



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial

ECODISEÑO DE UN AEROGENERADOR

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Alejandro Marín Imperial

Director: Ramón Francisco Pamies Porras

Codirector: Diego José Alcaraz Lorente



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Cartagena,

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 ENERGÍA EÓLICA Y OTROS TIPOS DE ENERGÍA.....	9
1.2 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA EÓLICA	10
1.3 LA ENERGÍA EÓLICA EN ESPAÑA	13
1.4 ENERGÍA EÓLICA EN EL MUNDO	18
1.5 HISTORIA DE LOS AEROGENERADORES.....	21
1.6 TIPOS DE AEROGENERADORES EN LA ACTUALIDAD	27
1.7 COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL TRIPALA	36
1.8 TIPOS DE VIENTOS EN LA ATMÓSFERA	44
1.9 EFECTOS DEL VIENTO EN SUPERFICIES GENERATRICES	47
1.10. EVALUACIÓN DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	49
1.10.1 ENERGÍA CONTENIDA.....	49
1.10.2 HUELLA DE CARBONO	50
2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DEL PROYECTO.....	51
2.1 METODOLOGÍA Y NORMATIVA CONSULTADA	51
2.2 METODOLOGÍA LEGISLATIVA SOBRE TRATAMIENTO DE RESIDUOS.....	52
3. RESULTADOS	58
3.1 LOCALIZACIÓN DEL AEROGENERADOR Y DE LOS PROVEEDORES	58
3.2 CICLO DE FIN DE VIDA DE LOS COMPONENTES DEL AEROGENERADOR.....	59
3.3 MATERIALES QUE SE USAN ACTUALMENTE PARA EL CONJUNTO DEL AEROGENERADOR	60
3.4 GASTOS GLOBALES DE ENERGÍA Y DE EMISIÓN DE CO ₂ A LA ATMÓSFERA, SEGÚN LOS CRITERIOS INICIALES.....	62
3.5 AMORTIZACIÓN ENERGÉTICA DEL AEROGENERADOR SEGÚN LOS CRITERIOS INICIALES	64
3.6 FASE DE OBTENCIÓN DE LA MATERIA PRIMA	66

3.7 FASE DE MANUFACTURA DE LA MATERIA PRIMA.....	68
3.8 FASE DE TRANSPORTE DE LOS COMPONENTES POR CARRETERA	70
3.9 FASE DE TRANSPORTE DE LOS COMPONENTES POR CARRETERA Y RED FERROVIARIA ...	74
3.10 FASE DE TRANSPORTE DE LOS COMPONENTES POR CARRETERA Y RED MARÍTIMA.....	79
3.11 COMPARACIÓN DE LAS DIFERENTES RUTAS DE TRANSPORTE	84
3.12 FASE DE RECICLAJE DE LOS COMPONENTES	86
3.13 ESTUDIO DE PROPIEDADES DE DIFERENTES PROPUESTAS DE MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE LAS PALAS	99
4. RESUMEN, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	105
Bibliografía (por orden alfabético).....	107

Índice de figuras

Figura 1. Tipos de fuentes energéticas, transformación y uso final.	10
Figura 2. Potencias instaladas según tecnología en el año 2011	13
Figura 3. Diferentes potencias eléctricas en España	14
Figura 4. Potencia eléctrica instalada en la península ibérica a finales del año 2019	15
Figura 5. Evolución de la generación eléctrica península renovable	16
Figura 6. Evolución de la potencia eólica instalada por Comunidades autónomas 2005-2011..	16
Figura 7. Incremento de potencia en el año 2011 respecto al año anterior.	17
Figura 8. Producción de energía eólica en todos los países (en GW).	19
Figura 9. Molino en la antigua Mesopotamia	22
Figura 10. Molinos europeos en la Edad Media	22
Figura 11. Molinos holandeses en el siglo XVI	23
Figura 12. Ejemplos de molinos americanos multipala	23
Figura 13. Prototipo de Honnef	25
Figura 14. Prototipo de Heronemus	26
Figura 15. Desarrollos eólicos de 400MW en México	27
Figura 16. Aerogenerador doméstico de eje horizontal	28
Figura 17. Enercon E40/500 aerogenerador de 500kW	28
Figura 18. Aerogeneradores de la compañía Vestas de 4,2MW de potencia	29
Figura 19. Aerogenerador de una pala	29
Figura 20. Aerogenerador de dos palas	30
Figura 21. Aerogenerador de tres palas	30
Figura 22. Torre en celosía de un aerogenerador	31
Figura 23. Torres de acero tubular de un aerogenerador	31
Figura 24. Torres de hormigón	32

Figura 25. Aerogenerador Darrieus	33
Figura 26. Aerogenerador Savonius	34
Figura 27. Aerogenerador de eje horizontal lento	35
Figura 28. Vista interior de conjunto de la parte superior de un aerogenerador	36
Figura 29. Vista de conjunto de la base de un aerogenerador	36
Figura 30. Buje aerogenerador horizontal tripala	36
Figura 31. Cono del buje	37
Figura 32. Pala de un aerogenerador	37
Figura 33. Freno de disco de un aerogenerador	38
Figura 34. Freno de disco de un aerogenerador	38
Figura 35. Controlador electrónico de un aerogenerador	39
Figura 36. Anemómetro de un aerogenerador	39
Figura 37. Veleta de un aerogenerador	40
Figura 38. Góndola de un aerogenerador	40
Figura 39. Bastidor o bancada de la góndola de un aerogenerador	41
Figura 40. Generador de un aerogenerador	41
Figura 41. Torre de un aerogenerador	42
Figura 42. Transformador de un aerogenerador	43
Figura 43. Cimentación de un aerogenerador	43
Figura 44. Vientos macro en el planeta	44
Figura 45. Funcionamiento de los vientos en colinas	45
Figura 46. Perfiles de velocidad de viento en función de las características topográficas del terreno	45
Figura 47. Fuerzas de sustentación, arrastre y resultante en un perfil aerodinámico	47
Figura 48. Esfuerzos en una pala en movimiento	48
Figura 49. Diferentes curvas de potencia	49
Figura 50. Diferentes modelos de gestión de residuos	57

Figura 51. Energía consumida (en azul) y huella de carbono (en naranja) de cada una de las etapas en escala logarítmica.	63
Figura 52. Energía y huella de carbono ligadas a la obtención de materia prima para cada uno de los componentes.	68
Figura 53. Energía y huella de carbono ligadas a la manufactura de cada uno de los componentes.	70
Figura 54. Ruta de transporte por carretera de todos los elementos del aerogenerador a excepción de la cimentación.	71
Figura 55. Ruta de transporte por carretera de la cimentación del aerogenerador.	72
Figura 56. Energía y huella de carbono ligadas al transporte de cada uno de los componentes.	74
Figura 57. Primer tramo de transporte.	75
Figura 58. Segundo tramo de transporte.	76
Figura 59. Tercer tramo de transporte.	77
Figura 60. Energía y huella de carbono ligadas al transporte de cada uno de los componentes.	79
Figura 61. Primer tramo de transporte.	80
Figura 62. Segundo tramo de transporte.	81
Figura 63. Tercer tramo de transporte.	82
Figura 64. Energía y huella de carbono ligadas al transporte de cada uno de los componentes.	84
Figura 65. Energía y huella de carbono del reciclaje de las palas.	89
Figura 66. Energía y huella de carbono del reciclaje de todos los componentes.	94
Figura 67. Palas de aerogeneradores en un vertedero	96
Figura 68. Energía y huella de carbono para los diferentes procesos de final de vida útil de las palas.	98
Figura 69. Precio y energía totales para la producción de las palas según los diferentes materiales estudiados.	103

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen ventajas e inconvenientes de la energía eólica.....	12
Tabla 2. Potencia eléctrica en España	14
Tabla 3. Potencia eólica por Comunidades Autónomas	18
Tabla 4. Instalación energética de continentes en los años 2017 y 2018.....	20
Tabla 5. Ranking de los países que más energía eólica tienen instalada en GW	20
Tabla 6. Tabla estimativa de vientos esperados a distintas alturas	46
Tabla 7. Lista de componentes de los que está fabricado el aerogenerador	61
Tabla 8. Valores de energía consumida y huella de carbono de los materiales extraídos de la tabla 7.....	62
Tabla 9. Obtención de la materia prima para los diferentes componentes del aerogenerador.	67
Tabla 10. Impacto ambiental de los procesos de fabricación.....	69
Tabla 11. Medio de transporte por carretera	72
Tabla 12. Rutas de transporte de los materiales por carretera	73
Tabla 13. Medio de transporte por carretera y por red ferroviaria.....	77
Tabla 14. Rutas de transporte de los materiales por carretera y por red ferroviaria.....	78
Tabla 15. Medio de transporte por carretera y red marítima.	82
Tabla 16. Rutas de transporte de los componentes por carretera y red marítima.	83
Tabla 17. Comparación de diferentes rutas de transporte.....	85
Tabla 18. Energía del reciclaje de las palas.	87
Tabla 19. Producción de huella de carbono del reciclaje de las palas.....	88
Tabla 20. Componentes del aerogenerador aptos para reciclaje.....	90
Tabla 21. Energía del reciclaje de todos los componentes.	92
Tabla 22. Huella de carbono del reciclaje de todos los componentes.....	93
Tabla 23. Energía usada para diferentes procesos de final de vida útil de las palas.	97

Tabla 24. Huella de carbono producida para diferentes procesos de final de vida útil de las palas.
..... 97

Tabla 25. Propiedades de los diferentes materiales para las palas del aerogenerador. 101

Tabla 26. Estudio del conjunto de diferentes materiales para las palas del aerogenerador.... 102

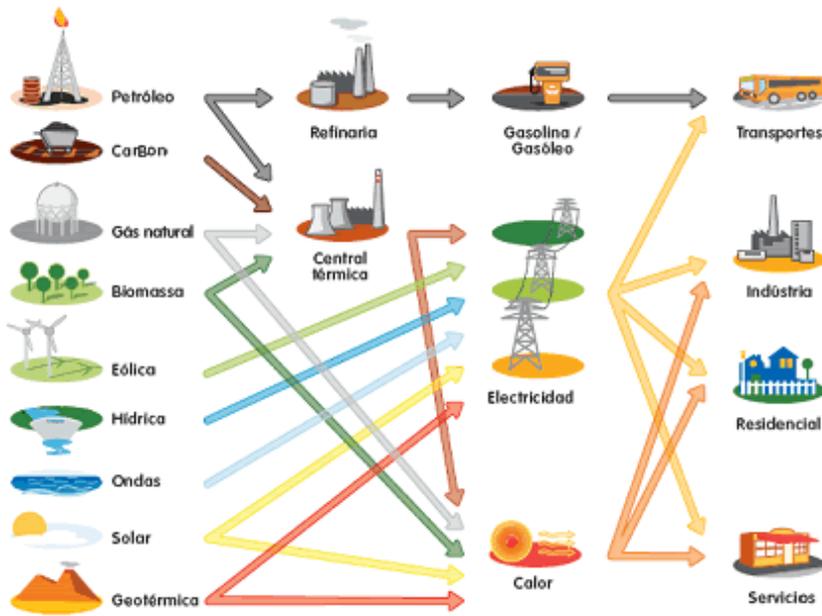
1. INTRODUCCIÓN

1.1 ENERGÍA EÓLICA Y OTROS TIPOS DE ENERGÍA

El viento ha sido utilizado por la humanidad desde hace muchos siglos para diferentes cometidos, tales como para la propulsión de naves, u otros más antiguos como para moler grano o para la extracción de agua. Recientemente se emplea este recurso como una vía para obtener energía eléctrica por medio del uso de aerogeneradores. Esta necesidad surgió a raíz de la concienciación de que el uso que se estaba realizando en ese momento de combustibles fósiles llevaría al agotamiento de esta forma de obtención de energía en un futuro no muy lejano si no se buscaba una alternativa que permitiese reducir su uso. Así surgió la solución de obtener esta energía que hasta ahora se producía con combustibles fósiles con energía eólica, ya que se trata de una energía la cual nunca se agotará, pues el viento es una energía renovable. Por otro lado también presenta la ventaja de que se trata de una energía limpia, que en la obtención de energía no expulsa gases nocivos a la atmósfera, al contrario que las energías basadas la combustión de combustibles fósiles, que producen el tan conocido efecto invernadero en la atmósfera, el cual actualmente está produciendo unos cambios de temperatura importantes en la atmósfera y debe ser reducido mediante el cese de la producción de gases de efecto invernadero.

Es cierto que además de la combustión de combustibles fósiles también desde la antigüedad se lleva usando un recurso de obtención de energía que a priori es considerado limpio en cuanto a la producción de gases de efecto invernadero, la energía nuclear. Pero también de un tipo de energía el cual es muy peligroso, y el cual debe de ser cuidadosamente controlado para que no se produzca ningún fallo en las centrales nucleares. Pues un fallo puede provocar la destrucción de un gran área alrededor de la situación de la central nuclear, además de los numerosos años en los cuales esta superficie se hace inhabitable debido a la radiación que no es eliminada hasta dentro de muchos años. Otro aspecto del cual hay que tomar mucha precaución es la del tratamiento de los residuos generados en las centrales nucleares. Con lo cual la ventaja en cuanto a seguridad por parte de la energía eólica es clara respecto a la nuclear.

Figura 1. Tipos de fuentes energéticas, transformación y uso final (tiposdeenergia.info, 2012).



Además de la energía eólica es sabido que existen otros tipos de energías renovables: geotérmica, biocombustibles, mareomotriz, solar, etc. Pero podríamos decir que las dos principales con más desarrollo, eficacia e implementación actualmente son la eólica y la solar. A esto hay que añadir que la implementación de este tipo de energías en España es conveniente debido a la cantidad de horas de sol y las condiciones de viento que presenta la mayoría del territorio español. En concreto la energía eólica es una apuesta muy prometedora actualmente debido a las ayudas estatales que se le dan, lo cual muchas veces la convierte en la alternativa óptima (eadic, escuela técnica, 2013).

1.2 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA EÓLICA

Dentro de las ventajas podemos incluir que actualmente sólo ella puede producir electricidad a gran escala. Su precio productivo se puede comparar con el de tecnologías tradicionales. Se trata de una energía limpia que no emite gases nocivos en la producción de energía, evitando la emisión de una gran cantidad de CO₂ al año. La mejora económica de la zona de instalación, ya que pueden traer contratos millonarios además de la recaudación por labores de reparación

mientras dura el proyecto, que sería alrededor de 25 años. En determinadas situaciones se impulsa la cultura energética en la zona en la que se ha implantado mediante centros de formación para trabajadores. Dicho sector es el que está experimentando un mayor desarrollo, con 250.000 personas trabajando sólo en Europa. Además del sector de la construcción se benefician otros sectores involucrados en el desarrollo, como son consultorías, servicios financieros y jurídicos. Se trata de una energía confiable en términos de abastecimiento, ya que no tenemos que importarla de ningún lado, y podemos despreocuparnos de la intermitencia de dicho abastecimiento. Se trata de una tecnología competente, pues los aerogeneradores actuales son capaces de generar energía aproximadamente un 95% del tiempo (eadic, escuela técnica, 2013).

Sobre las desventajas podemos decir que debido a la irregularidad de intensidad con la que sopla el viento se requiere un sistema de producción que debe de ser complementado con otro cuando las rachas de viento no sean intensas, energía que puede ser producida por combustibles fósiles, nucleares o energía hidroeléctrica. Otro problema es que la transmisión de la energía es costosa en general, debido a la lejanía entre las regiones de producción y las de consumo. Al igual que otras energías renovables está fuertemente influenciada por subsidios y ayudas estatales. Aún no se ha conseguido almacenar la energía producida, lo cual provoca que a veces se produzca más energía de la requerida, por lo que para optimizarla se produce la detención productiva de diferentes fuentes para poder aprovechar la energía eólica producida. Estas instalaciones provocan algunos impactos como el visual y el acústico. A pesar del gran avance que se está produciendo en la reducción de costes, a día de hoy este tipo de energía sigue siendo más caro que otros tipos de energía convencionales (eadic, escuela técnica, 2013).

Tabla 1. Resumen ventajas e inconvenientes de la energía eólica.

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Capaz de producir electricidad a gran escala	A veces debe de ser complementada con otras energías debido a irregularidad en la intensidad del viento
Precio de producción energético razonable en comparación con fuentes convencionales	Transmisión de energía costosa debido a largas distancias
Energía limpia	Fuertemente influenciada por ayudas estatales y subsidios
Atrae importantes contratos económicos a empresas locales e ingresos por mantenimiento	No se puede almacenar la energía producida
Impulsa cultura energética mediante centros de formación	Impacto visual y acústico
Sector energético con crecimiento más rápido	A pesar de los avances esta energía sigue siendo más cara de producir que otros tipos de energía convencionales
Se benefician otros sectores como consultorías, servicios financieros y jurídicos.	
Abastecimiento inagotable de viento	
Los aerogeneradores son eficientes	

1.3 LA ENERGÍA EÓLICA EN ESPAÑA

En el año 1979 se produjeron en España los primeros estudios destinados a la fabricación de una industria del sector eólico de unos 100kW. Pero no fue a partir de los años 90 cuando se produjo en el mercado español una gran evolución. Impulsándose más aún en el año 2007 tras la aprobación del Real Decreto 661/2007. Tras ese acontecimiento dicho sector asume unas metas difíciles que devuelven unas grandes sumas de dinero, atrayendo a empresas de todo el mundo, consolidando esta industria.

El aumento de potencia eólica instalada en el sistema eléctrico español según la Red Eléctrica de España (REE) fue de 1879MW en 2011, logrando superar los 100GW instalados totales (eadic, escuela técnica, 2013). En la siguiente figura podemos ver como la energía eólica supone el 20,24% de la potencia eléctrica total instalada.

Figura 2 Potencias instaladas según tecnología en el año 2011. (eadic, escuela técnica, 2013)

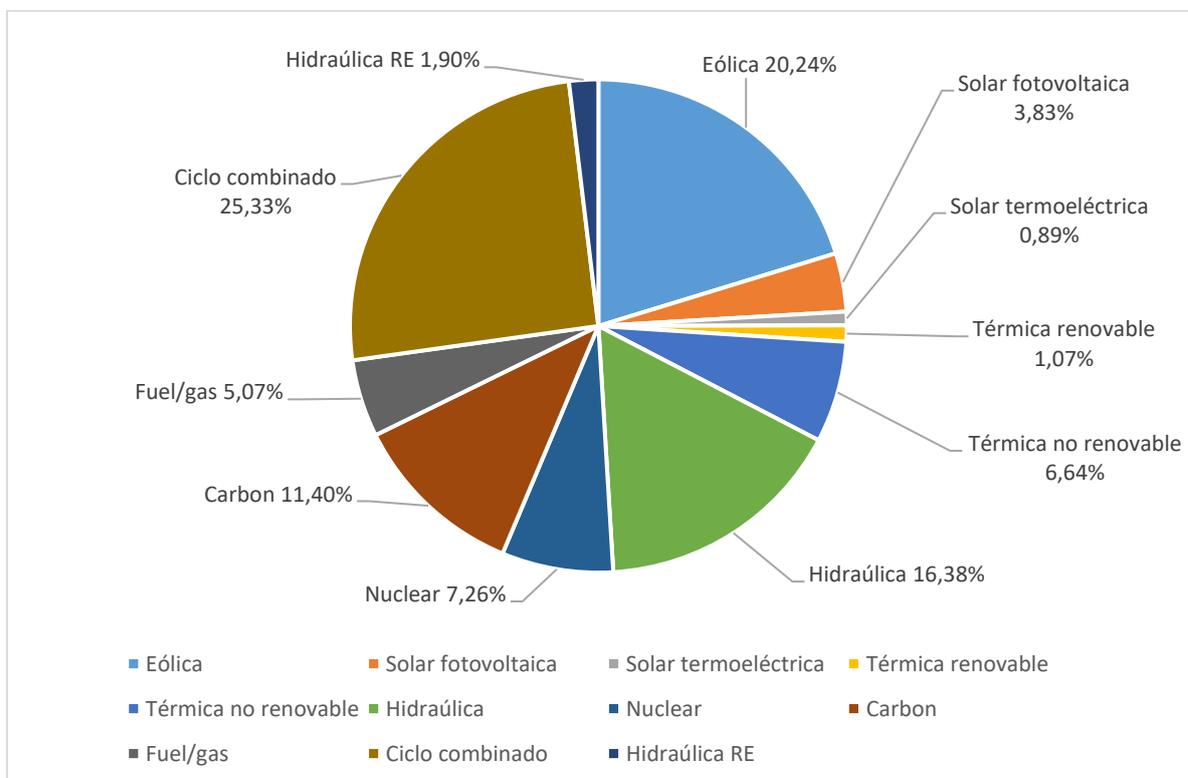


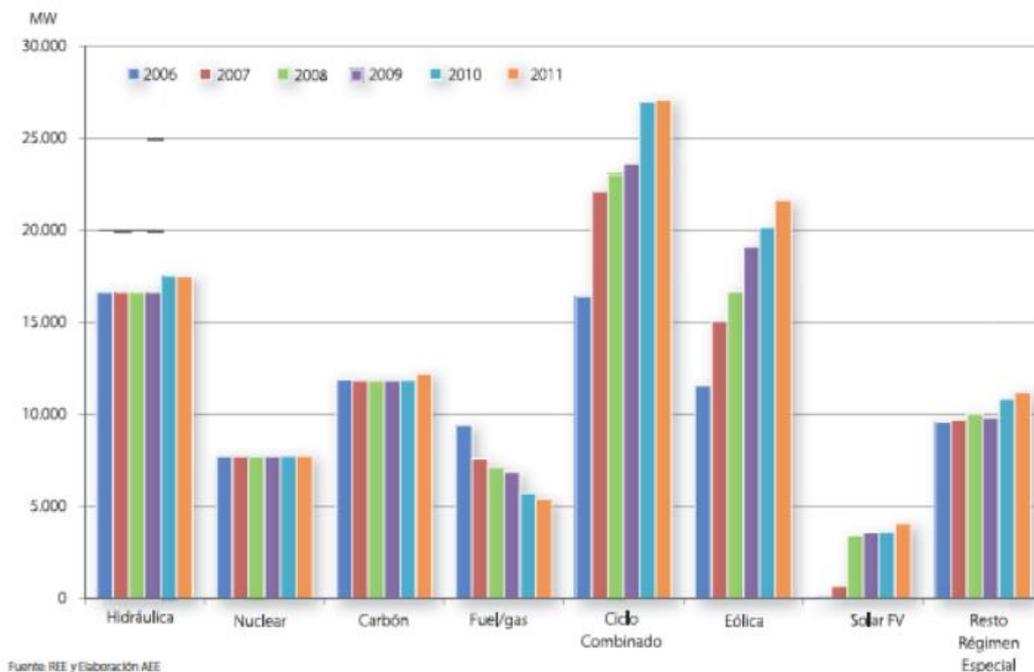
Tabla 2. Potencia eléctrica en España (eadic, escuela técnica, 2013).

Potencia instalada a 31/12/2011	Sistema peninsular (MW)	Sistemas extra-peninsulares (MW)	Total nacional (MW)	% sobre el total
Hidráulica	17.537	1	17.538	16,38%
Nuclear	7.777		7.777	7,26%
Carbón ⁽¹⁾	11.700	510	12.210	11,40%
Fuel/gas	2.540	2.885	5.425	5,07%
Ciclo Combinado	25.269	1.854	27.123	25,33%
Total RÉGIMEN ORDINARIO	64.823	5.250	70.073	65,43%
Hidráulica RE	2.036	0,5	2.037	1,90%
Eólica	21.527	146	21.673	20,24%
Solar fotovoltaica	3.903	196	4.099	3,83%
Solar termoeléctrica	949		949	0,89%
Térmica renovable	1.062	80	1.142	1,07%
Térmica no renovable	7.071	44	7.115	6,64%
Total RÉGIMEN ESPECIAL	36.548	467	37.015	34,57%
TOTAL GENERAL	101.371	5.717	107.088	100%

(1) A partir del 1 de enero de 2011 incluye GICC (Elcogás)

Fuente: REE y AEE

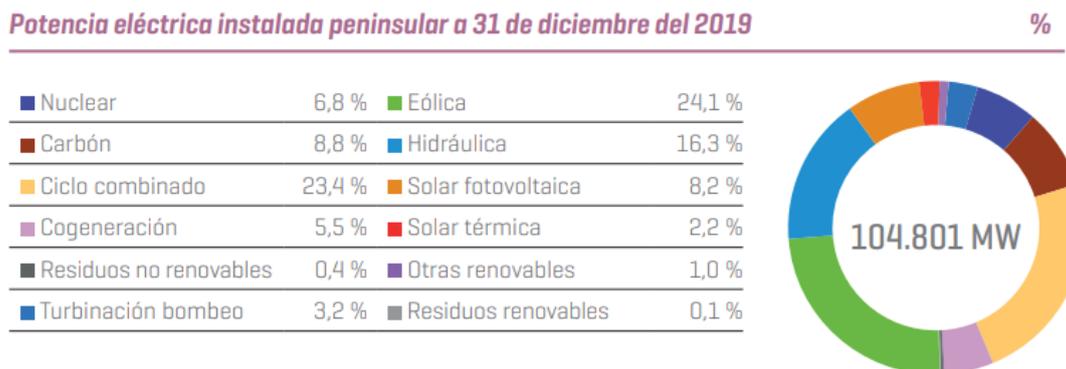
Figura 3. Diferentes potencias eléctricas en España (eadic, escuela técnica, 2013).



A la vista de los resultados gráficos podemos contemplar como desde el año 2006 hasta el año 2011 se ha producido un constante aumento de la potencia eólica instalada en el territorio español, convirtiéndose en una de las principales fuentes de obtención de energía eléctrica.

