
Estudio de caso: logística para la obra civil

PID_00266648

Enrique Martín Alcalde

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 3 horas



Enrique Martín Alcalde

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, y Máster en Shipping Business por la UPC-BarcelonaTech. Completa su formación con un Programa de Dirección por EADA y estancias internacionales en TUDelft (Países Bajos) y PNU (Corea del Sur).

Es Director de la Oficina Técnica de Innovación de la Autoridad Portuaria de Algeciras y consultor de logística en IDOM. Anteriormente trabajó en el Centro de Innovación del Transporte (CENIT) y la ingeniería TEC4.

Cuenta con más de 10 años de experiencia en proyectos de innovación, consultoría e investigación; siendo autor de diversas publicaciones sobre logística y transporte marítimo.

El encargo y la creación de este recurso de aprendizaje UOC han sido coordinados por el profesor: Eduard Josep Álvarez Palau (2019)

Primera edición: septiembre 2019
© Enrique Martín Alcalde
Todos los derechos reservados
© de esta edición, FUOC, 2019
Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona
Realización editorial: FUOC

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño general y la cubierta, puede ser copiada, reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea este eléctrico, químico, mecánico, óptico, grabación, fotocopia, o cualquier otro, sin la previa autorización escrita de los titulares de los derechos.

Índice

1. Introducción al caso	5
1.1. La industria de la energía eólica	5
1.2. Los parques eólicos	5
1.3. La cadena de valor de la energía eólica	7
2. Descripción general del proyecto	9
3. Etapas y fases del proyecto	11
3.1. Preparación para la ejecución	11
3.2. Construcción y ejecución de la obra civil	12
3.3. Operaciones logísticas y de transporte	19
3.4. Montaje de los aerogeneradores	20
4. Retos logísticos y de transporte asociados al proyecto	23
5. Propuesta técnica para dar solución a los retos logísticos y de transporte del proyecto	25
5.1. Datos de partida o condicionantes para llevar a cabo durante el reto	25
5.1.1. Origen y destino de los aerogeneradores	25
5.1.2. Características de los aerogeneradores	25
5.2. Análisis y caracterización de la solución logística y de transporte	26
5.2.1. Operativa portuaria	26
5.2.2. Transporte terrestre	30
5.2.3. Operaciones de montaje de los aerogeneradores	34
Bibliografía	37

1. Introducción al caso

1.1. La industria de la energía eólica

La energía eólica es una fuente de energía limpia e inagotable y, por tanto, perteneciente al conjunto de las energías renovables. También se incluye en el grupo de las denominadas energías alternativas para combatir la emisión de gases de efecto invernadero y preservar el medioambiente. De hecho, es la energía alternativa más extendida a escala internacional por potencia instalada (MW) y por energía generada (GWh).

España es uno de los principales países del mundo en integración de la energía eólica en la red y el quinto país del mundo en potencia eólica instalada (23.484 MW eólicos, repartidos en 1.123 parques eólicos en 807 municipios¹), tras China, Estados Unidos, Alemania e India. Cabe destacar que, durante el año 2018, el sector eólico en España abasteció el 19 % de la energía consumida, es decir, el equivalente a 12 millones de hogares (AEE, 2018), a un precio medio de 12 céntimos de euro por KWh.

⁽¹⁾<https://www.aeeolica.org/>

A escala internacional, la energía eólica instalada en el mundo creció un 9,6 % en 2018, hasta situarse en 591.000 MW, según datos del Global Wind Energy Council (GWEC). China lidera el *ranking* con una potencia total instalada de 211.392 MW, seguida de los Estados Unidos, con una potencia de 96.665 MW.

Por último, cabe indicar que la industria de la energía eólica es de vital importancia y clave para cumplir con el objetivo europeo de que un 32 % del consumo de energía deberá proceder de fuentes renovables en el año 2030.

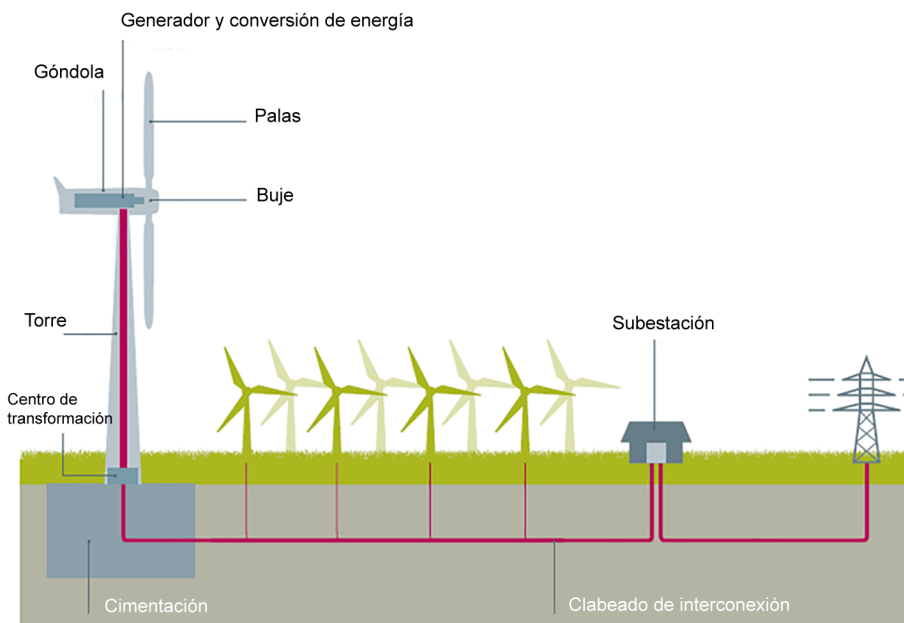
1.2. Los parques eólicos

Un **parque eólico** es una central eléctrica donde se produce la energía eléctrica a partir de la fuerza del viento, mediante la utilización de la energía cinética producida por efecto de las corrientes de aire a través del uso de aerogeneradores, o también conocidos como aeroturbinas.

Los parques pueden constituirse como centrales de generación aislada con aprovechamiento directo (parques con un aerogenerador o dos) o bien como centrales con conexión a la red eléctrica de las aeroturbinas de gran potencia.

La vida útil de un parque eólico se sitúa en torno a los veinte años y se compone principalmente de aerogeneradores, cimentaciones, caminos interiores y accesos, subestación eléctrica y cableado eléctrico necesario (figura 1). Suelen ubicarse en zonas con características específicas relativas a velocidad, frecuencia y dirección de viento, y en general deben instalarse en suelos no urbanizables. A su vez, deben situarse a más de un kilómetro de los núcleos urbanos para evitar la contaminación acústica y respetar la avifauna del entorno, para lo cual, si es preciso, habrá que instalar un paso para aves migratorias entre grupos de aerogeneradores.

Figura 1. Esquema de un parque eólico conectado a la red eléctrica y elementos de un aerogenerador



Fuente: <http://www.comunidadism.es>

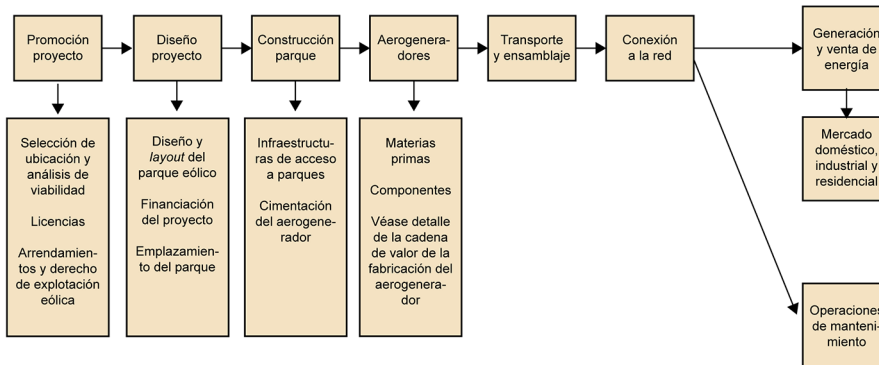
También hay que tener en cuenta que los aerogeneradores se deben colocar de forma óptima y que las turbinas han de situarse a cierta distancia las unas de las otras por cuestiones de aerodinámica, ya que el paso del viento por las palas de un aerogenerador genera turbulencias. Como norma general, la separación entre aerogeneradores es de cinco a nueve diámetros de rotor en la dirección de los vientos dominantes, y de tres a cinco diámetros de rotor en la dirección perpendicular a los vientos dominantes.

