

ELENA LOUREIRO BOUZÓN

POTENCIAL RESIDUO EÓLICO EN GALICIA

TESIS

Trabajo realizado en el programa de Doble Titulación entre la Universidad de la Coruña y el Instituto Politécnico de Bragança, como requisito para la obtención del título de Máster en Energías Renovables y Máster en Eficiencia e Aprovechamiento Energético.

Orientador: Luís Frólén Ribeiro

Co – orientador: José Luis Calvo Rolle

BRAGANÇA 2022

ELENA LOUREIRO BOUZÓN

POTENCIAL RESIDUO EÓLICO EN GALICIA

BRAGANÇA 2022

RESUMEN

El presente trabajo de fin de máster se enfoca en el problema que supone, en la actualidad, el residuo generado por los parques eólicos, tan necesarios a día de hoy para la generación de energía eléctrica.

Se parte de una perspectiva más general analizando lo que es el residuo eólico y las tecnologías de reciclaje y tratamiento actuales relacionados con este tipo de residuo, para acabar enfocándose en la situación gallega y el cálculo del potencial residuo mediante la aplicación de un modelo matemático.

En la actualidad existen una amplia variedad de modelos matemáticos para el cálculo del residuo eólico, dos de ellos han servido de inspiración para la elaboración de este trabajo: el modelo de H. Albers, por ser uno de los primeros y que sirve de base para la elaboración de la gran mayoría de los modelos posteriores, y el de Liu y Barlow, por ser uno de los más completos. El modelo matemático de este TFM ha considerado información proveniente de 357 turbinas eólicas de diferentes fabricantes, con un rango de potencia nominal desde los 50 kW (0.05 MW) a los 14 MW, con la finalidad de relacionar intervalos de potencia nominal (kW) con el valor de la mediana del peso de los aerogeneradores (T_n).

Los datos utilizados los ha proporcionado el Observatorio Eólico de Galicia, en cuanto a potencia instalada (3,412 MW), número de aerogeneradores (4,026 en un total de 164 parques eólicos) y ubicación de los mismos a nivel municipal y autonómico. Con estos datos hemos sido capaces de realizar varias hipótesis de cálculo de residuo eólico, con previsión a distintos años y a diferentes niveles administrativos, con los siguientes resultados:

- Hipótesis N°1: “Cálculo del RE en Galicia hasta el 2030” → peso total del residuo eólico generado desde el año 1997 hasta el año 2030 igual a 40,114.36 toneladas, con unos costes de entierro asociados de 1,083,087.80 €.
- Hipótesis N°2 “Cálculo del RE en Galicia hasta el 2045” → peso total del residuo eólico generado desde el año 1997 hasta el año 2045 igual a 40,699.21 toneladas, con unos costes de entierro asociados de 1,098,878.60 €.
- Hipótesis N°3 “Cálculo del RE a nivel provincial y municipal” → peso total del residuo eólico generado igual a 38,404.4 toneladas, distribuido provincialmente:
 - A Coruña: 9,424.4 toneladas.
 - Lugo: 19,230.0 toneladas.
 - Pontevedra: 5,952.0 toneladas.
 - Ourense: 3,798.0 toneladas.
- Hipótesis N°4: Ubicación de central de gestión de RE → En base a los resultados obtenidos de cantidad de residuo eólico y ubicación del mismo, se ha calculado mediante la ecuación del centro de masas o centroide. la localización de una futura central de tratamiento y gestión de residuo eólico en la comunidad gallega, optimizando su localización geográfica, en términos de logística y transporte. Siguiendo estos criterios se determina como la mejor ubicación para una futura central de gestión de residuo eólico, el municipio de Guitiriz, en la provincia de Lugo.

RESUMO

Esta dissertação de mestrado centra-se no problema que é causado pelos resíduos gerados pelos parques eólicos, tão necessários hoje para a geração de eletricidade. Parte-se de uma perspectiva mais geral, analisando o que são os resíduos eólicos e as tecnologias atuais de reciclagem e tratamento relacionadas com este tipo de resíduos, para acabar por focar-se na situação galega e no cálculo dos potenciais resíduos através da aplicação de um modelo matemático.

Atualmente existe uma grande variedade de modelos matemáticos para cálculo da quantidade do resíduo eólico, dois deles serviram de inspiração para a elaboração deste trabalho: o modelo de H. Albers, por ser um dos primeiros e servir de base para a elaboração de a grande maioria dos modelos posteriores, e o de Liu e Barlow, por ser um dos mais completos. O modelo matemático desta dissertação considerou informações de 357 aerogeradores de diferentes fabricantes, com potências em faixas nominais de 50 kW (0,05 MW) a 14 MW para relacionar os intervalos de potência nominal (kW) com o valor médio do peso das turbinas eólicas (T_n).

Os dados utilizados foram fornecidos pelo Observatório Eólico da Galiza, em termos de potência instalada (3.412 MW), número de aerogeradores (4.026 num total de 164 parques eólicos) e sua localização a nível municipal e regional. Com estes dados conseguiu-se determinar vários cenários para o cálculo do desperdício de energia eólica, com previsões para diferentes anos e em diferentes níveis administrativos, com os seguintes resultados:

- Cenário n.º 1: “Cálculo da ER na Galiza até 2030” → peso total de resíduos eólicos gerados de 1997 a 2030 igual a 40.114,36 toneladas, com custos de aterro de € 1.083.087,80.
- Cenário n.º 2 “Cálculo de ER na Galiza até 2045” → peso total de resíduos eólicos gerados de 1997 a 2045 igual a 40.699,21 toneladas, com custos de aterro de € 1.098.878,60.
- Cenário n.º 3 “Cálculo de ER a nível provincial e municipal” → peso total de resíduos eólicos gerados igual a 38.404,4 toneladas, distribuídos provincialmente:
 - A Corunha: 9.424,4 toneladas.
 - Lugo: 19.230,0 toneladas.
 - Pontevedra: 5.952,0 toneladas.
 - Ourense: 3.798,0 toneladas.
- Cenário n.º 4: Localização da central de gestão de ER → Com base nos resultados obtidos a partir da quantidade de resíduos eólicos e da sua localização, foi calculada através da equação do centro de massa a localização de uma futura estação de tratamento e gestão de resíduos eólicos na comunidade galega, otimizando a sua localização geográfica em termos de logística. Seguindo estes critérios, determinou-se o município de Guitiriz, na província de Lugo, como a melhor localização para uma futura central de gestão de resíduos eólicos.

ABSTRACT

This master's thesis focuses on the problem of the waste generated by wind farms, which are so necessary today for the generation of electricity.

It starts from a more general perspective analyzing what is the wind waste and the current recycling and treatment technologies related to this type of waste, to end up focusing on the Galician situation and the calculation of the potential waste through the application of a mathematical model.

At present there are a wide variety of mathematical models for the calculation of wind waste, two of them have served as inspiration for the elaboration of this work: the model of H. Albers, for being one of the first and that serves as the basis for the elaboration of the vast majority of later models, and that of Liu and Barlow, for being one of the most complete. The mathematical model of this TFM has considered information from 357 wind turbines from different manufacturers, with a nominal power range from 50 kW (0.05 MW) to 14 MW, in order to relate nominal power intervals (kW) with the value of the median weight of the wind turbines (T_n).

The data used has been provided by the Wind Observatory of Galicia, in terms of installed capacity (3,412 MW), number of wind turbines (4,026 in a total of 164 wind farms) and location of the same at the municipal and regional level. With these data we have been able to make several hypotheses of calculation of wind waste, with forecast to different years and at different administrative levels, with the following results:

- Hypothesis N°1: "Calculation of the RE in Galicia until 2030" → total weight of the wind waste generated from 1997 to 2030 equal to 40,114.36 tons, with associated burial costs of € 1,083,087.80.
- Hypothesis N°2 "Calculation of the RE in Galicia until 2045" → total weight of the wind waste generated from 1997 to 2045 equal to 40,699.21 tons, with associated burial costs of € 1,098,878.60.
- Hypothesis N°3 "Calculation of the RE at the provincial and municipal level" → total weight of the wind waste generated equal to 38,404.4 tons, distributed provincially:
 - A Coruña: 9,424.4 tons.
 - Lugo: 19,230.0 tons.
 - Pontevedra: 5,952.0 tons.
 - Ourense: 3,798.0 tons.
- Hypothesis N°4: Location of RE → Management plant Based on the results obtained from the amount of wind waste and its location, it has been calculated using the equation of the center of mass or centroid. the location of a future wind waste treatment and management plant in the Galician community, optimizing its geographical location, in terms of logistics and transport. Following these criteria, it is determined as the best location for a future wind waste management plant, the municipality of Guitiriz, in the province of Lugo.

INDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Enquadramiento	1
1.2	Objeto y alcance.....	1
1.3	Estructura del documento	1
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS & ESTADO DEL ARTE.....	3
2.1	Residuo eólico	3
2.2	Estructura y composición material de las palas eólicas.....	3
2.3	Problemática asociada a este tipo de residuo.....	4
2.4	Modelos de estimaciones y cálculo del residuo	5
2.5	Marco legislativo.....	11
2.6	Tratamientos de reciclaje y recuperación del residuo eólico	12
2.7	Gestión de residuos.....	19
2.8	Opciones de upcycling en la actualidad	20
2.9	Evolución del sector eólico en la Comunidad Gallega.....	24
3	MATERIALES & MÉTODOS.....	27
3.1	La energía eólica en Galicia	27
3.2	Distribución geográfica de la potencia eólica	28
3.3	Modelo matemático	38
3.4	Ecuación del centro de masas o centroide.....	40
3.5	Hipótesis.....	41
4	RESULTADOS & DISCUSIÓN	43
4.1	Hipótesis N°1: “Cálculo del RE en Galicia hasta el 2030”	43
4.2	Hipótesis N°2 “Cálculo del RE en Galicia hasta el 2045”	46
4.3	Hipótesis N°3 “Cálculo del RE a nivel provincial y municipal”.....	48
4.4	Hipótesis N°4: Ubicación de central de gestión de RE.....	53
5	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	62
6	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	64

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Sección transversal genérica de una pala (Fuente: TPI Composites).....	4
Ilustración 2: Modelo de Albers, masa de una pala según el diámetro del rotor. (Fuente: H. Albers, 2009).....	6
Ilustración 3: Esquema de los pasos que sigue el modelo de Liu y Barlow.	7
Ilustración 4: Masa de pala vs. potencia nominal aerogenerador (Fuente: Liu y Barlow, 2015).	7
Ilustración 5: Masa de pala por unidad de potencia nominal para las diferentes clases de tamaños de turbina (Fuente: Liu y Barlow, 2015).	8
Ilustración 6: Masa de pala vs. longitud de pala (Fuente: Liu y Barlow, 2015).....	8
Ilustración 7: Capacidad anual instalada por región. (Fuente: Liu y Barlow, 2017).....	9
Ilustración 8: Uso anual de material para palas eólicas con un algoritmo de crecimiento moderado a partir del año 2014 (Fuente: Liu y Barlow, 2017).....	10
Ilustración 9: Proyección de generación de residuo eólico en el 2050 (Fuente: Liu y Barlow, 2017).....	10
Ilustración 10: Proyección de generación de residuo eólico en el 2050 (Fuente: Liu y Barlow, 2017).....	11
Ilustración 11: Esquema de co-procesamiento del cemento (Fuente: WindEurope, 2020).	14
Ilustración 12: Esquema del proceso de molido mecánico (Fuente: WindEurope, 2020).	14
Ilustración 13: Esquema del proceso de pirólisis (Fuente: WindEurope, 2020).	15
Ilustración 14: Esquema del proceso de fragmentación con pulsaciones de alto voltaje (Fuente: WindEurope, 2020).....	16
Ilustración 15: Esquema del proceso de solvólisis (Fuente: WindEurope, 2020).....	16
Ilustración 16: Esquema del proceso de lecho fluido (Fuente: WindEurope, 2020)... ..	17
Ilustración 18: Ejemplo 1 de mobiliario en interiores (Fuente: https://ecestudents.nl/bladesign-sustainable-furniture/).....	20
Ilustración 19: Ejemplo 2 de mobiliario de interiores (Fuente: https://ecestudents.nl/bladesign-sustainable-furniture/).....	21
Ilustración 20: Ejemplo 3 de mobiliario de interiores (Fuente: https://ecestudents.nl/bladesign-sustainable-furniture/).....	21
Ilustración 21: Ejemplo 4 mobiliario de interiores (Fuente: https://gp-renewables.energy/blades-recycling-2/).....	22
Ilustración 22: Ejemplo aparcamiento bicicletas en Dinamarca (Fuente: https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/grappling-with-blade-recycling-wind-sector-buys-time-with-life-extensions-60567157).	22
Ilustración 23: Parque infantil (Fuente: https://principia-scientific.com/what-happens-to-all-the-old-wind-turbines/).	23
Ilustración 24: Pasarela en Szprotawa, Polonia (Fuente: Anmet).....	23
Ilustración 25: Dinámica de la potencia eólica en funcionamiento en Galicia (MW). (Fuente: BISEEGA).....	24

Ilustración 26: Dinámica de la potencia media por aerogenerador en funcionamiento en el territorio gallego.	25
Ilustración 27: Datos de estimación de la facturación de los parques eólicos en Galicia en euros (Fuente: Elaboración propia a partir del Informe mensual de ventas de energía de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia).....	26
Ilustración 28: Velocidad de viento en Galicia (Fuente: Global Wind Atlas.).....	27
Ilustración 29: Recurso eólico en Galicia (Fuente: Global Wind Atlas).	28
Ilustración 30: Mapa de Galicia por provincias (Fuente: https://www.mapasdeespana.com/).....	29
Ilustración 31: Mapa de Ayuntamientos de la provincia de A Coruña (Fuente: www.mapasdeespana.com).....	32
Ilustración 32: Mapa de Ayuntamientos de la provincia de Lugo. (Fuente: www.mapasdeespana.com).....	34
Ilustración 33: Mapa de Ayuntamientos de la provincia de Pontevedra. (Fuente: www.mapasdeespana.com).....	36
Ilustración 34: Mapa de Ayuntamientos de la provincia de Ourense. (Fuente: www.mapasdeespana.com).....	38
Ilustración 35: Distribución del peso, según el rango de potencia nominal al que pertenecen los aerogeneradores.	40
Ilustración 36: Ubicación de central de gestión de residuo eólico en la provincia de A Coruña (Fuente: GoogleMaps).	55
Ilustración 37: Ubicación de central de gestión de residuo eólico en la provincia de Lugo (Fuente: GoogleMaps).	57
Ilustración 38: Ubicación de central de gestión de residuo eólico en la provincia de Pontevedra (Fuente: GoogleMaps).	58
Ilustración 39: Ubicación de central de gestión de residuo eólico en la provincia de Orense (Fuente: GoogleMaps).	59
Ilustración 40: Centro de masas de residuo eólico en Galicia (Fuente: GoogleMaps).	60
Ilustración 41: Ubicación de central de gestión de residuo eólico en Galicia.	61

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Composición y ruta de eliminación de los principales elementos de un aerogenerador (Fuente: H. Albers, 2009).....	5
Tabla 2: Síntesis de procesos de reciclaje y tratamiento de residuo eólico.	18
Tabla 3: Distribución provincial del número de parques eólicos y de la potencia instalada a marzo de 2019. (Fuente: Instituto Energético de Galicia).....	28
Tabla 4.1: Distribución municipal del número de aerogeneradores en el año 2019.en A Coruña (Fuente: ORDEN del 17 de diciembre de 2018 por la que se regulan los criterios de repartición y se establecen las bases reguladoras y la convocatoria de subvenciones de la línea en concurrencia no competitiva y de la línea en concurrencia competitiva del Fondo de Compensación Ambiental para el año 2019, de forma individual y mediante el sistema de gestión compartida, destinadas a las entidades locales de Galicia).	30
Tabla 5.2: Distribución municipal del número de aerogeneradores en el año 2019.en A Coruña (Fuente: ORDEN del 17 de diciembre de 2018 por la que se regulan los criterios de repartición y se establecen las bases reguladoras y la convocatoria de subvenciones de la línea en concurrencia no competitiva y de la línea en concurrencia competitiva del Fondo de Compensación Ambiental para el año 2019, de forma individual y mediante el sistema de gestión compartida, destinadas a las entidades locales de Galicia).	31
Tabla 6: Distribución municipal del número de aerogeneradores en el año 2019.en Lugo (Fuente: ORDEN del 17 de diciembre de 2018 por la que se regulan los criterios de repartición y se establecen las bases reguladoras y la convocatoria de subvenciones de la línea en concurrencia no competitiva y de la línea en concurrencia competitiva del Fondo de Compensación Ambiental para el año 2019, de forma individual y mediante el sistema de gestión compartida, destinadas a las entidades locales de Galicia).	33
Tabla 7: Distribución municipal del número de aerogeneradores en el año 2019.en Pontevedra (Fuente: ORDEN del 17 de diciembre de 2018 por la que se regulan los criterios de repartición y se establecen las bases reguladoras y la convocatoria de subvenciones de la línea en concurrencia no competitiva y de la línea en concurrencia competitiva del Fondo de Compensación Ambiental para el año 2019, de forma individual y mediante el sistema de gestión compartida, destinadas a las entidades locales de Galicia).	35
Tabla 8: Distribución municipal del número de aerogeneradores en el año 2019.en Orense (Fuente: ORDEN del 17 de diciembre de 2018 por la que se regulan los criterios de repartición y se establecen las bases reguladoras y la convocatoria de subvenciones de la línea en concurrencia no competitiva y de la línea en concurrencia competitiva del Fondo de Compensación Ambiental para el año 2019, de forma individual y mediante el sistema de gestión compartida, destinadas a las entidades locales de Galicia).	37
Tabla 9: Clasificación de los datos de turbinas eólicas que sirven como base de datos para el modelo matemático.....	39
Tabla 10: Histórico potencia acumulada instalada en Galicia.	43
Tabla 11: Potencia instalada por año en Galicia.....	44
Tabla 12: Residuo eólico en tonelada de peso generado hasta el 2030.	45
Tabla 13: Coste de entierro de residuo eólico generado hasta el 2030.	46
Tabla 14: Residuo eólico en tonelada de peso generado hasta el 2045.....	47
Tabla 15: Coste de entierro de residuo eólico generado hasta el 2045.	48
Tabla 16: Potencia media de aerogeneradores y aplicación del modelo a nivel provincial.	49

Tabla 17.1: Residuo eólico en tonelada de peso generado en la provincia de A Coruña hasta el año 2045.	49
Tabla 18.2: Residuo eólico en tonelada de peso generado en la provincia de A Coruña hasta el año 2045.	50
Tabla 19: Residuo eólico en tonelada de peso generado en la provincia de Lugo hasta el año 2045.	51
Tabla 20: Residuo eólico en tonelada de peso generado en la provincia de Pontevedra hasta el año 2045.	52
Tabla 21: Residuo eólico en tonelada de peso generado en la provincia de Orense hasta el año 2045.	53
Tabla 22: Residuo eólico a nivel provincial para el año 2045.	53
Tabla 23.1: Cálculo de las coordenadas del centro de masas del residuo eólico en la provincia de A Coruña.	54
Tabla 24.2: Cálculo de las coordenadas del centro de masas del residuo eólico en la provincia de A Coruña.	55
Tabla 25: Cálculo de las coordenadas del centro de masas del residuo eólico en la provincia de Lugo.	56
Tabla 26: Cálculo de las coordenadas del centro de masas del residuo eólico en la provincia de Pontevedra.	58
Tabla 27: Cálculo de las coordenadas del centro de masas del residuo eólico en la provincia de Orense.	59
Tabla 28: Cálculo de las coordenadas del centro de masas del residuo eólico en Galicia.	60

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Encuadramiento

Nos encontramos en un momento global de cambio a la hora de entender el uso y la producción de energía, este proceso se denomina “transición energética”, motivado en gran medida por las preocupaciones desencadenadas con el cambio climático y por la limitación de recursos fósiles.

Se ha entendido ya, en una sociedad cuya demanda energética no deja de crecer, que es necesario el uso de otras fuentes de energía, denominadas energías verdes o renovables, que explotan recursos naturales que se regeneran sin comprometer las necesidades de generaciones futuras y que además reducen las emisiones de elementos contaminantes y nocivos a la atmósfera.

Una de estas energías renovables es la eólica, obtenida a partir del viento mediante aerogeneradores y en proliferación en todo el planeta desde los años 90. La energía eólica no produce emisiones y es un recurso, en principio, ilimitado; pero no todo son ventajas, existe un problema latente asociado a este tipo de energía: la cantidad de residuo que se genera con los parques eólicos, qué hacer con él y cómo gestionarlo.