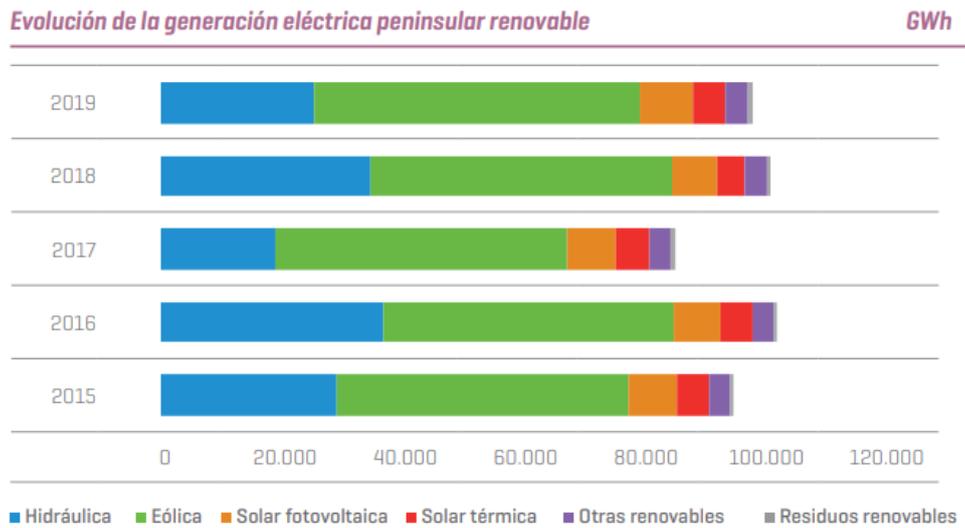
Si contrastamos estos datos con los más recientes de la misma página web de donde fueron recopilados podemos ver como la potencia total instalada en la península sigue teniendo unos valores próximos a los que había en el año 2011, con una potencia eléctrica instalada de 104,801GW. Pero en cambio podemos observar un notable progreso de la energía eólica, la cual aumenta casi un 4% en el año 2019 respecto al año 2011, en detrimento de otras energías no renovables como son el ciclo combinado que baja un 2%, el carbón que baja casi un 3%. Con lo cual podemos asumir que se ha producido un cambio favorable en relación a la utilización de energías renovables en nuestro país tras tantos años ha ido impulsando sobre todo las energías eólica y fotovoltaica dentro de las energías renovables, y bajando el uso de energías no renovables tan contaminantes como son la energía obtenida a partir del carbón. (Red eléctrica de España, 2020)

Figura 4. Potencia eléctrica instalada en la península ibérica a finales del año 2019 (Red eléctrica de España, 2020).



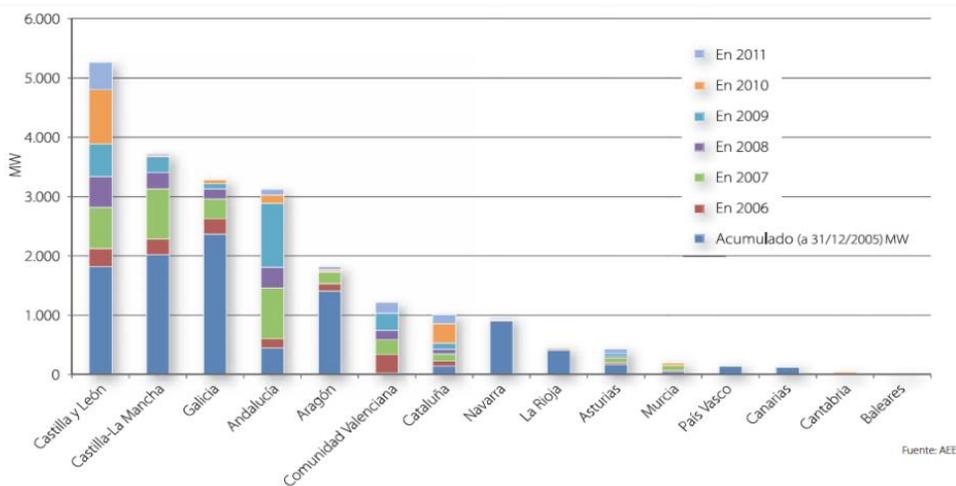
A continuación podemos verificar como dentro de las energías renovables la energía eólica ha sido la energía líder en cuanto a generación eléctrica a lo largo de los últimos años, seguida de cerca en algunos años de la energía hidráulica, que fluctúa considerablemente cada año. Además podemos ver como este último año se ha producido un pequeño aumento de la generación eléctrica por parte del sector fotovoltaico (Red eléctrica de España, 2020).

Figura 5. Evolución de la generación eléctrica península renovable (Red eléctrica de España, 2020).



En cuanto a la distribución territorial de potencia eólica instalada en España tenemos los siguientes resultados según comunidades autónomas:

Figura 6. Evolución de la potencia eólica instalada por Comunidades autónomas 2005-2011 (eadic, escuela técnica, 2013)

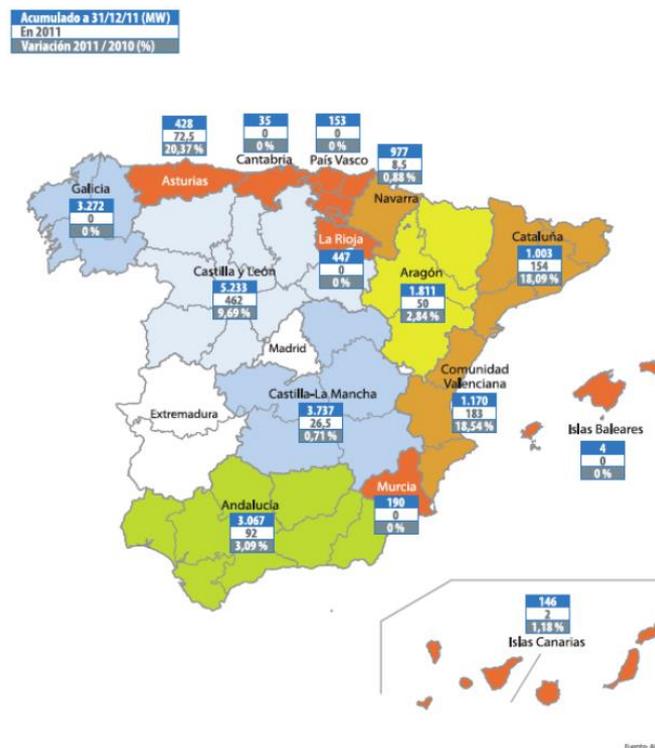


Podemos ver como la comunidad autónoma que lidera el ranking de potencia eólica es Castilla y León, la cual produce un porcentaje sobre el total del 44%.

Observamos que las primeras tres comunidades han sido comunidades donde se ha apostado por la energía eólica también antes del año 2005, lo cual podemos ver según el tamaño de su barra azul oscuro. Algo que no se ha producido en nuestra comunidad, la Región de Murcia, en la cual los valores totales de potencia eólica son de los más bajos de las comunidades españolas, y en la cual se ha empezado a apostar por la energía eólica solamente durante los últimos años, pudiendo distinguir el año 2010.

Complementariamente podemos ver en la siguiente figura el mapa de España las diferentes Comunidades Autónomas el número de MW que hay instalados procedentes únicamente de energía eólica. En azul los MW instalados totales hasta el año 2011, en blanco los MW que fueron instalados únicamente en el año 2011 y en gris el porcentaje de variación desde el año 2010 hasta el año 2011.

Figura 7. Incremento de potencia en el año 2011 respecto al año anterior (eadic, escuela técnica, 2013).



Si miramos los datos aportados por la asociación empresarial eólica podemos observar como la potencia eólica instalada en todas las comunidades ha sufrido un ligero aumento en general. Nuestra región, la Región de Murcia, con una instalación de 262MW sufre un notable aumento

respecto al año 2011 cuando la potencia eólica instalada era de 190MW (Asociación Empresarial Eólica, 2020). Aportando una generación eléctrica en porcentaje sobre el total del territorio español del 0,245%.

Tabla 3. Potencia eólica por Comunidades Autónomas (Asociación Empresarial Eólica, 2020).

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

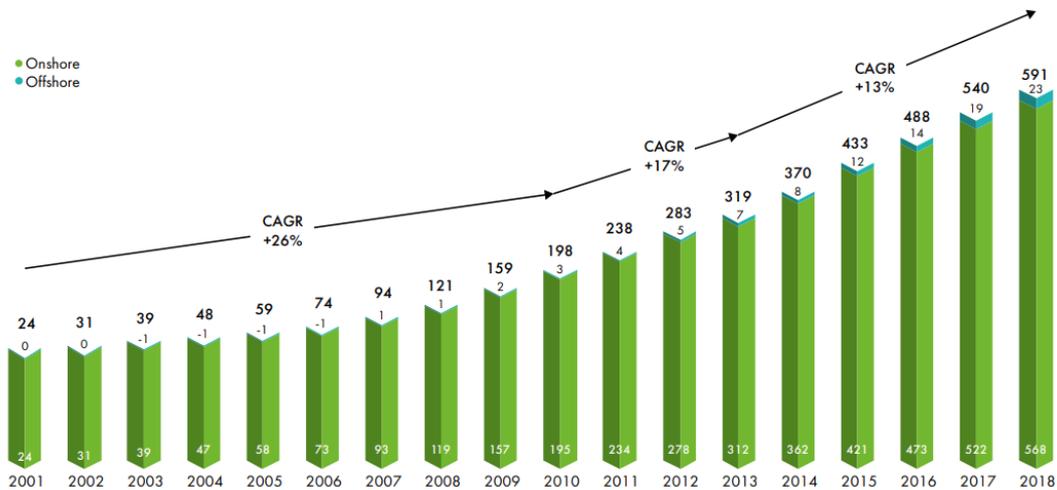
1.4 ENERGÍA EÓLICA EN EL MUNDO

Observaremos cual es la posición de nuestro país en cuanto a producción de energía eólica en comparación con otros países del mundo. Y podremos identificar cuáles son los países que más apuestan por este tipo de energía renovable y como ha sido su evolución con el paso de los años hasta el año 2018, que es el año más reciente del que tenemos datos según el consejo global de energía eólica (Global Wind Energy Council (GWEC)).

Para empezar vamos a ver cuál es el número de GW instalados en todo el mundo destinados a la producción de energía eólica a lo largo de los años.

Figura 8. Producción de energía eólica en todos los países (en GW) (GWEC, 2019).

Historic development of total installations
GW



A la vista del gráfico podemos contemplar como el número de GW instalados en todo el mundo va en continuo incremento desde el año 2001 hasta el año 2018, tanto de aerogeneradores onshore y offshore. Alcanzando el año 2018 una potencia total de 591GW, de los cuales 568 son de aerogeneradores onshore y 23 de generadores offshore. Lo cual supone un aumento de 51GW respecto al año anterior (GWEC, 2019).

Si quisiéramos saber cuál es el total de energía eólica instalada por cada país en concreto, y además saber cuál ha sido el incremento de su inversión en este tipo de energía en los dos últimos años tendríamos que mirar la siguiente tabla, la cual agrupa los distintos continentes y algunos de los países que los componen. Además, diferencia entre aerogeneradores onshore (a la izquierda) y aerogeneradores offshore (a la derecha). Curiosamente no incluye a España dentro de Europa, pero como ya tenemos estos datos del anterior apartado no es un problema, pues sabemos que en el año 2018 España tiene un total de 23.484MW instalados de energía eólica. También sabemos que en el año 2011 este número era de 21.673MW, lo cual no supone un gran aumento (GWEC, 2019).

Tabla 4. Instalación energética de continentes en los años 2017 y 2018 (GWEC, 2019).

MW, onshore	Instalaciones nuevas 2017	Instalaciones totales 2017	Instalaciones nuevas 2018	Instalaciones totales 2018
Total	48996	521774	46820	568409
América	10572	123091	11940	135041
Africa	632	4758	962	5720
Asia	23927	231419	24902	256320
Europa	13865	162506	9016	171328

MW, offshore	Instalaciones nuevas 2017	Instalaciones totales 2017	Instalaciones nuevas 2018	Instalaciones totales 2018
Total	4472	18658	4496	23140
América	0	30	0	30
Asia	1276	2998	1835	4832
Europa	3196	15630	2661	18278

Tabla 5. Ranking de los países que más energía eólica tienen instalada en GW (energías renovables , 2019).

Potencia total instalada por países

Country/Region1	2018	2017	2016	2015
China	221'630	195'730	168'730	148'000
United States	96'363	88'775	82'033	73'867
Germany	59'313	56'190	50'019	45'192
India**	35'017	32'879	28'279	24'759
Spain*	23'031	23'026	23'020	22'987
United Kingdom	20'743	17'852	14'512	13'614
France	15'313	13'760	12'065	10'293
Brazil**	14'490	12'763	10'800	8'715
Canada	12'816	12'239	11'898	11'205
Italy*	10'090	9'700	9'257	8'958
Rest of the World*	91'473	83'473	76'325	67'695
Total general	600'278	546'388	486'939	435'284

En la última tabla podemos ver un ranking de los países que más potencia eólica tienen instalada, así como su variación entre los años 2015 y 2018. España se encuentra en la quinta posición de la tabla con unos 23GW. Podemos ver como la inversión que ha hecho España en incrementar la potencia eólica esos 4 años ha sido prácticamente nula, mientras otros países como China, Estados Unidos, Alemania, India, Reino Unido, Francia y Brasil han ido incrementando su potencia considerablemente durante este periodo. Hablando de China podemos observar cómo casi duplica en cuatro años su potencia instalada, teniendo ella una potencia instalada que corresponde a más de un tercio de la potencia aportada por el total de todos los países del mundo, en cuanto a potencia eólica (energías renovables , 2019).

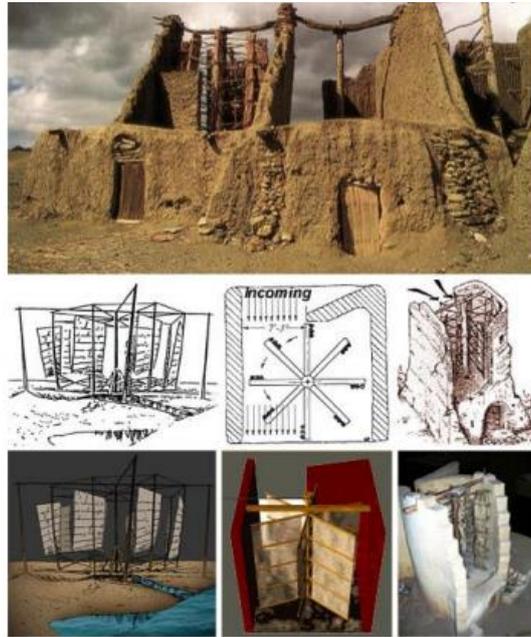
De seguir a este ritmo seguramente en un par de años España pase de la quinta posición a la octava posición o incluso más debajo de la tabla dependiendo de los otros países menos aventajados actualmente, ya que en comparación con otros países el desarrollo de la potencia eólica es casi nulo conforme a los últimos registros (energías renovables , 2019).

1.5 HISTORIA DE LOS AEROGENERADORES

La utilización de la energía eólica surgió para cubrir la necesidad de realizar trabajo mecánico, el cual era realizado tradicionalmente por animales.

Los molinos de viento ya fueron utilizados varios siglos antes de J.C, más concretamente en el siglo XVII antes de J.C. cuando fueron utilizados entre otras cosas para moler diferentes cereales y para regadío. En la siguiente figura podemos ver cómo eran este tipo de máquinas eólicas, que contaban con un eje de giro perpendicular a la superficie terrestre junto al cual giran solidariamente numerosas palas fabricadas de diferentes tipos de maderas, a las cuales se les colocaban telas (eadic, escuela técnica, 2013).

Figura 9. Molino en la antigua Mesopotamia (eadic, escuela técnica, 2013).



En Europa este tipo de molino se desarrolló entre los siglos V y XV. En su fase inicial se expandió por algunos países costeros del mediterráneo, así como por el país Galo. Alternativamente a los molinos orientales, los cuales eran principalmente de eje vertical, los molinos occidentales en el continente europeo fueron desarrollados con eje horizontal (eadic, escuela técnica, 2013).

Figura 10. Molinos europeos en la Edad Media (eadic, escuela técnica, 2013).



Conforme avanzó la Edad Media se fueron multiplicando la existencia de estos aparatos, los cuales se usaban para diversos cometidos, los españoles por ejemplo se utilizan para moler grano. En el siglo XVI los también conocidos molinos holandeses fueron utilizados para la desecación de los polders en los cuales el molino cumple la función de bomba de drenaje de agua mediante el movimiento de sus palas, todo esto para drenar los humedales que había cerca del mar del norte para convertirlos en tierra firme apta para el cultivo u otros usos (eadic, escuela técnica, 2013).

Figura 11. Molinos holandeses en el siglo XVI (eadic, escuela técnica, 2013)



En 1883 Stewart Perry diseñó el famoso molino americano multipala. Un pequeño molino de unos 3 metros de diámetro que ha sido utilizado para bombeo. Ha sido el molino más vendido de la historia, llegándose a fabricar más de 6 millones de unidades, de las cuales aún a día de hoy siguen varios miles en funcionamiento (eadic, escuela técnica, 2013).

Figura 12. Ejemplos de molinos americanos multipala (eadic, escuela técnica, 2013).



A principios del siglo XX podemos ver como en el diseño de las palas de los aerogeneradores se tiene en cuenta el perfil de las palas para hacerlo más aerodinámico, fijándose en el diseño utilizado para las alas de los aviones. Con el cometido de conseguir unas velocidades en la punta de la pala que fueran mayores que las del viento incidente, consiguiéndose que esta se multiplicase por cuatro o por cinco (eadic, escuela técnica, 2013).

Se buscaba esto precisamente debido a la demostración de Betz en el que reflejaba un aumento del rendimiento de los aerogeneradores ligado al aumento de la velocidad de rotación. También se dio cuenta de que a mayor velocidad de rotación la importancia del número de palas era cada vez menor, por lo que se podía incluso construir un aerogenerador con solo una pala sin que disminuyese el rendimiento del aerogenerador considerablemente (eadic, escuela técnica, 2013).

A pesar de los avances realizados la energía eólica seguía sin ser atractiva económicamente, pues aún presentaba dificultades tales como la variabilidad del viento o la imposibilidad del almacenaje. Después de la Primera Guerra Mundial los recursos energéticos tradicionales dejaron de ser los recursos más relevantes, ya que presentaban la desventaja de la sumisión entre los países que consumían hacia los países que producían estas energías, es por eso que sólo se invertía en la obtención energética en el propio país cuando se hacía notoria esta sumisión hacia otro país productor (eadic, escuela técnica, 2013).

Las turbinas eólicas sufrieron un desarrollo importante en dos caminos principalmente:

Por un lado, en la comercialización de aerogeneradores de baja potencia, destinados a la generación de electricidad para áreas rurales, a las que todavía no habían llegado las redes de electrificación. Por el otro lado en el desarrollo de grandes plantas eólicas capaces de generar electricidad a gran escala (eadic, escuela técnica, 2013).

Durante este periodo se realizaron numerosos programas de desarrollo eólicos mejorando diferentes elementos como la adquisición de información sobre recursos de los que disponemos

o datos relacionados con la meteorología, el cálculo óptimo de situación de la obra o el diseño de plantas de alta generación energética (eadic, escuela técnica, 2013).

Cabe destacar el modelo de Honnef, el cual consiste en una torre de 300 metros de altura, con 3 rotores de 150 metros de diámetro, capaces de generar 75MW. El prototipo de esta central fue destruido en una incursión aérea (eadic, escuela técnica, 2013).

Figura 13. Prototipo de Honnef (eadic, escuela técnica, 2013).



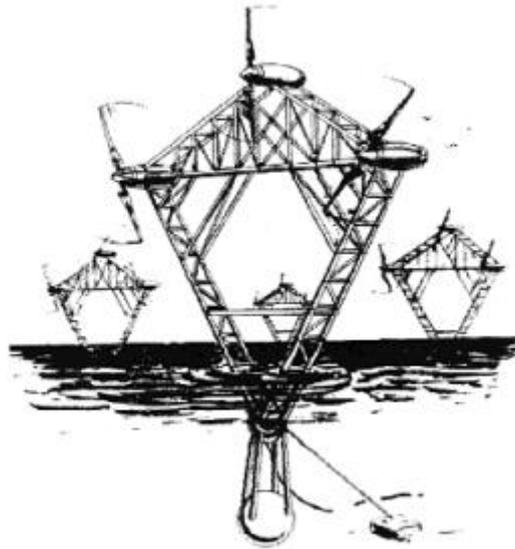
Entre los años 1970 y 1986 se sufrió un continuo incremento en el coste del petróleo, el cual volvió a incentivar el desarrollo de los aerogeneradores como fuente de energía alternativa, capaz de producir electricidad a precios competitivos (eadic, escuela técnica, 2013).

También se produjo un descenso del uso de los aerogeneradores de baja potencia situados en las zonas rurales aisladas debido al desarrollo de redes eléctricas que eran capaces de abastecer poblaciones aisladas (eadic, escuela técnica, 2013).

Durante estos años se realizaron numerosos proyectos experimentales en esta materia. Es destacable el realizado en los años setenta que trata de la instalación de torres de gran altura

que están compuestas por tres ejes de rotación de gran diámetro que son capaces de aportar gran generación energética, cuyo modelo fue denominado por el nombre de su creador Heronemus. Este modelo de aerogenerador fue el antecedente de los aerogeneradores offshore que podemos ver actualmente (eadic, escuela técnica, 2013).

Figura 14. Prototipo de Heronemus (eadic, escuela técnica, 2013).



“A finales de 1991 la potencia eólica instalada en la red eléctrica danesa ascendía a 410 MW con una producción de energía equivalente al 2,3% del consumo del país. En Alemania la potencia instalada era de 100 MW y estaba previsto alcanzar los 250 MW en breve plazo. Holanda contaba con 80 MW de potencia instalada y 100 más en construcción. El programa eólico holandés tenía previsto alcanzar los 1.000 MW hacia el año 2000 y los 2.000 MW en el 2010. España tenía en fase de realización varios proyectos que completarían los 50 MW hacia finales de 1992. El Plan de Energías Renovables, dentro del Plan Energético Nacional 1992/2000 alcanzó los 100 MW a finales de 1995, aunque evidentemente todos sabemos que las previsiones y realidad actual sobrepasaron con creces esas cifras” (eadic, escuela técnica, 2013).

En cuanto al tipo de aerogeneradores más utilizados se podían clasificar en dos grupos: las turbinas de eje horizontal de dos o tres palas y las turbinas Darrieux de eje vertical (eadic, escuela técnica, 2013).

En los últimos años se produjo sobre todo un aumento de la potencia individual de los aerogeneradores, que hasta 1990 estuvo en el rango de los 100kW, incrementándose en la década de los años noventa de 0,5MW a 1,2MW y llegando actualmente hasta una potencia máxima de unos 3MW (eadic, escuela técnica, 2013).

La tendencia sigue generalizada en la construcción de parques eólicos de gran tamaño, de entre 25-50MW, que en algunos casos superan por mucho esta potencia, como es el caso de la región mexicana de Oaxaca, que cuenta con un parque eólico de 400MW (eadic, escuela técnica, 2013).

Figura 15. Desarrollos eólicos de 400MW en México (eadic, escuela técnica, 2013).



1.6 TIPOS DE AEROGENERADORES EN LA ACTUALIDAD

Podríamos hacer una diferenciación de los tipos de aerogeneradores en función de varios parámetros, algunos de ellos podrían ser:

Aerogeneradores según la potencia:

- Turbinas de baja potencia: son los aerogeneradores que tienen una potencia aproximada de 1kW, usados principalmente para autoconsumo doméstico (renovetec, 2019).

Figura 16. Aerogenerador doméstico de eje horizontal (Archiexpo, s.f.).



- Turbinas de media potencia: tienen una potencia aproximada entre 10kW y 1MW. Suelen ser aerogeneradores antiguos.

Figura 17. Enercon E40/500 aerogenerador de 500kW (thewindpower, 2020).



- Turbinas de alta potencia: tienen una potencia mayor de 1MW. Suelen ser generadores de gran tamaño y de producción reciente. Forman parte principalmente de parques eólicos.

Figura 18. Aerogeneradores de la compañía Vestas de 4,2MW de potencia (Asociación Empresarial Eólica, 2018).



Aerogeneradores horizontales según su número de palas:

- Monopala: son los aerogeneradores que sólo tienen una pala.

Figura 19. Aerogenerador de una pala (Structuralia, 2018).



- Bipala: son los aerogeneradores que tienen dos palas.

Figura 20. Aerogenerador de dos palas (Structuralia, 2018).



- Tripala: son los aerogeneradores que tienen tres palas. Son actualmente los más usados para la producción de energía.

Figura 21. Aerogenerador de tres palas (Structuralia, 2018).



Aerogeneradores según el tipo de torre:

- Torres en celosía: se fabrican soldando los diferentes perfiles de acero. Su ventaja es su coste, ya que se usa la mitad de material (danish wind industry association , 2003).

Figura 22. Torre en celosía de un aerogenerador (danish wind industry association , 2003).



- Torres de acero tubular: es el tipo de torre más común. Son torres tronco cónicas con el fin de aumentar su resistencia y al mismo tiempo ahorrar material (danish wind industry association , 2003).

Figura 23. Torres de acero tubular de un aerogenerador (danish wind industry association , 2003).



- Torres de hormigón: se trata de estructuras macizas tronco cónicas creadas en su totalidad de hormigón.

Figura 24. Torres de hormigón (acciona, 2015).



Aerogeneradores según la posición de su eje de giro:

- Aerogeneradores de eje vertical

Este tipo de aerogeneradores son los que sus palas rotan en torno a un eje vertical que se encuentra centrado respecto al aerogenerador, y que comparándolo con los aerogeneradores de eje horizontal presenta las siguientes ventajas:

- ✓ Los elementos de retención de las palas son sencillos de diseñar.
- ✓ No necesitan ningún método de orientación
- ✓ Es posible ubicar el tren de potencia, generador y transformador en el suelo, siendo una ubicación más accesible.

En la práctica se hace un uso mucho más extendido de los aerogeneradores de eje horizontal respecto a los de eje vertical debido al bajo rendimiento que aportan éstos últimos.

Seguidamente se muestran algunos de los tipos de aerogenerador de eje vertical más usados:

AEROGENERADOR DARRIEUS

Como podemos ver en la siguiente figura se trata de un aerogenerador que tiene tres palas con la geometría que aparece en la figura. Los principales inconvenientes que presenta este diseño son que no permite el autoarranque debido a la simetría de las palas y a sus perfiles aerodinámicos, lo cual hace que precise de monitorización. Y el otro inconveniente principal es que precisa de varios tensores para poder mantener el aerogenerador estable (Structuralia, 2018).

Figura 25. Aerogenerador Darrieus (Structuralia, 2018).



AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIOUS

Los principales inconvenientes que presenta este diseño son su baja eficiencia y su baja velocidad de giro máxima. Como ventaja respecto al anterior cabe mencionar que éste es capaz de realizar autoarranque (Structuralia, 2018).

Figura 26. Aerogenerador Savonius (Structuralia, 2018).



- Aerogeneradores de eje horizontal

La principal diferencia con los aerogeneradores de eje vertical radica tal y como señala su denominación en la dirección del eje de giro, la cual en éste tipo de turbinas es horizontal, haciendo que el giro del eje sea paralelo a la velocidad del viento.

Cabe la posibilidad de clasificar estos aerogeneradores en función de la velocidad de giro de sus palas como rápidas y lentas. Esta rapidez de giro depende del número de palas, siendo menor cuantas más palas tenga el rotor. Todo esto se basa en el componente de sustentación de la pala, el cual cuanto más grande sea en comparación con la resistencia provocará unas velocidades específicas mayores (Structuralia, 2018).

AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL LENTO

Este tipo de aerogenerador tiene más de 5 palas, lo que provoca que precise de elevada energía de arranque y que además tendrá una velocidad máxima de giro baja. Tradicionalmente han sido destinados al bombeo de agua, no a generación energética. El coeficiente que relaciona la

velocidad lineal con la velocidad del viento tiene un valor de 1, denominado como lambda (Structuralia, 2018).

Figura 27. Aerogenerador de eje horizontal lento (Structuralia, 2018).



AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL RÁPIDO

Es el más implementado en la actualidad, ya que proporciona los mejores resultados, y es el tipo que vamos a estudiar con profundidad durante todo el documento.

Suele constar en su rotor de dos o tres palas, siendo lo más frecuentes estos últimos. El coeficiente lambda en este caso es mayor de 4 gracias a un acertado perfil aerodinámico, que a veces se incrementa hasta valores de 14. Es por esto por lo que se destinan principalmente a la producción energética, ya que el coste del multiplicador es mucho menor.

Dependiendo de la posición del rotor respecto al viento incidente podemos distinguir entre barlovento o sotavento.

En la actualidad el uso más extendido es el de rotores compuestos por tres palas a barlovento (Structuralia, 2018).

1.7 COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL TRIPALA

Figura 28. Vista interior de conjunto de la parte superior de un aerogenerador (World Energy Trade, 2019)

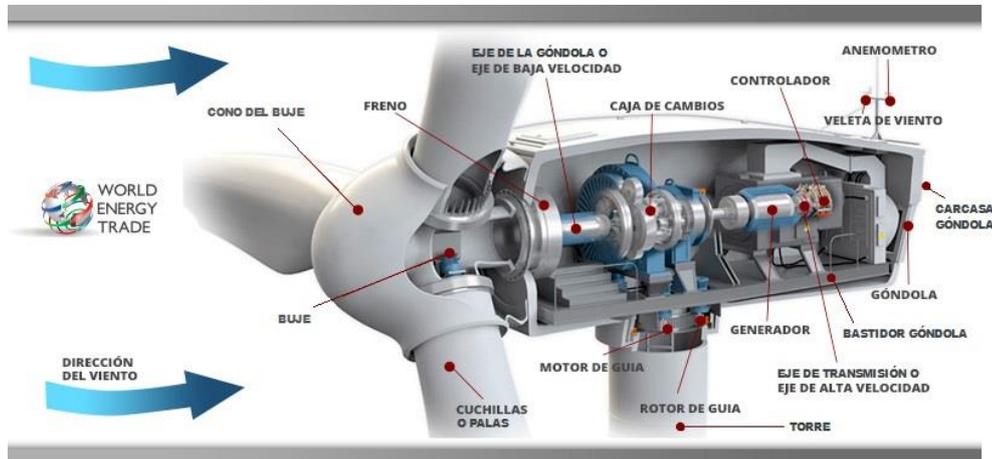
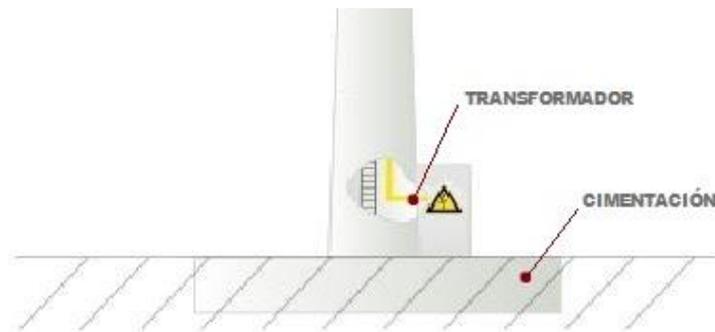


Figura 29. Vista de conjunto de la base de un aerogenerador (proalt ingeniería, 2019).



- Buje: la principal función que acomete es la de alojar las palas en su posición sin variaciones, así como sus sistemas de cambio de orientación y giro (Energiza, 2018).

Figura 30. Buje aerogenerador horizontal tripala (iz@ro, 2010).



- Cono del buje: su función es la de proteger el buje y los componentes que se encuentran en su interior para proporcionar una vida útil de los componentes más duradera y la de desviar el viento incidente hacia las palas. Se suele fabricar de un material ligero y resistente como la fibra de vidrio.

Figura 31. Cono del buje (spares in motion, s.f.).



- Cuchillas o palas: fabricadas con un perfil aerodinámico similar al usado en las alas de los aviones para así conseguir un gran aprovechamiento del viento incidente para moverlas cuando así se requiera. Suelen estar fabricadas de materiales ligeros y duraderos como la fibra de vidrio, los cuales facilitan a su vez el movimiento debido a su bajo peso. También es uno de los componentes que más sufre el desgaste con el paso del tiempo junto con otras partes móviles. Actualmente el aerogenerador tripala es el tipo de aerogenerador más usado.

Figura 32. Pala de un aerogenerador (eoliccat, s.f.).



- Freno: En la figura adjunta se señala el sistema de frenado mecánico, pero debemos ser conscientes de que también existe el frenado aerodinámico, el cual se consigue girando las

palas del rotor 90 grados para no ofrecer resistencia al viento, frenándose el aerogenerador tras un par de vueltas de forma suave. El tipo de freno mecánico que señalamos consta de un disco y unas zapatas hidráulicas que están situadas en el eje de baja velocidad. Éste tipo de freno es un freno de apoyo al aerodinámico y se usa para tareas de mantenimiento (izanda , 2020).

Figura 33. Freno de disco de un aerogenerador (direct industry, s.f.).



- Eje de la góndola o eje de baja velocidad: es el eje que está directamente conectado con el buje, y por lo tanto con las palas, por lo que la velocidad de giro de este eje es la misma que realizan las palas.
- Caja de cambios: Se trata de una caja de engranajes cuya función es la multiplicar la velocidad de giro a la salida en el eje de alta velocidad frente a la velocidad que recibe del eje de baja velocidad para así conseguir el régimen de giro más alto que precisa el generador para hacer su función.

Figura 34. Freno de disco de un aerogenerador (CIATEQ A.C.).



- Controlador: es el aparato encargado de transmitir a la persona responsable del mantenimiento del aerogenerador cualquier mensaje de error de funcionamiento o problema que pudiera surgir.

Figura 35. Controlador electrónico de un aerogenerador (Danish Wind Industry Association, 2003).



- Anemómetro: se encarga de la medición de la velocidad del viento, para así posicionar las palas de una u otra manera para conseguir un giro del rotor óptimo para producir energía o pararlo en caso de que las rachas de viento sean demasiado fuertes.

Figura 36. Anemómetro de un aerogenerador (NRG systems).



- Veleta de viento: complementa al anemómetro calculando la dirección del viento para así posicionar al aerogenerador siempre en una posición óptima para el aprovechamiento del viento.

Figura 37. Veleta de un aerogenerador (AulaFacil).



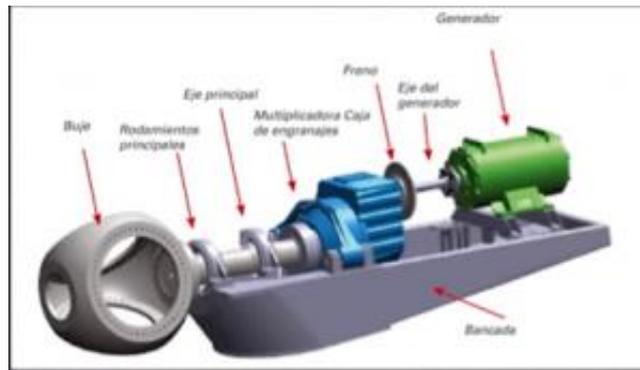
- Carcasa de la góndola: es el elemento más externo de la góndola. Cumple la función de revestimiento de la góndola, para así mejorar la durabilidad y el peso del componente, al estar usualmente fabricado de materiales con una alta durabilidad y bajo peso como la fibra de vidrio.
- Góndola: tiene una forma de “caja” y cumple la función de albergar muchos de los componentes del aerogenerador como son la caja de cambios, los ejes y el generador entre otros elementos. Es el habitáculo en el cual se tienen que realizar la mayoría de las operaciones de control y mantenimiento.

Figura 38. Góndola de un aerogenerador (ewwind, 2014).



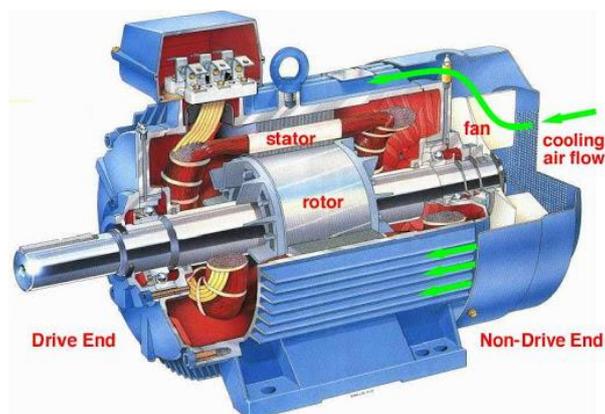
- Bastidor de la góndola: actúa como bancada para todos los elementos situados dentro de la góndola, asegurando así que ninguno de estos elementos se desplace y se mantenga firmemente en el sitio en el que fueron colocados en su diseño e implementación iniciales.

Figura 39. Bastidor o bancada de la góndola de un aerogenerador (sensoricx, 2018).



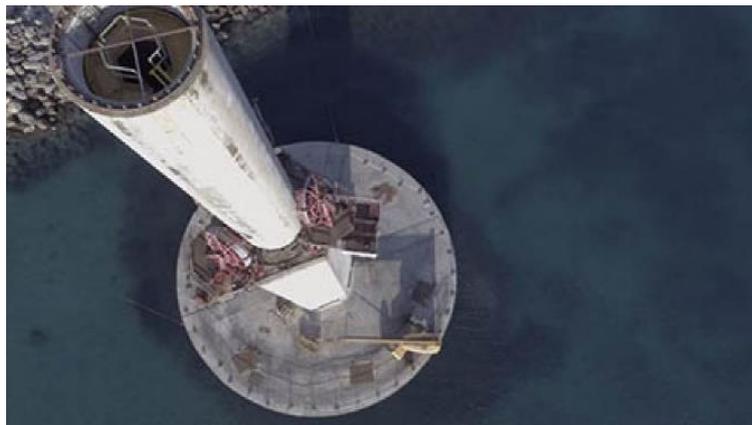
- Eje de transmisión o eje de alta velocidad: es el eje que conecta la caja de cambios con el generador. Gira a una velocidad mucho más alta que el eje de baja velocidad en función de la relación de giro por la que haya sido multiplicada en la caja de cambios.
- Generador: es el aparato encargado de transformar la energía mecánica de giro que recibe del eje de alta velocidad en energía eléctrica, que más tarde pasará por toda la torre mediante cables eléctricos hacia el transformador para conseguir unas características específicas de esta electricidad que la hagan apta para el transporte.

Figura 40. Generador de un aerogenerador (OpexEnergy, s.f.).



- Torre: es el elemento estructural que se encarga de soportar todo el peso de la góndola y el rotor. Tiene dentro de ella un ascensor y/o una escalera para el acceso a los elementos elevados y unos cables eléctricos para transportar la electricidad desde el generador hasta el transformador. Su estructura suele ser tronco cónica, pero hay algunas que forman una celosía. A mayor altura también se obtienen mayores velocidad de vientos (Energiza, 2018).

Figura 41. Torre de un aerogenerador (Revista del sector marítimo ingeniería naval, 2016).



- Rotor de guía: es el elemento mediante el cual la góndola es capaz de girar respecto a la torre y de identificar la posición en la cual se encuentra para orientarse correctamente.
- Motor de guía: es el encargado de proporcionar fuerza para girar la góndola a su posición correcta respecto al viento incidente.
- Transformador: situado en los aerogeneradores modernos en su base. Es el encargado de proporcionar el voltaje adecuado a la electricidad que recibe desde el generador para que así pueda ser transportada a una subestación y de ahí a la red eléctrica (Asociación Empresarial Eólica, 2011).

Figura 42. Transformador de un aerogenerador (direct industry, s.f.).



- Cimentación: su principal función es la soportar el peso de todo el aerogenerador y de mantener su posición sobre la cota horizontal tras las diferentes fuerzas que pudieran surgir en su superficie. La cimentación consta del anclaje y de la zapata. El anclaje es diseñado como continuación de la torre, a la cual se atornilla por medio de una brida interior. La zapata es de planta cuadrada o circular, y está construida con hormigón y una armadura de acero con bajo contenido en carbono (Energiza, 2018).

Figura 43. Cimentación de un aerogenerador (Energiza, 2018).



1.8 TIPOS DE VIENTOS EN LA ATMÓSFERA

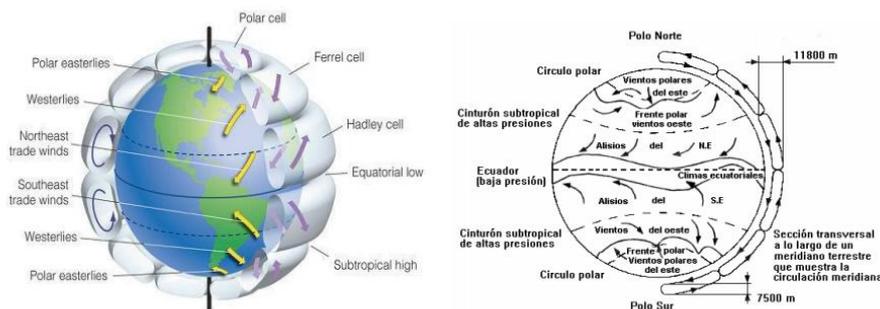
Vamos a clasificar los vientos en función de la escala de altura en la que se encuentren en la atmósfera en orden descendente.

VIENTOS DE ESCALA MACRO (100-10.000 Km)

Definimos el viento como aire en movimiento, ya que este se forma debido a la diferencia de temperaturas que causa la energía solar en la superficie terrestre, que junto a la rotación de la tierra crean los patrones globales de circulación del viento (eadic, escuela técnica, 2013).

En la parte superior de la atmósfera estas masas de aire se dividen en dos, de las cuales una se aleja del ecuador hacia el norte, y la otra se aleja del ecuador hacia el sur. Al alejarse el aire del ecuador se enfría y se vuelve más pesado, al descender causa un clima seco y sin nubes. (eadic, escuela técnica, 2013).

Figura 44. Vientos macro en el planeta (eadic, escuela técnica, 2013).

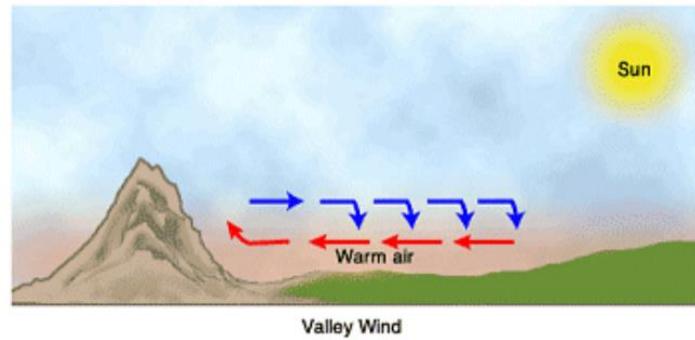


VIENTOS DE ESCALA MEDIA (5 a 200Km)

Cualquier objeto de gran tamaño sobre la superficie terrestre desacelera el flujo de aire, como pueden ser montañas y colinas, en los cuales el viento tiende a fluir por encima y alrededor de

ellos. A gran escala podemos distinguir dos tipos de vientos que se generan a esta altura, la brisa marina y los vientos de montaña (eadic, escuela técnica, 2013).

Figura 45. Funcionamiento de los vientos en colinas (eadic, escuela técnica, 2013).

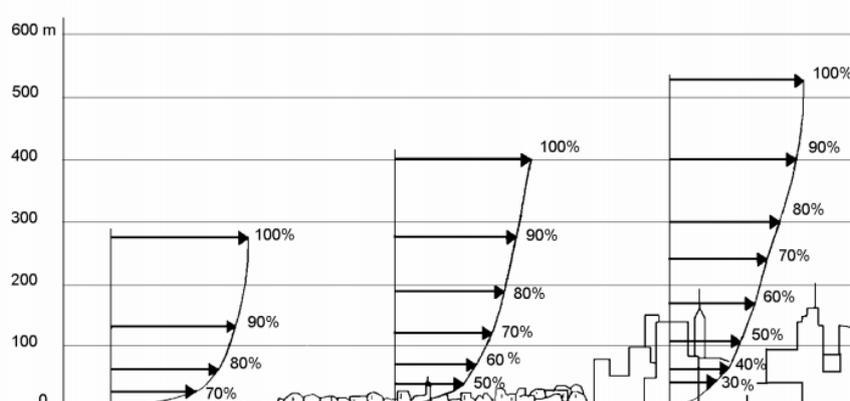


VIENTOS DE ESCALA MICRO (HASTA 10Km)

Este tipo de viento es el que más nos interesa ya que es el que afecta directamente a los aerogeneradores. Varía en función de la desigualdad del terreno, así como de la cantidad de elementos de gran dimensión que se encuentren en su superficie (eadic, escuela técnica, 2013).

La siguiente figura ilustra el comportamiento de perfil de velocidades del viento en función de las características topográficas del terreno (eadic, escuela técnica, 2013).

Figura 46. Perfiles de velocidad de viento en función de las características topográficas del terreno (eadic, escuela técnica, 2013).



La siguiente fórmula relaciona la velocidad con la altura. Es de aplicación para el caso más favorable donde nos encontramos en una superficie plana que además no presenta elementos de gran dimensión que obstaculicen el paso del viento (eadic, escuela técnica, 2013):

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^a$$

Siendo:

V1 : la velocidad del viento a la altura h1

V2 : la velocidad del viento a la altura h2

a : es un parámetro que depende de la topografía del terreno y de las condiciones meteorológicas. Una buena aproximación es 0,14.

En la siguiente tabla se puede ver una aproximación de las velocidades de viento supuestas a diferentes alturas (eadic, escuela técnica, 2013).

Tabla 6. Tabla estimativa de vientos esperados a distintas alturas (eadic, escuela técnica, 2013).

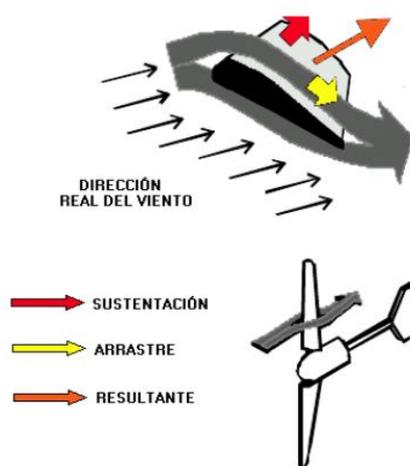
VALORES ESPERADOS DE VELOCIDAD DE VIENTO A DIFERENTES ALTURAS			
Velocidad de Viento promedio medida en m/s a 10 metros	Velocidad de viento promedio esperada en m/s		
	20 metros	30 metros	40 metros
3	3,3	3,5	3,7
4	4,4	4,7	4,9
5	5,5	5,8	6,1
6	6,6	7	7,3
7	7,7	8,2	8,5
8	8,8	9,4	9,8
9	9,9	10,5	11
10	11	11,7	12,2

Para terreno complejo como montañas, colinas o valles la situación es bastante más compleja, y hasta ahora no existen conceptos analíticos sencillos para modelar tales flujos (eadic, escuela técnica, 2013).

1.9 EFECTOS DEL VIENTO EN SUPERFICIES GENERATRICES

Todos los aerogeneradores siguen el mismo principio físico para la captación de viento a través de sus palas independientemente de que sean de eje horizontal o de eje vertical. Éste principio aerodinámico es similar al que hace que los aviones vuelen. Según este principio el aire es forzado a fluir por las caras superior e inferior de una placa o un perfil inclinado, generando una diferencia de presiones entre ambas caras, que da lugar a una fuerza resultante (eadic, escuela técnica, 2013).

Figura 47. Fuerzas de sustentación, arrastre y resultante en un perfil aerodinámico (eadic, escuela técnica, 2013).

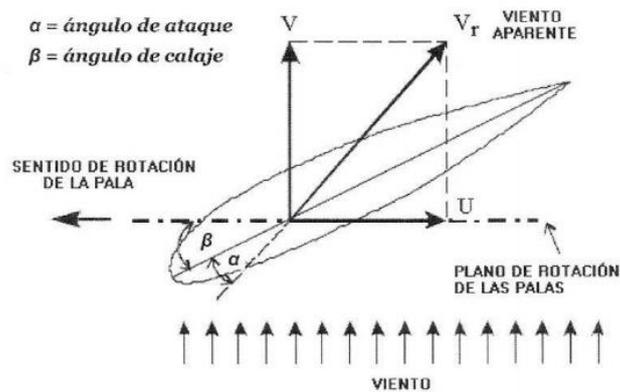


La fuerza de sustentación tiene una dirección perpendicular al viento. La fuerza de arrastre tiene una dirección paralela al viento (eadic, escuela técnica, 2013).

Es importante usar perfiles aerodinámicos para las palas que eviten que se formen torbellinos, para así incrementar la diferencia de presiones en ellas, lo cual hace que sean más eficaces. Según la posición de las palas respecto al viento y al eje de rotación, la fuerza que producirá el par motor será predominante la fuerza de arrastre o la de sustentación. En todas las máquinas modernas la fuerza predominante es la de sustentación, pues permite obtener mayores potencias por unidad de área del rotor, además de que permite que sean menos pesadas y costosas (eadic, escuela técnica, 2013).

En la práctica cuando las palas están estáticas el par motor producido únicamente proviene de la fuerza de sustentación por lo que habrá que intentar maximizarla mediante el diseño de un ángulo de ataque correcto. Una vez las palas giran la resultante de las fuerzas es el viento aparente que es combinación de la fuerza creada por las propias palas en su rotación “V” y de fuerza creada por el viento “U” (eadic, escuela técnica, 2013).

Figura 48. Esfuerzos en una pala en movimiento (eadic, escuela técnica, 2013).



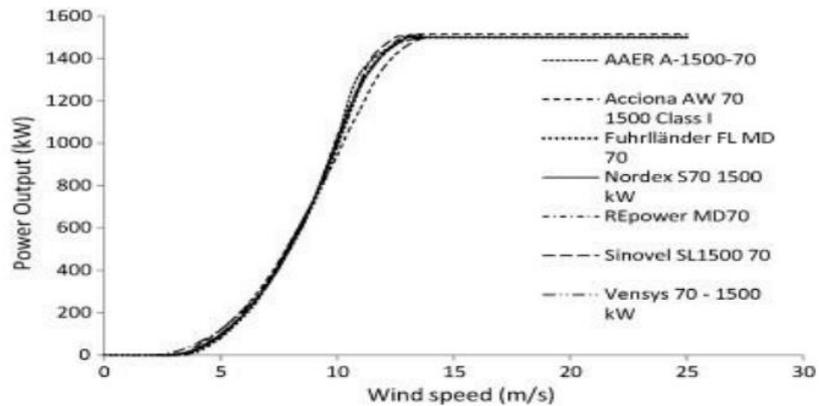
Las palas se fabrican con un ligero alabeo para que el ángulo de incidencia vaya variando conforme el viento recorre la pala, debido a la desigual velocidad que se presenta en la pala, siendo menor cuanto más nos acercamos al eje central. Por el mismo motivo el perfil tendrá menores dimensiones al acercarnos a la punta de la pala, para así conseguir la misma fuerza resultante al tener una velocidad mayor (eadic, escuela técnica, 2013).

El viento debe superar un valor mínimo de velocidad que requiere el aerogenerador para que éste pueda empezar a girar, si la velocidad es menor no se produce el arranque de la aeroturbina. Con velocidad mayores comenzará a girar, entregando potencia hasta llegar a la potencia nominal. El aerogenerador dispone de sistemas de control para impedir que éste funcione en condiciones diferentes para las que fue construido. Si empezara a trabajar en condiciones que no sean las adecuadas la máquina se detendrá (eadic, escuela técnica, 2013).

Las curvas de potencia indican cual es el funcionamiento de un aerogenerador en función del viento incidente. A continuación podemos ver como el tope de potencia que puede dar un

aerogenerador es de 1,5MW, independientemente de lo que aumente la velocidad del viento o del tipo de aerogenerador (eadic, escuela técnica, 2013).

Figura 49. Diferentes curvas de potencia (eadic, escuela técnica, 2013).



1.10. EVALUACIÓN DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

1.10.1 ENERGÍA CONTENIDA

La física realiza una definición de este concepto diciendo que es la capacidad de realizar un trabajo, midiéndola en Julios en el Sistema Internacional de unidades de medida y representándola con la letra E (acento, 2013).

En realidad la energía se manifiesta de diversas formas y a través de distintos medios, llegando a tener una gran variedad de tipos de energía como son la mecánica, solar, térmica, etc. Y como indica el principio de conservación de la energía: la energía se transforma en otros tipos de energía pero la cantidad de energía total es la misma antes, durante y después de la transformación. Por lo que en resumen podríamos definir la energía contenida como la suma de todas las energías necesarias para producir un bien o servicio. En nuestro caso nos centraremos en la producción del bien que es el aerogenerador (acento, 2013).