Por último, desde un punto de vista económico y de inversión, cabe tener en cuenta que cuanto mayor sea la potencia unitaria de los aerogeneradores, menor número de unidades serán necesarias por parque. Esto supone un ahorro en espacio ocupado, ya que, aunque deba haber un mayor espacio entre los aerogeneradores porque son más altos y la regla general es separarlos el doble de la altura de la torre, el número disminuye lo suficiente para ahorrar un espacio considerable. Por su parte, la obra civil en forma de caminos entre aerogeneradores y cimentaciones se ve significativamente disminuida, al igual que la obra y el equipamiento eléctrico, ya que el número de metros de zanja y de cable de media tensión que transcurren por el parque es menor.

1.3. La cadena de valor de la energía eólica

Por último, antes de proceder a analizar el proyecto de construcción del parque eólico en cuestión, resulta interesante analizar la **cadena de valor de la energía eólica**. Es decir, identificar y caracterizar los distintos pasos que suceden desde que se estudia la viabilidad de un parque eólico hasta que se conecta a la red y se subministra la energía al mercado doméstico, industrial y residencial.

Figura 2. Esquema de la cadena de valor de la energía eólica



Fuente: Universidad de Deusto

Tal como se muestra en la figura 2, la cadena de valor de la energía eólica se compone de los siguientes elementos:

- La fase inicial es la **promoción del proyecto**, que incluye, entre otros, la selección del emplazamiento y el análisis de viabilidad técnico-económica del proyecto de parque eólico. En esta fase también es necesario obtener las autorizaciones de la Administración pública y adquirir los arrendamientos y los derechos de explotación eólica. Aquí se tratan, asimismo, los temas de financiación de los proyectos e inversión.
- La segunda fase consiste en el **diseño del parque eólico** y su distribución.
- La tercera fase es la **fabricación de los aerogeneradores**, compuestos de múltiples partes y componentes.
- La cuarta fase consiste en la **construcción del emplazamiento**, que incluye la preparación de las vías de acceso y la instalación de las bases para los aerogeneradores (obra civil).
- Una vez fabricado el aerogenerador, se **transportan los componentes del aerogenerador** hasta el emplazamiento del parque eólico. Se trata de una fase crítica, ya que implica el manejo de componentes de formas especiales con gran peso y longitud.
- La sexta fase consiste en el **montaje y ensamblaje del aerogenerador**.

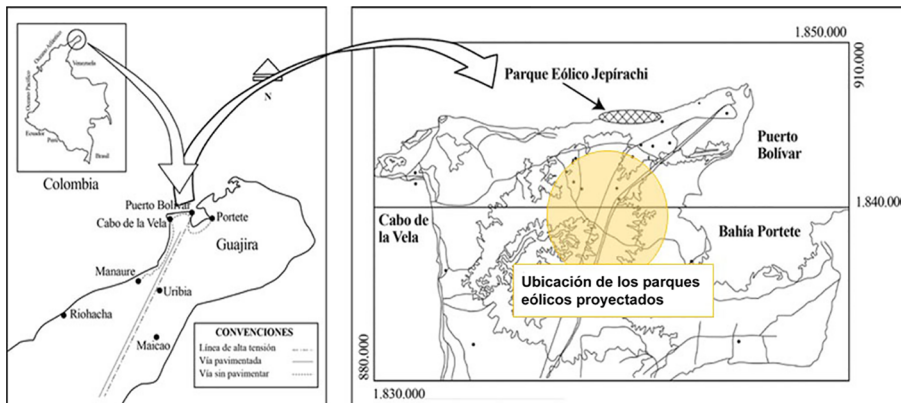
- La séptima fase es la **conexión a la red y la puesta en operación**, que incluye tanto la planificación del personal del emplazamiento como la puesta en marcha del aerogenerador y la gestión de los fallos y parones. También tiene lugar el preventivo y el predictivo, es decir, la planificación de los servicios de prevención (las inspecciones periódicas de los equipamientos, el cambio de aceite y filtros, la calibración de sensores electrónicos, la limpieza de las palas) y la organización de los servicios para reparar el mal funcionamiento de los componentes.
- La fase final en la cadena de valor consiste en la **generación y venta de energía**.

En este contexto, y dado el propósito del módulo de la asignatura de logística sectorial a la que atañe, se da especial importancia a las fases de obra civil, transporte de los componentes del aerogenerador hasta el emplazamiento del parque eólico y a las operaciones de montaje y ensamblaje de los aerogeneradores.

2. Descripción general del proyecto

El proyecto que se analiza en este módulo se refiere a la **construcción de cinco parques eólicos**, con una capacidad instalada de 648 megavatios (MW), cerca del municipio de Uribia, en la **región de la Alta Guajira** (figura 3), departamento colombiano del mar Caribe que limita con Venezuela.

Figura 3. Ubicación de los parques eólicos proyectados en la zona de la Alta Guajira, Colombia.



Fuente: Gabriel Pinilla Agudelo (2014) y elaboración propia

Esta zona se caracteriza por unos vientos fuertes y frecuentes (rangos entre los 5 y los 11 m/s durante todo el año) que permiten la generación permanente de energía, lo que lo convierte en un recurso muy competitivo en el mercado y aporta confiabilidad al sistema eléctrico nacional. Tras su construcción, se convertirá en el parque eólico de mayor escala en el país, superando al único parque existente (parque Jepirachi, en el municipio de Uribia, también en La Guajira), que cuenta con una capacidad de 19,5 MW y quince aerogeneradores.

Concretamente, el proyecto se compone de **cinco enclaves distribuidos en un área de influencia cercana a las 12.000 ha** y donde se instalarán **213 aerogeneradores** (ved la tabla 1):

Tabla 1. Caracterización de los cinco parques eólicos que conforman el proyecto de estudio

Parque	Capacidad	Aerogeneradores
Irraipa	99 MW	33
Carrizal	195 MW	65
Casa Eléctrica	180 MW	60
Apotolorru	75 MW	25
Jotomana	99 MW	30
Total	648 MW	213

Los aerogeneradores instalados tendrán una potencia nominal de entre 3,0 y 4,5 MW, una altura de torre comprendida entre los 120 y 131 metros, un diámetro entre 132 y 150 m y una velocidad de arranque y parada de 3 y 25 m/s, respectivamente. El modelo de aerogenerador utilizado será el de la compañía Vestas V150-4.2.

Actualmente, el parque eólico está en fase de proyecto y se espera que entre en operación a finales del año 2022, momento en el que también estará lista la línea de alta tensión que se está construyendo. La propiedad y derecho de explotación del parque eólico pertenece a la compañía AES Colombia, poseedora de una de las plataformas tecnológicas más avanzadas de Colombia y responsable del 6 % de la generación de energía del país, toda ella 100 % renovable².

⁽²⁾<https://www.aescol.com/>

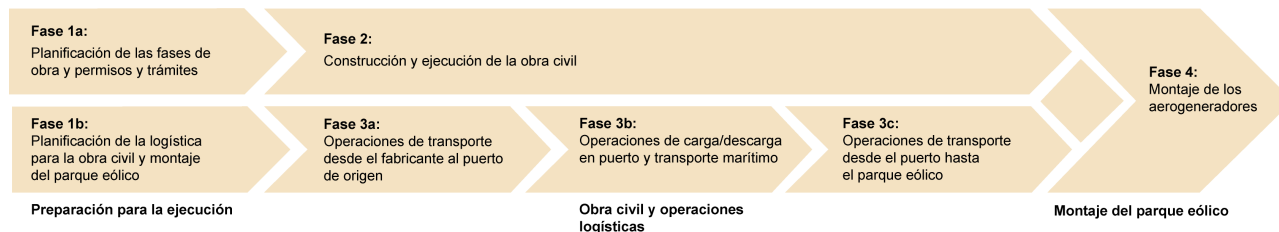
3. Etapas y fases del proyecto

El proyecto de **construcción y montaje de los parques eólicos** se ha estructurado en torno a cuatro etapas:

- preparación,
- obra civil,
- operaciones logísticas y transporte,
- montaje.