El presente documento se ha enfocado en el cálculo y la gestión del futuro residuo que se generará cuando los parques eólicos emplazados en la comunidad gallega lleguen al fin de su vida útil. Este caso es de especial interés por ser un problema de un futuro muy cercano en el caso de España y particularmente, Galicia, que cuenta con gran parte de los aerogeneradores más antiguos del país y que ya está afrontando el problema de repotenciar, en la última década, un elevado número de parques.

La gestión de este residuo tiene dos problemas básicos, la naturaleza material de los mismos, lo que complica su manipulación y sus dimensiones, pudiendo alcanzar hasta los 100 metro de largo, lo que dificulta su transporte; si, además, se añade la falta de legislación específica respecto a cómo tratar este residuo eólico, el problema crece y la solución se antoja más lejana y difícil.

Cabe destacar, que este problema no es a nivel autonómico, ni estatal, es un problema a nivel mundial, que se está intentando afrontar en otros países, aunque aún sin demasiado éxito.

Este trabajo pretende aportar al lector una radiografía del problema y su dimensión, con el fin de concienciar sobre la realidad actual y la necesidad de soluciones.

1.2 Objeto y alcance

La elaboración de este TFM tiene como objetivo abordar el problema medioambiental que supone el residuo eólico, partiendo de una perspectiva global, analizando los diferentes modelos matemáticos y su evolución hasta el día de hoy, así como los diferentes métodos de reciclaje y gestión de este tipo de residuo, para finalmente, acabar estudiando la situación en la Comunidad de Galicia, elaborando un modelo matemático optimizado para calcular el potencial residuo eólico con el que se tendrá que lidiar y plantear una solución logística para la gestión del mismo.

1.3 Estructura del documento

Para cumplir con el objeto de este TFM se dividirá el trabajo en siete capítulos.

El **capítulo 1** es la que se está detallando y consiste en una introducción al tema con el encuadre y la descripción de la situación actual, objeto y alcance del trabajo realizado y estructura del documento correspondiente al presente TFM.

El **capítulo 2**, presenta el Estado del Arte y la fundamentación teórica, con la última información publicada con temas relacionados con el tema del presente trabajo, se realizará un análisis con perspectiva general de la problemática de este tipo de residuo,

procedente de las palas de los aerogeneradores. Se someterá a estudio la estructura y el tipo de materiales que componen las palas y la legislación y soluciones existentes a día de hoy. También se analiza la evolución de la energía eólica en Galicia para tener un marco de la situación actual y un contexto claro del papel que juega la energía eólica en la comunidad.

El **capítulo 3**, presenta los materiales y la metodología que fue utilizada para la elaboración de del trabajo, es decir los datos que se han obtenido y utilizado y la descripción del modelo matemático con el que se calculará el residuo eólico.

El **capítulo 4**, aplicación del modelo matemático para el cálculo del potencial residuo eólico que se generará con los parques eólicos asentados en Galicia. Plantea 3 hipótesis de cálculo y analiza y discute los resultados obtenidos con los datos y el método expuestos en el capítulo 3.

El **capítulo 5**, consiste en evaluar todo el trabajo realizado y los consecuentes resultados y sacar las conclusiones pertinentes y planes de futuro para conseguir los objetivos marcados. Se hará un análisis más específico de la futura gestión del residuo eólico calculado para la Comunidad gallega y la optimización del mismo.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS & ESTADO DEL ARTE

2.1 Residuo eólico

En las últimas dos décadas el desarrollo de parques eólicos para producción de energía eléctrica se ha convertido en una de las fuentes de energía renovable más eficiente. Gracias al apoyo político y legal (e.g. the Renewable Energy Act EEG del año 2000) el desarrollo de la tecnología de la energía eólica se ha incrementado enormemente en los últimos 10 años. En los próximos años la cuestión será dónde se almacenarán las turbinas y los materiales procedentes de parques eólicos que han sido repotenciados o cerrados al llegar al final de su vida útil. En general, hay que remarcar que muy poca gente ha prestado atención a este tema en la última década.

Como los componentes de estas viejas turbinas eólicas normalmente son tratados como residuos, debe resolverse cómo y de qué manera la industria se deshace de este material, intentando utilizarlo en procesos de reciclaje o recuperación energética, o, simplemente lo desecha. (H. Albers, 2009)

La industria eólica se ha convertido en la fuente de energía renovable más prometedora en las últimas dos décadas, con una capacidad instalada que crece desde los 7,600 MW en 1998 hasta los 364,270 MW en 2014 (GWEC, 2015). Se espera que la capacidad instalada continúe creciendo, aunque las ratios puedan variar en las distintas áreas geográficas. El Global Wind Energy Council (GWEC) predijo que el crecimiento global anual superaría el 12% entre el 2013 y el 2018 (GWEC, 2014b). La Asociación Europea de la Energía Eólica (EWEA) predijo que en el 2020 habría 192 GW de capacidad instalada, aportando el 14,9% de la producción de electricidad global en 2020 (EWEA, 2014). La Asociación Internacional de la Energía (IEA) estima que el 15-18% de la electricidad global será de producción eólica en el año 2050 (IEA,2011). A pesar de la disparidad de los datos, todas las predicciones indican que la energía eólica continuará su desarrollo rápidamente durante la próxima década. (Liu and Barlow, 2017)

2.2 Estructura y composición material de las palas eólicas

Las palas de los aerogeneradores están hechas de materiales compuestos, una combinación de materiales que le otorgan diferentes propiedades, como mayor ligereza y longitud, optimizando su aerodinámica para aprovechar el mayor recurso eólico posible con su geometría.

Aunque la composición puede variar dependiendo del fabricante y del tipo de pala, normalmente es la siguiente:

- Refuerzos de fibras de vidrio y carbono, la fibra de vidrio es el material principal en la composición de las palas de los aerogeneradores, la fibra de carbono también se utiliza, aunque en menor medida ya que, aunque tiene mejores características mecánicas, el precio por unidad de volumen es mayor. También existen palas híbridas con una combinación de ambos materiales;
- Una matriz de polímero termoestable como epoxi, poliéster, vinilo, poliuretano o termoplásticos;
- Un núcleo de panel sándwich, madera de balsa o espumas como cloruro de polivinilo (PVC) o tereftalato de polietileno (PET);
- Adhesivos estructurales como epoxis y poliuretano (PUR);
- Revestimiento como poliéster (UPR) y poliuretano (PUR);
- Metales como el cobre, aluminio del cableado, o los pernos de acero.



Ilustración 1: Sección transversal genérica de una pala (Fuente: TPI Composites)

A continuación, se enumeran los componentes de la pala de la **Ilustración 1**, junto con una pequeña descripción de los materiales fundamentales:

- Spar Caps/Girders: Fibra de vidrio o carbono unidireccional combinado con epoxi, poliéster, poliuretano o una matriz de vinilo;
- Shear Webs and Shell Panels: Paneles tipo sándwich multiaxiales de fibra de vidrio laminado con madera de balsa/PVC/PET como núcleo y epoxi, poliéster, poliuretano o vinilo como sistema matriz;
- Leading/Trailing Edge and Webs Bonding: Adhesivo estructural a base de epoxy o poliuretano;
- Lightning Protection Cable: Aluminio o cobre;
- Surface Coating: Barniz a base de poliuretano;
- LEP (Leading Edge Protection): Barniz o cinta protectora a base de poliuretano.

La combinación de fibras y polímeros representan la mayor parte de la composición material de las palas de los eólicos, por ser materiales con poca densidad y peso por unidad de volumen, su resistencia a la fatiga y a la corrosión, su conductividad térmica y eléctrica, su flexibilidad y el relativo bajo coste de producción.

2.3 Problemática asociada a este tipo de residuo

La vida media de una turbina eólica es aproximadamente de 20 a 25 años, aunque las turbinas de nueva generación pueden llegar a alcanzar los 35 años. Una de las opciones para incrementar la vida útil de un parque eólico es la repotenciación, que consiste en sustituir los aerogeneradores por otros nuevos y más eficientes, mejorando así la producción de energía eléctrica.

Tanto el desmantelamiento de parques eólicos que llegan al final de su ciclo, como la repotenciación son fuentes de una generación de residuo de gran volumen.

Hoy en día se puede reciclar del 85% al 90% de la masa total de un aerogenerador, los materiales procedentes de la góndola, la torre y los cimientos son fácilmente reciclables sin que pierdan sus propiedades, el problema es la composición de las palas, normalmente a base de compuestos de fibra de vidrio o de carbono, ambos materiales tienen procesos de reciclaje complejos y poco rentables, por tanto, la opción más viable es la de la reutilización de estas piezas.

Tabla 1: Composición y ruta de eliminación de los principales elementos de un aerogenerador (Fuente: H. Albers, 2009).

Componente	Material	Ruta de eliminación
Cimentación	Cemento/acero	Reciclaje en materiales de construcción
Torre	Acero cubierto de pintura	Chatarra para industria del acero
Sistema de transmisión	Hierro fundido/acero/lubricante	Reciclado y reprocesado del material
Generador	Hierro fundido, cobre, electrónica	Reciclado y reprocesado del material
Componentes electrónicos	Cableado, cuadros de conexiones	Reciclado material y energético
Nacelle, palas del rotor	Compuestos de fibra, núcleo de panel de sándwich, metales	Reciclaje del metal e incineración, (Entierro y vertedero)

2.4 Modelos de estimaciones y cálculo del residuo

Algunos estudios se han basado en algunos aspectos de la ecología de la energía eólica. En cuanto al volumen de residuo procedente de las palas, se estima que habrá 260,000 toneladas de material utilizado para la fabricación de palas para turbinas de aerogeneradores en el 2008 y que este número se incrementará hasta 1.18 millones de toneladas en 2017 (Red, 2006). El modelo de Albers predice que habrá cerca de 50,000 toneladas de residuo eólico en 2020 y que ese número llegará a exceder las 200,000 toneladas en el 2034 (Albers, 2009). Andersen adopta la teoría de Albers y predice que la cantidad de residuo eólico que se tendrá que reciclar anualmente es de 400,000 toneladas entre el 2029 y el 2033. Se incrementará hasta las 800,000 toneladas anuales en el año 2050 (Andersen et al., 2014). Parece claro que habrá un número significativo de residuo procedente de las palas de los aerogeneradores que se tendrán que gestionar en las próximas dos décadas. Se debe mencionar el hecho de que la industria de la energía eólica se ha desarrollado rápidamente en los últimos años (Sieros y Chaviaropoulos, 2012; Siemens AG, 2014), cosa que no se ha tenido en cuenta en los estudios mencionados anteriormente. El modelo de Liu y Barlow intenta abordar el tema desde una perspectiva más actualizada, teniendo en cuenta el tamaño actual de las palas y factores que afectan al ciclo de vida de los aerogeneradores (Liu y Barlow, 2015).

De toda la información recopilada para la elaboración de este trabajo, destacan dos autores y sus modelos matemáticos para estimar el cálculo del residuo eólico.

El primero pertenece al autor (H. Albers, 2009), que calcula el potencial residuo eólico en Alemania con un modelo estadístico que utiliza como datos las proporciones típicas de material por componentes de las palas de las turbinas eólicas y la esperanza de vida útil de estas turbinas, combinando estos datos con el número de turbinas instaladas (clasificadas por tipología), potencia nominal y año de puesta en marcha (DEWI 2008/ISET 2008), proporcionan como resultado la cantidad anual esperada de residuos.

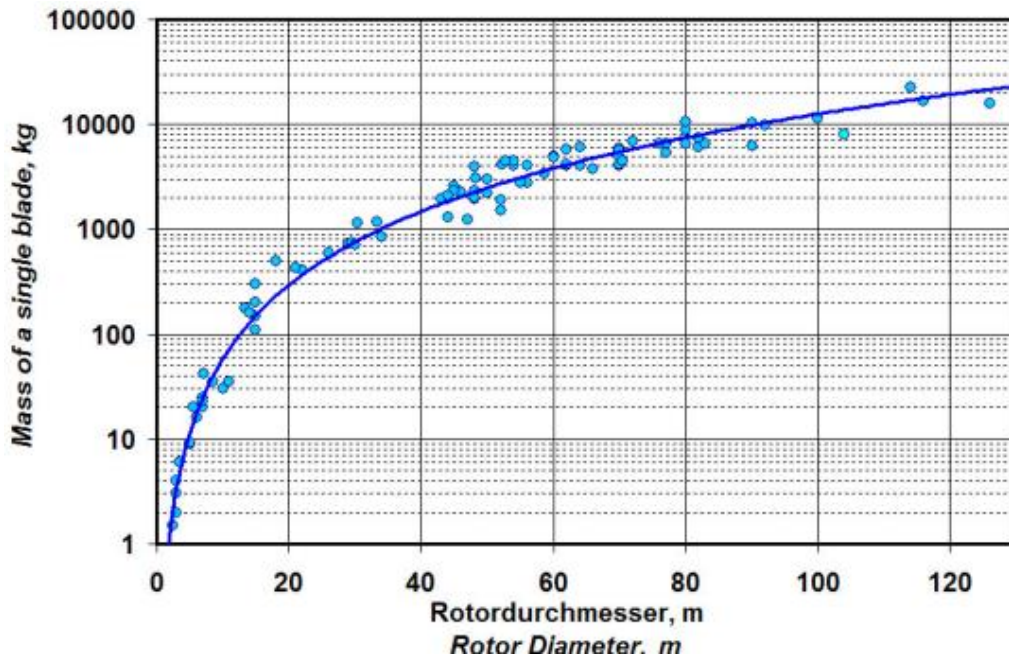


Ilustración 2: Modelo de Albers, masa de una pala según el diámetro del rotor. (Fuente: H. Albers, 2009).

El diámetro del rotor está directamente relacionado con la potencia nominal de las turbinas, la **Ilustración 2**, muestra la evaluación estadística de la masa de palas de rotor producidas en serie frente al diámetro del rotor. Para la mayoría de las palas de rotor comerciales, las proporciones de los diferentes componentes serían similares, por lo que se podrían estimar a partir de esta relación.

Grosso modo, se podría atribuir, según este modelo, 10 kg de residuo eólico por cada 1 kW de potencia instalada, o lo que es lo mismo 10 t/MW, para una turbina de tamaño medio.

El segundo modelo es el de Liu y Barlow en 2017, que estima la cantidad de material global con un método estadístico e información de varias fuentes para calcular la cantidad de material de pala requerido por unidad de potencia, cuantificando, además, la evolución de las turbinas en cuestión de diseño y especialmente, tamaño.

Normalmente la cantidad de material requerido está relacionado con la potencia nominal y a mayor potencia nominal, mayor longitud de pala, está relación no es directamente proporcional. La información obtenida se obtiene de especificaciones técnicas de 56 modelos producidos por 14 fabricantes distintos y divididos en 5 clases, en cada clase, la masa de la pala está sumada y dividida por el total de las turbinas con la misma potencia nominal, para obtener la media de material de pala por unidad de potencia (toneladas/MW). El tamaño de la central de generación eólica es estimado a partir de datos de asociaciones eólicas junto a predicciones sobre la industria eólica. Para cada año y región se usa la potencia media instalada para emparejarlo con la cantidad de material de pala por unidad de capacidad instalada (t/MW), posteriormente se una está unidad multiplicada por la capacidad instalada (MW) para obtener el total de material de pala utilizado en una determinada región durante este determinado período. Este material de pala se convertirá en residuo eólico cuando sea desmantelado. Finalmente se hace la suma de todo el residuo generado en cada región anualmente para poder estimar el residuo eólico total entre 2018-2050 (Liu y Barlow, 2015).

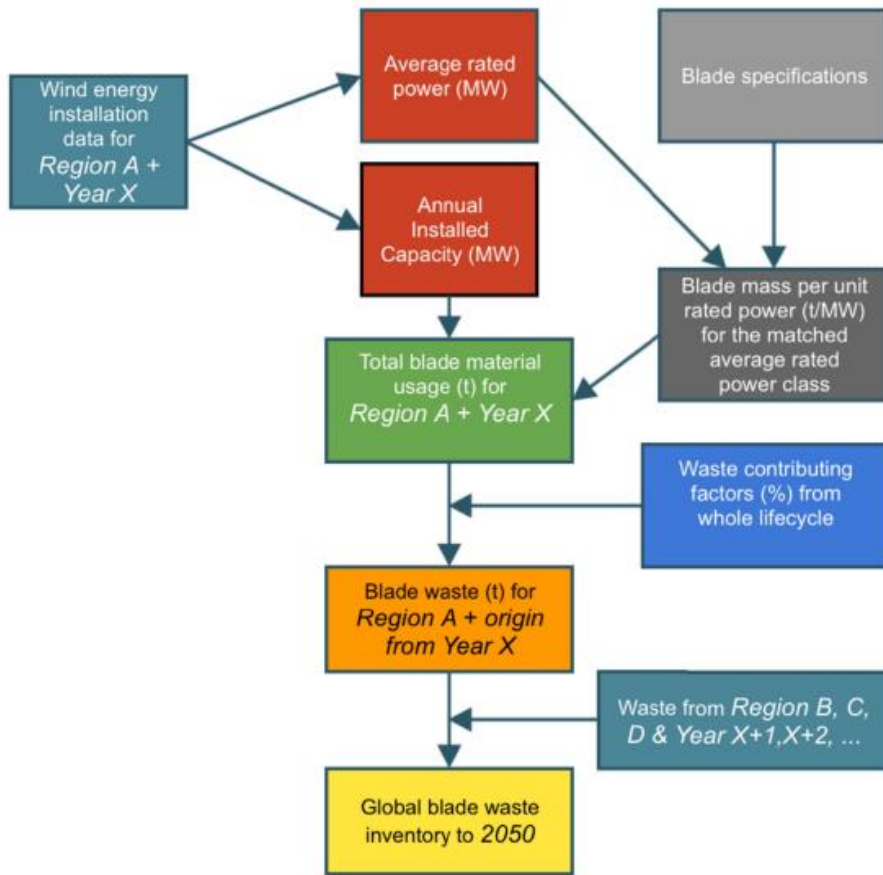


Ilustración 3: Esquema de los pasos que sigue el modelo de Liu y Barlow.

Se consiguió información de 56 turbinas eólicas con rangos de potencia de entre 500 kW y 8MW de productores de Estados Unidos, Asia y Europa y se clasifican en diferentes clases de tamaños: menos de 1 MW, 1-1.5 MW, 1.5-2MW, 2-5 MW y más de 5 MW.

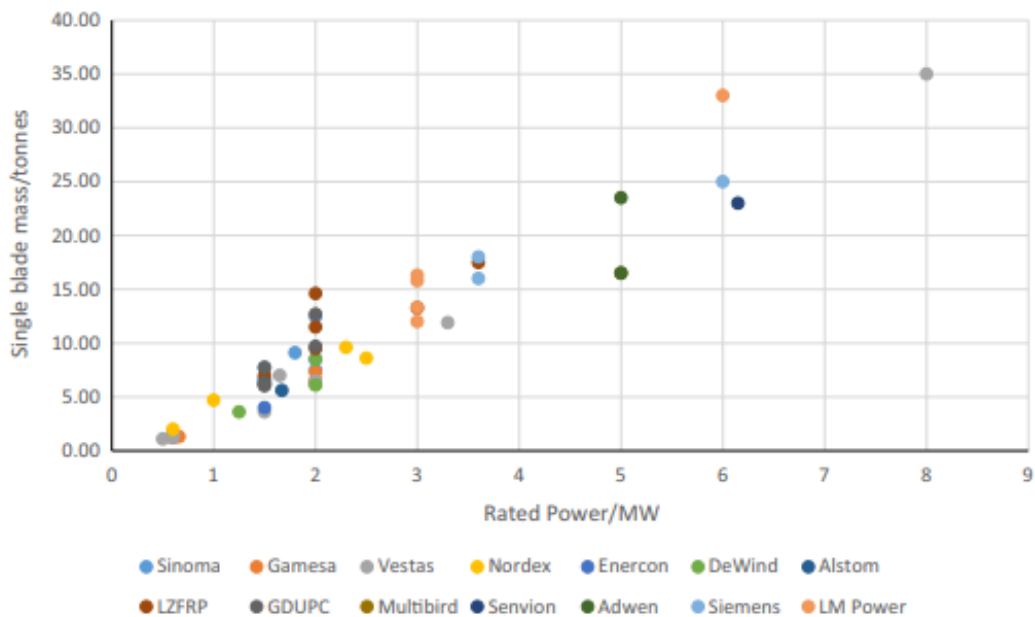


Ilustración 4: Masa de pala vs. potencia nominal aerogenerador (Fuente: Liu y Barlow, 2015).

Se necesita un valor medio de masa de pala por unidad de potencia para el siguiente paso y éste se calcula para cada clase de tamaño de turbina, en los rangos en los que se ha dividido anteriormente. Para cada clase de turbina, las masas de las palas se suman y se dividen por el total de la potencia nominal para obtener la masa de pala por unidad de potencia nominal (toneladas/MW).

