA OBRA DE DRENAJE	Volumen(m³)	Trayecto(km)	Nºviajes	Recorrido total(km)
Transporte de hormigón desde planta, por carretera en camión hormigonera de 300 kW y 9 m³	9	32	143	4.578

Tabla 25. Recorrido total para transporte de hormigón en masa para la obra de drenaje. Fuente: Elaboración propia con datos de [51].

Como se ha comentado anteriormente, es necesario el acero tanto para armaduras como el acero para los pernos pretensados y las bridas de anclaje. Se lleva dicho acero desde HIERROS ALCAÑIZ, SA. El trayecto es de 66,6 km y es el siguiente:

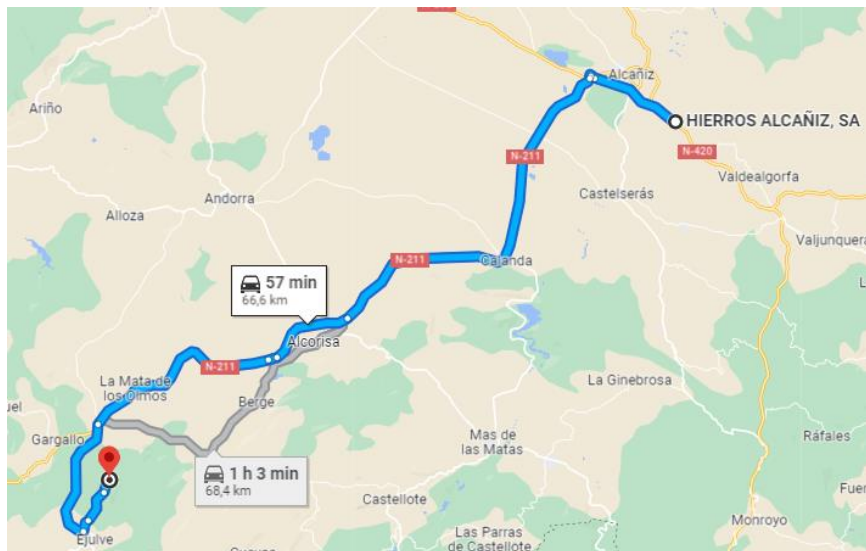


Figura 31. Trayecto para llevar acero de armadura hasta el parque eólico. Fuente: [60].

Sabiendo la masa de acero en el caso de las armaduras, se realizan 40 viajes:

TRANSPORTE DE ACERO ARMADURAS ZAPATA	Masa(kg)	Trayecto(km)	Nºviajes	Recorrido total(km)
Transporte de un camión con carga media de 25 toneladas	25.000	66,6	40	2.598

Tabla 26. Recorrido total para transporte acero de armadura de zapatas. Fuente: Elaboración propia con datos de [60].

Para el transporte de los pernos pretensados y de las bridas de anclaje, anteriormente se ha visto que las masas respectivamente son 7.000 kg y 24.504,42 kg, por lo que se van a llevar desde el mismo lugar que el acero para armadura y se llevará en un viaje cada tipo de elemento en un camino también de 25 toneladas:

TRANSPORTE DE ACERO JAULA DE PERNOS Y BRIDAS DE ANCLAJE	Trayecto(km)	Nºviajes	Recorrido total(km)
Transporte de un camión con carga media de 25 toneladas pernos	66,6	1	67
Transporte de un camión con carga media de 25 toneladas bridas	66,6	1	67
TOTAL			133

Tabla 27. Recorrido total para transporte de pernos pretensados y bridas de anclaje. Fuente: Elaboración propia con datos de [60].

En la siguiente tabla aparece el movimiento de tierras que es necesario para preparar el terreno para la ejecución de la obra.

	EXCAVACION EN DESMONTE (m³)	TERRAPLEN (m³)	A VERTEDERO (m³)
VIALES	75.703,24	33.484,09	42.219,14
CIMENTACIONES	25.834,45	18.181,73	7.652,72
PLATAFORMAS	124.685,46	143.342,70	-18.657,24
DRENAJES	3.787,50	-	3.787,50
ZANJA	5.626,29	3.810,54	1.815,75
TOTAL	235.636,94	198.819,07	36.817,87

Tabla 28. Balance del movimiento de tierras en m³. Fuente: Elaboración propia con datos de [45]

Por lo tanto, habrá un excedente de tierras de 36.817,87 m³ que habrá que llevar a vertedero. Sabiendo que la densidad de la tierra seca es de 1,9 t/m³ [61], se tiene 69.953,95 toneladas.

Masa total (kg)	Volumen (m³)
69.953.953	36.817,87

Tabla 29. Masa de tierra sobrante. Fuente: Elaboración propia con datos de [45].

En la figura siguiente aparece el trayecto que hay que realizar para poder depositar la tierra en un lugar conveniente:



Figura 32. Trayecto para llevar tierra sobrante al vertedero. Fuente: [61]

Se obtiene de esta manera la siguiente tabla:

TRANSPORTE DE TIERRAS AL VERTEDERO	Trayecto(km)	Nºviajes	Recorrido total(km)
Transporte de un camión con carga media de 25 toneladas	72,9	2798	203.986

Tabla 30. Recorrido total para transporte tierra sobrante al vertedero. Fuente. Elaboración propia con datos de [61].

A la hora de transportar las partes del aerogenerador, algunas partes al ser especiales y muy grandes no se llegan a fabricar en España (hay varios centros de producción, pero no para fabricar un aerogenerador de este tipo y características), sino que se fabrican, por ejemplo, en países como China o India.

Para el transporte de las palas, góndolas y tramos de la torre, primero se llevan desde el centro de producción hasta el puerto que se considere, y después se realiza viaje por mar hasta Valencia. Desde dicho lugar se transportará todos los componentes hasta la ubicación de nuestro parque eólico.

Para el transporte de palas, primero se lleva desde la fábrica de producción LM Wind Power Blades de Qinhuangdao hasta el puerto de Tianjin [87].

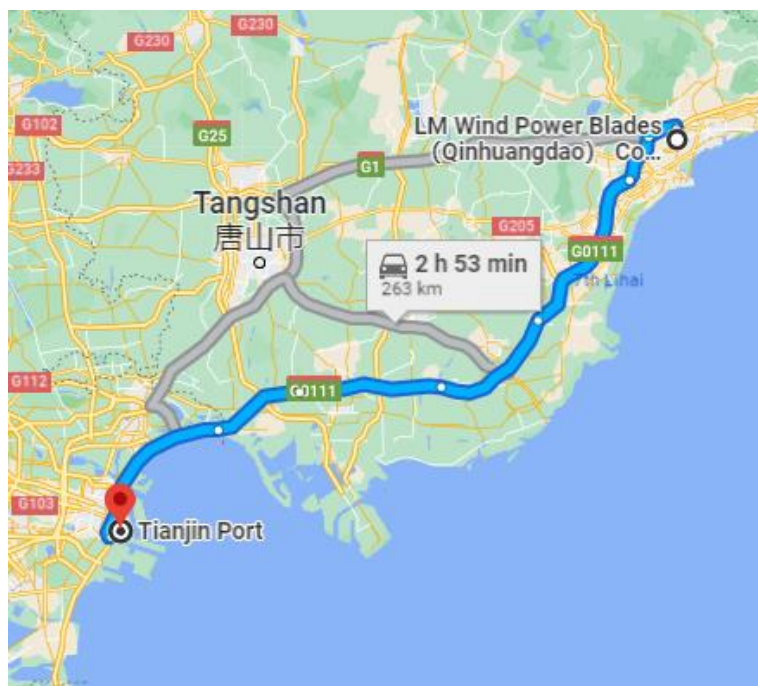


Figura 33. Trayecto para el transporte terrestre de las palas de aerogenerador por China. Fuente: [87]

Para el transporte de tramos de torre, se transportan desde la fábrica de producción de torres de aerogenerador Qingdao Wuxiao Group Co., Ltd. [88], hasta el puerto de Qingdao.

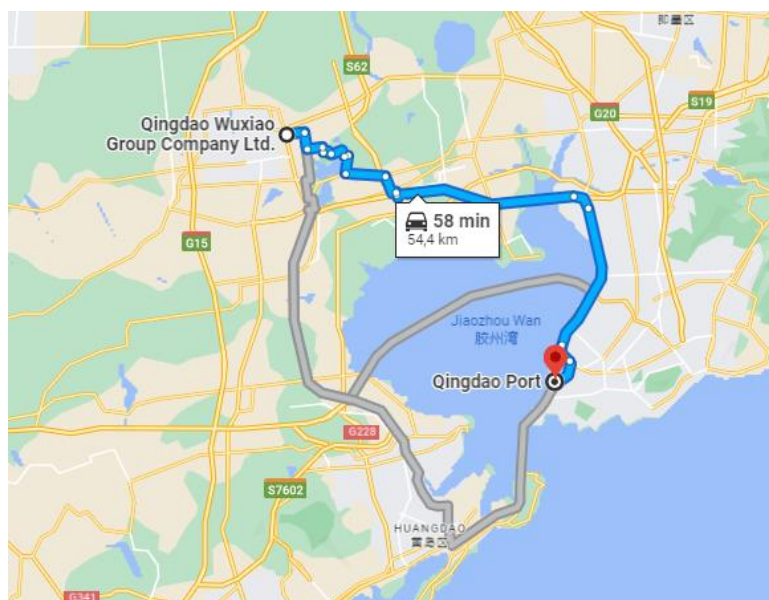


Figura 34. Trayecto para el transporte terrestre de los tramos de las torres de aerogenerador por China. Fuente: [89]

Para el transporte de góndolas, se transportan desde la fábrica de producción y montaje de góndolas de Vestas Wind Technology Co., Ltd. (ubicada en Tianjin) hasta el puerto de Tianjin, como en el caso del transporte de las palas.

