



TRABAJO FIN DE GRADO

Estrategia y coste del desmantelamiento de parque eólicos onshore

Strategy and cost of onshore wind farms decommissioning

Autor:

Javier Galván Serrano

Director:

Lucas Sanso Navarro

Ingeniería en Tecnologías Industriales

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Universidad de Zaragoza

5 de Septiembre de 2024

Resumen

El presente Trabajo Fin de Grado se basa en el análisis de una estrategia y los costes de desmantelar un parque eólico onshore, haciendo especial énfasis en la economía circular.

Para esto se ha llevado a cabo un análisis de la situación actual de la flota eólica española y su antigüedad. Posteriormente, se describen los distintos elementos y materiales que componen el conjunto de un aerogenerador, acompañado del proceso de desmontaje que se debe seguir para su desmantelamiento.

Se ha hecho una investigación de mercado para identificar líneas de investigación y posibles mejoras aplicables tanto al proceso de desmantelamiento como a la gestión de residuos.

Por último, se han planteado dos escenarios en el que se desmantela un parque eólico cercano a Zaragoza y se han calculado los costes de llevarlo a cabo.

Palabras clave: Parque eólico, repotenciación, ciclo de vida, gestión de residuos, análisis de costes y economía circular.

Abstract

This Final Degree Project is based on the analysis of a strategy and the costs of decommissioning of an onshore wind farm, with special emphasis on the circular economy.

For this purpose, an analysis of the current situation of the Spanish wind fleet and its age has been carried out. Subsequently, the different elements that make up a wind turbine and the materials of which they are composed are described, together with the dismantling process to be followed for its dismantling.

A market research has been carried out to identify lines of research and possible improvements applicable to both the dismantling process and waste management.

Finally, two scenarios to dismantle of a wind farm near Zaragoza has been proposed and the costs of carrying it out have been calculated.

Keywords: Wind farm, repowering, life cycle, waste management, cost analysis and circular economy.

Índice de contenidos

1 Parques eólicos en la actualidad en España.....	9
1.1 Potencia instalada y generación eólica en España.....	9
1.2 Vida útil y extensión de vida de los parques actuales	11
1.3 Repotenciación de parques eólicos.....	12
1.4 Antigüedad de los parques eólicos en España.....	13
1.5 Ejemplos de repotenciación en España.....	14
2. Composición de los aerogeneradores: Componentes y materiales	16
2.1 Cimentaciones	16
2.3 Torre	17
2.4 Góndola.....	19
2.5. El rotor: buje o cubo, palas y cono de vórtice	20
2.5 Visión general de los materiales usados en un aerogenerador.....	22
2.6 Computo de elementos y materiales del aerogenerador	22
3. Proceso de desmontaje de turbinas.	25
3.1 Desmontaje del rotor.....	26
3.2 Desmontaje de la góndola.....	30
3.3 Desmontaje de la torre	31
3.4 Desmontaje de las cimentaciones	34
4. Estudio de mercado para identificar estrategias de mejora	36
4.1 Desensamblaje de componentes.....	36
4.1.1 Bladerunner.....	36
4.2 Transporte	37
4.2.1 NABRAJOINT	38
4.2.2 Corte con hilo adiamantado	39
4.3 Gestión de componentes	40
4.3.1 Re-Wind network.....	41

4.3.2 Chatarrerías	43
4.3.4 Reciclaje de palas, materiales compuestos	46
5. Propuesta de mejoras al proceso actual de desmantelamiento	48
5.1 Inspección previa de las palas con drones	48
5.2 Corte de grandes piezas no reutilizables in-situ	50
5.3 Mantenimiento de caminos locales con los residuos de cimientos	52
6. Estudio económico	54
6.1 Presentación datos de costes parque eólico Prattsburgh de DNV	55
6.1.1 Presentación parque.....	55
6.1.2 Suposiciones generales del caso DNV	56
6.1.3 Costes desmontaje	57
6.1.4 Costes retirada de elementos	58
6.1.5 Costes de desechos – Venta.....	60
6.2 Costes desmantelamiento parque Acampo Arias, Zaragoza.....	62
6.2.1 Presentación parque Acampo Arias, Zaragoza	63
6.2.2 Costes Acampo Arias, escenario de no reventa	64
6.2.2.1 Costes de desmontaje	64
6.2.3 Costes retirada de elementos	65
6.2.4 Costes de desechos – Venta	66
6.2.5 Coste total desmantelamiento parque Acampo Arias, escenario sin venta	67
6.3 Costes Acampo Arias, escenario reventa parcial + mejoras propuestas	68
6.3.1. Costes desmontaje	69
6.3.2 Costes retirada	69
6.3.3 Costes de desechos – Venta	70
6.3.4 Costes totales	71
7. Conclusiones	73
Bibliografía.....	74

Índice de Figuras

Ilustración 1: Distribución porcentual de la generación eléctrica en España en 2022. Fuente: [1]	9
Ilustración 2: Evolución anual y acumulada de la potencia instalada en España. Fuente: [2].....	10
Ilustración 3: Numero de parque eólicos por CC.AA (2021). Fuente:[2].....	10
Ilustración 4: Variación en las dimensiones de un aerogenerador tras un "partial repowering". Fuente: [30]	11
Ilustración 5: Variación de algunas características tras un "partial repowering". Fuente:[6]	12
Ilustración 6: Evolución de la antigüedad del parque eólico español. Fuente: [2].....	13
Ilustración 7: Antes y después de la repotenciación parque eólico El Cabrito. Fuente:[3]	14
Ilustración 8: Antes vs después de repowering El Cabrito. Fuentre: [8]	15
Ilustración 9: Fotografía del proceso de repotenciación del parque eólico de Malpica. Fuente: [4]	15
Ilustración 10: Fase inicial de los cimientos con la jaula de pernos al descubierto. Fuente: Elaboración propia	16
Ilustración 11: Estructura de acero de los cimientos. Fuente: [5].....	17
Ilustración 12: Almacenaje de módulos de la torre previo al montaje. Fuente: elaboración propia	18
Ilustración 13: Montaje modular de una torre eólica de acero. Fuente:[6]	18
Ilustración 14: Elementos en el interior de la góndola. Fuente: [14].....	20
Ilustración 15: Instalación de una pala. Fuente: [9].....	21
Ilustración 16: Almacenaje de las palas en la plataforma de montaje. Fuente: Elaboración propia.....	21
Ilustración 17: Materiales usados en un aerogenerador. Fuente: [8]	22
Ilustración 18: Composición en % de cada elemento principal de un aerogenerador. Fuente:[2]	24
Ilustración 19: Maniobra de descenso del rotor por partes. Fuente: elaboración propia.	26
Ilustración 20: Maniobra de descenso de rotor en bloque. Fuente: elaboración propia..	27
Ilustración 21: Utillaje de elevación de palas. Fuente: [13]	28

Ilustración 22: Corte de palas de aerogenerador mediante water jet cutting. Fuente: [22]	29
Ilustración 23: Corte de palas de aerogenerador mediante disco de corte. Fuente: [23]	29
Ilustración 24: Corte de palas de aerogenerador mediante cable de corte adiamantado. Fuente:[24]	29
Ilustración 25: Esquema componentes de la base de la torre. Fuente: [16]	31
Ilustración 26: sistemas de elevación. Piñón-cremallera (izd.) y guiado por cable (der.). Fuente:[25].	32
Ilustración 27: Interior de torre aerogenerador: sistema de elevación por cable. Fuente: [17]	32
Ilustración 28: Torre de hormigón segmentada. Fuente:[31].	33
Ilustración 29: Demolición de cimientos de aerogenerador con martillo hidráulico (izq.) y Acero separado del hormigón de los cimientos para su posterior reciclaje (der.). Fuente: [19]	35
Ilustración 30: Sistema de sujeción de las palas BLADERUNNER.Fuente:[32]	37
Ilustración 31: Sistema BLADERUNNER en funcionamiento. Fuente: [32]	37
Ilustración 32: Prototipo de NABRAJOINT para ensayos de fatiga. Fuente:[33]	39
Ilustración 33: Unión de segmentos de pala NABRAJOINT. Fuente:[33]	39
Ilustración 34: Equipo de corte con hilo adiamantado. Fuente:[37]	40
Ilustración 35: BladePlatform de Re-Wind. Fuente:[34]	42
Ilustración 36: BladeBridge de Re-Wind. Fuente:[34]	42
Ilustración 37:Proyecto piloto BladeBridge. Fuente:[36]	43
Ilustración 38: Feed Bunk de Re-Wind. Fuente:[34]	43
Ilustración 39: Valor de materiales de un aerogenerador a precio de chatarra. Fuente: Elaboración propia [38].	44
Ilustración 40: Dron DJI para sector industrial M300 RTK. Fuente:[43]	49
Ilustración 41: Dron DJI M300 RTK en parque eólico. Fuente:[43]	49
Ilustración 42: Excavadora Hitachi equipada con 3 discos de corte. Fuente:[44]	50
Ilustración 43: Equipo de corte por hilo adiamantado (peso:500KG). Fuente:[46]	51
Ilustración 44: Equipo triturador J-1480 con tren de rodaje y separador magnético. Fuente: [45]	52
Ilustración 45: Imagen satélite esquematizada parque eólico Acampo Arias. Fuente: elaboración propia.	54

Índice de Tablas

Tabla 1: Desglose de materiales (total) desmantelamiento planta eólica. Fuente: Elaboración propia y [10].....	23
Tabla 2: Desglose de materiales (Por MW instalado) desmantelamiento planta eólica. Fuente: elaboración propia y [10].....	23
Tabla 3: Precios de metales en chatarrería a 15/08/2024. Fuente: [38]	44
Tabla 4: Precios de vertido de hormigón de RECYTOUR. Fuente: Elaboración propia.....	45
Tabla 5: Composición parque eólico Pratssburgh. Fuente:[48]	56
Tabla 6: Costes de movilización maquinaria estudio DNV	57
Tabla 7: Costes desmontaje aerogeneradores estudio DNV	57
Tabla 8: Coste desmontaje subestación HV estudio DNV	58
Tabla 9: Coste total desmontaje parque de Pratssburgh estudio DNV	58
Tabla 10: Coste retirada aerogeneradores estudio DNV	59
Tabla 11: Coste total retirada de subestación HV estudio DNV	59
Tabla 12: Coste total retirada parque de Pratssburgh estudio DNV	60
Tabla 13: Precios materias primas estudio DNV 2022.	60
Tabla 14:Ingresos/costes de vertidos estudio DNV	61
Tabla 15:Ingresos provenientes de venta de componentes del estudio de DNV	61
Tabla 16: Composición parque eólico Acampo Arias. Fuente: Elaboración propia.	63
Tabla 17: Coste desmontaje aerogeneradores parque Acampo Arias.....	64
Tabla 18: Coste desmontaje subestación parque Acampo Arias.	64
Tabla 19: Coste total desmontaje parque Acampo Arias.	65
Tabla 20: Coste retirada elementos aerogeneradores parque Acampo Arias.	65
Tabla 21: Coste retirada elementos subestación HV parque Acampo Arias.....	65
Tabla 22: Coste retirada total elementos parque Acampo Arias.	66
Tabla 23: Coste vertido componentes aerogeneradores parque Acampo Arias.	66
Tabla 24: Desglose coste vertido aerogenerador en Ingresos-Costes.....	66
Tabla 25: Coste total gestión residuos parque Acampo Arias.....	67
Tabla 26: Coste total desmantelamiento parque Acampo Arias, sin venta de componentes.	67
Tabla 27:Coste implementación de las mejoras propuestas. Fuente: elaboración propia y	69

Tabla 28: Coste total desmontaje parque Acampo Arias escenario con reventa y mejoras. 69

Tabla 29: Coste total retirada parque Acampo Arias escenario con reventa y mejoras. 70

Tabla 30:Ingresos obtenidos reventa parcial parque Acampo Arias escenario mejoras aplicadas 71

Tabla 31: Coste total gestión de residuos parque Acampo Arias escenario mejoras aplicadas 71

Tabla 32: Coste total desmantelamiento parque Acampo Arias con reventa parcial, previo a aplicar mejoras. 71

Tabla 33: Coste total desmantelamiento parque Acampo Arias con reventa parcial y mejoras aplicadas. 72

1 Parques eólicos en la actualidad en España

1.1 Potencia instalada y generación eólica en España

A pesar de que estemos muy acostumbrados a ver aerogeneradores a los lados de la carretera cuando vamos en el coche y parezca que llevan ahí toda la vida, eso no es así. Lo que podemos observar es el resultado de muchos años, de desarrollo, investigación, incentivos a la producción de energía verde, inversión tanto privada como pública y numerosos proyectos para la construcción de todos los parques eólicos. Todo ello da como resultado la siguiente distribución de fuentes de producción de energía eléctrica, donde la energía eléctrica cubre ya casi el 25% (ver ilustración 1).

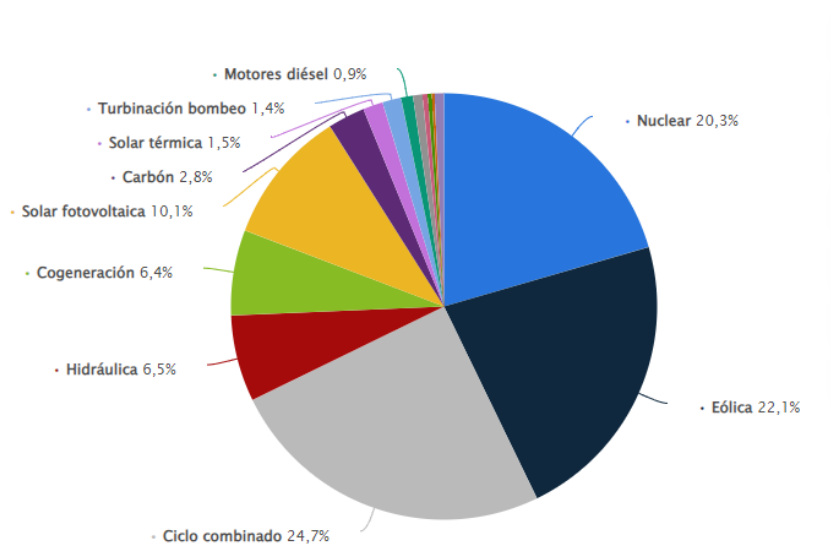


Ilustración 1: Distribución porcentual de la generación eléctrica en España en 2022. Fuente: [1]

Brevemente, respecto al panorama internacional, cabe mencionar que España es puntera en este sector. Siendo el quinto país del mundo con más potencia instalada, sólo por detrás de China, Estados Unidos, Alemania e India. Y el segundo país europeo por detrás de Alemania

Por su parte, dentro de España, en las últimas décadas, la potencia instalada ha alcanzado un total de 29.813MW en 2022 (ver ilustración 2).

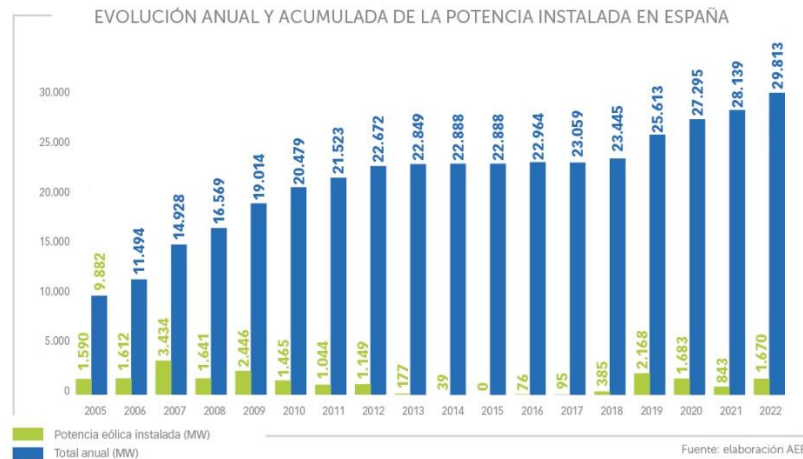


Ilustración 2: Evolución anual y acumulada de la potencia instalada en España. Fuente: [2]

De la gráfica anterior, se puede extraer la conclusión que, hasta la fecha, sólo ha experimentado un incremento en la potencia total instalada a pesar de tener un periodo de 5 años con apenas instalación (periodo de 2012 al 2017).

Aparte de conocer el total de la potencia instalada en el España, es interesante conocer como esta distribuida dentro del país. A continuación podemos ver una tabla que resume el número de parque eólicos por comunidades autónomas en el año 2021, correspondiente a un total de 28.138 MW (Figura 2)

Comunidad autónoma	Nº de parques eólicos
Andalucía	162
Aragón	168
Asturias	23
Baleares	46
Cantabria	3
Castilla La Mancha	148
Castilla y León	267
Cataluña	47
Comunidad Valenciana	39
Extremadura	1
Galicia	179
Islas Canarias	89
La Rioja	14
Murcia	14
Navarra	58
País Vasco	7
TOTAL	1.265

Ilustración 3: Numero de parque eólicos por CC.AA (2021). Fuente:[2]

Será interesante ver qué ocurre en la siguiente década ya que numerosos parques alcanzarán su vida útil inicialmente prevista y se lleve a cabo su desmantelamiento. Podría darse un posible escenario de disminución de la potencia total instalada si la potencia desmantelada no es compensada con nuevos parques.

1.2 Vida útil y extensión de vida de los parques actuales

Hasta ahora, los aerogeneradores han sido diseñados de media para una vida útil de entre 20 y 25 años, en función de la ubicación de trabajo que va acompañada de unas condiciones meteorológicas propias del lugar y del desgaste previsto a lo largo de su vida. No obstante, el funcionamiento de estos se puede alargar entre 5 y 10 años adicionales, si se realizan diversas inversiones en mantenimiento, cambio de determinados elementos que generalmente suelen ser, mejoras de las palas, cajas de transmisiones, rodamientos u otros componentes internos de la nacelle. Son principalmente elementos referidos a la parte mecánica y eléctrica del aerogenerador. Este procedimiento es llamado “Partial repowering”, repotenciación parcial o extensión de vida útil.