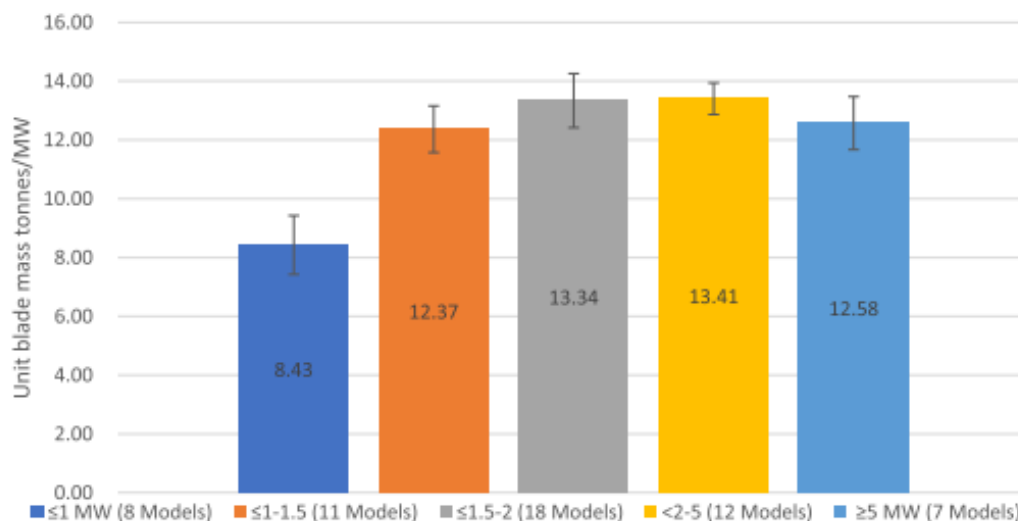


Ilustración 5: Masa de pala por unidad de potencia nominal para las diferentes clases de tamaños de turbina (Fuente: Liu y Barlow, 2015).

La masa por unidad de potencia es menor cuanto menor es la turbina, por tanto, a masa de pala crece con el tamaño de la pala, pero a una escala menor que la que se predijo en otros modelos, debido a las mejoras tecnológicas.

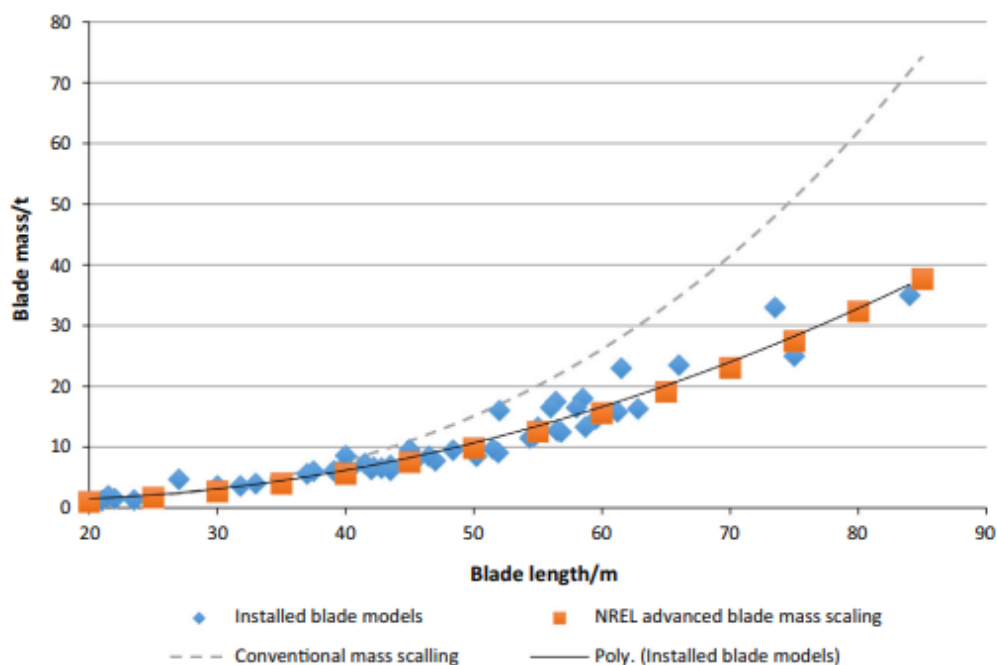


Ilustración 6: Masa de pala vs. longitud de pala (Fuente: Liu y Barlow, 2015).

Los resultados de masa de pala por unidad de potencia (8-13.4 t/MW) son similares a los del modelo de Albers (10 t/MW), pero más precisos.

Con estos resultados se estima la cantidad total de material para cada región y período temporal específico. Cada región tiene estrategias diferentes de desarrollo de tecnología

de generación eólica que afecta a la potencia media por unidad de turbina instalada cada año. Se seleccionan cuatro regiones principales, Estados Unidos, Asia, Europa y el resto del mundo y un histórico de datos de potencia instalada desde 1998 hasta 2015 (últimos datos anuales disponibles), procedentes de la American Wind Energy Association (AWEA), la Chinese Wind Energy Association (CWEA), la European Wind Energy Association (EWEA) y la Global Wind Energy Council (GWEC) (Anthony, 2014; GWEC, 2014a; EWEA, 2013; CWEA, 2014). La industria eólica comenzó en Europa donde más del 50% de las turbinas fueron instaladas entre 1998 y el 2006 y se ha estancado desde entonces. La potencia media de las turbinas instaladas ronda el MW en 2000, 1.5 MW en 2006 y 2 MW en 2010 (Vitina et al., 2015; IRENA, 2012; Woebbeking, 2012).

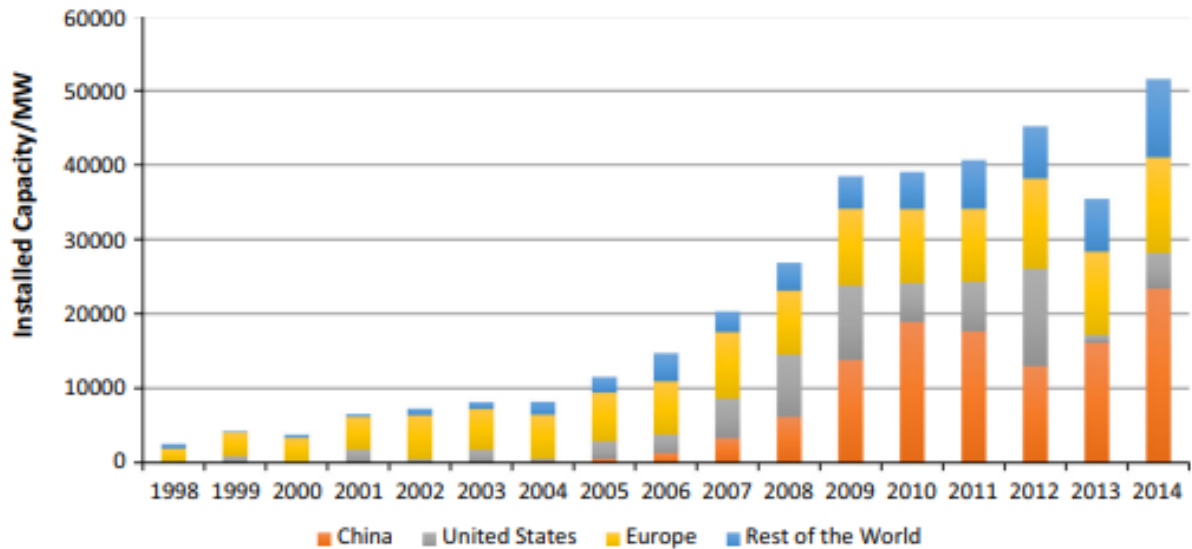


Ilustración 7: Capacidad anual instalada por región. (Fuente: Liu y Barlow, 2017).

La predicción de la cantidad es necesaria para determinar la proyección de los futuros años, mediante un algoritmo de crecimiento que utiliza como base la media de la capacidad instalada los últimos tres años. Se definen tres escenarios de crecimiento “Base”, “Moderado” y “Avanzado”, para calcular la futura capacidad instalada. Posteriormente, se usa la capacidad anual instalada (MW) y se multiplica por el material de para requerido por unidad de potencia (t/MW) y se obtiene la cantidad total de material de pala requerido cada año.

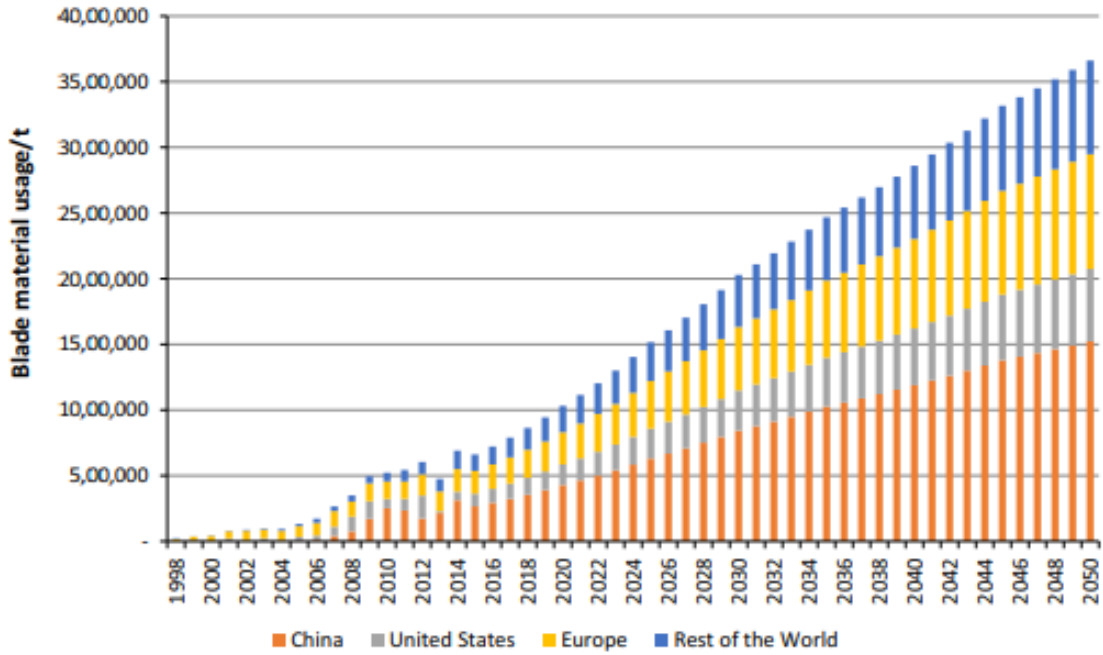


Ilustración 8: Uso anual de material para palas eólicas con un algoritmo de crecimiento moderado a partir del año 2014 (Fuente: Liu y Barlow, 2017).

Además, este modelo tiene en cuenta otros factores además de la producción para calcular el residuo, como son las operaciones de mantenimiento y posible repotenciación.

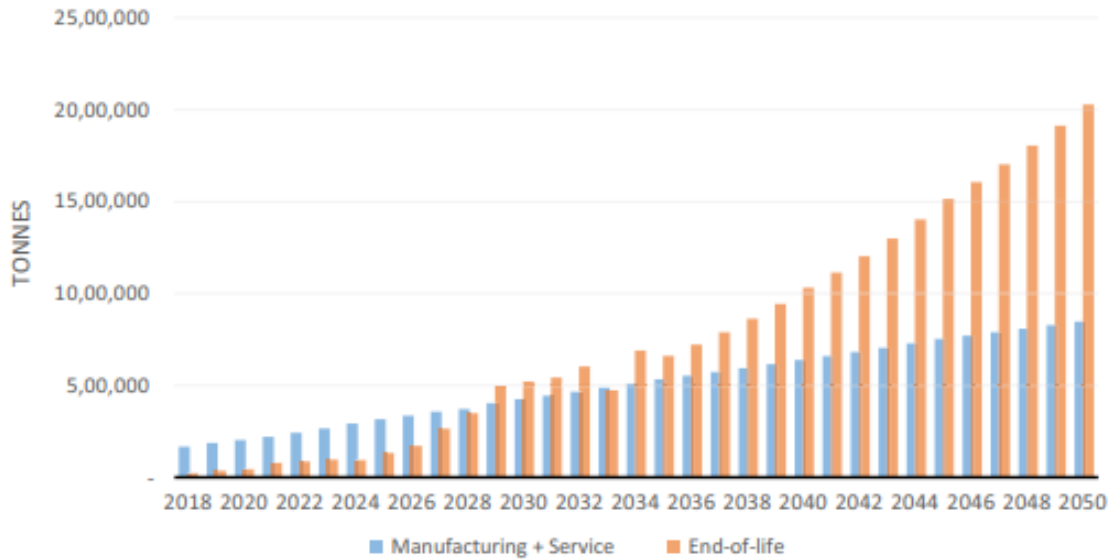


Ilustración 9: Proyección de generación de residuo eólico en el 2050 (Fuente: Liu y Barlow, 2017).

Aplicando un escenario con características intermedias en estas variables, el resultado es el siguiente:

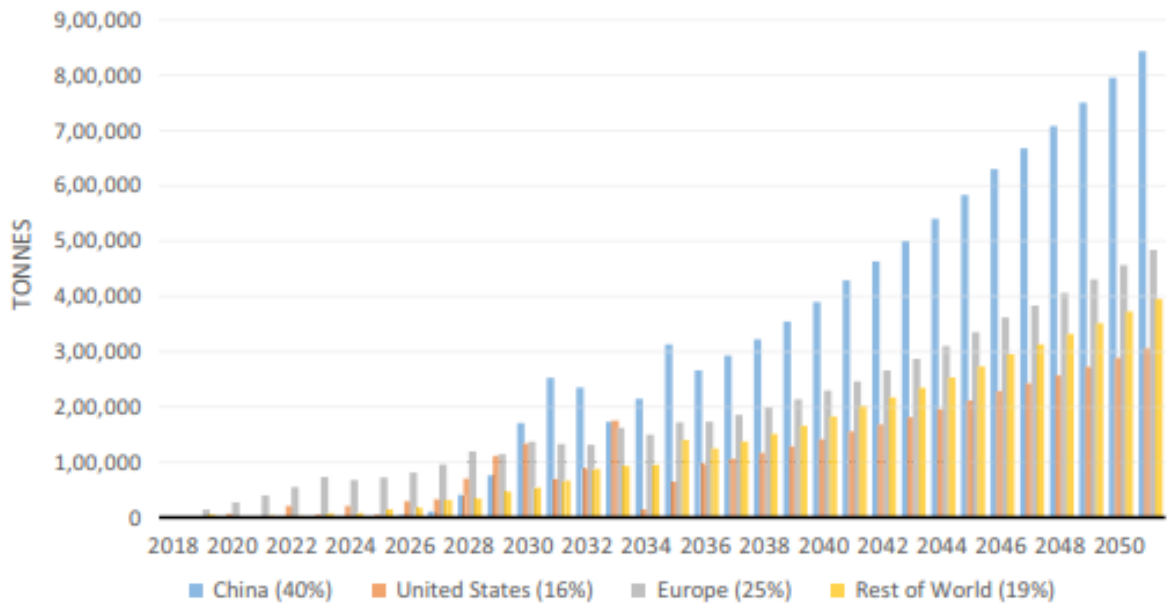


Ilustración 10: Proyección de generación de residuo eólico en el 2050 (Fuente: Liu y Barlow, 2017).

El residuo eólico generado en la producción y servicio a lo largo de la vida útil de la turbina representa entre el 16% y el 45% de la masa total.

Este modelo, pese a ser bastante completo porque analiza múltiples variables y escenarios, tiene la desventaja de que utiliza muchas suposiciones y estimaciones, por lo que los resultados pierden rigurosidad.

2.5 Marco legislativo

A día de hoy, la legislación a nivel europeo y nacional para la regulación de la gestión de residuos procedentes de los parques eólicos es muy limitada. El mercado de la energía eólica se ha desarrollado en los diferentes países de manera progresiva, por lo tanto, el desmantelamiento y repotenciación de los parques sólo se ha producido en los países pioneros en aplicar este tipo de tecnología.

Generalmente, las autoridades de cada país utilizan diferentes instrumentos regulatorios para incentivar el reciclaje. Estos instrumentos son la imposición legal de objetivos de reciclaje, prohibición del uso de vertederos, o el pago de impuestos por el uso de los mismos, y la responsabilidad ampliada del productor desde el inicio hasta el fin de su vida útil incluyendo el desmantelamiento del mismo, intentando fomentar la economía circular.

De ahora en adelante, lo lógico sería armonizar las directrices de las legislaciones existentes a nivel nacional para que la gestión del residuo sea más eficiente a nivel europeo y favorecer la creación de un mercado de gestión de residuos procedente de las palas de los eólicos, en conjunto con otros residuos procedentes de esta industria, o de otras similares, de la misma manera que se ha hecho, por ejemplo, con el mercado europeo del CO2.

Actualmente se está trabajando en esta dirección por parte de las industrias de producción de energía eólica, para establecer los principios de una guía común para el desmantelamiento y decomisionado de los aerogeneradores.

En España no existe legislación específica sobre la gestión del residuo eólico, simplemente, a la hora de realizar el proyecto, es obligatorio la presentación de un

estudio medioambiental que incluya un plan de desmantelamiento del mismo, que en la mayoría de los casos es el entierro de los aerogeneradores, o el envío a vertedero.

En otros países de la unión europea como Alemania y Holanda, existen ya prohibiciones en torno al entierro de residuo eólico y en países como Francia se exige la responsabilidad del productor en el ciclo de vida del producto, incentivando la economía circular.

2.5.1 Clasificación del residuo

De acuerdo con la clasificación europea de residuos, el residuo compuesto procedente de los aerogeneradores se clasifica como “*residuo plástico procedente de demolición o construcción*” con el código 17 02 03, aunque es común que dependiendo del país se utilicen otros códigos similares.

2.6 Tratamientos de reciclaje y recuperación del residuo eólico

El reciclaje significa la transformación de las palas en un nuevo producto o material, con la misma o diferente función. El reciclaje requiere energía y recursos, con el objetivo de convertir el residuo eólico en otra cosa. La recuperación o revalorización consiste en convertir el residuo en un combustible o energía térmica, habiendo retirado previamente los componentes del residuo que se pudieran reutilizar. Son las dos opciones más utilizadas hoy en día para el tratamiento de residuos eólicos, aunque ambas son perjudiciales desde el punto de vista medioambiental.

A la hora de hablar de las diferentes tecnologías hay que tener en cuenta su madurez, ya que la mayoría son procesos experimentales y no están disponibles, todavía, a escala industrial. Este nivel de madurez se determina por medio del TRL (technological readiness levels), por sus siglas en inglés. Como se considera fundamental para la comprensión de este trabajo el concepto de TRL, se procederá a citar una publicación del autor D.Briveiro del 2018 que lo explica con gran precisión:

“Los TRL (Technology Readiness Levels) o, lo que es lo mismo, los niveles de madurez de la tecnología son determinadas categorías que indican el grado de novedad y/o acercamiento al mercado de un proyecto de I+D. Estos niveles se han introducido con el programa H2020 y su uso se ha ido extendiendo aguas abajo hacia las convocatorias estatales y regionales, aunque no se trata de algo especialmente novedoso, ya que fue la NASA quien lo introdujo inicialmente para identificar el grado de madurez de un proyecto concreto.