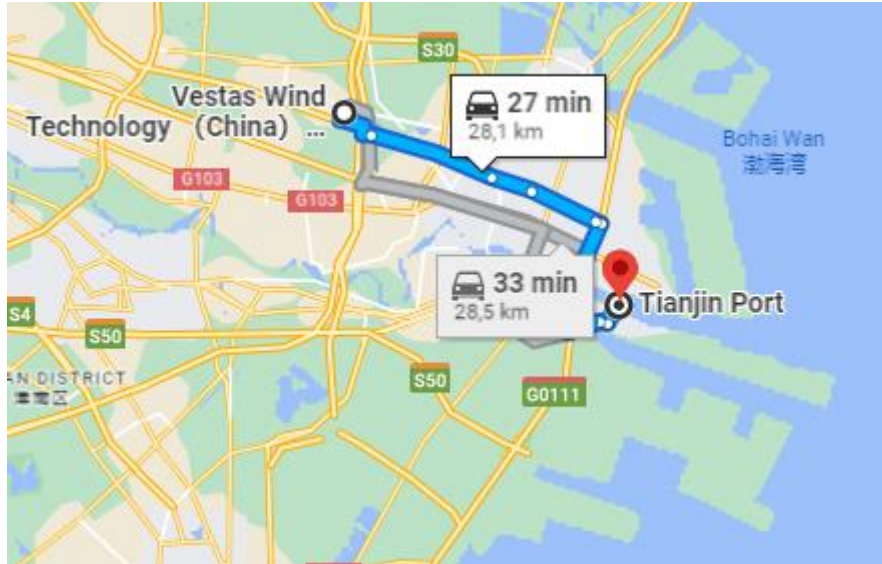


Figura 35. Trayecto para el transporte terrestre de las góndolas de aerogenerador por China. Fuente: [93]

El viaje que se realiza para transporte de palas y góndolas es desde el puerto internacional de Tianjin (China) hasta el puerto de Valencia, y se asume que un barco carguero tarda 37 días consecutivos (888 horas) [84]. Sabiendo la velocidad de un gran buque portacontenedor es de 30 km/h, se estima que la distancia es de 26.640 km.

Por otra parte, el viaje que se realiza para transporte de tramos de torre es desde el puerto internacional de Qingdao (China) hasta el puerto de Valencia, y se asume que un barco carguero tarda 35 días consecutivos (840 horas) [84]. En este caso la distancia es de 25.200 km.



*Figura 36. Barco carguero transportando palas de aerogenerador por vía marítima.
Fuente: [85].*

El transporte por vía marítima se realiza en 3 viajes, uno por cada tipo de componente del aerogenerador: palas, góndolas y finalmente tramos de torre.

$$217 \frac{\text{toneladas}}{\text{góndola}} * 10 \text{ góndolas} = 2170 \text{ toneladas.}$$

$$25,2 \frac{\text{toneladas}}{\text{pala}} * 30 \text{ palas} = 756 \text{ toneladas.}$$

$$75 \frac{\text{toneladas}}{\text{tramo de torre}} * 50 \text{ tramos de torre} = 3750 \text{ toneladas.}$$

Sabiendo el factor de emisión del barco carguero según punto 4.2 (dependiente de las toneladas y kilómetros), se podrá hallar las emisiones de CO₂ por cada viaje.

Una vez se encuentran en el puerto de Valencia, hay que llevar todos los componentes por vía terrestre en camiones hasta la ubicación del parque eólico.

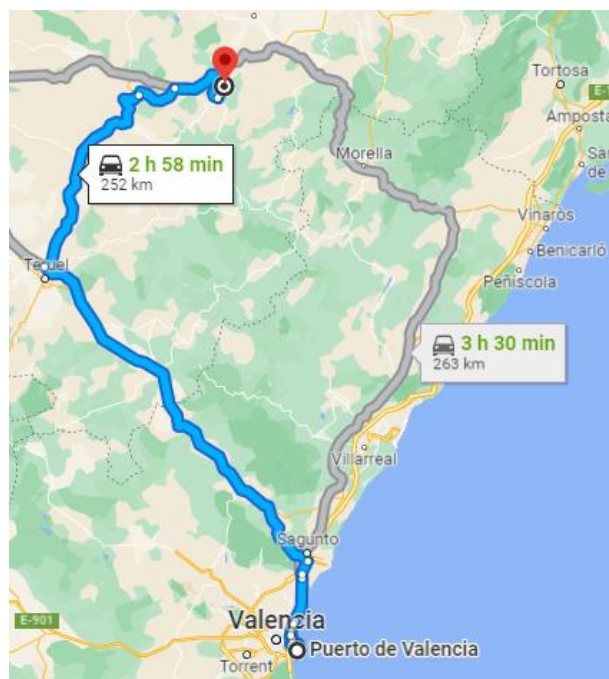


Figura 37. Trayecto para el transporte terrestre de las partes del aerogenerador.
Fuente: [65]

Finalmente, para el transporte de bujes se realiza el trayecto desde WEC, la fábrica de producción especializada en el sector eólico y máquina herramienta que se encuentra en Agurain, Álava [91]. El trayecto es de 427 km:

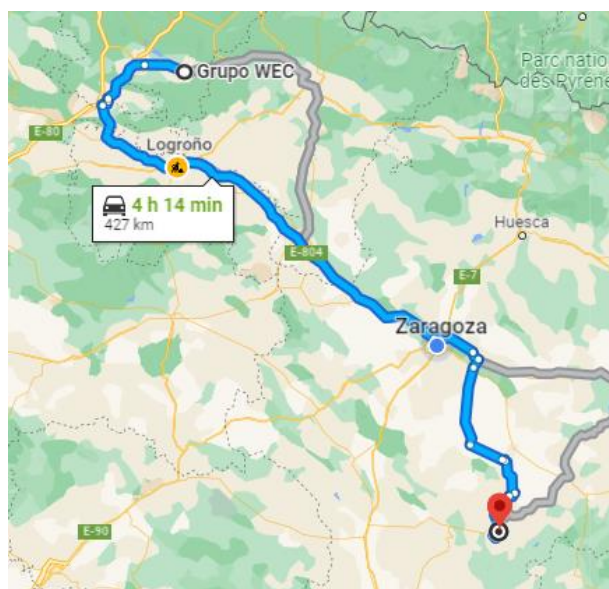


Figura 38. Trayecto para el transporte terrestre de los bujes de aerogenerador. Fuente: [92]

TRANSPORTE PARTES DE AEROGENERADOR	Trayecto(km)	Nºviajes	Recorrido total(km)
Transporte de camión 50t para palas ESP	252	30	7.560
Transporte de camión 50t para palas CHINA	263	30	7.890
Transporte de camión 225t para góndola ESP	252	10	2.520
Transporte de camión 225t para góndola CHINA	28,1	10	281
Transporte de camión 80t para tramos torre ESP	252	50	12.600
Transporte de camión 80t para tramos torre CHINA	54,4	50	2.720
Transporte de camión 80t para bujes ESP	427	10	4.270
Transporte vía marítima Tianjin-Valencia góndolas	26.640	1	26.640
Transporte vía marítima Tianjin-Valencia palas	26.640	1	26.640
Transporte vía marítima Qingdao-Valencia tramos torre	25.200	1	25.200

Tabla 31. Recorrido total para transporte de partes de aerogenerador hasta el Parque eólico. Fuente: Elaboración propia.

Para poder transportar el transformador, se emplea el camión especial con capacidad para 225 toneladas, y el trayecto es desde TRANSFORMADORES GEDELSA de Salamanca hasta la ubicación del parque eólico.



Figura 39. Trayecto para el transporte del transformador. Fuente: [82]

TRANSPORTE DEL TRANSFORMADOR	Trayecto(km)	Nºviajes	Recorrido total(km)
Transporte de un camión con carga media de 225 toneladas	551	1	551

Tabla 32. Recorrido para transporte de transformador. Fuente: Elaboración propia con datos de [82].

Para el transporte de aluminio y cobre necesarios en los cables, se asume que normalmente los cables vienen en bobinas como la siguiente.



Figura 40. Bobina empleada para el transporte de los cables. Fuente: [74]

Para poder saber la cantidad de bobinas a usar, se obtiene el diámetro por cable y se sacan conclusiones de tabla formalizada de [74]. Sabiendo la superficie en m^2 de cada cable y su fórmula ($A = \pi r^2$), se obtienen para cables de aluminio de media tensión:

- Cable 150 mm^2 de aluminio $\rightarrow \approx 14 \text{ mm}$ de diámetro. Se emplea bobina M1600 con capacidad para 5.600m, y peso 230 kg.
- Cable 240 mm^2 de aluminio $\rightarrow \approx 18 \text{ mm}$ de diámetro. Se emplea bobina M1800 con capacidad para 4.820 metros, y peso 260 kg.
- Cable 400 mm^2 de aluminio $\rightarrow \approx 23 \text{ mm}$ de diámetro. Se emplea bobina M2200 con capacidad para 4.650 metros, y peso 310 kg.

