



Universidad de Valladolid

**Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal,
Agronómica y de la Bioenergía**

Campus de Soria

MÁSTER EN INGENIERÍA DE LA BIOENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**TÍTULO: EVALUACIÓN DE FLUJO NETO DE EMISIONES
Y HUELLA DE CARBONO DE UN PARQUE EÓLICO**

AUTOR: Iván Postigo Casado

DEPARTAMENTO: Ingeniería Agrícola y Forestal

TUTOR/ES: Miguel V. Broto Cartagena

SORIA, septiembre de 2024



Universidad de Valladolid

**VISTO BUENO DEL TUTOR/ES PARA LA PRESENTACIÓN DEL TRABAJO
FIN DE MÁSTER**

Según lo dispuesto en el Real Decreto 1393/2007, de 29 de octubre,
por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales,
y como profesor tutor del trabajo de fin de estudios en el título de

Máster en INGENIERÍA DE LA BIOENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

de la (SO) Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y de la Bioenergía

de la Universidad de Valladolid, D. MIGUEL BROTO CARTAGENA

y

DECLARA/N que el/la estudiante D. Iván Postigo Casado

ha realizado bajo su tutela el trabajo titulado:

Evaluación de flujo neto de emisiones y huella de carbono de un parque eólico

Breve informe del tutor/es

El TFM está bien entroncado en los contenidos y competencias del Máster, con un buen planteamiento desde el punto de vista académico e incluso profesional, bien resuelto en su desarrollo, dotado de originalidad, y demostrando una sobresaliente capacidad.

Considera/n que el TFM anteriormente mencionado cumple los requisitos establecidos y AUTORIZA/N su presentación para la defensa ante la Comisión evaluadora correspondiente.

En Soria , a fecha de firma electrónica

Fdo.: El tutor/es
BROTO CARTAGENA
MIGUEL VICTORIAN
- 18021444R

Firmado digitalmente por BROTO
CARTAGENA MIGUEL VICTORIAN -
18021444R
Fecha: 2024.09.18 18:52:31 +02'00'



Universidad de Valladolid

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER *

D./D.º Iván Postigo Casado

con DNI/pasaporte 71150562Q y estudiante del Máster en

Máster en Ingeniería de la Bioenergía y Sostenibilidad Energética

de la (SO) Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y de la Bioenergía

de la Universidad de Valladolid, del curso 2023/2024 como autor/a del TFM titulado:

Evaluación de flujo neto de emisiones y huella de carbono de un parque eólico

DECLARO QUE:

El trabajo que presento para su exposición y defensa es original y no he utilizado fuentes de información, sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía.

Asimismo, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos términos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Valladolid, a 19 de septiembre de 2024

Firma:

***Reglamento sobre la elaboración y evaluación del trabajo de fin de máster**, artículo 2.1: El TFM ha de ser original e inédito y debe ser realizado por el estudiante bajo la supervisión y la orientación de su correspondiente tutor académico.

RESUMEN

El cálculo de la huella de carbono de un parque eólico es un proceso integral que abarca todo el ciclo de vida del proyecto, desde la extracción de materias primas hasta el desmantelamiento final. Este estudio considera las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a cada etapa, incluyendo la fabricación de componentes, la construcción del parque, su operación y mantenimiento.

Es fundamental señalar que la mayor parte de las emisiones, entre el 68% y el 85%, se concentran en las fases iniciales del proyecto, principalmente en la extracción y procesamiento de materiales necesarios para la fabricación de los aerogeneradores y la construcción del parque. La metodología más común para este cálculo es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que implica multiplicar los datos de actividad por factores de emisión estandarizados.

A diferencia de las fuentes convencionales de energía, la energía eólica no produce emisiones de gases de efecto invernadero durante su operación, lo que la convierte en una opción mucho más favorable para la reducción de emisiones en el sector eléctrico y la mitigación del cambio climático. Por ello, resulta esencial comparar la energía eólica con las fuentes convencionales, y estudiar cuándo un parque eólico en fase de operación alcanza el tiempo de retorno de carbono. Este punto se logra cuando las emisiones asociadas a la huella de carbono del parque han sido compensadas por la energía limpia producida.

En el contexto del presente estudio, los resultados obtenidos muestran que el tiempo de retorno de carbono para un parque eólico terrestre es de menos 6 meses. Esto resalta la eficiencia de la energía eólica en comparación con las fuentes convencionales, tanto en términos de huella de carbono como de beneficios medioambientales a largo plazo.

ABSTRACT

Calculating the carbon footprint of a wind farm is a comprehensive process that covers the entire life cycle of the project, from the extraction of raw materials to final decommissioning. This study considers the greenhouse gas emissions associated with each stage, including component manufacturing, wind farm construction, operation and maintenance.

It is essential to note that most of the emissions, between 68% and 85%, are concentrated in the initial phases of the project, mainly in the extraction and processing of materials necessary for the manufacture of the wind turbines and the construction of the wind farm. The most common methodology for this calculation is Life Cycle Assessment (LCA), which involves multiplying activity data by standardized emission factors.

Unlike conventional energy sources, wind energy does not produce greenhouse gas emissions during operation, which makes it a much more favorable option for reducing emissions in the electricity sector and mitigating climate change. It is therefore essential to compare wind energy with conventional sources, and to study when a wind farm in operation reaches the carbon payback time. This point is achieved when the emissions associated with the wind farm's carbon footprint have been offset by the clean energy produced.

In the context of the present study, the results obtained show that the carbon payback time for an onshore wind farm is minus 6 months. This highlights the efficiency of wind energy compared to conventional sources, both in terms of carbon footprint and long-term environmental benefits.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Definición y alcance	2
1.2.	Objetivo.....	2
2.	ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO	3
2.1.	Aerogenerador	3
2.1.1.	Góndola	3
2.1.2.	Palas.....	4
2.1.3.	Torre y jaula de pernos.....	4
2.1.4.	Cimentación	5
2.1.5.	Plataforma.....	7
2.1.6.	Viales	8
2.2.	Localización	10
2.3.	Masa forestal afectada	11
3.	DIMENSIONAMIENTO DE MATERIALES.....	12
3.1.	Fase de construcción	12
3.1.1.	Góndola	12
3.1.2.	Torre	13
3.1.3.	Palas.....	14
3.1.4.	Cimentación	14
3.2.	Transporte.....	14
3.2.1.	Componentes.....	14
3.2.2.	Hormigón	18
3.3.	Fase de operación	20
3.4.	Fase de desmantelamiento	20
3.4.1.	Transporte a plantas de reciclaje	21
3.	METODOLOGÍA.....	25
3.1.	CALCULO DE HUELLA DE CARBONO	25
3.1.1.	Fase de construcción.....	25
3.1.2.	Fase de operación	28
3.1.2.	Fase de desmantelamiento.....	28
3.1.2.1.	Desmontaje.....	29
3.1.2.2.	Procesamiento y gestión de residuos.....	30
3.3.	Huella de Carbono total en las tres fases	31
3.4.	Compensación de huella de carbono	32
3.4.1.	Emisiones netas 0.....	33
4.	CONCLUSIONES.....	35
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Detalles técnicos del aerogenerador	9
Tabla 2 Especificaciones técnicas del aerogenerador Siemens Gamesa SG 6.6-170. Fuente: Siemens Gamesa	13
Tabla 3 Pesaje total de la Torre. Fuente: Elaboración propia.....	13
Tabla 4 Pesaje total de las palas. Fuente: Elaboración propia	14
Tabla 5 Pesaje total del hormigón. Fuente: Elaboración propia	14
Tabla 6 Distancia de los lugares de origen de fabricación al Parque Eólico. Fuente: Elaboración propia.....	17
Tabla 7 Litros de combustible consumidos para el transporte de los componentes. Fuente: Elaboración propia.....	18
Tabla 8 Litros de combustible consumidos en vacío. Fuente: Elaboración propia	18
Tabla 9 Distancia ruta Cementos Cosmos-Foncebadón. Fuente: Elaboración propia	19
Tabla 10 Litros de combustible consumidos para el transporte de hormigón. Fuente: Elaboración propia.....	19
Tabla 11 Litros de combustible consumidos en vacío de una hormigonera. Fuente: Elaboración propia.....	20
Tabla 12 Litros de combustible consumidos hacia la planta de reciclaje. Fuente: Elaboración propia.....	22
Tabla 13 Litros de combustible consumidos en vacío hacia la planta de reciclaje. Fuente: Elaboración propia.....	22
Tabla 14 Litros de combustible consumidos hacia la planta de reciclaje en Almazán. Fuente: Elaboración propia.....	24
Tabla 15 Litros de combustible consumidos en vacío desde la planta de reciclaje en Almazán. Fuente: Elaboración propia.....	24
Tabla 16 Huella de carbono por cada componente de la góndola. Fuente: Elaboración propia.....	26
Tabla 17 Huella de carbono la torre del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia	26
Tabla 18 Huella de carbono las palas del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia	27
Tabla 19 Huella de carbono por el hormigón usado en la fase de construcción. Fuente: Elaboración propia.....	27
Tabla 20 Huella de carbono por el combustible usado en la fase de construcción. Fuente: Elaboración propia.....	28
Tabla 21 Huella de carbono por el desmontaje de los aerogeneradores. Fuente: Elaboración propia.....	29
Tabla 22 Huella de carbono por el reciclaje de cada componente del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia.....	30
Tabla 23 Huella de carbono del combustible necesario en la fase de desmantelamiento. Fuente: Elaboración propia	31
Tabla 24 Huella de carbono total en la fase de construcción. Fuente: Elaboración propia.	31
Tabla 25 Huella de carbono total en la fase de desmantelamiento. Fuente: Elaboración propia.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mecanismo de una Nacelle por dentro. Fuente: Siemens Gamesa.....	3
Figura 2 Detalles técnicos de la cimentación de un aerogenerador. Fuente: Siemens Gamesa.....	6
Figura 3 Ruta Ágreda-Foncebadón. Fuente: Google Maps.....	16
Figura 4 Ruta Reinosa-Foncebadón. Fuente: Google Maps.....	16
Figura 5 Ruta Aoiz-Foncebadón. Fuente: Google Maps.....	16
Figura 6 Ruta Zamudio-Foncebadón. Fuente: Google Maps.....	17
Figura 7 Ruta Cementos Cosmos-Foncebadón. Fuente: Google Maps.....	19
Figura 8 Ruta Cubillos del Sil-Foncebadón. Fuente: Google Maps.....	22
Figura 9 Ruta Almazán-Foncebadón. Fuente: Google Maps.....	23

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo teórico-práctico se enmarca en la aplicación de los conocimientos adquiridos a lo largo de la maestría en Ingeniería de la Bioenergía y Sostenibilidad Energética, y se centrará en un parque eólico ubicado en los municipios de Santa Colomba de Somoza y Torre del Bierzo (León). El objetivo es calcular la huella de carbono del proyecto en las distintas fases de su ciclo de vida, es decir, en la construcción, operación y desmantelamiento del mismo.