Para la obtención del aerogenerador acabado es necesario pasar por diferentes procesos, los cuales van desde la etapa inicial, en la que se extraen las materias primas con las cuales se fabrica cada uno de los componentes del aerogenerador, hasta la última etapa que sería el reciclaje de las piezas del aerogenerador. Cada uno de los procesos que se requieren para el bien final requieren energía que puede ser medida de forma que podamos obtener información sobre la inversión energética en cada etapa del ciclo de construcción. De esta forma podremos evaluar diferentes procedimientos de las distintas etapas que sean más rentables energéticamente, contribuyendo a mitigar el calentamiento global y también al costo final del producto (acento, 2013).

Este aspecto junto al estudio de la huella de carbono serán dos de los principales valores que intentaremos reducir buscando métodos y materiales alternativos que hagan nuestro producto más competente energéticamente y en términos de emisión de carbono a la atmósfera.

1.10.2 HUELLA DE CARBONO

La huella de carbono indica la cantidad de gases contaminantes que se emiten de manera directa o indirecta en una actividad humana, ya sea de producción de un producto o de otra índole. En nuestro caso ligado a la obtención de materias primas, manufactura, transporte y reciclaje del aerogenerador. Algunos ejemplos de gases de efecto invernadero son el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), Óxidos de nitrógeno (NO_x), Ozono (O_3), Clorofluorocarbonos (CFC) y el vapor de agua (H_2O) (ecointeligencia, 2017).

La huella de carbono tiene una cierta dependencia de la energía contenida para realizar un proceso, aunque no siempre es así, pudiendo observar esto principalmente en los procesos de reciclaje, en los cuales hay algunos en los cuales la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) se multiplica sin que lo haga la energía contenida para dicho proceso. Por lo que lo ideal es además de buscar unos procesos los cuales requieran de un uso menor de energía contenida, también mantengan la emisión de GEI bajo unos niveles que no contribuyan en exceso al efecto invernadero.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Los principales objetivos del proyecto son la selección de los materiales que componen las distintas partes de un aerogenerador y evaluar la sustitución de materiales según su comportamiento en servicio y su impacto medioambiental. En la sustitución de materiales haremos especial hincapié en las palas del aerogenerador al ser un componente muy costoso y versátil a la hora de buscar otros materiales alternativos. Para la evaluación del impacto ambiental nos vamos a centrar en el estudio de sus dos parámetros más representativos: la energía contenida y la huella de carbono, los cuales nos indican la cantidad de energía que se necesita y la cantidad de contaminación que se emite en la realización de las distintas fases y componentes del aerogenerador.

En la metodología del proyecto vamos a hacer uso del programa informático CES EduPack 2010, que se trata de un software que permite a los usuarios hacer búsquedas y analizar datos que se encuentran en su base de datos para poder optimizar el comportamiento de un material basándose en las especificaciones de diseño que queramos implementar, y como es nuestro caso, para buscar materiales que nos aporten un buen comportamiento en servicio a la vez que conseguimos reducir la energía contenida y la huella de carbono en las distintas fases del proyecto (CES EduPack , 2010). Para la búsqueda de información sobre los diversos temas de los que trata el proyecto vamos a hacer uso de libros e internet. Para la creación de la documentación, gráficos y tablas vamos a hacer uso del paquete de Microsoft Office en su versión del año 2016.

2.1 METODOLOGÍA Y NORMATIVA CONSULTADA

Respecto a la relación entre la metodología y la normativa consultada podemos añadir que nos hemos centrado en la búsqueda de legislación española actualizada sobre tratamiento de

residuos, haciendo una diferenciación entre los residuos de construcción y demolición y el resto de residuos, ya que estos necesitan un tratamiento especial al ser residuos peligrosos. Es por esto que hemos realizado la búsqueda de normativa específica sobre la producción y gestión de residuos peligrosos. También hemos hecho una clasificación jerárquica de gestión de residuos. Hemos establecido los pasos a seguir en caso de que se produzca o se posean residuos para su gestión ambiental. Además, hemos clasificado los vertederos según sus distintos tipos y hemos definido qué clases de residuos pueden ir destinados a estos vertederos. Por último, se han definido las distintas opciones de gestión pública y privada de recogida de residuos.

Como fuente de información legislativa hemos hecho uso de la guía técnica de gestión de residuos municipales de Ecoembes en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid en su segunda edición del año 2015. Además, se ha extraído gran parte de la información de numerosas publicaciones del Boletín Oficial del Estado (BOE).

2.2 METODOLOGÍA LEGISLATIVA SOBRE TRATAMIENTO DE RESIDUOS

LEGISLACIÓN ESTATAL

Sobre la legislación estatal se creó el Real Decreto 1304/2009 de 31 de Julio relativo al vertido de residuos con la intención de establecer un marco jurídico técnico adecuado para la eliminación de residuos mediante su depósito en vertedero, regulando también sus características, incluyendo la gestión y explotación del mismo (femp, 2015).

Consideramos vertedero toda instalación de eliminación de residuos mediante depósito en la superficie o subterráneo, por períodos de tiempo superiores a los establecidos para el almacenamiento. No se incluyen las instalaciones en las cuales se descargan los residuos para su transporte posterior (femp, 2015).

RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Acerca de los residuos de construcción y demolición tenemos que ser conscientes de que son incompatibles con el tratamiento del resto de los residuos, y deben de ser segregados en recogida y transporte (femp, 2015).

En el anejo 2 del Real Decreto 952/1997 se considera a los residuos de construcción y demolición dentro de la clasificación de residuos peligrosos (BOE, 1997).

JERARQUÍA DE RESIDUOS

La jerarquía de residuos sigue el siguiente orden de prioridad en su gestión (a no ser que se justifique otra jerarquía para un determinado flujo de residuos que contribuya a la protección ambiental) (BOE, 2011):

- 1) Prevención
- 2) Preparación para reutilización
- 3) Reciclado
- 4) Otro tipo de valorización energética
- 5) Eliminación

PRODUCCIÓN, POSESIÓN Y GESTIÓN DE RESIDUOS

El productor o poseedor de residuos está obligado a realizar el tratamiento de los residuos por sí mismo, o a encargar o entregar el tratamiento de sus residuos a un negociante o a una entidad o empresa para su procesamiento (BOE, 2011).

El productor de residuos no peligrosos tiene la obligación de demostrar con documentos el trámite adecuado de sus residuos frente al organismo local (BOE, 2011).

El productor u otro poseedor inicial está obligado a informar a las empresas autorizadas para llevar a cabo la gestión de residuos cuando estos presenten características especiales para su tratamiento, transporte, recogida, valorización o eliminación. Y en caso de que se produzca un escape de residuos peligroso informar inmediatamente a la administración ambiental competente (BOE, 2011).

Las normas para cada flujo de residuos pueden obligar a la separación de los mismos según los materiales (BOE, 2011).

En el caso de que sea un productor de residuos peligrosos está obligado a la elaboración de un estudio de minimización comprometiéndose a la reducción de producción de residuos. Además puede ser obligado a suscribir una garantía financiera que cubra las responsabilidades a las que puedan dar lugar sus actividades (BOE, 2011).

CLASES DE VERTEDERO

Hay tres tipos de vertederos (pudiendo éstos estar clasificados en varias categorías a la vez): Vertedero de residuos inertes, no peligrosos y peligrosos (BOE, 2002).

RESIDUOS QUE PODRÁN PROCESARSE SEGÚN LA CLASE DE VERTEDERO

- Habrá que realizar algún tratamiento previo a los residuos que se depositen en vertedero a excepción de los residuos inertes (BOE, 2002).
- Los residuos que sean peligrosos únicamente se depositarán en vertedero para residuos peligrosos (BOE, 2002).

- Los residuos de tipo urbano, no peligrosos, no reactivos, estables o provenientes de un proceso de estabilización se podrán verter en vertederos de residuos no peligrosos.
- Los vertederos de residuos inertes sólo admitirán residuos inertes (BOE, 2002).

NORMAS ESPECÍFICAS SOBRE LA PRODUCCIÓN Y GESTIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS

Es obligación de los productores de residuos peligrosos separar adecuadamente los residuos peligrosos, envasar y etiquetar los recipientes según la normativa, llevar un registro, suministrar la información adecuada para su tratamiento y eliminación a empresas autorizadas, presentar un informe anual especificando como mínimo la cantidad de residuos peligrosos producidos o importados y por último de informar inmediatamente a la Administración pública en caso de desaparición de residuos peligrosos (BOE, 1998).

La gestión de residuos peligrosos queda sometida a régimen de autorización por el órgano ambiental de la Comunidad Autónoma. Éstas autorizaciones fijarán el plazo y condiciones en las que se otorgan y quedarán sujetas a la constitución por el solicitante de un seguro de responsabilidad civil. El transporte de estos residuos peligrosos además requerirá de un documento específico de identificación de los residuos (BOE, 1998).

GESTIÓN DEL RECICLAJE DE RESIDUOS GENÉRICOS Y DE CONSTRUCCIÓN

El reciclaje de residuos de construcción debe de hacerse con especial cuidado, ya que están incluidos dentro de los residuos peligrosos debido a la gran cantidad de aditivos que se le añaden al cemento. Algunos tan peligrosos como el amianto que se usaba extendidamente entre los años 1940 hasta el año 2002 cuando fue prohibido su uso. Se usaba para gran variedad de elementos de construcción como tejados, tuberías, falsos techos, etc. Fue prohibido debido a

las fibras de amianto que se desprendían del amianto al ser manipulado cuando estaba contenido dentro de otros materiales, tales como la tan conocida uralita, también conocida como fibrocemento, que estaba constituido por cemento y amianto, el cual fue sustituido por fibra de vidrio por sus graves problemas para la salud, ya que es el culpable de muchos casos de cáncer de pulmón.

Para la retirada de elementos que contengan amianto se precisa de personal especializado que se cubre con un traje íntegro para evitar aspirar estas fibras microscópicas producidas por el amianto. El elevado coste de ejecución de la retirada de estos elementos con amianto es lo que actualmente dificulta la retirada de este tipo de material de las viviendas, colegios, hospitales y prácticamente cualquier tipo de edificio construido entre 1940 y 2002. Además, no se puede depositar este material en cualquier vertedero, pues es considerado un material peligroso.

El reciclaje del resto de residuos que produce el generador (excluyendo la cimentación de hormigón) es más sencillo de procesar, ya que ninguno de los otros materiales está dentro de la clasificación de materiales peligrosos, por lo que se podrán depositar en cualquier vertedero, y para la recogida de los residuos no precisaremos de personal especializado como el que se necesita para algunos residuos de construcción y demolición. Todo esto en caso de que finalmente vayan a parar a un vertedero, y no les aplicamos ningún tipo de reciclaje ni solución diferente.

Respecto a los tipos de gestión de los residuos podemos diferenciar entre realizar una gestión pública o una gestión privada de los residuos.

En gestión pública tenemos dos opciones:

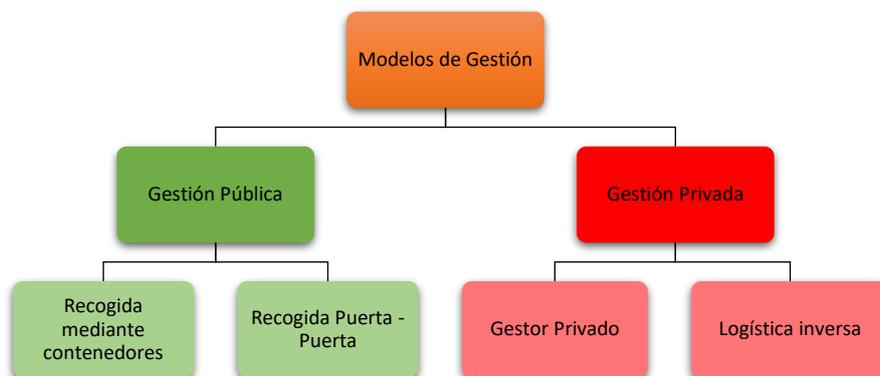
-Recogida mediante contenedores: la cual en nuestro caso no será la más indicada pues tenemos un gran volumen de residuos, los cuales no cabrían seguramente dentro de un contenedor (femp, 2015).

-Recogida puerta-puerta: respecto a la gestión pública será la más indicada, pues podemos hablar con la administración pública, y conforme a nuestra situación respecto a la cantidad de residuos que necesitemos eliminar podemos llevar a un acuerdo para que se nos aporte una serie de vehículos cerca del aerogenerador que se encarguen de llevar y procesar los residuos que se hayan producido (femp, 2015).

En gestión privada:

Podemos acudir a un gestor privado o a la aplicación de logística inversa, ambos métodos son igualmente válidos, y la diferencia respecto a la gestión pública radica esencialmente en que la empresa que realiza la recogida y el procesado de los residuos opera por cuenta ajena a la administración pública (femp, 2015).

Figura 50. Diferentes modelos de gestión de residuos (femp, 2015).



Otra opción es la de vender directamente nuestros residuos a otra empresa a la que le interese como materia prima para su propia producción, beneficiándose ambas partes.

3. RESULTADOS

A continuación se van a presentar los resultados obtenidos en el este trabajo fin de grado. Esta sección consta de varias partes:

3.1 LOCALIZACIÓN DEL AEROGENERADOR Y DE LOS PROVEEDORES

En esta sección se explica la localización del aerogenerador y también de los diferentes proveedores y fabricantes con el fin de poder establecer la logística de la fabricación del aerogenerador.

En este trabajo, se parte del supuesto de la instalación de un aerogenerador en la Sierra del Buey en Jumilla, más exactamente en las siguientes coordenadas: Latitud $38^{\circ} 31' 12.4''$ y Longitud $-1^{\circ} 14' 28''$ (Jumilla 30520). Ya que es donde está el parque eólico con más aerogeneradores de toda la región de Murcia, que consta de 23 turbinas eólicas, sumando todas ellas una potencia de 19550kW (thewindpower, 2018). Pero no es el parque eólico que produce la mayor cantidad de potencia, por lo que sería conveniente realizar una mejora respecto a los aerogeneradores usados en la actualidad en ese parque. Ya que nuestro aerogenerador tiene una potencia aproximada de 2MW (thewindpower, 2020).

Todos los componentes del aerogenerador, a excepción de la cimentación, van a ser fabricados en la sede de la empresa española Siemens Gamesa situada en Bizkaia. La localización exacta va a ser: Parque tecnológico de Bizkaia Edificio, 222, 48170 Zamudio, BI (kompass, s.f.).

Vamos a evaluar el transporte de todos los componentes del aerogenerador, a excepción de la cimentación, de tres maneras distintas para determinar cuál es la opción más viable. Primero supondremos el transporte íntegramente por carretera, la segunda manera será el transporte por vía férrea y carretera, y por último por vía marítima y carretera. Los materiales de la

cimentación serán siempre transportados por carretera, ya que la fábrica que produce los materiales está situada mucho más cerca que la del resto de componentes.

Los materiales necesarios y la creación de la cimentación van a ser importados desde la empresa Ibercofran situada en Calle de las Tejeras, 34, 30510 Yecla, Murcia, por lo que nos ahorraríamos una gran distancia de transporte de estos materiales al lugar de construcción del aerogenerador, en comparación con la distancia de transporte de los demás materiales, lo cual nos es muy conveniente ya que esta parte del aerogenerador es la más pesada y la que más energía consume en su transporte hacia la zona de edificación del aerogenerador. Haciendo estos cambios en lugar de 761km que tenemos de distancia desde la empresa Siemens Gamesa tendremos sólo 27.3km (IBERCOFRAN, s.f.).

3.2 CICLO DE FIN DE VIDA DE LOS COMPONENTES DEL AEROGENERADOR

Para el ciclo de fin de vida de los componentes del aerogenerador vamos a evaluar las diferentes opciones de fin de vida de cada uno de los componentes con el programa CES EduPack para así tomar una decisión óptima para cada uno de los componentes en cuanto a energía contenida y a huella de carbono. Lo ideal sería que en todos los componentes fuéramos capaz de hacer una reutilización de los mismos para otros propósitos, pero la realidad es que no es posible y es por eso por lo que se debe evaluar opciones más allá del traslado a un vertedero.

Prestaremos especial atención a componentes como las palas del aerogenerador, al ser uno de los componentes más costosos de producir y también a la posibilidad de poder elegir entre una gran variedad de materiales como sustitutos debido a las condiciones de diseño que requiere dentro del aerogenerador. A esto hay que añadir que actualmente el material del que se suelen fabricar, la fibra de vidrio junto con resina epoxy, no es un material reciclable y es por eso por lo que encontrar una alternativa sería de gran beneficio a la hora de evaluar el ciclo de vida de este componente.

3.3 MATERIALES QUE SE USAN ACTUALMENTE PARA EL CONJUNTO DEL AEROGENERADOR

En la tabla 7 se presenta la lista de materiales que se utilizan para fabricar el aerogenerador modelo que consideramos en este proyecto. Como se puede observar se han incluido los materiales, el peso y el proceso de fabricación de cada uno de los componentes. Esta tabla es el punto de partida de trabajo de todo el proyecto.

Tabla 7. Lista de componentes de los que está fabricado el aerogenerador (Ashby M. F., 2009).

Cantidad	Componente	Material	Peso (kg)	Proceso de fabricación
3	Pala	Fibra de vidrio con resina epoxy	6500	Moldeo por compresión
1	Buje	Hierro de fundición nodular 350/22	$1,4 \cdot 10^4$	Fundición
1	Cono del buje	Fibra de vidrio con resina epoxy	310	Moldeo por compresión
1	Cimentación hormigón	Hormigón (cemento Portland)	$7 \cdot 10^5$	Ensamblaje
1	Cimentación Acero bajo carbono	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	$2,5 \cdot 10^4$	Forjado
1	Góndola	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	$1,5 \cdot 10^4$	Forjado
1	Torre	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	$1,43 \cdot 10^5$	Forjado
1	Bastidor de la góndola	Hierro de fundición nodular 350/22	$1,1 \cdot 10^4$	Fundición
1	Eje de la góndola	Acero de baja aleación AISI 3140 recocido	6100	Forjado
1	Transformador bobina	Cobre C12500 forjado duro	1500	Forjado
1	Transformador cuerpo	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	3300	Forjado
1	Generador bobina	Cobre C12500 forjado duro	2000	Forjado
1	Generador cuerpo	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	4290	Forjado
1	Eje de transmisión	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	8000	Forjado
1	Engranaje de transmisión	Hierro de fundición nodular 350/22	8000	Forjado
1	Carcasa góndola	Fibra de vidrio con resina epoxy	2000	Moldeo por compresión
TOTAL			$9,6 \cdot 10^5$	

3.4 GASTOS GLOBALES DE ENERGÍA Y DE EMISIÓN DE CO₂ A LA ATMÓSFERA, SEGÚN LOS CRITERIOS INICIALES

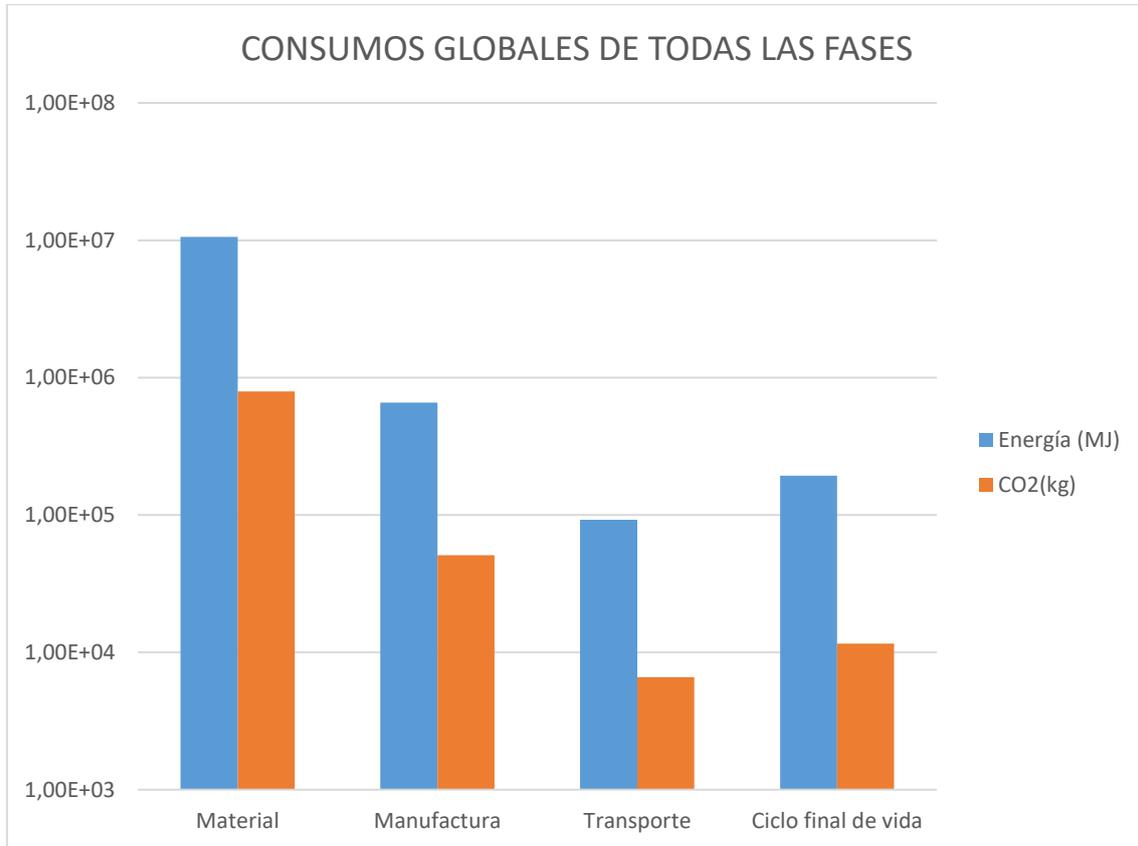
Como criterios iniciales para el estudio de la energía consumida y la emisión de CO₂ a la atmósfera por la construcción del aerogenerador de 2MW vamos a suponer el conjunto de materiales descrito en la tabla 7 para cada componente del aerogenerador, con su correspondiente proceso de fabricación descrito más adelante. En el punto inicial, como medio de transporte vamos a suponer que todos los elementos van a ser íntegramente transportados por carretera, en dos rutas diferentes según el componente que se detallará más adelante. Y por último vamos a suponer que para el ciclo de fin de vida de los materiales todos ellos van a ir a parar a un vertedero.

Los resultados para cada una de las fases se representan en la tabla 8 y en la figura 51.

Tabla 8. Valores de energía consumida y huella de carbono de los materiales extraídos de la tabla 7.

FASE	Energía (MJ)	Energía (%)	CO ₂ (kg)	CO ₂ (%)
Material	$1,06 \cdot 10^7$	92,1	$7,92 \cdot 10^5$	92
Manufactura	$6,60 \cdot 10^5$	5,6	$5,11 \cdot 10^4$	5,9
Transporte	$9,25 \cdot 10^4$	0,8	$6,60 \cdot 10^3$	0,7
Ciclo final de vida	$1,93 \cdot 10^5$	1,5	$1,16 \cdot 10^4$	1,4
TOTAL	$1,15 \cdot 10^7$	100	$8,61 \cdot 10^5$	100

Figura 51. Energía consumida (en azul) y huella de carbono (en naranja) de cada una de las etapas en escala logarítmica.



Como se puede observar, la etapa que tiene un mayor impacto ambiental es la obtención de las diferentes piezas, ya que supone alrededor del 92 % de la energía consumida y de la huella de carbono del total. El valor total de energía consumida en la fabricación de este aerogenerador es de $1,15 \cdot 10^7$ MJ y su huella de carbono es de $8,65 \cdot 10^5$ kgCO₂. A la vista de estos resultados resulta primordial realizar una investigación para encontrar unos materiales alternativos que cumplan con el cometido del aerogenerador reduciendo significativamente la energía consumida y la huella de carbono, ya que suponen casi la totalidad de los recursos empleados. Además investigaremos sobre medios de transporte de los materiales más eficientes y métodos más efectivos de reciclaje para conseguir bajar al mínimo posible la energía consumida y la huella de carbono, ya que en el caso inicial no se hace ningún tipo de reciclaje o procesado de ningún componente, simplemente se envían a un vertedero todos los componentes.

3.5 AMORTIZACIÓN ENERGÉTICA DEL AEROGENERADOR SEGÚN LOS CRITERIOS INICIALES

Si el tiempo de vida medio del aerogenerador es de 25 años podemos hacer cálculos para saber el tiempo que necesitamos para recuperar la inversión energética inicial empleada en todas las fases que dan lugar al aerogenerador terminado y situado en su posición de trabajo.

Sabemos que el aerogenerador que vamos a construir tiene una potencia de 2MW, lo cual quiere decir que es capaz de producir 2MW por cada hora de funcionamiento a máximo rendimiento, el cual irá fluctuando en función de las rachas de viento que reciba el aerogenerador, que harán que las palas giren a unas velocidades determinadas.

Un aerogenerador actual es capaz de estar produciendo electricidad entre el 70 y el 85% del tiempo, generando diferentes cantidades en función de la velocidad del viento. En la práctica genera aproximadamente un 30% del máximo teórico a lo largo de un año, concepto conocido como factor de carga del aerogenerador (eoliccat, s.f.).

Ya que no poseemos datos detallados acerca de dimensiones de los componentes del aerogenerador ni del viento a lo largo de un año en el emplazamiento vamos a hacer una estimación con los datos de factor de carga de un aerogenerador a lo largo de un año.

Nuestro generador de 2MW generará aproximadamente un 30% de la potencia máxima a lo largo de un año, lo cual interpretaremos como el rendimiento total. Por lo que la energía obtenida en un año en forma de cálculo es:

$$E_G = P_r * t = 0,6 * (3600 * 24 * 365) = 1,89 \cdot 10^7 \text{ MW en un año}$$

$$P_r = P * \eta = 2 * \frac{30}{100} = 0,6 \text{ MW}$$

E_G : energía generada por el aerogenerador en un año

P_r : potencia relativa del aerogenerador teniendo en cuenta que no trabaja en su punto de máximo rendimiento continuamente

t : tiempo en horas

P : Potencia máxima del aerogenerador a rendimiento máximo.