Y para cable cobre puesta a tierra:

- Cable 50 mm^2 de cobre $\rightarrow \approx 8 \text{ mm}$ de diámetro. Se emplea 3 bobinas M1000 con capacidad para 4.200 metros y peso 55 kg.

Con todo ello, y sabiendo los metros cúbicos de aluminio y cobre necesarios, y su densidad, se obtiene una masa total de $\rightarrow (8,35 * 2.700) + (0,43 * 8.960) + 230 + 260 + 310 + (55 * 3) = 27.362,8 \text{ kg}$. Por lo que será necesario dos viajes de camión con capacidad para 25 toneladas, y corresponde el siguiente trayecto de 134 km:

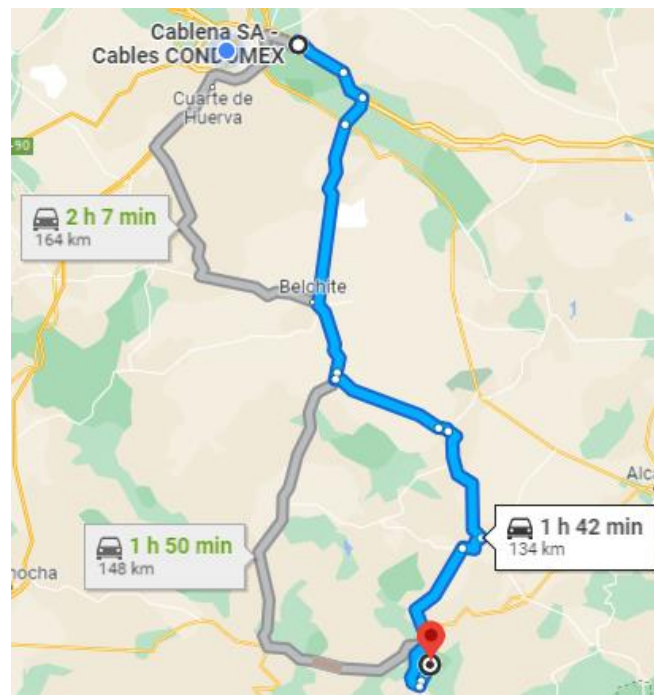


Figura 41. Trayecto necesario para transporte de cobre y aluminio. Fuente: [66]

TRANSPORTE DE ALUMINIO Y COBRE PARA CABLES	Masa(kg)	Trayecto(km)	Nºviajes	Recorrido total(km)
Transporte de un camión con carga media de 25 toneladas	25.000	134	1	134
Transporte de un camión con carga media de 25 toneladas	25.000	134	1	134

Tabla 33. Recorrido total para transporte de cobre y aluminio. Fuente: Elaboración propia con datos de [66]

Finalmente, para el transporte de la arena tamizada se lleva en camión de 25 toneladas el volumen hallado en el apartado 5.1 de este trabajo. Se recuerda que la densidad de la arena es 1.700kg/m^3 . [49]

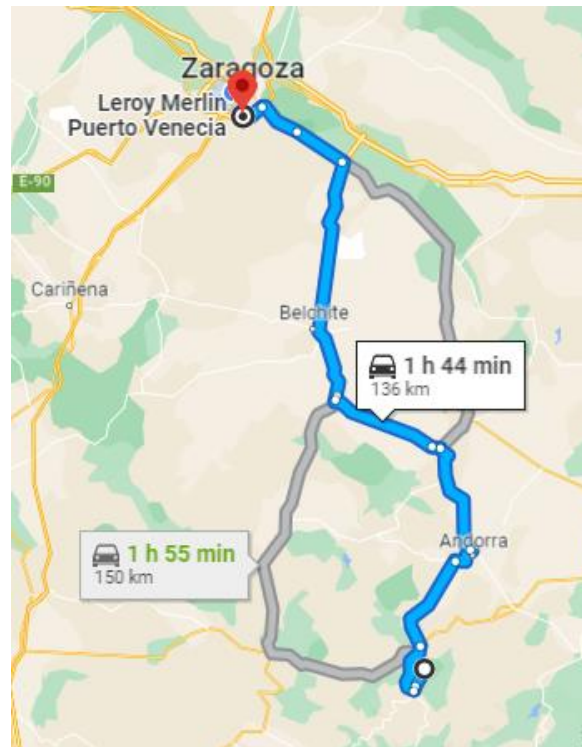


Figura 42. Trayecto necesario para transporte de arena tamizada. Fuente: [90].

TRANSPORTE DE ARENA TAMIZADA PARA ZANJA	Masa(kg)	Trayecto(km)	Nºviajes	Recorrido total(km)
Transporte de un camión con carga media de 25 toneladas	25.000	136	125	16.964

Tabla 34. Recorrido total para transporte de arena tamizada. Fuente: Elaboración propia con datos de [90].

Para transportar los edificios prefabricados que se emplean en la subestación, se llevan desde Iberapa (Ibérica de aparellajes S.L), una fábrica en la que se realizan edificios prefabricados de grandes dimensiones [79], y se encuentra Massamagrell, (Valencia) hasta la ubicación del parque eólico. El trayecto es de 234 km y se realizarán 4 viajes. Se asume que el edificio de celdas prefabricado se llevará directamente con el camión especial anteriormente descrito de 225 toneladas de carga, y para el edificio de operación y oficinas se llevará en 3 partes en este mismo camión y se acoplarán en el mismo lugar donde se ubique.

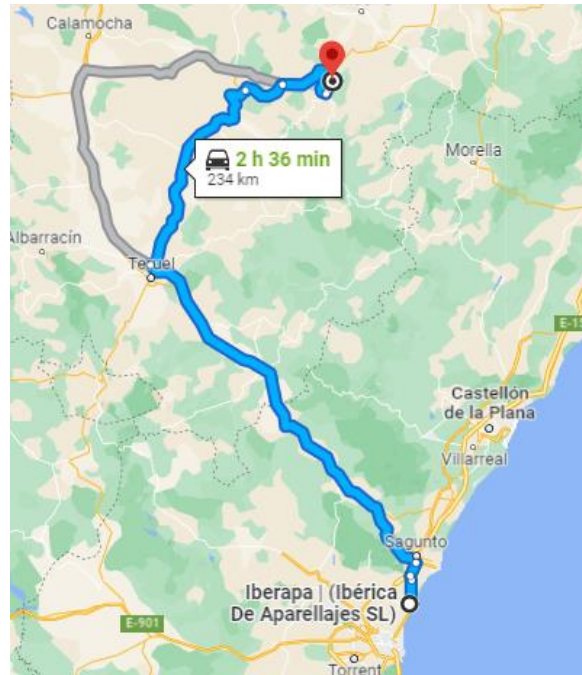


Figura 43. Trayecto necesario para transporte de edificios prefabricados. Fuente: [79].

5.3 Datos de uso de maquinaria

Como anteriormente está explicado, se necesita maquinaria para poder realizar la construcción del parque eólico, y esta tendrá unas emisiones de CO₂ y un impacto medioambiental. En la siguiente tabla queda reflejada la maquinaria necesaria para cada trabajo con sus factores de emisiones y los volúmenes de trabajo:

Maquinaria para instalación de zahorra	EMISIONES (kgCO ₂ eq/m ³)			Volumen(m ³)
Vial 1 de acceso al parque				4.531,20
Vial 2 de acceso al parque				10.581,6
Viales interiores al parque				16.095
Plataformas de montaje				22.153,30
TOTAL	2,62			53.361,10
Maquinaria para movimiento de tierras	EMISIONES (kgCO ₂ eq/m ³)	Excavación en desmonte(m ³)	Terraplén (m ³)	Volumen(m ³)
Viales		75.703,24	33.484,09	109.187,33
Cimentaciones		25.834,45	18.181,73	44.016,18
Plataformas		124.685,46	143.342,7	268.028,16
Drenaje		3.787,50	0	3.787,5
Zanjas		5.626,29	3.810,54	9.436,83
TOTAL	1,93	235.636,94	198.819,06	434.456

Maquinaria para instalación de arena	EMISIONES (kgCO₂eq/m³)			Volumen(m³)
Relleno de arena para zanjas	1,9			1.948,99
Maquinaria para instalación de hormigón	EMISIONES (kgCO₂eq/m³)			Volumen(m³)
Hormigón para cimentación				6.868,94
Hormigón para drenaje				1.287,60
TOTAL	0,39			8.156,54
Instalación del aerogenerador	Años	Horas al año(h)	Consumo(l/h)	
Grúa auxiliar 200t	1	2.920	7	
Grúa principal 500t	1	2.920	17,5	
Camión grúa	1	2.920	16	
Instalación de subestación	Años	Horas al año(h)	Consumo(l/h)	
Grúa 200t	1	2.920	7	
Camión grúa	1	2.920	16	

Tabla 35. Maquinaria necesaria para la construcción del parque eólico. Fuente: Elaboración propia.

5.4 Huella de carbono

En el momento en el que se han obtenido todos los parámetros necesarios para obtener la huella de carbono en la construcción del parque eólico, se procede a mostrar una tabla resumen con todo lo anterior descrito. Estos valores (medidos en kgCO₂eq) se obtienen en la multiplicación de cada factor de emisión (descrito en el punto 4 de este trabajo) y multiplicando por cada unidad de trabajo, ya sea volumen, masa, distancia.