Hay que destacar que en procesos de repotenciación parcial pueden resultar en un ligero aumento de la capacidad nominal, aumento de la altura total de la turbina o del diámetro del rotor. Esos aumentos de potencia o dimensiones están limitados ya que se parte de una torre y cimientos de un aerogenerador ya existente.

También hay que mencionar que el desgaste del aerogenerador puede ser disminuido si se realizan las labores de mantenimiento preventivo adecuadas.

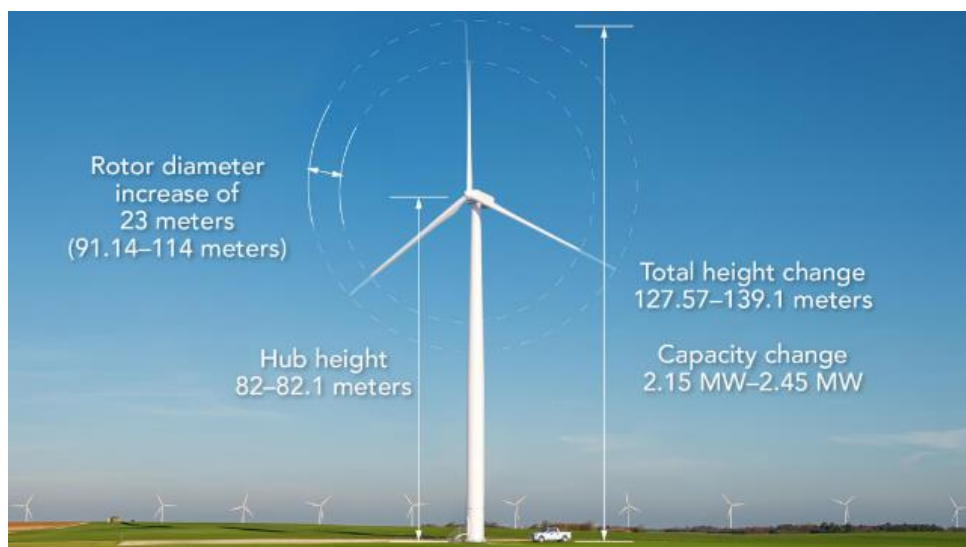


Ilustración 4: Variación en las dimensiones de un aerogenerador tras un "partial repowering". Fuente: [30]

En la siguiente figura podemos observar una gráfica que muestra la variación de la altura, del tamaño de rotor y de la capacidad nominal tras una repotenciación parcial. La obtención de estos datos proviene de un estudio de 12 proyectos que incluían 769 aerogeneradores y un total de 1.6 GW previos a la modificación.

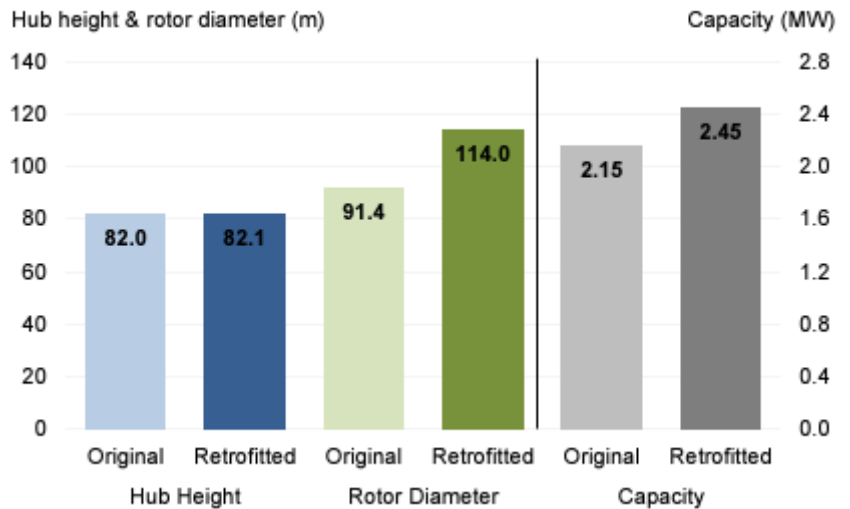


Ilustración 5: Variación de algunas características tras un "partial repowering". Fuente:[6]

1.3 Repotenciación de parques eólicos

Alternativamente a la Extensión de vida útil de parques eólicos, se puede realizar una Repotenciación o “Repowering”. Este consiste en alargar la vida útil del parque en su conjunto mediante la sustitución de algunos componentes por otros más modernos. Esto será posible siempre y cuando ese cambio pueda ser soportado por el resto de los componentes y se disponga de los permisos necesarios para seguir operando en la misma ubicación con máquinas de mayor envergadura. Lo más habitual es la sustitución de los aerogeneradores por otros más altos y con un tamaño de palas superior.

A partir de un estudio realizado por la asociación WindEurope, resultado del seguimiento de 241 proyectos de repowering en Europa, se concluye que, de media, tras los proyectos de repowering, hay un 25% menos de aerogeneradores y se experimenta un incremento de potencia instalada de un 158% [8].

1.4 Antigüedad de los parques eólicos en España

Según la siguiente figura, se está alcanzando el fin del ciclo de vida (prevista) de muchas de las centrales eólicas que operan actualmente.



Ilustración 6: Evolución de la antigüedad del parque eólico español. Fuente: [2]Error! Reference source not found.

No podemos saber a ciencia cierta cuándo se va a desmantelar cada parque, no obstante, se puede apreciar en envejecimiento de éstos. En concreto, en 2024, se puede ver que alrededor de 20.000 MW están muy próximos al fin del ciclo de vida, unos 8.500 MW de los cuales ya superarán los 20 años de antigüedad. Dicho de otra forma, el Autor prevé que el número de desmantelamientos ascienda a 1.433 MW en el 2024 y 2.339 MW en el año 2025.

De lo anterior, se concluye que, próximamente, se acometerá el desmantelamiento y la consiguiente gestión de residuos en un número considerable de parques eólicos en España. Esto implicará la resolución de muchas cuestiones acerca de cómo se llevarán a cabo los desmantelamientos y la consiguiente y determinante gestión de residuos, de lo que se hablará más adelante.

Respecto a la previsión de desmantelamiento debemos saber que cada parque tendrá una situación distinta respecto a la “salud” de las instalaciones y su duración. Tomando por definición de desmantelamiento (Derribar o desmontar algo, especialmente clausurar o demoler un edificio u otro tipo de construcción con el fin de interrumpir o impedir una actividad) y respecto al ciclo de vida 20 años de media + 5 extras debido a inversiones adicionales, de ahí podemos concluir que nos aproximamos a años de múltiples cierres de parques.

Abandonar las instalaciones o derribar y llevar todo a vertedero sería lo fácil y poco responsable con el medioambiente. El mástil de los aerogeneradores suele ser de hormigón y acero, también la parte mecánica está compuesta de numerosos elementos eléctricos donde tenemos cobre, y finalmente el elemento más problemático en la gestión de los residuos: las palas. Las palas suponen un gran problema a la hora de separar los materiales ya que estas suelen estar hechas de materiales compuestos, décadas atrás usaban acero, generalmente se trata de epoxi reforzado con fibra de vidrio y en ocasiones se usa fibra de carbono.

1.5 Ejemplos de repotenciación en España

A continuación, se presentan dos casos reales de repotenciación de parques eólicos.

En primer lugar, el parque eólico El Cabrito (Cádiz). Este constaba de 90 aerogeneradores de 330 KW de potencia unitaria haciendo un total de 29,7 MW. Tras 24 años de funcionamiento, se procedió a renovar los equipos sustituyéndolos por tan solo 12 aerogeneradores (8 Nordex N100/3000 de potencia 3 MW y 4 AW70/1500 de potencia 1,5 MW). Como resultado de lo anterior, se obtiene una disminución del número de turbinas, pero manteniendo la potencia.

Otros aspectos a destacar de este proyecto son: la reducción de la cantidad de terreno ocupado, un menor impacto acústico y, al aumentar la distancia entre generadores, mayor permeabilidad al paso de la avifauna.



Ilustración 7: Antes y después de la repotenciación parque eólico El Cabrito. Fuente:[3]

A continuación, se incluye una tabla resumen que muestra, con datos, el antes y el después del proyecto de repowering llevado a cabo en el parque eólico El Cabrito.

At a glance		Before		After
• 87% fewer turbines	Turbines	Number	90	12
		Power rating	0.333 MW	8 x 3 MW 4 x 1.5 MW
• Overall, 7.5x more powerful turbines	Wind farm capacity		30 MW	30 MW
• Same wind farm capacity	OEM		Kenetech	Nordex
• 24 years old when dismantled				

Ilustración 8: Antes vs después de repowering El Cabrito. Fuente: [8]

Otro caso de repotenciación es el parque eólico de Malpica de Bergantiños (Galicia) en el año 2017. Este parque contaba con 69 turbinas que hacían un total de 16,45 MW. La repotenciación trató de sustituir estas turbinas por únicamente 7, también manteniendo la potencia a la mencionada 16,45 MW. En este caso, la repotenciación supuso una reducción del terreno utilizado de 3,2 a 1,9 hectáreas (-40%).



Ilustración 9: Fotografía del proceso de repotenciación del parque eólico de Malpica. Fuente: [4]

2. Composición de los aerogeneradores: Componentes y materiales

A continuación, se presenta un desglose de las partes que compone un aerogenerador, incluyendo detalles sobre los residuos que generará el desmantelamiento de los mismos.

2.1 Cimentaciones

Se trata del primer elemento estructural construido y su importancia es vital ya que deberá soportar el peso del aerogenerador y resistir las fuerzas del viento y las condiciones ambientales. Este elemento estructural está compuesto por dos elementos principales: hormigón y acero, lo que se conoce como hormigón armado.

Respecto al hormigón debemos recalcar que está compuesto por cemento, agua, arena y grava. Las proporciones de estas influirán sobre las propiedades y se ajustarán a los requerimientos de la estructura.

Las cantidades de hormigón y acero dependerá del tamaño y la geometría de la cimentación. Normalmente, se disponen 132 kg de acero por cada m³ de hormigón. (Extraído de un video de YouTube de un caso real empleando 42 Tm de acero y 317 m³ de hormigón)

Así mismo, en el interior del volumen de hormigón, se encontrarán tuberías de plástico que alojan cables a través de los cuales se transportará la electricidad producida por el generador y, acero en la jaula de pernos y bridas. Esto último posibilita la conexión entre la cimentación y la torre.

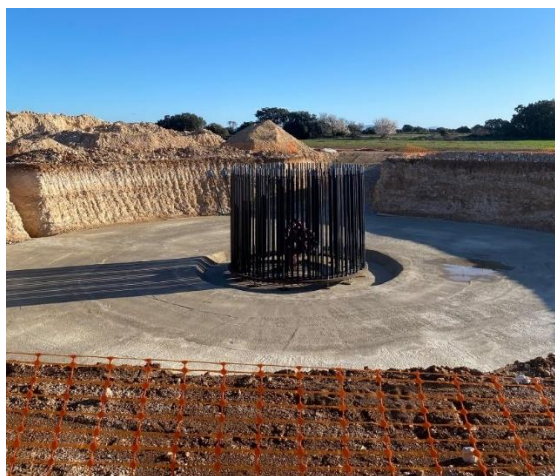


Ilustración 10: Fase inicial de los cimientos con la jaula de pernos al descubierto. Fuente: Elaboración propia



Ilustración 11: Estructura de acero de los cimientos. Fuente: [5]

2.3 Torre

La torre es el siguiente elemento clave en la estructura. Su función es la de sostener la góndola, el rotor y las palas, mientras transfiere las cargas mecánicas y la energía producida al suelo.

Existen distintos tipos de torres según su estructura: Torres tubulares de hormigón, de acero o incluso mixtas (Hormigón – Acero), torres de celosía, y torres de mástil tensado. El autor se va a centrar en las torres más habituales, las torres tubulares generalmente de acero.

Hay que destacar que las torres tubulares no tienen un diámetro constante, sino que es una estructura cónica donde disminuye el diámetro de ésta conforme se aumenta la altura. Dentro de la gama de las torres tubulares según el material las podemos encontrar construidas en acero, siendo esta la elección más popular, en hormigón o una opción intermedia, las híbridas (en acero y hormigón).

Las torres se fabrican a base de láminas de acero de unos centímetros de espesor, con éstas se forman estructuras anulares y posteriormente se sueldan entre ellas en segmentos de 20-30m. La totalidad de la torre suele estar compuesta de 3 segmentos, siendo variable según el modelo y tamaño de la torre. A la hora del montaje, el primer tramo se ancla a la cimentación mediante la jaula de pernos con tuercas situadas en el exterior de la torre, y los sucesivos segmentos tienen la superficie de unión en el interior de la torre, normalmente, también, mediante pernos pretensados. El primer tramo también puede quedar directamente embebido en el interior de la cimentación.

El otro caso que podemos encontrar es que sean torres fabricadas en hormigón armado. En este caso, los módulos cilíndricos de los que hemos hablado están a su vez divididos angularmente en más módulos (3 o 4 generalmente).



Ilustración 12: Almacenaje de módulos de la torre previo al montaje. Fuente: elaboración propia



Ilustración 13: Montaje modular de una torre eólica de acero. Fuente: [6]

2.4 Góndola

La góndola, o *nacelle*, es el siguiente elemento en orden de construcción. Se trata del chasis principal, situándose este en la parte superior de la torre. La unión de la góndola a la torre hay que destacar que no es fija, sino que ésta se une a través de una rueda dentada que permite la orientación del rotor al viento (sistema Yaw).

En ella podemos encontrar principalmente la multiplicadora, el generador y un sistema de refrigeración de la góndola. Respecto al generador varía mucho según el modelo de aerogenerador, no obstante, en su gran mayoría se trata de generadores trifásicos.

Respecto a los materiales usados en ésta, se trata principalmente del uso de acero, aluminio y materiales compuestos (fibra de vidrio o fibra de carbono).

El acero se usa para la estructura principal de la góndola debido a su gran resistencia, ya que éste soportara el peso del rotor y el generador (*main bearing*).

El aluminio es usado para elementos que requieren ser ligeros y no están expuestos a grandes cargas, no obstante, éste sigue teniendo una buena resistencia. Suele ser usado para las carcasas de los distintos elementos como el del transformador o distintas placas de seguridad.

Finalmente, los materiales compuestos se usan en áreas donde se requiere un peso ligero y gran resistencia y durabilidad. Se trata fundamentalmente de los paneles exteriores de la góndola.

En la siguiente imagen podemos ver una representación de la disposición de los elementos en el interior de la góndola. En ella se aprecian los elementos mecánicos y eléctricos mencionados anteriormente. En color verde oscuro, la multiplicadora, en la cual podemos ver el eje de entrada (eje lento, rojo) y el eje de salida (eje rápido, amarillo). A continuación, en verde claro, encontramos el generador eléctrico y, por último, en color azul el sistema de refrigeración de la góndola. Existen también sistemas de refrigeración de otros elementos que dependen normalmente del modelo, dimensiones y potencia. En general se encuentran dos sistemas distintos:

a.- para baja potencia o pequeño tamaño, ventilación natural, una reja de entrada de aire y otra de salida.

b.- para alta potencia, donde se necesita disipar mucha potencia térmica, se usa un ventilador para introducir aire y una reja de salida.

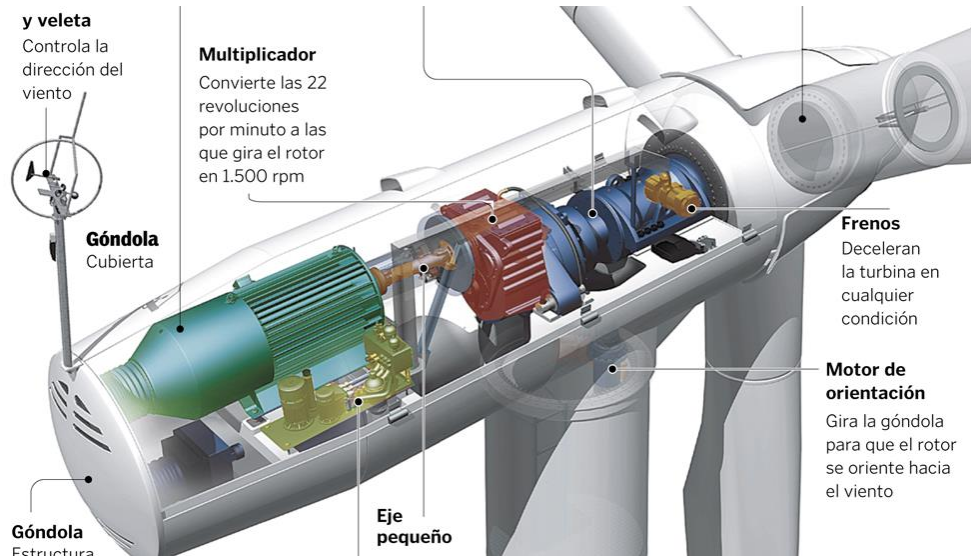


Ilustración 14: Elementos en el interior de la góndola. Fuente: [14]

2.5. El rotor: buje o cubo, palas y cono de vórtice

El rotor se refiere a la parte giratoria del aerogenerador que incluye el buje, 3 palas (dos en algunos casos) y el cono de vórtice. Este es el elemento encargado de capturar la energía cinética del viento, que está unido al eje de transmisión para llevar a cabo la transformación de la energía mecánica a eléctrica.