η : rendimiento total del aerogenerador a lo largo de un año

Teniendo estos datos de energía generada en un año por el aerogenerador podemos comparar con la energía requerida para crear el aerogenerador y sabremos cuanto tiempo precisaremos para amortizar esta energía inicial:

Según los cálculos realizados en la tabla 2 sabemos que la energía requerida E_R es $1,15 \cdot 10^7$ MJ, que para pasarlo a MW:

$$E_R = 1,15 \cdot 10^7 \text{ MJ} = 1,15 \cdot 10^7 \text{ MW}$$

$$t_{am} = \frac{E_R}{E_G} = \frac{1,15 \cdot 10^7}{1,89 \cdot 10^7} = 0,608 \text{ años}$$

t_{am} : tiempo de amortización de la inversión energética inicial

E_R : energía requerida para la construcción e instalación del aerogenerador

A la vista de los resultados podemos concluir diciendo que para realizar la amortización energética del aerogenerador va a tener que estar trabajando aproximadamente unos 0,6 años. Teniendo en cuenta que su vida útil está estimada en 25 años se producirá energía neta durante más de 24 años sin ninguna pérdida a excepción de las operaciones de reparación y mantenimiento.

3.6 FASE DE OBTENCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

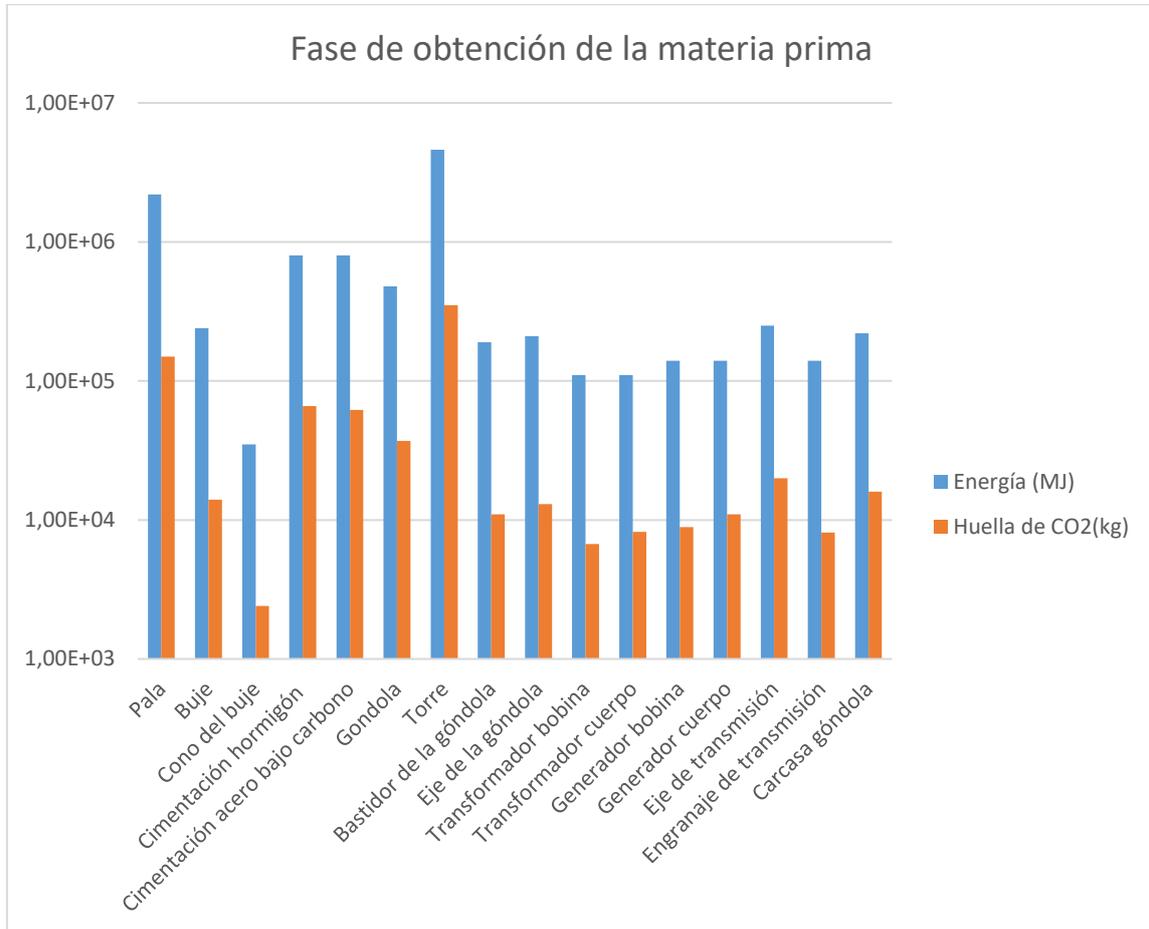
A continuación vamos a analizar en más detalle cada una de estas etapas y su contribución al total del estudio. Empezaremos con la obtención primaria de los materiales. Esta fase podríamos considerarla la más importante de todas las fases, ya que es la que requiere un mayor uso de energía y también produce la mayor cantidad de huella de carbono, siendo el uso energético de más de un 90% del total, por lo que es necesario prestarle especial importancia. Esta fase va ligada directamente con el material del que se produce cada uno de los componentes y con la cantidad de este material expresado en kg, los cuales podemos ver en la tabla 7 detalladamente.

En la tabla 9 podemos ver como los tres elementos del aerogenerador más costosos de producir energéticamente en orden descendente son la torre, las palas y la cimentación. Sólo estos tres componentes requieren tres cuartas partes del total de energía requerido, siendo solamente la torre casi la mitad del total. Por lo que será sobre estos elementos sobre los que habría que trabajar para lograr disminuir el tiempo de amortización energético. Esta gran cantidad de energía requerida para estos componentes son principalmente por la alta cantidad de material que se requiere por las grandes dimensiones de los componentes. En el caso de las palas además de la alta cantidad de material requerido, se puede añadir que la fibra de vidrio junto con resina epoxy es un material bastante costoso, por lo que en conjunto hacen que este componente ocupe una gran parte de la energía requerida.

Tabla 9. Obtención de la materia prima para los diferentes componentes del aerogenerador.

Componente	Material	Peso (kg)	Energía (MJ)	%	Huella de CO ₂ (kg)	%
Pala	Fibra de vidrio con resina epoxy	19500	2,2·10 ⁶	20,7	1,5·10 ⁵	19,3
Buje	Hierro de fundición nodular 350/22	1,4·10 ⁴	2,4·10 ⁵	2,3	1,4·10 ⁴	1,8
Cono del buje	Fibra de vidrio con resina epoxy	310	3,5·10 ⁴	0,3	2,4·10 ³	0,3
Cimentación hormigón	Hormigón (cemento Portland)	7·10 ⁵	8·10 ⁵	7,5	6,6·10 ⁴	8,4
Cimentación acero bajo carbono	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	2,5·10 ⁴	8·10 ⁵	7,5	6,2·10 ⁴	7,8
Góndola	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	1,5·10 ⁴	4,8·10 ⁵	4,5	3,7·10 ⁴	4,7
Torre	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	1,43·10 ⁵	4,6·10 ⁶	43,0	3,5·10 ⁵	44,8
Bastidor de la góndola	Hierro de fundición nodular 350/22	1,1·10 ⁴	1,9·10 ⁵	1,8	1,1·10 ⁴	1,4
Eje de la góndola	Acero de baja aleación AISI 3140 recocido	6100	2,1·10 ⁵	2,0	1,3·10 ⁴	1,6
Transformador bobina	Cobre C12500 forjado duro	1500	1,1·10 ⁵	1,0	6,7·10 ³	0,8
Transformador cuerpo	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	3300	1,1·10 ⁵	1,0	8,2·10 ³	1,0
Generador bobina	Cobre C12500 forjado duro	2000	1,4·10 ⁵	1,3	8,9·10 ³	1,1
Generador cuerpo	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	4290	1,4·10 ⁵	1,3	1,1·10 ⁴	1,3
Eje de transmisión	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	8000	2,5·10 ⁵	2,4	2·10 ⁴	2,5
Engranaje de transmisión	Hierro de fundición nodular 350/22	8000	1,4·10 ⁵	1,3	8,1·10 ³	1,0
Carcasa góndola	Fibra de vidrio con resina epoxy	2000	2,2·10 ⁵	2,1	1,6·10 ⁴	2,0
TOTAL		9,6·10⁵	1,06·10⁷	100	7,92·10⁵	100

Figura 52. Energía y huella de carbono ligadas a la obtención de materia prima para cada uno de los componentes.



3.7 FASE DE MANUFACTURA DE LA MATERIA PRIMA

En la tabla 10 se representa la energía empleada en la fabricación de cada componente, así como su huella de carbono. Esta fase de producción no implica cantidades de energía requerida tan altas como la fase de obtención de la materia prima.

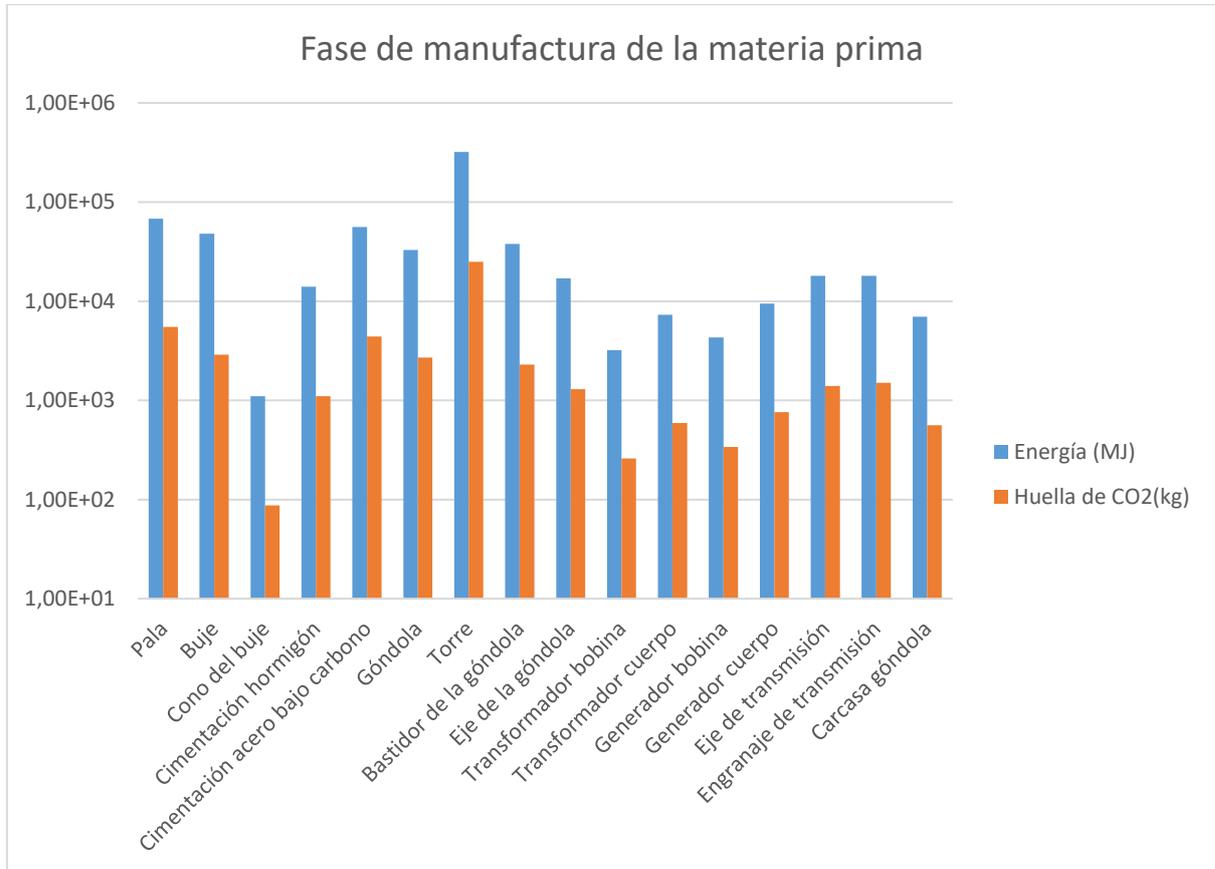
Los componentes más costosos de manufacturar siguen siendo la torre, palas y cimentación. Esta vez la cimentación es notablemente más costosa de manufacturar que en la fase de obtención de la materia prima, siendo proporcionalmente más costosa de manufacturar que las palas, superando ambos componentes juntos una proporción de un 10,5%. El componente más costoso energéticamente en esta fase es con diferencia la torre, que requiere prácticamente la

mitad del total de energía para su confección mediante forjado. Las palas con un porcentaje energético del 10,3% siguen siendo un componente muy costoso energéticamente también en esta fase. También podemos observar como el buje aunque en la fase de obtención de materia prima no tenía relevancia en la cantidad de energía requerida en esta fase precisa de una importante cantidad de energía con un 7,3% del total en su confección mediante fundición.

Tabla 10. Impacto ambiental de los procesos de fabricación.

Componente	Proceso de fabricación	Energía (MJ)	%	Huella de CO ₂ (kg)	%
Pala	Moldeo por compresión	$6,8 \cdot 10^4$	10,3	$5,5 \cdot 10^3$	10,7
Buje	Fundición	$4,8 \cdot 10^4$	7,3	$2,9 \cdot 10^3$	5,7
Cono del buje	Moldeo por compresión	$1,1 \cdot 10^3$	0,2	87	0,2
Cimentación hormigón	Ensamblaje	$1,4 \cdot 10^4$	2,1	$1,1 \cdot 10^3$	2,2
Cimentación acero bajo carbono	Forjado	$5,6 \cdot 10^4$	8,4	$4,4 \cdot 10^3$	8,7
Góndola	Forjado	$3,3 \cdot 10^4$	5,1	$2,7 \cdot 10^3$	5,2
Torre	Forjado	$3,2 \cdot 10^5$	48,1	$2,5 \cdot 10^4$	49,8
Bastidor de la góndola	Fundición	$3,8 \cdot 10^4$	5,7	$2,3 \cdot 10^3$	4,4
Eje de la góndola	Forjado	$1,7 \cdot 10^4$	2,5	$1,3 \cdot 10^3$	2,6
Transformador bobina	Forjado	$3,2 \cdot 10^3$	0,5	$2,6 \cdot 10^2$	0,5
Transformador cuerpo	Forjado	$7,3 \cdot 10^3$	1,1	$5,9 \cdot 10^2$	1,1
Generador bobina	Forjado	$4,3 \cdot 10^3$	0,6	$3,4 \cdot 10^2$	0,7
Generador cuerpo	Forjado	$9,5 \cdot 10^3$	1,4	$7,6 \cdot 10^2$	1,5
Eje de transmisión	Forjado	$1,8 \cdot 10^4$	2,7	$1,4 \cdot 10^3$	2,8
Engranaje de transmisión	Forjado	$1,8 \cdot 10^4$	2,8	$1,5 \cdot 10^3$	2,9
Carcasa góndola	Moldeo por compresión	$7 \cdot 10^3$	1,1	$5,6 \cdot 10^2$	1,1
TOTAL		$6,6 \cdot 10^5$	100	$5,11 \cdot 10^4$	100

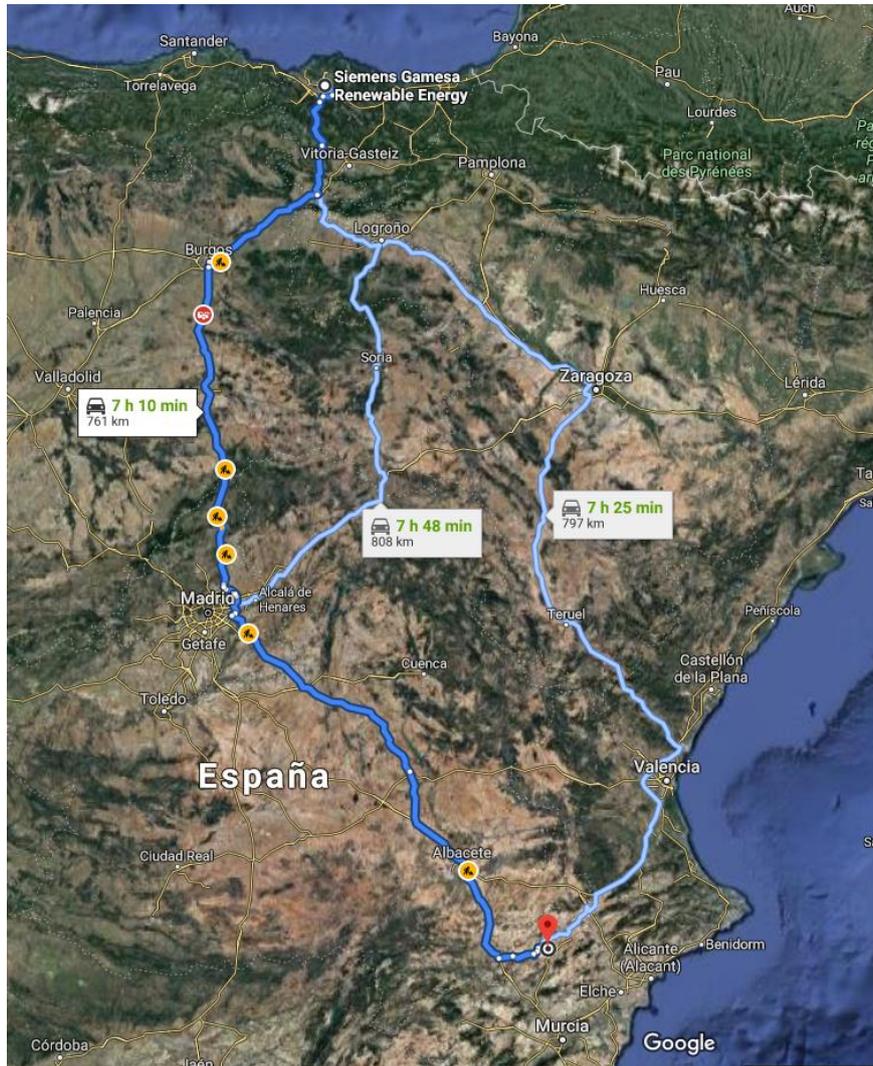
Figura 53. Energía y huella de carbono ligadas a la manufactura de cada uno de los componentes.



3.8 FASE DE TRANSPORTE DE LOS COMPONENTES POR CARRETERA

En esta etapa se evalúa el impacto de las diferentes rutas de transporte de los componentes del aerogenerador. Vamos a suponer el transporte de todos los materiales a través de carretera mediante un camión de 32 toneladas. La cimentación será transportada mediante camión desde Yecla hasta el parque eólico. El resto de los componentes del aerogenerador serán transportados desde la empresa Siemens Gamesa hasta el parque eólico directamente mediante transporte por carretera en una sola ruta.

Figura 54. Ruta de transporte por carretera de todos los elementos del aerogenerador a excepción de la cimentación.



Supone una distancia de 761km por carretera para el camión.

Figura 55. Ruta de transporte por carretera de la cimentación del aerogenerador.



Supone una distancia de 27,3km por carretera para el camión.

Todo el transporte de los materiales se realiza por medio de un camión de 32 toneladas.

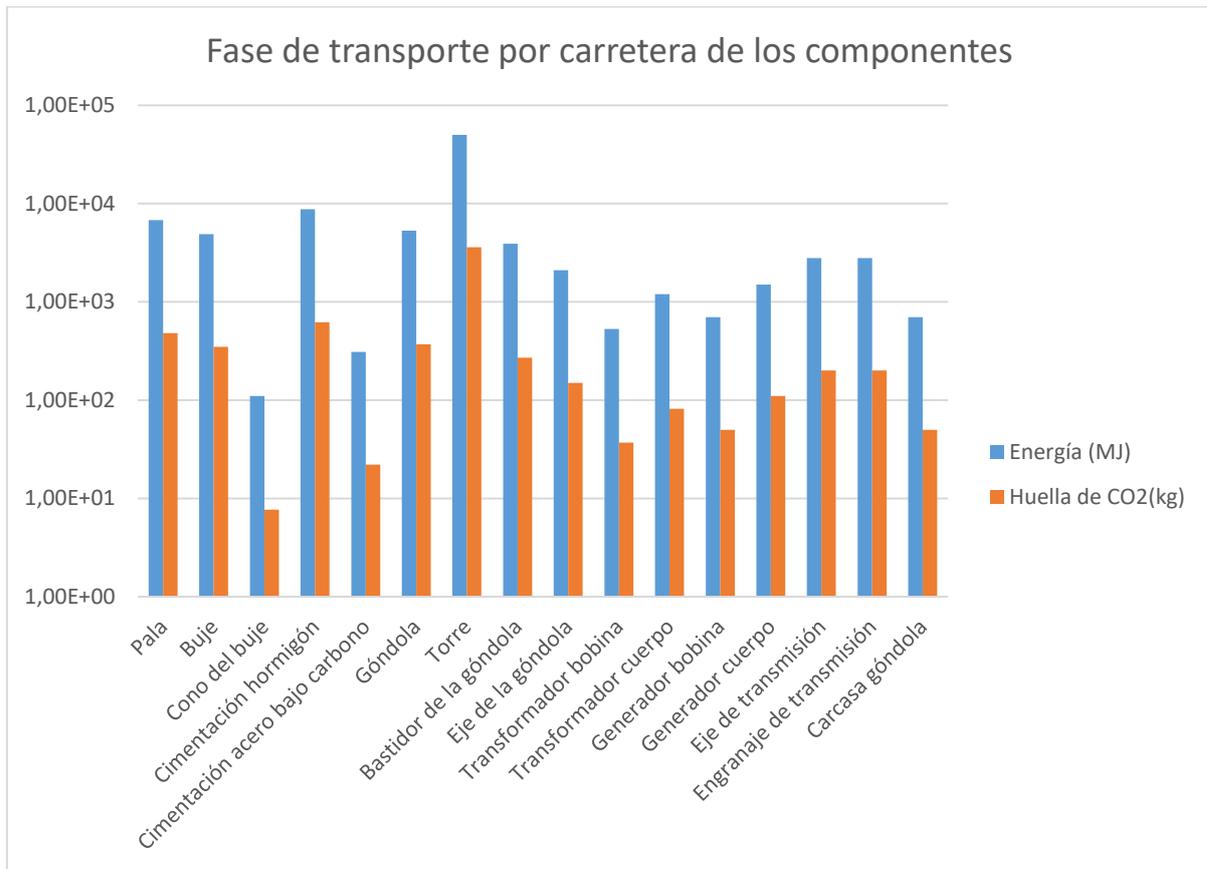
Tabla 11. Medio de transporte por carretera

Tipo de transporte	Energía del transporte (MJ/tonelada*km)	Huella de CO ₂ del transporte (kg/MJ)
Camión de 32 toneladas	0,46	0,071

Tabla 12. Rutas de transporte de los materiales por carretera

Componente	Masa (kg)	Ruta	Distancia (km)	Energía (MJ)	Huella de CO₂ (kg)
Pala	$2 \cdot 10^4$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	761	$6,8 \cdot 10^3$	$4,8 \cdot 10^2$
Buje	$1,4 \cdot 10^4$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	761	$4,9 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^2$
Cono del buje	$3,1 \cdot 10^2$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	761	$1,1 \cdot 10^2$	7,7
Cimentación hormigón	$7 \cdot 10^5$	Ibercofran – Sierra de Jumilla	27,3	$8,8 \cdot 10^3$	$6,2 \cdot 10^2$
Cimentación acero bajo carbono	$2,5 \cdot 10^4$	Ibercofran – Sierra de Jumilla	27,3	$3,1 \cdot 10^2$	22
Góndola	$1,5 \cdot 10^4$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	761	$5,3 \cdot 10^3$	$3,7 \cdot 10^2$
Torre	$1,4 \cdot 10^5$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	761	$5 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^3$
Bastidor de la góndola	$1,1 \cdot 10^4$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	761	$3,9 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^2$
Eje de la góndola	$6,1 \cdot 10^3$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	761	$2,1 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^2$
Transformador bobina	$1,5 \cdot 10^3$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	761	$5,3 \cdot 10^2$	37
Transformador cuerpo	$3,3 \cdot 10^3$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	761	$1,2 \cdot 10^3$	82
Generador bobina	$2 \cdot 10^3$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	761	$7 \cdot 10^2$	50
Generador cuerpo	$4,3 \cdot 10^3$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	761	$1,5 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^2$
Eje de transmisión	$8 \cdot 10^3$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	761	$2,8 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^2$
Engranaje de transmisión	$8 \cdot 10^3$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	761	$2,8 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^2$
Carcasa góndola	$2 \cdot 10^3$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	761	$7 \cdot 10^2$	50
TOTAL	$9,6 \cdot 10^5$			$9,25 \cdot 10^4$	$6,60 \cdot 10^3$

Figura 56. Energía y huella de carbono ligadas al transporte de cada uno de los componentes.



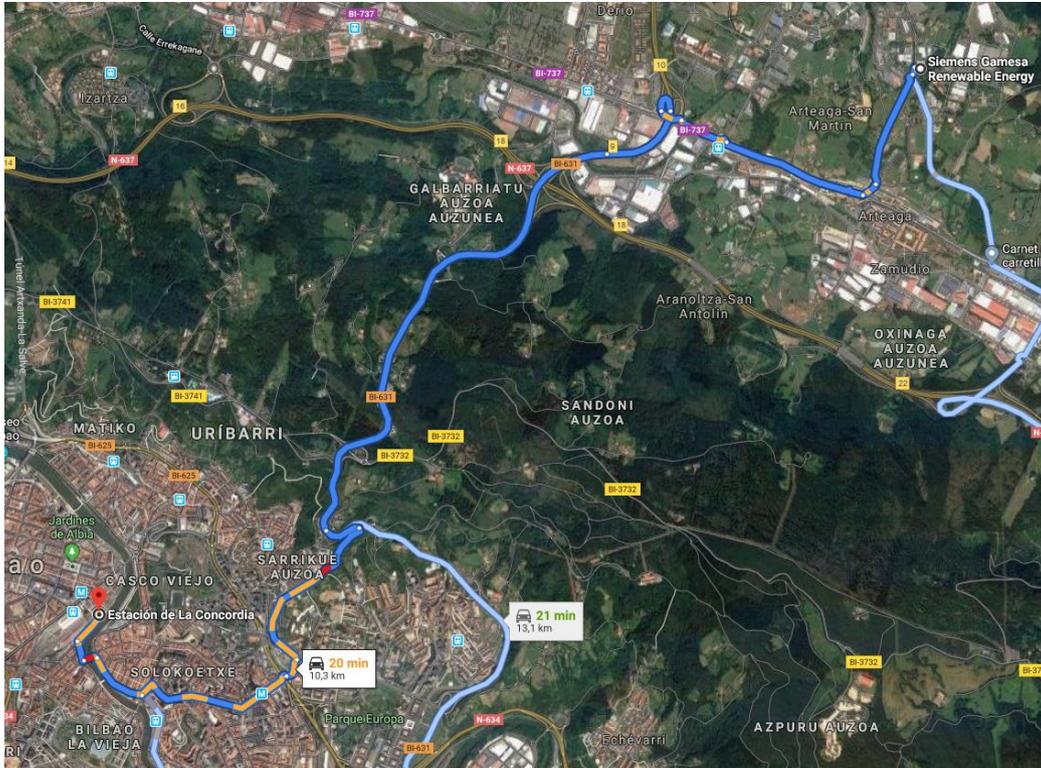
3.9 FASE DE TRANSPORTE DE LOS COMPONENTES POR CARRETERA Y RED FERROVIARIA

Vamos a suponer el transporte de todos los materiales, a excepción de la cimentación, a través de carretera mediante un camión de 32 toneladas, y por red ferroviaria en las redes proporcionadas por Renfe. La cimentación será transportada mediante camión desde Yecla hasta el parque eólico.