MATERIALES	EMISIONES (KgCO₂eq)
Zahorra	1.291.338,62
Hormigón armado	2.329.385,60
Acero para armaduras	961.650,94
Acero para jaula de pernos y bridas	88.212,38
Hormigón en masa	366.966,00
Arena tamizada	26.506,20
Aluminio	287.321,38
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	8.694.000,00
Acero forjado para aerogenerador	12.555.180,00
Cobre	56.828,50

Acero al silicio	243.077,56
TOTAL	26.900.467,18
TRANSPORTE	
Transporte zahorra	887.928,70
Transporte hormigón armado	169.250,56
Transporte hormigón en masa	31.726,46
Transporte acero para armaduras, jaula pernos y bridas	3.337,24
Transporte arena tamizada	28.838,74
Transporte tierras al vertedero	346.775,74
Transporte para aluminio y cobre	455,60
Transporte del transformador	8.430,30
Transporte de edificios prefabricados	33.721,20
Transporte palas	52.530,00
Transporte tramos de torre	83.340,80
Transporte góndola	42.855,30
Transporte buje	23.228,80
Transporte marítimo	517.345,92
TOTAL	2.229.765,37
MAQUINARIA	
Instalación de la zahorra	139.806,08
Movimiento de tierras	838.500,08
Instalación de arena	3.703,07
Vertido de hormigón	3.181,05
Instalación de aerogenerador	284.651,82
Instalación de subestación	161.654,12
TOTAL	1.431.496,22
TOTAL	30.561.728,77

Tabla 36. Huella de carbono en la construcción del parque eólico. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto el parque eólico está en funcionamiento, hay que realizar un mantenimiento preventivo, que es el conjunto de actividades, de forma rutinaria y con periodicidad prefijada, tienen por objeto la comprobación del estado general de los diferentes equipos y sistemas del Parque Eólico y de su correcto funcionamiento, procediendo, en su caso, a la sustitución de componentes con el fin de evitar que se produzcan averías [86].

Con lo anteriormente descrito y con las emisiones de GEI por kWh producido en los parques eólicos onshore comentadas en el punto 2.1 de este trabajo, se asume que el parque eólico tiene una emisión 4 gCO₂eq/kWh producido durante su funcionamiento y operación.

6. Comparativa con fuentes de energía no renovables

Para poder sacar la energía producida por año del PE en cuestión, se utilizan datos históricos de la velocidad de viento de la ubicación de Ejulve [67]. Las velocidades medias por mes han sido captadas con un anemómetro a una altura de 10 m. Se utiliza una distribución Weibull para la energía producida en los parques eólicos, ya que no todas las velocidades aparecen con la misma frecuencia y por tanto obtener la potencia a partir de la velocidad media puede ser impreciso. Dependiendo de un factor de escala y un factor de forma (ambos dependientes de la velocidad media y de la desviación típica), la probabilidad se “acumula” en un rango de viento menor. Es importante señalar la variación de la energía disponible con la altura, puesto que al aumentar esta, la incidencia del viento es mayor y, por tanto, hay una mayor velocidad media. Para ello, se utiliza la siguiente expresión denominada exponencial de Hellman [68]:

$$v(z) = v(z_o) \left(\frac{z}{z_o} \right)^\alpha \quad (Ec. 6.1)$$

En ella se observa que la velocidad a una determinada altura se puede calcular a partir de la velocidad a otra altura, sabiendo el coeficiente de rugosidad del terreno (α). Dependiendo de la zona, este coeficiente puede variar, y a un menor valor de α , la velocidad del viento se estabiliza antes, por lo que varía menos de la velocidad medida por el anemómetro. Como el parque eólico “Iberos” se encuentra en zona rústica, se considera este coeficiente $\alpha = 0,2$. A continuación, se calcula la velocidad media a la altura que interesa en este trabajo (a 115 m, que es la altura del buje que estamos considerando).

MES	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sept	oct	nov	dic
Vel(m/s) a 10 m	5,36	5,44	5,16	4,95	4,25	3,8	3,7	3,53	3,87	4,38	5,03	5,3
Vel(m/s) a 115 m	8,74	8,87	8,41	8,07	6,93	6,19	6,03	5,75	6,31	7,14	8,20	8,64

Tabla 37. Velocidades por meses en 2022 en el municipio de Ejulve. Fuente: Elaboración propia con datos de [67].

Con todo esto, se hallan las probabilidades de cada una de las velocidades posibles, y se multiplica por las horas de un año para poder estimar el tiempo por año que el aerogenerador estaría funcionando con cada una de ellas. Se recuerda que los aerogeneradores no funcionan hasta tener una velocidad mínima (3 m/s en este caso) y se paran a una velocidad máxima para evitar una falta de seguridad (25 m/s en este caso). Aplicando la ecuación (3.6), se puede ir obteniendo la potencia teórica a cada velocidad, para poder sacar la curva de potencia. Es importante señalar que, a partir de una determinada velocidad, la potencia que se obtiene según dicha ecuación sobrepasaría la potencia nominal, impuesta en 5 MW para este trabajo. Por tanto, se limita, y aunque se vaya aumentando la velocidad hasta el máximo que permite el aerogenerador (25m/s), se seguiría teniendo una potencia de 5 MW. Cabe destacar que el coeficiente de potencia anteriormente descrito en el punto 3.4 de este trabajo se asume que es $C_p=0,5$.

Así pues, la curva de potencia obtenida en este aerogenerador es la siguiente:

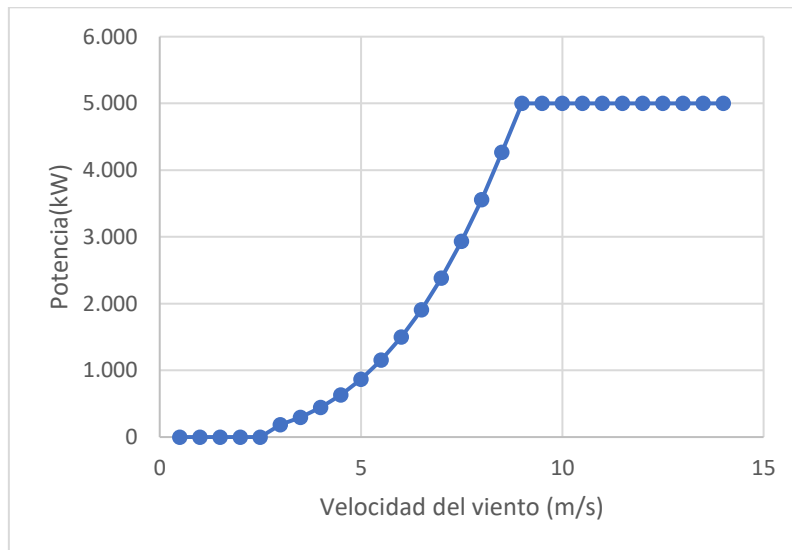


Figura 44. Aproximación de curva de potencia del aerogenerador de 5MW utilizado en este trabajo. Fuente: Elaboración propia.

Sabiendo las horas por año que está trabajando el aerogenerador a cada determinada velocidad, se puede sacar la energía producida por año sumando cada energía producida con su respectiva velocidad:

$$E = P * t$$

Con ello, y sabiendo que ρ es la densidad estándar del aire al nivel del mar $\rho=1,225$ kg/m³ y $A = \pi r^2$ es el área de barrido de las palas de aerogenerador (el radio de rotor es $170/2 = 85$ m) se concluye que, con un aerogenerador de estas características, se producen 25.741.407,52 kWh en un año. Por lo que el parque eólico genera una cantidad de energía de 257.414.075,2 kWh/año.

Una vez se sabe la cantidad de energía que produce el parque eólico en un año, se puede comparar las emisiones de CO₂ que produce con respecto a otras fuentes de energía no renovables. Se toma como ejemplo una comparativa con una central de gas natural y una central de carbón convencional. Tomando como dato lo explicado en el punto 2.1, en el que un parque eólico emite entre 100 y 200 veces menos de CO₂ comparado con una central de carbón convencional y entre 50 y 100 veces menos que una central de gas natural, se puede estimar el tiempo que tendría que estar el parque eólico funcionando para alcanzar el “break-even-point” de la huella de carbono, es decir, llegar al momento en el que el parque eólico ha compensado las emisiones de CO₂ que produjo durante su construcción. Se asume que la central de carbón emite 100 veces más de CO₂ y la central de gas natural 50 veces más.

Se va a estimar dicho tiempo utilizando una función lineal del tipo $y=mx+n$. En este caso, la ordenada en el origen de la función que representa las emisiones del parque eólico son los kilogramos de CO₂eq que se han obtenido anteriormente durante la construcción del parque eólico, 30.561.728,77 kgCO₂eq, y la pendiente es la cantidad de emisiones que produce el parque eólico una vez en funcionamiento, es decir, 0,004 kgCO₂eq/kWh. La función “y” se mide en kgCO₂eq, la pendiente en kgCO₂eq/kWh y la “x” en kWh.