Respecto a la función de cada uno de los elementos tienen distintos propósitos. El buje, que puede llegar a pesar 30 Tm, es el elemento que hace de unión entre las palas y el eje lento. También se unen a él los rodamientos que permiten variar la orientación de las palas para ajustar la producción de energía. Las palas, que comparten similitudes con las alas de los aviones, cuya función es crear el momento necesario para hacer girar todo el sistema gracias al viento. Y finalmente el cono o nariz, se trata de un elemento que pasa muy desapercibido y tiene función aerodinámica, ya que estará encarada al viento y dada su forma, el buje no creará resistencia al viento y lo redireccionará de la parte frontal del rotor a los respiraderos de la góndola y evitará turbulencias en la parte frontal del rotor.

Respecto a los materiales usados en la fabricación de estos elementos son los siguientes: En el buje, se recurre generalmente al uso de acero mecanizado, aunque en algunos casos,

en los aerogeneradores más modernos, se usan materiales compuestos. Para la nariz, se usan materiales compuestos en algunos casos, aunque generalmente, para abaratar costes, se usa aluminio. Finalmente, en las palas, se hace uso de materiales compuestos generalmente poliéster o epoxi reforzado con fibra de vidrio por la gran cantidad de fuerzas que sufrirá (torsión, cizalladura, flexión).



Ilustración 15: Instalación de una pala. Fuente: [9]



Ilustración 16: Almacenaje de las palas en la plataforma de montaje. Fuente: Elaboración propia.

2.5 Visión general de los materiales usados en un aerogenerador

A continuación, se muestra una infografía que desglosa los elementos principales del aerogenerador y qué materiales están implicados actualmente, en los procesos de repowering y desmontaje de aerogeneradores.

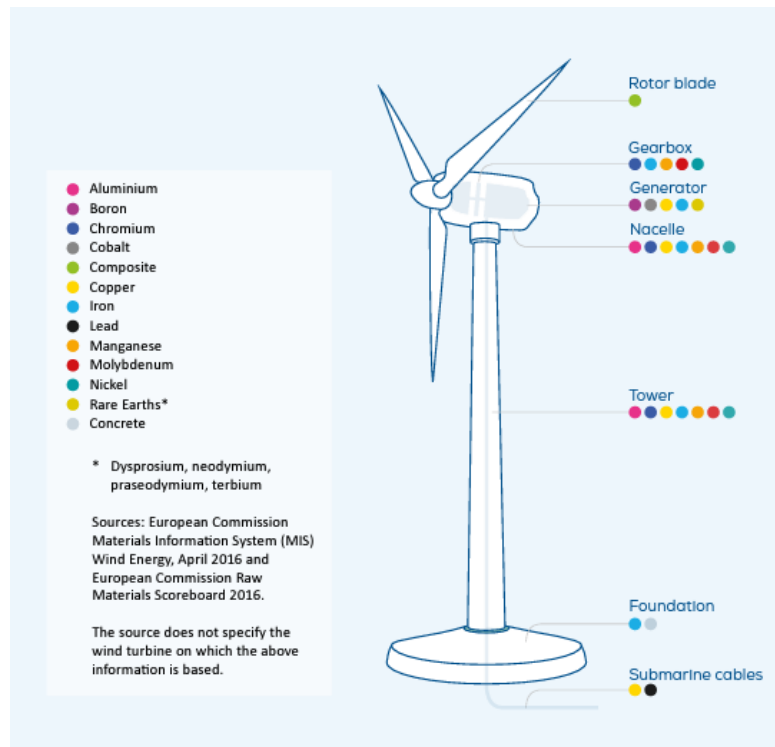


Ilustración 17: Materiales usados en un aerogenerador. Fuente: [8]

Como conclusión de todo lo anterior, se observa que se hace uso de una gran variedad de materiales de distinta naturaleza y esto es lo que complicará la separación de residuos. Cuanto mayor sea el número de materiales usados, extraer valor del desmontaje de los parques eólicos resultará más complejo y más costoso.

No obstante, los materiales más utilizados son: hormigón, acero, aluminio y materiales compuestos (poliéster o epoxi reforzado con fibra de vidrio).

2.6 Computo de elementos y materiales del aerogenerador

A continuación, se aportan las cifras de residuos obtenidos durante el desmantelamiento de un parque eólico. Cabe destacar que los residuos evidentemente dependerán de

diversos factores como pueda ser el tamaño del parque, el modelo de aerogeneradores y la configuración del parque, entre muchos otros.

Por ello, para la elaboración de este listado, el Autor se ha apoyado en un estudio sobre el ciclo de vida realizado por VESTAS (fabricante de tecnología eólica [11]) en un parque onshore de una potencia de 50 MW, utilizando aerogeneradores VESTAS V90-2.0 MW, y por tanto con 25 aerogeneradores.

A continuación, se muestra una tabla simplificada de los tipos de materiales que se obtuvieron del total de la planta. (Tabla completa en el Anexo 1)

Desglose materiales planta de 50 MW (Turbina V90-2.0MW)						
Clasificación del material	Unidad	Turbina	Cimientos	Cables	Interruptores	Trasformadores
Materiales de acero y hierro	t	5133	957	0	5	44
Aleaciones ligeras, aleaciones fundidas y forjadas	t	105	0	555	0	0
Metales pesados no ferrosos, aleaciones fundidas y forjadas	t	42	1	110	2	11
Materiales poliméricos	t	261	3	1015	0	0
Polímeros de procesados	t	7	0	0	0	0
Otros materiales y materiales compuestos	t	530	18772	1	0	1
Componente electricos / electronicos	t	60	0	0	0	0
Combustibles y medios auxiliares	t	22	0	0	0	19
No especificado	t	30	0	0	0	0
Masa total		6193	19733	1682	7	75
Numero de piezas		25	25	1	7	1
Masa media por pieza	t	248	789	1682	1	75

Tabla 1: Desglose de materiales (total) desmantelamiento planta eólica. Fuente: Elaboración propia y [10]

Por otra parte, puede ser interesante tener a mano los valores de residuos generados por unidad de potencia instalada (t/MW). A continuación, podemos observar estos datos:

Desglose materiales planta de 50 MW (Turbina V90-2.0MW)						
Clasificación del material	Unidad	Turbina	Cimientos	Cables	Interruptores	Trasformadores
Materiales de acero y hierro	t/MW	102,66	19,14	0	0,1	0,88
Aleaciones ligeras, aleaciones fundidas y forjadas	t/MW	2,1	0	11,1	0	0
Metales pesados no ferrosos, aleaciones fundidas y forjadas	t/MW	0,84	0,02	2,2	0,04	0,22
Materiales poliméricos	t/MW	5,22	0,06	20,3	0	0
Polímeros de procesados	t/MW	0,14	0	0	0	0
Otros materiales y materiales compuestos	t/MW	10,6	375,44	0,02	0	0,02
Componente electricos / electronicos	t/MW	1,2	0	0	0	0
Combustibles y medios auxiliares	t/MW	0,44	0	0	0	0,38
No especificado	t/MW	0,6	0	0	0	0

Tabla 2: Desglose de materiales (Por MW instalado) desmantelamiento planta eólica. Fuente: elaboración propia y [10]

De la tabla anterior, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los cimientos, a pesar de no tener mucha variedad de materiales, suponen gran parte de la masa de residuos.
- La turbina presenta una variedad significativa de materiales.

Por último, el Autor concluye que la dificultad de la gestión de los residuos aumentará si la cantidad de materiales distintos en un mismo elemento es significativa. Lo anterior incrementará el número de procesos de separación de componentes.

A modo de simplificación, a continuación podemos ver una tabla que nos resume la composición (%) de cada componente.

Parte	Componente	Tipo de material. (en % de peso)					
		Hormigón	Acero	Aluminio	Cobre	Materiales compuestos	Otros
Rotor	Buje		100				
	Palas		3			67	30
Góndola	Multiplicadora		96	2	2		
	Generador		65		35		
	Maquinaria, otros		84	9	4	3	
Torre (de acero)		2	98				

Ilustración 18: Composición en % de cada elemento principal de un aerogenerador. Fuente:[2]

3. Proceso de desmontaje de turbinas.

En este apartado se procederá a desglosar el proceso de desmontaje de un aerogenerador por elementos, con la finalidad de, tras el desmontaje, someter a cada elemento a sus procesos correspondiente de separación de materiales y finalmente tratar de darles una segunda vida (reciclaje / economía circular) o, en el peor de los casos, desecharlos.

El proceso de desmontaje se podría resumir a grosso modo en que es lo mismo que el proceso de montaje, pero en orden inverso de las acciones. No obstante, conviene remarcar que, a la hora de realizar el montaje, todo debe funcionar correctamente cuando comience a operar y la instalación debe ser ágil. Es por eso que partes críticas pueden venir ensambladas desde la planta de producción, como puede ser el caso de la góndola con sus elementos internos o también es el caso de los módulos de torre, con sus escaleras, plataformas y elevadores. Así mismo, puede darse el caso de que, en el desmantelamiento, se dejen elementos sin desmontar como por ejemplo los cimientos (demoler en este caso).

A lo largo de este capítulo se explicará la forma de proceder y a su vez la maquinaria requerida.

Debemos mencionar que, previo al desmontaje, pueden ser necesarias tareas de desbroce de las plataformas de montaje y la habilitación de terrenos para las zonas de almacenaje de piezas y las áreas de reciclaje o procesamiento en el caso de que fuese necesario realizar algún proceso en el propio parque. Ya que, aunque fuese acondicionado para el proceso de montaje, éste puede haber cambiado y haber sufrido una alteración considerable.

Destacar que para este proceso algunos de los principales factores que lo condicionarán serán: la ubicación del parque y su tipo de terreno, modelo de aerogenerador (ya que puede tratarse de tecnologías distintas, y diferentes materiales o construcciones), la meteorología prevista para la desmantelamiento, tamaño del parque (número de aerogeneradores), distancia a parques de reciclaje o centros de recogida de los distintos componentes, legislación correspondiente a transporte de vehículos especiales, distancia a la población más cercana de cara a factores ruidos o contaminantes y otros factores múltiples.

3.1 Desmontaje del rotor

Se trata de la primera fase del desmantelamiento. En esta fase se desmontan los siguientes elementos: buje, palas y nariz. Como ya se ha mencionado previamente, los procesos de desmontaje pueden estar condicionados por numerosos factores, por eso a continuación se van a mencionar y explicar tres (3) métodos, dos de ellos son comunes y un tercero, que es poco habitual por ser reciente y, por tanto, de momento poco extendido en la actualidad.

El primer método consiste en el desmontaje de las palas de forma individual estando aún montadas en el buje. Durante el proceso debemos tener la capacidad de hacer girar el rotor para la correcta colocación de las palas. Para ello, el generador puede estar conectado a la red, aunque en la mayoría de los casos la máquina debe estar desconectada de la red con antelación a el comienzo de las operaciones. En primer lugar, se colocará el rotor de forma que una pala quede en posición horizontal y de activar el freno del rotor para evitar que éste gire por la descompensación de peso una vez retirada la primera pala. Una vez bien colocado el rotor, la grúa ayudada de un utillaje especial (Ilustración 15) situará el gancho en su lugar. Es en ese momento que, operarios, desde el interior del buje, retirarán los distintos pernos de sujeción para así liberarla. Tras ello, se procederá a descender la pala al suelo a una zona habilitada para ello. Una vez finalizada la primera pala se procederá del mismo modo con las otras dos (2) palas.

Finalmente se procede a bajar el buje, que es la estructura donde se fijaban previamente las palas y la nariz (ya mencionado previamente, función únicamente aerodinámica).

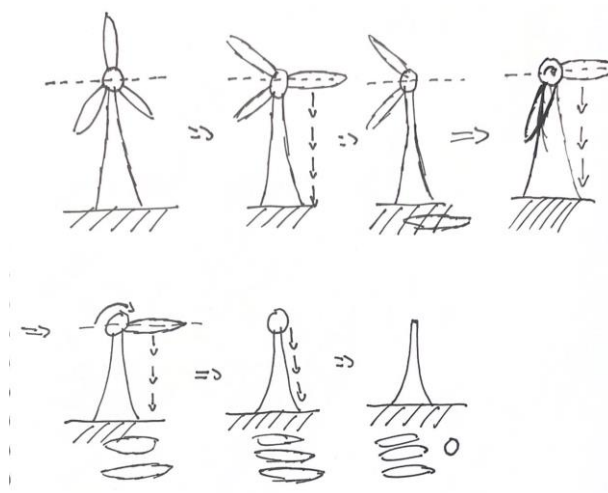


Ilustración 19: Maniobra de descenso del rotor por partes. Fuente: elaboración propia.

El segundo método consiste en bajar todo el rotor en bloque. No obstante, esa operación es más complicada y delicada frente a la mencionada de bajarla por partes. Un requisito indispensable para poder usar este método es que la zona de montaje tenga el tamaño suficiente para alojar el conjunto entero, para posteriormente desmontar en sus correspondientes piezas. Hay que recordar que en la actualidad se están superando los 200 m de diámetro de rotor. Por este motivo, por ejemplo, en parques ubicados en zonas en las que hay vegetación no suele usarse ya que para las plataformas de montaje se prioriza no deforestar la zona en exceso. Como es evidente la grúa que se utilice debe tener mayor capacidad frente a la que se utiliza en el desmantelamiento del rotor por partes.

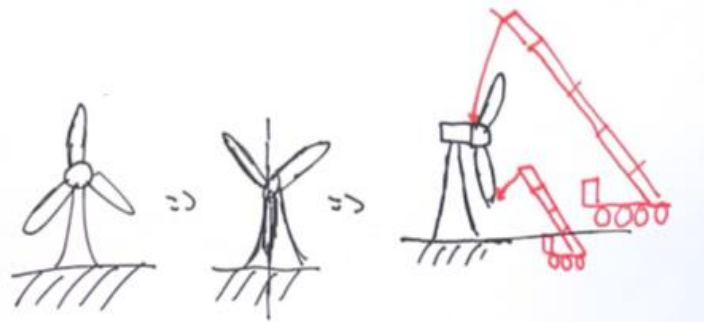


Ilustración 20: Maniobra de descenso de rotor en bloque. Fuente: elaboración propia.

Sobre las grúas, cabe destacar que no hay una única grúa que cubra las necesidades, sino que dentro de la amplia variedad deberemos valorar las opciones (dimensiones, tamaños, disponibilidad, etc.). Lo más común dentro de las grúas de alta capacidad suelen ser grúas autopropulsadas por su movilidad o grúas de orugas. Estas últimas necesitan una flota de camiones para desplazarla al parque y medios auxiliares para su montaje. Una vez ahí podrían moverse entre generadores por sus propios medios. No obstante, el ancho de los caminos y plataformas deberán ser los adecuados para posibilitar su desplazamiento [12]. De media se suelen emplear dos (2) o tres (3) grúas, siendo las de mayor tamaño para elevar piezas y las de menor envergadura para movimiento de piezas o acomodación de estas en el terreno.



Ilustración 21: Utillaje de elevación de palas. Fuente: [13]

Un tercer método innovador de desmontaje el rotor, concretamente de las palas (método también usado para montaje de palas) se trata de el BLADERUNNER patentado por NABRAWIND [20].

Una vez se tiene en el suelo todo el rotor, se procederá a trasladar los distintos elementos fuera del parque a sus sitios correspondientes.

Por parte de las palas existen dos posibilidades cada una con sus pros y contras: transportarlas en una única pieza o trocearlas. La opción de mantenerlas de una única pieza se suele aplicar cuando se le va a dar uso de alguna forma, como puede ser el caso de reusarlas en otros aerogeneradores o venderlas en mercados de segunda mano. La principal desventaja es el transporte ya que se tienen que pedir permisos, también implica un mayor uso de vehículos y mayor coste. Por otro lado, está la opción de trocearlas en diferentes segmentos y de esta forma se facilita el transporte, se reducen costes y evitamos el trámite de permisos de circulación de vehículos especiales. Pero en este caso habrá que valorar las opciones respecto a qué hacer con los residuos: enviarlas a un vertedero o buscar empresas capaces de reciclarlas. Respecto al método de troceado de las palas del aerogenerador encontramos distintas alternativas, cada una tiene sus ventajas e

inconvenientes como cualquier otro proceso. Algunas de las opciones que se utilizan son: corte con agua a presión (*water jet cutting*), excavadora con disco de corte y corte con cable de corte adiamantado.



Ilustración 22: Corte de palas de aerogenerador mediante water jet cutting. Fuente: [22]



Ilustración 23: Corte de palas de aerogenerador mediante disco de corte. Fuente: [23]



Ilustración 24: Corte de palas de aerogenerador mediante cable de corte adiamantado. Fuente:[24]

Respecto al buje, está compuesto principalmente de acero, por lo que lo idóneo será trasladarlo a un centro de reciclaje ya que el acero tiene una alta capacidad de ser reciclado y volver a ser usado.

3.2 Desmontaje de la góndola

Generalmente la góndola ya sale de fábrica con todos los equipos y componentes interiores ya ensamblados lo que facilita el montaje en el parque ya que no solo se gana tiempo sino que también se reduce la posibilidad de errores. Se suele montar todo el equipo dentro de la góndola en la fábrica para facilitar el montaje en la planta, de esta forma se transporta la góndola íntegra y solo queda elevarla y realizar las conexiones correspondientes a la torre, cableados de transporte de potencia y de control. Mediante una grúa, se eleva y se fija a la torre además de realizar las conexiones de control y transmisión de energía. Por eso, para el desmontaje, será la misma forma, en primer lugar, se realizará la desconexión de los elementos hacia la torre, los ya mencionados cables de potencia y control, se procederá a bajarla a tierra y, una vez ahí, se transportará a un centro de tratamiento, donde se analizará el estado de los componentes y en función del estado de cada componente se podrá optar por desecharlo o tratar de darle uso de nuevo. En la mayoría de los casos, sale más rentable vender maquinaria frente a la separación de materiales y su posterior reciclaje. Es por eso que existe un mercado de segunda mano de aerogeneradores y de sus componentes. Como se mencionó a principios de documento, la vida útil de un aerogenerador podía extenderse mediante la sustitución de ciertos elementos, el mercado de segunda mano puede ser atractivo para estos casos. Algunos ejemplos de compañías del sector de la compra-venta de componentes son: windturbines-marketplace [26], MWPS [27], RepoweringSolutions [28] o AMM Capital [29].