Y, a su vez, el proyecto se ha dividido en siete fases y subfases, en las que la coordinación es crítica para cumplir con los tiempos y el presupuesto asignado. Posteriormente a la fase de construcción y montaje, está la fase de puesta en marcha de los aerogeneradores y su conexión al Sistema Interconectado Nacional (SIN), a partir del año 2022. La figura 4 muestra conceptualmente la coordinación temporal de dichas fases y subfases de proyecto.

Figura 4. Esquema conceptual con las principales fases del proyecto de construcción de los parques eólicos



Fuente: elaboración propia

Como se puede apreciar, el proyecto toma dos vías complementarias que pueden discurrir en paralelo: obra civil, por un lado, y operativa logística y de transporte, por otro, para unirse finalmente con la operativa de montaje de los aerogeneradores, una vez finalizadas las tareas de cimentación y tengamos a disposición tanto las grúas que asistirán durante el proceso de ensamble como las piezas que componen los molinos eólicos (torre, góndola, palas, buje, etc.).

3.1. Preparación para la ejecución

Esta etapa preparatoria del proyecto se realiza de forma separada entre la parte de obra civil y la parte de logística y transporte, y se lleva a cabo teniendo en cuenta los requerimientos de equipos, los costes de obra y personal, la tramitación de permisos, la selección de proveedores, etc. A continuación, se detallan las principales tareas que hay que realizar en cada caso:

Tabla 2. Desglose de actividades que forman parte de la etapa de preparación para la ejecución

Planificación de las fases de obra civil	Planificación de la operativa logística
<ul style="list-style-type: none"> • Obtención de permisos operativos y de obra: <ul style="list-style-type: none"> – Uso de vías. – Obras zona de acopio temporal. – Obras/Adecuación vía principal. • Selección y contratación de proveedores, contratistas de las obras civiles y electromecánicas. • Permisos medioambientales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de rutas para el transporte de las piezas desde la fábrica de origen hasta el emplazamiento final. • Estudio técnico de cargas y verificación de radios de giros, pendientes, intersecciones, etc. • Selección del puerto para llevar a cabo la operativa de carga/descarga. • Contratos de fletamento o <i>charter party</i>. • Plan de estiba y trincaje. • Solicitud de los permisos de uso de vías de transporte y utilización de maquinaria y vehículos especiales.

3.2. Construcción y ejecución de la obra civil

La construcción de los parques eólicos lleva asociada una obra civil para la construcción de los caminos y de las plataformas que se utilizarán durante el montaje de los aerogeneradores. Los viales y las plataformas permanecerán durante la vida útil de la explotación, con el fin de poder realizar operaciones de mantenimiento.

Por tanto, esta etapa tiene como objetivo el acondicionamiento de los accesos para llevar a cabo el transporte de los aerogeneradores y demás equipos complementarios; así como la construcción de vías internas, infraestructuras auxiliares de ingeniería, edificios de explotación, estación eléctrica para la transferencia de la energía producida por cada aerogenerador hacia la red de la compañía eléctrica y, por último, la cimentación para el anclaje al terreno del aerogenerador.

A continuación, se indican de forma resumida las principales tareas proyectadas para la construcción de los cinco parques eólicos, teniendo en cuenta los requisitos y recomendaciones del fabricante Vestas.

1) Construcción y adecuación de los viales de acceso e interiores del parque eólico

Las tareas o actividades que se incluyen en este caso son:

- Balizamiento de las zonas de trabajo.
- Adecuación de superficies de acopio de materiales.
- Despeje y desbroce.
- Explanación y movimiento de tierras para la adecuación del terreno.
- Realización del firme con materiales de construcción no asfálticos (zohorra).
- Obras de drenaje a lo largo del trazado del vial.

Lectura recomendada

Vestas (2010). *Road, Crane Pad and Hardstand Specifications for Vestas Turbines* (Technology R&D). Randers (Dinamarca): Vestas Wind Systems A/S.

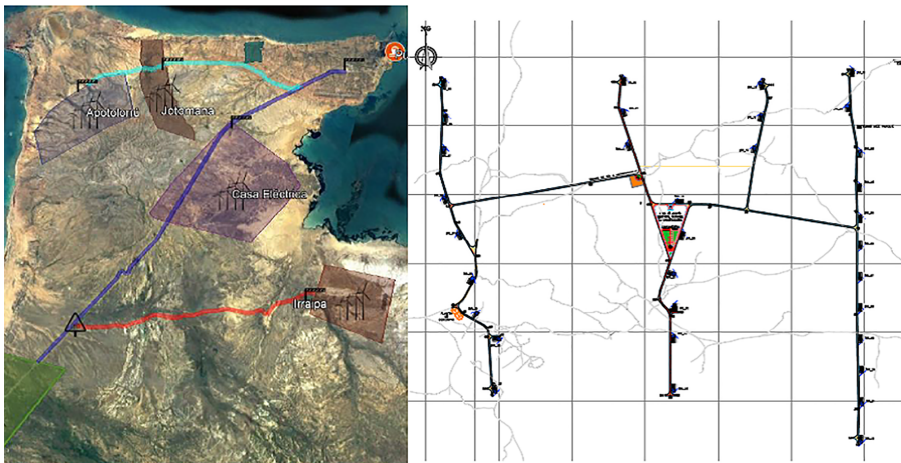
- Eliminación de los materiales sobrantes y de las instalaciones provisionales.
- Almacenamiento y trasiego de aceites y combustibles.

Y los criterios de diseño exigibles para el trazado de viales para el modelo de aerogenerador escogido (Vestas V150 4.2) son:

- Los viales de acceso al parque, así como los internos, deben tener un ancho mínimo de 5,5 m con un arcén al menos de 1 metro.
- La pendiente máxima longitudinal de dichos viales debe ser de 8°.
- La pendiente máxima transversal (gradiente) debe ser como máximo de 2°.
- La capacidad de los viales debe soportar como mínimo 17 toneladas de carga por eje y de 180 KN/m² para garantizar un transporte seguro.
- El radio de curvatura/acuerdo vertical (convexo y cóncavo) debe ser como mínimo de 200 metros.
- Las intersecciones de los viales de acceso a los viales internos del parque deben tener un radio de curvatura mínimo de 45 metros.
- Para las maniobras de los tráileres o camiones en las intersecciones (*hammerhead*) se aconseja dejar un espacio libre en horizontal y vertical mínimo de 75 metros.
- Para el movimiento de grúas montadas en la zona de obra se recomienda:
 - Un ancho de vía de 6,5 m y un ancho libre de 11 metros.
 - Una capacidad de carga del terreno/firme de 250 KN/m².
 - Una pendiente máxima longitudinal de un 6 %.

Algunos de los caminos deben tener carácter provisional, por lo que su uso se limita a esta primera fase de ejecución de las instalaciones. Otros, sin embargo, constituirán las pistas de acceso para el mantenimiento y el control operacional que deban realizarse durante la vida útil del parque.

Figura 5. Vías de acceso a los parques eólicos y plano de vías internas del parque eólico de Irraipa



Fuente: IDOM y elaboración propia

Teniendo en cuenta los criterios anteriores y la situación actual de la zona de proyecto (tabla 3) se estima que la adecuación de las vías internas de los parques eólicos requiere la construcción de los siguientes tipos de vía y terraplenes:

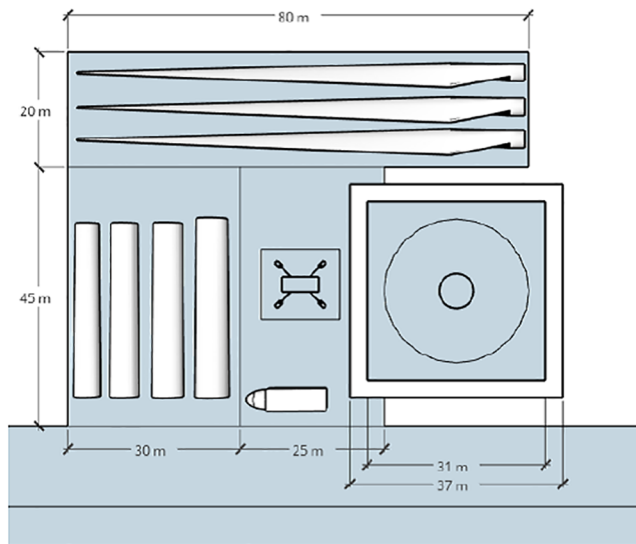
Tabla 3. Detalle de la vías internas proyectadas para los parques eólicos

Proyecto	Longitud (km)	Tipo de vía	Terraplén (m ³)
Irraipa	11	Tipo 1 (terraplén de 0,4 m)	56.000
Carrizal	39	Tipo 1 (terraplén de 0,4 m)	109.000
Casa Eléctrica	36	Tipo 2 (terraplén de 0,2 m)	50.000
Apitolorrú	15	Tipo 2 (terraplén de 0,2 m)	21.000
Jotomana	18	Tipo 2 (terraplén de 0,2 m)	25.000
Total	128		261.000

2) Construcción de las plataformas de montaje y maniobra

Junto a cada aerogenerador debe construirse un área de maniobra (plataforma) que permita el acopio de los elementos de montaje y permita la ubicación de grúas y camiones empleados en el izado y montaje del aerogenerador.