Con las centrales de las fuentes de energía no renovables la pendiente será 100 y 50 veces mayor (carbón y gas natural, respectivamente) tal como se ha explicado en el punto 2, y la ordenada en el origen será 0, puesto que son centrales que ya están en funcionamiento y construidas en el momento de la comparativa. Además, se asume que las centrales térmicas tienen un periodo de vida mayor. Por su parte, el parque eólico en este trabajo se construye y seguidamente empieza a operar.

FUENTE DE ENERGÍA	FUNCIÓN LINEAL DE EMISIONES
Parque eólico	$y = 0,004x + 30.561.728,77$
Central de carbón convencional	$y = 0,4x$
Central de gas natural	$y = 0,2x$

Tabla 38. Funciones lineales de emisiones para cada fuente de energía. Fuente: Elaboración propia.

Si se igualan las funciones y se despeja la incógnita “x”, se puede saber cuántos kwh de energía se tienen que producir en el parque eólico para que las emisiones de dicho parque (construcción + operación) alcancen a las emitidas en las centrales, y por lo tanto se alcance el denominado “break-even-point”.

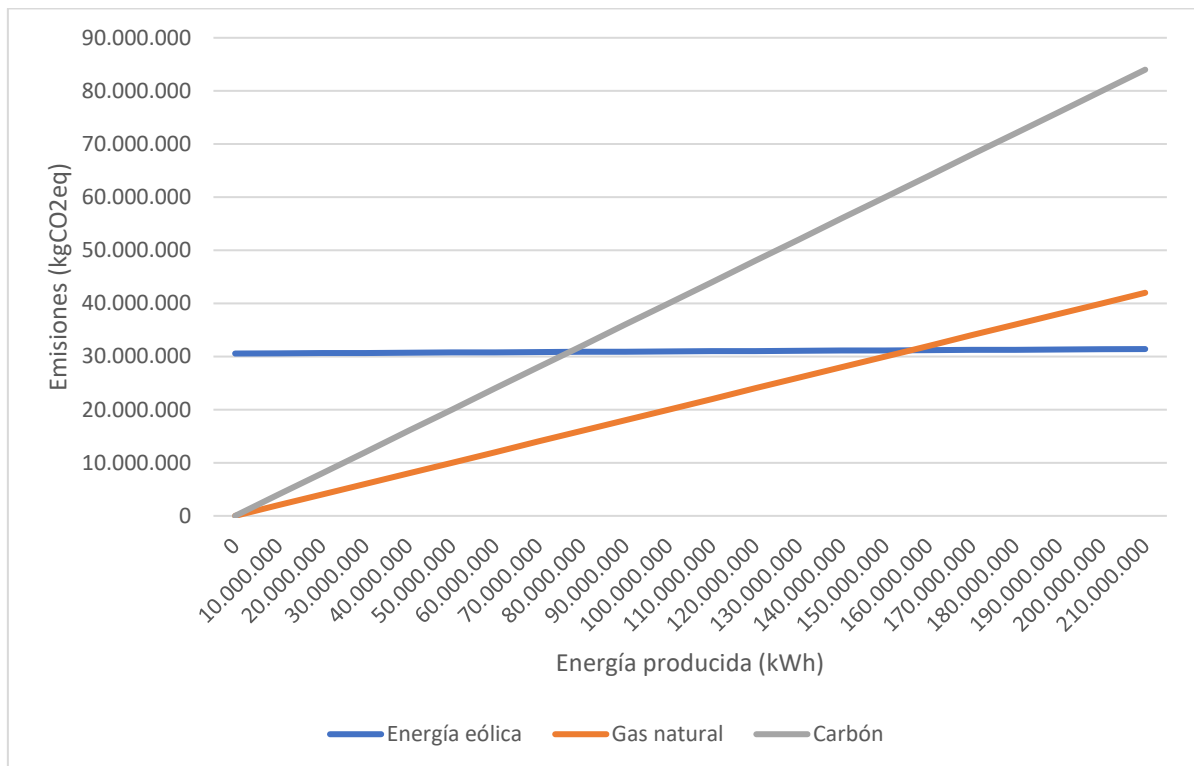


Figura 45: Gráfica comparativa de las emisiones de CO₂ y la energía producida: Fuente: Elaboración propia.

Por tanto →

$$0,004 * x_1 + 30.561.728,77 = 0,4 * x_1 \rightarrow x_1 = 77.176.082,75 kWh.$$

$$0,004 * x_2 + 30.561.728,77 = 0,2 * x_2 \rightarrow x_2 = 155.927.187,8 kWh.$$

Con las anteriores cuentas se muestra que el parque eólico tiene que producir una cantidad de 77.176.082,75 kWh para que se alcance el “break-even-point” o momento

en el que se compensan las emisiones de CO₂ respecto a las que se producirían con el uso de una central de carbón convencional.

En el segundo caso, hace falta que el parque eólico produzca una cantidad de 155.927.187,8 kWh para alcanzar el momento en el que se compensan las emisiones de CO₂ respecto a las que se producirían con el uso de una central de gas natural.

Una vez sabido esto, y la energía que produce el parque eólico calculada anteriormente (257.414.075,2 kWh/año), se concluye que el break even point en el caso de la comparativa de la energía eólica con la central de carbón es de 0,3 años, y en el caso de la comparativa de la energía eólica con la central de gas natural es de 0,6 años.

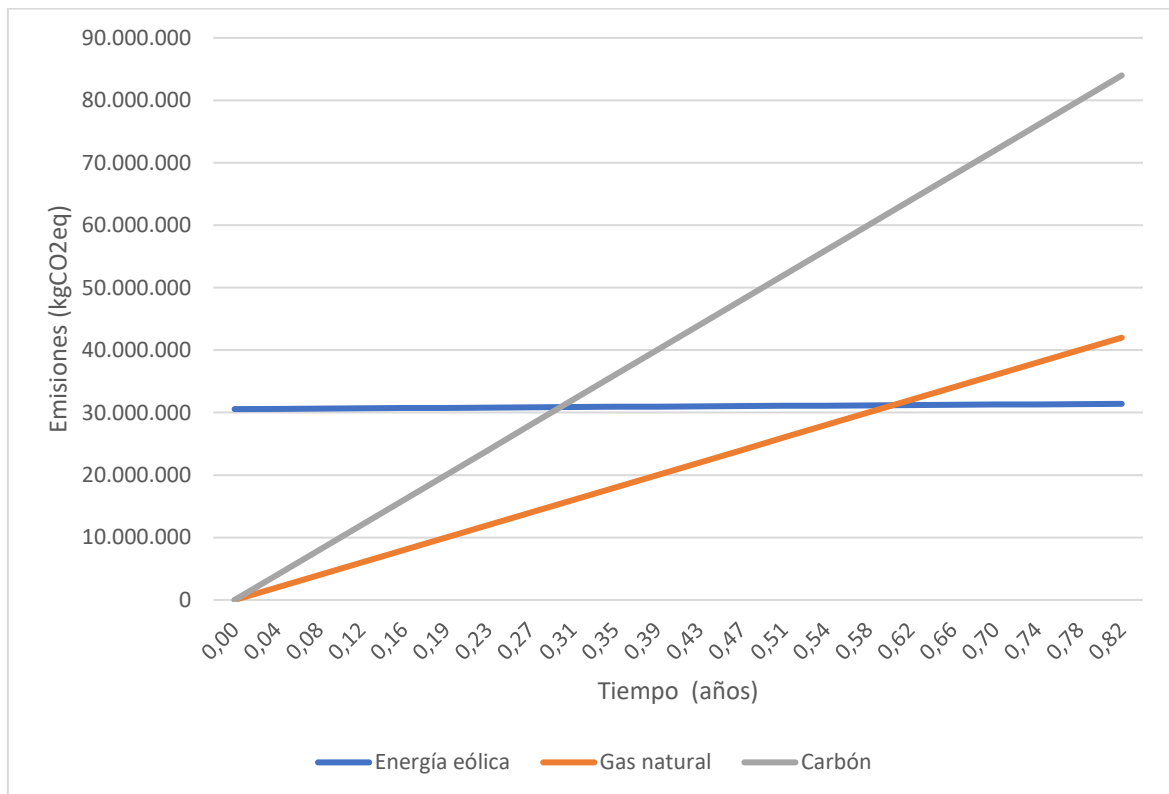


Figura 46: Gráfica comparativa de las emisiones de CO₂ y tiempo: Fuente: Elaboración propia.

7. Conclusiones

El objetivo de este proyecto ha sido intentar describir de un modo detallado la energía eólica, en su vertiente constructiva, y preparar una herramienta de cálculo que permite obtener la huella de carbono en la construcción y operación de un parque eólico (no incluye el desmontaje). Así mismo, se ha resuelto su aplicación al parque eólico Íberos, situado en los términos municipales de Ejulve y Molinos, Teruel. A partir del estudio realizado en el caso real, se pueden obtener varias conclusiones.

En el momento de la construcción, un parque eólico de 50 MW produciría unas emisiones de gases de efecto invernadero de alrededor de 30.000 toneladas de CO₂eq, lo que significa un impacto en términos medioambientales. Por tanto, las emisiones que producen esta fuente de energía renovable no son cero.

No obstante, se ha demostrado que, comparándola con otras fuentes de energía fósiles, la energía eólica permite ahorrar una gran cantidad de gases de efecto invernadero, ya que se alcanza el “break -even-point” en términos de impacto medioambiental en un periodo menor a un año.