Constan de 9 rangos, de mayor a menor incertidumbre tecnológica (y como consecuencia, de menor a mayor proximidad a mercado), que se desglosan a continuación:

- *TRL 0 «Idea». Se trata de ideas no probadas previamente, o conceptos de los que no se han realizado ensayos o análisis revisados por pares.*
- *TRL 1 «Investigación básica». La investigación científica inicial se ha culminado, donde los principios fundamentales de la idea han podido ser postulados y observados. Se han podido identificar los esquemas del proceso. No hay pruebas experimentales y los análisis detallados están todavía disponibles.*
- *TRL 2 «Formulación de la tecnología» o «Concepto Tecnológico». El concepto de la tecnología, su aplicación y su puesta en práctica han sido formulados. Se perfila el plan de desarrollo. Se realizan estudios y pequeños experimentos que proporcionan una “prueba de concepto” para los conceptos de la tecnología.*
- *TRL 3 «Investigación aplicada» o «Prueba de Concepto». Se completan los primeros ensayos de laboratorio. El concepto y los procesos han sido demostrados a escala de laboratorio o experimentos de mesa. El potencial de los materiales y cuestiones de ampliación de escala han sido identificados.*

- TRL 4 «Unidad de desarrollo de prototipo a pequeña escala» o «Validación en laboratorio». Los componentes de la tecnología han sido identificados. Una unidad de desarrollo de prototipo ha sido construida en laboratorio y en entorno controlado. Las operaciones han proporcionado datos para identificar el potencial de ampliación y cuestiones operativas. Las medidas validan las predicciones analíticas de los distintos elementos de la tecnología. La simulación de los procesos ha sido validada. Se han desarrollado evaluaciones del ciclo de vida preliminares y modelos de evaluación económica.
- TRL 5 «Unidad de desarrollo de prototipo a gran escala» o «Validación en entorno relevante». La tecnología se ha calificado a través de pruebas en el entorno previsto, simulada o real. El nuevo desarrollo está listo para su primer uso. Se refina el modelado de los procesos (técnica y económicamente). Se han validado evaluaciones del ciclo de vida y modelos de evaluación económica. Cuando sea relevante para su posterior ampliación, se han identificado los siguientes conceptos: Salud y seguridad, limitaciones ambientales, regulación y disponibilidad de recursos.
- TRL 6 «Sistema prototipo» o «Demostración en entorno relevante». Los componentes y los procesos se han ampliado para demostrar el potencial industrial y su integración en el sistema energético. La solución se ha modificado y ampliado. La mayoría de los problemas identificados anteriormente se han resuelto. Se ha identificado y modelado el sistema a escala comercial completa. La evaluación del ciclo de vida y la evaluación económica se han perfeccionado.
- TRL 7 «Sistema de demostración» o «Demostración en entorno operacional (real)». Se ha demostrado que la tecnología funciona y opera a escala precomercial. Se han identificado las cuestiones de fabricación y operacionales finales. Se han resuelto cuestiones tecnológicas menores. La evaluación del ciclo de vida y la evaluación económica se han perfeccionado.
- TRL 8 «Primer sistema de tipo comercial» o «Sistema completo y certificado». Se ha demostrado que la tecnología funciona a nivel comercial a través de una aplicación a gran escala. Todas las cuestiones operacionales y de fabricación han sido resueltas.
- TRL 9 «Aplicación comercial completa» o «Despliegue». La tecnología ha sido completamente desarrollada y está disponible comercialmente para cualquier consumidor.

Estos diferentes niveles los podemos agrupar de tal manera que respondan a la clasificación tradicional de I+D+i reflejada, por ejemplo, en el Manual de Frascati y en el de Oslo. Así podríamos decir:

- TRL 1 – TRL 4: Investigación. En estos niveles se realizan trabajos desde la investigación tecnológica más básica hasta llegar a una primera prueba de concepto.
- TRL 5 – TRL 6: Desarrollo. Se llevan a cabo los proyectos que finalizan con un primer prototipo o demostrador no comercializable.
- TRL 7 – TRL 9: Innovación. En este último estadio se realizan todas las pruebas y ensayos necesarios hasta lograr la introducción de un nuevo producto o servicio en el mercado. Finalizada esta fase se podrá realizar el despliegue o implantación a gran escala del producto o servicio en el mercado.”

(D.Briveiro, 2018)

A continuación, se describirán brevemente las diferentes opciones de tratamiento de reciclaje y recuperación de residuo eólico recogidas en el informe WindEurope del año 2020.

2.6.1 Co-procesamiento del cemento (TRL=9)

Es la alternativa más utilizada y evolucionada para el reciclaje del residuo eólico. La fibra de vidrio se recicla como un componente del clinker del cemento y la matriz de polímero plástico se quema como combustible en el proceso, lo que reduce la huella de carbono de producción de cemento (WindEurope, 2020).



Ilustración 11: Esquema de co-procesamiento del cemento (Fuente: WindEurope, 2020).

Ventajas:

- Es un proceso eficiente, rápido y escalable.
- Puede procesar grandes cantidades de residuo.
- Reduce las emisiones de CO₂ de producción de cemento hasta en un 16%.
- No produce cenizas ni residuos.

Desventajas:

- Pérdida de la estructura física original de la fibra de vidrio
- Emisión de partículas contaminantes y polución.
- Sólo válida para residuos de fibra de vidrio reforzada.

2.6.2 Molido mecánico (TRL entre 6 y 9)

El molido mecánico es una tecnología comúnmente utilizada por su efectividad, bajo coste y requerimiento energético, sin embargo, el valor del producto reciclado disminuye considerablemente. El resultado son fibras cortas de vidrio y polvo procedente de la matriz, que se puede utilizar como refuerzos o relleno, pero de manera muy limitada (proporciones no superiores al 10%) ya que sus propiedades mecánicas se ven muy deterioradas por el proceso de reciclaje. Se suele utilizar este método como última opción (WindEurope, 2020).

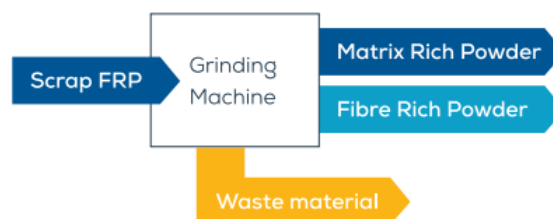


Ilustración 12: Esquema del proceso de molido mecánico (Fuente: WindEurope, 2020).

Ventajas:

- Eficiencia y bajo coste.

Desventajas:

- Aún no puede competir con los materiales originales.
- No hay desarrolladas aplicaciones a gran escala

- Se generan hasta un 40% de residuos durante el proceso de molido y tamizado.
- Las emisiones de polvo resultantes son peligrosas y contaminantes.

2.6.3 Pirólisis (TRL entre 4 y 9)

La pirólisis es un proceso térmico de reciclaje que permite la recuperación de la fibra en forma de ceniza y de la matriz de polímero en forma de hidrocarburos. Es la tecnología a escala industrial con menor pérdida de valor respecto al producto inicial, pero tiene un coste elevado y requiere grandes inversiones iniciales, haciendo que sólo sea viable con materiales compuestos por fibra de carbono. Como resultado de este proceso se obtienen polvos e hidrocarburos procedente de la matriz, que se puede utilizar como fillers o aditivos, aunque debido a las altas temperaturas las fibras superficiales se ven afectadas y sus propiedades mecánicas disminuyen (WindEurope, 2020).

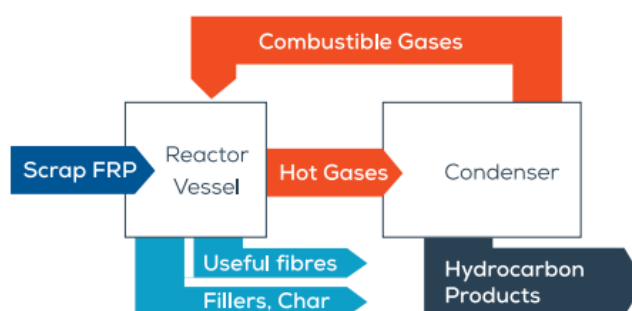


Ilustración 13: Esquema del proceso de pirólisis (Fuente: WindEurope, 2020).

Ventajas:

- Los productos resultantes (syngas y otros derivados de hidrocarburos) se pueden utilizar como fuentes de energía.
- Fácil de trasladar el proceso a cualquier escala.
- Actualmente ya está en uso a escala comercial para residuos de fibra de carbono.

Desventajas:

- Pérdida de resistencia de las fibras debido a la alta temperatura del proceso.
- El producto derivado de la fibra puede tener restos de oxidación y carbonilla.
- Disminución de calidad de producto respecto al original, aun siendo la mejor tecnología en este aspecto.
- Elevados costes.

2.6.4 Fragmentación con pulsaciones de alto voltaje (TRL=6)

Es un proceso electromecánico que separa los componentes de la matriz, de las fibras, mediante corrientes eléctricas. Sólo pequeñas fibras se pueden recuperar mediante este proceso y para obtener fibras de calidad hacen falta grandes cantidades de energía. Es un proceso más limpio y menos destructivo que el molido mecánico (WindEurope, 2020).

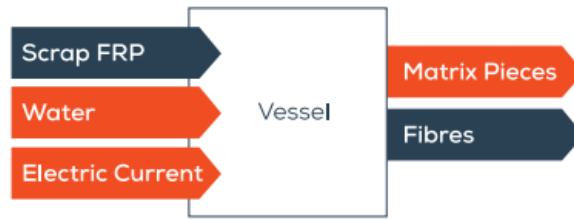


Ilustración 14: Esquema del proceso de fragmentación con pulsaciones de alto voltaje (Fuente: WindEurope, 2020).

Ventajas:

- Potencialmente escalable para el tratamiento de grandes cantidades de residuo.
- Alto potencial de mejora tecnológica con poca inversión.

Desventajas:

- Disponible sólo a nivel prototipo.
- La calidad de la fibra de vidrio es menor que el original.
- Requiere instalaciones de gran tamaño.

2.6.5 Solvólisis (TRL entre 5 y 6)

La solvólisis es un tratamiento químico donde los disolventes (agua, alcohol y/o ácido) se utilizan para romper las uniones de la matriz a una determinada temperatura y presión. La solvólisis ofrece un gran abanico de posibilidades dependiendo del tipo de disolvente, temperatura y presión utilizado. En comparación con las tecnologías de tipo térmico, se requieren menores temperaturas, con lo cual, las fibras se degradarán mucho menos y conservarán mejor sus propiedades mecánicas y, además, ofrece la posibilidad de recuperar también la resina. Aunque parece una tecnología prometedora, por el bajo impacto del proceso en las fibras, a día de hoy, todavía está poco desarrollada y sólo se han podido reciclar fibras de carbono (WindEurope, 2020).

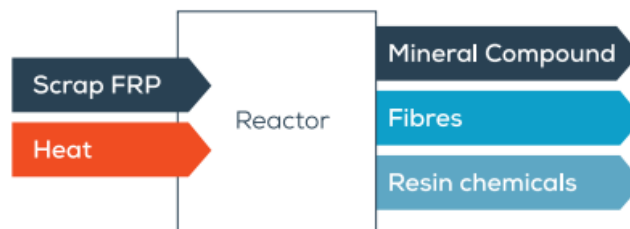


Ilustración 15: Esquema del proceso de solvólisis (Fuente: WindEurope, 2020).

Ventajas:

- Recuperación limpia de las fibras con su longitud completa.
- Producción de resina química que puede ser reutilizada.
- Uso de disolventes de poco riesgo como el alcohol, glicoles y agua supercrítica.

Desventajas:

- Alto consumo energético de los procesos de alta temperatura y de alta presión.
- Uso de grandes cantidades de disolventes, aunque éstos pueden ser reutilizados durante el proceso.
- Deterioro de los materiales resultantes respecto a los originales.

- Sólo se ha podido aplicar a fibras de carbono.

2.6.6 Lecho fluido (TRL entre 5 y 6)

La única característica de este proceso es que puede tratar mezclas de materiales y puede ser de utilidad para tratamientos de final de ciclo de vida de los residuos (WindEurope, 2020).

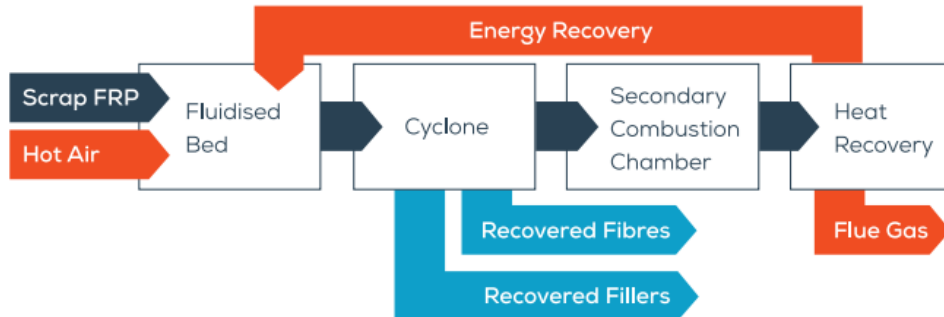


Ilustración 16: Esquema del proceso de lecho fluido (Fuente: WindEurope, 2020).

Ventajas:

- Más tolerante con la contaminación.
- Recuperación energética en el proceso.
- Alta eficiencia de transmisión del calor.

Desventajas:

- Mayor degradación de las fibras que en otros procesos
- Aún está en proceso de desarrollo a gran escala.
- Proceso de altas emisiones.

2.6.7 Resumen de procesos de reciclaje y tratamiento de residuo eólico

A continuación, se sintetiza toda la información de los puntos anteriores sobre procesos de tratamiento y reciclaje de residuos procedente de centrales eólicas, ordenando los procesos según su TRL y comparando las ventajas y desventajas de los mismos.

Tabla 2: Síntesis de procesos de reciclaje y tratamiento de residuo eólico.

Proceso	TRL	Ventajas	Desventajas
Co-procesamiento del cemento	9	<ul style="list-style-type: none"> • Es un proceso eficiente, rápido y escalable. • Puede procesar grandes cantidades de residuo. • Reduce las emisiones de CO2 de producción de cemento hasta en un 16%. • No produce cenizas ni residuos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de la estructura física original de la fibra de vidrio • Emisión de partículas contaminantes y polución. • Sólo válida para residuos de fibra de vidrio reforzada.
Molido mecánico	6 a 9	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia y bajo coste. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aún no puede competir con los materiales originales. • No hay desarrolladas aplicaciones a gran escala • Se generan hasta un 40% de residuos durante el proceso de molido y tamizado. • Las emisiones de polvo resultantes son peligrosas y contaminantes.
Pirólisis	4 a 9	<ul style="list-style-type: none"> • Los productos resultantes (syngas y otros derivados de hidrocarburos) se pueden utilizar como fuentes de energía. • Fácil de trasladar el proceso a cualquier escala. • Actualmente ya está en uso a escala comercial para residuos de fibra de carbono. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de resistencia de las fibras debido a la alta temperatura del proceso. • El producto derivado de la fibra puede tener restos de oxidación y carbonilla
Fragmentación con pulsaciones de alto voltaje	6	<ul style="list-style-type: none"> • Potencialmente escalable para el tratamiento de grandes cantidades de residuo. • Alto potencial de mejora tecnológica con poca inversión 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponible sólo a nivel prototipo. • La calidad de la fibra de vidrio es menor que el original. • Requiere instalaciones de gran tamaño
Solvólisis	5 a 6	<ul style="list-style-type: none"> • Recuperación limpia de las fibras con su longitud completa. • Producción de resina química que puede ser reutilizada. • Uso de disolventes de poco riesgo como el alcohol, glicoles y agua supercrítica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto consumo energético de los procesos de alta temperatura y de alta presión. • Uso de grandes cantidades de disolventes, aunque éstos pueden ser reutilizados durante el proceso. • Deterioro de los materiales resultantes respecto a los originales. • Sólo se ha podido aplicar a fibras de carbono.
Lecho fluido	5 a 6	<ul style="list-style-type: none"> • Más tolerante con la contaminación. • Recuperación energética en el proceso. • Alta eficiencia de transmisión del calor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor degradación de las fibras que en otros procesos • Aún está en proceso de desarrollo a gran escala. • Proceso de altas emisiones.

2.7 Gestión de residuos

La directiva europea (2008/98/EC) define los conceptos básicos para la gestión de residuos y enfatiza la necesidad de incrementar los procesos de reutilización y reciclaje y el excesivo uso de terreno para vertedero y entierro de residuos.

Además, establece una jerarquía de tratamiento de residuos de más a menos favorable:

1. Prevención
2. Reutilización
3. Reubicación
4. Reciclaje
5. Recuperación
6. Deshecho

La **prevención** consiste en centrar esfuerzos en el diseño, con vistas a minimizar el material utilizado en la pala, para que se genere el menor residuo posible, y en incrementar la vida útil de la pala lo máximo posible, mediante ensayos y certificaciones.

La **reutilización** de palas debería extenderse en el tiempo lo máximo posible, para ello es necesario cumplir con las revisiones y reparaciones rutinarias. Hay casos en los que la vida útil de las palas puede ampliarse, mediante reparaciones y refuerzos en determinadas zonas de la misma, la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) está desarrollando un proceso de análisis estandarizado para la prolongación de la vida útil de los aerogeneradores (IEC TS 61400-28).

La **reubicación** significa reutilizar una de las partes existentes para una aplicación diferente de la original, normalmente de menor exigencia. Hay varios ejemplos de reubicación de las palas de los aerogeneradores en la actualidad, pero se tratará este tema con mayor profundidad en el siguiente punto del presente documento.

El **reciclaje** y la **recuperación** son los siguientes puntos en la jerarquía del tratamiento de residuos. En el apartado 2.3 del presente documento se describen ambos conceptos y se analizan las diferentes tecnologías.

Por último, tenemos el **deshecho** del residuo, es la opción más desfavorable y consiste en el entierro de los residuos o a su traslado a un vertedero al descubierto, o en su incineración sin ningún tipo de recuperación energética.



Ilustración 18: Vertedero de palas eólicas en Wyoming (Fuente: Bloomberg Green, Autor: Benjamín Rasmussen).

2.8 Opciones de upcycling en la actualidad

El upcycling es la reutilización creativa, el aprovechamiento de residuos para la fabricación de nuevos productos incrementando el valor ecológico y económico. Se corresponde con la reubicación de la jerarquía de gestión de residuos, pero con un valor cualitativo añadido.

- **Mobiliario de interiores**



Ilustración 17: Ejemplo 1 de mobiliario en interiores (Fuente: <https://ecestudents.nl/bladesign-sustainable-furniture/>).

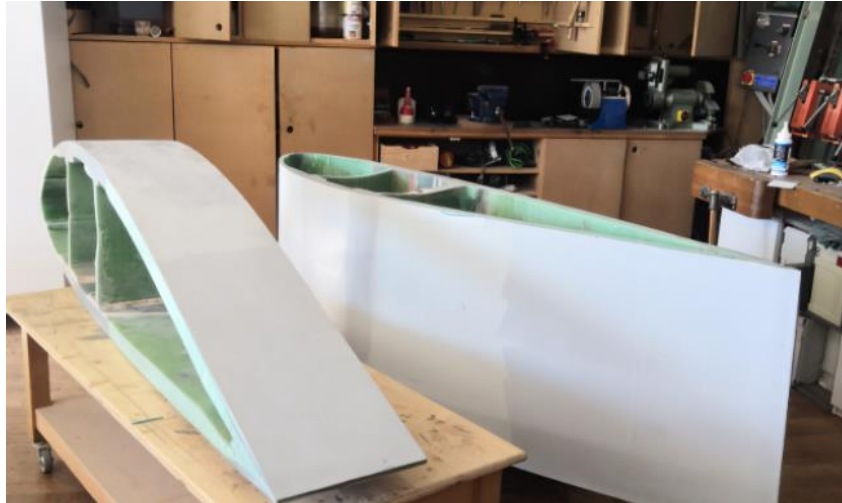


Ilustración 18: Ejemplo 2 de mobiliario de interiores (Fuente: <https://ecestudents.nl/bladesign-sustainable-furniture/>).



Ilustración 19: Ejemplo 3 de mobiliario de interiores (Fuente: <https://ecestudents.nl/bladesign-sustainable-furniture/>).



Ilustración 20: Ejemplo 4 mobiliario de interiores (Fuente: <https://gp-renewables.energy/blades-recycling-2/>).

➤ Mobiliario urbano



Ilustración 21: Ejemplo aparcamiento bicicletas en Dinamarca (Fuente: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/grappling-with-blade-recycling-wind-sector-buys-time-with-life-extensions-60567157>).



Ilustración 22: Parque infantil (Fuente: <https://principia-scientific.com/what-happens-to-all-the-old-wind-turbines/>).

➤ Proyectos de ingeniería civil



Ilustración 23: Pasarela en Szprotawa, Polonia (Fuente: Anmet).

La pasarela de la ilustración es la primera pasarela peatonal fabricada a partir de residuos de palas eólicas, actualmente existen otros proyectos similares en desarrollo como la pasarela de County Cork en Irlanda, o la “Blade Pole”, una torre de alta tensión fabricada también con este tipo de residuo.

Otros ejemplos de proyectos de ingeniería civil en desarrollo son:

- Rompeolas: palas alineadas con la costa marina para proteger zonas del oleaje intenso y prevenir la erosión.
- Estructuras artificiales que sirvan como base para los arrecifes de coral, sumergidos bajo el agua.
- Herramienta para la mejora de barreras contra la contaminación acústica en carreteras.
- Skateparks y obras de arte.
- Elementos constructivos en edificación.

2.9 Evolución del sector eólico en la Comunidad Gallega

España ha sido uno de los países pioneros en lo que a energía eólica se refiere, desde los años 90 se ha invertido en este sector, llegando en la actualidad a completar el 20% del Mix de producción eléctrica. Dentro de la península, una de las zonas con mayor potencial eólico es la zona noroeste, que se corresponde con la comunidad Gallega.

Los primeros parques eólicos se construyeron en Galicia en el año 1997, a partir de esa fecha su crecimiento ha sido lineal hasta llegar al año 2008 donde la cifra de potencia instalada supera los 3.000 MW y comienza a estancarse, correspondiéndose con el inicio de la gran crisis financiera que azotaba en aquel entonces.

Los datos de la potencia eólica instalada, potencia media de aerogeneradores y número de aerogeneradores que se utilizarán para este trabajo, han sido cedidos por el Observatorio Eólico de Galicia.