Figura 6. Ejemplo de planta de detalle de una plataforma de maniobra (propuesta para el proyecto)



Fuente: IDOM y elaboración propia

En este sentido, el fabricante danés Vestas recomienda los siguientes parámetros de diseño para dicha plataforma de montaje:

- Zona de maniobra mínima de la grúa principal de 25 x 50 metros, dispuesta en las inmediaciones de la cimentación del aerogenerador, para acomodar la grúa.
- Pendiente longitudinal y transversal de la plataforma de montaje máxima de 2°.
- Zona de depósito temporal para la góndola o *nacelle* de 7 x 50 m dentro del radio de trabajo de la grúa principal.
- Zona de acopio temporal para las palas de 20 x 80 m dentro del radio de trabajo de la grúa principal.
- Zona de acopio temporal para los tramos de torre de 30 x 45 m dentro del radio de trabajo de la grúa principal.
- El firme de esta zona, por debajo de la plataforma de montaje, es aconsejable que sea de zahorra natural o artificial, con un 0 % de pendiente y una capacidad portante al menos de 250 KN/m².

Las acciones de ejecución de la plataforma son idénticas a las que se han expuesto para los viales de acceso y las necesidades de superficie para el proyecto eólico son las siguientes:

Tabla 4. Superficie requerida para las plataformas de montaje

Parque	Aerogeneradores	Tipo de suelo	Área plataformas (m ²)	Volumen plataformas (m ³)
Irraipa	33	Tipo 1	134.475	53.790
Carrizal	65	Tipo 1	264.875	105.950
Casa Eléctrica	60	Tipo 2	244.500	48.900
Apitolorru	25	Tipo 2	101.875	20.375
Jotomana	30	Tipo 2	122.250	24.450
Total	213		867.975	253.465

3) Construcción y adecuación de un campamento de obra

Dentro de la zona de obra debe habilitarse una campa (explanada de terreno acondicionado) como instalación auxiliar, en la que se ubicará el campamento de obra y zonas de acopio de materiales, equipos y medios. Esta zona también de un punto limpio, dotado de contenedores para la segregación de residuos y, además, un espacio para el lavado de hormigoneras.

4) Construcción de las edificaciones anejas

Construcción de los edificios de explotación, relativos a las operaciones de control y a la subestación colectora de la planta.

El centro de control del parque es más o menos complejo, pero generalmente alberga los lugares de mando para control y mantenimiento, almacén y servicios administrativos. Para ello se requiere una planta rectangular (10 m de ancho, 25 de largo y 6 de alto) y construcciones auxiliares para el abastecimiento de aguas y saneamiento. Las acciones principales del proceso son:

- Adecuación de superficies de acopio.
- Despeje y desbroce.
- Explanación y excavación.
- Realización de estructuras civiles (edificios y fosas).
- Uso de vehículos y maquinaria específica.

5) Zapatas y cimentación de los aerogeneradores

La ejecución de las cimentaciones de la torre debe realizarse con hormigón armado y, en función del tipo de terreno, puede ser tipo zapata superficial o cimentación mediante pilotes. Los procedimientos constructivos que hay que seguir son:

- Excavación del hueco (4-5 m de profundidad) para la zapata superficial mediante el uso de maquinaria pesada o bien el uso de la máquina de pilotes en las zonas de Irraipa, Carrizal y algunas de Casa Eléctrica. Se estima que al menos un 50 % de los aerogeneradores del parque eólico del proyecto requerirá cimentaciones pilotadas con 24 pilotes por aerogenerador de 1 m de diámetro y entre 16 y 20 m de profundidad. El rendimiento de la máquina es de dos pilotes al día. En el caso de las zapatas, y si las características del terreno lo requieren, deben rellenarse con piedras y hormigón (zahorra artificial) hasta la cota requerida. En total se estima que será necesario excavar y mover aproximadamente 375.000 m³ de tierra.
- Hormigón de limpieza o de nivelación (capa de 10 a 15 centímetros y pendientes de 0,2 a 1 %), sobre el que se instala el ferrallado de la armadura inferior. Debe emplearse acero tipo B500-SD con distintos diámetros.
- Inserción y posicionamiento de la virola en la excavación.
- Ferrallado de la armadura superior, en la que se introduce parte del hierro de la misma a través de la virola para asegurar su unión con la losa de hormigón.

Virola

Anclaje de la torre eólica que se introduce en la cimentación.

- Creación de la losa de hormigón para formar la zapata de la estructura eólica mediante una bomba de hormigonado.

La virola o fuste, una vez hormigonado por dentro y por fuera, sobresale de 40 a 50 centímetros sobre el nivel de la plataforma para facilitar la operación con el resto de los tramos de la torre.

Las dimensiones de la plataforma, o explanada, para las torres también vienen establecidas por el fabricante Vestas y deben ser de planta circular con un diámetro de 23 metros, con una losa de 1 m de canto, un cono de 1,7 m de canto y un fuste de 0,5 m de altura.

Figura 7. Detalle de la cimentación de planta circular de una torre eólica



Fuente: <http://www.arquitecturaenacero.org>

A continuación, se resumen los **trabajos de cimentación** proyectados para el parque eólico:

Tabla 5. Cimentaciones profundas y superficiales para los aerogeneradores

Parques	Aerogeneradores	Cimentación superficial		Cimentación profunda			Total
		Volumen hormigón (m ³)	Peso acero (Tm)	Pilotes (Q)	Excavación por parque (m ³)	Hormigón (m ³)	
Irraipa	33	26.705	2.938	792	12.441	12.441	39.145
Carrizal	65	52.600	5.786	1.560	24.504	24.504	77.105
Casa Eléctrica	60	48.554	5.341	0	0	0	48.554
Jotomana	25	20.231	2.225	0	0	0	20.231
Apotolorrú	30	24.277	2.670	0	0	0	24.277
Total	213	172.367	18.960	2.352	36.945	36.945	209.312

6) Instalación eléctrica (subestación)

El sistema eléctrico del parque eólico tiene por objeto la transferencia de la energía producida por cada aerogenerador hacia la red del SIN, debido a que la energía eléctrica no se puede almacenar en grandes cantidades. Para el proyecto en cuestión, se estima que se requerirá una subestación por parque y quizá una subestación eléctrica para la conexión con el SIN.

Dicha conexión y complejo de subestaciones deberá estar compuesto por los siguientes elementos:

- Instalación eléctrica de baja tensión (BT): puede ser interna a cada aerogenerador o bien externa.
- Red subterránea de media tensión (MT): que conecta a los aerogeneradores entre sí y a la subestación del parque eólico.
- Toma de tierra: además de las canalizaciones descritas, cada aerogenerador debe estar provisto de una canalización específica para la red de tierra, con excavación de una zanja de un metro de profundidad por 0,40 de anchura, colmatada con tierra vegetal y material procedente de la propia excavación o préstamo.
- Subestación transformadora MTIAT: transforma la electricidad de MT de las líneas de transmisión del parque en valores superiores de tensión (AT). Consiste en una estructura prefabricada mixta.
- Evacuación en alta tensión (AT): la forma más eficiente de transportar la energía producida por el parque eólico es la alta tensión, que conlleva la disminución de las pérdidas a causa de caídas de tensión por resistencia y reactancia.

7) Zanjas, cableado y alcantarillado

El enterramiento de los cables de tensión debe llevarse a cabo mediante zanjas contiguas a los viales, o bien mediante cruzamientos o arquetas de empalme.