La evaluación de las distintas fuentes de producción de energía eléctrica permite cuantificar y contrastar los impactos que genera cada tecnología. En este sentido, se busca desmitificar la idea de que las energías alternativas son completamente limpias, mostrando su contribución a las emisiones a lo largo de su ciclo de vida, aunque estas sean ínfimas.

La huella de carbono (HC) se ha convertido en un instrumento fundamental para medir el impacto climático de diversas actividades humanas. Este concepto, que simplifica el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), se enfoca específicamente en la contribución al calentamiento global de productos, servicios o procesos. Las diferencias en la huella de carbono per cápita son notables a nivel mundial, variando desde aproximadamente 1 tonelada de CO₂ equivalente por año en países africanos hasta cerca de 30 toneladas en Estados Unidos. A escala global, las emisiones de gases de efecto invernadero se distribuyen de la siguiente manera: el 72% se debe al consumo familiar, el 18% proviene de las inversiones y el 10% corresponde al consumo gubernamental (*World Resources Institute, 2020*).

El interés por cuantificar la huella de carbono está aumentando en diversos sectores. Las empresas están evaluando sus cadenas de producción, los consumidores demandan información sobre el impacto de los productos, los inversores utilizan la HC como un indicador de riesgo y los gobiernos implementan políticas basadas en este indicador. Además, las instituciones educativas también están adoptando este enfoque. Un ejemplo destacado es la Universidad Politécnica de Madrid, que desde 2016 ha estado calculando su huella de carbono. Esta iniciativa, liderada por el Equipo Huella de Carbono Montes-UPM, no solo representa un compromiso con la responsabilidad social y ecológica, sino que también busca

optimizar presupuestos y mejorar la eficiencia energética (UPM, 2016).

Este enfoque innovador demuestra cómo la medición de la huella de carbono puede ser una herramienta valiosa para la gestión sostenible en diversos ámbitos, desde el individual hasta el institucional.

1.1. Definición y alcance

Se plantea llevar a cabo un estudio de la huella de carbono en un parque eólico, tomando como caso de estudio de un proyecto eólico en Santa Colomba de Somoza y Torre del Bierzo (León). El análisis se basará en los principios y requisitos del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), adoptando un enfoque "Cradle to Grave" que abarca todos los procesos productivos involucrados en la generación de energía eléctrica.

1.2. Objetivo

El objetivo de este estudio incluye determinar cuándo el parque eólico alcanzará emisiones cero a lo largo de su vida útil, es decir, el momento en que las emisiones evitadas por la generación de energía renovable compensen completamente las emisiones generadas en las fases de construcción y desmantelamiento. Además, se busca comparar esta huella de carbono con la de fuentes de energía convencionales, como las centrales de carbón o gas natural, que producen emisiones significativas durante toda su operación.

Este análisis permitirá evaluar el beneficio ambiental del parque eólico en relación con las alternativas fósiles y establecer el tiempo necesario para que el parque compense sus emisiones iniciales, alcanzando un impacto neto positivo en términos de carbono.

2. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO

El presente documento contempla la instalación de diez aerogeneradores modelo Siemens Gamesa SG 6.6-170, o equivalente, con una potencia unitaria de 6.6 MW, un diámetro de rotor de 172 metros y una altura de buje de 170 metros.

El parque eólico situado en los términos municipales de Santa Colomba de Somoza y Torre del Bierzo (66 MW) evacuará la energía generada a través de una Subestación Elevadora ubicada en el término municipal de Santa Colomba de Somoza. La energía será transportada mediante líneas aéreas hasta dicha subestación, desde donde se evacuará a través de una línea aérea de alta tensión.

2.1. Aerogenerador

2.1.1. *Góndola*

En la siguiente ilustración se presenta un esquema de los componentes principales del aerogenerador dentro de la “nacelle” o góndola para el modelo de aerogenerador seleccionado (**Fig. 1**).

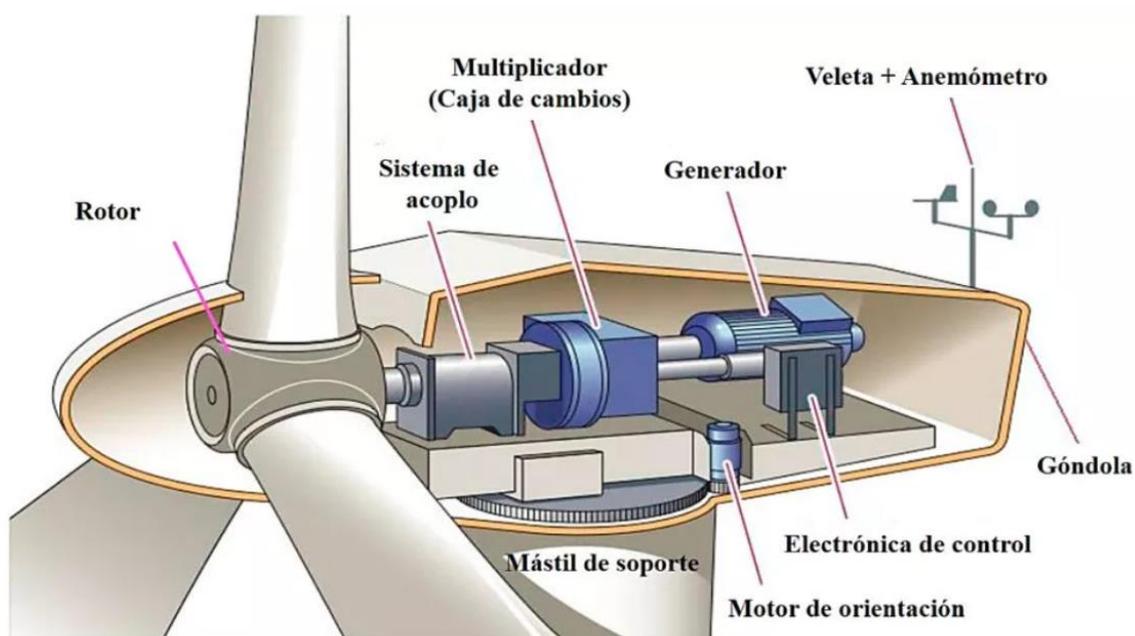


Figura 1 Mecanismo de una Góndola por dentro. Fuente: Siemens Gamesa

La nacelle, también conocida como góndola, es el corazón operativo del aerogenerador. Este componente crucial alberga toda la maquinaria necesaria para

transformar la energía cinética del viento en electricidad utilizable. Los elementos principales que se encuentran en su interior son:

1. Sistema de engranajes: Ajusta la velocidad de rotación para optimizar el rendimiento del generador.
2. Generador eléctrico: Convierte la energía mecánica de rotación en energía eléctrica.
3. Sistema de frenado: Diseñado para detener la rotación en situaciones de vientos excesivamente fuertes o ante fallos técnicos.
4. Sistema de orientación activo: Permite girar la góndola para mantener el rotor siempre orientado hacia el viento incidente, maximizando la captación de energía.

Además, el aerogenerador está equipado con un sistema de regulación automática del ángulo de paso (pitch). Esta tecnología permite que cada una de las tres palas gire de manera independiente sobre su eje longitudinal. Aunque las palas responden a la misma consigna de posición, tienen la capacidad de ajustarse a diferentes velocidades. Esta característica permite una optimización continua del rendimiento del aerogenerador, adaptándose a las condiciones cambiantes del viento y maximizando la eficiencia en la generación de energía.

2.1.2. Palas

El modelo de aerogenerador seleccionado es tripala y orientado hacia barlovento, en línea con los estándares actuales de la industria eólica.

2.1.3. Torre y jaula de pernos

Las torres de los aerogeneradores seleccionados para los parques eólicos analizados en este estudio presentan las siguientes características principales:

- Estructura y diseño

La torre tiene una forma troncocónica, más ancha en la base y más estrecha en la parte superior. Se fabrica en secciones separadas para facilitar el transporte y montaje. Está construida con acero de alta calidad, lo que proporciona la resistencia y durabilidad necesarias.

- Altura y tendencias

Las alturas específicas de las torres se detallan en tablas al final del apartado mencionado. La industria eólica tiende hacia torres cada vez más altas con el objetivo de captar vientos de mayor velocidad a mayores altitudes y maximizar la producción de energía del aerogenerador.

- Fabricación y transporte

Se construyen en módulos separados debido a la necesidad de facilitar el transporte desde la fábrica al sitio de instalación y permitir el montaje por etapas en el emplazamiento del parque eólico.

- Sistema de anclaje

La base de la torre se conecta a los cimientos mediante un sistema especializado que utiliza una "jaula de pernos", compuesta por conectores de acero. Este sistema asegura una fijación robusta y estable de la torre al suelo. Esta configuración de torre representa el estado actual de la tecnología en aerogeneradores terrestres, optimizando aspectos como eficiencia energética, facilidad de instalación y estabilidad estructural.

2.1.4. *Cimentación*

La cimentación del aerogenerador cumple un papel crucial en la estabilidad y funcionamiento de toda la estructura. Sus características principales son:

- Objetivo y función

La cimentación tiene como propósito fundamental garantizar la estabilidad de la torre del aerogenerador durante toda su vida útil. Esto se logra mediante la transferencia efectiva de las cargas recibidas al terreno

- Cargas soportadas:

Carga vertical: Proviene principalmente del peso propio de la torre, la góndola y las palas. Carga crítica: Generada por los esfuerzos del viento, siendo esta la más determinante en el diseño. Momento flector: Debido a la gran altura de la torre, una fuerza horizontal del viento produce un momento flector significativo en la base

- Diseño preliminar

En esta fase del proyecto, se ha realizado un prediseño basado en cargas

nivelada y limpia sobre la cual construir la cimentación principal.

- Encofrado

Se monta el encofrado, que es la estructura temporal que dará forma al hormigón de la cimentación.

- Armadura

Se instala la armadura de acero, que proporcionará resistencia y estabilidad a la estructura de hormigón.

- Sistema de anclaje

Se monta e instala el sistema de anclaje para la torre del aerogenerador. Este sistema es crucial para asegurar la correcta fijación de la torre a la cimentación.

- Hormigonado

Se procede al vertido del hormigón dentro del encofrado, asegurando su correcta distribución y compactación. Necesario para la base de un aerogenerador con 21 metros de diámetro y 3 metros de profundidad.

- Relleno final

Una vez que la cimentación ha fraguado y alcanzado la resistencia adecuada, se rellena el área circundante con material seleccionado proveniente de la excavación inicial. Este material se compacta cuidadosamente hasta recuperar la cota original del terreno. Este proceso de construcción de la cimentación es fundamental para garantizar la estabilidad y durabilidad del aerogenerador a lo largo de su vida útil, proporcionando una base sólida capaz de soportar las cargas y fuerzas a las que estará sometida la estructura.