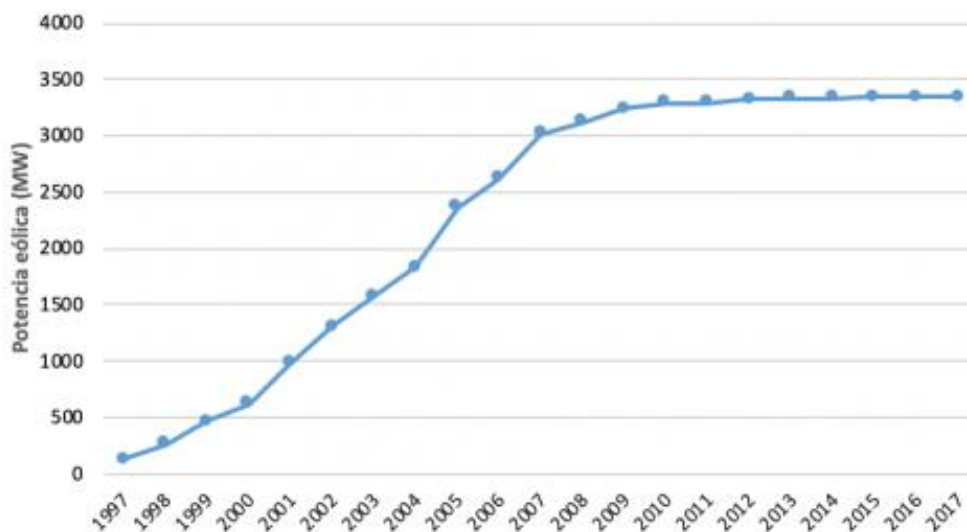


Ilustración 24: Dinámica de la potencia eólica en funcionamiento en Galicia (MW). (Fuente: BISEEGA).

Como se puede observar en la gráfica, a partir de la crisis del 2008 y hasta prácticamente la actualidad, la potencia instalada se ha mantenido estable, aunque, debido a la situación medioambiental, económica y social que estamos viviendo, se está volviendo a apostar por esta tecnología de generación eléctrica y a partir del año 2020 hay nuevos objetivos energéticos y políticos que han tenido como consecuencia un elevado número de nuevos parques eólicos que ya se encuentran en fase constructiva.

Como toda tecnología, los molinos eólicos o aerogeneradores han evolucionado con el paso del tiempo. En la comunidad gallega, los primeros parques eólicos tenían una potencia media por aerogenerador que no superaba los 0,40 MW, esta potencia media se ha ido incrementando con el paso de los años con la creación de nuevos parques con tecnologías mejoradas, llegando a aerogeneradores con potencias nominales de hasta 4 o 5 MW cada uno en los parques eólicos que se proyectan en la actualidad.

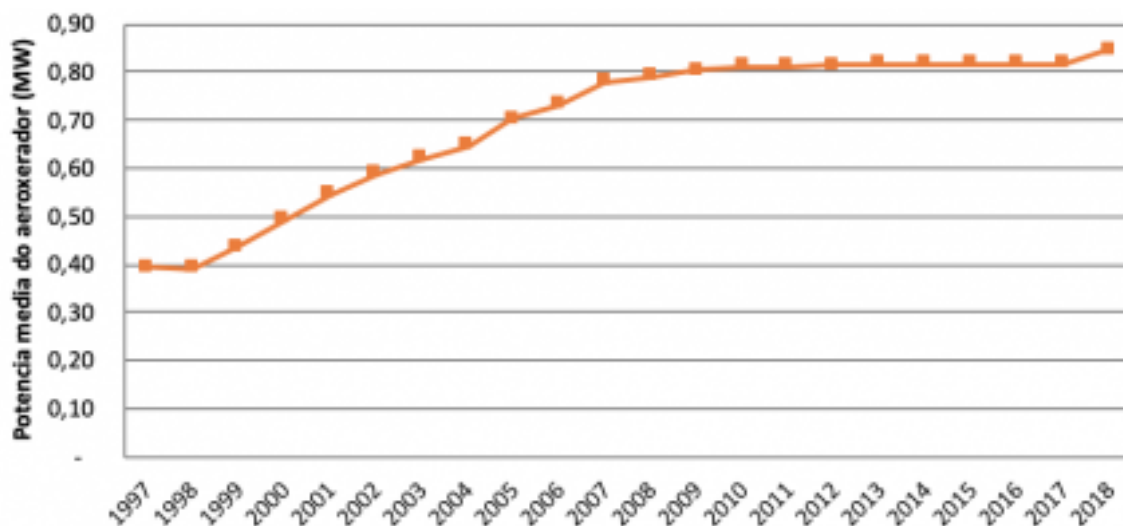


Ilustración 25: Dinámica de la potencia media por aerogenerador en funcionamiento en el territorio gallego.

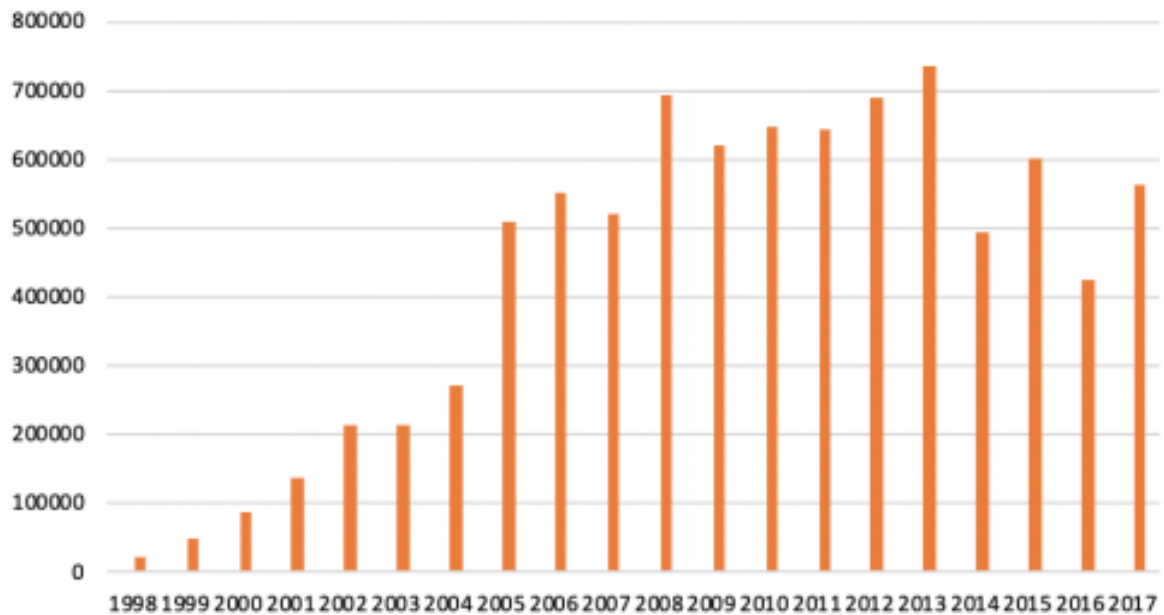
2.9.1 La influencia económica de los parques eólicos en Galicia

La proliferación de los parques eólicos en la comunidad gallega desde los años 90 sólo se entiende analizando el punto de vista económico. La comunidad gallega cuenta con una zona rural de mucha relevancia, estando la economía gallega muy ligada a actividades agrarias, mayormente en la zona del interior. Los proyectos de parques eólicos han sido una inyección económica importante en estas zonas, muchas de ellas con poca actividad o condenadas a la despoblación.

Las corrientes políticas han aprovechado estas circunstancias para alentar a las empresas de este sector mediante una legislación que favorece la creación de parques eólicos y simplifica el proceso administrativo en la mayoría de los casos.

La Comunidad Autónoma de Galicia tiene regulado el aprovechamiento de la energía eólica a través del **Decreto 242/2007, de 13 de diciembre**, en el que, entre otros aspectos, se estimula la participación del sector público en el capital social del proyecto de las empresas que, en virtud del procedimiento que diseña, resulten autorizadas para instalar parques eólicos generadores de energía eléctrica y la **Ley 8/2009**, de 22 de diciembre, por la que se regula el aprovechamiento eólico en Galicia y se crean el canon eólico y el Fondo de Compensación Ambiental. (BOE).

La facturación de los parques eólicos gallegos llegó a superar los 700 Millones de euros de facturación en el año 2013 (Observatorio Eólico de Galicia, 2020).



***Ilustración 26:** Datos de estimación de la facturación de los parques eólicos en Galicia en euros (Fuente: Elaboración propia a partir del Informe mensual de ventas de energía de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia).*

Como se puede observar en la **Ilustración 27**, la facturación de los parques eólicos gallegos ha evolucionado positivamente desde el inicio en 1998 con una tendencia prácticamente lineal hasta el año 2005 donde se produce una fuerte subida motivada por el aumento en ese período de la potencia instalada en la comunidad, junto con las mejores tecnológicas de los aerogeneradores, hasta tener una tendencia más estable en la actualidad.

En Galicia existe algún parque eólico en el que se estiman más de 4.000 horas de funcionamiento al año. (Observatorio Eólico de Galicia, 2020)

3 MATERIALES & MÉTODOS

3.1 La energía eólica en Galicia

La energía eólica es aquella que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica a través del movimiento de las palas en el rotor del aerogenerador y, posteriormente, en energía eléctrica.

Galicia es una de las comunidades españolas con mayor recurso eólico de España y una de las pioneras en este sector.

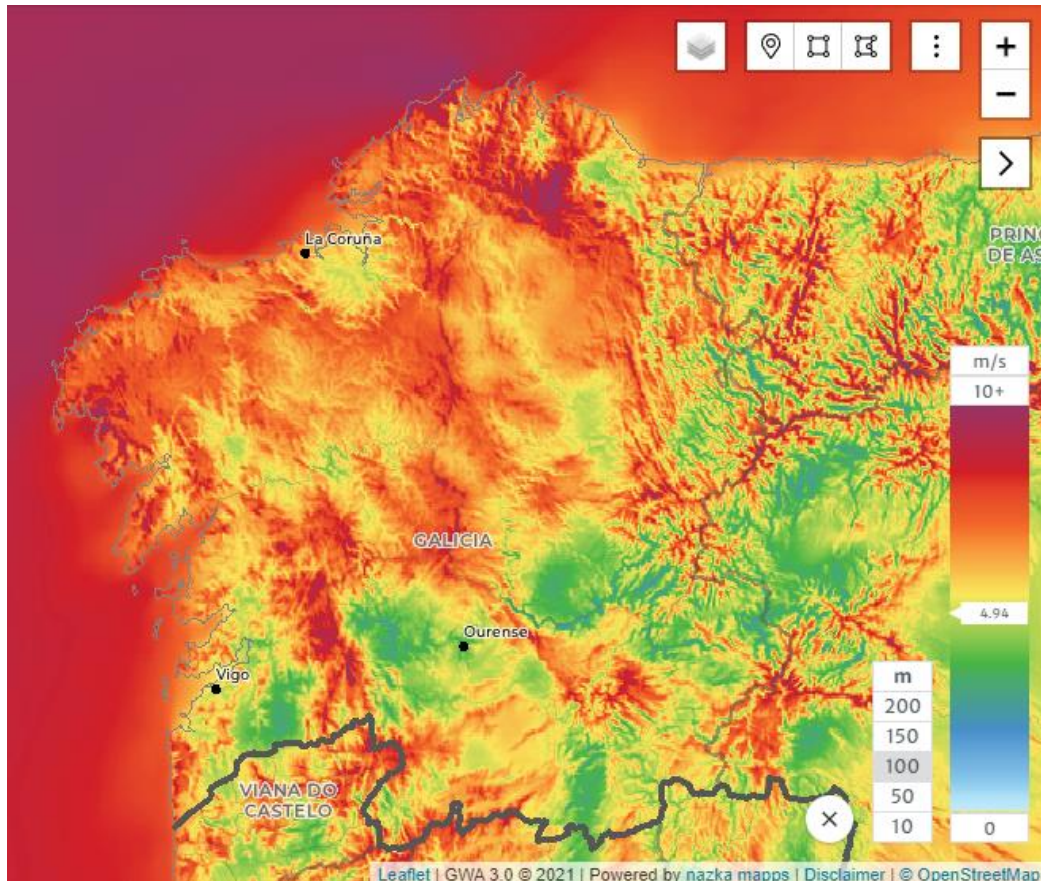


Ilustración 27: Velocidad de viento en Galicia (Fuente: Global Wind Atlas.)

Como se puede ver en la **Ilustración 28** las mayores velocidades medias de viento se distribuyen en las zonas costeras del noroeste de la comunidad que se corresponden con el litoral de las provincias de A Coruña y Lugo.

Las zonas con mayor velocidad de viento no tienen por qué corresponderse con las de mayor recurso eólico, es decir, no toda la energía cinética del viento puede ser aprovechable, en la **Ilustración 29**, se representa el recurso eólico de la comunidad gallega, zona que se corresponde con la que tiene el mayor número de aerogeneradores.

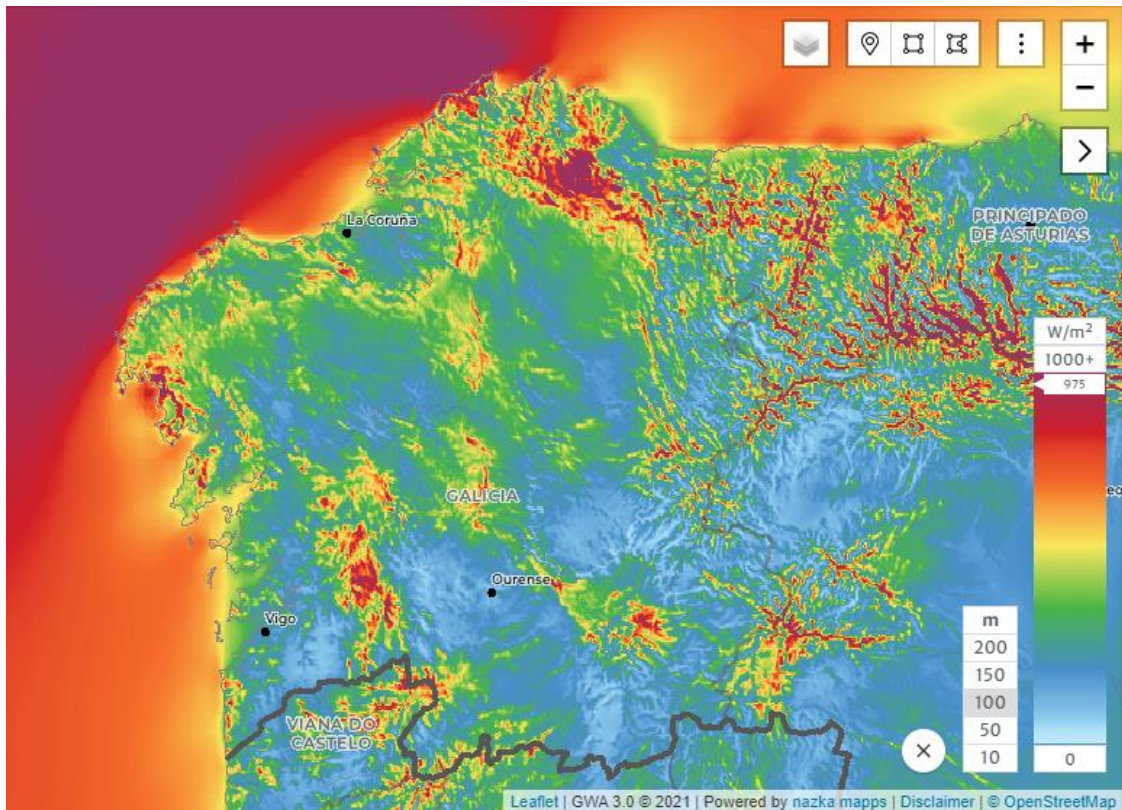


Ilustración 28: Recurso eólico en Galicia (Fuente: Global Wind Atlas).

Teniendo en cuenta lo comentado sobre las ilustraciones anteriores, la energía eólica no se distribuye de manera homogénea a lo largo del territorio, existen espacios geográficos que concentran gran parte de la potencia instalada en funcionamiento. Los municipios que concentran la mayor parte de los aerogeneradores gallegos están radicados en las sierras que componen la Dorsal Gallega y en las zonas de costa de la provincia de A Coruña. Destaca particularmente la densidad eólica existente en la Serra do Xistral con ayuntamientos como el de o Valadouro, Abadín o Oourol que cuentan con cientos de aerogeneradores instalados en sus términos municipales, siendo el ayuntamiento de Muras el que encabeza esta lista con un total de 381 aerogeneradores en funcionamiento

3.2 Distribución geográfica de la potencia eólica

3.2.1 Análisis provincial

La distribución de la potencia eólica instalada que se encuentra actualmente en funcionamiento, a escala provincial, permite hacer un análisis de la distribución de los aerogeneradores por la comunidad gallega.

Tabla 3: Distribución provincial del número de parques eólicos y de la potencia instalada a marzo de 2019. (Fuente: Instituto Energético de Galicia).

Provincia	Número de parques	Potencia instalada (MW)
A Coruña	68	1196
Lugo	64	1454
Pontevedra	21	450
Ourense	11	312

Destaca la provincia de Lugo por tener la mayor potencia instalada y la provincia de la Coruña por tener el mayor número de parques.



Ilustración 29: Mapa de Galicia por provincias (Fuente: [https:// www.mapasdeespana.com/](https://www.mapasdeespana.com/)).

3.2.2 Distribución municipal del número de aerogeneradores

Con una distribución a escala municipal se concretiza la localización de los aerogeneradores existentes. Hay que explicar, antes de nada, el uso de cifras decimales en el número de aerogeneradores pertenecientes a cada ayuntamiento. La finalidad es respetar los datos que el Observatorio Eólico de Galicia ha proporcionado para la realización de este trabajo, aunque a primera vista parece no tener mucho sentido que pueda haber medio aerogenerador, los datos existentes son estos y se respeta la fiabilidad de los mismos a lo largo de la elaboración de todo el presente trabajo.

- A Coruña

Tabla 4.1: Distribución municipal del número de aerogeneradores en el año 2019 en A Coruña (Fuente: ORDEN del 17 de diciembre de 2018 por la que se regulan los criterios de repartición y se establecen las bases reguladoras y la convocatoria de subvenciones de la línea en concurrencia no competitiva y de la línea en concurrencia competitiva del Fondo de Compensación Ambiental para el año 2019, de forma individual y mediante el sistema de gestión compartida, destinadas a las entidades locales de Galicia).

A CORUÑA	
Ayuntamiento	Nº aerogeneradores
As Pontes de García Rodríguez	139.0
Mazaricos	123.5
Ortigueira	116.0
Dumbria	114.0
Somozas	87.0
Mañón	73.0
Cedeira	70.0
Vimianzo	68.0
Ponteceso	63.0
Santa Comba	56.5
Porto do Son	51.0
Carnota	49.5
Negreira	49.0
Pobra do Caramiñal	48.0
Cariño	44.0
Camariñas	42.0
Muros	41.0
Muxía	34.0
Outes	30.0
Coristanco	29.0
Zas	28.5
San Sadurniño	26.0
Monfero	25.0
Melide	19.0
Valdoviño	19.0
Irixoa	15.5
Lousame	15.0
Aranga	15.0
Rois	14.0
Sobrado	13.5
Cabana de Bergantiños	13.0
Silleda	12.5
Toques	12.0
A Capela	11.0
Tordoia	7.0
Malpica de Bergantiños	7.0
Rianxo	6.0

Tabla 5.2: Distribución municipal del número de aerogeneradores en el año 2019 en A Coruña (Fuente: ORDEN del 17 de diciembre de 2018 por la que se regulan los criterios de repartición y se establecen las bases reguladoras y la convocatoria de subvenciones de la línea en concurrencia no competitiva y de la línea en concurrencia competitiva del Fondo de Compensación Ambiental para el año 2019, de forma individual y mediante el sistema de gestión compartida, destinadas a las entidades locales de Galicia).

A CORUÑA	
Ayuntamiento	Nº aerogeneradores
Narón	6.0
Boimorto	5.5
Dodro	5.0
Arteixo	2.0
Padrón	2.0
Cerceda	2.0
Boiro	1.0
A Laracha	1.0
TOTAL	1611.0



Ilustración 30: Mapa de Ayuntamientos de la provincia de A Coruña (Fuente: www.mapasdeespana.com).

- Lugo

Tabla 6: Distribución municipal del número de aerogeneradores en el año 2019.en Lugo (Fuente: ORDEN del 17 de diciembre de 2018 por la que se regulan los criterios de repartición y se establecen las bases reguladoras y la convocatoria de subvenciones de la línea en concurrencia no competitiva y de la línea en concurrencia competitiva del Fondo de Compensación Ambiental para el año 2019, de forma individual y mediante el sistema de gestión compartida, destinadas a las entidades locales de Galicia).