Dichas zanjas para cableado se refuerzan con una capa de hormigón y una estructura metálica para que el agua fluyente no deteriore la superficie y puedan quedar al descubierto los conductores.

La sección de dichas zanjas está formada por los elementos siguientes: material de relleno, placa de protección, material procedente de la excavación y cemento en la capa superior. Los cables deben ir en la parte inferior de la capa de relleno.

Para llevar a cabo el conjunto de actuaciones y procedimientos de construcción indicados se requiere el uso de retroexcavadoras, plantas de hormigón, bombas de hormigón, máquinas pilotadoras y plantas de doblado y corte de acero.

3.3. Operaciones logísticas y de transporte

Las **operaciones de logística y transporte** asociadas a la construcción de un parque eólico suponen una de las fases más complejas. Esto es debido, por una parte, a la necesidad de un transporte con un equipo especializado para mover las piezas de grandes dimensiones (estructuras muy pesadas y voluminosas) que componen los aerogeneradores puerto a puerto y puerta a puerta, y por otra parte, la propia logística de las grúas y maquinaria que se requieren para el izado, montaje y ensamblaje de los aerogeneradores (torre, palas, rotor, góndolas, etc.).

En lo referente al **transporte puerto a puerto**, resultan claves las operaciones siguientes:

- Contratación de un buque entero, o póliza de fletamento de un buque y concierto de las pólizas de seguro correspondientes a cargo del proyecto. En el transporte de grandes cargas, se suelen diferenciar dos tipos de relaciones contractuales: la relación contractual del cliente (importador o exportador de cargas de proyecto) con el operador logístico que organiza la operación, y la relación contractual del operador logístico con las empresas transportistas que ejecutan el transporte. Ambos tipos de relaciones contractuales presentan elementos fundamentales que hay que tener en cuenta, tales como la distribución de responsabilidades, entre otros. (Bohoyo, 2017).
- Operaciones portuarias de carga/descarga:
 - Recepción de las piezas en el puerto de origen hasta el embarque.
 - Estiba/desestiba de las piezas y componentes de los aerogeneradores.
 - Trincaje de las piezas para un transporte seguro.
 - Recepción de las piezas en el puerto de destino y acopio (depósitos aduaneros o fiscales).
- Trámites para el despacho aduanero.
- Transporte marítimo entre puertos.

Lectura recomendada

L. Bohoyo Acosta (2017). *Los riesgos en el transporte de carga de proyecto*. Máster en Negocio y Derecho Marítimo (Promoción 2016-2017). Madrid: IME y Universidad Pontificia Comillas.

Cabe indicar que tanto las operaciones de carga/descarga de las piezas como su trincaje deben realizarse según el plan de estiba correspondiente y teniendo en cuenta las indicaciones que vienen explícitas en el manual de sujeción de la carga (CSM) del buque, basado en los principios establecidos en el código CSS. En él se documentan los tipos de carga para las que un buque está adaptado para transportar, y cómo debe ser cargada, estibada y asegurada.

Por ello, en los contratos de fletamento correspondientes, el fletador o cargador y/o los aseguradores de la carga suelen incluir un requisito referente al nombramiento de un *surveyor* independiente, cuya responsabilidad es revisar, aprobar y monitorear todas las operaciones de carga, estiba y aseguramiento de la mercancía.

En el transporte **puerta a puerta**, destacan las siguientes fases:

- Transporte terrestre desde la fábrica hasta la zona de recepción del puerto de origen.
- Transporte terrestre desde la terminal portuaria de descarga hasta la zona de acopio en las inmediaciones del puerto.
- Transporte terrestre hasta la zona de acopio del parque eólico.

Cabe tener en cuenta que la velocidad de circulación media de los equipos de transporte es entre 10 y 15 km/h y que se trata, generalmente, de equipos con cama alta extensible para las palas, de suelo bajo para tramos cortos de torre, *nacelles* y bujes, y de tipo direccionable para los tramos más largos.

Por último, el **transporte de grúas** (tipo celosía sobre orugas o cadena) y **equipos de izado** para el montaje de los aerogeneradores se realiza hasta la zona de montaje en el parque eólico por vía terrestre, y para ello se utilizan las vías de acceso adaptadas para el transporte y el movimiento de los aerogeneradores.

3.4. Montaje de los aerogeneradores

Finalmente, conforme la obra civil llega a su fase final, y una vez se han transportado y acopiado los componentes hasta el punto de anclaje, se procede al montaje y ensamblaje de los aerogeneradores. Para ello, se hace uso de una grúa de grandes dimensiones, que se emplea para el rotor y la góndola, y otra de dimensiones menores y más fácil de mover, para los primeros tramos de la torre.

Lectura recomendada

Organización Marítima Internacional (OMI). *CSS Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing*. Comité de Seguridad Marítima, Resolución A.714(17), noviembre de 1991.

Figura 8. Detalle del proceso de montaje de unos aerogeneradores



Fuente: <https://blog.structuralia.com/>

En términos generales, el montaje de los aerogeneradores se realiza de acuerdo con cinco fases:

- 1) Montaje de la base de la torre del aerogenerador.
- 2) Montaje de los segmentos de la torre.
- 3) Montaje de la góndola o *nacelle* sobre la torre.
La góndola suele izarse de forma completa, aunque también puede izarse de manera modular si los aerogeneradores son muy grandes, generalmente superiores a los 4 MW.
- 4) Ensamblaje del rotor con las palas del aerogenerador.
- 5) Ensamblaje del rotor y las palas con la góndola o *nacelle*.

Conviene indicar que el rotor se puede izar montado desde el suelo en posición horizontal, para ello es necesario utilizar dos grúas (una vez que sobrepasa una altura determinada se coloca en posición de anclaje), o bien se puede izar con el buje unido a la góndola y después unir las palas una a una.

Por último, una vez montado el aerogenerador, se conectan los sistemas eléctricos e hidráulicos que permitirán ponerlo en funcionamiento.

Figura 9. Detalle del proceso de montaje de las palas

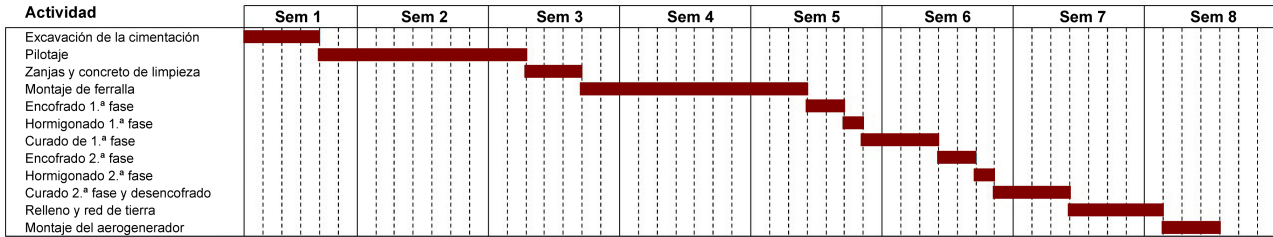


Fuente: <https://blog.structuralia.com/>

Para llevar a cabo el montaje completo de un aerogenerador, teniendo en cuenta las fases previas de obra civil y preparación, se ha estimado una duración total de 53 días por aerogenerador con pilotaje; en este proceso las actividades

de pilotaje y montaje de acero son las de mayor duración (ved el diagrama de Gantt). Para los aerogeneradores que requieren cimentación superficial (zapa-ta) se estima una duración aproximada de 38 días de trabajo.

Figura 10. Detalle del proceso de montaje de un aerogenerador que requiere pilotaje en la zona de proyecto



Fuente: IDOM y elaboración propia

4. Retos logísticos y de transporte asociados al proyecto

El proyecto de construcción de los parques eólicos en la zona de La Guajira presenta un gran reto a escala logística relacionado con el **transporte y el movimiento de los aerogeneradores** hasta la zona de proyecto, incluidos tanto la **operativa portuaria** como el **transporte terrestre de acarreo**. La zona de proyecto, como se ha podido ver en los apartados anteriores, es de difícil acceso por vía terrestre y marítima, por lo que es necesario analizar las distintas alternativas de rutas y adecuaciones viales para acometer el proyecto.

Por otra parte, y en menor grado de complejidad, se encuentra el reto asociado al **montaje de los aerogeneradores**.

En este contexto, a continuación, se indican los **retos específicos** relacionados con la etapa operativa y logística del proyecto.