2.1.5. *Plataforma*

Para el montaje de los aerogeneradores, se han definido plataformas paralelas a los viales del parque eólico que cumplen funciones esenciales en el proceso de instalación. Estas plataformas se dividen en varias áreas específicas:

- Zona de almacenamiento de los tramos de la torre

Esta área está destinada al acopio temporal de las secciones modulares que componen la torre del aerogenerador. Permite tener los componentes a mano y organizados para su montaje secuencial.

- Zona de acopio de palas

Espacio dedicado al almacenamiento de las palas del rotor. Dada la longitud y fragilidad de estos componentes, requieren un área específica que permita su manipulación segura.

- Zona de montaje de la grúa principal

Área preparada y reforzada para soportar el peso y las operaciones de la grúa principal, que se encargará de elevar los componentes pesados del aerogenerador durante su montaje.

- Zona de montaje de la pluma de la grúa

Espacio adicional necesario para el ensamblaje y despliegue de la pluma de la grúa principal, elemento crucial para alcanzar las alturas requeridas en el montaje de la torre y la góndola.

- Zona auxiliar (opcional)

Área complementaria destinada al acopio de contenedores y material de obra. Aunque se menciona como opcional, puede ser muy útil para la organización y eficiencia del proceso de construcción. Estas plataformas, con sus áreas diferenciadas, son fundamentales para garantizar un montaje eficiente y seguro de los aerogeneradores, facilitando la logística y las operaciones de construcción en el parque eólico.

2.1.6. *Viales*

Para facilitar el acceso a los aerogeneradores y a la torre meteorológica permanente del parque, se han definido los viales internos del parque eólico. Las características principales de estos viales son:

- Diseño y trazado

El objetivo es minimizar el impacto en el entorno, reduciendo la longitud de los viales y el movimiento de tierras. En áreas sin caminos previos, los nuevos viales se han trazado para minimizar afectaciones a las parcelas. Se ha planificado una red de caminos que interconecta las turbinas

- Funcionalidad

Permiten el tránsito de equipos y maquinaria durante el montaje. Aseguran el acceso para explotación y mantenimiento durante la vida útil del parque

- Modificaciones necesarias

Ampliación de algunos caminos existentes. Creación de nuevos tramos donde sea preciso. Vial de acceso al parque. Trazado planificado considerando carreteras cercanas. Busca minimizar el impacto ambiental y afectaciones a municipios adyacentes

- Tipos de secciones

- Con material granular: para la mayoría de los tramos
- Con hormigón: diseñada para tramos con pendientes pronunciadas, mejorando la tracción de vehículos de transporte

- Especificaciones técnicas

Las dimensiones como ancho y longitud de los viales para cada parque se detallan en tablas al final del apartado mencionado. Los criterios de diseño específicos para cada tipo de firme se encuentran en los anteproyectos de los parques eólicos. Este diseño de viales busca equilibrar la funcionalidad necesaria para la construcción y operación del parque eólico con la minimización del impacto ambiental y las afectaciones a propietarios y comunidades locales.

En la siguiente tabla se especifican los detalles del modelo escogido (**Tabla 1**).

Tabla 1 Detalles técnicos del aerogenerador

Elemento	Proyecto modificado (mediciones/ descripción)
Nº de aerogeneradores	10
Modelo de aerogenerador	SIEMENS GAMESA SG170-6,6 MW
Potencia total instalada (MW)	90
Energía producida anual bruta (MWh)	173.448
Altura de buje (m)	115
Altura total (m)	200
Diámetro de rotor (m)	170
Área total de barrido (m ²)	340470

Separación media entre aerogeneradores (m)	545
Dimensión Plataforma de montaje (m)	50*85

2.2. Localización

Al igual que en la anterior alternativa del Parque Eólico, cuenta con un total de 10 aerogeneradores, con una potencia unitaria de 6,6MW, para sumar una potencia instalada de 66MW. Las posiciones se ubican en los términos municipales de Torre del Bierzo y Santa Colomba de Somoza. En la siguiente tabla, se pueden ver las coordenadas de ubicación de cada una de las posiciones. **(Tabla 2)**.

Tabla 2 Posiciones de los aerogeneradores en la alternativa 2 Fuente: Elaboración propia

	UTM ETRS89 H29	
	X	Y
POS-01	713.891	4.705.430
POS-02	714.223	4.705.860
POS-03	714.498	4.706.223
POS-04	715.199	4.704.439
POS-05	715.558	4.704.805
POS-06	716.069	4.704.935
POS-07	716.163	4.705.416
POS-08	716.292	4.705.956
POS-09	717.140	4.706.240
POS-10	717.270	4.706.733

A continuación, un mapa donde se muestra la situación de los aerogeneradores en la alternativa 1 **(Fig. 2)**:

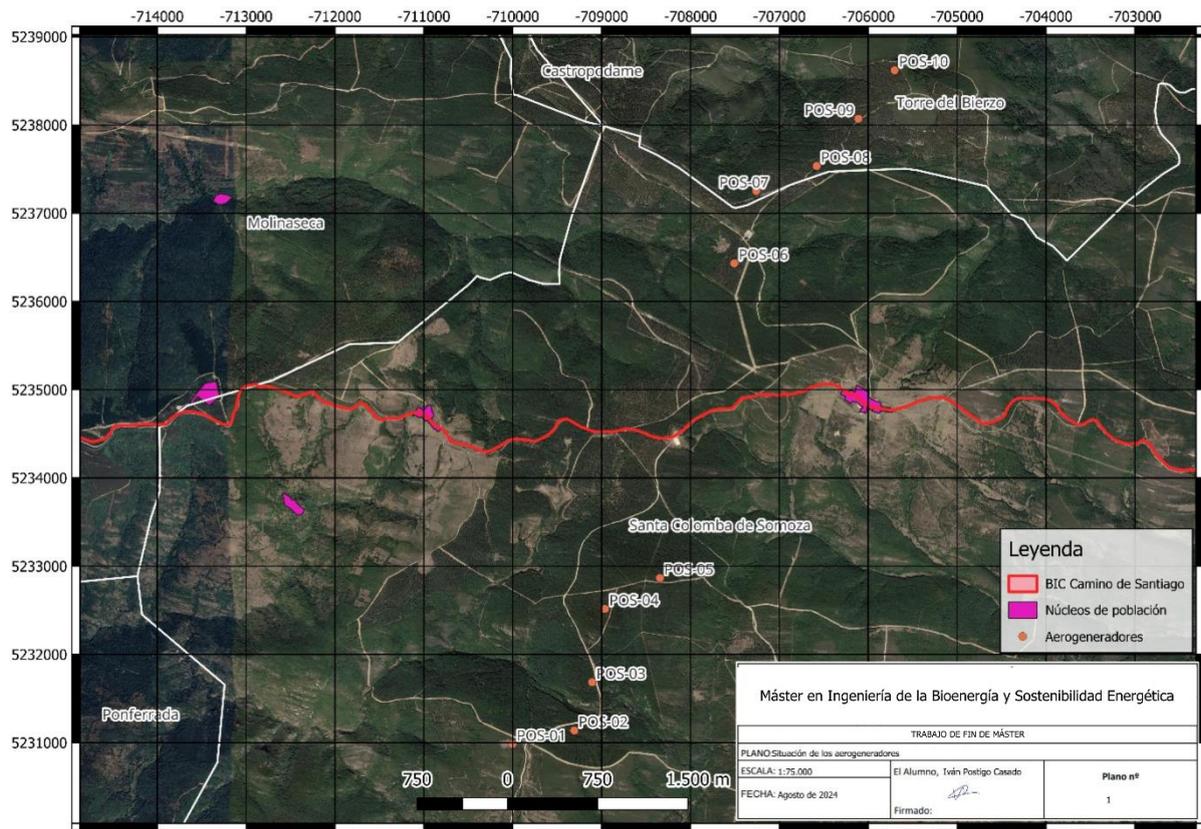


Figura 2 Mapa del parque eólico en los municipios de Santa Colomba de Somoza y Torre del Bierzo.
Fuente: Elaboración propia

2.3. Masa forestal afectada

En el proyecto de construcción del parque eólico, se ha previsto que las masas forestales afectadas serán destinadas a la producción de biomasa. Esto implicará una pérdida de sumideros de carbono, ya que los árboles, al ser eliminados, dejarán de capturar dióxido de carbono de la atmósfera. Sin embargo, esta pérdida se compensará parcialmente a través del aprovechamiento energético de la biomasa generada.

Además, como parte del plan de restauración ambiental, se llevará a cabo la repoblación de la zona afectada con nuevos ejemplares de la misma especie, lo que permitirá recuperar gradualmente la función de sumidero de carbono en el área, restaurando el equilibrio ecológico y contribuyendo a la conservación del hábitat natural.

3. DIMENSIONAMIENTO DE MATERIALES

Para calcular la huella de carbono de un parque eólico, es esencial dimensionar todos los materiales necesarios tanto para la construcción como para el desmantelamiento del parque, así como el transporte asociado. Esto implica evaluar la cantidad y el tipo de materiales utilizados en la construcción inicial y en el desmantelamiento, incluyendo el transporte de estos materiales y componentes. Se deben considerar las emisiones generadas por el transporte de los materiales hacia y desde el sitio de desmantelamiento, así como el uso de maquinaria durante las tres fases. Con esta información, se puede estimar de manera precisa las emisiones de gases de efecto invernadero generadas en cada etapa del proyecto, permitiendo una evaluación completa de la huella de carbono.

3.1. Fase de construcción

3.1.1. *Góndola*

La góndola de este modelo de aerogenerador contiene los componentes clave para la generación de electricidad, como el generador, el sistema de transmisión, y otros equipos mecánicos y eléctricos. A continuación, se detallan los materiales y el peso de cada componente de góndola típica para el aerogenerador Siemens Gamesa SG 6.6-170 (**Tabla 2**).

Componentes principales de la góndola:

1. Generador:
 - Materiales: Cobre, acero, aluminio.
 - Peso aproximado: 75 toneladas, según fabricante.
2. Multiplicadora (caja de engranajes):
 - Materiales: Acero, hierro fundido, lubricantes.
 - Peso aproximado: 30 toneladas.
3. Eje principal:
 - Materiales: Acero.
 - Peso aproximado: 15 toneladas.
4. Sistema de refrigeración y electrónica:
 - Materiales: Aleaciones de aluminio, cobre, materiales plásticos.
 - Peso aproximado: 3 toneladas.

5. Estructura de soporte de la góndola:
 - Materiales: Acero, aluminio.
 - Peso aproximado: 12,5 toneladas.

El peso total de la góndola de un aerogenerador de gran capacidad como el Siemens Gamesa SG 6.6-170 es de 135,5 toneladas.