LUGO	
Ayuntamiento	Nº aerogeneradores
Muras	381.0
Abadín	198.0
Ouro	156.5
Vilalba	129.0
O Valadouro	120.0
O Vicedo	84.0
A Fonsagrada	64.0
Viveiro	50.0
Xermade	43.5
Mondoñedo	39.0
Guitiriz	39.0
Alfoz	35.0
Ribeira de Piquín	33.0
Friol	33.0
Meira	30.0
Palas de Rei	25.0
Castroverde	24.5
Chantada	21.0
Baleira	17.0
Cervo	16.5
Xove	11.0
Carballedo	10.0
A Pontenova	9.5
Foz	9.0
Sarria	6.0
A Patoriza	5.0
Pol	4.5
O Páramo	4.0
Riotorto	2.5
Antas de Ulla	2.0
TOTAL	1602.5



Ilustración 31: Mapa de Ayuntamientos de la provincia de Lugo. (Fuente: www.mapasdeespana.com).

- Pontevedra

Tabla 7: Distribución municipal del número de aerogeneradores en el año 2019.en Pontevedra (Fuente: ORDEN del 17 de diciembre de 2018 por la que se regulan los criterios de repartición y se establecen las bases reguladoras y la convocatoria de subvenciones de la línea en concurrencia no competitiva y de la línea en concurrencia competitiva del Fondo de Compensación Ambiental para el año 2019, de forma individual y mediante el sistema de gestión compartida, destinadas a las entidades locales de Galicia).

PONTEVEDRA	
Ayuntamiento	Nº aerogeneradores
Forcarei	105.5
Lalín	80.0
A Cañiza	62.0
A Lama	51.5
Covelo	49.0
Rodeiro	36.0
As Neves	23.0
Arbo	23.0
Cerdedo-Cotovade	21.0
Agolada	11.0
Catoira	10.0
Vila de Cruces	8.0
Fornelos de Montes	5.0
Caldas de Reis	4.0
Cuntis	3.0
A Estrada	2.0
Vilagarcía de Arousa	2.0
TOTAL	496.0



Ilustración 32: Mapa de Ayuntamientos de la provincia de Pontevedra. (Fuente:www.mapasdeespana.com).

- Orense

Tabla 8: Distribución municipal del número de aerogeneradores en el año 2019.en Orense (Fuente: ORDEN del 17 de diciembre de 2018 por la que se regulan los criterios de repartición y se establecen las bases reguladoras y la convocatoria de subvenciones de la línea en concurrencia no competitiva y de la línea en concurrencia competitiva del Fondo de Compensación Ambiental para el año 2019, de forma individual y mediante el sistema de gestión compartida, destinadas a las entidades locales de Galicia).

ORENSE	
Ayuntamiento	Nº aerogeneradores
Nogueira de Ramuín	53.0
Cualedro	44.5
Avión	40.5
O Irixo	37.0
Montederramo	36.0
Chandrexa de Queixa	35.0
Melón	18.0
Parada de Sil	17.0
Verea	15.0
Xunqueira de Espadanedo	6.0
Baltar	4.0
Bande	4.0
Castro Caldelas	4.0
Piñor	2.0
Xinzo de Limia	0.5
TOTAL	316.5

siempre que sus características sean similares a las del resto de modelos que componen la base de datos del modelo matemático. Teniendo esto en cuenta, el reto a la hora de la creación del modelo matemático era conseguir el mayor número de datos de peso de pala de diferentes modelos de aerogeneradores como fuera posible, para así aumentar la fiabilidad de este y que los resultados obtenidos sean lo más precisos posible.

La idea central del modelo es basarse en datos reales y disponibles al público, cuánto más se base el modelo en datos reales que proceden de hojas de especificaciones técnicas de turbinas de aerogeneradores existentes, mayor exactitud en los resultados. La mayor ventaja de este modelo es que no utiliza progresiones ni estimaciones matemáticas, en los que el margen de error se magnifica por falta de datos concretos y específicos.

En resumidas cuentas, el modelo relaciona la potencia del aerogenerador con su peso por unidad de pala, partiendo de una base de datos con las datasheets de todos los fabricantes de turbinas eólicas que se han podido conseguir.

3.3.2 Fundamentos matemáticos

El primer paso para la creación del modelo ha sido la búsqueda de datos reales de turbinas eólicas. La fuente de dónde se han extraído los datos ha sido el portal online [[HTTPS://EN.WIND-TURBINE-MODELS.COM](https://en.wind-turbine-models.com)], la información prioritaria para el modelo era: la potencia nominal de la turbina y el peso de cada pala.

El modelo utilizado en este TFM ha considerado información proveniente de 357 turbinas eólicas de diferentes fabricantes, con un rango de potencia nominal desde los 50 kW (0.05 MW) a los 14 MW.

Una vez analizados estos datos, se han clasificado en diferentes categorías, la idea es tener diferentes rangos de potencia nominal de los aerogeneradores, para que el resultado sea más efectivo. Otro factor a tener en cuenta es el número de datos que se obtuvieron de cada rango de potencia, siendo más preciso cuanto mayor sea la cantidad. La siguiente tabla resume la distribución de los datos obtenidos para el modelo:

Tabla 9: Clasificación de los datos de turbinas eólicas que sirven como base de datos para el modelo matemático.

Intervalos de potencia nominal (kW)	Valor de la mediana del peso (Tn)	Número de datos analizados
[50-100]	0.30	31
[101-200]	0.80	21
[201-300]	0.80	44
[301-400]	1.20	11
[401-500]	1.80	26
[501-750]	1.95	52
[751-1000]	4.00	21
[1001-1500]	5.90	21
[1501-2000]	8.50	33
[2001-2500]	12.00	37
[2501-3000]	14.00	19
[3001-4000]	15.00	12
[4001-6000]	23.70	12
[6001-8000]	25.50	9
[8001-10000]	35.00	6

El objetivo del uso de la mediana en lugar de la media es filtrar los datos atípicos o que se salgan del rango de valores esperados. El siguiente gráfico representa la distribución del peso en las diferentes categorías, en las cuales los puntos representan una turbina eólica real y la línea entre los sombreados grises representa la mediana. Si se hubiera utilizado el valor medio, los valores atípicos, que a veces proceden de datos de modelos que no son comerciales, habrían tenido un impacto mayor del deseado.

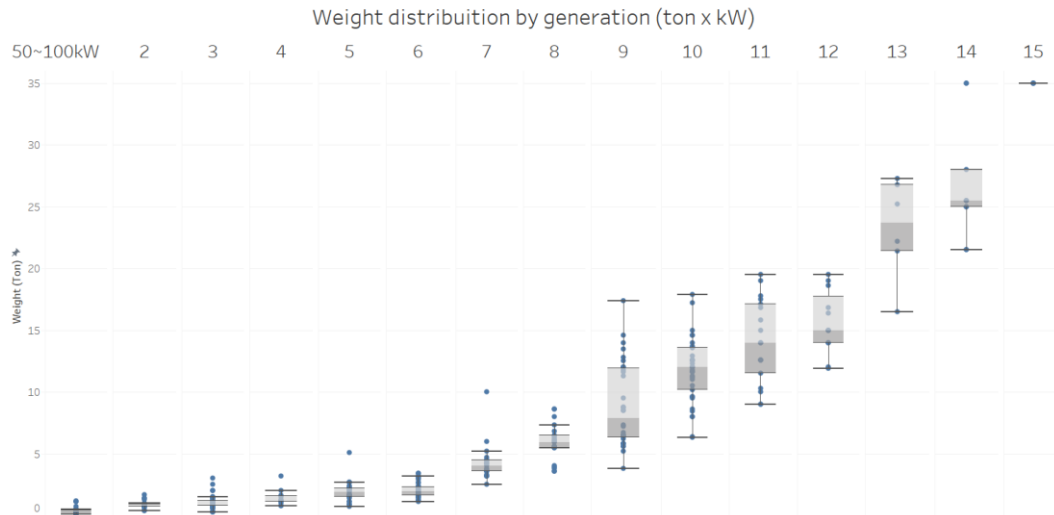


Ilustración 34: Distribución del peso, según el rango de potencia nominal al que pertenecen los aerogeneradores.

3.3.3 Aplicación del modelo matemático

El punto de partida para aplicar el modelo es un histórico de datos aportados por el [Observatorio Eólico de Galicia](#) desde el año 1997, cuando se implantaron los primeros parques, hasta el año 2019. Estos datos incluyen: potencia eólica instalada en Galicia, potencia media de las turbinas de los aerogeneradores y número de aerogeneradores por ayuntamiento y provincia gallegos.

3.4 Ecuación del centro de masas o centroide

Con el fin de establecer un punto de futura gestión del residuo eólico generado en la comunidad se va a aplicar la ecuación del modelo matemático del centroide. De esta manera se podrá establecer el punto de la comunidad óptimo en cuanto a localización usando los datos del apartado 3.2 y los resultados de la aplicación del modelo matemático para el cálculo del residuo primero a nivel provincial y luego a nivel autonómico.

La fórmula del centro de masas o centroide permite calcular el punto geométrico que dinámicamente se comporta como si en él estuviera aplicada la resultante de las fuerzas externas al sistema, de manera que el sistema formado por toda la masa concentrada en el centro de masas es un sistema equivalente al original.

En este caso se utilizan dos variables X e Y que serán equivalentes a las dos componentes del sistema de coordenadas: latitud y longitud, medidos en grados decimales. La masa (m), se corresponde con el residuo eólico calculado, en toneladas.

La ecuación a utilizar en el modelo es la siguiente:

$$\bar{X} = \frac{\sum m_i \cdot X_i}{\sum m_i}, \quad \bar{Y} = \frac{\sum m_i \cdot Y_i}{\sum m_i} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Los datos de las coordenadas de cada municipio se obtienen de Google Maps.

Los resultados \bar{X} e \bar{Y} son con las coordenadas, latitud y longitud correspondientemente, del centro de masas del residuo eólico.

3.5 Hipótesis

Para la elaboración de este trabajo de tendrán en cuenta 4 diferentes casos o hipótesis de estudio, en las que se aplicarán los datos y modelos matemáticos anteriormente explicados en este apartado.

3.5.1 Hipótesis N°1: “Cálculo del RE en Galicia hasta el 2030”

Se parte de la premisa de que los parques eólicos empiezan a instalarse en Galicia en el año 1997 y la potencia media de los aerogeneradores gallegos y la potencia eólica instalada sufren una variación mínima desde el año 2008 hasta el año 2019 que son los datos que se han podido obtener para la realización de este trabajo.

Por tanto, estimado una vida útil de los parques de entre 20 y 25 años, se aplica el modelo matemático para obtener el residuo eólico generado hasta el año 2030.

Para esta hipótesis se utiliza el Modelo Matemático de cálculo de residuo eólico y los datos cedidos por el Observatorio eólico de Galicia.

3.5.2 Hipótesis N°2 “Cálculo del RE en Galicia hasta el 2045”

En esta segunda hipótesis se aplicará el modelo matemático a todos los datos obtenidos sin hacer ninguna presunción previa, es decir, con todos los datos hasta el año 2019.

Se sigue estimando una vida útil de aproximadamente 25 años, por tanto, se calculará el residuo eólico producido en Galicia hasta el año 2045, mediante la aplicación del Modelo Matemático de cálculo de residuo eólico y los datos cedidos por el Observatorio eólico de Galicia.

3.5.3 Hipótesis N°3 “Cálculo del RE a nivel provincial y municipal”

En esta tercera hipótesis se calcula el residuo a nivel municipal para poder realizar un análisis desde una perspectiva espacial de la distribución del residuo eólico a lo largo de la comunidad gallega, sabiendo en que territorios se concentrará la mayor parte de este residuo, para posteriormente optimizar la logística de su gestión.

Los datos utilizados también serán hasta el 2019, a nivel municipal y provincial, cedidos por el Observatorio eólico de Galicia, por tanto, estimando una vida útil por parque eólico de 20 a 25 años y aplicando el Modelo Matemático de cálculo de residuo eólico, se calculará para el 2045.

3.5.4 Hipótesis N°4: Ubicación de central de gestión de RE.

En esta última hipótesis se utilizará el modelo matemático del centroide con el fin de determinar la ubicación óptima de una central para gestionar el potencial residuo eólico de la comunidad gallega, partiendo del residuo calculado por ayuntamiento en la hipótesis anterior.

Se optimiza la ubicación a nivel provincial y luego se repite el proceso para obtener la ubicación a nivel autonómico.

4 RESULTADOS & DISCUSIÓN

4.1 Hipótesis N°1: “Cálculo del RE en Galicia hasta el 2030”

Para la aplicación del modelo en esta primera hipótesis se parte de la premisa de que, según los datos analizados en el **Apartado 2.9** de este TFM (**Ilustración 25 e Ilustración 26**) y sintetizados a continuación en la **Tabla 10**, los parques eólicos empiezan a instalarse en Galicia en el año 1997 y la potencia media de los aerogeneradores gallegos y la potencia eólica instalada sufren una variación mínima desde el año 2008 hasta el año 2019 que son los datos que se han podido obtener para la realización de este trabajo.

Por tanto, estimado una vida útil de los parques de entre 20 y 25 años, se aplica el modelo matemático para obtener el residuo eólico generado hasta el año 2030.

Partiendo de los datos de potencia media del aerogenerador por año y de la potencia eólica instalada se calcula el número de aerogeneradores totales anuales.

Tabla 10: Histórico potencia acumulada instalada en Galicia.

Año	Potencia media aero (MW)	Potencia eólica instalada (MW)	N.º de aerogeneradores
1997	0.40	200	500
1998	0.40	300	750
1999	0.45	500	1,111
2000	0.50	600	1,200
2001	0.56	1,000	1,786
2002	0.59	1,350	2,288
2003	0.62	1,600	2,581
2004	0.66	1,850	2,803
2005	0.70	2,400	3,429
2006	0.74	2,650	3,581
2007	0.78	3,000	3,846
2008	0.79	3,100	3,924
2009	0.80	3,250	4,063
2010	0.81	3,260	4,025
2011	0.81	3,270	4,037
2012	0.81	3,280	4,049
2013	0.81	3,280	4,049
2014	0.81	3,290	4,062
2015	0.82	3,300	4,024
2016	0.82	3,300	4,024
2017	0.82	3,300	4,024
2018	0.85	3,400	4,000
2019	0.85	3,412	4,026

A partir de estos datos, que son los acumulados, se calculan los parciales de cada año:

Tabla 11: Potencia instalada por año en Galicia.

Año	N.º de aerogeneradores instalados	Potencia instalada en el año	Potencia media aerogeneradores instalados
1997	500	200	0.40
1998	250	100	0.40
1999	361	200	0.55
2000	89	100	1.13
2001	586	400	0.68
2002	502	350	0.70
2003	293	250	0.85
2004	222	250	1.12
2005	626	550	0.88
2006	153	250	1.64
2007	265	350	1.32
2008	78	100	1.28
2009	138	150	1.08
2010	-38	10	-0.26
2011	12	10	0.81
2012	12	10	0.81
2013	0	0	0.00
2014	12	10	0.81
2015	-37	10	-0.27
2016	0	0	0.00
2017	0	0	0.00
2018	-24	100	-4.10
2019	26	12	0.46

Analizando los datos obtenidos se concluye que:

- A partir del año 2008 el crecimiento de los parques eólicos se ha estancado.
- En los años 2010, 2015 y 2018 los datos son negativos, lo que sugiere una repotenciación, o incluso el cierre, de algún parque eólico.

La vida media útil de un parque eólico ronda entre 20 y 25 años, por tanto, se aplicarán en el modelo los datos desde el año 1997 hasta el 2010, calculando así el residuo eólico que se generaría en el año 2030.

Tabla 12: Residuo eólico en tonelada de peso generado hasta el 2030.

Año	Mediana peso por pala (tn)	Peso total de residuo anual (tn)
1997	1.20	1,800.00
1998	1.20	900.00
1999	1.95	2,112.50
2000	5.90	1,573.33
2001	1.95	3,426.43
2002	1.95	2,939.16
2003	4.00	3,510.11
2004	5.90	3,936.22
2005	4.00	7,506.49
2006	8.50	3,889.00
2007	5.90	4,691.79
2008	5.90	1,378.77
2009	5.90	2,450.55
Residuo total generado desde 97 hasta 2030		40,114.36

En España, hay estudios que apuntan que cada habitante genera un total de 462 kilos al año (Fuente: ECOEMBES), así que el residuo generado sería el equivalente al generado por casi 100.000 personas a lo largo de un año.

Por otro lado, resulta interesante como punto de discusión, hacer referencia a la comparación entre el resultado obtenido con nuestro modelo y los otros modelos empleados como referencia para la elaboración del presente documento.

El modelo de Albers de 2009 estimaba 10 kg de residuo eólico por cada 1 kW de potencia instalada. La comunidad gallega cuenta con 3412 MW de potencia eólica instalada, por tanto, según este modelo, el residuo total sería de 34,120 toneladas, ligeramente inferior al resultado de nuestro modelo.

El modelo de Liu y Barlow de 2017 arroja unos resultados diferentes, para aplicar este modelo a los datos se hace una proporción directa entre la potencia eólica instalada en Europa en el año 2019 (Fuente: Anuario Eólico 2020), que cuenta con un total de 205 GW y la potencia instalada en Galicia en ese mismo año, 3412 MW. Según el modelo, el residuo eólico para Europa en el año 2045 sería de 3 millones de toneladas, por lo tanto, a la comunidad gallega le corresponderían 49,931.70 toneladas, un valor superior al calculado con nuestro modelo, lo cual tiene sentido porque este modelo estima el residuo eólico teniendo en cuenta el mantenimiento, reparaciones de pala y repotenciaciones de los parques eólicos.

El coste medio del entierro de residuos eólicos varía entre 7 y 47 euros la tonelada, sin tener en cuenta la transporte y logística. Asumiendo un valor medio de 27 euros la tonelada de residuo se pueden calcular los costes del entierro de los mismos.

Tabla 13: Coste de entierro de residuo eólico generado hasta el 2030.

Año	Coste entierro residuos eólicos
1997	48,600.00 €
1998	24,300.00 €
1999	57,037.50 €
2000	42,480.00 €
2001	92,513.57 €
2002	79,357.45 €
2003	94,773.10 €
2004	106,277.86 €
2005	202,675.32 €
2006	105,002.90 €
2007	126,678.27 €
2008	37,226.87 €
2009	66,164.95 €
1997-2030	1,083,087.80 €

En lo relevante al coste, sería de 317, 43 euros/MW, en principio puede no parecer muy elevado, sobre todo comparándolo con el coste de potencia eólica instalada, que es de aproximadamente de 1,2 millones de euros/MW.

Cabe recalcar que estos valores son exclusivamente del coste que supondría el entierro de los residuos materiales, sin tener en cuenta los costes de logística y transporte, que es lo que realmente puede llegar a ser más costoso, mucho más con el incremento en el precio de los combustibles fósiles al que está siendo sometida toda Europa y en especial la península.

En algunos países de la Unión Europea como Holanda y Alemania ya se están tomando medidas para prohibir el entierro de este tipo de residuos. Es muy factible que en los próximos años los gobiernos tengan que tomar este tipo de medidas, o, en su defecto, penalizar con sanciones económicas, hasta que el entierro de residuo eólico no resulte rentable.

4.2 Hipótesis N°2 “Cálculo del RE en Galicia hasta el 2045”

En esta segunda hipótesis se aplicará el modelo matemático a todos los datos obtenidos sin hacer ninguna presunción previa, por tanto, se calculará el residuo eólico producido en Galicia hasta el año 2045, partiendo de los datos reflejados en la **Tabla 10 y Tabla 11** y teniendo en cuenta que la instalación de parques eólicos en la comunidad comienza en el 1997 y los datos anuales obtenidos son hasta el 2019 y la vida útil de un parque eólico se estima en 20 o 25 años.

En la mayoría de los artículos relacionados con el cálculo del residuo eólico se analiza la perspectiva en el año 2050, con esta hipótesis se podrá realizar una comparativa más exacta desde el punto de vista temporal.

Tabla 14: Residuo eólico en tonelada de peso generado hasta el 2045.

Año	N.º de aerós instalados	Mediana peso por pala (tn)	Peso total de residuo anual (tn)
1997	500	1.20	1,800.00
1998	250	1.20	900.00
1999	361	1.95	2,112.50
2000	89	5.90	1,573.33
2001	586	1.95	3,426.43
2002	502	1.95	2,939.16
2003	293	4.00	3,510.11
2004	222	5.90	3,936.22
2005	626	4.00	7,506.49
2006	153	8.50	3,889.00
2007	265	5.90	4,691.79
2008	78	5.90	1,378.77
2009	138	5.90	2,450.55
2010	-38	0.00	0.00
2011	12	4.00	148.15
2012	12	4.00	148.15
2013	0	0.00	0.00
2014	12	4.00	148.15
2015	-37	0.00	0.00
2016	0	0.00	0.00
2017	0	0.00	0.00
2018	-24	0.00	0.00
2019	26	1.80	140.40
Residuo hasta 2045			40,699.21

Los resultados son muy parecidos a los de la **Hipótesis N°1**, lo cual tiene sentido porque a partir del 2009 los proyectos de centrales de generación eólica se estancaron en la comunidad gallega.