Cabe destacar para el posterior tratamiento de estos elementos que el peso y cantidad de material proveniente de estos dependerá de la potencia del aerogenerador y de las características mecánicas del mismo.

3.3 Desmontaje de la torre

Este proceso constará de dos (2) elementos. La propia estructura visible desde fuera del aerogenerador, la torre, y, por otro lugar, todo el conjunto de elementos y estructuras que albergan la torre en su interior. Estos últimos generalmente son: escaleras, ascensor, línea de vida (o línea anticaída), cables de transporte de energía, plataformas intermedias, transformador y sistemas de control.

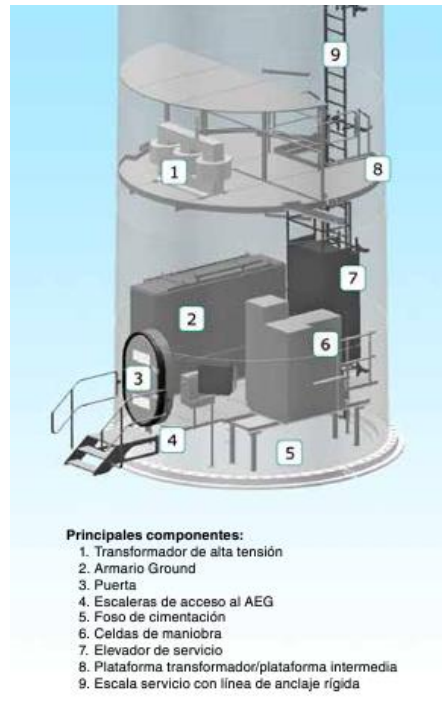


Ilustración 25: Esquema componentes de la base de la torre. Fuente: [16]

Como ya se ha mencionado previamente, la torre de un aerogenerador es modular, lo que significa que está compuesta por varios tramos. En el interior, suele ser una prioridad en el diseño el evitar tener elementos continuos a lo largo de toda la longitud de la torre, es por eso por lo que se fragmenta por módulos todo en el interior siempre que sea posible, el mejor ejemplo es la escalera, que no es una única y continua, si no una por cada tramo de torre y además tras cada plataforma intermedia suelen estar desplazadas un cierto ángulo.

No obstante, sí que hay elementos continuos como son los cables de potencia. (otros elementos como el montacargas hay diversos casos en algunos casos serán continuos los guiados por cable y en otros discontinuos, como los guiados por piñón-cremallera).

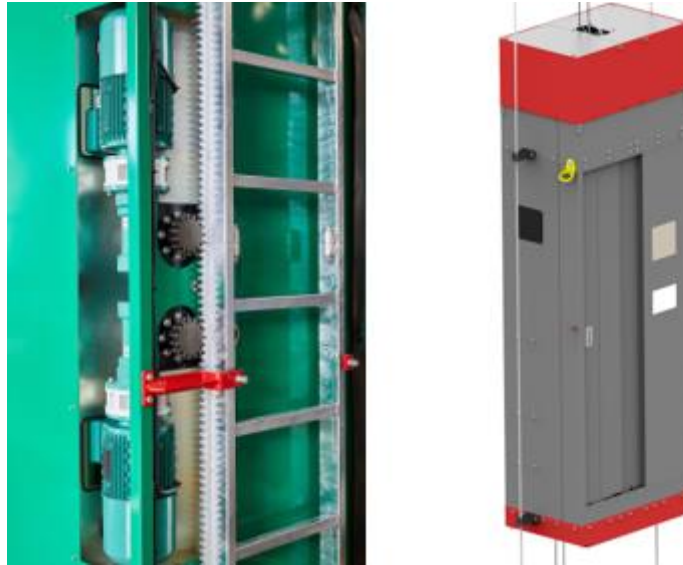


Ilustración 26: sistemas de elevación. Piñón-cremallera (izd.) y guiado por cable (der.). Fuente:[25].

La supuesta continuidad de los cables de potencia es solucionada gracias a empalmes entre los diferentes segmentos de cable entre módulos de la torre, por lo que de ese modo no se trata de un único tramo de cable. Una vez se han retirado los elementos continuos nos encontramos con que ya no hay conexiones entre módulos de la torre (digamos que son independientes los módulos) se procede al desmontaje de los módulos manteniendo en su interior todos los elementos posibles (escaleras, focos, líneas de vida, plataformas intermedias). Tras el desmontaje, los distintos módulos serán trasladados a una planta donde se llevará a cabo el correspondiente despiece y separación de componentes.



Ilustración 27: Interior de torre aerogenerador: sistema de elevación por cable. Fuente: [17]

Otro caso aparte sería el caso de las torres híbridas o las torres de hormigón. Se pueden distinguir entre dos tipos de construcciones en hormigón, torres monolíticas o torres segmentadas. Las denominadas como torres de hormigón monolítico, son aquellas en las que cada tramo de torre es una única pieza de hormigón, y por el otro lado, las segmentadas son las que cada tramo de torre está compuesto por múltiples paneles unidos entre sí.



Ilustración 28: Torre de hormigón segmentada. Fuente:[31].

En el caso de las torres integras de hormigón, se pueden llevar a cabo varias prácticas. En primer lugar, la decisión a tomar es si se va a optar por demoler o desmontar ya sea si es torre monolítica (tramos de torre son una única pieza) o si es segmentada (cada tramo de torre múltiples piezas). Si se opta por desmontaje, se comienza a bajar piezas y tras finalizar se desmontan los equipos de la base que incluyen: sistemas de control, transformadores y equipos de seguridad y monitoreo entre otros. Por el contrario, tenemos la otra opción que es la demolición. Esta suele ser más común con torres monolíticas debido a su completo y costoso transporte. Aunque, independientemente del tipo de torre de hormigón, se suele proceder de la misma forma. En primer lugar, se lleva a cabo el desmontaje y retirada tanto de los equipos de la base como de otros componentes reutilizables como puede ser el sistema de elevación. Tras ello se lleva a cabo la demolición de la estructura.

Un factor importante que destacar es el hecho de que en los requerimientos de diseño de un aerogenerador se exige que por la puerta de acceso de la torre puedan pasar los diferentes armarios y los diferentes dispositivos que se encuentran en la base, por lo que es posible sacar elementos por la puerta.

3.4 Desmontaje de las cimentaciones

En numerosos proyectos de desmantelamiento existe la posibilidad de no destruir los cimientos ya que la parte que es visible es mínima y el mayor volumen de la cimentación puede dejarse intacta bajo tierra. De todos modos, si se desea realizar un desmantelamiento completo, lo idóneo es dejar el lugar tal y como estaba previo a su instalación y posteriormente hacer uso de los residuos obtenidos de esta.

Para llevar a cabo la demolición completa en primer lugar deberemos retirar la tierra empleada para cubrir los cimientos. Una vez retirada la tierra se procede a la demolición del hormigón de las cimentaciones. Se dispone de números métodos a la hora de la destrucción de los cimientos, a continuación, se dos procedimientos habituales. Una forma de operar consistirá en ir fragmentando el hormigón en trozos gracias a una excavadora con un martillo hidráulico o una equipada con una cizalla de demolición (esta servirá para cortar las barras de acero), posteriormente sería necesario verter todos los escombros en una máquina que se encargase de fragmentar más aun los trozos de hormigón y así separar el hormigón del acero y finalmente si se requiriese otra pasada por maquinaria para el hormigón de cara a obtener fragmentos de determinado tamaño. Una vez separados, lo más habitual sería llevarse el acero a un centro de reciclaje y con el hormigón existen diversas opciones, una de ellas se comentará más adelante.

Un segundo método de destrucción de cimientos es hacer uso de explosivos o componentes expansivos y de esa forma convertir el cimiento en numerosos trozos de variedad de formas y tamaños. Tras haber fragmentado el cimiento el procedimiento continuaría de la misma forma que el mencionado anteriormente, para así separar el acero del hormigón.



Ilustración 29: Demolición de cimientos de aerogenerador con martillo hidráulico (izq.) y Acero separado del hormigón de los cimientos para su posterior reciclaje (der.). Fuente: [19]

La imagen superior corresponde con la demolición completa de las cimentaciones del parque eólico de Zás [21], en la imagen se puede ver volúmenes de tierra en los exteriores y en el centro fragmentos de hormigón y varillas de acero de la estructura que conformaba el hormigón armado. Conviene destacar que tras la demolición el hormigón se transformó en zahorra de 0-40 mm para usar en los caminos del parque, siendo esto un claro ejemplo de economía circular.

Posteriormente a la retirada de los cimientos, como se ha comentado, lo ideal es dejar el terreno como estaba previamente a la instalación. Para ello lo que se hace es reponer el hueco con tierra vegetal de la zona (destacar que en ocasiones no se realiza una extracción de los cimientos completa sino parcial) para favorecer la restauración del ecosistema y minimizar el impacto visual. Por parte del Autor, valoraría la opción tras el movimiento de tierras (relleno), plantar alguna especie vegetal autóctona.

A pesar de esto, lo más habitual suele ser la retirada de los cimientos hasta una cierta profundidad de 50 cm y recubrirlo con tierra vegetal de la zona. Esa profundidad suele ser suficiente para que posteriormente el terreno pueda recuperar su vegetación o para cultivar.

4. Estudio de mercado para identificar estrategias de mejora

La búsqueda de optimizar procesos, ahorro de costes y líneas de investigación en busca de innovar, son factores comunes a todas las industrias, y este sector no es una excepción.

A continuación, se mostrarán diversas innovaciones y líneas de investigación tanto del propio sector de la eólica, como de otros sectores de los cuales se podría trasladar prácticas o tecnología al desmantelamiento de los aerogeneradores y la gestión de residuos.

4.1 Desensamblaje de componentes

Esta es la primera fase del desmantelamiento y en la que se va fragmentando el aerogenerador en sus componentes. La idea de esta fase es que, cuanto más simple sea, menos maquinaria requiera y menos tiempo conlleve mejor. A continuación, veremos diferentes avances orientados a esta fase y su simplificación.

4.1.1 Bladerunner

Se trata de un sistema de elevación/descenso de palas desarrollado por una empresa española llamada NABRAWIND, fundada en el 2015 en Navarra (España).

Se trata de un sistema diseñado para tareas de instalación y de mantenimiento. Se basa en la instalación de algunos elementos en rotor que constituyen el sistema de elevación, unido a otra pieza que se coloca en la raíz de la pala, donde se atarán los cables para su posterior manipulación.

Uno de los factores más llamativos este sistema es que se trata, según dice la empresa, del único sistema de instalación que no toca la superficie de las palas, sino que el punto de agarre de la pala está en la raíz, haciendo uso de los pernos de unión al rotor (“BladeRunner is the only blade installation and maintenance Touchless System”). De esta forma, se elimina el riesgo de dañar parte de las superficies aerodinámicas. Esto último que se ha mencionado puede ser un factor clave en el desmantelamiento ya que favorece el buen estado de la pala para en el caso de que su destino vaya a ser la reutilización en otro parque u otro aerogenerador del mismo propietario o incluso en el mercado de segunda mano.



Ilustración 30: Sistema de sujeción de las palas BLADERUNNER. Fuente: [32]

Este sistema, también se atribuye una reducción significativa en los costes de operación de un 70%, a raíz de que con este sistema es viable la instalación completa del rotor en 3 días, además este sistema se puede transportar en una furgoneta corriente ya que tiene un peso inferior a 1,000 kg y requiere únicamente un equipo de 4 personas para operarlo. Todo esto se traduce en reducción de costes por distintas causas: reducción de personal, quita la necesidad de hacer uso de grúas de alto tonelaje y tamaño para las palas (si serán necesarias para la nacelle), ahorro de tiempo.



Ilustración 31: Sistema BLADERUNNER en funcionamiento. Fuente: [32]

4.2 Transporte

La fase de transporte de los componentes tras el desmantelamiento es una fase crítica, tanto a nivel logístico, como a nivel económico. La complejidad de esta etapa está en

mover estas cargas de tamaño y peso significativas desde el parque a sus correspondientes lugares, ya sea a sitios de almacenamiento, a centros de reciclaje o a otros parques.

El principal obstáculo para esta fase, como se ha mencionado, son las dimensiones y el peso de las piezas (recordemos que actualmente se llega a 114 m de longitud en las palas). Actualmente, gran parte de las piezas requieren transportes especiales con remolques diseñados para la actividad. No solo afecta a los vehículos, sino que también afecta a la planificación de ruta, teniendo en cuenta, anchura de las vías, curvas cerradas, altura de puentes, túneles o líneas eléctricas entre múltiples otros factores.

A esto se le suma que debe ser viable físicamente y además económicamente. Los principales costes del transporte son los siguientes: Alquiler de vehículos especiales, el personal de operación, permisos de transporte, escoltas en carretera o la modificación temporal de elementos como señales de tráfico u otros elementos

4.2.1 NABRAJOINT

Se trata de una tecnología desarrollada por la misma empresa que desarrollo el BLADERUNNER (NABRAWIND). La idea de NABRAJOINT es simple, convertir las palas que son una única pieza de grandes dimensiones, en varios segmentos y de esta forma tener una pala modular, como es el caso de la torre.

Esta tecnología tiene como finalidad la de facilitar la logística de cara a aerogeneradores de próximas generaciones ya que no hacen más que aumentar en tamaño, lo cual se traduce en logísticas más complicadas o poco viables si no se proponen soluciones.

Esta idea trata de trocear la pala en los módulos deseados y mediante unas robustas uniones con pernos ensamblar el conjunto para de esa forma facilitar notablemente el transporte. Una vez en la plataforma de montaje se realizaría el ensamblaje de todas las partes y se uniría al rotor como una pala normal. Bien es cierto, que es un sistema que se debería implementar desde la fabricación de la pala y no a posteriori.

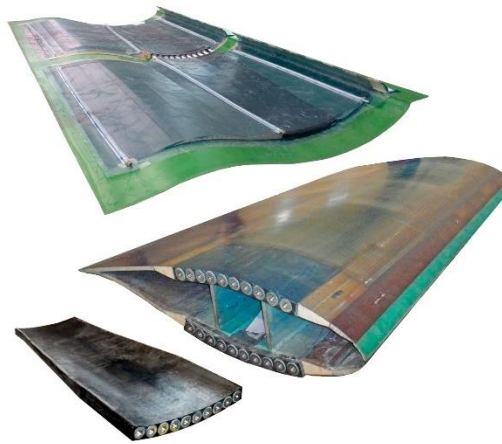


Ilustración 32: Prototipo de NABRAJOINT para ensayos de fatiga. Fuente:[33]

Es muy interesante el NABRAJOINT, no obstante, para el desmantelamiento solo nos puede ser ventajoso si el aerogenerador a desmantelar la lleva instalada. Tiene ventajas muy llamativas, pero no es aplicable a un aerogenerador que vayamos a desmantelar ya que como se ha mencionado esta debe ser integrada en la fabricación.

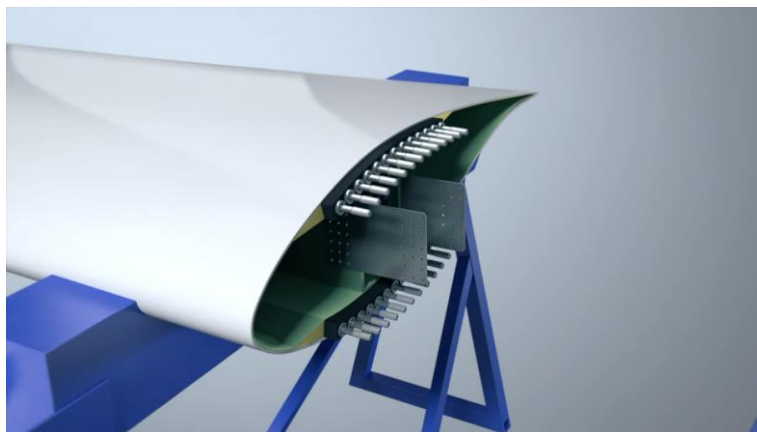


Ilustración 33: Unión de segmentos de pala NABRAJOINT. Fuente:[33]

4.2.2 Corte con hilo adiamantado

Esta es una tecnología que ya se ha mencionado previamente, y para recordar, consiste en un cable de acero con inserciones de diamante para aportar una mayor dureza al hilo. Esta técnica de corte se usa principalmente en canteras para el corte de rocas de grandes dimensiones.

Si bien es cierto que es una tecnología con múltiples ámbitos en los que se usa, no tiene un gran papel en el sector de los aerogeneradores. No obstante, puede ser interesante trasladarla al desmantelamiento de aerogeneradores.

Un ejemplo de empresa dedicada a el sector de corte mediante hilo adiamantado es el caso de ARACORTE, ubicada en Pinseque-Zaragoza.



Ilustración 34: Equipo de corte con hilo adiamantado. Fuente:[37]

Lo más llamativo de esta tecnología es el alto poder de corte sobre materiales muy resistentes que posee. Y por otro lado las pequeñas dimensiones del equipo de corte frente al uso de excavadoras con sierra de corte y también que no es necesario el uso de agua o líquidos como es el caso de corte por agua a presión del cual que ya hemos hablado.

Plantear el uso de esta abre múltiples posibilidades para facilitar el proceso de desmantelamiento gracias a sus ventajas a nivel económico y logístico.

4.3 Gestión de componentes

Una de las cuestiones más importantes en esta fase del desmantelamiento es para cada elemento si es el fin de su uso o se puede seguir haciendo uso de ese elemento es decir reutilizar vs desechar. Esta decisión dependerá de diversos factores, algunos de ellos podrán ser los siguientes: estado del componente, materiales del componente (precio de los materiales), tecnología de reciclaje disponible, demanda de dichos componentes en mercados de segunda mano, costes de reciclaje, costes de transporte o incluso pueden jugar parte componentes éticos.