Tabla 2 Especificaciones técnicas del aerogenerador Siemens Gamesa SG 6.6-170. Fuente: Siemens Gamesa

Componente	Unidades	Peso (kg)	Kg totales
Generador	10	75.000	750.000
Multiplicadora	10	30.000	300.000
Eje principal	10	15.000	150.000
Sistema de refrigeración y electrónica	10	3.000	30.000
Estructura de soporte de la góndola	10	12.500	125.000

3.1.2. Torre

Para esta turbina eólica, el peso de la torre es el siguiente:

- **Altura de la torre:** 120 metros en 3 tramos de 40 metros cada uno.
- **Peso de la torre:** entre 300 toneladas, 100 toneladas cada tramo.

Este peso depende del material principalmente acero y del tipo de torre, que en este caso tiene secciones modulares.

Turbinas más grandes o en entornos offshore pueden tener torres aún más pesadas debido a la necesidad de mayor resistencia y estabilidad, turbinas onshore el peso es el siguiente (**Tabla 3**):

Tabla 3 Pesaje total de la Torre. Fuente: Elaboración propia

Componente	Unidades	Kg totales
Torre	10 (aerogeneradores) x 300.000 kg (torre entera)	3.000.000

3.1.3. Palas

El peso de una pala para el modelo SG 6.6-170 de Siemens Gamesa es de 25.000 kg. Este peso incluye tanto los materiales compuestos como la fibra de vidrio y la resina epoxi, que son los principales componentes utilizados en la fabricación de las palas, con una proporción de fibra de vidrio (65%) y resina epoxi (35%) (**Tabla 2**).

Tabla 4 Pesaje total de las palas. Fuente: Elaboración propia

Componente	Palas necesarias (total del Parque Eólico)	Kg totales
Pala	10 (aerogeneradores) x 3 (palas cada aerogenerador) x 25.000 kg (cada pala)	750.000

3.1.4. Cimentación

Para un aerogenerador de una capacidad de 6,6 MW, como el Siemens Gamesa SG 6.6-170, la cimentación puede requerir de promedio 600 m³ de concreto, dependiendo de las condiciones del terreno y el diseño estructural.

Si consideramos que el concreto tiene una densidad aproximada de 2.4 toneladas por m³, una cimentación de 600 m³ de concreto pesaría alrededor de 1,440 toneladas/aerogenerador, se especifica el hormigón requerido en la tabla siguiente (**Tabla 5**).

Tabla 5 Pesaje total del hormigón. Fuente: Elaboración propia

Componente	Aerogeneradores	Por cada aerogenerador (m ³)	Densidad (kg/m ³)	Kg totales
Hormigón	10	600	2.400	14,4*10 ⁶

3.2. Transporte

3.2.1. Componentes

Las fábricas de **Siemens Gamesa** en **Ágreda (Fig. 3)**, **Reinosa (Fig. 4)**, **Aoiz (Fig. 5)**, y **Zamudio (Fig. 6)**, son instalaciones clave para la producción y desarrollo de

componentes relacionados con los aerogeneradores y la tecnología eólica. Siendo Ágreda la que fábrica góndolas, bujes y trenes de potencia, Reinoso fabrica los generadores, Aoiz fabrica las palas y Zamudio las torres.

Para el transporte de componentes de turbinas eólicas como palas, góndolas y secciones de torre, se emplean camiones de gran capacidad en este caso se realizará con el modelo **Volvo FH 16**, generalmente con una capacidad de carga de 60 toneladas. El consumo de combustible de este vehículo pesado varía considerablemente según diversos factores, incluyendo el peso de la carga, el estado de las carreteras y la eficiencia del vehículo. Típicamente, se estima que estos camiones consumen entre 30 y 40 litros de diésel por cada 100 kilómetros recorridos. Este rango de consumo, equivalente a 0.3-0.4 litros por kilómetro, es consistente con los datos reportados por varias fuentes y estudios sobre transporte de carga pesada. La Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), por ejemplo, suele informar consumos similares para camiones de gran tonelaje operando en condiciones normales. Es importante destacar que el gasto en combustible representa aproximadamente el 30% de los costos totales de operación de estos vehículos. Por lo tanto, optimizar el consumo de combustible es crucial tanto desde una perspectiva económica como ambiental para las empresas de transporte que utilizan estos camiones de gran capacidad y tonelaje.

A continuación, se detallan las rutas escogidas para el transporte de los componentes para el parque eólico:

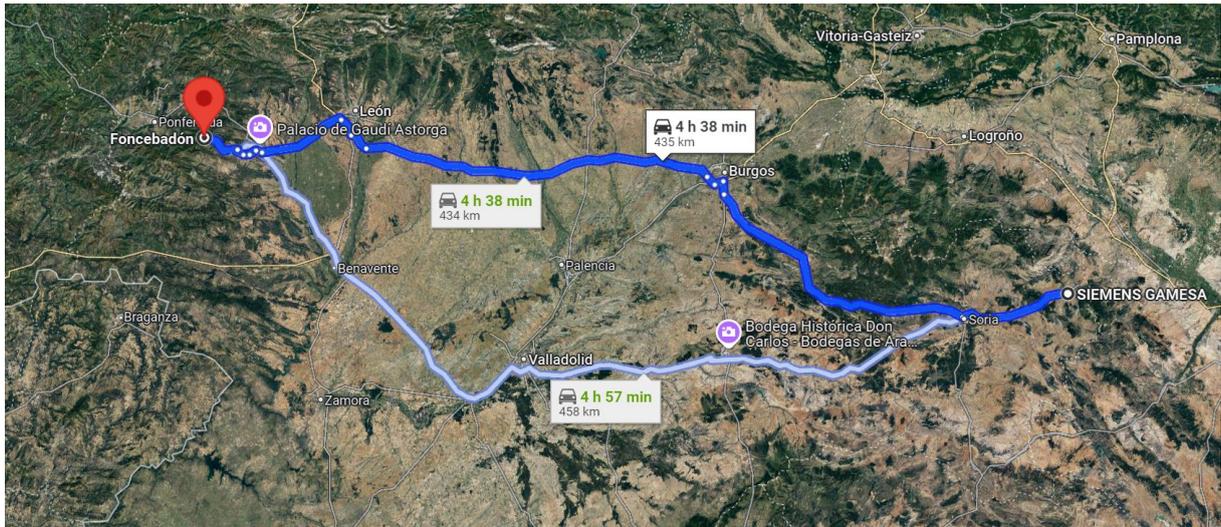


Figura 3 Ruta Ágreda-Foncebadón. Fuente: Google Maps

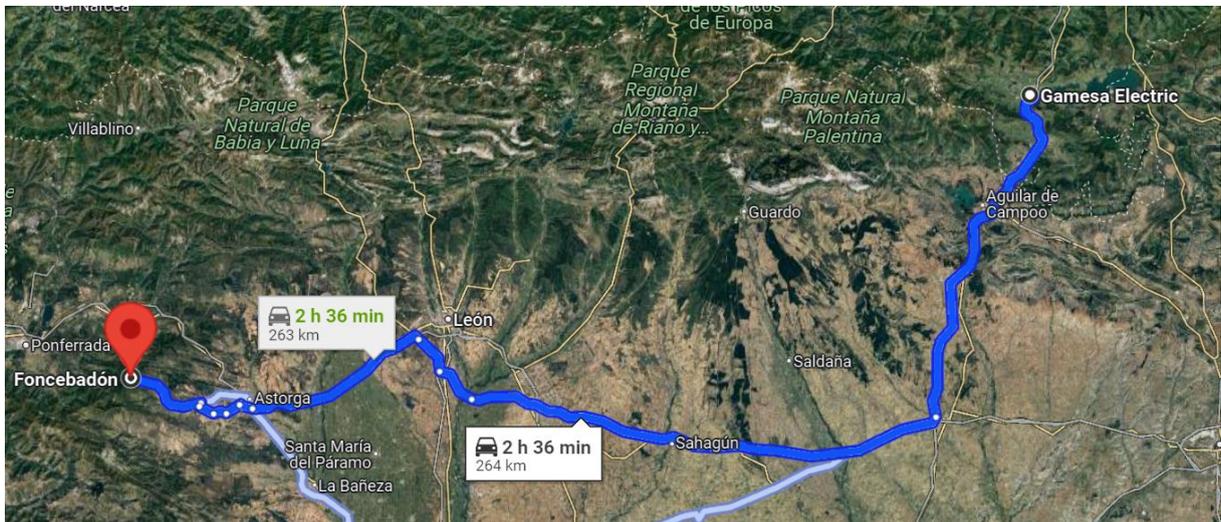


Figura 4 Ruta Reinosa-Foncebadón. Fuente: Google Maps

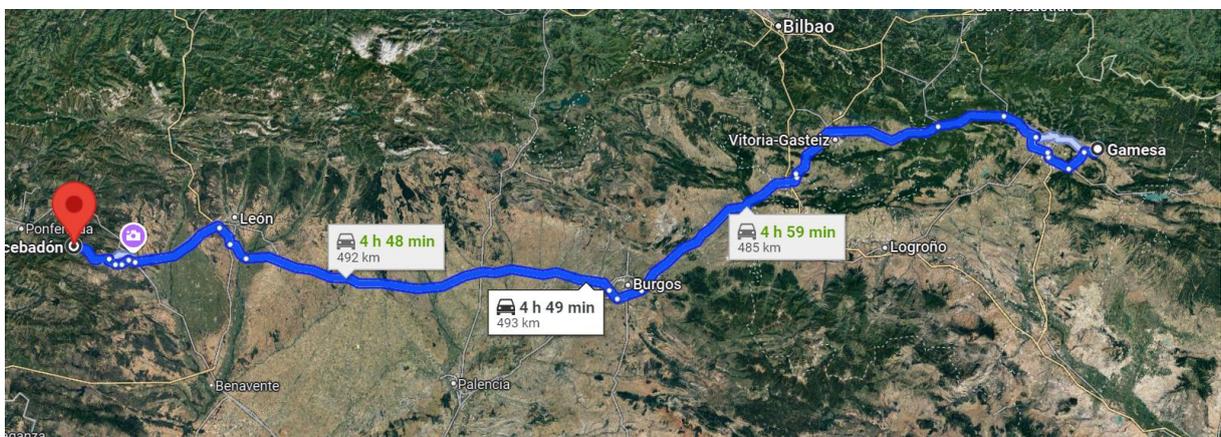


Figura 5 Ruta Aizoaín-Foncebadón. Fuente: Google Maps

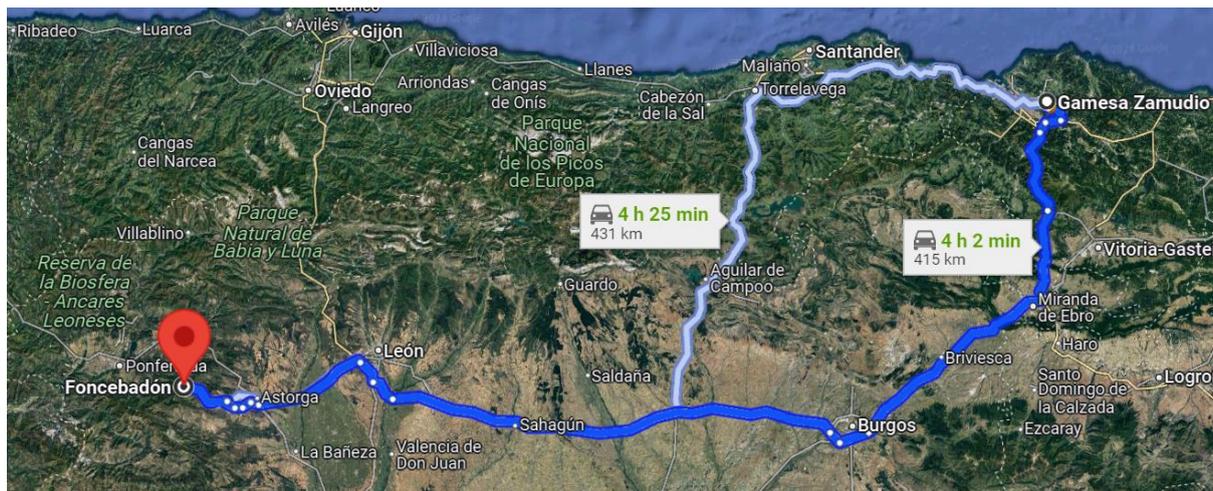


Figura 6 Ruta Zamudio-Foncebadón. Fuente: Google Maps

En la siguiente tabla se muestra la distancia de la localidad donde se sitúa el parque eólico hasta cada uno de los lugares de origen de los componentes (**Tabla. 6**)

Tabla 6 Distancia de los lugares de origen de fabricación al Parque Eólico. Fuente: Elaboración propia

Componente	Viajes	km totales
Góndola Bujes Tren de potencia Casquillo	Ágreda – Foncebadon	435
Generador	Reinosa – Foncebadon	263
Palas	Aoiz – Foncebadon	485
Torre	Zamudio – Foncebadon	415

A continuación, vamos a calcular con los datos que tenemos la gasolina y los viajes requeridos al parque eólico, como el consumo medio con carga completa ronda los 30-40L por cada 100km vamos a coger la media 35L por cada 100km (**Tabla. 7**).

Tabla 7 Litros de combustible consumidos para el transporte de los componentes. Fuente: Elaboración propia

Componente	Viajes con carga	Km (recorridos)	Media de consumo cada km	Combustible consumido (L)
Góndola Bujes Tren de potencia Casquillo	10	435	0,35	1.522,5
Generador	10	263	0,35	920,5
Palas	30	485	0,35	5.092
Torre	30	415	0,35	4357,5

Vamos a suponer que hacen el mismo recorrido de vuelta, pero en vacío hacia el lugar de origen (**Tabla. 8**).

Tabla 8 Litros de combustible consumidos en vacío. Fuente: Elaboración propia

Componente	Viajes con carga	Km (recorridos)	Media de consumo cada km	Combustible consumido (L)
Góndola Bujes Tren de potencia Casquillo	10	435	0,2	870
Generador	10	263	0,2	526
Palas	30	485	0,2	2910
Torre	30	415	0,2	2490

La suma de combustible tanto de ida como de vuelta asciende a 18.688,5 L de combustible.

3.2.2. Hormigón

Para el hormigón la empresa que puede suplir tal cantidad de material cercano al parque eólico, se encuentra a escasos kilómetros, se trata de la empresa *Cementos Cosmos S.L.*, situado en la localidad de Toral de los Vados (León).

A continuación, se detalla la ruta escogida para el transporte de hormigón (**Fig. 7**)

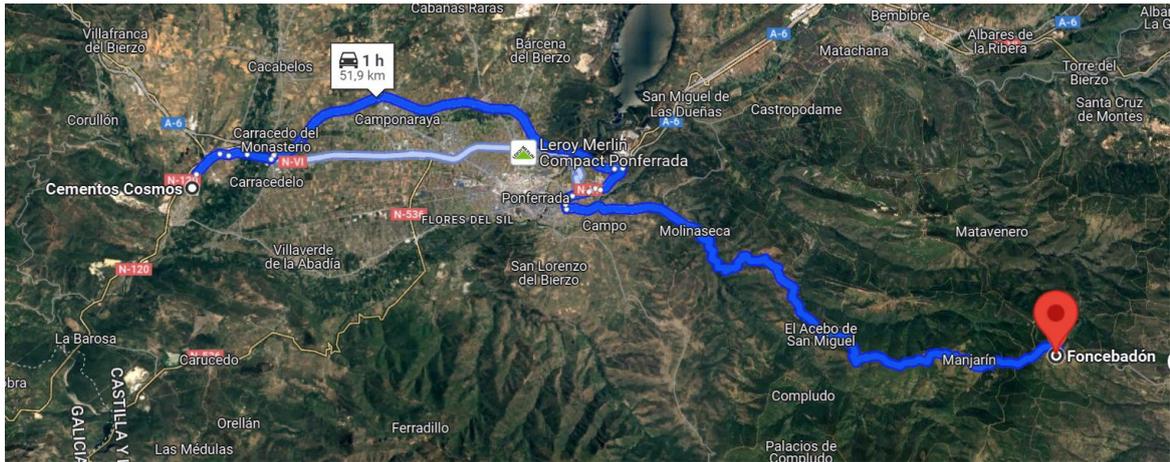


Figura 7 Ruta Cementos Cosmos-Foncebadón. Fuente: Google Maps

Siendo la distancia de la ruta la siguiente (**Tabla 9**):

Tabla 9 Distancia ruta Cementos Cosmos-Foncebadón. Fuente: Elaboración propia

Componente	Viajes	km
Hormigón	Toral de los Vados - Foncebadón	51,9

Teniendo en cuenta que una hormigonera promedio tiene una capacidad de 8m^3 , y en total necesitamos 6000m^3 para el total de las cimentaciones, sabiendo la capacidad de transporte y el total necesario, precisaremos de un total de 750 viajes hacia el parque eólico, de esta forma obtenemos:

De promedio una hormigonera cargada, consume cada 100 kilómetros alrededor de 30 Litros, obtenemos lo siguiente (**Tabla 10**):

Tabla 10 Litros de combustible consumidos para el transporte de hormigón. Fuente: Elaboración propia

Componente	Viajes con carga	Km (recorridos)	Media de consumo cada km	Combustible consumido (L)
Combustible Hormigonera	750	51,9	0,3	11.677,5

Hay que destacar que, las emisiones por excavación para la cimentación son prácticamente despreciables en comparación con el consumo del transporte.

De otra forma, una hormigonera en vacío consume una media de 20 Litros cada 100 kilómetros (**Tabla 11**).

Tabla 11 Litros de combustible consumidos en vacío de una hormigonera. Fuente: Elaboración propia

Componente	Viajes sin carga	Km (recorridos)	Media de consumo cada km	Combustible consumido (L)
Combustible Hormigonera	750	51,9	0,2	7.785

3.3. Fase de operación

La única huella de carbono que se puede producir es por el Mantenimiento y reparaciones del parque eólico, siendo los vehículos utilizados para transportar el personal de mantenimiento y las piezas de repuesto pueden consumir combustibles fósiles y aumentar la huella de carbono, que sería ínfima en este caso, respecto al total.

3.4. Fase de desmantelamiento

Principales fuentes de emisiones en la fase de desmantelamiento:

1. Transporte de los componentes:

- El desmantelamiento implica el uso de grúas y maquinaria pesada para desmontar las torres, góndolas, palas y otros equipos, lo que requiere combustible (generalmente diésel).
- Transporte de los componentes a centros de reciclaje, vertederos o almacenamiento. Las emisiones dependerán de la distancia recorrida y del tipo de vehículo utilizado.

2. Procesos de reciclaje:

- La mayoría de los materiales de un parque eólico son reciclables, como el acero de las torres y el cobre de los cables, pero el proceso de reciclaje genera emisiones indirectas, principalmente en el tratamiento y la fundición de metales.
- Las palas suelen ser más complicadas de reciclar porque están hechas de materiales compuestos (fibra de vidrio y resina epoxi), y su reciclaje o disposición final puede generar emisiones.

3.4.1. Transporte a plantas de reciclaje

Las palas de los aerogeneradores que han llegado al final de su vida útil serán transportadas a la futura planta de reciclaje de palas en **Cubillos del Sil**. Esta planta, que se especializará en la gestión y reciclaje de componentes de aerogeneradores, será un paso importante hacia la sostenibilidad dentro del sector eólico.

Las palas de los aerogeneradores están hechas principalmente de materiales compuestos, como fibra de vidrio y resinas, que tradicionalmente son difíciles de reciclar. Sin embargo, la planta de Cubillos del Sil desarrollará técnicas avanzadas para procesar estos materiales, descomponiéndolos y reutilizándolos en la fabricación de nuevos productos.

Este proceso reducirá la necesidad de depositar estas piezas en vertederos, disminuyendo así el impacto ambiental. La planta también contribuirá a la economía circular, promoviendo un ciclo de vida más sostenible para los componentes de las energías renovables.