El coste medio del entierro de residuos eólicos varía entre 7 y 47 euros la tonelada, sin tener en cuenta la transporte y logística. Asumiendo un valor medio de 27 euros la tonelada de residuo se pueden calcular los costes del entierro del mismo.

Tabla 15: Coste de entierro de residuo eólico generado hasta el 2045.

Año	Coste entierro residuos eólicos
1997	48,600.00 €
1998	24,300.00 €
1999	57,037.50 €
2000	42,480.00 €
2001	92,513.57 €
2002	79,357.45 €
2003	94,773.10 €
2004	106,277.86 €
2005	202,675.32 €
2006	105,002.90 €
2007	126,678.27 €
2008	37,226.87 €
2009	66,164.95 €
2010	0.00 €
2011	4,000.00 €
2012	4,000.00 €
2013	0.00 €
2014	4,000.00 €
2015	0.00 €
2016	0.00 €
2017	0.00 €
2018	0.00 €
2019	3,790.80 €
1997-2045	1,098,878.60 €

Como en el caso anterior, los resultados sufren una mínima variación con respecto a la **Hipótesis N°1**, lo cual tiene sentido.

Por tanto, los puntos de discusión y comentarios respecto a los resultados, son los mismos que en la **Hipótesis N°1**.

4.3 Hipótesis N°3 “Cálculo del RE a nivel provincial y municipal”

En esta tercera hipótesis se calcula el residuo eólico con los datos del **Apartado 3.2** del presente documento, es decir, potencia instalada a nivel provincial y número de aerogeneradores de cada municipio.

El objetivo de este análisis es una idea más espacial de la distribución del residuo eólico a lo largo de la comunidad gallega, sabiendo en que territorios se concentrará la mayor parte de este residuo, para posteriormente optimizar la logística de su gestión.

Se parte de los datos de las **Tablas 4, 5, 6, 7 y 8**, para estimar la potencia media de los aerogeneradores instalados en cada provincia. Los datos también son del 2019, por tanto, estimando una vida útil por parte eólico de 20 a 25 años, el potencial residuo eólico se calcula para el 2045.

Tabla 16: Potencia media de aerogeneradores y aplicación del modelo a nivel provincial.

Provincia	N.º de aerogeneradores	Potencia instalada (MW)	Potencia media aerogeneradores instalados (MW)	Mediana peso por pala (tn)
A Coruña	1,611.00	1,196.00	0.74	1.95
Lugo	1,602.50	1,454.00	0.91	4.00
Pontevedra	496.00	450.00	0.91	4.00
Ourense	316.50	312.00	0.99	4.00

- A Coruña

Tabla 17.1: Residuo eólico en tonelada de peso generado en la provincia de A Coruña hasta el año 2045.

A CORUÑA	
Ayuntamiento	Peso total de residuo eólico (tn)
As Pontes de García Rodríguez	813.2
Mazaricos	722.5
Ortigueira	678.6
Dumbria	666.9
Somozas	509.0
Mañón	427.1
Cedeira	409.5
Vimianzo	397.8
Ponteceso	368.6
Santa Comba	330.5
Porto do Son	298.4
Carnota	289.6
Negreira	286.7
Pobra do Caramiñal	280.8
Cariño	257.4
Camariñas	245.7
Muros	239.9
Muxía	198.9
Outes	175.5
Coristanco	169.7
Zas	166.7
San Sadurniño	152.1
Monfero	146.3
Melide	111.2
Valdoviño	111.2
Irixoa	90.7
Lousame	87.8
Aranga	87.8
Rois	81.9

Tabla 18.2: Residuo eólico en tonelada de peso generado en la provincia de A Coruña hasta el año 2045.

A CORUÑA	
Ayuntamiento	Peso total de residuo eólico (tn)
Sobrado	79.0
Cabana de Bergantiños	76.1
Silleda	73.1
Toques	70.2
A Capela	64.4
Tordoia	41.0
Malpica de Bergantiños	41.0
Rianxo	35.1
Narón	35.1
Boimorto	32.2
Dodro	29.3
Arteixo	11.7
Padrón	11.7
Cerceda	11.7
Boiro	5.9
A Laracha	5.9
TOTAL	9,424.4

- Lugo

Tabla 19: Residuo eólico en tonelada de peso generado en la provincia de Lugo hasta el año 2045.

LUGO	
Ayuntamiento	Peso total de residuo eólico (tn)
Muras	4,572.0
Abadín	2,376.0
Ouro	1,878.0
Vilalba	1,548.0
O Valadouro	1,440.0
O Vicedo	1,008.0
A Fonsagrada	768.0
Viveiro	600.0
Xermade	522.0
Mondoñedo	468.0
Guitiriz	468.0
Alfoz	420.0
Ribeira de Piquín	396.0
Friol	396.0
Meira	360.0
Palas de Rei	300.0
Castroverde	294.0
Chantada	252.0
Baleira	204.0
Cervo	198.0
Xove	132.0
Carballedo	120.0
A Pontenova	114.0
Foz	108.0
Sarria	72.0
A Patoriza	60.0
Pol	54.0
O Páramo	48.0
Riorto	30.0
Antas de Ulla	24.0
TOTAL	19,230.0

- Pontevedra

Tabla 20: Residuo eólico en tonelada de peso generado en la provincia de Pontevedra hasta el año 2045.

PONTEVEDRA	
Ayuntamiento	Peso total de residuo eólico (tn)
Forcarei	1,266.0
Lalín	960.0
A Cañiza	744.0
A Lama	618.0
Covelo	588.0
Rodeiro	432.0
As Neves	276.0
Arbo	276.0
Cerdedo-Cotovade	252.0
Agolada	132.0
Catoira	120.0
Vila de Cruces	96.0
Fornelos de Montes	60.0
Caldas de Reis	48.0
Cuntis	36.0
A Estrada	24.0
Vilagarcía de Arousa	24.0
TOTAL	5,952.0

- Orense

Tabla 21: Residuo eólico en tonelada de peso generado en la provincia de Orense hasta el año 2045.

ORENSE	
Ayuntamiento	Peso total de residuo eólico (tn)
Nogueira de Ramuín	636.0
Cualedó	534.0
Avión	486.0
O Irixo	444.0
Montederramo	432.0
Chandrexa de Queixa	420.0
Melón	216.0
Parada de Sil	204.0
Verea	180.0
Xunqueira de Espadanedo	72.0
Baltar	48.0
Bande	48.0
Castro Caldelas	48.0
Piñor	24.0
Xinzo de Limia	6.0
TOTAL	3,798.0

Tabla 22: Residuo eólico a nivel provincial para el año 2045.

Provincia	Potencia instalada (MW)	Nº de aerogeneradores	Residuo eólico (Tn)
A Coruña	1,196.0	1,611.0	9,424.4
Lugo	1,454.0	1,602.5	19,230.0
Pontevedra	450.0	496.0	5,952.0
Ourense	312.0	316.5	3,798.0
Total	3,412.0	4,026.0	38,404.4

El residuo eólico total calculado para la comunidad gallega en la Hipótesis 3 es de **38,404.4** toneladas, valor ligeramente inferior al de las otras dos hipótesis, pero bastante similar. Cabe destacar que el residuo estimado para la provincia de Lugo es el superior, pese a tener un número mayor de aerogeneradores la provincia de A Coruña. La potencia instalada en la provincia de Lugo es superior, por lo tanto, aunque el número de aerogeneradores sea menor, son de mayores dimensiones, por tanto, con el modelo aplicado, se considera que el residuo generado será mayor.

4.4 Hipótesis Nº4: Ubicación de central de gestión de RE.

En esta hipótesis número 4 se parte de los resultados obtenidos en la en la **Hipótesis Nº3** y se aplica la ecuación del centro de masas o centroide del **Apartado 3.4**, con el fin de determinar la ubicación óptima de una central para gestionar el potencial residuo

eólico de la comunidad gallega. Se optimiza la ubicación a nivel provincial y luego se repite el proceso para obtener la ubicación a nivel autonómico.

- A Coruña

Tabla 23.1: Cálculo de las coordenadas del centro de masas del residuo eólico en la provincia de A Coruña.

A CORUÑA						
Ayuntamiento	m (tn)	X (°)	Y (°)	mi/M	(mi*xi)/M	(mi*yi)/M
As Pontes de García Rodríguez	813.15	43.4502	-7.8532	0.0863	3.7490	-0.6776
Mazaricos	722.48	42.9361	-8.9900	0.0767	3.2915	-0.6892
Ortigueira	678.60	43.6831	-7.8500	0.0720	3.1454	-0.5652
Dumbria	666.90	43.0104	-9.1180	0.0708	3.0436	-0.6452
Somozas	508.95	43.5330	-7.9441	0.0540	2.3509	-0.4290
Mañón	427.05	43.7361	-7.7056	0.0453	1.9818	-0.3492
Cedeira	409.50	43.6500	-8.0500	0.0435	1.8966	-0.3498
Vimianzo	397.80	43.1100	-9.0344	0.0422	1.8197	-0.3813
Ponteceso	368.55	43.2429	-8.9005	0.0391	1.6911	-0.3481
Santa Comba	330.53	43.0384	-8.8143	0.0351	1.5094	-0.3091
Porto do Son	298.35	42.7246	-9.0059	0.0317	1.3525	-0.2851
Carnota	289.58	42.8211	-9.0872	0.0307	1.3157	-0.2792
Negreira	286.65	42.9110	-8.7350	0.0304	1.3052	-0.2657
Pobra do Caramiñal	280.80	42.6000	-8.9333	0.0298	1.2693	-0.2662
Cariño	257.40	43.7414	-7.8692	0.0273	1.1947	-0.2149
Camariñas	245.70	43.1300	-9.1850	0.0261	1.1244	-0.2395
Muros	239.85	42.7744	-9.0575	0.0255	1.0886	-0.2305
Muxía	198.90	43.1062	-9.2175	0.0211	0.9098	-0.1945
Outes	175.50	42.8511	-8.9264	0.0186	0.7980	-0.1662
Coristanco	169.65	43.1863	-8.7404	0.0180	0.7774	-0.1573
Zas	166.73	43.0953	-8.9242	0.0177	0.7624	-0.1579
San Sadurniño	152.10	43.5327	-8.0727	0.0161	0.7026	-0.1303
Monfero	146.25	43.3268	-8.0494	0.0155	0.6724	-0.1249
Melide	111.15	42.9146	-8.0136	0.0118	0.5061	-0.0945
Valdoviño	111.15	43.6000	-8.1331	0.0118	0.5142	-0.0959
Irixoa	90.68	43.2877	-8.0487	0.0096	0.4165	-0.0774
Lousame	87.75	42.7589	-8.8294	0.0093	0.3981	-0.0822
Aranga	87.75	43.2339	-8.0158	0.0093	0.4026	-0.0746
Rois	81.90	42.7623	-8.7071	0.0087	0.3716	-0.0757
Sobrado	78.98	43.0419	-8.0275	0.0084	0.3607	-0.0673
Cabana de Bergantiños	76.05	43.1898	-8.9142	0.0081	0.3485	-0.0719
Silleda	73.13	42.6980	-8.2466	0.0078	0.3313	-0.0640
Toques	70.20	42.9690	-7.9557	0.0074	0.3201	-0.0593
A Capela	64.35	43.4353	-8.0722	0.0068	0.2966	-0.0551
Tordoia	40.95	43.1069	-8.5724	0.0043	0.1873	-0.0372

Tabla 24.2: Cálculo de las coordenadas del centro de masas del residuo eólico en la provincia de A Coruña.

A CORUÑA						
Ayuntamiento	m (tn)	X (°)	Y (°)	mi/M	(mi*xi)/M	(mi*yi)/M
Malpica de Bergantiños	40.95	43.2984	-8.8246	0.0043	0.1881	-0.0383
Rianxo	35.10	42.6489	-8.8174	0.0037	0.1588	-0.0328
Narón	35.10	43.5011	-8.1926	0.0037	0.1620	-0.0305
Boimorto	32.18	43.0075	-8.1269	0.0034	0.1468	-0.0277
Dodro	29.25	42.7155	-8.7148	0.0031	0.1326	-0.0270
Arteixo	11.70	43.3000	-8.5000	0.0012	0.0538	-0.0106
Padrón	11.70	42.7390	-8.6603	0.0012	0.0531	-0.0108
Cerceda	11.70	43.1886	-8.4703	0.0012	0.0536	-0.0105
Boiro	5.85	42.6500	-8.8833	0.0006	0.0265	-0.0055
A Laracha	5.85	43.2486	-8.5833	0.0006	0.0268	-0.0053
M	9,424.35				43.2076	-8.5103

Las coordenadas resultantes de la central de gestión de residuo eólico de la provincia de A Coruña son $\bar{X} = 43.2076$ e $\bar{Y} = -8.5103$ grados decimales, que se corresponden con el municipio de Laracha.



Ilustración 35: Ubicación de central de gestión de residuo eólico en la provincia de A Coruña (Fuente: GoogleMaps).

- Lugo

Tabla 25: Cálculo de las coordenadas del centro de masas del residuo eólico en la provincia de Lugo.

LUGO						
Ayuntamiento	m (tn)	X (°)	Y (°)	mi/M	(mi*xi)/M	(mi*yi)/M
Muras	4,572.00	43.4678	-7.7231	0.2378	10.3346	-1.8362
Abadín	2,376.00	43.3636	-7.4750	0.1236	5.3579	-0.9236
Ourol	1,878.00	43.5619	-7.6420	0.0977	4.2543	-0.7463
Vilalba	1,548.00	43.2963	-7.6786	0.0805	3.4853	-0.6181
O Valadouro	1,440.00	43.5345	-7.4843	0.0749	3.2600	-0.5604
O Vicedo	1,008.00	43.7325	-7.6734	0.0524	2.2924	-0.4022
A Fonsagrada	768.00	43.1333	-7.0667	0.0399	1.7226	-0.2822
Viveiro	600.00	43.6481	-7.5900	0.0312	1.3619	-0.2368
Xermade	522.00	43.3551	-7.8122	0.0271	1.1769	-0.2121
Mondoñedo	468.00	43.4281	-7.3628	0.0243	1.0569	-0.1792
Guitiriz	468.00	43.1819	-7.8953	0.0243	1.0509	-0.1921
Alfoz	420.00	43.5283	-7.4139	0.0218	0.9507	-0.1619
Ribeira de Piquín	396.00	43.1986	-7.2003	0.0206	0.8896	-0.1483
Friol	396.00	43.0289	-7.7908	0.0206	0.8861	-0.1604
Meira	360.00	43.2133	-7.2942	0.0187	0.8090	-0.1366
Palas de Rei	300.00	42.8803	-7.8718	0.0156	0.6690	-0.1228
Castroverde	294.00	43.0306	-7.3250	0.0153	0.6579	-0.1120
Chantada	252.00	42.6083	-7.7689	0.0131	0.5584	-0.1018
Baleira	204.00	43.0017	-7.2392	0.0106	0.4562	-0.0768
Cervo	198.00	43.6697	-7.4095	0.0103	0.4496	-0.0763
Xove	132.00	43.6858	-7.5089	0.0069	0.2999	-0.0515
Carballedo	120.00	42.5307	-7.8055	0.0062	0.2654	-0.0487
A Pontenova	114.00	43.3481	-7.1925	0.0059	0.2570	-0.0426
Foz	108.00	43.5689	-7.2550	0.0056	0.2447	-0.0407
Sarria	72.00	42.7778	-7.4144	0.0037	0.1602	-0.0278
A Patoriza	60.00	43.3004	-7.3512	0.0031	0.1351	-0.0229
Pol	54.00	43.1297	-7.3600	0.0028	0.1211	-0.0207
O Páramo	48.00	42.8276	-7.5149	0.0025	0.1069	-0.0188
Riotorto	30.00	43.3256	-7.2733	0.0016	0.0676	-0.0113
Antas de Ulla	24.00	42.7823	-7.8897	0.0012	0.0534	-0.0098
M	19,230.00				43.3912	-7.5812

Las coordenadas resultantes de la central de gestión de residuo eólico de la provincia de Lugo son $\bar{X} = 43.3912$ e $\bar{Y} = -7.5812$ grados decimales, que se corresponden con el municipio de Villalba.



Ilustración 36: Ubicación de central de gestión de residuo eólico en la provincia de Lugo (Fuente: GoogleMaps).

- Pontevedra

Tabla 26: Cálculo de las coordenadas del centro de masas del residuo eólico en la provincia de Pontevedra.

PONTEVEDRA						
Ayuntamiento	m (tn)	X (°)	Y (°)	mi/M	(mi*xi)/M	(mi*yi)/M
Forcarei	1,266.00	42.5922	-8.3501	0.2127	9.0594	-1.7761
Lalín	960.00	42.6614	-8.1110	0.1613	6.8809	-1.3082
A Cañiza	744.00	42.2128	-8.2744	0.1250	5.2766	-1.0343
A Lama	618.00	42.3969	-8.4423	0.1038	4.4021	-0.8766
Covelo	588.00	42.2314	-8.3632	0.0988	4.1721	-0.8262
Rodeiro	432.00	42.6493	-7.9472	0.0726	3.0955	-0.5768
As Neves	276.00	43.4314	-8.0564	0.0464	2.0140	-0.3736
Arbo	276.00	42.1123	-8.3124	0.0464	1.9528	-0.3855
Cerdedo-Cotovade	252.00	42.4719	-8.4819	0.0423	1.7982	-0.3591
Agolada	132.00	42.7622	-8.0197	0.0222	0.9484	-0.1779
Catoira	120.00	42.6611	-8.7149	0.0202	0.8601	-0.1757
Vila de Cruces	96.00	42.7951	-8.1683	0.0161	0.6902	-0.1317
Fornelos de Montes	60.00	42.3403	-8.4514	0.0101	0.4268	-0.0852
Caldas de Reis	48.00	42.6028	-8.6383	0.0081	0.3436	-0.0697
Cuntis	36.00	42.6353	-8.5618	0.0060	0.2579	-0.0518
A Estrada	24.00	42.6892	-8.4872	0.0040	0.1721	-0.0342
Vilagarcía de Arousa	24.00	42.5951	-8.7431	0.0040	0.1718	-0.0353
M	5,952.00				42.5224	-8.2778

Las coordenadas resultantes de la central de gestión de residuo eólico de la provincia de Pontevedra son $\bar{X} = 42.5224$ e $\bar{Y} = -8.2778$ grados decimales, que se corresponden con A Portela de Lamas en la parroquia de Pardesoa, municipio de Forcarei.

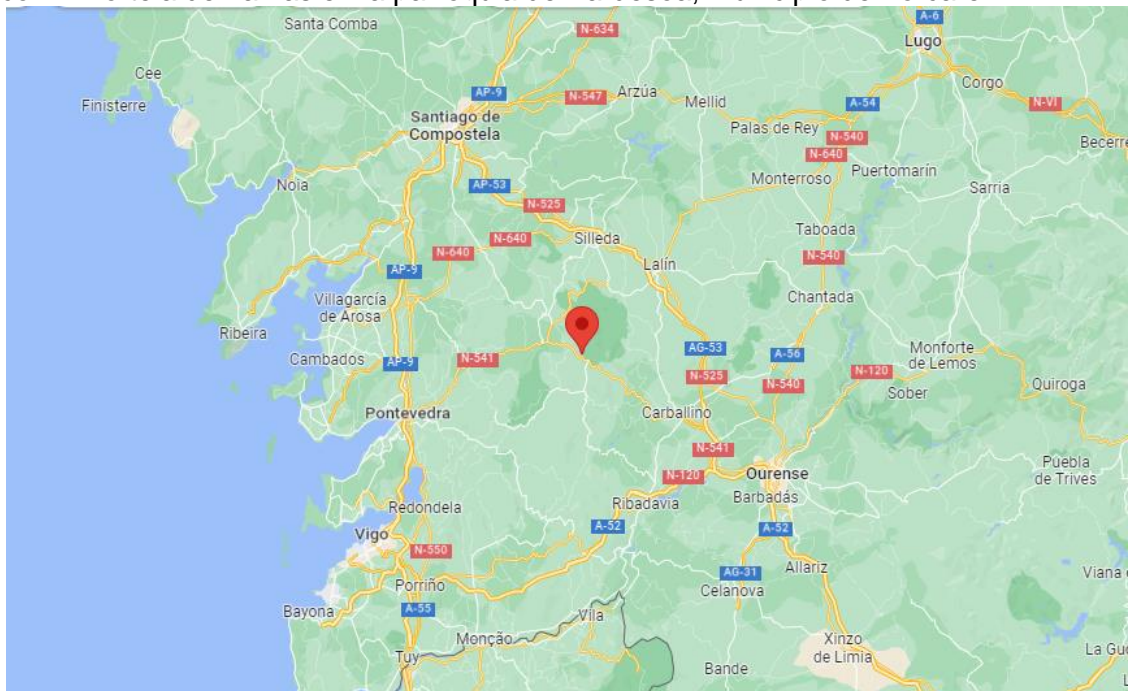


Ilustración 37: Ubicación de central de gestión de residuo eólico en la provincia de Pontevedra (Fuente: GoogleMaps).