Los posibles destinos de un elemento son principalmente 4. Reusar, con reusar nos referimos a seguir haciendo uso de un elemento con el fin para el cual ha sido diseñado. Reutilizar, es decir hacer uso del elemento, pero para un fin distinto. Reciclar, con la

finalidad de separar los materiales y reincorporarlos a la cadena de valor. Retirar, es decir desechar la pieza en su totalidad (vertederos).

4.3.1 Re-Wind network

Este se trata de un proyecto de alto valor para la industria de la gestión de los residuos de las palas de los aerogeneradores. Consiste en una red de investigadores académicos de diversas universidades de múltiples partes del mundo y centros tecnológicos en colaboración con la compañía “Bladebridge”.

Su objetivo es el de encontrar nuevas formas de usar palas de los aerogeneradores provenientes del repowering.

Este proyecto está en una fase relativamente joven, actualmente su enfoque es el de transformar las posibles ideas de aplicación de las palas a diseños de prototipos. Algunas de estas ideas están más avanzadas y se han llegado a hacer proyectos piloto. Conviene destacar que gran parte de estos proyectos tienen que ver con mobiliario urbano o estructuras que estarán a la intemperie haciendo uso de una gran característica del material de las palas, ya que su composición hace que sean inertes para el medio ambiente.

Algunos de los diseños disponibles en su catálogo de primavera del 2022 son los siguientes: BladePlatform, BladeJetty, BladeBuoy, BladeBridge, BladePoles, BladeBarriers, Noise Barrier, BladeShelters, BusShelter, BladeFarming o Feed Bunks y Grain Partitions. Todas estas son gran parte de las ideas propuestas por este grupo. A continuación, hablaremos de forma breve de algunas de ellas.

BladePlatform. Este proyecto trata de estructuras flotantes para alojar paneles PV. Las palas ofrecen buenas características gracias a que son estancas y a su vez no se corroen, uno de los mayores desafíos a los que se encuentran las estructuras acuáticas.

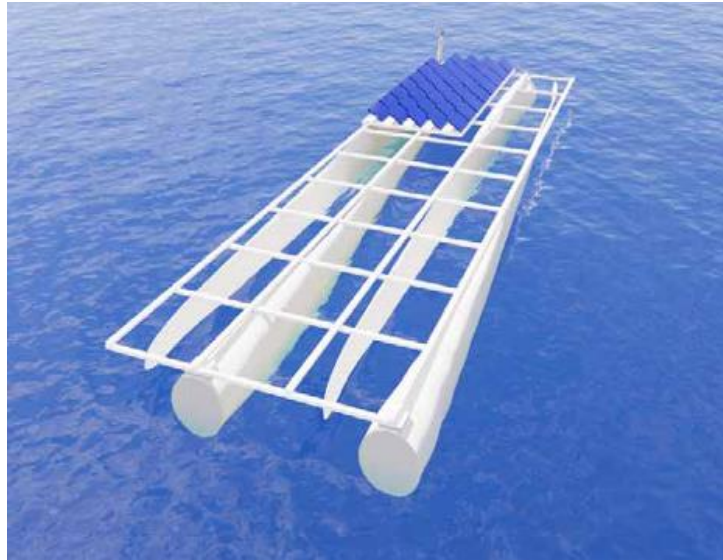


Ilustración 35: BladePlatform de Re-Wind. Fuente:[34]

BladeBridges. Se trata de puentes tanto peatonales como para vehículos dónde, como elemento principal de soporte de cargas, se hace uso de las palas de aerogeneradores. Tienen múltiples diseños. El más desarrollado es uno que usa dos palas, una a cada lateral del puente. Es uno de los pocos proyectos que ya han visto la luz con proyectos piloto.

A continuación, podemos ver la idea original a ordenador y su resultado final.



Ilustración 36: BladeBridge de Re-Wind. Fuente:[34]



Ilustración 37: Proyecto piloto BladeBridge. Fuente:[36]

Otra idea es la del Feed Bunk, o comederos. Este diseño está orientado a la ganadería intensiva y a los largos comederos de los que hacen uso.

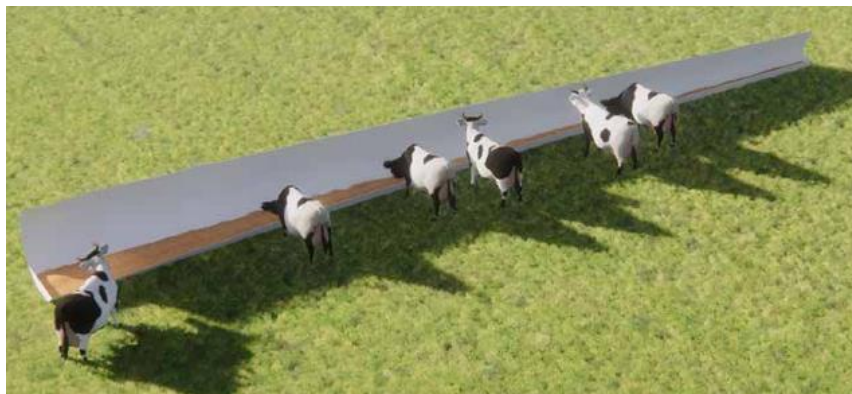


Ilustración 38: Feed Bunk de Re-Wind. Fuente:[34]

4.3.2 Chatarrerías

Las chatarrerías son establecimientos que se dedican a la compraventa de residuos tanto metálicos como otros materiales reciclables. Algunos de los materiales con mayor movimiento en las chatarrerías son el cobre, acero y aluminio, materiales que están presentes en grandes cantidades en un aerogenerador.

Aparte de labor comercial tienen un papel fundamental en la gestión de residuos, favoreciendo el reciclaje y la economía circular. Eso implica reducir el impacto al medioambiente.

Como se ha comentado, una chatarrería son lugares de compra/venta de materiales, en el desmantelamiento de los aerogeneradores jugaríamos un papel de vendedor. A continuación, vemos una tabla de precios orientativos de algunos metales.

Material	Precio [€/KG]
Acero inoxidable	1,00 €
Aluminio perfil	1,20 €
Cable aluminio	1.25 €
Cable aluminio PVC	0,50 €
Cable aluminio cobre	0,40 €
Latón comercial	3,60 €
Cobre Berry	6,00 €
Cobre tubo y 2ª	5,70 €
Hierro	0,24 €
Plomo	1,25 €
Cinc	0,90 €

Tabla 3: Precios de metales en chatarrería a 15/08/2024. Fuente: [38]

Esos son los precios a 15/08/2024 de algunos de los materiales principales con los que se trabaja en las chatarrerías. A continuación, con los datos obtenidos previamente de un proyecto de desmantelamiento y de los precios de mercado actuales, veremos una tabla de su valor aplicado a la turbina objeto del proyecto.

Valor materiales de una turbina V90-2.0Mw			
Material	Cantidad [Kg]	Precio [€/KG]	Valor [€]
Acero y hierro	245560	0,62 €	152.247,20 €
Aluminio	26400	1,25 €	33.000,00 €
Cobre	6640	6,00 €	39.840,00 €
			225.087,20 €

Ilustración 39: Valor de materiales de un aerogenerador a precio de chatarra. Fuente: Elaboración propia [38]

A falta de saber cantidad exacta de acero y hierro, ya que en la tabla del Anexo 1 viene el peso total, se ha ponderado el precio de acero y hierro con una contribución del 50% cada uno.

Debemos tener en cuenta que esos valores monetarios son aproximaciones teniendo en cuenta: que se vende todo el material (no es factible ya que no será posible una total separación), a un precio de un día concreto y es de un modelo concreto. No obstante, nos sirve para darnos cuenta de que podría ser interesante valorar la opción de las chatarrerías para disminuir costes de desmantelamiento y reducir impacto ambiental.

4.3.3 Reciclaje de hormigón

Recordemos que el hormigón es una mezcla que se basa en 3 componentes: cemento, arena y grava; es decir, se trata de una mezcla de 3 componentes que pasan a formar la mezcla del hormigón.

La idea del reciclaje del hormigón se basa en una reducción del impacto ambiental más que en un ahorro de costes. Bien es cierto que no son materiales caros, si no que el hecho de que representen un coste significativo en la construcción se debe a que tiene un uso extensivo.

Existen empresas dedicadas a este sector, como puede ser el caso de RECYTOUR, estas empresas funcionan parecido a las chatarrerías, tienen unos precios de vertido, tras la recogida de residuos son procesados, clasificados y finalmente se ponen a la venta como materiales reciclados.

Precio de vertido de Concreto “RECYTOUR” (01/07/2024 al 31/08/2024)	
Hormigón puro no armado – Sin materiales finos	2,00 €/Tm
Hormigón puro no armado – sin materiales nobles	3,50 €/Tm
Hormigón puro ligeramente armado – diámetro < 6mm	7,00 €/Tm
Hormigón armado puro	12,00 €/Tm

Tabla 4: Precios de vertido de hormigón de RECYTOUR. Fuente: Elaboración propia

Ventajas de uso de áridos reciclados: Menor impacto ambiental, más baratos que los áridos nuevos, favorece la sostenibilidad y promueve la economía circular.

Desventajas: Calidad y propiedades mecánicas variables a causa de la posible variabilidad del hormigón de origen. Eso puede traducirse en que las propiedades mecánicas del hormigón posterior sean algo distintas al que sería resultado de materiales vírgenes.

Respecto a lo comentado de las propiedades mecánica, que son menos homogéneas que materiales nuevos, es por eso por lo que es interesante usarlos para aplicaciones que no sean estructurales. Algunas ideas para usar áridos reciclados en elementos no estructurales pueden ser: carriles bici, bases de carreteras, barreras de ruido entre otras. O, por otro lado, de vuelta en parques de aerogeneradores, tomando lugar en cimentaciones de nuevos aerogeneradores o de base para los caminos.

El uso de áridos reciclados, u otros materiales de origen reciclado, aunque en algunos casos pueda no suponer un ahorro económico puede situar un parque en una posición muy positiva de cara a obtener subvenciones y permisos de diversas finalidades gracias a su reducida huella ambiental en su ciclo de vida.

4.3.4 Reciclaje de palas, materiales compuestos

Para poner en contexto, conviene recordar que las palas son la parte del aerogenerador más problemática desde el punto de vista ambiental, a causa de sus grandes dimensiones, poco interés en su material frente a otros como puede ser el cobre o el acero y principalmente por su dificultad de reciclaje mediante métodos convencionales.

Esta dificultad para su reciclaje por métodos convencionales se debe a que se trata de materiales compuestos. A diferencia de otras piezas del aerogenerador que se hacen de un material único, en el caso de las palas, el material base es una mezcla de un polímero generalmente orgánico que tiene la función de unir y dar forma; y por otro lado las fibras que su función es la de aportar propiedades mecánicas. Las mas usadas son fibras de vidrio o de carbono. Por tanto, existen diversas opciones a la hora de tratar estos residuos, a continuación, trataremos algunas.

El vertedero es una de las opciones. Según el país y sus normativas estará permitido o no, por ejemplo, en Bélgica está prohibido llevar estos residuos a vertederos, lo cual implica que se trate de buscar otras alternativas.

Otra alternativa más usual es la de la incineración. En la incineración, la parte orgánica (polímero) actúa como combustible, mientras que la parte inorgánica (fibras) puede

degradarse algo y perder ciertas propiedades, pero queda prácticamente intacta. De cara a la incineración se podría distinguir según el objetivo principal de esta.

La generación de calor para otros fines, como es el caso de las cementeras para la producción de clínker, un componente fundamental en el cemento. Hay que recalcar que las cementeras funcionan de forma similar a vertederos. Esto les permite reducir sus costes para el uso de combustibles fósiles y a su vez generar un cierto beneficio económico. Por otro lado, la incineración con el fin de obtener un producto, que en este caso sería la obtención de las fibras (parte inorgánica) para reusarlas a posteriori. Hay que destacar que para esta segunda práctica no se debe mezclar en el quemador variedad de residuos sino únicamente el material del que nos interesa el residuo, para no tener que después hacer separación de residuos. En esta hay que destacar que las fibras pierden parte de sus propiedades.

En último lugar, existen métodos de reciclaje de materiales compuestos más avanzados. En España está el proyecto EoLO-HUBs, ubicado concretamente en el centro tecnológico “Aitiip” en Zaragoza. Este proyecto ha desarrollado dos tecnologías. La primera se trata de pirolisis de baja emisión de carbono. Esta permite recuperar las fibras de carbono, pero con el inconveniente de que el polímero no se recupera. Y la otra tecnología, que esta sí que permite separar fibras de la resina, sin que estas resulten dañadas. (Consultar fuentes para más información [41][42]).

Estas dos últimas, están en fases de desarrollo y no están disponibles a nivel comercial.

Como conclusión de este apartado podemos extraer que, a pesar de ser el residuo más problemático, hay opciones disponibles que no son los vertederos, es decir se les puede sacar cierto partido a estos residuos.

Al igual que con lo comentado con el hormigón, tras la gestión de residuos puede darse el caso de que nos sea posible el uso de los materiales resultantes o reportarnos un beneficio económico. También puede darse el caso en el que no nos aporte beneficio económico, pero de cualquier forma llevar a cabo estas prácticas de economía circular y cuidado del medio ambiente nos traerán ventajas a nivel de imagen, obtención de permisos y en recibir subvenciones, es decir favorece tener una posición comercial y social ventajosa.

5. Propuesta de mejoras al proceso actual de desmantelamiento

En este capítulo se propondrán una serie de mejoras al proceso estándar actual, con la finalidad de tratar solucionar algunos de las principales dificultades de este proceso y de mejorar el proceso en general. Las diferentes mejoras que se mencionaran se hará un análisis de ventajas y desventajas.

La serie de mejoras que se van a proponer van a ir orientadas fundamentalmente a la logística, reuso /reutilización de piezas, reducción del impacto al medio ambiente, simplificación del proceso y reducción del coste neto.

5.1 Inspección previa de las palas con drones

Esta propuesta consiste en realizar una inspección de todas las palas de forma individualizada de los aerogeneradores a desmantelar con el uso de drones equipados con cámaras y con la finalidad de saber el estado de cada pala.

Esta inspección se debería hacer una vez se sepa que el parque será desmantelado, pero de forma anticipada al alquiler de servicios de transporte especial, para de esta forma reducir al mínimo el servicio contratado.

Posteriormente a la inspección, será posible saber cuántas palas se encuentran un estado aceptable para ser instaladas en otros aerogeneradores, es decir, trasladarlas directamente a otro parque del mismo grupo o venderlas en mercados de segunda mano ya comentados.

Lo verdaderamente interesante de esto es conocer cuántas palas están en un estado no aceptable para seguir operando, por lo que tendrán que ser usadas con otras finalidades como, por ejemplo, algunas de las propuestas de “Re-Wind” mencionadas en el capítulo anterior o ser recicladas. La finalidad de esta idea radica en “¿Por qué transportar integra las palas que van a ser troceadas en su destino?”.

Esta propuesta carece de sentido si no se habla de tener algún sistema de troceado de palas en la propia plataforma de desmontaje, de este sistema hablaremos en el próximo apartado de este capítulo.

Para llevar a cabo esta idea sería únicamente necesario un operador de dron y un especialista de aerogeneradores, siendo el operador la persona capacitada para manejar el dron y el especialista para guiarle sobre donde necesita poder ver las palas para hacer un diagnóstico claro de cada pala para determinar su destino.



Ilustración 40: Dron DJI para sector industrial M300 RTK. Fuente:[43]

Ventajas de implementar la idea: ahorro de tiempo y eficiencia de las inspecciones, mejora de la seguridad de trabajadores y previene riesgos laborales. Lo anterior se acompaña de la idea de que el corte in-situ nos permite ahorrar enormemente en costes al reducir viajes de transporte especial, menor solicitud de permisos y simplicidad en el transporte

Desventajas: Necesario contratar un servicio externo y cualificado, añade variabilidad al proceso y necesario que este todo bien coordinado y necesaria buena planificación.



Ilustración 41: Dron DJI M300 RTK en parque eólico. Fuente:[43].

Esta idea nos permite saber con antelación cuantas de las palas van a requerir una inspección interna. Ya que para poder seguir siendo usadas, no solo deben mantener un buen estado exterior sino también interior. De tal forma que al saber el número de palas

que cumplen con un buen estado exterior, podremos saber previamente al desmontaje, la cantidad de recursos que deberán ser destinados a su inspección interna.

5.2 Corte de grandes piezas no reutilizables in-situ

El uso de transporte especial para las piezas de grandes dimensiones puede suponer grandes retos en el proceso. Desde tener que asumir costes elevados a problemas de tiempos. Es por ello por lo que, cuanto más podamos evitar las cargas y dimensiones excepcionales en el transporte menos dificultades y mayor ahorro de tiempo.

La propuesta está orientada principalmente a las palas. Consiste en el troceado de elementos que no vayan a ser reutilizados en el sector eólico de nuevo y que puedan ser transportadas en camiones convencionales en su transporte al emplazamiento de tratamiento de residuos.

Para este troceado de elementos existen diferentes alternativas, en este caso se proponen dos formas de corte y por otro lado el triturado.

En primer lugar, el sistema de disco de corte equipado en excavadora trataría de cortar las palas que se vayan a desechar en rebanadas que se puedan apilar en camiones y se transportados a su correspondiente destino que nos encaje más; cementeras para la incineración o centros de reciclaje. La parte positiva de usar una excavadora es que hay multitud de modelos y tamaños, a equipar con multitud de cabezales, es decir, la misma que nos trocee las palas podría demoler los cimientos.