Primero transportamos la mercancía desde la fábrica de Siemens Gamesa hasta la estación de tren de Bilbao La Concordia. A continuación, vamos a hacer la ruta Bilbao La Concordia – Villena en tren, ya que es el destino más próximo a la localización del parque eólico. Por último, realizaremos el desplazamiento por medio de camión desde la estación de tren de Villena hasta el parque eólico.

TRAMO 1: SIEMENS GAMESA, ZAMUDIO – ESTACIÓN DE LA CONCORDIA, BILBAO.

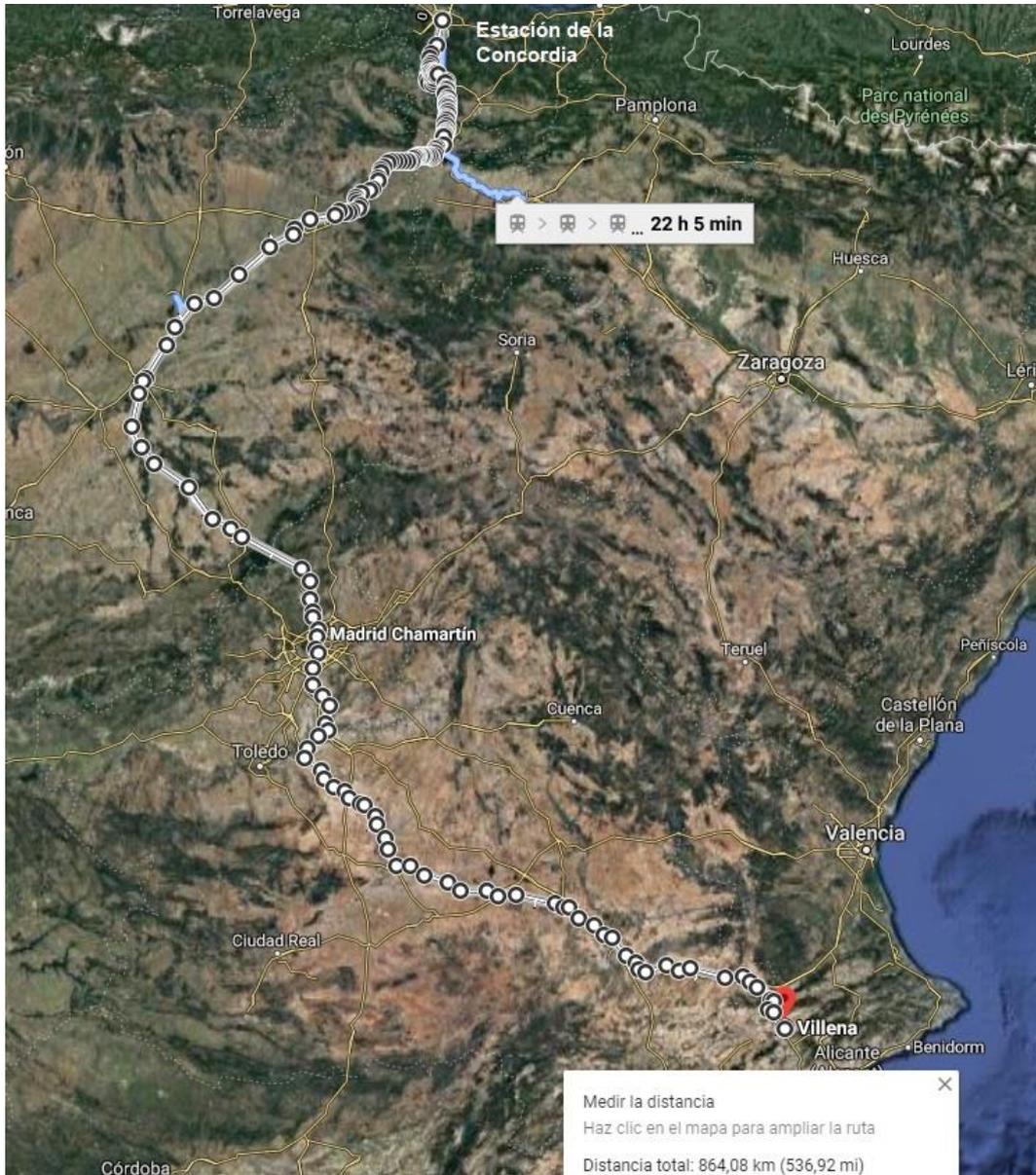
Figura 57. Primer tramo de transporte.



Supone una distancia de 10,3km por carretera para el camión.

TRAMO 2: ESTACIÓN DE LA CONCORDIA, BILBAO - ESTACIÓN DE VILLENA.

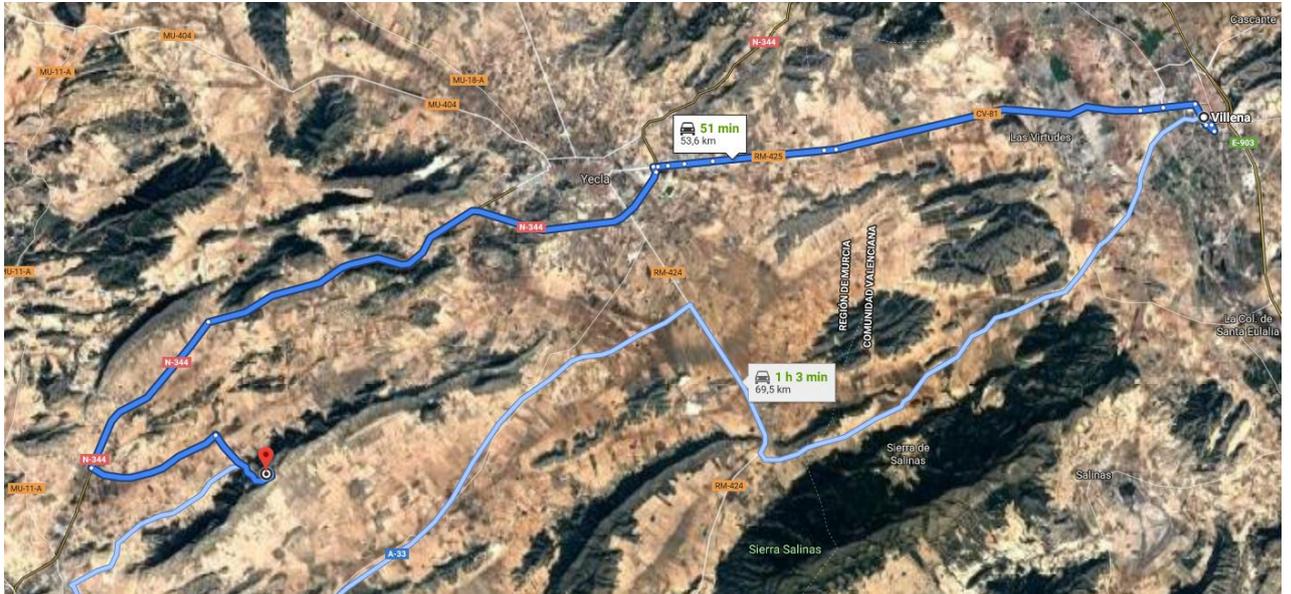
Figura 58. Segundo tramo de transporte.



Supone una distancia aproximada de 900km por red ferroviaria, ya que hemos ido midiendo la distancia tramo por tramo del trayecto y el resultado será notablemente mayor en realidad en comparación a las mediciones.

TRAMO 3: ESTACIÓN DE VILLENA – PARQUE EÓLICO

Figura 59. Tercer tramo de transporte.



Supone una distancia de 53,6km por carretera para el camión.

En conjunto vamos a tener unas distancias totales de 63,9km por carretera y de 900km por red ferroviaria. Que juntas suman aproximadamente 964km.

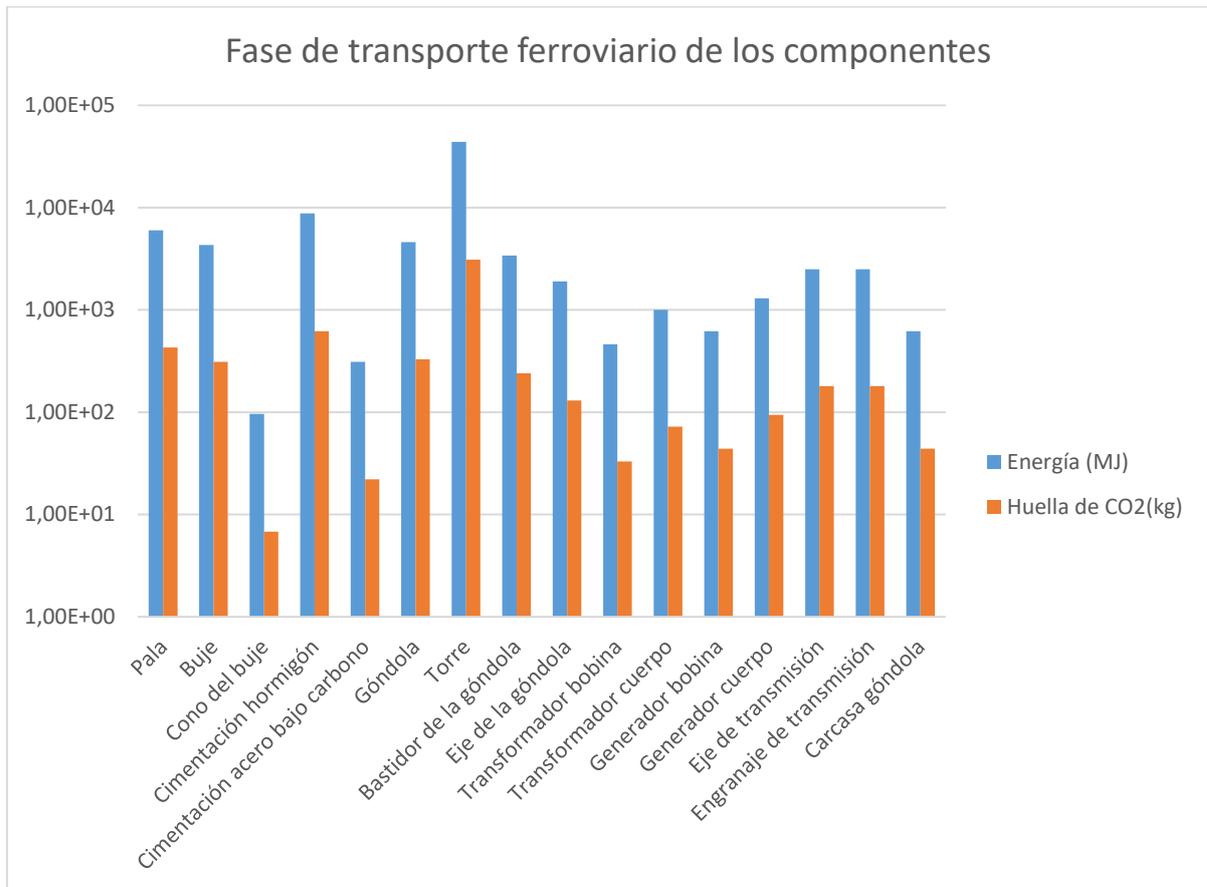
Tabla 13. Medio de transporte por carretera y por red ferroviaria.

Tipo de transporte	Energía del transporte (MJ/tonelada*km)	Huella de CO ₂ del transporte (kg/MJ)
Camión de 32 toneladas	0,46	0,071
Transporte ferroviario	0,31	0,071

Tabla 14. Rutas de transporte de los materiales por carretera y por red ferroviaria.

Componente	Masa (kg)	Ruta	Distancia (km)	Energía (MJ)	Huella de CO₂(kg)
Pala	$2 \cdot 10^4$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	964	$6 \cdot 10^3$	$4,3 \cdot 10^2$
Buje	$1,4 \cdot 10^4$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	964	$4,3 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^2$
Cono del buje	$3,1 \cdot 10^2$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	964	96	6,8
Cimentación hormigón	$7 \cdot 10^5$	Ibercofran – Sierra de Jumilla	27,3	$8,8 \cdot 10^3$	$6,2 \cdot 10^2$
Cimentación acero bajo carbono	$2,5 \cdot 10^4$	Ibercofran – Sierra de Jumilla	27,3	$3,1 \cdot 10^2$	22
Góndola	$1,5 \cdot 10^4$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	964	$4,6 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^2$
Torre	$1,4 \cdot 10^5$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	964	$4,4 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^3$
Bastidor de la góndola	$1,1 \cdot 10^4$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	964	$3,4 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^2$
Eje de la góndola	$6,1 \cdot 10^3$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	964	$1,9 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^2$
Transformador bobina	$1,5 \cdot 10^3$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	964	$4,6 \cdot 10^2$	33
Transformador cuerpo	$3,3 \cdot 10^3$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	964	$1 \cdot 10^3$	72
Generador bobina	$2 \cdot 10^3$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	964	$6,2 \cdot 10^2$	44
Generador cuerpo	$4,3 \cdot 10^3$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	964	$1,3 \cdot 10^3$	94
Eje de transmisión	$8 \cdot 10^3$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	964	$2,5 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^2$
Engranaje de transmisión	$8 \cdot 10^3$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	964	$2,5 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^2$
Carcasa góndola	$2 \cdot 10^3$	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	964	$6,2 \cdot 10^2$	44
TOTAL	$9,6 \cdot 10^5$			$8,24 \cdot 10^4$	$5,84 \cdot 10^3$

Figura 60. Energía y huella de carbono ligadas al transporte de cada uno de los componentes.



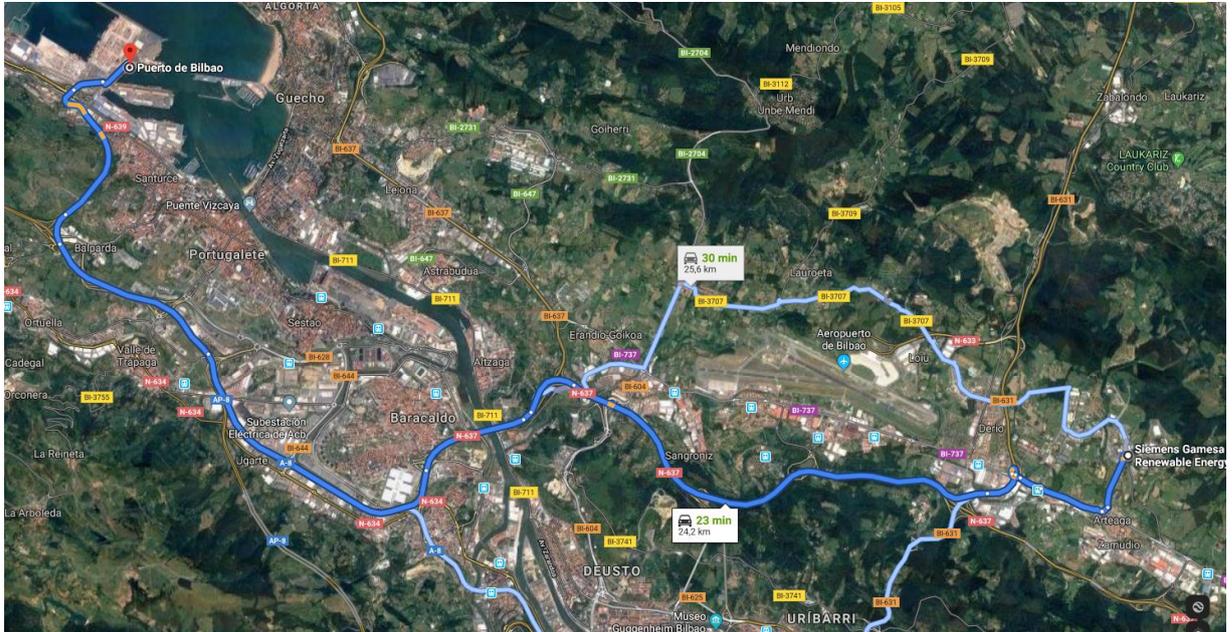
3.10 FASE DE TRANSPORTE DE LOS COMPONENTES POR CARRETERA Y RED MARÍTIMA

Ahora vamos a suponer el transporte de todos los materiales, a excepción de la cimentación, a través de carretera mediante un camión de 32 toneladas, y por transporte marítimo mediante un buque de transporte de mercancías. La cimentación será transportada mediante camión desde Yecla hasta el parque eólico.

Primero transportamos la mercancía desde la fábrica de Siemens Gamesa hasta el puerto marítimo de Bilbao. A continuación, vamos a hacer la ruta Puerto de Bilbao – Puerto de Alicante en buque de mercancías, ya que es el puerto más cercano a la localización del parque eólico. Por último, realizaremos el desplazamiento por medio de camión desde el puerto marítimo de Alicante hasta el parque eólico.

TRAMO 1: SIEMENS GAMESA, ZAMUDIO – PUERTO DE BILBAO.

Figura 61. Primer tramo de transporte.



Supone una distancia de 24,2km por carretera para el camión.

TRAMO 2: PUERTO DE BILBAO – PUERTO DE ALICANTE.

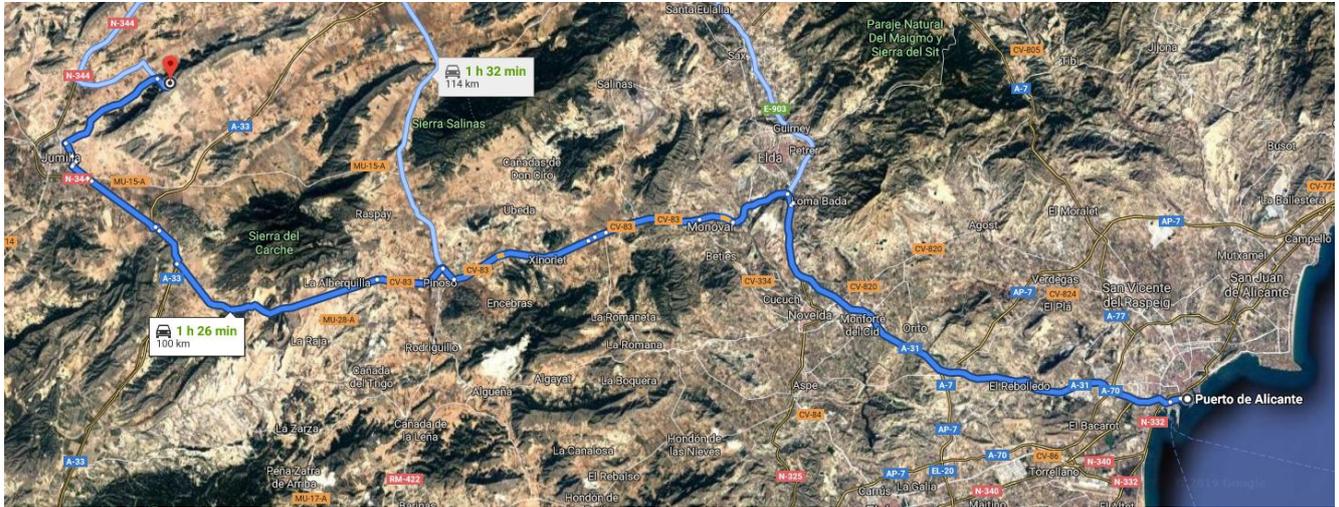
Figura 62. Segundo tramo de transporte.



Supone una distancia aproximada de 2200km por vía marítima para el buque de mercancías.

TRAMO 3: PUERTO DE ALICANTE – PARQUE EÓLICO.

Figura 63. Tercer tramo de transporte.



Supone una distancia de 100km por carretera para el camión.

En conjunto vamos a tener unas distancias totales de 124km por carretera y de 2200km por red marítima. Que juntas suman un total de 2324km.

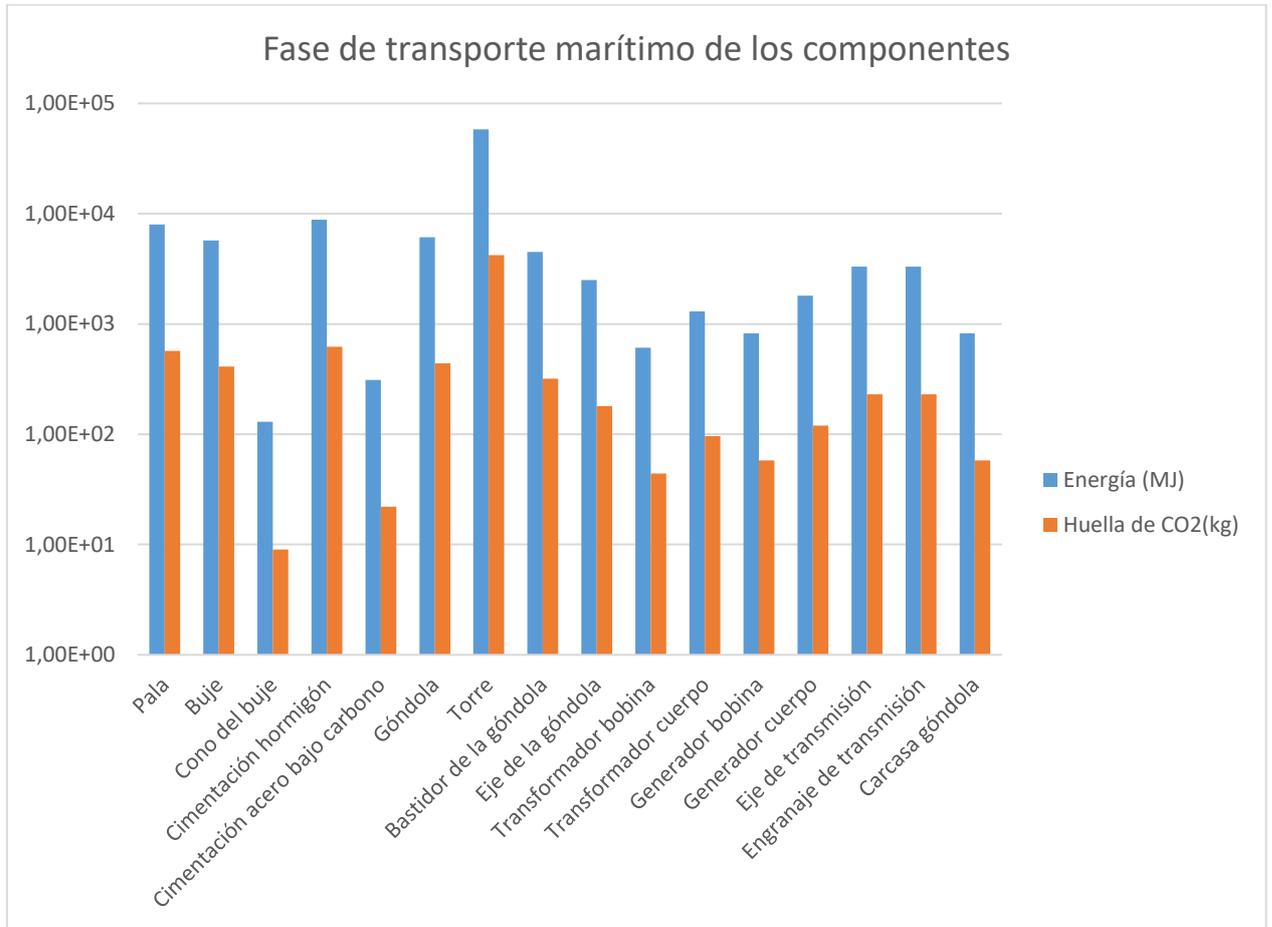
Tabla 15. Medio de transporte por carretera y red marítima.

Tipo de transporte	Energía del transporte (MJ/tonelada*km)	Huella de CO ₂ del transporte (kg/MJ)
Camión de 32 toneladas	0,46	0,071
Transporte marítimo	0,16	0,071

Tabla 16. Rutas de transporte de los componentes por carretera y red marítima.

Componente	Masa (kg)	Ruta	Distancia (km)	Energía (MJ)	Huella de CO₂(kg)
Pala	2·10 ⁴	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	2324	8·10 ³	5,7·10 ²
Buje	1,4·10 ⁴	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	2324	5,7·10 ³	4,1·10 ²
Cono del buje	3,1·10 ²	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	2324	1,3·10 ²	9
Cimentación hormigón	7·10 ⁵	Ibercofran – Sierra de Jumilla	27,3	8,8·10 ³	6,2·10 ²
Cimentación acero bajo carbono	2,5·10 ⁴	Ibercofran – Sierra de Jumilla	27,3	3,1·10 ²	22
Góndola	1,5·10 ⁴	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	2324	6,1·10 ³	4,4·10 ²
Torre	1,4·10 ⁵	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	2324	5,8·10 ⁴	4,2·10 ³
Bastidor de la góndola	1,1·10 ⁴	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	2324	4,5·10 ³	3,2·10 ²
Eje de la góndola	6,1·10 ³	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	2324	2,5·10 ³	1,8·10 ²
Transformador bobina	1,5·10 ³	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	2324	6,1·10 ²	44
Transformador cuerpo	3,3·10 ³	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	2324	1,3·10 ³	96
Generador bobina	2·10 ³	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	2324	8,2·10 ²	58
Generador cuerpo	4,3·10 ³	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	2324	1,8·10 ³	1,2·10 ²
Eje de transmisión	8·10 ³	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	2324	3,3·10 ³	2,3·10 ²
Engranaje de transmisión	8·10 ³	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	2324	3,3·10 ³	2,3·10 ²
Carcasa góndola	2·10 ³	Siemens Gamesa – Sierra de Jumilla	2324	8,2·10 ²	58
TOTAL	9,6·10⁵			1,06·10⁵	7,61·10³

Figura 64. Energía y huella de carbono ligadas al transporte de cada uno de los componentes.