A continuación, se detalla la ruta escogida para el transporte de las palas del parque eólico hacia la planta de reciclaje en Cubillos del Sil (**Fig. 8**):

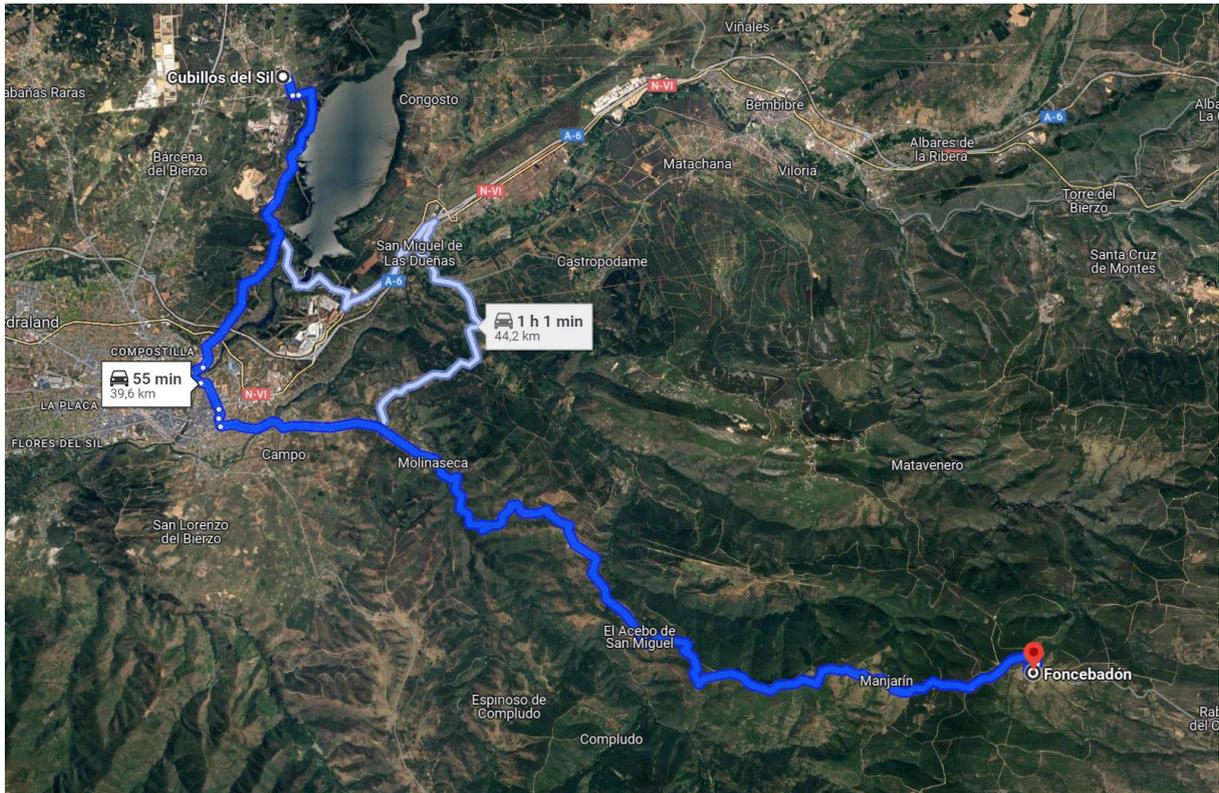


Figura 8 Ruta Cubillos del Sil-Foncebadón. Fuente: Google Maps

A continuación, vamos a calcular con los datos que tenemos la gasolina y los viajes requeridos a la planta de reciclaje de palas, como el consumo medio con carga completa ronda los 30-40L por cada 100km vamos a escoger el promedio, es decir, 35L por cada 100km (**Tabla. 12**).

Tabla 12 Litros de combustible consumidos hacia la planta de reciclaje. Fuente: Elaboración propia

Componente	Viajes con carga	Km (recorridos)	Media de consumo cada km	Combustible consumido (L)
Palas	30	44	0,35	462

Vamos a suponer que hacen el mismo recorrido de vuelta, pero en vacío hacia el lugar de origen (**Tabla. 13**).

Tabla 13 Litros de combustible consumidos en vacío hacia la planta de reciclaje. Fuente: Elaboración propia

Componente	Viajes con carga	Km (recorridos)	Media de consumo cada km	Combustible consumido (L)
Palas	30	44	0,2	264

El resto de los componentes de los aerogeneradores, como las torres, generadores, y otros elementos mecánicos y electrónicos, serán transportados a la futura **planta de reciclaje de parques eólicos en Almazán**. Esta planta se especializará en el desmantelamiento y reciclaje integral de aerogeneradores, gestionando todos los materiales que componen un parque eólico, desde metales hasta sistemas electrónicos.

Al igual que la planta de Cubillos del Sil, la de Almazán contribuirá a la **economía circular**, reduciendo el impacto ambiental de los parques eólicos al final de su vida útil y promoviendo la reutilización y el reciclaje de materiales. De esta manera, ambas instalaciones jugarán un papel crucial en hacer que la industria eólica sea más sostenible y respetuosa con el entorno.

A continuación, se detalla la ruta escogida para el transporte del resto de componentes del parque eólico, hacia la planta de reciclaje en Almazán. **(Fig. 8)**:

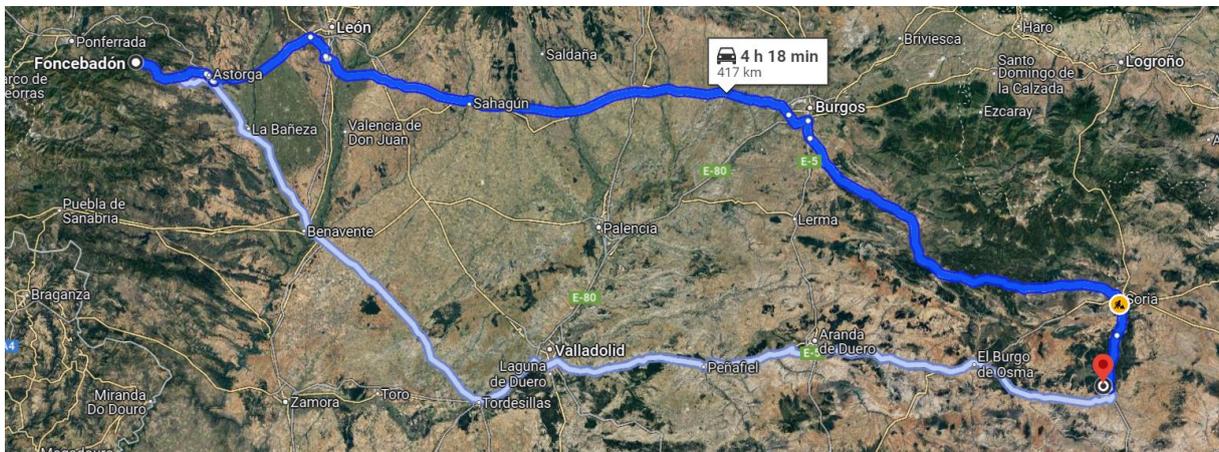


Figura 9 Ruta Almazán-Foncebadón. Fuente: Google Maps

A continuación, vamos a calcular con los datos que tenemos la gasolina y los viajes requeridos a la planta de reciclaje de palas, como el consumo medio con carga completa ronda los 30-40L por cada 100km vamos a escoger el promedio, es decir, 35L por cada 100km **(Tabla. 14)**.

Tabla 14 Litros de combustible consumidos hacia la planta de reciclaje en Almazán. Fuente: Elaboración propia

Componente	Viajes con carga	Km (recorridos)	Media de consumo cada km	Combustible consumido (L)
Góndola Bujes Tren de potencia Casquillo	10	417	0,35	1459,5
Generador	10	417	0,35	1459,5
Torre	30	417	0,35	4378,5

Vamos a suponer que hacen el mismo recorrido de vuelta, pero en vacío hacia el lugar de origen (**Tabla. 15**).

Tabla 15 Litros de combustible consumidos en vacío desde la planta de reciclaje en Almazán. Fuente: Elaboración propia

Componente	Viajes con carga	Km (recorridos)	Media de consumo cada km	Combustible consumido (L)
Góndola Bujes Tren de potencia Casquillo	10	417	0,2	834
Generador	10	417	0,2	834
Torre	30	417	0,2	2502

3. METODOLOGÍA

La estimación de la huella de carbono del aerogenerador completo, incluyendo las palas, la torre, la góndola y otros componentes, así como, las fases de construcción operación y desmantelamiento, se llevará a cabo mediante el uso de fuentes bibliográficas reconocidas, como análisis de ciclo de vida (ACV) reportados por bases de datos como Ecoinvent, estudios revisados por pares en la Journal of Cleaner Production, y publicaciones de organismos internacionales como IRENA (Agencia Internacional de Energía Renovable). Estos estudios proporcionan datos detallados sobre las emisiones asociadas a la producción, transporte, instalación, operación y desmantelamiento de aerogeneradores.

3.1. CALCULO DE HUELLA DE CARBONO

3.1.1. Fase de construcción

Góndola: Vamos a calcular la huella de carbono total de los componentes de acuerdo con la tabla, utilizando factores de emisión aproximados para cada tipo de material o componente (**Tabla 16**).

Factores de emisión aproximados (kg CO₂e por kg):

- **Generador:** 4.0 kg CO₂e por kg (debido a acero, cobre y otros materiales).
- **Multiplicadora:** 3.5 kg CO₂e por kg (compuesto principalmente de acero y engranajes).
- **Eje principal:** 2.5 kg CO₂e por kg (acero de alta resistencia).
- **Sistema de refrigeración y electrónica:** Huella de carbono por kg:
 - Aluminio (50%): Aproximadamente 8.6 kg de CO₂e por kg.
 - Cobre (40%): Aproximadamente 4 kg de CO₂e por kg.
 - Resto plásticos
- **Estructura de soporte de la góndola:** 1.85 kg CO₂e por kg (estructura de acero).

Tabla 16 Huella de carbono por cada componente de la góndola. Fuente: Elaboración propia

Componente	Peso total (kg)	Factor de emisión (kg CO ₂ e/kg)	Huella de carbono (kg CO ₂ e)
Generador	750.000	4.0	3.000.000
Multiplicadora	300.000	3.5	1.050.000
Eje principal	150.000	2.5	375.000
Sistema de refrigeración y electrónica	30.000	6.0	180.000
Estructura de soporte de la góndola	125.000	1.85	231.250
Total	1.355.000		4,836,250

- Torre: 1.85 kg CO₂e por kg (estructura de acero). También tiene otros componentes, aunque la torre puede incluir otros materiales (como cables, recubrimientos y elementos electrónicos), su peso y huella de carbono son relativamente insignificantes en comparación con el acero (**Tabla 17**).

Tabla 17 Huella de carbono la torre del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia

Componente	Unidades	Kg totales	Factor de emisión (kg CO ₂ e/kg)	Huella de carbono (kg CO ₂ e)
Torre	10 torres x 300.000 kg cada una	3,000.000	1,85	5,550,000

- Palas: 3,6 kg CO₂e por kg (promedio fibra de vidrio (65%) y resina epoxi (35%)) (**Tabla 18**).

Tabla 18 Huella de carbono las palas del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia

Componente	Palas necesarias (total del parque eólico)	Kg totales	Factor de emisión (kg CO ₂ e/kg)	Huella de carbono (kg CO ₂ e)
Pala	10 aerogeneradores x 3 palas x 25.000 kg	750.000	3,6 (promedio para resina epoxi y fibra de vidrio)	2.700.000

Desglosándolo tenemos una huella de carbono total estimada por cada pala:

Sumando ambos componentes, tenemos:

1. Fibra de vidrio: 24,375 kg de CO₂e.
 2. Resina epoxi: 65,625 kg de CO₂e.
- Hormigón: el factor de emisión para el hormigón generalmente se estima entre 0.072 kg CO₂e/kg y 0.18 kg CO₂e/kg, dependiendo de la mezcla de hormigón y el proceso de producción. Utilizaremos un valor promedio de 0.1 kg CO₂e/kg para este cálculo (**Tabla 19**).