Ilustración 42: Excavadora Hitachi equipada con 3 discos de corte. Fuente:[44]

La segunda alternativa sería implementar el corte de palas desechables con un equipo de corte por cable. Esta alternativa tiene dimensiones muy reducidas. Así mismo, el transporte de este equipo es muy sencillo y fácil de operar.



Ilustración 43: Equipo de corte por hilo adiamantado (peso:500KG). Fuente:[46]

En último lugar, se propone el triturado. Se entiende como tal el troceado de la pala, pero en trozos de dimensiones menores que en las anteriores. Para ello, sería necesario el uso de equipos de triturado, algunos de estos equipos tienen la ventaja de que son móviles. Por otro lado, deberemos tener en cuenta que estos equipos no se pueden alimentar con la pala entera, si no que tiene capacidad de triturar elementos de menores dimensiones, por lo que deberemos hacer uso de un equipo de troceado previo, como puede ser el caso de una excavadora con disco o con mordazas.



Ilustración 44: Equipo triturador J-1480 con tren de rodaje y separador magnético. Fuente: [45]

Lo más interesante de este último, es que el número de camiones para evacuar una pala será mucho menor ya que se logra un factor de empaquetamiento del volumen del camión mucho mayor al no existir tantos huecos entre fragmentos.

Ventajas de implementar la idea: Obtenemos un mayor factor de empaquetamiento en los camiones para el traslado de los residuos de las palas, menor cantidad de camiones necesarios.

Desventajas de la implementación: Necesario trasladar el equipo al parque, equipo voluminoso, necesario un operador y podrían quedar residuos de polvo de la trituración en el aire.

5.3 Mantenimiento de caminos locales con los residuos de cimientos

Esta propuesta tiene como finalidad la de aportar algo a los pueblos o comunidades que han estado conviviendo cerca del parque a lo largo de la vida útil de este como forma de agradecimiento, y a su vez no facilita la gestión de los residuos de los cimientos

Para aplicar esta propuesta no tiene mayor complejidad que la de triturar fragmentos de cimientos acompañado de la retirada de las barras de acero que conforman el armado de las bases y con el conjunto de rocas resultante de este proceso distribuir las sobre caminos rurales existentes, nuevos parques renovables o parques repotenciados.

Estrategia y coste del desmantelamiento de parque eólicos *onshore*

Ventajas de implementar la idea: Apoyo a comunidades pequeñas/ pueblos que cuentan con menores presupuestos a mantener caminos, evitamos el pago de verter hormigón, evitamos el coste los camiones de camino al vertedero.

Desventajas: Necesario algo de personal extra para desarrollar el proyecto.

6. Estudio económico

En este apartado se tratará de hacer una aproximación del resultado económico de desmantelar un parque eólico. Teniendo en cuenta costes y posibles ingresos provenientes de venta de materiales o partes a mercados de segunda mano. Para el análisis económico se tendrán en cuenta dos escenarios. El primero constará de desmantelamiento sin recuperación de dinero por ningún medio, es decir, el coste base de desmantelar. En el segundo se tratará de recuperar el capital gracias a venta de componentes en mercados de segunda mano, venta de residuos a precio de materia prima y también incluyendo el coste de las mejoras comentadas en el apartado anterior (Capítulo 5).

Algunos de los principales factores que pueden afectar a los costes de desmantelar un parque son los siguientes: número de aerogeneradores, modelo de aerogenerador (dimensiones), capacidad necesaria de la grúa, ubicación del parque, distancia del parque a centros de reciclaje o chatarrerías, cantidad de elementos que se desecharán o reutilizarán, cantidad de transporte especial requerido e incluso la meteorología de los días de proyecto.

En este caso trataremos de dar un coste aproximado de desmantelar el parque eólico “Acampo Arias”, ubicado en Zaragoza y que fue instalado en el 2004. Por lo tanto, se estima que su desmantelamiento tendrá lugar dentro de entre 2 y 5 años.

Se trata de un parque que consta de 26 aerogeneradores Vestas V90 y una central colectora de conexión a red. En la imagen a continuación, se puede observar que el parque tiene una disposición en dos hileras, lo que permitiría un desmantelamiento en paralelo.

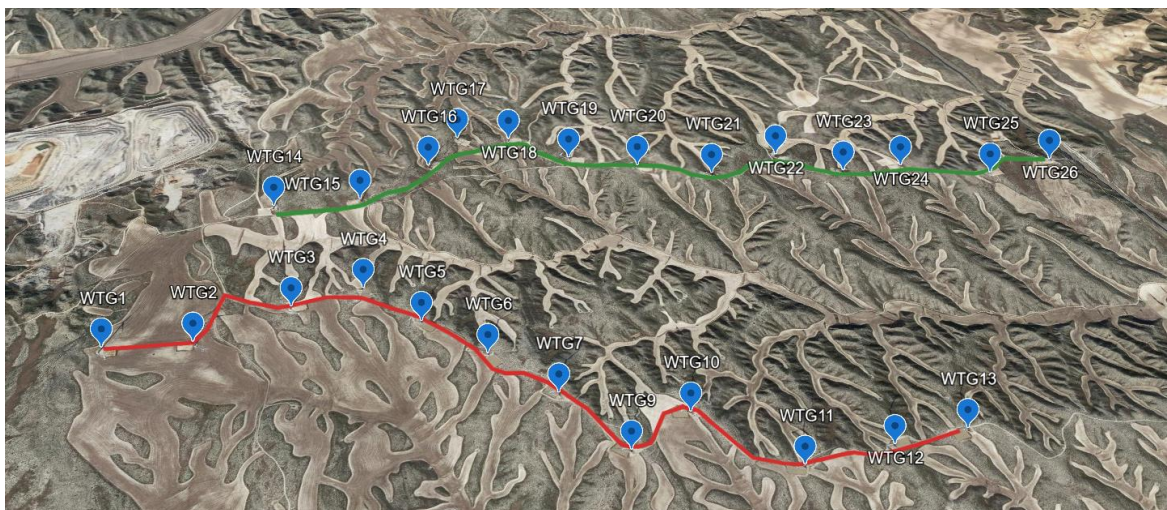


Ilustración 45: Imagen satélite esquematizada parque eólico Acampo Arias. Fuente: elaboración propia.

Se tomarán dos posibles escenarios como se ha comentado. El primero constará del desmantelamiento sin intento de reducir costes y sin aplicar mejoras y en el segundo supuesto se tendrá en cuenta la venta de equipos y aplicar las mejoras del capítulo anterior.

Como se trata de un proceso prácticamente estandarizado y que existe gran dificultad para obtener costes de maquinaria como es grúas, camiones y otros servicios necesarios y por otro lado puede resultar complejo a este nivel saber con certeza el número de diferentes vehículos necesarios y de personal, para obtener una aproximación de los costes lo más acertada posible. se va a partir de unas estimaciones provenientes de la empresa danesa DNV sobre un proyecto concreto ([48]).

Conviene recalcar que a estas cifras se les aplicarán ciertos factores para adaptarlo a nuestro parque y nuestras circunstancias.

6.1 Presentación datos de costes parque eólico Prattsburgh de DNV

En primer lugar, todos los costes corresponden a el año 2022, en otra divisa (dólar [\$]) y otro país. Es decir que no correspondería con realizar los mismos cálculos en la actualidad.

En este subapartado se resume y explica el informe en cuestión para presentar los datos con lo que se trabajará posteriormente para trasladarlo al parque de “Acampo Arias” y calcular sus costes. Los datos del informe serán expuestos en este capítulo, a menudo se añadirán datos de coste por MW. Esto último posibilitará trasladar costes a nuestra planta.

6.1.1 Presentación parque

El parque la cuestión es un parque no existente a fecha de junio del 2022, que se construirá a futuro, debido a normativas, las autoridades de la zona, para poder llevar la construcción de a cabo, le exigía a DNV presentar un proyecto de desmantelamiento para cuando el parque acabe tu vida útil,

El parque eólico de Prattsburgh estará localizado en Nueva York. Estará constituido por 30 Vestas155 y 7 Vestas162 (La cifra hace referencia al diámetro del rotor, es decir no

hay mucha diferencia de tamaño), los cuales generaban 3,6 y 5,6 MW respectivamente (147 MW totales). A lo anterior, se le sumaba una subestación de conexión con la red, dos torres meteorológicas y dos torres ADSL (sistema de iluminación y detección de aeronaves).

Composición parque eólico Prattsburgh	
Elemento	Cantidad
Vestas V155 3.6 MW	30 Uds
Vestas V162 5.6 MW	7 Uds
Subestaciones de conexión	1 Ud
Torres ADSL (Aircraft detection lighting system)	2 Uds
Torres meteorológicas	2 Uds
Caminos	21 millas

Tabla 5: Composición parque eólico Prattsburgh. Fuente:[48]

6.1.2 Suposiciones generales del caso DNV

- Todo el proceso de desmantelamiento se realiza bajo condiciones meteorológicas favorables.
- El proceso de desmantelamiento incluye la retirada de todos los elementos que sobresalen del terreno y los que están hasta una profundidad de 4 pies ($\approx 1,20$ m).
- A modo de realizar un análisis conservador por parte de DNV, los caminos serán desmantelados, aunque en numerosas ocasiones los propietarios de las tierras solicitan mantenerlos.
- No se retirarán los cables colectores subterráneo de los aerogeneradores a la subestación.
- De media una grúa principal necesitara 1 día y medio en desmontar un aerogenerador incluyendo transporte entre turbinas.
- La nacelle se transporta integra para facilitar el desmontaje en planta.

- Las palas se cortarán las secciones y serán transportadas a vertedero.
- Grúas principales utilizadas: 2.
- Grúas auxiliares utilizadas: 4.

6.1.3 Costes desmontaje

En primer lugar, el primer coste que se tiene en cuenta es el de la maquinaria. No el coste de tenerla disponible cada día, sino el de tener la maquinaria en el lugar donde hace falta. Estos costes se denominan costes de movilización. La cuantía de estos costes la vemos a continuación.

Coste de movilización	
Grúas principales	2
Grúas auxiliares	8
Coste total de movilización	\$2.117,00

Tabla 6: Costes de movilización maquinaria estudio DNV. Fuente:[48]

Ya con la maquinaria en su lugar, comienza la fase de desmontaje. Para el coste de desmontaje de aerogeneradores se tienen en cuenta el coste de las grúas tanto principales como auxiliares, coste de los trabajadores, otras maquinarias y herramientas.

Coste desmontaje Aerogenerador	
Tarea	Coste por WTG [\$]
Desmontaje rotor y palas	\$32.000,00
Desmontaje nacelle	\$32.000,00
Desmontaje torre	\$63.000,00
Demolición cimientos	\$7.000,00
Total por turbina	\$134.000,00
Total proyecto (37 WTG)	\$4.958.000,00

Coste desmontaje por MW	\$33.727,89
-------------------------	-------------

Tabla 7: Costes desmontaje aerogeneradores estudio DNV. Fuente:[48]

En segundo lugar, el sistema de colección de energía que es el conjunto cables de aerogeneradores enterrados, la subestación de elevación de voltaje y red eléctrica aérea. Conviene recordar que los cables subterráneos no se desmantelarán al cumplir requisitos de estar enterrados a más de 4 pies.

Coste desmontaje de subestación	
Tarea	Coste [\$]
Preparación	\$9.600,00
Desmantelamiento equipo de HV	\$31.000,00
Desmantelamiento y preparación de envío del transformador principal	\$20.000,00
Retirada de edificio de control	\$86.000,00
Retirada de cimientos	\$48.000,00
Alquiler maquinaria pesada	\$18.000,00
Alquiler maquinaria ligera	\$15.000,00
Renaturalizar terreno	\$19.000,00
Total	\$246.600,00

Tabla 8: Coste desmontaje subestación HV estudio DNV. Fuente:[48]

Tras todo esto, el proceso de desmontaje supone unos gastos totales que se pueden ver desglosados en la siguiente tabla.

Coste total desmontaje parque	
Ítem	Coste [\$]
Turbinas	\$4.958.000,00
Sistema de colección	\$958.000,00
Subestación de HV	\$247.000,00
Caminos	\$821.000,00
Antenas meteorológicas y torres ADSL	\$41.000,00
Movilización de maquinaria	\$2.117.000,00
Total coste desmontaje	\$9.142.000,00

Tabla 9: Coste total desmontaje parque de Prattsburgh estudio DNV. Fuente:[48]

En esta tabla se incluyen la retirada de los cables de transporte de energía bajo el concepto de “sistema de colección”. En este caso hace, se hace referencia a los cableados aéreos que salen de la subestación, que son un circuito trifásico de unas 15 millas ($\approx 24,14$ Km). También se incluye el coste de desmantelar los caminos.

6.1.4 Costes retirada de elementos

Una vez los elementos van desmontándose, estos deben ir retirándose del parque. Son los costes de estos traslados los que abarcaremos en este apartado. Conviene recalcar que no son fases distintas del proceso de desmontaje, sino que ocurren simultáneamente, es decir, mientras unos elementos están siendo desmontados otros están siendo retirados, formando todo el proceso un mecanismo bien sincronizado.

De nuevo se divide en proceso en dos bloques principales desglosados. Por un lado, los aerogeneradores y por otro la subestación de HV o de recolección.

En la siguiente tabla podemos ver desglosados los costes de retirar del parque los diferentes componentes que conforman el aerogenerador. Respecto al aerogenerador, conviene mencionar que, de los cimientos, se retiran únicamente la cantidad requerida por reglamento (≈ 1 m) y posteriormente se recubre con tierra

Coste retirada del aerogenerador	
Ítem	Coste por WTG [\$]
Palas (troceadas)	\$7.500
Rotor	\$15.000
Nacelle	\$15.000
Secciones de torre (troceadas)	\$89.900
Elementos internos	\$925
Transformador	\$925
Cimientos (hasta 4 pies)	\$900
Total por turbina	\$130.150
Total proyecto (37 turbinas)	\$4.815.550

Coste retirada por MW	\$32.759
------------------------------	-----------------

Tabla 10: Coste retirada aerogeneradores estudio DNV. Fuente:[48]

En la tabla de subestación. se incluye únicamente la parcela en la que se encuentran los equipos de recolección y sistemas de elevación de voltaje a nivel de red de transporte.

Coste retirada subestación HV	
Ítem	Coste [\$]
Equipo de HV	\$15.000
Transformador principal	\$15.000
Sistemas de control	\$15.000
Estructuras	\$15.000
Cimientos	\$1.650
Grava	\$49.500
Total coste transporte subestación HV	\$111.150

Tabla 11: Coste total retirada de subestación HV estudio DNV. Fuente:[48]

A los dos bloques principales que se han descrito previamente, se les debe añadir otros costes para poder calcular el coste total de la retirada de elementos del parque, como son los postes meteorológicos, torres ADSL, el sistema de colección que va de la subestación a la red y finalmente los caminos.

Coste total retirada	
Ítem	Coste [\$]
Turbinas	\$4.815.000
Sistema de colección	\$239.000
Subestación de HV	\$111.000
Caminos	\$701.000
Antenas meteorológicas y torres ADSL	\$5.000
Total coste retirada	\$5.871.000

Tabla 12: Coste total retirada parque de Prattsburgh estudio DNV. Fuente:[48]

6.1.5 Costes de desechos – Venta

El paso final, una vez ha sido todo extraído del parque, es llevar cada elemento a su lugar, teniendo dos posibles destinos, siendo estos los centros de reciclaje o los mercados de segunda mano. En los centros de reciclaje, se obtendrá un precio de materia prima o a mercados de segunda mano, donde los precios pueden oscilar en función de la pieza, modelo, y antigüedad. En este informe se han tratado inicialmente un escenario de reventa nula y posteriormente con reventa de piezas, con el objetivo de poder comparar costes netos.

A continuación, una tabla con los precios de los 3 elementos más abundantes en un aerogenerador, con los cuales se han hecho los cálculos de precio de chatarra.

Precios de las materias primas asumidas (2022)	
Material	Precio [\$/tonelada]
Acero	417
Cobre	7,05
Aluminio	1,52

Tabla 13: Precios materias primas estudio DNV 2022. Fuente:[48]

Lo interesante de esta tabla que vemos a continuación es que por el vertido de casi todos los componentes se puede recuperar parte del capital en concepto de valor de materias primas, salvo por el caso de las palas y del hormigón, esto es a causa de su poca reciclabilidad.

Ingresos/costes de vertido de piezas	
Ítem	Coste [\$]
Palas	-\$3.000
Rotor + Acero de las palas	\$16.000
Nacelle	-\$500
Base de la nacelle	\$28.500
Eje principal	\$6.000
Caja de cambios	\$12.000
Generador	\$33.500
Acero de la torre	\$161.000
Elementos internos	\$43.000
Transformador	\$30.000
Cimientos	-\$2.000
Total por turbina	\$324.500
Total proyecto (37 WTG)	\$12.006.500

Ingresos/costes por MW	\$81.677
------------------------	----------

Tabla 14: Ingresos/costes de vertidos estudio DNV. Fuente: [48]

El importe anterior corresponde al escenario en el cual se derecha todo lo proveniente del aerogenerador. Como ya sabemos, todo lo que favorezca la economía circular puede traernos ingresos y reducir el coste neto del proyecto. En la tabla a continuación se muestra el ingreso que podría obtenerse de la venta de componentes. Evidentemente para introducir elementos en la reventa de componentes deben cumplir unos criterios que aseguren un buen estado. En la columna de “cantidad para reventa” podemos ver la estimación que hacen sobre los elementos que podrán vender.