- Orense

Tabla 27: Cálculo de las coordenadas del centro de masas del residuo eólico en la provincia de Orense.

ORENSE						
Ayuntamiento	m (tn)	X (°)	Y (°)	mi/M	(mi*xi)/M	(mi*yi)/M
Nogueira de Ramuín	636.00	42.4197	-7.7531	0.1675	7.1035	-1.2983
Cualedro	534.00	41.9831	-7.5831	0.1406	5.9028	-1.0662
Avión	486.00	42.3883	-8.2728	0.1280	5.4241	-1.0586
O Irixo	444.00	42.5119	-8.1183	0.1169	4.9698	-0.9491
Montederramo	432.00	42.2767	-7.5042	0.1137	4.8087	-0.8536
Chandrea de Queixa	420.00	42.2403	-7.4261	0.1106	4.6711	-0.8212
Melón	216.00	42.2575	-8.2172	0.0569	2.4033	-0.4673
Parada de Sil	204.00	42.3831	-7.5689	0.0537	2.2765	-0.4065
Verea	180.00	42.0939	-7.9936	0.0474	1.9950	-0.3788
Xunqueira de Espadanedo	72.00	42.3175	-7.6286	0.0190	0.8022	-0.1446
Baltar	48.00	41.9500	-7.7158	0.0126	0.5302	-0.0975
Bande	48.00	42.0306	-7.9753	0.0126	0.5312	-0.1008
Castro Caldelas	48.00	42.3750	-7.4156	0.0126	0.5355	-0.0937
Piñor	24.00	42.4978	-8.0050	0.0063	0.2685	-0.0506
Xinzo de Limia	6.00	42.0636	-7.7239	0.0016	0.0665	-0.0122
M	3,798.00				42.2889	-7.7991

Las coordenadas resultantes de la central de gestión de residuo eólico de la provincia de Orense son $\bar{X} = 42.2889$ e $\bar{Y} = -7.7991$ grados decimales, que se corresponden con el municipio de San Ciprián de Viñas.

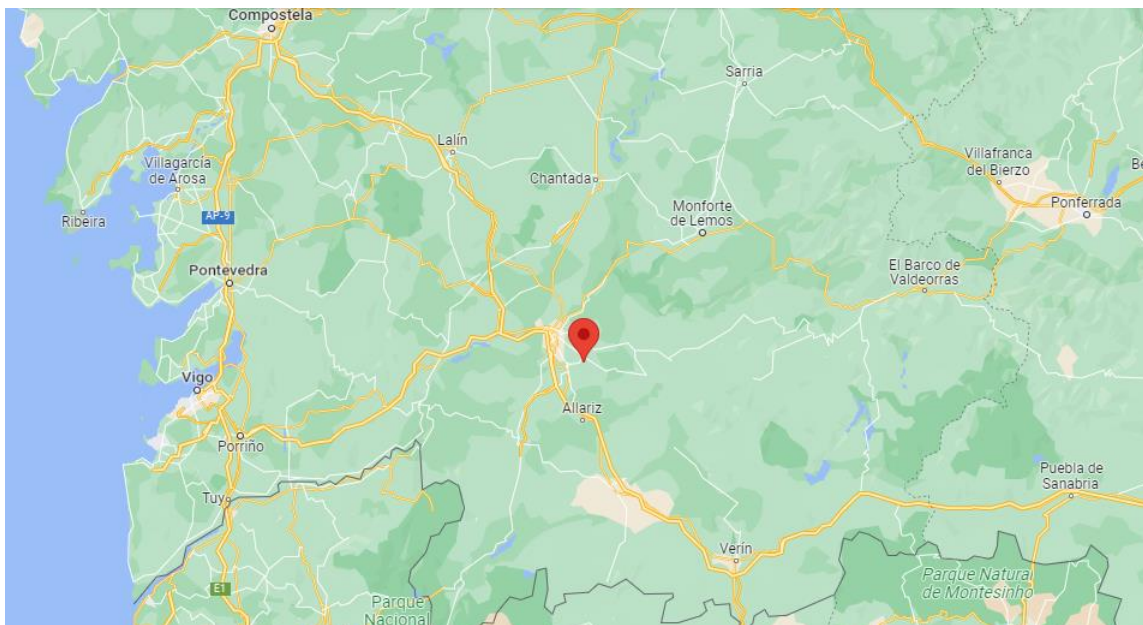


Ilustración 38: Ubicación de central de gestión de residuo eólico en la provincia de Orense (Fuente: GoogleMaps).

En el plano autonómico los resultados serían los siguientes:

Tabla 28: Cálculo de las coordenadas del centro de masas del residuo eólico en Galicia.

GALICIA						
Provincia	m (tn)	X (°)	Y (°)	mi/M	(mi*xi)/M	(mi*yi)/M
A Coruña	9,424.35	43.2076	-8.5103	0.2454	10.6031	-2.0884
Lugo	19,230.00	43.3912	-7.5812	0.5007	21.7271	-3.7961
Pontevedra	5,952.00	42.5224	-8.2778	0.1550	6.5902	-1.2829
Ourense	3,798.00	42.2889	-7.7991	0.0989	4.1822	-0.7713
M	38,404.35				43.1025	-7.9387

Las coordenadas resultantes de la central de gestión de residuo eólico de la comunidad gallega son $\bar{X} = 43.1025$ e $\bar{Y} = -7.9387$ grados decimales, entre el municipio de Sobrado en la provincia de A Coruña y el de Friol y Guitiriz, en Lugo.

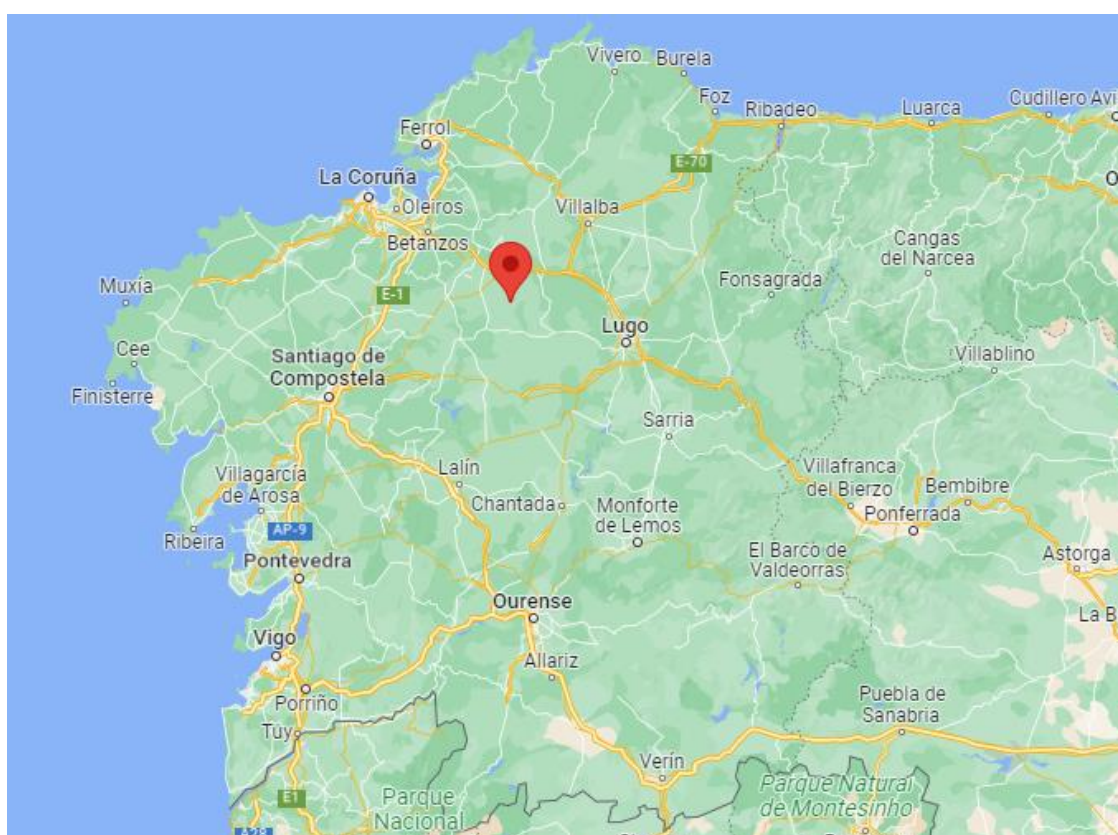


Ilustración 39: Centro de masas de residuo eólico en Galicia (Fuente: GoogleMaps).

De los tres municipios, el que tiene mayor residuo eólico es Guitiriz, con 468 toneladas según el modelo, seguido de Friol, con 369 toneladas y por último Sobrado, con 79 toneladas. Además, el que tiene mejor comunicación con la red viaria es también Guitiriz, estando localizado al lado de la autovía A6 y la carretera N-VI, contando además con estaciones de servicio. Siguiendo estos criterios se determina como la mejor ubicación para una futura central de gestión de residuo eólico, el municipio de Guitiriz, en la provincia de Lugo.

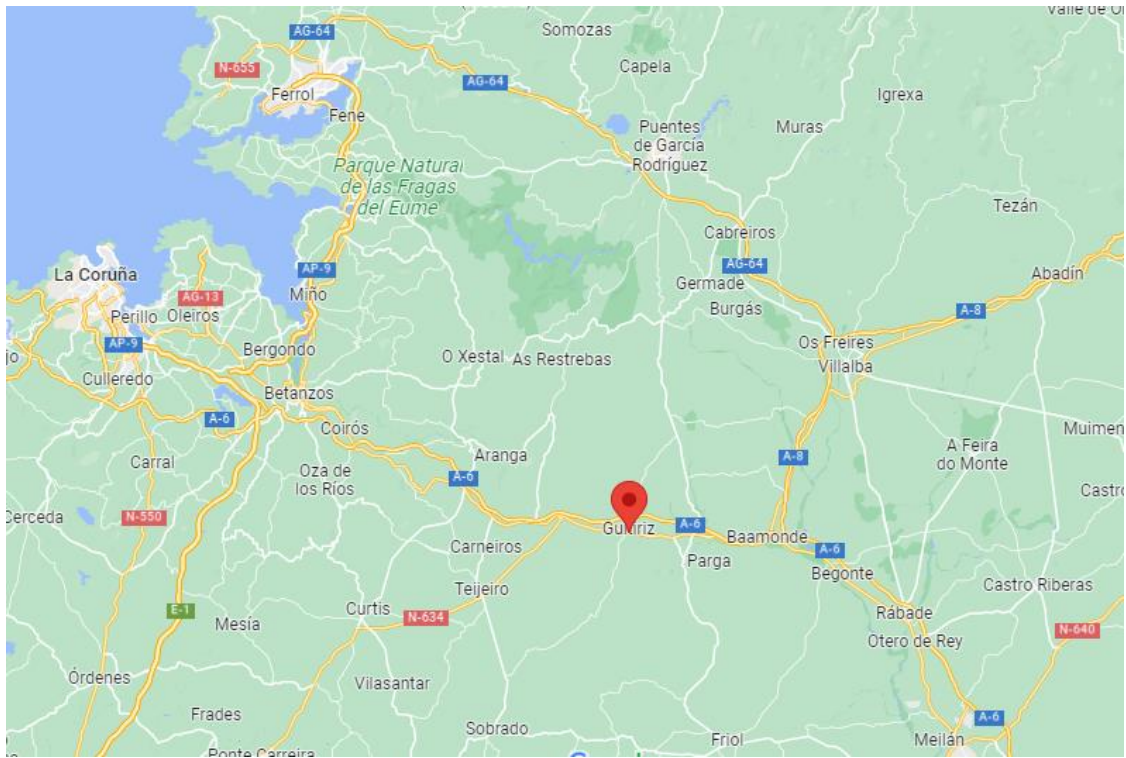


Ilustración 40: Ubicación de central de gestión de residuo eólico en Galicia.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Tras la elaboración del presente documento, se concluye que la gestión del residuo procedente de los parques eólicos es un problema ya no del futuro, sino del presente. En España, y en concreto en Galicia, no existe prácticamente legislación para tratar este problema y una gran parte de los parques eólicos de la comunidad están llegando al final de su vida útil.

En cuanto al cálculo del residuo eólico, los datos hablan por sí solos, entre el año 1997 y el año 2008 se construyeron la mayoría de parques eólicos de Galicia, los años posteriores hasta el día de hoy a penas se incrementaron y en los últimos años, se puede observar en los datos que el número de aerogeneradores han disminuido, esto corresponde probablemente con la repotenciación de algunos parques, lo que refuerza la teoría de que en los próximos años, llegando al final de su vida útil, se generará un residuo de gran dimensión en la comunidad gallega.

El residuo total calculado con el modelo matemático con el que se tendrá que lidiar en el año 2030, es de **40,114.36** toneladas en la **Hipótesis 1**. En la **Hipótesis 2**, se calcula con la misma metodología el residuo eólico con el total de los datos obtenidos, para el año 2045, el resultado es muy similar, confirmando las suposiciones consideradas en la Hipótesis 1, con un residuo eólico total de **40,699.21** toneladas. El coste de enviar este residuo a vertedero sería aproximadamente de **1,083,087.80 €** y de **1,098,878.60 €** en la **Hipótesis 1** y **2** respectivamente, sin tener en cuenta los costes de transporte y logística y el impacto medioambiental que supondría.

En la **Hipótesis 3** la perspectiva del análisis es distinta, enfocándose en la ubicación del residuo eólico. Se aplica el modelo a nivel provincial, aspecto que resulta muy interesante a la hora de determinar la ubicación de una posible central de tratamiento de residuo eólico.

En la **Hipótesis 4**, según los resultados obtenidos la ubicación más óptima de una central de gestión de residuos eólicos sería en el ayuntamiento de Guitiriz, en la provincia de Lugo, después de aplicar la ecuación del centro de masas o centroide sobre los resultados obtenidos en la **Hipótesis 3**. Se elige esta localización como la óptima por ser el punto medio de referencia estratégica en cuanto a la proporción de residuo en toda la comunidad gallega, además de contar con buenas conexiones viarias con el resto de la comunidad gallega y estaciones de servicio.

Finalmente, podemos concluir que los resultados reflejados por la aplicación de nuestro modelo son bastante lógicos, ya que los valores calculados en las tres hipótesis de este trabajo se encuentran en una horquilla comprendida entre los valores de los modelos matemáticos utilizados como referencia.

Como trabajos futuros, en lo referente al cálculo de residuo eólico, todavía hay mucho trabajo por hacer, los modelos matemáticos utilizados tienen amplio margen de mejora, pero sería necesaria una base de datos más amplia, para minimizar el error y se necesitaría la colaboración de fabricantes y empresas de generación energética que faciliten la información referente a sus parques eólicos.

En cuanto a las tecnologías de reciclaje de palas están en diferentes niveles de desarrollo, pero incluso las más avanzadas siguen teniendo un efecto contaminante, tanto en emisiones de CO₂ como en la liberación de partículas tóxicas derivadas de la fibra de vidrio y de carbono. La opción que parece óptima para gestionar este tipo de residuos es la de upcycling o reubicación. Existen varios ejemplos en varios países de Europa de la reutilización de palas de aerogeneradores, que han llegado al final de su vida útil, en otras áreas y cumpliendo nuevas funciones, el problema es que estas nuevas soluciones por el momento son prototipos y no se ha llegado todavía a su producción a nivel comercial y en masa, lo cual sería necesario para responder a la

cuestión de qué hacer con la gran cantidad de residuo eólico que se generará en los próximos años.

La inclusión de este tipo de residuo en la ingeniería civil también es un frente abierto bastante interesante. Se ha demostrado que el residuo eólico procedente del reciclaje mecánico de las palas puede utilizarse como refuerzo en piezas de hormigón prefabricado, que podrían utilizarse en el ámbito de la construcción e incluso de la edificación.

6 REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- AEE, 2020. Anuario Eólico 2020. Sitio web: <https://aeeolica.org/aee-anuario-2020/>
- Albers, H., 2009. Recycling of wind turbine rotor blades - fact or fiction? DEWI Mag. 34, 32–41
- Andersen, P.D. et al., 2014. Recycling of wind turbines. Sitio web: http://www.natlab.dtu.dk/english/Energy_Reports/DIER_2014
- Anthony, J., 2014. AWEA U.S. Wind Energy Industry Market Update. Sitio web: <http://www.awea.org/Resources/Content.aspx?ItemNumber=6386>
- Boletín Oficial del Estado Español (BOE). Sitio web <https://www.boe.es/>
- Briviero, D., 2018. Innovación y gestión del conocimiento - ¿Qué son los TRL y para qué sirven? (Visitado, 2022). Sitio web: <https://dbriveiro.wordpress.com/2018/03/27/que-son-los-trl-y-para-que-sirven/>
- CWEA, 2014. 2013 China Wind Installations Statistics, Beijing
- EWEA, 2013. EWEA 2013 Annual Report (Visitado, 2022). Sitio web: <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=NkTWxqDX588C&oi=fnd&pg=PA6&dq=EWEA+2013+Annual+Report&ots=nON53dqXv9&sig=8v8mbJKvFGrAAb1arLScko-6GDo>
- EWEA, 2014. Wind Energy Scenarios for 2020, pp. 1–8. (Visitado, 2022). Sitio web: <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/scenarios/EWEA-Wind-energyscenarios-2020.pdf>
- Gurit Composites, 2009. Wind Turbine Blade Structural Engineering. Sitio web: http://www.gurit.com/files/documents/3_blade_structure.pdf
- GWEC, 2013. Global Wind Statistics 2012, Brussels Sitio web: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2013/02/GWEC-PRstats-2012_english.pdf
- GWEC, 2014a. Global Wind Energy Outlook 2014 Sitio web: <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/Market-forecast-2014-2018.pdf>
- GWEC, 2014b. Market Forecast for 2014–2018, Brussels Sitio web: <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/Market-forecast-2014-2018.pdf>
- GWEC, 2015. Global Wind Report Annual Market Update 2014 Sitio web: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/03/GWEC_Global_Wind_2014_Report_LR.pdf
- Hayman, B., Wedel-Heinen, J., Brøndsted, P., 2008. Materials challenges in present and future wind energy. MRS Bull. 33 (4), 343–353
- IEA, 2011. Wind Energy Technology Roadmap. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg
- IRENA, 2012. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series - Wind Power 1 (5), 4–35
- Liu, P., 2014. Wind Turbine Blade Market Trend
- Liu, P., Barlow, C., 2015: EWEA Annual Conference. EWEA, Paris
- Liu, P., Barlow, C., 2016a. The environmental impact of wind turbine blades. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 139, 12032
- Liu, P., Barlow, C., 2016b. The environmental impact of Wind Turbine Blades (Presentation). 37th Risoe International Symposium on Material Science, 1–16
- Observatorio Eólico de Galicia, 2020. Energía Eólica en Galicia (Visitado 2022). Sitio web: <https://observatorio.eolico.uvigo.es/energia-eolica-en-galicia/?lang=es>

Red, C., 2006. Wind turbine blades: big and getting bigger. Composite Technology. Sitio web: <http://www.compositesworld.com/articles/wind-turbine-bladesbig-and-getting-bigge>

Schmid, M., Gonzalez N., Dierckx, A., Wegman, T., 2020. Accelerating Wind Turbine Blade Circularity. Sitio web: <https://www.windeurope.org/>

Siemens AG, 2015. Robust and low weight: all-rounder blades. Siemens AG Website

Sieros, G., Chaviaropoulos, P., 2012. Upscaling wind turbines: theoretical and practical aspects and their impact on the cost of energy. Wind Energy 15 (1), 3–17

Vestas, 2006. Life Cycle Assessment of Offshore and on Shore Sited Wind Power Plants Based on Vestas V90-3.0 MW Turbines

Vitina, A. et al., 2015. IEA Wind Task 26: Wind Technology, Cost, and Performance Trends in Denmark, Germany, Ireland, Norway, the European Union, and the United States, 2007–2012, 54

Woebbeking, M., 2012. Turbine size: is big always beautiful? In: EWEA Annual 2012. Sitio web: <http://www.ewea.org/blog/2012/04/turbine-size-is-bigalways-beautiful/>