En cuanto al cálculo de huella de carbono, se observa que un 88% de todas las emisiones han sido debidas a la producción de los materiales empleados en la obra. Concretamente, es la producción del poliéster reforzado con fibra de vidrio (28,5%) y la producción del acero empleado para la torre, góndola y buje (41%), los elementos que mayor impacto medioambiental tienen, puesto que, entre ambos, conforman el aerogenerador, suman casi tres cuartas partes de toda la huella de carbono que se produce durante la construcción del parque eólico.

En el caso del transporte, tan sólo representa un 7,3% de todas las emisiones, cobrando especial importancia el transporte de la zavorra y el transporte por vía marítima. Este último es debido a que los componentes de un aerogenerador con las características del que se utiliza en este trabajo son fabricados en el extranjero, por lo que sería interesante que los centros de producción en España fueran válidos para todo tipo de turbinas, ya que el impacto medioambiental sería menor en este punto, además de aumentar el impacto socioeconómico en la península.

8. Bibliografía

- [1] EP. (23 de Diciembre de 2022). *La eólica bate récord de generación eléctrica en España en 2022*. Obtenido de Ecoavant: https://www.ecoavant.com/sostenibilidad/la-eolica-bate-record-de-generacion-electrica-en-espana-en-2022_10102_102.html#:~:text=La%20potencia%20e%C3%B3lica%20instalada%20a,4%2C6%20nuevos%20GW%20renovables.
- [2] Asociación Empresarial Eólica. (En línea). Recuperado en 2023, de Asociación Empresarial Eólica: <https://aeolica.org/>
- [3] Asociación Empresarial Eólica. (31 de Agosto de 2022). *Un análisis de la actualidad de la eólica*. Obtenido de Asociación Empresarial Eólica: <https://aeolica.org/nueva-edicion-anuario-eolico-2022-la-voz-del-sector-un-analisis-de-la-actualidad-de-la-eolica-en-espana-y-en-el-mundo-y-su-papel-clave-en-el-nuevo-escenario-energetico/#:~:text=En%20Espa%C3%B1a%20hay%201.298%20parques,2%25%20m%C3%A1s%20>
- [4] Mintforpeople. (9 de Junio de 2022). *¿Por qué el CO2 disminuye con la energía eólica?* Obtenido de Mintforpeople: <https://mintforpeople.com/noticias/por-que-el-co2-disminuye-con-la-energia-eolica/>
- [5] Instituto Nacional de Estadística. (2022). *Cuenta de emisiones a la atmósfera*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176941&menu=ultiDatos&idp=1254735976603
- [6] Datosmacro. (2022). *Energía y medio ambiente*. Obtenido de Datosmacro: <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/espana>
- [7] Barrero, A. (5 de Enero de 2023). *Demanda de electricidad en España*. Obtenido de Energías Renovables: [https://www.energias-renovables.com/panorama/cae-la-demanda-de-electricidad-en-espana-20230105#:~:text=Sea%20como%20fuere%2C%20en%20todo,cuarta%20\(10%2C1%25\)](https://www.energias-renovables.com/panorama/cae-la-demanda-de-electricidad-en-espana-20230105#:~:text=Sea%20como%20fuere%2C%20en%20todo,cuarta%20(10%2C1%25)).
- [8] Eolivertical. (28 de Agosto de 2019). *Eólica onshore vs offshore*. Obtenido de Eolivertical: <http://www.eolivertical.es/2019/08/28/eolica-onshore-vs-offshore/>
- [9] Coble, J. J. (23 de Marzo de 2021). *¿Qué hacemos con las plantas eólicas cuando acaba su vida útil?* Obtenido de The Conversation: <https://theconversation.com/que-hacemos-con-las-plantas-eolicas-cuando-acaba-su-vida-util-157340#:~:text=Como%20recoge%20el%20informe%20Accelerating,en%20funci%C3%B3n%20de%20las%20circunstancias>.
- [10] Ministerio para la Transición Ecológica. (En línea). *Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización*. Recuperado en Mayo de 2023, de Miteco: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guia_huella_carbono_tcm30-479093.pdf
- [11] ENEL Green Power. (En línea). *Aerogeneradores*. Recuperado en 2023, de <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-eolica/aerogenerador>
- [12] Ronergy. (15 de Junio de 2021). *Funcionamiento de un aerogenerador*. Obtenido de <https://ronergy.com/funcionamiento-de-un-aerogenerador/>
- [13] Iberdrola. (2023). *Qué es un aerogenerador y cómo funciona*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores>
- [14] Danish wind industry association. (29 de Julio de 2003). *Tamaño de aerogeneradores*. Obtenido de <http://xn--drmrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/size.htm>
- [15] Repsol. (2023). *Todo sobre la huella de carbono*. Obtenido de <https://www.repsol.com/es/sostenibilidad/cambio-climatico/reduccion-huella-carbono/index.cshtml>
- [16] Iberdrola. (2023). *¿Qué es la huella de carbono y por qué es vital reducirla para frenar el cambio climático?* Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/huella-de-carbono>
- [17] Heras, J. (28 de Agosto de 2022). *El periódico de aragón*. Obtenido de <https://www.elperiodicodearagon.com/aragon/2022/08/28/aragon-2-804-aerogeneradores-40-73916311.html>
- [18] AutoSolar. (s.f.). *AutoSolar*. Obtenido de <https://autosolar.es/aspectos-tecnicos/como-funciona-un-aerogenerador>
- [19] BladeCleaning. (2017). *BladeCleaning*. Obtenido de <http://www.bladecleaning.com/problematika.htm>
- [20] Rodríguez, E. (Abril de 2019). Obtenido de UAEM: <http://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/670/ROSENMOOT.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [21] Danish wind industry association. (10 de Mayo de 2003). *Dromstorre*. Obtenido de <http://xn--drmrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/design/concepts.htm>

- [22] Mírez, J. (15 de Julio de 2011). *Matlab/Simulink and Renewable Energy*. Obtenido de <https://jmirez.wordpress.com/2011/07/15/j280-imagen-ejemplo-de-area-de-barrido-y-potencia-de-generacion-eolica/>
- [23] Barrientos, R. (9 de Noviembre de 2019). *Siemens Gamesa*. Obtenido de <https://www.siemensgamesa.com/es-es/descubrir/revista/2019/11/siemens-gamesa-inventors-day#:~:text=En%20el%20caso%20de%20la,energ%C3%ADa%20cin%C3%A9tica%20en%20energ%C3%ADa%20mec%C3%A1nica.>
- [24] Conocimiento Eólico. (17 de Abril de 2017). *Conocimiento Eólico*. Obtenido de <http://conocimientoelico.blogspot.com/2017/04/teoria-de-la-cantidad-de-movimiento.html>
- [25] Richmond-Navarro, G. (2015). *Dialnet*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5432054.pdf>
- [26] Bueno, M. (Abril de 2015). *Sistema de Control para Aerogeneradores Empleando Lógica Difusa*. Obtenido de researchgate: https://www.researchgate.net/publication/321807468_Sistema_de_Control_para_Aerogeneradores_Empleando_Logica_Difusa/fullTextFileContent
- [27] Structuralia. (5 de Octubre de 2016). *Structuralia*. Obtenido de <https://blog.structuralia.com/construccion-de-parques-eolicos-montaje-de-los-aerogeneradores#:~:text=El%20rotor%20se%20puede%20izar,las%20palas%20una%20a%20una.>
- [28] Elcacho, J. (4 de Enero de 2021). *La Vanguardia*. Obtenido de <https://www.lavanguardia.com/natural/energia/20210104/6164853/espectacular-transporte-carretera-pala-eolica-gigante.html>
- [29] Noticias Maquinaria. (13 de Junio de 2016). *Noticias Maquinaria*. Obtenido de <https://www.noticiasmaquinaria.com/la-grua-torre-de-liebherr-1000-ec-b-125-litronic-en-el-montaje-de-un-aerogenerador-con-149m-de-altura-de-buje/>
- [30] ENEL Green Power. (2020). *P.E Íberos*. Obtenido de Gobierno de Aragón: <https://www.aragon.es/-/parque-eolico-iberos>
- [31] Acciona. (s.f.). *Acciona*. Obtenido de Eólico San Roman: <https://www.eolicosanroman.com/>
- [32] Adurcal. (s.f.). *Adurcal*. Obtenido de <https://www.adurcal.com/enlaces/mancomunidad/viabilidad/57.htm>
- [33] GEEA Geólogos. (2023). *GEEA Geólogos Plataforma montaje aerogeneradores*. Obtenido de <https://geea.es/project/plataformas-montaje-aerogeneradores/>
- [34] Iberdrola. (2023). *Qué es la energía eólica terrestre*. Obtenido de Iberdrola: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/como-funcionan-parques-eolicos-terrestres>
- [35] Ramos Rodríguez, M. (Junio de 2016). *Diseño y análisis económico financiero de una instalación eólica onshore*. Obtenido de UPM: https://oa.upm.es/42996/1/PFC_Miguel_Ramos_Rodriguez.pdf
- [36] López Mendizabal, R. (2015). *Con el viento a favor*. Obtenido de Fundación Esteyco: https://www.esteyco.com/wp-content/uploads/2017/01/L15_RL_Viento_Favor_WFW.pdf
- [37] Rodríguez Dapena, Á., & Serrano Hidalgo, O. (2020). *Guía metodológica para el cálculo de la huella de carbono en puertos*, Diciembre 2020. Obtenido de Puertos: <https://www.puertos.es/es-es/medioambiente/Documents/Guia%20Huella%20de%20Carbono%20-%20Puertos%20del%20Estado%20-%20Web.pdf>
- [38] Grupo Cobra. (2019). *Interconexión Parque Eólico San Marcos 230 kV entre Subestación El Bijagual y Santa Lucía*. Obtenido de Grupo Cobra: <https://www.grupocobra.com/proyecto/interconexion-parque-eolico-san-marcos-230-kv-entre-subestacion-el-bijagual-y-santa-lucia/>
- [39] 123rf. (2023). *Excavación de una zanja de electricidad por cable grande*. Obtenido de 123rf: https://es.123rf.com/photo_14442313_excavaci%C3%B3n-de-una-zanja-de-electricidad-por-cable-grande-para-un-parque-e%C3%B3lico-grande-nuevo-en-los-pa%C3%ADses-ba.html
- [40] Gestacur. (21 de Junio de 2021). *Parque Eólico Ballestas y Casetona*. Obtenido de Gestacur: <https://www.gestacur.com/proyectos/parque-eolico-ballestas-y-casetona-vallejera-burgos/>
- [41] Ecay Construcciones. (2023). *Cimentación y accesos para aerogenerador en parque eólico*. Obtenido de Construcciones Ecay: <https://construccionesecay.com/portfolio-items/cimentacion-y-accesos-para-aerogenerador-en-parque-eolico/#>
- [42] Miteco. (Marzo de 2022). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI)*. Obtenido de Miteco: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/Inventario-GEI.aspx>
- [43] Rodríguez Dapena, Á., & Serrano Hidalgo, O. (2020). *Guía metodológica para el cálculo de la huella de carbono en puertos*, Diciembre 2020. Obtenido de Puertos: <https://www.puertos.es/es->