3.11 COMPARACIÓN DE LAS DIFERENTES RUTAS DE TRANSPORTE

Una vez realizado el estudio detallado de los tres posibles métodos de transporte de los componentes del aerogenerador a su lugar de emplazamiento, que consideramos que pueden ser los más rentables energéticamente y en términos de reducción de la producción de CO₂. Llegamos a la conclusión de que el método más rentable mirando estos parámetros sería el transporte ferroviario junto con el de carretera por ciertos tramos en los que no es posible usar el transporte ferroviario.

Se puede ver una notable diferencia entre la energía empleada y en la emisión de CO₂ a la atmósfera, sobre todo en comparación con la vía marítima. Las comparaciones totales entre los

diferentes transportes en datos quedarían de la siguiente forma en orden de preferencia descendente:

Tabla 17. Comparación de diferentes rutas de transporte

Método de transporte	Energía (MJ)	Huella de CO ₂ (kg)
Transporte ferroviario	8,24·10 ⁴	5,84·10 ³
Transporte por carretera	9,25·10 ⁴	6,60·10 ³
Transporte marítimo	1,06·10 ⁵	7,61·10 ³

El aumento de consumo de energía y de contaminación de CO₂ en porcentaje entre los otros medios de transporte comparados con el ferroviario es:

ENERGÍA:

Transporte por carretera en comparación con transporte ferroviario:

$$\frac{9,25 * 10^4 - 8,24 * 10^4}{8,24 * 10^4} * 100 = 12,26\%$$

Transporte marítimo en comparación con transporte ferroviario:

$$\frac{1,06 * 10^5 - 8,24 * 10^4}{8,24 * 10^4} * 100 = 28,64\%$$

HUELLA DE CO₂:

Transporte por carretera en comparación con transporte ferroviario:

$$\frac{6,60 * 10^3 - 5,84 * 10^3}{5,84 * 10^3} * 100 = 13,01\%$$

Transporte marítimo en comparación con transporte ferroviario:

$$\frac{7,61 * 10^3 - 5,84 * 10^3}{5,84 * 10^3} * 100 = 30,31\%$$

Además de estas ventajas del transporte ferroviario respecto a los demás cabe mencionar también una ventaja importante, sobre todo respecto al medio de transporte íntegro por carretera, que es la reducida siniestralidad durante el trayecto y los imprevistos que pueden surgir como atascos, o problemas con las infraestructuras de la carretera, al ser componentes tan voluminosos, lo cual puede retrasar en gran medida el transporte, con las pérdidas económicas que esto conlleva.

3.12 FASE DE RECICLAJE DE LOS COMPONENTES

En este apartado vamos a hacer un estudio de reciclaje de los materiales para ver cómo podemos ahorrar energía reciclando o procesando de alguna manera los materiales del aerogenerador que nos sean posibles. Vamos a suponer un caso inicial donde todos los componentes van a parar a un vertedero y lo vamos a comparar con otro caso en donde vamos a reciclar o realizar algún tipo de valorización energética de todos los materiales que se puedan, siempre evitando la deposición en un vertedero, que será la última alternativa. Con la comparación de estos dos casos seremos capaces de contrastar el ahorro energético y de emisiones de CO₂ que se pueden lograr al hacer uso de todas las herramientas de reciclado o de procesamiento de residuos que existen hoy en día.

Empezamos con el caso inicial donde todos los componentes van a parar a un vertedero.

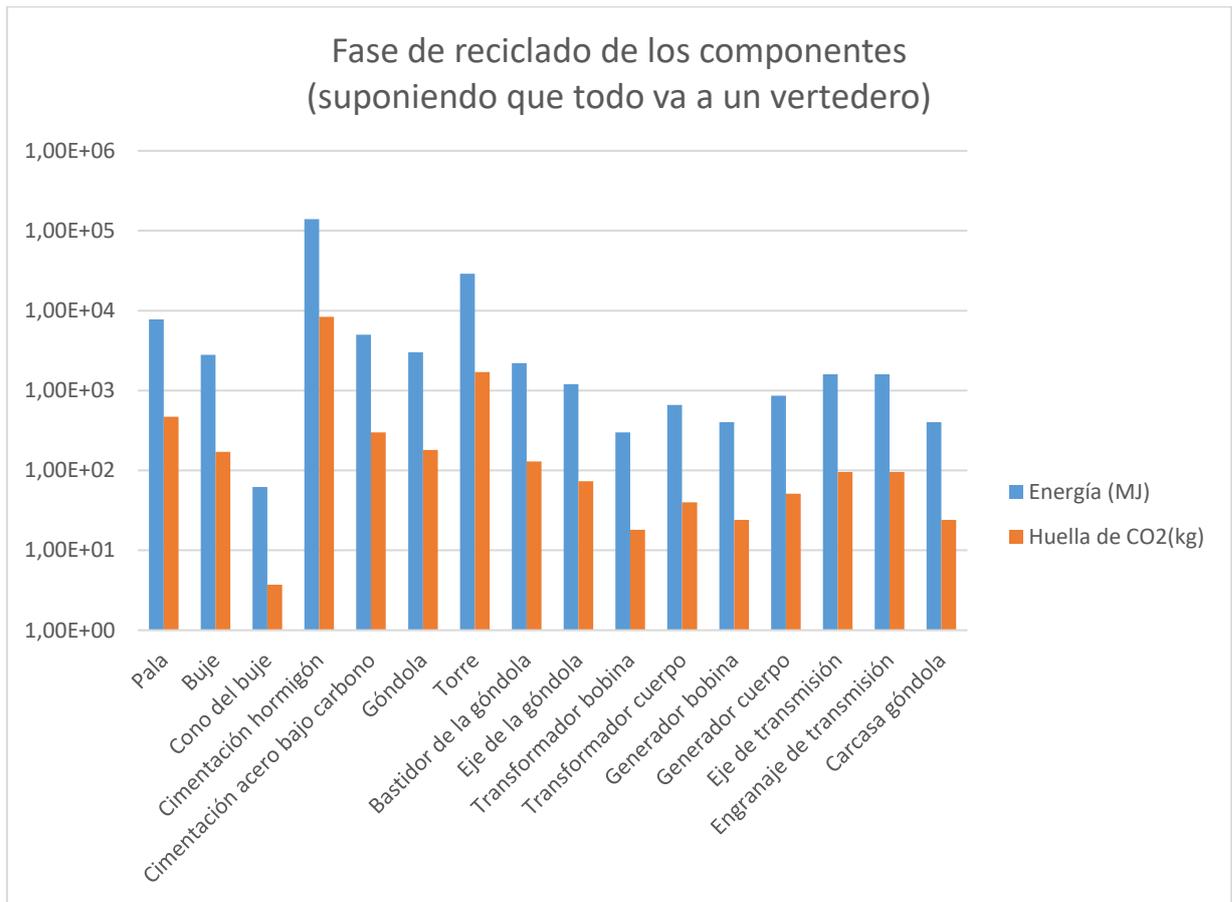
Tabla 18. Energía del reciclaje de las palas.

Componente	Material	Ciclo de fin de vida	Masa (kg)	Energía usada en recolección y reciclado (MJ/kg)	Ahorro energía al final de vida (MJ/kg)	Energía total usada (MJ)
Pala	Fibra de vidrio con resina epoxy	Vertedero	$2 \cdot 10^4$	0,2	0	$3,9 \cdot 10^3$
Buje	Hierro de fundición nodular 350/22	Vertedero	$1,4 \cdot 10^4$	0,2	0	$2,8 \cdot 10^3$
Cono del buje	Fibra de vidrio con resina epoxy	Vertedero	$3,1 \cdot 10^2$	0,2	0	62
Cimentación hormigón	Hormigón (cemento Portland)	Vertedero	$7 \cdot 10^5$	0,2	0	$1,4 \cdot 10^5$
Cimentación acero bajo carbono	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Vertedero	$2,5 \cdot 10^4$	0,2	0	$5 \cdot 10^3$
Góndola	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Vertedero	$1,5 \cdot 10^4$	0,2	0	$3 \cdot 10^3$
Torre	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Vertedero	$1,4 \cdot 10^5$	0,2	0	$2,9 \cdot 10^4$
Bastidor de la góndola	Hierro de fundición nodular 350/22	Vertedero	$1,1 \cdot 10^4$	0,2	0	$2,2 \cdot 10^3$
Eje de la góndola	Acero de baja aleación AISI 3140 recocido	Vertedero	$6,1 \cdot 10^3$	0,2	0	$1,2 \cdot 10^3$
Transformador bobina	Cobre C12500 forjado duro	Vertedero	$1,5 \cdot 10^3$	0,2	0	$3 \cdot 10^2$
Transformador cuerpo	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Vertedero	$3,3 \cdot 10^3$	0,2	0	$6,6 \cdot 10^2$
Generador bobina	Cobre C12500 forjado duro	Vertedero	$2 \cdot 10^3$	0,2	0	$4 \cdot 10^2$
Generador cuerpo	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Vertedero	$4,3 \cdot 10^3$	0,2	0	$8,6 \cdot 10^2$
Eje de transmisión	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Vertedero	$8 \cdot 10^3$	0,2	0	$1,6 \cdot 10^3$
Engranaje de transmisión	Hierro de fundición nodular 350/22	Vertedero	$8 \cdot 10^3$	0,2	0	$1,6 \cdot 10^3$
Carcasa góndola	Fibra de vidrio con resina epoxy	Vertedero	$2 \cdot 10^3$	0,2	0	$4 \cdot 10^2$
TOTAL			$9,6 \cdot 10^5$			$1,97 \cdot 10^5$

Tabla 19. Producción de huella de carbono del reciclaje de las palas.

Componente	Material	Ciclo de fin de vida	Masa (kg)	CO ₂ producido en recolección y reciclado (kg/kg)	Ahorro CO ₂ al final de vida (kg/kg)	CO ₂ total producido (kg)
Pala	Fibra de vidrio con resina epoxy	Vertedero	2·10 ⁴	0,012	0	2,3·10 ²
Buje	Hierro de fundición nodular 350/22	Vertedero	1,4·10 ⁴	0,012	0	1,7·10 ²
Cono del buje	Fibra de vidrio con resina epoxy	Vertedero	3,1·10 ²	0,012	0	3,7
Cimentación hormigón	Hormigón (cemento Portland)	Vertedero	7·10 ⁵	0,012	0	8,4·10 ³
Cimentación acero bajo carbono	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Vertedero	2,5·10 ⁴	0,012	0	3·10 ²
Góndola	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Vertedero	1,5·10 ⁴	0,012	0	1,8·10 ²
Torre	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Vertedero	1,4·10 ⁵	0,012	0	1,7·10 ³
Bastidor de la góndola	Hierro de fundición nodular 350/22	Vertedero	1,1·10 ⁴	0,012	0	1,3·10 ²
Eje de la góndola	Acero de baja aleación AISI 3140 recocido	Vertedero	6,1·10 ³	0,012	0	73
Transformador bobina	Cobre C12500 forjado duro	Vertedero	1,5·10 ³	0,012	0	18
Transformador cuerpo	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Vertedero	3,3·10 ³	0,012	0	40
Generador bobina	Cobre C12500 forjado duro	Vertedero	2·10 ³	0,012	0	24
Generador cuerpo	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Vertedero	4,3·10 ³	0,012	0	51
Eje de transmisión	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Vertedero	8·10 ³	0,012	0	96
Engranaje de transmisión	Hierro de fundición nodular 350/22	Vertedero	8·10 ³	0,012	0	96
Carcasa góndola	Fibra de vidrio con resina epoxy	Vertedero	2·10 ³	0,012	0	24
TOTAL			9,6·10⁵			1,18·10⁴

Figura 65. Energía y huella de carbono del reciclaje de las palas.



¿Qué elementos del aerogenerador son aptos para reciclaje?

Tabla 20. Componentes del aerogenerador aptos para reciclaje.

Componente	Material	Reciclable
Pala	Fibra de vidrio y resina epoxy	NO
Buje	Hierro de fundición nodular 350/22	SI
Cono del buje	Fibra de vidrio y resina epoxy	NO
Cimentación hormigón	Hormigón (cemento Portland)	SI
Cimentación Acero bajo carbono	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	SI
Góndola	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	SI
Torre	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	SI
Bastidor de la góndola	Hierro de fundición nodular 350/22	SI
Eje de la góndola	Acero de baja aleación AISI 3140 recocido	SI
Transformador bobina	Cobre C12500 forjado duro	SI
Transformador cuerpo	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	SI
Generador bobina	Cobre C12500 forjado duro	SI
Generador cuerpo	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	SI
Eje de transmisión	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	SI
Engranaje de transmisión	Hierro de fundición nodular 350/22	SI
Carcasa góndola	Fibra de vidrio y resina epoxy	NO

Observando la tabla nos damos cuenta de que los tres componentes que no son reciclables comparten el mismo material, que es la fibra de vidrio junto con resina epoxy. Por lo tanto todos los demás materiales serán aptos de reciclaje si así lo deseamos.

Todos estos materiales son aptos de las otras alternativas que se les pueden aplicar a estos materiales cuando llegan a su final de vida útil. Estas alternativas abarcan: deposición en un vertedero, reciclado bajo, reingeniería o reuso.

Suponemos ahora el caso en el que realizamos el reciclaje de todos los productos en los que sea posible y analizamos el ahorro energético.

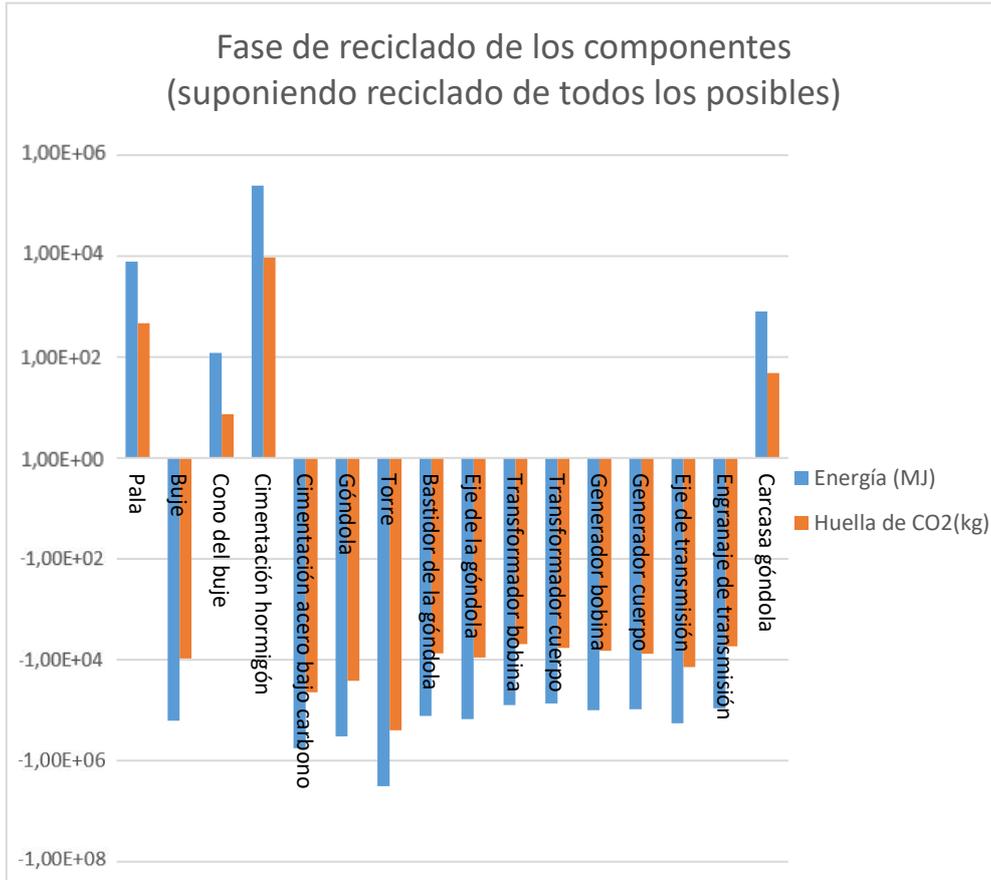
Tabla 21. Energía del reciclaje de todos los componentes.

Componente	Material	Ciclo de fin de vida	Masa (kg)	Energía usada en recolección y reciclado (MJ/kg)	Ahorro energía al final de vida (MJ/kg)	Energía total usada (MJ)
Pala	Fibra de vidrio con resina epoxy	Reciclado bajo	$2 \cdot 10^4$	0,5	-0,1	$7,8 \cdot 10^3$
Buje	Hierro de fundición nodular 350/22	Reciclado	$1,4 \cdot 10^4$	0,7	-12	$-1,6 \cdot 10^5$
Cono del buje	Fibra de vidrio con resina epoxy	Reciclado bajo	$3,1 \cdot 10^2$	0,5	-0,1	$1,2 \cdot 10^2$
Cimentación hormigón	Hormigón (cemento Portland)	Reciclado	$7 \cdot 10^5$	0,7	-0,34	$2,5 \cdot 10^5$
Cimentación acero bajo carbono	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Reciclado	$2,5 \cdot 10^4$	0,7	-23	$-5,6 \cdot 10^5$
Góndola	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Reciclado	$1,5 \cdot 10^4$	0,7	-23	$-3,3 \cdot 10^5$
Torre	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Reciclado	$1,4 \cdot 10^5$	0,7	-23	$-3,2 \cdot 10^6$
Bastidor de la góndola	Hierro de fundición nodular 350/22	Reciclado	$1,1 \cdot 10^4$	0,7	-12	$-1,3 \cdot 10^5$
Eje de la góndola	Acero de baja aleación AISI 3140 recocido	Reciclado	$6,1 \cdot 10^3$	0,7	-25	$-1,5 \cdot 10^5$
Transformador bobina	Cobre C12500 forjado duro	Reciclado	$1,5 \cdot 10^3$	0,7	-53	$-7,9 \cdot 10^4$
Transformador cuerpo	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Reciclado	$3,3 \cdot 10^3$	0,7	-23	$-7,3 \cdot 10^4$
Generador bobina	Cobre C12500 forjado duro	Reciclado	$2 \cdot 10^3$	0,7	-53	$-1 \cdot 10^5$
Generador cuerpo	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Reciclado	$4,3 \cdot 10^3$	0,7	-23	$-9,5 \cdot 10^4$
Eje de transmisión	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Reciclado	$8 \cdot 10^3$	0,7	-23	$-1,8 \cdot 10^5$
Engranaje de transmisión	Hierro de fundición nodular 350/22	Reciclado	$8 \cdot 10^3$	0,7	-12	$-9,1 \cdot 10^4$
Carcasa góndola	Fibra de vidrio con resina epoxy	Reciclado bajo	$2 \cdot 10^3$	0,5	-0,1	$8 \cdot 10^2$
TOTAL			$9,6 \cdot 10^5$			$-4,9 \cdot 10^6$

Tabla 22. Huella de carbono del reciclaje de todos los componentes.

Componente	Material	Ciclo de fin de vida	Masa (kg)	CO ₂ producido en recolección y reciclado (kg/kg)	Ahorro CO ₂ al final de vida (kg/kg)	CO ₂ total producido (kg)
Pala	Fibra de vidrio con resina epoxy	Reciclado bajo	2·10 ⁴	0,03	-0,006	4,7·10 ²
Buje	Hierro de fundición nodular 350/22	Reciclado	1,4·10 ⁴	0,042	-0,71	-9,4·10 ³
Cono del buje	Fibra de vidrio con resina epoxy	Reciclado bajo	3,1·10 ²	0,03	-0,006	7,4
Cimentación hormigón	Hormigón (cemento Portland)	Reciclado	7·10 ⁵	0,042	-0,029	9,4·10 ³
Cimentación acero bajo carbono	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Reciclado	2,5·10 ⁴	0,042	-1,8	-4,4·10 ⁴
Góndola	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Reciclado	1,5·10 ⁴	0,042	-1,8	-2,6·10 ⁴
Torre	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Reciclado	1,4·10 ⁵	0,042	-1,8	-2,5·10 ⁵
Bastidor de la góndola	Hierro de fundición nodular 350/22	Reciclado	1,1·10 ⁴	0,042	-0,71	-7,4·10 ³
Eje de la góndola	Acero de baja aleación AISI 3140 recocido	Reciclado	6,1·10 ³	0,042	-1,5	-9·10 ³
Transformador bobina	Cobre C12500 forjado duro	Reciclado	1,5·10 ³	0,042	-3,3	-4,9·10 ³
Transformador cuerpo	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Reciclado	3,3·10 ³	0,042	-1,8	-5,8·10 ³
Generador bobina	Cobre C12500 forjado duro	Reciclado	2·10 ³	0,042	-3,3	-6,6·10 ³
Generador cuerpo	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Reciclado	4,3·10 ³	0,042	-1,8	-7,5·10 ³
Eje de transmisión	Acero bajo carbono AISI 1010 recocido	Reciclado	8·10 ³	0,042	-1,8	-1,4·10 ⁴
Engranaje de transmisión	Hierro de fundición nodular 350/22	Reciclado	8·10 ³	0,042	-0,71	-5,4·10 ³
Carcasa góndola	Fibra de vidrio con resina epoxy	Reciclado bajo	2·10 ³	0,03	-0,006	48
TOTAL			9,6·10⁵			-3,8·10⁵

Figura 66. Energía y huella de carbono del reciclaje de todos los componentes.



A la vista de los resultados de la tabla y de la gráfica podemos ver que el balance global si realizamos un reciclaje de todos los elementos en la medida que sea posible nos sale negativo, lo cual quiere decir que en lugar de tener que aportar una energía para procesarlos vamos a ganar energía. Cosa que no pasaba cuando sólo realizábamos un reciclado bajo de las palas y los demás componentes iban a parar a un vertedero, en el cual teníamos que aportar energía para que esto se produjese.

Según el gráfico cuando reciclamos los materiales se hace indispensable realizar el reciclado de la torre, pues supone un gran ahorro de energía, debido al material en el que está construida a su elevada utilización de material. También se hace necesario debido a su influencia en el ahorro de energía el reciclado de la góndola y de la parte del entramado que conforma la cimentación de acero al carbono.

En cambio, podemos observar en la gráfica que el único material que a pesar de ser reciclado sigue siendo produciendo una gran pérdida de energía en su procesado es la cimentación de hormigón, debido a que su proceso de reciclado no llega a devolver la energía utilizada durante este proceso, pues únicamente somos capaces de reciclar entre un 13 y 14% del material, lo cual no llega a cubrir los gastos energéticos del procesado. Todo esto unido a la gran cantidad de este material utilizada para la cimentación hace que sea conveniente buscar una solución para este material, por ejemplo, buscando un material alternativo.

El proceso de reciclado del hormigón consiste en la trituración de los escombros de hormigón recogidos que se procesan en una planta de reciclaje. Para poder procesarlos es necesario que no estén contaminados por otros materiales, como madera o ladrillo. Una vez han sido triturados se clasifican por tamaño en árido grueso o fino. Finalmente, el árido que se utiliza para prácticamente cualquier tipo de proyecto es el árido grueso, ya que su densidad es similar a la del hormigón original (únicamente un 5-10% inferior) (Structuralia, 2018).

Recientemente se está desarrollando un nuevo polímero para sustituir al hormigón tradicional, llamado geopolímero, el cual posee en su fabricación una huella de carbono casi nula, lo cual es totalmente ventajoso respecto al hormigón, que produce una elevada emisión de gases de efecto invernadero.

Por lo que podemos concluir que quizás la mejor solución para este componente del aerogenerador sea dejarlo donde está sin modificarlo, o aplicarle alguna solución del tipo de reingeniería o de reúso, lo cual también parece complicado de aplicar.

También nos llama la atención que las palas fueron el segundo material más costoso de producir en términos de energía, lo cual era una gran cantidad de energía. Mientras que la energía devuelta tras el proceso de reciclado bajo es muy baja, por lo que nos interesa investigar que otros procesos podríamos realizar para conseguir recuperar parte de la alta energía empleada en la creación de este elemento.

Y es importante buscar una alternativa viable ecológicamente para el final de vida de las palas, pues actualmente se está produciendo un auge acusado de palas que tienen que ser cambiadas

una vez producido su periodo de servicio de 25 años, lo cual produce una gran aglomeración de este material en los vertederos. La siguiente imagen ilustra la situación actual.

Figura 67. Palas de aerogeneradores en un vertedero (La Unión de Hoy, 2020).



Investigando con el programa de materiales CES, éste nos aporta los siguientes resultados para diferentes procesos tras la vida útil de las palas.

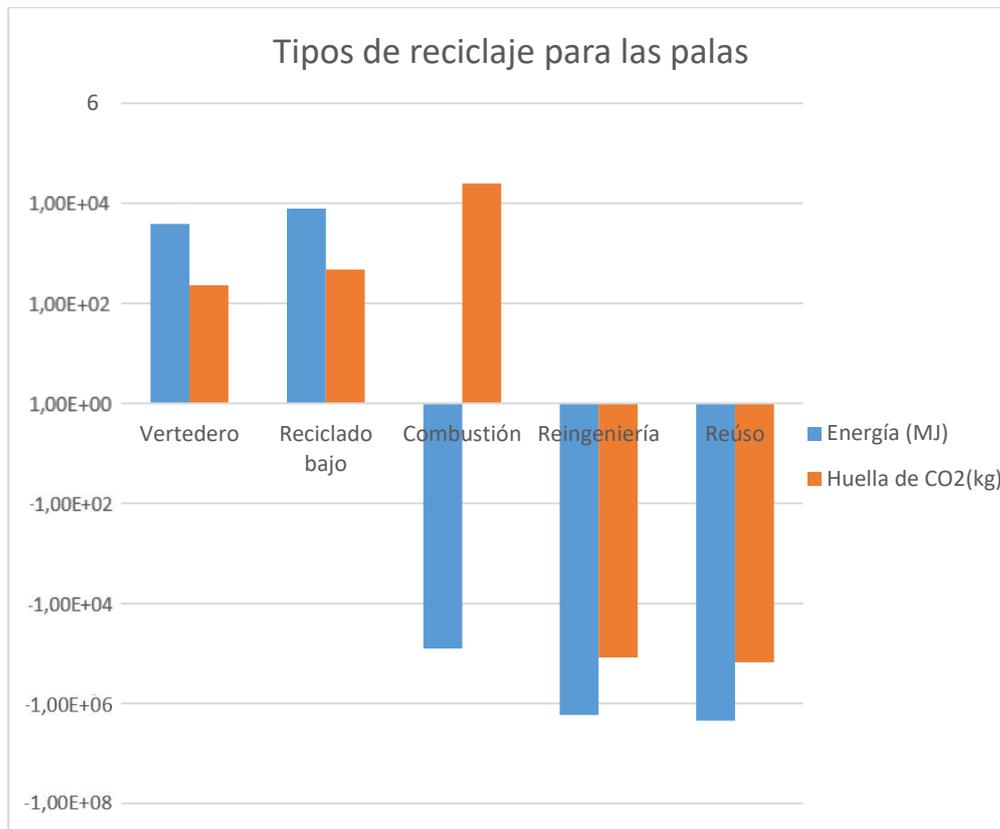
Tabla 23. Energía usada para diferentes procesos de final de vida útil de las palas.