Operativa portuaria

- 1) ¿Qué tipo de buque es necesario para el transporte de los aerogeneradores?
- 2) ¿Qué puerto se escogerá para llevar a cabo las operaciones de carga/descarga de las piezas de los aerogeneradores, según las condiciones de atraque, capacidad de muelle y zonas de acopio para la recepción de las piezas?
- 3) ¿Qué tipo de maquinaria se necesita para realizar las operaciones de carga/descarga, transporte interior en el puerto y manipulación en la zona de acopio?

Transporte terrestre de acarreo

- 1) ¿Qué opciones de rutas y alternativas de transporte están disponibles desde el puerto escogido hasta la zona de proyecto?
- 2) ¿Cómo hay que transportar los diferentes componentes de los aerogeneradores desde el puerto escogido hasta la zona de proyecto?
- 3) ¿Qué tipo de equipos y unidades de transporte se requieren para el transporte de los componentes de los aerogeneradores?

Operaciones de montaje de los aerogeneradores

- 1) ¿Qué tipología de grúa conviene utilizar para el montaje de los aerogeneradores?

- 2) ¿Cómo se van a transportar los equipos de montaje?

5. Propuesta técnica para dar solución a los retos logísticos y de transporte del proyecto

5.1. Datos de partida o condicionantes para llevar a cabo durante el reto

5.1.1. Origen y destino de los aerogeneradores

Origen

La instalación de Vestas que proporcionará los aerogeneradores para los parques eólicos en construcción se ubica en el **estado de Ceará (Brasil), concretamente entre los municipios de Aquiraz y Verife-Itaitinga**, a unos treinta kilómetros del puerto de Fortaleza, desde donde se transportarán por vía marítima las piezas de los aerogeneradores.

Destino final

El destino final, como se indica al comienzo de este módulo, es la región de **la Alta Guajira**, cerca del municipio de Uribia.

5.1.2. Características de los aerogeneradores

Dadas las características de viento de la zona (categoría IEC IIIB – 3,0-7,5 m/s) y la capacidad de entrega deseada para conectar al SIN (693MW) en los parques eólicos se utilizará el modelo de aerogenerador del fabricante Vestas V150 -4.2, cuyas dimensiones que hay que tener en cuenta para el transporte son las siguientes:

Tabla 6. Caracterización de los aerogeneradores para planificar la logística y el transporte

Componente	Dimensiones	Valores
Aerogeneradores	Número de aerogeneradores necesarios	153 unidades (capacidad unitaria, de 4 a 4,2 MW)
Dimensiones del rotor/buje	Diámetro del rotor/buje	150 m
	Área de movimiento circular (<i>swetp area</i>)	17,671 m ²
	Longitud de tramo máxima	5,5 m
	Altura de tramo máxima	3,8 m
	Ancho de tramo máximo	3,8 m

Componente	Dimensiones	Valores
	Peso	38 Tm
Dimensiones de las palas	Longitud de las palas	73,7 m
	Ancho máximo de la pala (<i>chord distance</i>)	4,2 m
	Peso de las palas	18 Tm/pala
Dimensiones de la torre	Altura de la torre	120 m
	Tramos de la torre	10 - 38 m
	Número de tramos	6
	Peso de la torre	34 - 67 Tm
Dimensiones de la góndola o nacelle	Altura (transporte/instalada)	3,4 m / 6,9 m
	Longitud	12,8 m
	Ancho	4,2 m
	Altura	7,0 m
	Peso	110-120 Tm

Fuente: www.vestas.com

5.2. Análisis y caracterización de la solución logística y de transporte

5.2.1. Operativa portuaria

¿Qué puerto se escogerá para llevar a cabo las operaciones de carga/descarga de las piezas de los aerogeneradores, según las condiciones de atraque, capacidad de muelle y zonas de acopio para la recepción de las piezas?

A partir de la ubicación de la fábrica de componentes de los aerogeneradores en el estado de Ceará (Brasil), se ha creído conveniente que el **puerto de origen y, por tanto, de recepción, acopio y carga de las palas, góndolas y rotores sea el puerto de Fortaleza** (también conocido como Porto do Mucuripe), ubicado a 30 kilómetros de distancia, con un calado medio de 14 m y una extensa superficie de almacenaje pavimentada (> 171.000 m²).

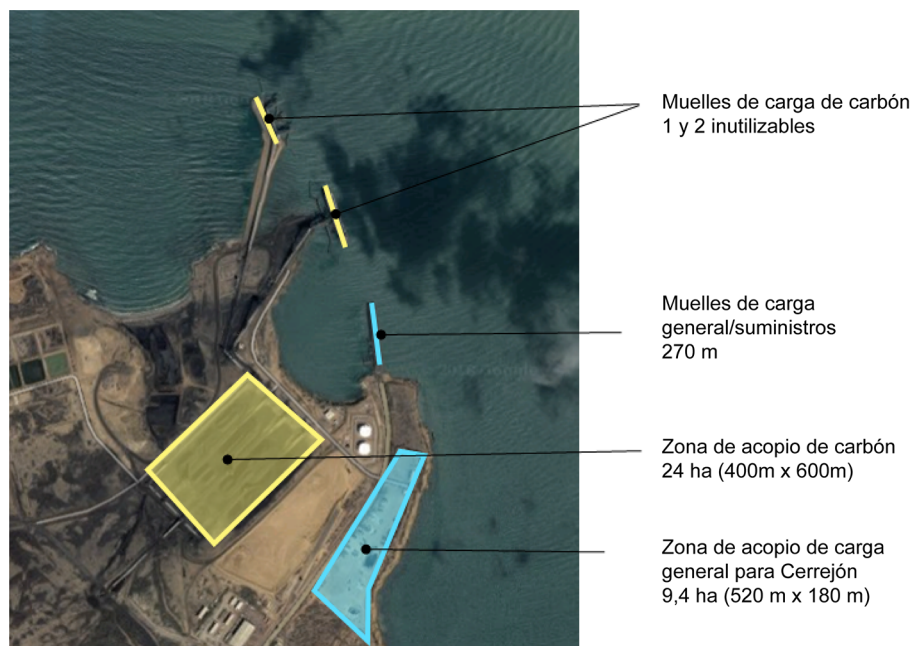
Por otra parte, entre las distintas opciones para llevar a cabo la operativa portuaria en la zona de destino (inmediaciones del parque eólico en construcción) destacan las siguientes:

Tabla 7. Alternativas de puerto de destino en las inmediaciones de los parques eólicos en construcción

Puerto candidato	Características del puerto
Puerto Santa Marta (Sociedad Portuaria)	<p>Muelle para carga general de 240 m de longitud y 13 m de calado.</p> <p>Posibilidad de acceder con grúas al muelle (se han manejado cargas extradimensionadas en este puerto).</p> <p>Existencia de patio para el almacenaje de carga general, aunque compartido (5 ha).</p> <p>Distancia al parque eólico más cercano superior a los 250 km.</p>
Puerto Brisa	<p>Puerto multipropósito en el corregimiento de Mingueo, municipio de Dibulla, departamento de La Guajira.</p> <p>Muelle con longitud y calado suficientes.</p> <p>Posibilidad de acceder con grúas al muelle.</p> <p>Existencia de una campa de acopio cercana, en la que actualmente se almacena carbón. Se requieren permisos de uso.</p> <p>Distancia al parque eólico más cercano superior a los 200 km.</p>
Puerto Bolívar	<p>Ubicado en bahía Portete, al norte de La Guajira.</p> <p>Especializado en la exportación de carbón y con capacidad para recibir buques de hasta 175.000 toneladas de peso muerto, con 300 m de eslora y 45 m de manga.</p> <p>Muelle privado para carga general con una longitud superior a 250 m y calado de 9,5 metros.</p> <p>Posibilidad de acceso al muelle con camiones y grúas auxiliares.</p> <p>Disponibilidad de campa de acopio cercana.</p> <p>Cercanía a los parques eólicos (inferior a 35 km).</p>

Entre las opciones anteriores, se ha considerado que la **mejor**, dadas las características del muelle, la disponibilidad de una campa para el acopio temporal y la cercanía a los parques eólicos, es **Puerto Bolívar** como puerto de destino y recepción de los aerogeneradores.