- es/medioambiente/Documents/Guia%20Huella%20de%20Carbono%20-%20Puertos%20del%20Estado%20-%20Web.pdf
- [44] Miteco. (Mayo de 2023). *Factores de emisión*, 22. Obtenido de Miteco: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/factoresemision_tcm30-479095.pdf
- [45] ENEL Green Power. (2020). *Estudio de impacto medioambiental P.E Íberos*. Obtenido de Gobierno de Aragón: https://www.aragon.es/documents/20127/89846210/EsIA+PE+IBEROS_sin_LAT.pdf/82d541a4-1eaf-6c62-7bcf-4c1637613ec7?t=1620202476380
- [46] Miteco. (2020). *Fabricación de aluminio (emisiones de proceso)*. Obtenido de Miteco: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040301-fabric-aluminio_tcm30-502319.pdf
- [47] El Mercurio. (22 de Julio de 2009). *Aumento de emisiones de CO₂ en la minería*. Obtenido de La revista energética de Chile: <https://www.revistaei.cl/2009/07/22/emisiones-de-co2-de-la-mineria-suben-48-en-5-anos-pese-a-menor-produccion-de-cobre/#>
- [48] Ramirez, L. (Marzo de 2014). *Análisis de las emisiones de CO₂ de los materiales usados en palas de aerogeneradores de eje vertical*. Obtenido de Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/303345390_Analisis_de_las_emisiones_de_CO2_de_los_materiales_usados_en_palas_de_aerogeneradores_de_eje_vertical
- [49] Ibavi. (s.f.). *Cálculo de emisiones de CO₂ durante la ejecución de las obras*. Obtenido de Life Reusing Posidonia: http://reusingposidonia.com/dy37jf22/wp-content/uploads/2020/07/C1_CO2_compressed.pdf
- [50] Martinez Ruiz, E. (17 de Mayo de 2022). *Cuánto consume un camión y cómo mejorar su rendimiento*. Obtenido de Gesruta: <https://programadetransporte.es/cuanto-consume-un-camion/#:~:text=El%20dato%20que%20corroborar%20esta,por%20cada%20100%20kil%C3%B3metros%20recorridos.>
- [51] Google Maps. (En línea). Recuperado en 2023, de Google Maps: <https://www.google.com/maps/dir/Aridos+Y+Hormigones+Gracia+S.L.,+Carretera+Teruel-Alca%C3%B1iz,+Alcorisa/40.811872,-0.542325/@40.8566205,-0.6150741,11z/data=!4m9!4m8!1m5!1m1!1s0xd5f14226524ac43:0x4c097f51744f8cc8!2m2!1d-0.3682769!2d40.8981021!1m0!3e0?entr>
- [52] Ayuntamiento de Erandio. (s.f.). *Cuadro de precios*. Obtenido de Ayuntamiento de Erandio: https://www.erandio.eus/es-ES/Ayuntamiento/Perfil-Contratante/2817_BPRESUPUESTO_Fase1/PRECIOS%20UNITARIOS.pdf
- [53] Maquituls. (En línea). *Pison vibrador Baumax*. Recuperado en 2023, de <https://www.maquituls.es/planchas-compactadoras/3732-pison-vibrador-baumax-gs70p.html>
- [54] Gotoyard. (En línea). *Consumo de combustible en excavadoras Caterpillar*. Recuperado en 2023, de Gotoyard: <https://gotoyard.com/consumo-de-combustible-en-excavadoras-caterpillar/>
- [55] Alquimat. (En línea). *Características rodillo vibrante*. Recuperado en 2023, de Alquimat: <https://www.alquimat.com/corro-vibrant-3000-kgrs/?lang=es>
- [56] Gotoyard. (En línea). *Consumo de combustible en motoniveladoras Caterpillar*. Recuperado en 2023, de Gotoyard: <https://gotoyard.com/consumo-de-combustible-en-motoniveladoras-caterpillar/>
- [57] Acciona. (15 de Septiembre de 2016). *¿Quieres saber cómo se hace la cimentación de un aerogenerador?* Obtenido de Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=M_tL-MfNhe8&ab_channel=ACCIONA
- [58] Gobierno de Aragón. (2 de Marzo de 2023). *Parque eólico Azafrán 2 en los términos municipales de Azuara y Almonacid de la Cuba (Zaragoza)*. Obtenido de Gobierno de Aragón: <https://www.aragon.es/-/parque-eolico-azafran-2-en-ls-terminos-municipales-de-azuara-y-almonacid-de-la-cuba-zaragoza->
- [59] Problemas y ecuaciones. (En línea). *Calculadora del área y volumen del tronco de cono*. Recuperado en 2023, de Problemas y ecuaciones: <https://www.problemasyecuaciones.com/geometria3D/volumen/tronco/cono/calculadora-area-volumen-formula-demostracion.html#:~:text=El%20C3%A1rea%20del%20tronco%20es,%C3%A1rea%20de%20las%20bases.&te xt=donde%20r%3DR2%E2%88%92R,%3D%20R%202%20E2%88%92%20>
- [60] Google Maps. (En línea). Recuperado en 2023, de Google Maps: <https://www.google.com/maps/dir/HIERROS+ALCA%C3%91IZ,+S.A.,+Inspecci%C3%B3n+T%C3%A9cnica+de+Veh%C3%ADculos,+Alca%C3%B1iz/40.811872,-0.542325/@40.9473703,-0.6676021,10.5z/data=!4m9!4m8!1m5!1m1!1s0xd5f5c64923f6e2f:0xfa98bc26da55c6f1!2m2!1d-0.099162!2d41.023>