Tabla 19 Huella de carbono por el hormigón usado en la fase de construcción. Fuente: Elaboración propia

Cantidad de Hormigón(kg)	Factor de emisión (kg CO ₂ e/L)	Huella de carbono (kg CO ₂ e)
14.440.000	0,1	1.440.000

- Transporte: haciendo la suma total de combustible requerido tenemos un total de 38.150,5 L de combustible, Factor de emisión del diésel: Aproximadamente 2.68 kg de CO₂e por litro de diésel consumido (**Tabla 20**).

Tabla 20 Huella de carbono por el combustible usado en la fase de construcción. Fuente: Elaboración propia

Cantidad de combustible (L)	Factor de emisión (kg CO ₂ e/L)	Huella de carbono (kg CO ₂ e)
38.150,5	2,68	102.253,34

3.1.2. Fase de operación

Durante la operación, los requerimientos de mantenimiento son relativamente bajos y suelen implicar actividades como inspecciones periódicas y reparaciones puntuales. Esto puede requerir desplazamientos de vehículos y herramientas, pero las emisiones asociadas son insignificantes en comparación con las fases de construcción y desmantelamiento.

3.1.2. Fase de desmantelamiento

La fase de desmantelamiento de un parque eólico implica varias actividades que generan emisiones de carbono, aunque su magnitud es mucho menor que la de la fase de construcción. Para calcular la huella de carbono en esta fase, se deben considerar las siguientes fuentes de emisiones:

Fuentes principales de emisiones durante el desmantelamiento:

1. Desmontaje de las estructuras (uso de maquinaria pesada, grúas, etc.).
2. Transporte de los componentes desmantelados (palas, góndola, torre, etc.).
3. Procesamiento y reciclaje de materiales (principalmente acero, cobre y compuestos).
4. Gestión de residuos, especialmente de las palas, que no siempre son reciclables.

Suposiciones para el cálculo:

- El peso total de los componentes desmontados será similar al peso utilizado en la fase de construcción:
 - Torres: 3,000,000 kg
 - Góndolas: 1,355,000 kg (según el desglose anterior)
 - Palas: 750,000 kg

3.1.2.1. Desmontaje

- El desmontaje implica el uso de grúas, maquinaria pesada, y energía para desmontar las torres, góndolas y palas.
- Se estima que el uso de maquinaria genera aproximadamente 50 kg CO₂e por cada tonelada desmontada.
- Peso total desmontado: **5,105 toneladas**.

Emisiones del desmontaje, por tonelada desmontada (**Tabla 21**).

Tabla 21 Huella de carbono por el desmontaje de los aerogeneradores. Fuente: Elaboración propia

Actividad	Descripción	Valor
Uso de maquinaria	Grúas, maquinaria pesada, y energía para desmontar torres, góndolas y palas	-
Generación de emisiones	Se estima que se generan 50 kg CO ₂ e por cada tonelada desmontada	50 kg CO ₂ e/tonelada
Peso total desmontado	Torres, góndolas y palas desmontadas	5.105 toneladas
Cálculo de emisiones	5,105 toneladas × 50 kg CO ₂ e/tonelada	255.250 kg CO ₂ e

3.1.2.2. Procesamiento y gestión de residuos

Factores de emisión para el reciclaje del acero:

- El reciclaje de acero es una actividad bien documentada y es uno de los materiales más reciclados a nivel global. Los estudios sobre la huella de carbono del reciclaje de acero suelen mostrar que el proceso genera alrededor de 0.5 kg CO₂e por cada kg de acero reciclado. Esta cifra varía ligeramente según la eficiencia del proceso, pero 0.5 kg CO₂e/kg es un valor comúnmente aceptado en estudios de LCA para materiales metálicos.

Factores de emisión para el reciclaje del cobre:

- El cobre es un material que, aunque valioso, tiene un proceso de reciclaje más intensivo en términos energéticos que el acero. Según diversas evaluaciones de ciclo de vida, las emisiones del reciclaje de cobre pueden estar en el rango de 3.0 kg CO₂e por kg de cobre reciclado.

Factores de emisión para el reciclaje de las palas de fibra de vidrio y resina epoxi:

- El reciclaje de palas de aerogeneradores es más complejo y menos eficiente que el de los metales. Esto se debe a que están hechas de compuestos de fibra de vidrio y resina epoxi, los cuales no se reciclan fácilmente. Según estudios recientes sobre la sostenibilidad de las palas de aerogeneradores, el procesamiento de estos materiales genera alrededor de 1.0 kg CO₂e por cada kg.

Emisiones por cada componente del aerogenerador (Tabla 22):

Tabla 22 Huella de carbono por el reciclaje de cada componente del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia

Componente	Peso total (kg)	Factor de emisión (kg CO ₂ e/kg)	Emisiones de reciclaje (kg CO ₂ e)
Torre	3.000.000	0,5	1.500.000
Góndola	1.355.000	1,0	1.355.000
Palas	750.000	1,0	750.000

Transporte: haciendo la suma total de combustible requerido tenemos un total de 12193,5 L de combustible para llevar los componentes a sus respectivas plantas de reciclaje. Factor de emisión del diésel: Aproximadamente 2.68 kg de CO₂e por litro

de diésel consumido (**Tabla 23**).

Tabla 23 Huella de carbono del combustible necesario en la fase de desmantelamiento. Fuente: Elaboración propia

Cantidad de combustible (L)	Factor de emisión (kg CO ₂ e/L)	Huella de carbono (kg CO ₂ e)
12.193,5	2.68	32.678.58

3.3. Huella de Carbono total en las tres fases

Fase de construcción (Tabla 24):

Tabla 24 Huella de carbono total en la fase de construcción. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Emisiones (kg CO ₂ e)
Generador	3.000.000
Multiplicadora	1.050.000
Eje principal	375.000
Sistema de refrigeración y electrónica	180.000
Estructura de soporte de la góndola	231.250
Torre	5.550.000
Palas	2.700.000
Hormigón	1.440.000
Combustible	102,253
TOTAL	14.628.503

Fase de operación:

Durante la operación, las emisiones son insignificantes. Se pueden estimar en 0 kg CO₂e o un valor cercano a cero debido a la generación de energía limpia a lo largo de la vida útil del parque eólico. El transporte del responsable del parque durante la operación, los requerimientos de mantenimiento son relativamente bajos y suelen implicar actividades como inspecciones periódicas y reparaciones puntuales, suponemos que maneja un vehículo eléctrico suplido con una estación de carga con la energía que aporta el parque eólico por lo que estimamos que la huella de carbono va a ser 0 kg CO₂e o un valor cercano.

Fase de desmantelamiento (Tabla 25):

Tabla 25 Huella de carbono total en la fase de desmantelamiento. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Emisiones (kg CO ₂ e)
Desmontaje	255.250
Reciclaje Torre	1.500.000
Reciclaje Góndola	1.355.000
Reciclaje Palas	750.000
Combustible	32.678
TOTAL	3.892.928

Sumando la huella de carbono desde su construcción hasta el desmantelamiento el total de emisiones en es de **18.521.431 kg CO₂e**.

3.4. Compensación de huella de carbono

Vamos a recalcular la huella de carbono por kWh para un parque eólico de 66 MW con una vida útil de 30 años y una huella de carbono total estimada en 18,500 toneladas de CO₂e.

Datos:

1. Capacidad del parque: 66 MW
2. Factor de capacidad: 30% (valor típico para parques eólicos terrestres)
3. Vida útil: 30 años
4. Huella de carbono total: 18,500 toneladas de CO₂e

Cálculo de la producción total de energía durante la vida útil:

1. Producción total de energía:

$$66MW \times \frac{24h}{día} \times 365 \text{ días} \times 0,30 \times 30 \text{ años} = 5.203.440 \text{ MW/h}$$

2. Producción anual:

$$66MW \times \frac{24h}{día} \times 365 \text{ días} \times 0,30 = 173.448 \frac{MW}{h} \text{ año}$$

3. Tenemos la huella de carbono en kilogramos: 18.521.431 kg CO₂e.

4. Cálculo de la huella de carbono por kWh:

$$\frac{18.521.431 \text{ kg CO}_2\text{e}}{5.203.440 \text{ MW/h}} = 0,00355 \text{ kg de CO}_2\text{e/MWh} = 3,56 \text{gCO}_2\text{e/kWh}$$

Resultado:

La huella de carbono del parque eólico de 66 MW con una vida útil de 30 años y una huella total de 18.500 toneladas de CO₂e es de aproximadamente 3,56 gCO₂e/kWh.

Este dato es coherente ya que: el IPCC ha recopilado datos sobre la huella de carbono de diferentes fuentes de energía en su informe especial sobre energías renovables. Para la energía eólica, los estudios realizados indican que la **huella de carbono promedio de un parque eólico está entre 3 y 12 gCO₂e/kWh**, dependiendo de los materiales y la tecnología utilizada, la ubicación y la eficiencia del parque. Este valor es consistente con los resultados obtenidos en nuestro cálculo.

3.4.1. Emisiones netas 0

Un parque eólico alcanza emisiones netas de CO₂ equivalentes a 0 (o carbono neutral) cuando la cantidad de emisiones evitadas por la generación de electricidad renovable supera o iguala las emisiones totales generadas durante su ciclo de vida. Esto incluye las emisiones de CO₂ generadas durante la fabricación de las turbinas, transporte, instalación, operación, mantenimiento y desmantelamiento del parque eólico.

Este momento se llama el punto de equilibrio de carbono o tiempo de retorno de carbono (carbon payback time).

Cálculo del tiempo de retorno de carbono para el parque eólico de 66 MW

Vamos a usar los datos que ya tenemos para calcular cuándo el parque eólico tiene emisiones netas 0:

- Huella de carbono total: 18.521.431 kg CO₂e (18.521 toneladas)
- Producción anual: 173.448 MWh/año (como hemos calculado antes)
- Emisiones evitadas por kWh generado: Depende de la fuente de energía a la que reemplaza. En promedio, el mix de generación de electricidad convencional (carbón, gas natural, etc.) emite aproximadamente 500 gCO₂e/kWh.

Cálculo de las emisiones evitadas por año:

1. Emisiones evitadas por kWh:

$$500 \frac{gCO_2e}{kWh} = 0,5kgCO_2e/kWh$$

2. Emisiones evitadas por año:

$$173.448 \frac{MWh}{año} \times 0,5kg CO_2e/kWh = 86.724.000kg CO_2e \text{ evitadas/año}$$

Es decir, el parque eólico evita 86,724 toneladas de CO₂e cada año al reemplazar la generación de electricidad con fuentes más contaminantes.