Figura 11. Vista en planta del Puerto Bolívar y zona de descarga de los aerogeneradores



Fuente: IDOM y elaboración propia

Las instalaciones portuarias dedicadas a la carga general (zona sombreada en azul de la figura 12) presentan las siguientes características físicas:

Tabla 8. Dimensiones máximas de los buques de carga general que pueden operar en Puerto Bolívar

Dimensiones máximas de los buques en el muelle de carga general	Eslora: 175 m Manga: 32 m Calado: 9,5 m
Dimensiones de acceso al muelle y capacidad portante	Ancho de acceso al muelle: >5 m Capacidad portante del muelle: 0,2 MPa Espacio suficiente para el giro de camiones y vehículos especiales

¿Qué tipología de buque y características se necesitan para el transporte de los aerogeneradores?

Para determinar las características que deben cumplir los buques que transportarán las piezas de los aerogeneradores desde el puerto de Fortaleza al Puerto Bolívar se han tenido en cuenta los siguientes factores:

- Tipología de buque compatible con el transporte de aerogeneradores (buques de carga general multipropósito con grúas a bordo o buques de tipo *heavy lift*) y que operan en la región marítimo-portuaria.
- Restricciones físicas que presenta el muelle para carga general en el Puerto Bolívar.
- Necesidades de carga y dimensiones de las piezas de los aerogeneradores (tabla 5). En este sentido, el elemento o pieza más pesada y, por tanto, más condicionante es la *nacelle* del aerogenerador, con un peso de 150 toneladas, y en cuanto a dimensiones, son las palas, con una longitud cercana a los 74 metros.

Según dichas características, a continuación se hace una propuesta de buques de carga general que son aptos para llevar a cabo el transporte de las piezas:

Tabla 9. Buques de carga general aptos para el transporte de los aerogeneradores y operar en los puertos de Fortaleza y Bolívar

Buque	Tipo	Eslora (m)	Manga (m)	Calado (m)	Grúas
Condor Bilbao	Carga general	144,85	22,00	7,10	2 x 150 Tm 1 x 80 Tm
Ocean Freedom	Carga general	153,52	23,45	7,40	2 x 400 Tm
ABB Vanessa	Carga general	139,93	21,01	6,20	2 x 180 Tm
BBC Sapphire	Carga general	153,45	23,20	6,60	2 x 400 Tm 1 x 80 Tm
BBC Russia	Carga general	147,00	22,80	6,60	2 x 250 Tm

Fuente: MarineTraffic

En dichos buques, las palas de los aerogeneradores deben ir posicionadas en una estructura soporte de doce unidades (tres alturas y cuatro unidades por fila) en la cubierta principal. Las secciones de torres eólicas deben ir también estibadas en la cubierta principal con unos soportes de apoyo en los extremos y protegidos con una espuma de polietileno de alta densidad junto con imán (*Magnet Foam*) para fijarlo a la carga y así protegerlo de posibles daños durante la operativa portuaria. Las góndolas y los rotores deben ir en el interior de las bodegas del buque de carga general.

Figura 12. Transporte marítimo y operaciones portuarias de carga/descarga de palas eólicas y tramos de torre de aerogeneradores



Fuente: <http://www.kaleidologistics.com>

¿Qué tipo de maquinaria se necesita para realizar las operaciones de carga y descarga, transporte interior en el puerto y manipulación en la zona de acopio?

Debido al reducido espacio útil en el muelle, la descarga de los elementos debe realizarse directamente al camión que transporte las piezas a la zona de acopio por medio de las grúas del propio buque, asistida por dos **grúas móviles de celosía auxiliar o telescópicas** en el muelle de descarga. Por tanto, el movimiento más crítico en el traslado de los diferentes elementos, en cuanto a tiempos, es el de la propia descarga del buque al camión.

La **campa o zona de acopio** tiene una superficie de 50.000 m² y se ubica a 3,5 km del muelle, con una pendiente máxima en el recorrido del 4,8 %. Para cada aerogenerador se ha estimado una superficie máxima necesaria de unos 2.000 m², repartidos de la siguiente forma: 600 m² para los tramos de torre, 20 m² para el buje, 65 m² para la *nacelle*, 675 m² para las palas y unos 600 m² adicionales para zonas de paso y maniobra.

Esta zona de acopio debe tener dos puntos de entrada y dos de salida en los extremos, de tal forma que los camiones no interfieran las labores de descarga de los camiones al cubrir las rutas del puerto a la zona de acopio y de la zona de acopio a los parques.

Figura 13. Ubicación de la zona de acopio de piezas y ruta hasta el muelle de descarga



Fuente: IDOM y elaboración propia

En la zona de acopio de piezas son necesarias **grúas auxiliares para la descarga y carga de los equipos en la campa** de la misma tipología que las empleadas en el muelle de descarga. Esto es, **grúas móviles de celosía auxiliar o telescópicas**.

Teniendo en cuenta los datos anteriores, que la duración del ciclo (descarga del buque al camión, transporte a la zona de acopio, descarga en campa, retorno al muelle) es de 2 a 3 horas y la limitación de espacio en el muelle, se utilizarán **tres camiones funcionando en “modo carrusel”**, de manera que en ningún caso los equipos de descarga del buque deban esperar a alguno de ellos.

5.2.2. Transporte terrestre

¿Qué opciones de rutas y alternativas de transporte están disponibles desde el puerto escogido hasta la zona de proyecto?

La zona de acopio ubicada en las inmediaciones del puerto está situada a 7 km del parque eólico de proyecto más cercano (Casa Eléctrica) y a 30 km del parque más lejano (Carrizal), y las rutas posibles a cada uno de los cinco enclaves de proyecto son:

- **Ruta A:** es la vía que comunica el casco urbano de Uribia con Puerto Bolívar, es propiedad del Cerrejón y cuenta con condiciones para el transporte de carga sobredimensionada. En total se recorren aproximadamente 32 km sobre esta vía para llegar a la entrada del proyecto más apartado del puerto, Carrizal.
- **Ruta B:** es la vía que comunica el kilómetro 2 de la ruta A hasta los parques de Apotolorrú y Jotomana. Se recorren aproximadamente 13,3 km hasta Apotolorrú y 8,5 hasta Jotomana.

- **Ruta C:** es la vía de acceso al parque eólico de Irraipa. Es la vía en peor estado y necesita adecuarse completamente para contrarrestar los efectos del invierno. Es un trayecto de 14 km, aproximadamente.

Las **distancias aproximadas** que hay que recorrer entre Puerto Bolívar y los parques eólicos se indican en la tabla siguiente:

Tabla 10. Rutas alternativas de transporte y distancia entre la zona de acopio portuaria y las zonas de proyecto

Parque	Aerogeneradores	Ruta A	Ruta B	Ruta C	Total
Irraipa	33	15,50 km	-	12,00 km	27,50 km
Carrizal	65	25,70 km	-	-	25,70 km
Casa Eléctrica	60	7,30 km	-	-	7,30 km
Apotolorru	25	2,70 km	13,30 km	-	16,00 km
Jotomana	30	2,70 km	8,50 km	-	11,20 km

En cuanto al **tiempo de viaje de la rotación campa-parque-campa**, a partir de los datos anteriores se puede estimar que, en el caso extremo del parque eólico más alejado (27,5 km) serán necesarias alrededor de ocho horas para completar la ida, la descarga y la vuelta a la campa de acopio (10-15 km/h de velocidad media). Y, para la ruta más corta, se estima un tiempo de rotación aproximado de tres horas y media.

¿Cómo hay que transportar los diferentes componentes de los aerogeneradores desde el puerto escogido hasta la zona de proyecto? ¿Qué tipo de equipos y unidades de transporte se requieren para el transporte de los componentes de los aerogeneradores?

El transporte de los aerogeneradores desde el puerto a la zona de construcción de los parques eólicos se realiza por carretera y por las vías indicadas anteriormente. Para ello, deben solicitarse los permisos de transporte especial correspondientes y el transporte debe ir escoltado por los equipos de seguridad de la región.