- [61] Yepes Piqueras, V. (Marzo de 2019). *Coefficiente de esponjamiento en movimiento de tierras*. Obtenido de Universitat Politècnica de valencia: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/03/01/coeficiente-de-esponjamiento-en-movimiento-de-tierras/>
- [62] Google Maps. (En línea). Recuperado en 2023, de Google Maps: <https://www.google.com/maps/dir/TRESIDUAL+-+Tratamiento+de+Residuos+Alca%C3%B1iz+S.L/40.811872,-0.542325/@40.91484,-0.5727488,10.25z/data=!4m9!4m8!1m5!1m1!1s0xd5f5badd3e8fdaf:0xae5ea4fed0f18abd!2m2!1d-0.1644968!2d41.1126174!1m0!3e0>
- [63] Wind turbine models. (30 de Abril de 2019). *CSIC H171-5.0*. Obtenido de Wind turbine models: <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/2056-csic-h171-5.0#datasheet>
- [64] Asociación Empresarial Eólica. (2013). *Listado de centros industriales*. Obtenido de Asociación Empresarial Eólica: https://aeolica.org/wp-content/uploads/2013/06/Listado_de_centros_industriales.pdf
- [65] Google Maps. (En línea). Recuperado en 2023, de Google Maps: <https://www.google.com/maps/dir/Puerto+de+Valencia,+Valencia/40.811872,-0.542325/@40.3640009,-1.3646612,8.25z/data=!4m9!4m8!1m5!1m1!1s0xd6049cd3307d0e3:0xbb8ff18eaa1c0eb9!2m2!1d-0.3105582!2d39.4444615!1m0!3e0?entry=tту>
- [66] Google Maps. (En línea). Recuperado en 2023, de Google Maps: <https://www.google.com/maps/dir/Cablerna+S+A+-+Cables+CONDUMEX,+Pol%C3%ADgono+Industrial+Malpica,+Calle+E+Parcela+43-44,+50016+Zaragoza,+Espa%C3%B1a/40.811872,-0.542325/@41.4180816,-0.562219,8.92z/data=!4m9!4m8!1m5!1m1!1s0xd5916de5e29aa5f:0x9c53b5332694b46>
- [67] Weather Spark. (En línea). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Ejulve*. Recuperado en 2023, de Weather Spark: <https://es.weatherspark.com/y/42859/Clima-promedio-en-Ejulve-Espa%C3%B1a-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- [68] Racero Armario, C. (10 de Julio de 2012). *Caracterización del viento*. Obtenido de Biblioteca de la Universidad de Sevilla: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/5116/fichero/Cap%C3%ADtulo+2.pdf>
- [69] Europa Press Sociedad. (2 de Enero de 2023). *Las emisiones de gases de efecto invernadero aumentaron un 5,7% en 2022 en España respecto al año anterior*. Obtenido de Europapress: <https://www.europapress.es/sociedad/noticia-emisiones-gases-efecto-invernadero-aumentaron-57-2022-espana-respecto-ano-anterior-20230102140051.html#:~:text=Las%20emisiones%20de%20gases%20de%20efecto%20invernadero%20en%20Espa%C3%B1a%20en,efecto%20invernader>
- [70] Mercader, M., Ramírez de Arellano, A., & Olivares, M. (20 de Junio de 2012). *Modelo de cuantificación de las emisiones de CO2 producidas en edificación*. Obtenido de Informes de la construcción CSIC: <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/articulo/download/2184/2492/2932>
- [71] CYPE Ingenieros. (En línea). *Placa de anclaje de acero, con pernos atornillados con arandelas, tuerca y contratuerca*. Recuperado en 2023, de Generador de precios: http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/calculaprecio.asp?Valor=250|0|1|EAS006|eas_006_dims:_0_700_150_2|hac_acerolam_todos%20placa_anclaje:_0_0_1_0|eas_rigidizad:_0_0|eas_anclaje:_2_0_80|hac_acero_pernos:_0_0_2#gsc.tab=0
- [72] The Wind Power. (30 de Diciembre de 2022). *Fabricantes y aerogeneradores Vestas*. Obtenido de The Wind Power: https://www.thewindpower.net/turbine_es_33-vestas_v90-3000.php
- [73] Nordic crane. (2 de Diciembre de 2020). *Worlds first electric crawler crane*. Obtenido de Nordic crane: <https://nordiccrane.com/en/worlds-first-electric-crawler-crane/>
- [74] Eiser Pro. (En línea). *Volumen, dimensiones y embalajes de los cables*. Recuperado en 2023, de Eiser Pro: <https://eiserpro.com/articulos/volumen-dimensiones-y-embalajes-de-los-cables/>
- [75] Portillo, G. (s.f.). *Todo lo que conlleva la construcción de un parque eólico*. Obtenido de Renovables verdes: https://www.renovablesverdes.com/parques-eolicos/#Elementos_de_construccion
- [76] Daelim Electric. (2022). *Transformador 10 MVA*. Obtenido de Daelim Electric: <https://daelim-electric.com/es/transformador-10-mva/>
- [77] Ormazabal. (En línea). *Aparamenta de MT*. Recuperado en 2023, de Interbiak Bizkaia: <https://interbiak.bizkaia.eus/fitxategiak/Dokumentuak/pliegos/Anexo%20III%20Parte%20I.pdf?hash=683f0fed9acb62eab0b0ffcf1bc0e57e>
- [78] El instalador electricista. (2022). *Batería de condensadores I-save box*. Obtenido de El instalador electricista: <https://www.elinstaladorelectricista.es/bateria-de-condensadores/3629-bateria-de-condensadores-i-save-box-potencia-efectiva-60-kvar-400v.html>

- [79] Iberapa . (2013). *Edificios prefabricados de hormigón*. Obtenido de Iberapa: https://iberapa.es/catalogos/productos/CENTROS_1_2013E.pdf
- [80] CYPE Ingenieros. (En línea). *Cuneta revestida de hormigón*. Recuperado en 2023, de Generador de precios: http://www.generadordeprecios.info/espacios_urbanos/calculaprecio.asp?Valor=10|0|2|IUD010|iud_010:_0_0_5#gsc.tab=0
- [81] Universidad católica de Chile. (En línea). *Técnicas especiales de hormigonado*. Recuperado en 2023, de Universidad católica de Chile: https://www7.uc.cl/sw_educ/construccion/materiales/html/lab_h/obra_h2.html#:~:text=Cami%C3%B3n%20Bomba&text=La%20altura%20m%C3%A1xima%20de%20bombeo,%20hora%20a%2060%20%2Fhora
- [82] Google Maps. (En línea). Recuperado en 2023, de Google Maps: <https://www.google.com/maps/dir/40.811872,-0.542325/TRANSFORMADORES+GEDELSA+S.A./@41.4887043,-3.9633543,8z/data=!4m1!1m3!2m2!1d-0.542325!2d40.811872!1m5!1m1!1s0xd3f267ce91cf0bb:0x14f83d393b11356a!2m2!1d-5.6544258!2d40.9449428?entry=ttu>
- [83] Clúster marítimo español. (29 de Noviembre de 2016). *¿Cuánto contamina realmente un buque?* Obtenido de Clúster marítimo : <https://www.clustermaritimo.es/2016/11/29/cuanto-contamina-realmente-un-buque/>
- [84] AM CARG international worldwide logistics. (En línea). *¿Cuál es el tiempo de tránsito hasta Extremo Oriente?* Recuperado en 2023, de AM CARG international worldwide logistics: <https://www.amcargo.es/transporte-maritimo/extremo-orient/>
- [85] Fernández Munguía, S. (7 de Febrero de 2019). *Así es el viaje en barco de 156 palas de aerogenerador en su camino hacia España*. Obtenido de Diario renovables: <https://www.diariorenovables.com/2019/02/transporte-barco-palas-aerogenerador.html>
- [86] Eólicas de Fuerteventura. (Marzo de 2019). *Pliego de prescripciones técnicas para la prestación de los servicios de operación y mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo del parque eólico de Cañada de la Barca*. Obtenido de Eólicas de Fuerteventura: <https://contrataciondelestado.es/wps/wcm/connect/633cc1e4-38ef-4bac-8c13-c01f23cd7803/DOC20191226125653PPT.pdf?MOD=AJPERES>
- [87] Google Maps. (En línea). Recuperado en 2023, de Google Maps: <https://www.google.com/maps/dir/LM+Wind+Power+Blades+%EF%BC%88Qinhuangdao%EF%BC%89+Co.,Ltd.,+65+Longhai+Ave,+Haigang+District,+Qinhuangdao,+Hebei,+China,+066318/Tianjin+Port,+Binhai,+China,+300456/@39.2960302,117.5347046,8z/data=!4m14!4m13!1m5!1m1!1s0x3595ddf63fb360>
- [88] Wuxiao group. (En línea). *Wind Turbine Tower*. Recuperado en 2023, de Wuxiao group: <https://www.wuxiaogroup.com/wind-turbine-tower/wind-turbine-tower.html>
- [89] Google Maps. (En línea). Recuperado en 2023, de Google Maps: <https://www.google.com/maps/dir/73R2%2B78M+Qingdao+Wuxiao+Group+Company+Ltd.,+Lanzhou+E+Rd.,+Jiaozhou+City,+Qingdao,+Shandong,+China,+266399/Qingdao+Port,+Shibei+District,+Qingdao,+China/@36.3773742,119.5539687,9z/data=!4m14!4m13!1m5!1m1!1s0x3595ddf63fb360>
- [90] Google Maps. (En línea). Recuperado en 2023, de Google Maps: <https://www.google.com/maps/dir/40.811872,-0.542325/Leroy+Merlin+Puerto+Venecia,+Centro+Comercial+Puerto+Venecia,+C.+Teatro+Malibr%C3%A1n,+10,+50021+Zaragoza/@41.0570173,-1.4069668,8.75z/data=!4m12!4m11!1m3!2m2!1d-0.542325!2d40.811872!1m5!1m1!1s0xd59150c>
- [91] Noticias de Álava. (26 de Julio de 2012). *WEC fabrica en Agurain bujes para grandes aerogeneradores*. Obtenido de Noticias de Álava: <https://www.noticiasdealava.eus/economia/2012/07/26/wec-fabrica-agurain-bujes-grandes-1698000.html>
- [92] Google Maps. (En línea). Recuperado en 2023, de Google Maps: <https://www.google.com/maps/dir/grupo+wec/40.811872,-0.542325/@42.0700847,-3.2553896,7.25z/data=!4m14!4m13!1m5!1m1!1s0xd5021cfa137979d:0xf73a6e7cec1a8a80!2m2!1d-2.412232!2d42.8505845!1m5!1m1!1s0x0:0x73c7ae39eb9d4f1c!2m2!1d-0.542325!2d40.811872!5i1?entry=>
- [93] Google Maps. (En línea). Recuperado en 2023, de Google Maps: <https://www.google.com/maps/dir/Vestas+Wind+Technology+%EF%BC%88China%EF%BC%89+Co.,Ltd.+Nacelles+Assembly+Factory,+Xinyeer+Street,+Binhai+New+District,+Tianj%C3%ADn,+China/Tianjin+Port,+Binhai+New+District,+Tianj%C3%ADn,+China/@39.0554235,117.2826421,10z/>