Ingresos provenientes de venta de componentes			
Ítem	Cantidad para reventa	Precio de reventa [\$]	Ingreso/coste no obtenido si se hubiese desechado [\$]
Caja de cambios	3	\$401.000	\$36.000
Generador	3	\$241.000	\$100.500
Palas	1	\$134.000	-\$3.000
Rodamiento de pith (orientación palas)	5	\$262.000	-
Convertidor de potencia	9	\$77.000	-
Rodamiento principal (del rotor)	5	\$339.000	-
Transformador	18	\$868.000	\$540.000
Total ingreso reventa [\$]			\$2.322.000
Ingreso no obtenido de venta a desguace [\$]			-\$673.500
Ingreso neto reventa [\$]			\$1.648.500

Tabla 15: Ingresos provenientes de venta de componentes del estudio de DNV. Fuente: [48]

En último lugar, el coste total de la gestión de todos los residuos, al igual que en las partes de desmontaje y retirada, se incluye ahora los diferentes componentes de tanto la subestación, caminos, torre de meteorología y ADSL y sistema de conexión a red de distribución.

Total coste gestión residuos/ reventa		
Ítem	Vertidos [\$]	Ventas [\$]
Aerogenerador	-\$222.000	\$12.247.000
Sistema de colección	-\$40.000	\$81.000
Subestacion de HV	-\$26.000	\$413.000
Caminos	-\$2.013.000	-
Antenas meteorológicas y torres ADSL	-\$2.600	\$10.700
Retorno total	-\$2.303.600	\$12.751.700

Tabla 16: Coste total gestión de residuos caso de no reventa estudio DNV. Fuente:[48]

En la tabla a continuación se exponen los resultados de coste total del proyecto de los dos escenarios, el caso de nada de “no reventa” y el segundo caso, con reventa parcial de componentes.

	No reventa	Con reventa parcial
Coste total por turbina	\$123.380	\$70.150
Total del proyecto (37 turbinas)	\$5.564.900	\$2.595.400
Coste del proyecto por MW	\$ 37.856	\$ 17.655

Tabla 17: Resultados estudio DNV. Fuente:[48]

6.2 Costes desmantelamiento parque Acampo Arias, Zaragoza

En este subapartado final, se van a realizar los cálculos correspondientes a presupuestar un coste de desmantelamiento del parque eólico “Acampo Arias”.

Para realizar esta tarea se van a usar los resultados obtenidos en el apartado anterior. Partiendo de esas cifras, se realizarán los ajustes correspondientes para obtener unas cifras acordes a nuestro parque, algunos de los ajustes que se tendrán en cuenta son los siguientes.

- Pasar los valores del estudio del que partimos a valor presente.
- Cambio de divisa de \$ a €.

- Aplicar factor corrector a causa de la diferencia de precios de EEUU a España (no referidos a cambio de divisa).
- Tener en cuenta que el número de turbinas en el parque Acampo Arias y en Prattsburgh son diferentes.
- Cambio de longitudes de caminos de Acampo Arias y Prattsburgh.
- No hay instalaciones como las torres ADSL.
- Se asumirá la existencia de un mástil meteorológico.
- Independientemente de que las turbinas de un parque sean de mayores dimensiones al otro no se tendrá en cuenta el modelo sino los precios por MW.

6.2.1 Presentación parque Acampo Arias, Zaragoza

El parque eólico de Acampo Arias está ubicado en los alrededores de Zaragoza. El Autor opina que se trata de una buena localización en términos de gestión de residuos ya que está al lado del centro tecnológico de reciclaje de Zaragoza.

Respecto a la composición del parque, según la base de datos de “The Wind Power”, el parque consta de 3 partes: la primera siendo 6 turbinas Vestas V90/2000, la segunda 9 turbinas Vestas V90/2000 y la última fase; número de turbinas desconocido pero 18 MW totales.

Dado que con la herramienta Google Earth, podemos contabilizar 26 turbinas y que según “The Wind Power”, el parque tiene una potencia total de 48 MW, trabajaremos bajo un escenario ficticio de que todas las turbinas son equivalentes (26 turbinas en total resultando en 48 MW).

Por otro lado, con las imágenes satélite no se han observado antenas meteorológicas ni ADSL, supondremos que tenemos una torre meteorología y ninguna ADSL.

Composición parque eólico Acampo Arias	
Ítem	Descripción
Turbinas	26 Uds
Potencia total	48 MW
Subestaciones HV	1 Ud
Torres meteorológicas	1 Ud
Caminos	8600 m (5,34 millas)

Tabla 16: Composición parque eólico Acampo Arias. Fuente: Elaboración propia.

Como se pueden observar, existen ciertas diferencias con el parque que estudia el caso de DNV. No obstante, sabiendo las diferencias y aplicando los factores correctivos, obtendremos una aproximación del coste.

6.2.2 Costes Acampo Arias, escenario de no reventa

A continuación, se muestran los cálculos de los costes del desmantelamiento sin ningún tipo de reventa de componentes, únicamente a precio de materia prima/chatarra, en mismo formato que en parque del estudio de DNV. Acompañado de comentarios acerca de los ajustes que se han realizado.

6.2.2.1 Costes de desmontaje

Para el cálculo del coste de desmontaje de aerogeneradores, partimos del coste por MW proveniente del estudio comentado y se ajusta a la potencia de nuestro parque.

Coste desmontaje Aerogenerador		Ajustes de cálculos realizados / Observaciones	
Tarea	Coste por WTG [\$]		
Coste desmontaje por MW	\$33.728		Precio por MW, según estudio DNV
Coste total parque (48 MW)	\$1.618.939	=33.728*48	Precio \$ por MW de DNV* MW de nuestro parque

Tabla 17: Coste desmontaje aerogeneradores parque Acampo Arias. Fuente: Elaboración propia

Respecto al coste de desmontaje de la subestación de HV, no presenta cambios ya que tenemos la misma cantidad de subestaciones y a nivel de equipos no hay gran diferencia.

Coste desmontaje de Subestación		Ajustes de cálculos realizados / Observaciones
Tarea	Coste [\$]	
Desmontaje subestación (1 Ud)	\$246.600	Misma cantidad de subestaciones que caso DNV, mismo coste

Tabla 18: Coste desmontaje subestación parque Acampo Arias. Fuente: Elaboración propia

Tras esto, para el coste total de desmontaje, debemos sumar otros elementos. Las diferencias que se encuentran son: menor longitud de caminos a desmontar y que únicamente existe una torre meteorológica.

Coste total desmontaje parque		Ajustes de cálculos realizados / Observaciones	
Turbinas	\$1.618.938,78		
Sistema de colección	\$958.000		
Subestación de HV	\$247.000		
Caminos	\$208.769	=821000*(5,34/21)	Precio x milla de DNV * Nuestra distancia
Antenas meteorológicas y torres ADSL	\$10.250	=41000*1/4	No tenemos torres ADS y 1 meteorológica
Movilización de maquinaria	\$1.058.500		Mitad del coste de DNV, ya que nuestro proyecto dura la mitad
Total coste desmontaje	\$4.101.457		

Tabla 19: Coste total desmontaje parque Acampo Arias. Fuente: Elaboración propia

6.2.3 Costes retirada de elementos

Para el cálculo de los costes de la retirada de elementos del parque, procedimiento similar.

Coste retirada del aerogenerador		Ajustes de cálculos realizados / Observaciones	
Tarea	Coste por WTG [\$]		
Coste retirada por MW	\$32.759		Precio por MW, según estudio DNV
Coste total parque (48 MW)	\$1.572.424	32.759 * 48	Precio \$ por MW de DNV* MW de nuestro parque

Tabla 20: Coste retirada elementos aerogeneradores parque Acampo Arias. Fuente: Elaboración propia

Respecto a la subestación de HV, nada diferente del apartado anterior, presentamos una subestación, al igual que el estudio base.

Coste desmontaje de Subestación		Ajustes de cálculos realizados / Observaciones	
Tarea	Coste [\$]		
Desmontaje subestación (1 Ud.)	\$111.150	Misma cantidad de subestaciones que caso DNV, mismo coste	

Tabla 21: Coste retirada elementos subestación HV parque Acampo Arias. Fuente: Elaboración propia

Y por último y tercer bloque, el coste total, añadiendo a los costes anteriores, las tareas de desmontaje de la torre meteorológica, los caminos y el sistema de colección que une con la red de distribución. De nuevo, se ha ajustado la distancia de caminos y el número de postes de meteorología al parque en cuestión.

Los costes totales de la retirada de elementos como se muestra a continuación.

Coste total retirada		Ajustes de cálculos realizados / Observaciones	
Ítem	Coste [\$]		
Turbinas	\$1.572.424		
Sistema de colección	\$239.000		
Subestación de HV	\$111.000		
Caminos	\$178.254	=701000*(5,34/21)	Precio x milla de DNV * Nuestra distancia
Antenas meteorológicas y torres ADSL	\$1.250	=5000/4	No tenemos torres ADS y 1 meteorológica
Total coste retirada	\$2.101.929		

Tabla 22: Coste retirada total elementos parque Acampo Arias. Fuente: Elaboración propia

6.2.4 Costes de desechos – Venta

Para este apartado, se debe mencionar que los valores asumidos de las materias primas, de cara a la venta como chatarra, no se han tomado diferentes precios, ya que sobre el coste total del proyecto, se ha aplicado la corrección de la inflación de estos dos años.

Los costes de las diferentes partes quedan de la siguiente forma.

Coste vertido del aerogenerador		Ajustes de cálculos realizados / Observaciones	
Tarea	Coste por WTG [\$]		
Ingresos/costes por MW	\$81.677	Proveniente del estudio de DNV	
Ingreso total parque (48 MW)	\$3.920.490	=81.677*48	Precio \$ por MW de DNV* MW de nuestro parque

Tabla 23: Coste vertido componentes aerogeneradores parque Acampo Arias. Fuente: Elaboración propia

Hay que destacar que la cantidad de \$3.920.490 es un ingreso y no un coste, proveniente de la venta de piezas como materias primas. Para aclarar el cuadrante de ingresos/costes, se tiene la siguiente tabla que desglosa, por un lado, la cantidad de coste por desechar y por otro, los ingresos que se obtienen por la venta de los materiales.

Desglose importes vertidos		
Ítem	Importes por MW (DNV) [\$]	Acampo Arias
Ingresos	\$83.313	\$3.999.020
Costes	-\$1.497	-\$71.837

Tabla 24: Desglose coste vertido aerogenerador en Ingresos-Costes. Fuente: Elaboración propia

Para la gestión del resto de piezas del parque, disponemos de la tabla que vemos a continuación, que agrupa el total de costes, tanto ingresos como costes de todo el conjunto del parque.

Total coste gestión residuos/ reventa			Ajustes de calculos realizados / Observaciones
Ítem	Vertidos [\$]	Ventas [\$]	
Aerogenerador	-\$71.837	\$3.999.020	
Sistema de colección	-\$40.000	\$81.000	Igual que caso DNV
Subestación de HV	-\$26.000	\$413.000	Igual que caso DNV
Caminos	-\$511.877		Adaptado a la distancia del parque Acampo Arias
Antenas meteorológicas y torres ADSL	-\$650	\$2.675	Importes de antenas 1/4, al tener solo una torre meteorológica y ninguna ADSL
Retorno total	-\$650.364	\$4.495.695	

Tabla 25: Coste total gestión residuos parque Acampo Arias. Fuente: Elaboración propia

6.2.5 Coste total desmantelamiento parque Acampo Arias, escenario sin venta

Tras todo lo expuesto en los epígrafes anteriores, podemos sacar el compuesto total del coste que supondría el desmantelamiento de este parque en cuestión, realizando una nula venta de componentes y mandando todo a centros de reciclaje.

Como se puede apreciar, en la tabla se ha trasladado la cifra final del coste, a euros [€] (cambio \$/€ [49]) y a una fecha actual teniendo en cuenta el componente de la inflación (valores de inflación España [47]), para tener un valor real y actual del coste que supondría.

Coste total proyecto		Observaciones
Ítem	Importe [\$]	
Coste desmontaje	-\$4.101.457	
Coste Retirada	-\$2.101.929	
Costes gestión residuos	-\$650.364	
Ingresos gestión residuos	\$4.495.695	
Total coste	-\$2.358.055	Dólares 2022
Total coste	-€ 2.263.732	Euros 2022, cambio \$/€ 0,96
Total coste valor presente	-€ 2.467.174	Euros 2024. Valores inflación: 5,71% (2022) y 3,10% (2023)
Total coste por MW	-€ 51.399	

Tabla 26: Coste total desmantelamiento parque Acampo Arias, sin venta de componentes. Fuente: Elaboración propia

Como resultado relevante obtenemos un valor de desmantelamiento total de 51.399 € por MW instalado en el caso menos favorable, desmantelación de caminos y reventa nula.

6.3 Costes Acampo Arias, escenario reventa parcial + mejoras propuestas

En este epígrafe final, vamos a abordar el coste del proceso de desmantelamiento del parque eólico del apartado anterior, pero esta vez añadiremos diferentes prácticas que tienen como objetivo, reducción de costes, simplificación del proceso, reducción del impacto ambiental y reducción de la exposición de trabajadores a situaciones de riesgo.

A continuación, las iremos nombrando y comentando como afectan al balance de costes del proyecto.

En primer lugar, inspección técnica de las palas de los aerogeneradores con drones. Esta propuesta nos evita tener que inspeccionar las palas en tierra mientras hay obras en curso de tal forma que únicamente correspondería una inspección interna de las que cumplen que el exterior esta de forma óptima para su venta, minimizando tiempo de inspección en tierra. Respecto a los costes se estima la jornada completa de vuelo por 450 €, a su vez estimamos que se podría realizar por día la inspección de las palas de 3 aerogeneradores. Es decir, nos supondría un total de 9 días y un coste de 4,050 € de coste extra.

En segundo lugar, el uso de cortadora de hilo acompañada de un equipo triturador para la gestión de las palas. Esta nos permite, por un lado, no tener que hacer que la excavadora tenga que cambiar sus cabezales para cortar la pala y así poder invertir el total del tiempo de la excavadora en picar los cimientos y minimizar su uso en cargar los trozos de pala en la trituradora. Respecto a los costes de la trituradora, se establece un coste de 13,59 €/h, que teniendo en cuenta que en el proyecto se tardará en desmontar las turbinas 39 días (1,5 días por turbina) y 2 semanas adicionales para subestación, red de colección y antenna meteorológica, estimamos la duración del proyecto en 53 días.

Para el coste del equipo de corte, a falta de información sobre el precio de uso de estos equipos, se estima un precio similar a otros equipos de corte, en 15 €/h. Se usará únicamente para el proceso de cortar las palas por lo que habría que disponer del equipo de corte, una duración de 39 días que requiere el desmontaje de turbinas.

Coste implementación mejoras	
Ítem	Coste [€]
Trituradora (53 días)	€ 17.286
Cortadora de hilo (39 días)	€ 14.040
Inspección de drones	€ 4.050

Tabla 27: Coste implementación de las mejoras propuestas. Fuente: elaboración propia y

Por último, la utilización de los residuos de los cimientos en mantenimiento o mejora de los caminos actuales, o los propios del parque en el caso de que se decidan mantener (caso idóneo). Esto nos beneficia de gran forma, ya que nos evitamos tener que pagar por desechos de hormigón, es decir coste del hormigón nulo, y simplemente deberíamos usar algún camión de los que ya disponemos para distribuir los residuos por el camino. No nos añadiría coste extra debido a que el equipo triturador también es posible usarlo para hormigón. Por lo tanto, al coste total del proyecto, no nos añade ningún coste extra, únicamente nos reducir costes.

6.3.1. Costes desmontaje

En este escenario, para el cálculo de los costes de desmontaje, únicamente presentamos un cambio. Este cambio se trata de no incluir costes de desmontaje de caminos dado que en este escenario los caminos no se desmantelarán. De este modo, el coste total del desmontaje queda de la siguiente forma.

Coste total desmontaje parque		Ajustes de cálculos realizados / Observaciones
Turbinas	\$1.618.938,78	
Sistema de colección	\$958.000	
Subestación de HV	\$247.000	
Caminos	\$0	no desmantelamos caminos
Antenas meteorológicas y torres ADSL	\$10.250	No tenemos torres ADS y 1 meteorológica
Movilización de maquinaria	\$1.058.500	
Total coste desmontaje	\$3.892.689	

Tabla 28: Coste total desmontaje parque Acampo Arias escenario con reventa y mejoras. Fuente: Elaboración propia

6.3.2 Costes retirada

Para los costes de retirada de elementos, presentamos dos cambios en los cálculos. En primer lugar, no tenemos cimientos que transportar fuera del parque o a centros de reciclaje, sino que se quedarán los restos en el parque o en sus inmediaciones y, por otro

lado, para el coste de transporte de las palas que se van a desechar suponemos que tenemos el doble de factor de empaquetamiento en los camiones dado que irán trituradas y por tanto gastaremos la mitad en transporte de las palas.

Coste total retirada		Ajustes de cálculos realizados / Observaciones	
Ítem	Coste [\$]		
Turbinas	\$1.513.224		
Sistema de colección	\$239.000		
Subestación de HV	\$111.000		
Caminos	\$0	No desmantelamos camino	
Antenas meteorológicas y torres ADSL	\$1.250	No tenemos torres ADS y 1 meteorológica	
Total coste retirada	\$1.864.474		

Tabla 29: Coste total retirada parque Acampo Arias escenario con reventa y mejoras. Fuente: Elaboración propia

6.3.3 Costes de desechos – Venta

En el cálculo de coste de desechos y venta parcial de elementos, sí que presentamos más cambios. En primer lugar, respecto a vertido a chatarrerías y vertederos de los aerogeneradores, no tenemos que contabilizar los cimientos. Para el cálculo de los ingresos de la reventa parcial de componentes, se ha calculado la cantidad de elementos que se podría vender de segunda mano con una proporción equivalente a la del estudio de DNV, a estos ingresos de reventa se les ha restado el coste de oportunidad de ser vendidos como chatarra.