Cálculo del tiempo de retorno de carbono:

3. Tiempo para compensar las 18,521 toneladas de CO₂e:

$$\frac{18.521 \text{ toneladas de } CO_2e}{86.724 \text{ toneladas de } CO_2e \text{ evitadas por año}} = \mathbf{0,21 \text{ años}}$$

Resultado:

El parque eólico de 66 MW alcanzará emisiones netas 0 aproximadamente después de 2.5 meses de operación. Es decir, después de unos 2-3 meses de funcionamiento, el parque eólico habrá compensado todas las emisiones generadas durante su fabricación, instalación y otros procesos del ciclo de vida. A partir de ese momento, seguirá operando con emisiones netas negativas, evitando grandes cantidades de CO₂ cada año y contribuyendo de manera positiva al medio ambiente.

4. CONCLUSIONES

La energía eólica se ha consolidado como una de las fuentes de energía más prometedoras en la lucha contra el cambio climático y la transición hacia un futuro energético más sostenible. Los parques eólicos, tanto terrestres (onshore) como marinos (offshore), ofrecen una solución de generación eléctrica que combina eficiencia, bajo impacto ambiental y viabilidad económica.

Impacto ambiental mínimo:

Los parques eólicos se distinguen por su mínima huella de carbono:

- Emisiones de CO₂: Entre 3-12 gCO₂e/kWh, dependiendo si son terrestres o marinos.
- Comparativa: Plantas de carbón emiten hasta 1050 gCO₂e/kWh, y las de gas natural 450-500 gCO₂e/kWh.

Esta diferencia significativa posiciona a la energía eólica como un actor clave en la descarbonización del sector energético global.

Rápida neutralidad climática:

El concepto de "tiempo de retorno de carbono" es crucial para entender el beneficio ambiental de los parques eólicos:

- Parques terrestres: Alcanzan emisiones netas cero en menos de 6 meses, en este caso es de 2,5 meses (75 días).
- Parques marinos: Requieren 1-2 años para compensar su huella de carbono.

Una vez superado este período, los parques eólicos operan con un balance de carbono negativo durante su vida útil de 25-30 años, contribuyendo activamente a la mitigación del cambio climático.

Factores de optimización:

La eficiencia y el impacto ambiental de los parques eólicos pueden mejorarse mediante:

- Ubicación estratégica en zonas de vientos constantes y fuertes.
- Avances tecnológicos en diseño de aerogeneradores.
- Uso de materiales más sostenibles y técnicas de reciclaje avanzadas.

Rol en la transición energética:

La energía eólica, junto con otras fuentes renovables, está transformando el panorama energético global:

- Contribuye significativamente a la descarbonización del sector eléctrico.
- Ofrece una solución tecnológicamente madura y económicamente competitiva.
- Se integra eficazmente en estrategias nacionales e internacionales de lucha contra el cambio climático.

En resumen, los parques eólicos representan una apuesta segura y eficaz para un futuro energético más limpio y sostenible, combinando beneficios ambientales con viabilidad económica y tecnológica.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. Agencia Europea de Medio Ambiente (2024) *Agencia Europea de Medio Ambiente*. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/es> [Accessed 19 june 2024].
2. Arvesen, A. and Hertwich, E.G., 2012. Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), pp.5994-6006. doi:10.1016/j.rser.2012.06.023.
3. Cantabria, 2020. Estudio de Impacto Ambiental: Parque Eólico Lantueno. [online] Available at: https://www.cantabria.es/documentos/dgiem/EOL-29-2020%20LANTUENO/10.7_EOL-29-2020-EsIA.pdf [Accessed 19 September 2024].
4. Diario de León, 2023. *La futura planta de reciclaje de palas eólicas en Cubillos del Sil recibirá 3,2 millones de Europa*. [online] Available at: <https://www.diariodeleon.es/bierzo/221025/28086/futura-planta-reciclaje-palas-eolicas-cubillos-sil-recibira-3-2-millones-europa.html> [Accessed 19 june 2024].
5. Ecoinvent, 2024. *Ecoinvent Database*. [online] Available at: <https://ecoinvent.org/database/> [Accessed 19 june 2024].
6. Ecoinvent, 2024. *Dataset Documentation: Cut-off, Steel Production*. [online] Available at: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/4663/documentation> [Accessed 19 july 2024].
7. El Periódico de la Energía, 2021. *Siemens Gamesa presenta su torre eólica ecológica*. [online] Available at: <https://elperiodicodelaenergia.com/siemens->

[gamesa-presenta-torre-eolica-ecologica/](#) [Accessed 19 august 2024].

8. Fthenakis, V. and Kim, H.C., 2009. Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), pp.1465-1474. doi:10.1016/j.rser.2008.09.017.
9. García, A., 2019. Análisis de la Huella de Carbono de un Parque Eólico en Tenerife, España. [online] Instituto Politécnico de Leiria. Available at: <https://iconline.ipleiria.pt/bitstream/10400.8/4619/1/%28VERS%C3%83O%20CORRIGIDA%29%20-%20An%C3%A1lisis%20de%20la%20Huella%20de%20Carbono%20de%20Un%20Parque%20E%C3%B3lico%20en%20Tenerife-%20Espa%C3%B1a.pdf> [Accessed 1 September 2024].
10. González, A., García, A. and Martínez, E., 2014. Environmental impacts of offshore wind farms and the significance of the building phase. *Renewable Energy*, 66, pp.49-58. doi:10.1016/j.renene.2013.11.007.
11. Guezuraga, B., Zauner, R. and Pölz, W., 2012. Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. *Renewable Energy*, 37(1), pp.37-44. doi:10.1016/j.renene.2011.05.008.
12. Gobierno de Navarra, 2021. Estudio de Impacto Ambiental del Parque Eólico Barranco de Mairaga. [online] Available at: https://gobiernoabierto.navarra.es/sites/default/files/2._esia._pe_barranco_de_mairaga_compressed.pdf [Accessed 1 September 2024].
13. International Energy Agency (IEA), 2020. CO2 Emissions from Fuel Combustion. [online] IEA. Available at: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuel-combustion-2020> [Accessed 9 June 2024].
14. Instituto Superior de Medio Ambiente (ISM), 2021. La Huella de Carbono de las Energías Renovables: Energía Eólica. [online] Available at: <https://www.comunidadism.es/la-huella-de-carbono-de-las-energias->

renovables-2-eolica/ [Accessed 19 September 2024].

15. IRENA (International Renewable Energy Agency), 2024. *Homepage*. [online] Available at: <https://www.irena.org/> [Accessed 9 July 2024].
16. Jungbluth, N., Bauer, C., Dones, R. and Frischknecht, R., 2005. Life cycle assessment for emerging technologies: Case studies for photovoltaic and wind power. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(1), pp.24-34. doi:10.1065/lca2004.11.181.
17. Lenzen, M. and Munksgaard, J., 2002. Energy and CO₂ life-cycle analyses of wind turbines—review and applications. *Renewable Energy*, 26(3), pp.339-362. doi:10.1016/S0960-1481(01)00145-8.
18. Martínez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jiménez, E. and Blanco, J., 2009. Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. *Renewable Energy*, 34(3), pp.667-673. doi:10.1016/j.renene.2008.05.020.
19. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), 2020. *Instrucciones Calculadora Huella de Carbono*. [online] Available at: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/instruccionescalculadorahc_tcm30-485627.pdf [Accessed 19 June 2024].
20. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), 2020. *Guía para el Cálculo de la Huella de Carbono*. [online] Available at: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guia_huella_carbono_tcm30-479093.pdf [Accessed 19 June 2024].
21. Mint for People, 2024. ¿Por qué el CO₂ disminuye con la energía eólica?. [online] Available at: <https://mintforpeople.com/noticias/por-que-el-co2-disminuye-con-la-energia-eolica/> [Accessed 19 August 2024].

22. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2013. Life Cycle Assessment Harmonization of Wind Power. [online] Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/57131.pdf> [Accessed 17 August 2024].
23. Omawa, 2024. *IPCC Huella de Carbono*. [online] Available at: <https://omawa.es/ipcc-huella-de-carbono/> [Accessed 17 June 2024].
24. ScienceDirect, 2024. *Journal of Cleaner Production*. [online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-cleaner-production> [Accessed 27 July 2024].
25. Soria Noticias, 2022. *Almazán tendrá la primera empresa de reciclaje de parques eólicos en España*. [online] Available at: <https://sorianoticias.com/noticia/2022-07-23-almazan-tendra-la-primer-empresa-de-reciclaje-de-parques-eolicos-en-espana-92013> [Accessed 17 July 2024].
26. Pehnt, M., 2006. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable Energy*, 31(1), pp.55-71. doi:10.1016/j.renene.2005.03.002.
27. TheWindPower.net, 2024. *Siemens Gamesa SG 6.6-170 Turbine Specifications*. [online] Available at: https://www.thewindpower.net/turbine_es_1852_siemens-gamesa_sg-6.6-170.php [Accessed 17 August 2024].
28. Tremeac, B. and Meunier, F., 2009. Life cycle analysis of 4.5 MW and 250 W wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), pp.2104-2110. doi:10.1016/j.rser.2009.02.002.
29. UK Parliament, 2024. Carbon Footprint of Electricity Generation. [online] Available at: https://www.parliament.uk/globalassets/documents/post/postpn_383-carbon-

footprint-electricity-generation.pdf [Accessed 17 august 2024].

30. Universidad Politécnica de Madrid. (2016). *Huella de carbono de la Universidad Politécnica de Madrid*. [online] Available at: <https://sostenibilidad.upm.es/huella-de-carbono-de-la-universidad-politecnica-de-madrid-2016/> [Accessed 4 august 2024].
31. Verificat, 2023. Las renovables tienen una huella de carbono decenas de veces menor que las fósiles pese al impacto inicial de su construcción. [online] Available at: [https://www.verificat.cat/es/las-renovables-tienen-una-huella-de-carbono-decenas-de-veces-menor-que-las-fosiles-pese-al-impacto-inicial-de-su-construccion/#:~:text=Por%20ejemplo%2C%20en%20el%20caso%20de%20la%20energ%C3%ADa%20e%C3%B3lica%20el,14%20g%20CO2%20eq%2FkWh](https://www.verificat.cat/es/las-renovables-tienen-una-huella-de-carbono-decenas-de-veces-menor-que-las-fosiles-pese-al-impacto-inicial-de-su-construccion/#:~:text=Por%20ejemplo%2C%20en%20el%20caso%20de%20la%20energ%C3%ADa%20e%C3%B3lica%20el,14%20g%20CO2%20eq%2FkWh.). [Accessed 19 September 2024].
32. Wind-Turbine-Models.com, 2024. *Siemens Gamesa SG 6.6-170*. [online] Available at: <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/2346-siemens-gamesa-sg-6.6-170> [Accessed 24 august 2024].
33. World Resources Institute (WRI), 2020. *Global Greenhouse Gas Emissions by Sector*. [online] Available at: <https://www.wri.org/data/world-greenhouse-gas-emissions-2016> [Accessed 24 august 2024].