Componente	Material	Ciclo de fin de vida	Masa (kg)	Energía usada en recolección y reciclado (MJ/kg)	Ahorro energía al final de vida (MJ/kg)	Energía total usada (MJ)
Pala	Fibra de vidrio y resina epoxy	Vertedero	$2 \cdot 10^4$	0,2	0	$3,9 \cdot 10^3$
Pala	Fibra de vidrio y resina epoxy	Reciclado bajo	$2 \cdot 10^4$	0,5	-0,1	$7,8 \cdot 10^3$
Pala	Fibra de vidrio y resina epoxy	Combustión	$2 \cdot 10^4$	0,5	-4,6	$-8 \cdot 10^4$
Pala	Fibra de vidrio y resina epoxy	Reingeniería	$2 \cdot 10^4$	0,2	-90	$-1,7 \cdot 10^6$
Pala	Fibra de vidrio y resina epoxy	Reúso	$2 \cdot 10^4$	0,2	-1,1·102	$-2,2 \cdot 10^6$

Tabla 24. Huella de carbono producida para diferentes procesos de final de vida útil de las palas.

Componente	Material	Ciclo de fin de vida	Masa (kg)	CO ₂ producido en recolección y reciclado (kg/kg)	Ahorro CO ₂ al final de vida (kg/kg)	CO ₂ total producido (kg)
Pala	Fibra de vidrio y resina epoxy	Vertedero	$2 \cdot 10^4$	0,012	0	$2,3 \cdot 10^2$
Pala	Fibra de vidrio y resina epoxy	Reciclado bajo	$2 \cdot 10^4$	0,03	-0,006	$4,7 \cdot 10^2$
Pala	Fibra de vidrio y resina epoxy	Combustión	$2 \cdot 10^4$	0,03	1,2	$2,5 \cdot 10^4$
Pala	Fibra de vidrio y resina epoxy	Reingeniería	$2 \cdot 10^4$	0,012	-6,3	$-1,2 \cdot 10^5$
Pala	Fibra de vidrio y resina epoxy	Reúso	$2 \cdot 10^4$	0,012	-7,8	$-1,5 \cdot 10^5$

Figura 68. Energía y huella de carbono para los diferentes procesos de final de vida útil de las palas.



A la vista del gráfico queda claro que las opciones de vertedero y reciclado bajo no son viables ni energéticamente ni en producción de CO₂, pues en ambos casos hay que aportar energía para procesar el componente al final de su vida útil. Es curioso observar como la deposición en un vertedero es más rentable energéticamente que la realización de un reciclado bajo, siendo ésta la peor opción estudiada. Es aquí donde hay que encontrar un equilibrio para ciertos materiales de difícil reciclado, cuya acumulación puede ser también nociva para el medio ambiente.

Lo ideal, al igual que con muchos materiales, sería la reutilización lo cual consistiría en volver a utilizarlo para la misma finalidad en el mismo aerogenerador o en otro aerogenerador, lo cual no será posible pues el material después de tanto tiempo de servicio ya no es capaz de resistir los mismos esfuerzos y habría que destinarlo a otra finalidad que conlleve menos esfuerzo mecánico por parte del material.

Otra opción que habría que valorar sería la de reingeniería, que consistiría en realizar una reparación o alguna modificación al componente para destinarla a otro uso menos exigente mecánicamente. El problema de esta solución sería la de buscar un uso alternativo que realmente sea útil, lo cual es complicado debido a las dimensiones y geometría de la pala, pues son muy grandes y de geometría poco convencional.

En Castilla y León se está llevando a cabo un novedoso proyecto para reciclar los plásticos y fibra de los aerogeneradores en material para pavimentar las carreteras. Éste proyecto consiste básicamente en primer lugar de la retirada de todo el componente plástico y de la fibra de vidrio de las palas realizando su separación. Una vez separados se añaden según se necesiten para la mejora y construcción de asfalto (Residuosprofesional, 2017).

Si no fuera posible ninguna manera de aplicar una reingeniería o una reutilización para las palas, lo adecuado sería la realización de una combustión del material. Pues aunque este es el método que más CO₂ produce, compensa con la notable cantidad de energía que emite, la cual podemos aprovechar.

Todas estas conclusiones las podemos aplicar de la misma manera a los otros componentes del aerogenerador que comparten material con las palas, los cuales son el cono del buje y la carcasa de la góndola.

3.13 ESTUDIO DE PROPIEDADES DE DIFERENTES PROPUESTAS DE MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE LAS PALAS

Todos los datos a excepción de la durabilidad de los materiales los hemos obtenido de la base de datos del programa CES EduPack 2010.

Para obtener el volumen necesario vamos a suponer un valor inicial de volumen de los diferentes materiales igual al volumen que tienen las palas de fibra de vidrio, el cual vamos a multiplicar luego por los cocientes de módulo de Young y por el cociente de la durabilidad que

lo relaciona con los otros materiales, para así según la durabilidad que tenga el nuevo material en comparación con la fibra de vidrio y con la resistencia que tenga de módulo de Young tener una aproximación del nuevo volumen de material que vamos a necesitar.

La durabilidad la vamos a representar con el símbolo Ψ para que así sea posible insertarla en el espacio disponible en la tabla, así como los siguientes símbolos:

ρ = densidad

E = módulo de Young

V = volumen

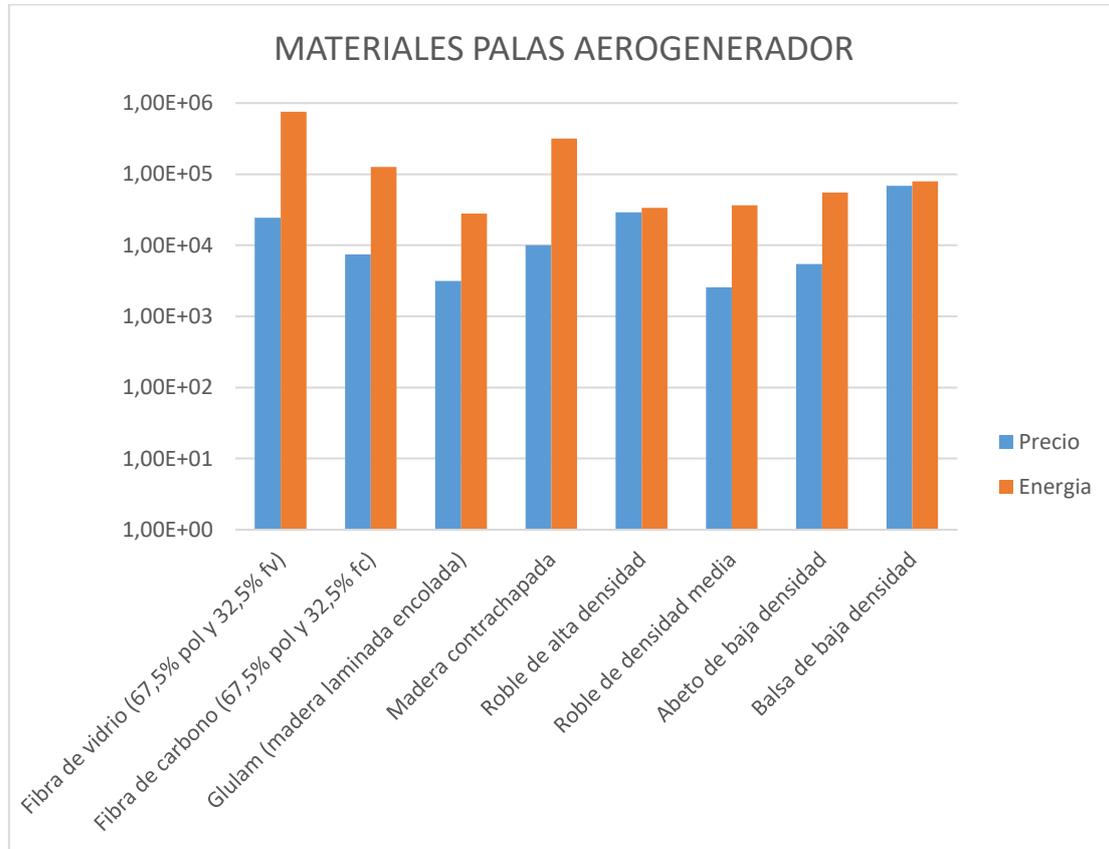
Tabla 25. Propiedades de los diferentes materiales para las palas del aerogenerador.

Material	Composición	ρ $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	Peso (Kg)	Volumen (m ³)	E (GPa)	Energía de producción $\left(\frac{MJ}{Kg}\right)$	Energía de manufactura $\left(\frac{MJ}{Kg}\right)$	Energía total $\left(\frac{MJ}{Kg}\right)$	Precio $\left(\frac{\text{€}}{Kg}\right)$	Durabilidad (años)
Fibra de vidrio y resina epoxy	67,5% polímero y 32,5% fibra de vidrio	$1,65 \cdot 10^3$	6500	3,939	20,7	112,5	3,505	116,005	3,75	25
Fibra de carbono y resina epoxy	67,5% polímero y 32,5% fibra de vidrio	$1,55 \cdot 10^3$	-	-	109,5	272,5	3,5	276	16,2	63
Glulam	100% madera aprox.	575	-	-	13	15	0,5	15,5	1,755	50
Madera contrachapada	100% madera aprox.	750	-	-	7,5	15	0,5	15,5	0,493	10
Roble de alta densidad	100% madera	940	-	-	22,9	7,58	0,5	8,08	6,955	20
Balsa de baja densidad	100% madera	270	-	-	8	7,58	0,5	8,08	6,955	7
Abeto de baja densidad	100% madera	435	-	-	13	7,58	0,5	8,08	0,8025	10
Roble de densidad media	100% madera	765	-	-	17,3	7,58	0,5	8,08	0,571	20

Tabla 26. Estudio del conjunto de diferentes materiales para las palas del aerogenerador.

MATERIAL	MÓDULO DE YOUNG(E) (GPa)	$\frac{E_{fibra\ de\ vidrio}}{E_{material}}$	Ψ (años)	$\frac{\Psi_{fibra\ de\ vidrio}}{\Psi_{material}}$	Volumen necesario (m^3)	Densidad ($\frac{Kg}{m^3}$)	Masa (kg)	$\frac{E}{\rho}$	Precio ($\frac{€}{Kg}$)	Precio total (€)	Energía para producirlo ($\frac{KJ}{Kg}$)	Energía total para producirlo (KJ)
Fibra de vidrio (67,5% pol y 32,5% fv)	20,7	1	25	1	3,939	$1,65 \cdot 10^3$	6500	0,0125	3,75	$2,44 \cdot 10^4$	116,01	$7,54 \cdot 10^5$
Fibra de carbono (67,5% pol y 32,5% fc)	109,5	0,189	63	0,397	0,295	$1,55 \cdot 10^3$	457	0,0706	16,2	$7,40 \cdot 10^3$	276	$1,26 \cdot 10^5$
Glulam (madera laminada encolada)	13	1,592	50	0,5	3,135	575	1802	0,0226	1,755	$3,16 \cdot 10^3$	15,5	$2,79 \cdot 10^4$
Madera contrachapada	7,5	2,76	10	2,5	27,179	750	20384	0,01	0,493	$1,00 \cdot 10^4$	15,5	$3,16 \cdot 10^5$
Roble de alta densidad	22,9	0,904	20	1,25	4,451	940	4183	0,0244	6,955	$2,91 \cdot 10^4$	8,08	$3,38 \cdot 10^4$
Roble de densidad media	17,3	1,197	20	1,25	5,894	765	4508	0,0226	0,571	$2,57 \cdot 10^3$	8,08	$3,64 \cdot 10^4$
Abeto de baja densidad	13	1,592	10	2,5	15,677	435	6819	0,0298	0,8025	$5,47 \cdot 10^3$	8,08	$5,51 \cdot 10^4$
Balsa de baja densidad	8	2,588	7	3,571	36,403	270	9828	0,0296	6,955	$6,84 \cdot 10^4$	8,08	$7,94 \cdot 10^4$

Figura 69. Precio y energía totales para la producción de las palas según los diferentes materiales estudiados.



A la vista de los gráficos podemos ver como el material más costoso en su producción términos energéticos es curiosamente la fibra de vidrio, mientras que en términos económicos sería una de las alternativas que habíamos estudiando, la balsa de baja densidad, ya que parecía una buena opción debido a su buen nivel de resistencia en relación a su densidad, pero se trata de un material que no es económico, y esto junto a su baja durabilidad hacen que no sea una opción viable para las palas del aerogenerador.

Tras hacer el estudio numérico detallado acerca del precio y la energía de producción de los materiales haciendo una aproximación en base a la durabilidad y resistencia de cada material, relacionándolo con la fibra de vidrio como referente. Llegamos a la conclusión de que en conjunto podrían ser una buena alternativa a la tradicional fibra de vidrio el uso de Glulam, Roble de densidad media o Abeto de baja densidad, ya que proporcionan los mejores valores de precio y consumo de energía, y además no distan mucho del valor de módulo de Young de la fibra de vidrio. Personalmente si tuviese que elegir uno seguramente sería el roble de densidad media,

ya que es el que más módulo de Young posee, acercándose al de la fibra de vidrio, y además la durabilidad de este material también es similar al de la fibra de vidrio, siendo solamente 5 años inferior.

4. RESUMEN, CONCLUSIONES Y FUTURAS

LÍNEAS DE TRABAJO

En resumen, se ha hecho un estudio sobre el ciclo de vida del aerogenerador basándonos en el análisis de las cuatro principales fases que lo constituyen: obtención de la materia prima, manufactura, transporte y reciclaje. Para ello, se ha escogido el lugar de emplazamiento del aerogenerador, así como las diferentes empresas proveedoras de los diferentes componentes que lo constituyen. Se ha analizado dichas fases de manera conjunta para ver cuál es el gasto energético y de emisión de CO₂ global, y también se ha determinado para cada una de las fases del ciclo de vida en concreto. Esto ha permitido evaluar el periodo de amortización energética del aerogenerador según los criterios iniciales establecidos. La fase de obtención de la materia prima es la fase más costosa en términos medioambientales, por lo que hemos buscado un material alternativo para las palas, al ser éste uno de los componentes que más influyen en el tiempo de amortización. Los costes energéticos de la fase de manufactura por cada componente siguen unos valores similares a la de obtención de materia prima, aunque suponen un porcentaje mucho menor de la energía en comparación. Se han comparado tres métodos de transporte diferentes: ferroviario, marítimo y por carretera. En la última fase, la de reciclaje, se ha comparado la energía requerida y la huella de carbono según dos supuestos: el primero cuando todos los materiales van a parar a un vertedero, y el segundo cuando se realiza un reciclaje o reciclaje bajo a todos los componentes en los que sea posible.

Como conclusiones se puede añadir que gracias a la sustitución del material de las palas por roble de densidad media en la fase de obtención de la materia prima somos capaces de realizar un gran ahorro energético y económico en este componente en comparación con el material que se usa usualmente en la actualidad, la fibra de vidrio con resina epoxy. Cabe destacar que esta sustitución del material de las palas también beneficia a la fase de manufactura, ya que dicha madera tiene una energía requerida de procesamiento mucho más baja que la fibra de vidrio. En la fase del transporte se ha visto como el transporte ferroviario es el tipo óptimo, a pesar de tener que recorrer más kilómetros que el de carretera, y descartando el marítimo al ser el que más energía requiere debido a la gran cantidad de kilómetros que debe de recorrer para bordear la península. Finalmente en la última fase, la de reciclaje, se observa que hay una

gran diferencia entre los dos casos estudiados, quedando claro la gran ventaja de reciclar los componentes que llega a reducir en gran medida la energía de obtención posterior del mismo material.

Las futuras líneas de trabajo a desarrollar serán la construcción de un prototipo de palas con el nuevo material estudiado como alternativa, el roble de densidad media, para así poder comprobar que cumple las expectativas de funcionamiento esperadas para su cometido. Sería interesante además estudiar un ciclo de final de vida para las palas y la cimentación que nos permitiese aplicar un proceso de reuso o reingeniería, con el cual seríamos capaces de ahorrar gran cantidad de energía, ya que para reciclar dichos materiales aún debemos seguir aportando más energía.

Bibliografía (por orden alfabético)

- acciona. (2015). *acciona*. Obtenido de <https://www.acciona.com/es/salaprensa/noticias/2015/marzo/acciona-windpower-inaugura-primer-planta-torres-eolicas-hormigon-mexico/>
- acento. (2013). *acento*. Obtenido de <https://acento.com.do/2013/opinion/210714-energia-contenida/>
- Archiexpo. (s.f.). *archiexpo*. Obtenido de <https://www.archiexpo.es/prod/bergey-windpower/product-87875-1289509.html>
- Ashby, M. F. (2009). *Materials and the Environment*.
- Ashby, M. G. (s.f.). *Materials and the Environment*.
- Asociación Empresarial Eólica. (2011). *aeolica*. Obtenido de https://www.aeolica.org/uploads/BAJACuadrptico_ACERCATE_AEE_2.pdf
- Asociación Empresarial Eólica. (2018). *aeolica*. Obtenido de <https://www.aeolica.org/comunicacion/la-actualidad-eolica/3770-vestas-instalara-22-aerogeneradores-de-4-2-mw-en-un-parque-eolico-en-suecia>
- Asociación Empresarial Eólica. (2020). *Aeolica*. Obtenido de <https://www.aeolica.org/comunicacion/la-actualidad-eolica-en-5-minutos/newsletter-febrero-2020/4019-la-eolica-supera-los-25-700-mw-instalados-en-espana-tras-un-ano-de-intensa-actividad>
- AulaFacil. (s.f.). *aulafacil*. Obtenido de <https://www.aulafacil.com/cursos/medio-ambiente/energia-eolica/el-viento-l37084>
- BOE. (05 de 07 de 1997). *boe*. Obtenido de <https://www.boe.es/boe/dias/1997/07/05/pdfs/A20871-20880.pdf>
- BOE. (22 de 04 de 1998). *boe*. Obtenido de <https://www.boe.es/boe/dias/1998/04/22/pdfs/A13372-13384.pdf>
- BOE. (29 de 01 de 2002). *boe*. Obtenido de <https://www.boe.es/boe/dias/2002/01/29/pdfs/A03507-03521.pdf>

BOE. (29 de 07 de 2011). *boe*. Obtenido de <https://www.boe.es/boe/dias/2011/07/29/pdfs/BOE-A-2011-13046.pdf>

BOE LEGISLACIÓN CONSOLIDADA. (2008). *boe*. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/pdf/2008/BOE-A-2008-2486-consolidado.pdf>

CES EduPack . (2010). *grantadesign*. Obtenido de https://grantadesign.com/download/pdf/CESEduPack_Manual_10.pdf

CIATEQ A.C. (s.f.). *ciateq.repositorioinstitucional*. Obtenido de <https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/274/1/Desarrollo%20de%20una%20caja%20de%20engranes%20RevistaSOMIM%20para%20RN.pdf>

danish wind industry association . (2003). *drømstørre*. Obtenido de <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/tower.htm>

Danish Wind Industry Association. (2003). *drømstørre*. Obtenido de <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/control.htm>

DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET. (2007). *byg.dtu*. Obtenido de file:///C:/Users/Alejandro/Downloads/byg_r177.pdf

direct industry. (s.f.). *directindustry*. Obtenido de <https://www.directindustry.com/prod/stromag-france/product-33941-1374001.html>

direct industry. (s.f.). *directindustry*. Obtenido de <https://www.directindustry.es/fabricante-industrial/transformador-aerogenerador-106214.html>

eadic, escuela técnica. (2013). *www.eadic.com*. Obtenido de <http://eadic.com/wp-content/uploads/2013/09/Monograf%C3%ADa-Conceptos-generales-Energ%C3%ADa-E%C3%B3lica.pdf>

ecointeligencia. (2017). *ecointeligencia*. Obtenido de <https://www.ecointeligencia.com/2017/07/huella-carbono/>

energías renovables . (2019). *energías renovables el periodismo de las energías limpias*. Obtenido de <https://www.energias-renovables.com/eolica/20190904-1>

Energiza. (2018). *energiza*. Obtenido de http://www.energiza.org/index.php?option=com_k2&view=item&id=1246:principales-componentes-de-un-aerogenerador

eoliccat. (s.f.). *eoliccat*. Obtenido de <http://eoliccat.net/las-palas-eolicas-mas-grandes-del-mundo-listas-para-equipar-la-turbina-mas-potente/?lang=es>

evwind. (2014). *evwind*. Obtenido de <https://www.evwind.com/2014/03/11/eolica-y-energias-renovables-aerogeneradores-marinos-g128-5-0-mw-de-gamesa/>

femp. (2015). *femp.femp*. Obtenido de http://femp.femp.es/files/3580-1356-fichero/Guia-Tecnica-Gestion-Residuos-Municipales_Web_Edicion2.pdf

GWEC. (2019). *gwec.net*. Obtenido de <https://gwec.net/wp-content/uploads/2019/04/GWEC-Global-Wind-Report-2018.pdf>

IBERCOFRAN. (s.f.). *ibercofran*. Obtenido de <http://ibercofran.com/>

iz@ro. (2010). *izaro*. Obtenido de <https://www.izaro.com/incremento-de-productividad-en-la-fabricacion-de-aerogeneradores/c-1292347430/>

izanda . (2020). *izanda*. Obtenido de <https://www.izanda.com/repara-frenos-aerogenerador/>

kompass. (s.f.). *es.kompass*. Obtenido de <https://es.kompass.com/c/siemens-gamesa-renewable-energy/es1213191/>

La Unión de Hoy. (2020). *launiondehoy*. Obtenido de <http://www.launiondehoy.com/index.php/52-cartagena-de-imagen/noticias/21137-turbina-eolica-reciclable>

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO. (s.f.). *miteco.gob*. Obtenido de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Deposito-en-vertedero.aspx>

NRG systems. (s.f.). *NRG systems*. Obtenido de https://www.google.com/search?q=anemometro+aerogenerador&rlz=1C1CHBF_esES805ES805&sxsrf=ALeKk03S2LEzdVmFK9l86MgH91tNasQa3Q:1588181735831&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjRoc-Blo7pAhXE2-AKH28DmMQ_AUoAXoECAwQAw&biw=958&bih=955#imgrc=1MpzDVEBCHD_tm

OpexEnergy. (s.f.). *opex-energy*. Obtenido de http://opex-energy.com/eolica/generador_sincrono_y_asincrono.html

proalt ingeniería. (2019). *proalt*. Obtenido de <https://www.proalt.es/mantenimiento-aerogeneradores/>

quercast. (s.f.). *quercast*. Obtenido de <https://www.quercast.co.uk/uk-oak-supply-sawmill/>

Red eléctrica de España. (2020). *Avance del Informe del sistema eléctrico español 2019*. Obtenido de

- https://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documentos/InformesSistemaElectrico/2020/Avance_ISE_2019.pdf
- renovetec. (2019). *mantenimientodeaerogeneradores*. Obtenido de <http://www.mantenimientodeaerogeneradores.com/index.php/parametros-caracteristicos-de-los-aerogeneradores>
- renovetec. (s.f.). *mantenimientodeaerogeneradores*. Obtenido de <http://www.mantenimientodeaerogeneradores.com/index.php/clasificacion-de-aerogeneradores>
- Residuosprofesional. (2017). *residuosprofesional*. Obtenido de <https://www.residuosprofesional.com/refibre-proyecto-de-reutilizacion-de-palas-eolicas-unico-en-europa/>
- Revista del sector marítimo ingeniería naval. (2016). *sectormarítimo*. Obtenido de <https://sectormaritimo.es/torre-telescopica-aerogenerador-gran-canaria>
- Sandia National Laboratories. (2019). *energy.gov*. Obtenido de <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/12/f69/SAND2019-14173-Optimized.pdf>
- sensoricx. (2018). *sensoricx*. Obtenido de <https://sensoricx.com/termodinamica-y-procesos-industriales/aerogenerador/>
- spares in motion. (s.f.). *sparesinmotion*. Obtenido de <https://www.sparesinmotion.com/es/node/73924>
- Structuralia. (2018). *blog.structuralia*. Obtenido de <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>
- Structuralia. (2018). *Structuralia*. Obtenido de <https://blog.structuralia.com/el-reciclado-del-hormigon-y-sus-enormes-ventajas-medioambientales>
- thewindpower. (2018). *thewindpower*. Obtenido de https://www.thewindpower.net/windfarm_es_2473_sierra-del-buey.php
- thewindpower. (2020). *thewindpower*. Obtenido de https://www.thewindpower.net/operator_es_540_energias-renovables-de-la-region-de-murcia.php

thewindpower. (2020). *thewindpower*. Obtenido de https://www.thewindpower.net/turbine_es_164_enercon_e40-500.php

tiposdeenergia.info. (2012). Obtenido de <https://tiposdeenergia.info/fuentes-de-energia/>

Wood Solutions. (s.f.). *woodsolutions*. Obtenido de <https://www.woodsolutions.com.au/wood-species/balsa>

Woodworkersuk. (s.f.). *woodworkersuk*. Obtenido de <https://www.woodworkersuk.co.uk/images/1900-timber-durability-chart.jpg>

World Energy Trade. (2019). *worldenergytrade*. Obtenido de <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/como-funcionan-los-aerogeneradores>

WTP. (s.f.). *wtpstyle*. Obtenido de <https://www.wtpstyle.com/solid-wood-vs-particle-board-furniture/>