En cuanto a la **tipología de los medios de transporte terrestre**, deben utilizarse distintas soluciones de semirremolques ya adaptados para transportar aerogeneradores. Entre las distintas alternativas, destacan las siguientes:

Tabla 11. Tipología de semirremolques para el transporte terrestre de las piezas de los aerogeneradores

Tipología de semirremolque	Unidad de carga recomendada para transportar
Plataforma de cama fija o extensible (simple/doble/cuádruple) y corona giratoria de dos a siete ejes con capacidad de 120 toneladas.	Tramos de torre u otras piezas largas.
Góndolas de cama baja (fija o extensible) de uso polivalente con una carga útil de 180 toneladas.	Secciones de torre, generadores eléctricos, palas y concentradores, góndola o <i>nacelle</i> , maquinaria de obra.
Góndolas de cama rebajada con ruedas traseras giratorias con una carga útil de hasta 150 toneladas.	<i>Nacelles</i> , buje, maquinaria de obra, grúas especiales.
Semirremolques especiales para el sector eólico con ejes pendulares, cama extensible desde los 18 hasta los 64 metros, ruedas traseras giratorias y cuello de cisne ajustable (<i>Super Wing Carrier</i>).	Palas de los aerogeneradores (74 metros)

Fuente: www.nooteboom.com

Como se puede apreciar, debido a las diferentes características de los componentes, se necesitan, al menos, tres tipologías de equipos:

- Semirremolque especial de cama extensible con ejes pendulares y ruedas traseras giratorias para transportar las palas.
- Semirremolque de cama rebajada con ruedas traseras giratorias para el transporte de la góndola/*nacelle* y buje (capaces de cargar también los tramos más cortos de la torre).
- Semirremolque de cama baja y de uso polivalente para el transporte del resto de tramos de las torres.

En este contexto, hay que indicar que para transportar las góndolas y los bujes de los aerogeneradores existen diversas opciones, en función de las restricciones de peso en algún tramo de la ruta (transportar los componentes juntos o por separado) o bien por cuestiones de montaje y ensamblaje en el lugar de proyecto. En este sentido, las opciones de transporte son las siguientes:

- Transportar el buje y la góndola por separado o a la vez.
- Transportar el buje y la góndola por separado sin que la góndola tenga el generador instalado.
- Transportar la góndola sin generador ni multiplicadora ni buje (por separado).
- Transportar todos los componentes por separado (*nacelle*, buje, generador, multiplicadora y tren de potencia).

La decisión final también está condicionada por el presupuesto disponible.

Figura 14. Transporte por carretera de las palas de los aerogeneradores



Fuente: <http://www.kaleidologistics.com>

Por último, en lo referente al número de unidades de transporte requeridas para transportar las piezas hasta los parques eólicos, se ha considerado que en los parques existe la posibilidad de almacenar los distintos elementos, de forma que se puede garantizar la llegada de las piezas con anterioridad al montaje.

Por ello, teniendo en cuenta los tiempos de desplazamiento y que disponemos de tres equipos de transporte especializados para las palas, tramos de torre y góndolas, respectivamente, se considera oportuno que se hagan dos viajes completos al día por equipo.

De esta forma tenemos que, para un aerogenerador formado por tres palas, seis tramos de torre y una góndola completa, se necesitan los siguientes viajes y días de trabajo desde la zona de acopio en el Puerto Bolívar hasta los parques eólicos:

Tabla 12. Detalle del movimiento de piezas por carretera y estimación temporal por aerogenerador

Equipo/Pieza	Viajes/Día	Movimiento piezas día -2	Movimiento piezas día -1	Día de montaje
Equipo 1. Semirremolque de cama baja	Viaje 1/2	Tramo torre 1/6	Tramo torre 5/6	Acopio, montaje y listo para el izado
	Viaje 2/2	Tramo torre 2/6	Tramo torre 6/6	
Equipo 2. Semirremolque de cama rebajada	Viaje 1/2	Tramo torre 3/6	Góndola / Nacelle	
	Viaje 2/2	Tramo torre 4/6	Buje	
Equipo 3. Semirremolque especial	Viaje 1/2	Pala 1/3	Pala 3/3	
	Viaje 2/2	Pala 2/3	-	

Como se puede apreciar, para mover un aerogenerador completo se requieren tres unidades de transporte entre el parque eólico y la campa cerca del Puerto Bolívar y dos días completos de trabajo para transportar las once piezas completas que lo componen. Estos equipos son compatibles con un equipo de montaje en los parques eólicos.

En caso de realizar el montaje de varios aerogeneradores en paralelo, se podría incrementar un turno más por día o incrementar el número de unidades de transporte y en parque.

5.2.3. Operaciones de montaje de los aerogeneradores

¿Qué tipología de grúa conviene utilizar para el montaje de los aerogeneradores?

A partir de las dimensiones (tamaño y peso) de las piezas de los aerogeneradores se requieren grúas de montaje desplazables por carretera y por los viales internos en las zonas de proyecto con capacidad para izar el rotor del aerogenerador a 120 m de altura, teniendo en cuenta que el peso de la góndola es de 110 a 120 toneladas.

En este sentido, las opciones de grúa disponibles en el mercado son:

- Grúa móvil telescópica con capacidad para 750 toneladas de carga máxima y alcance de 120 a 130 m con un sistema de arriostamiento tipo Y, plumín abatible, chasis todo terreno de nueve ejes sobre orugas y desplazable en carretera (por ejemplo, Liebherr LTM 1750-9.1).
- Grúa de celosía sobre cadenas de 120 a 130 m de alcance con pluma, sistema Derrick y plumín fijo, con capacidad para 600 toneladas (por ejemplo, Liebherr LR 1600/2). Se puede trasladar por carretera y desmontada tiene una anchura de tres metros.
- Grúa móvil telescópica con menor capacidad para el montaje de los segmentos bajos de las torres. Se requiere poco espacio para montar la grúa y es universalmente aplicable (por ejemplo, Liebherr LTM).

En este sentido, se estima que un equipo de trabajo montando las bases de las torres y otro, en paralelo, montando los segmentos altos de las torres, las góndolas, las palas y los bujes daría una **productividad de dos a tres aerogeneradores por semana**, apoyado por los equipos de transporte indicados anteriormente, que son capaces de transportar las once piezas de un aerogenerador en dos días completos (dos turnos por día).

El **primer frente** estaría formado por una **grúa móvil telescópica** de menor capacidad (LTM) y el **segundo frente**, por maquinaria más especializada y de gran capacidad formada por una **grúa de celosía sobre cadenas** (Liebherr LR 1600/2), apoyada por una grúa telescópica auxiliar que ayude a verticalizar los distintos componentes.

Por último, conviene indicar que las operaciones logísticas de montaje son muy complejas y requieren equipos y personal especializado. Por otro lado, las condiciones meteorológicas han de ser necesariamente favorables, no pueden izarse piezas con vientos superiores a 12 m por segundo.

Bibliografía

Las principales **fuentes de información** que han servido de base para la elaboración del presente módulo se citan a continuación.

Bohoyo Acosta, L. (2017). *Los riesgos en el transporte de carga de proyecto*. Máster en Negocio y Derecho Marítimo (Promoción 2016-2017). Madrid: IME y Universidad Pontificia Comillas.

Davide Parrilli, M. (coord.); Álvarez, E.; Elola, A.; Lorenz, U.; Rabbellotti, R. (2012). *Análisis de la cadena de valor de la industria eólica vasca: oportunidades y ámbitos de mejora*. Bilbao: Orkestra - Instituto Vasco de Competitividad, Fundación Deusto, Universidad de Deusto.

Galán Soraluze, F. (2009). *Anchoring wind towers using an embedded steel section*. *Revista de Obras Públicas* (n.º 156 (3503), págs. 35-48).

IDOM (octubre de 2018). *Due diligence técnica para la compra de 5 proyectos eólicos*.

Liebherr-Werk GmbH (2018). *Tecnología punta de Liebherr. Grúas para la energía eólica*. Ehingen (Alemania).

Organización Marítima Internacional (OMI). *CSS Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing*. Comité de Seguridad Marítima, Resolución A.714(17), noviembre de 1991.

Pinilla Agudelo, G. (2014). *Notas sobre la vegetación desértica del Parque Eólico Jepírachi, Alta Guajira, Colombia*. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* (n.º 38, págs. 43-52, 10.18257/raccefyn.39).

Talayero Navales, A.; Telmo Martínez, E. (2011). *Energía eólica*. (2.ª ed.). Prensas universitarias de Zaragoza.

Vestas (2010). *Road, Crane Pad and Hardstand Specifications for Vestas Turbines (Technology R&D)*. Randers (Dinamarca): Vestas Wind Systems A/S.