Ingresos provenientes de venta de componentes			
Ítem	Cantidad para reventa	Precio de reventa [\$]	Ingreso/coste no obtenido si se hubiese desechado [\$]
Caja de cambios	2	\$267.300	\$36.000
Generador	2	\$160.000	\$67.000
Palas	1	\$134.000	-\$3.000
Rodamiento de pith (orientación palas)	4	\$209.600	-
Convertidor de potencia	6	\$51.300	-
Rodamiento principal (del rotor)	4	\$271.200	-
Transformador	13	\$626.888	\$390.000
Total ingreso reventa [\$]			\$1.720.288
Ingreso no obtenido de venta a desguace [\$]			-\$490.000
Ingreso neto reventa [\$]			\$1.230.288

Estrategia y coste del desmantelamiento de parque eólicos *onshore*

Tabla 30: Ingresos obtenidos reventa parcial parque Acampo Arias escenario mejoras aplicadas Fuente: Elaboración propia

Total coste gestión residuos/ reventa			Ajustes de cálculos realizados / Observaciones
Ítem	Vertidos [\$]	Ventas [\$]	
Aerogenerador	-\$71.837	\$3.999.020	
Sistema de colección	-\$40.000	\$81.000	Igual que caso DNV
Subestación de HV	-\$26.000	\$413.000	Igual que caso DNV
Caminos	\$0		No me generan coste
Antenas meteorológicas y torres ADSL	-\$650	\$2.675	Importes de antenas 1/4, al tener solo una torre meteorológica y ninguna ADSL
Retorno total	-\$138.487	\$4.495.695	

Tabla 31: Coste total gestión de residuos parque Acampo Arias escenario mejoras aplicadas Fuente: Elaboración propia

6.3.4 Costes totales

Finalmente, en las siguientes tablas, podremos observar los costes totales del proyecto. En la primera tabla podemos ver la cuantía de lo que supondría cada fase del proyecto teniendo en cuenta reventa parcial y no desmantelamiento de los caminos. Conviene destacar que el coste total de esta tabla no contempla las mejoras que aplicamos en el proceso

Coste total proyecto escenario 2, reventar parcial componentes, (sin costes mejoras incluidos)						
Ítem	Coste desmontaje	Coste retirada	Coste vertido	Coste total	Ingreso reventa/chatarra	Neto
Turbinas	\$1.618.939	\$1.513.224	\$71.837	\$3.204.000	\$5.229.308	\$2.025.308
Sistemas de colección	\$958.000	\$239.000	\$40.000	\$1.237.000	\$81.000	-\$1.156.000
Subestación de HV	\$246.600	\$111.150	\$26.000	\$383.750	\$413.000	\$29.250
Caminos	0	0	0	\$0	0	\$0
Poste meteorológico	\$10.250	\$1.250	\$650	\$12.150	\$2.675	-\$9.475
Costes de movilización	\$1.058.500,00	-	-	\$1.058.500	0	-\$1.058.500
Total fase de proyecto	\$3.892.289	\$1.864.624	\$138.487	\$5.895.400	\$5.725.983	-\$169.417
Total coste proyecto						-\$169.417

Tabla 32: Coste total desmantelamiento parque Acampo Arias con reventa parcial, previo a aplicar mejoras. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en esta última tabla recalcula el coste final del proyecto añadiendo el coste extra que nos supondría la aplicación de cada mejora para facilitar el proceso. Siendo los valores de mayor relevancia el coste total del proyecto y el coste total por MW instalado.

Coste total proyecto	Observaciones
----------------------	---------------

Estrategia y coste del desmantelamiento de parque eólicos *onshore*

Ítem	Importe [\$]	
Total coste proyecto sin mejoras (venta parcial + caminos no desmantelados)	\$169.417	Dólares 2022
Total coste	€ 162.640	Euros 2022, cambio \$/€ 0,96
Total coste proyecto a valor presente a falta de mejoras	€ 177.256	Euros 2024. Valores inflación: 5,71% (2022) y 3,10% (2023)
Coste implementación inspección drones	€ 4.050	
Coste implementación trituradora	€ 17.286	
Coste implementación sistema de corte con hilo	€ 14.040	
Coste total proyecto con mejoras	€ 212.632	
Total coste por MW	€ 4.430	

Tabla 33: Coste total desmantelamiento parque Acampo Arias con reventa parcial y mejoras aplicadas. Fuente: Elaboración propia

Como resultado del caso favorable, teniendo en cuenta: Nula desmantelación de caminos, venta parcial de equipos, y añadiendo costes de mejoras. Nos resulta en un coste de únicamente 4.430 €/MW.

Para hacernos una idea de cómo afecta al coste únicamente ahorrarse el coste de desmantelar los caminos, el coste ascendería a un total de 24.024€/MW, por lo que es un aumento de casi 20.000 €/MW.

De esos 24.024 €/MW a los 51.399 €/MW, ese margen corresponde principalmente a la venta parcial de maquinaria, y una parte marginal de esta, al ahorro de coste de transporte por llevar trituradas las palas.

7. Conclusiones

El avance de la tecnología en los nuevos aerogeneradores unido al factor de que parte de la flota eólica española está empezando a llegar al **final de su vida útil** propicia que estén comenzando a desmontarse los parques existentes tanto para finalizar su actividad como para **renovar equipos**. En ambas situaciones se debe **desmantelar** el parque.

En este proyecto se realiza un análisis de la situación actual de la antigüedad del parque eólico español para exponer el contexto en el que nos encontramos. A su vez se trata de describir qué componentes conforman un aerogenerador para poder comprender el proceso que se lleva a cabo para realizar su desmontaje en la desmantelación del parque y las limitaciones que podemos presentar a causa de las dimensiones.

Una vez abordados los componentes hacemos un análisis de los **materiales** que conforman cada uno de ellos, factor que es de vital importancia para su posterior **tratamiento de residuos** orientado a favorecer la **economía circular** en los casos que no sea posible utilizar de nuevo los componentes. Es por ello que se ha llevado a cabo un estudio de mercado en el cual se explican algunas de las innovaciones/líneas de investigación que se están desarrollando o se propone la aplicación de tecnologías, todo con el fin de facilitar el proceso de desmantelación, disminuir costes o fomentar la economía circular.

En último lugar, se ha realizado un estudio económico acerca de los **costes** que supondría llevar a cabo la **desmantelación** de un parque eólico de los alrededores de Zaragoza, haciendo una comparación del escenario de un proceso estándar frente a un caso en el que se aplican algunas de las propuestas mencionadas en el estudio de mercado.

Para concluir este trabajo y como conclusión, podemos decir que el fin del ciclo de vida de los parques está convirtiéndose en una realidad, nos encontramos con un buen procedimiento estándar de desmantelamiento, sobre el cual hay margen para implementar prácticas que pueden suponer **ganancias marginales económicas**, hacer un proceso más **sostenible** y aumentar tasas de **reciclabilidad de componentes**.

Bibliografía

- [1] *Producción eléctrica en España por tipo en 2023* / Statista. (2024, 22 marzo). Statista. <https://es.statista.com/estadisticas/993747/porcentaje-de-la-produccion-de-energia-electrica-por-fuentes-energeticas-en-espana/#:~:text=La%20generaci%C3%B3n%20de%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica,ya%20ocupa%20el%20ciclo%20combinado>
- [2] [AEE](#). (2022). La eólica en España. Recuperado de <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-espana/>
- [3] [Acciona](#). El cabrito. Recuperado de https://www.acciona.com/es/proyectos/parque-eolico-el-cabrito/?_adin=02021864894
- [4] Enerfín. Parque eólico Malpica. Recuperado de <https://www.enerfin.es/parque-eolico-malpica>
- [5] [Energías](#) renovables, el periodismo de las energías limpias. (12 de diciembre de 2022). Recuperado de <https://www.energias-renovables.com/eolica/rwe-emplea-una-solucion-de-cimentacion-20221211>
- [6] [Structuralia](#). (5 de Octubre 2016). Construcción de parques eólicos. Montaje de los aerogeneradores. Recuperado de <https://blog.structuralia.com/construccion-de-parques-eolicos-montaje-de-los-aerogeneradores>
- [7] Danish wind industry association (2003). Recuperado de <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/comp/index.htm>
- [8] WindEurope. (2023). Reports. Recuperado de <https://windeurope.org/intelligence-platform/reports/#>
- [9] Gestores de residuos. (2015). Eólica y reciclaje: Palas eólicas para los aerogeneradores. Recuperado de <https://gestoresderesiduos.org/noticias/eolica-y-reciclaje-palas-eolicas-para-los-aerogeneradores>
- [10] Peter Garret & Klaus Ronde (2011) Life Cycle assessment of electricity production from a V90_2.0 MW grinstreamer wind plant: https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/lcas/LCA_V902MW_version1.pdf.coredownload.inline.pdf

- [11] Vestas (2022). Sustainability Report 2022.
<https://www.vestas.com/en/sustainability/reports-and-ratings>
- [12] Grúas Arlin. (2019). Conozca los principales tipos de grúas que existen en el mundo. Recuperado de <https://gruasarlin.com/conoce-principales-tipos-gruas/>
- [13] Direct Industry. Aparato de levantamiento y volteo para palas de aerogeneradores. Recuperado de <https://www.directindustry.es/prod/airpes/product-213033-2424360.html>
- [14] La voz de Galicia. (06/01/2016). Funcionamiento de un aerogenerador. Recuperado de <https://www.lavozdeg Galicia.es/grafico/galicia/2016/01/06/undefined/00161452035952818873608.htm#>
- [15] Junta de Andalucía.(07/05/2020). ANTEPROYECTO DE DESMANTELAMIENTO Y RESTAURACIÓN PAISAJÍSTICA. Recuperado de <https://www.juntadeandalucia.es/sites/default/files/2020-10/Proyecto%20de%20desmantelamiento.PDF>
- [16] Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. (2014). Aerogeneradores (I): funcionamiento y marco normativo de prevención de riesgos laborales. Recuperado de <https://www.aeeolica.org/uploads/documents/10170-aerogeneradores-i-funcionamiento-y-marco-normativo-de-prevenircn-de-riesgos-laborales.pdf>
- [17] RenovablesVerdes. (14/06/2021). Aerogenerador vertical. Recuperado de <https://www.renovablesverdes.com/aerogeneradores-verticales/>
- [18] Hugo González Lázare. (Junio 2018). Cimentaciones especiales para un aerogenerador.
https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/15232/TFM_HUGO_GONZÁLEZ_LÁZARE.pdf?isAllowed=y&sequence=1
- [19] Recinor gestión de residuos. Demolición y reciclado de las zapatas de aerogeneradores en Zás, A Coruña. Recuperado de <https://recinor.com/proyectos/demolicion-de-cimentaciones-parque-eolico-de-zas/>
- [20] Nabrawind. (2018). Bladerunner. Recuperado de: <https://www.nabrawind.com/bladerunner-2/>

- [21] Recinor Gestion de residuos. Demolición y reciclado de la zapatas de aerogeneradores en Zás, A Coruña. Recuperado de: <https://recinor.com/proyectos/demolicion-de-cimentaciones-parque-eolico-de-zas/>
- [22] Falch. (2024). Falch world of water jetting. Recupero de: <https://www.falch.com/en/>
- [23] C&en. (2022). How can companies recycle wind turbine Blades. Recuperado de: <https://cen.acs.org/environment/recycling/companies-recycle-wind-turbine-blades/100/i27>
- [24] Evan Wright. (2021). Wind turbine Blade- Cutting with diamond wire. Recuperado de: https://www.youtube.com/watch?v=m-X1uc7MyKo&ab_channel=EvanWright
- [25] Jaso Elevation Systems. (2024). Elevator for wind turbines. Recuperado de: <https://jaso.com/elevation/en/wind/>
- [26] WindTurbines-MarketPlace. (2024). Wind turbines for sale. Recuperado de: <https://windturbines-marketplace.com/>
- [27] MWPS. Buy used wind turbines. Recuperado de: <https://www.mwps.world/>
- [28] RepoweringSolutions. Recuperado de: <https://repoweringsolutions.com/index.htm>
- [29] AMM Capital. Recuperado de: <https://ammcapital.es/>
- [30] WINDEXchange: *End of Service Wind Turbine Guide*. (s. f.). <https://windexchange.energy.gov/end-of-service-guide>
- [31] *Innovative precast concrete component concept with optimized joint design for especially tall wind turbines*. (2018, 29 junio). Concrete Plant Precast Technology. https://www.bft-international.com/en/artikel/bft_Innovative_precast_concrete_component_concept_with_optimized_joint_design-3188078.html
- [32] *BladeRunner – Nabrawind*. (s. f.). <https://www.nabrawind.com/bladerunner-2/>

- [33] *Nabrajoint – Nabrawind*. (s. f.). <https://www.nabrawind.com/nabrajoint/>
- [34] Re-Wind Network. (2022). Re-Wind design catalog 2nd edition fall/autumn 2022
- [35] *The Re-Wind network*. (2024, 1 junio). The Re-Wind Network. <https://www.re-wind.info/>
- [36] BladeBridge. (2024, 22 julio). *BladeBridge - Wind Turbine Blade Repurposing - Waste Repurposing*. <https://www.bladebridge.ie/>
- [37] *Corte con hilo en tubería encamisada | - Aracorte*. (2022, 10 febrero). Aracorte. <https://aracorte.com/portfolio/corte-con-hilo-en-tuberia-encamisada-con-acero/>
- [38] *Chatarrerías en Barcelona - Precios chatarra: Metal*. (s. f.). www.chatarreriasbarcelona.com.
<https://www.chatarreriasbarcelona.com/precios-chatarra-barcelona/precios-chatarra-barcelona-metal/ia51>
- [39] *Recytour - Travaux publics Hubaut*. (2024, 1 julio). Travaux Publics Hubaut. <https://hubaut.be/recytour/>
- [40] Johan Gauderis, RebelGroup (2022 Enero). Dcommissioning of windturbines-logistics business case
- [41] Instituto Tecnológico de ARagón. (2024, 31 julio). *RECICLADO BIOLÓGICO DE MATERIALES COMPUESTOS*. ITA. <https://www.ita.es/blog/reciclado-biologico-de-materiales-compuestos/>
- [42] Echtcommunity. (s. f.). *Home*. EoLO-HUBs. <https://www.eolo-hubs.eu/>
- [43] *DJI - Official Website*. (s. f.). DJI Official. <https://www.dji.com/es>
- [44] *Grupo Fragmenta | Productos de demolición técnica » Sierras Echidna*. (s. f.). <https://www.fragmentalo.com/sierras-echidna/>

- [45] *Trituradora móvil sobre orugas J-1480 / Criba móvil primaria.* (s. f.).
Finlay. <https://www.terex.com/finlay/es/product/jaw-crushers/j-1480>
- [46] *Equipos de corte por hilo diamantado Segeda MHS 30 - Obras p~~u~~bllicas*
- Equipos de corte por hilo diamantado. (s. f.).
<https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/FeriaVirtual/Producto-Equipos-de-corte-por-hilo-diamantado-Segeda-MHS-30-157267.html>
- [47] Triami Media. (s. f.). *Inflación histórica España – inflación histórica España IPC.* <https://www.inflation.eu/es/tasas-de-inflacion/espana/inflacion-historica/ipc-inflacion-espana.aspx>
- [48] Decommissioning Costs Analysis Report: Prattsburgh Wind. (2022). En
DNV (N.º 10304479-HOU-R-01). DNV Energy USA Inc.
- [49] *Dólar Euro histórico / Evolución USD/EUR - Investing.com.* (s. f.).
Investing.com Español. <https://es.investing.com/currencies/usd-eur-historical-data>

Estrategia y coste del desmantelamiento de parque eólicos *onshore*

ANEXO 1: Desglose materiales parque eólico completo [10]

Parque onshore de una potencia de 50 MW (VESTAS V90-2.0 MW)

Material classification	Unit	Turbines	Foundations	Site cables	Site switchgears	Site transformer
Steel and iron materials (total)	tonne	5133	957	0	5	44
Unalloyed, low alloyed	tonne	3524	149	0	0	20
Highly alloyed	tonne	584	3	0	5	24
Cast iron	tonne	1000	0	0	0	0
Steel and iron materials (unspecified)	tonne	24	805	0	0	0
Lights alloys, cast and wrought alloys (total)	tonne	105	0	555	0	0
Aluminium and aluminium alloys	tonne	105	0	555	0	0
Nonferrous heavy metals, cast and wrought alloys (total)	tonne	42	1	110	2	11
Copper	tonne	42	1	110	2	11
Copper alloys	tonne	0	0	0	0	0
Polymer materials (total)	tonne	261	3	1015	0	0
Thermoplastics	tonne	56	3	848	0	0
Thermoplastic elastomers	tonne	3	0	0	0	0
Elastomers / elastomeric compounds	tonne	6	0	0	0	0
Duromers	tonne	73	0	167	0	0
Polymeric compounds	tonne	123	0	0	0	0
Process polymers (total)	tonne	7	0	0	0	0
Lacquers	tonne	7	0	0	0	0
Adhesives, sealants	tonne	0	0	0	0	0
Other materials and material compounds (total)	tonne	530	18772	1	0	1
Modified organic natural materials	tonne	52	0	0	0	1
Ceramic / glass	tonne	477	0	1	0	1
Other materials and material compounds	tonne	0	0	0	0	0
Concrete	tonne	0	18772	0	0	0
SF ₆ gas	kg	183	0	0	43	0
Electronics / electrics (total)	tonne	60	0	0	0	0
Electronics	tonne	11	0	0	0	0
Electrics	tonne	40	0	0	0	0
Magnets	tonne	9	0	0	0	0
Fuels and auxiliary means (total)	tonne	22	0	0	0	19
Lubricants	tonne	17	0	0	0	19
Coolant / other glycols	tonne	4	0	0	0	0
Other fuels and auxiliary means	tonne	2	0	0	0	0
Not specified	tonne	30	0	0	0	0
Total mass	tonne	6193	19733	1682	7	75
Total number of pieces	tonne	25	25	1	7	1
Mass of piece	tonne	248	789	1682	1	75