

# Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la energía eólica

## Introducción

Las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad son documentos de referencia técnica que contienen ejemplos generales y específicos de la práctica internacional recomendada para la industria en cuestión<sup>1</sup>. Cuando uno o más miembros del Grupo del Banco Mundial participan en un proyecto, estas Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad se aplican con arreglo a los requisitos de sus respectivas políticas y normas. Las presentes Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para este sector de la industria deben usarse junto con el documento que contiene las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**, en el que se ofrece orientación a los usuarios respecto de cuestiones generales sobre la materia que pueden aplicarse potencialmente a todos los sectores industriales. En el caso de proyectos complejos, es probable que deban usarse las guías aplicables a varios sectores industriales, cuya lista completa se publica en el siguiente sitio web: <http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines>.

Las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad contienen los niveles y los indicadores de desempeño que generalmente

pueden lograrse en instalaciones nuevas, con la tecnología existente y a costos razonables. En lo que respecta a la posibilidad de aplicar estas guías a instalaciones ya existentes, podría ser necesario establecer metas específicas del lugar así como un calendario adecuado para alcanzarlas.

La aplicación de las guías debe adaptarse a los peligros y riesgos establecidos para cada proyecto sobre la base de los resultados de una evaluación ambiental en la que se tengan en cuenta las variables específicas del emplazamiento, tales como las circunstancias del país receptor, la capacidad de asimilación del medio ambiente y otros factores relativos al proyecto. La decisión de aplicar recomendaciones técnicas específicas debe basarse en la opinión profesional de personas idóneas y con experiencia.

En los casos en que el país receptor tenga reglamentaciones diferentes a los niveles e indicadores presentados en las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad, los proyectos deben alcanzar los que sean más rigurosos. Si corresponde utilizar niveles o indicadores menos rigurosos en vista de las circunstancias específicas del proyecto, debe incluirse como parte de la evaluación ambiental del emplazamiento en cuestión una justificación completa y detallada de cualquier alternativa propuesta, en la que se ha de demostrar que el nivel de desempeño alternativo protege la salud humana y el medio ambiente.

<sup>1</sup> Definida como el ejercicio de la aptitud profesional, la diligencia, la prudencia y la previsión que podrían esperarse razonablemente de profesionales idóneos y con experiencia que realizan el mismo tipo de actividades en circunstancias iguales o semejantes en el ámbito mundial. Las circunstancias que los profesionales idóneos y con experiencia pueden encontrar al evaluar el amplio espectro de técnicas de prevención y control de la contaminación a disposición de un proyecto pueden incluir, sin que la mención sea limitativa, diversos grados de degradación ambiental y de capacidad de asimilación del medio ambiente, así como diversos niveles de factibilidad financiera y técnica.

## Aplicabilidad

Las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la energía eólica contienen información relevante sobre el medio ambiente, la salud y la seguridad en las instalaciones en tierra y mar dedicadas a la generación de energía eólica. El Anexo A contiene una descripción completa de las actividades de este sector industrial. Las cuestiones sobre medio ambiente, salud y seguridad asociadas con la operación de las líneas de transmisión se describen en las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la transmisión y distribución de electricidad. Este documento está dividido en las siguientes secciones:

- Sección 1.0: Manejo e impactos específicos de la industria
- Sección 2.0: Indicadores y seguimiento del desempeño
- Sección 3.0: Referencias
- Anexo A: Descripción general de las actividades de la industria

## 1.0 Manejo e impactos específicos de la industria

La siguiente sección contiene una síntesis de las cuestiones relativas al medio ambiente, la salud y la seguridad asociadas con las plantas de generación de energía eólica, así como recomendaciones para su manejo.

### 1.1 Medio ambiente

Las actividades de construcción para los proyectos de energía eólica incluyen el desbroce del terreno para la preparación del emplazamiento y las vías de acceso; la excavación, la voladura y el terraplenado; el transporte de materiales de suministro y combustible; la construcción de las bases, lo que implica excavaciones y colocación de hormigón; la operación de grúas para la descarga e instalación de los equipos; y la recepción de nuevos equipos. Las actividades de desmantelamiento pueden suponer la retirada de la infraestructura del proyecto y la rehabilitación del emplazamiento.

Las cuestiones ambientales asociadas con estas actividades de construcción y desmantelamiento pueden incluir entre otros el ruido y la vibración, la erosión del suelo y las amenazas a la biodiversidad, además de la alteración del hábitat y los impactos sobre la fauna. Dado que las plantas de conversión de energía eólica suelen situarse en ubicaciones remotas, el transporte de equipos y materiales durante la construcción y desmantelamiento puede plantear desafíos logísticos. La sección sobre construcción y desmantelamiento de las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contiene recomendaciones para el manejo de estas cuestiones.

Los problemas ambientales específicos de la operación de los proyectos e instalaciones dedicados a la generación de energía eólica incluyen:

- Impactos visuales
- Ruido
- Mortalidad o daños a las especies y perturbaciones
- Problemas de luz e iluminación
- Alteración del hábitat
- Calidad del agua

#### Impactos visuales

Dependiendo de la ubicación y de la percepción pública local, las centrales eólicas pueden tener un impacto sobre los recursos visuales. Los impactos visuales relacionados con los proyectos de energía eólica suelen asociarse con las propias turbinas (por ejemplo, color, altura y número de turbinas) y los impactos se refieren a su interacción con el carácter del paisaje circundante.

Las medidas de prevención y control de los impactos visuales incluyen<sup>2</sup>:

- Consultar a la comunidad la ubicación de la central eólica para incorporar los valores comunitarios en el diseño;
- Tener en cuenta el carácter del paisaje durante la ubicación de la turbina;
- Tener en cuenta los impactos visuales de las turbinas desde todos los ángulos de visión relevantes a la hora de planificar la ubicación;
- Minimizar la presencia de estructuras auxiliares en el emplazamiento evitando la instalación de vallas, reduciendo al máximo el número de carreteras, soterrando las líneas eléctricas del proyecto y eliminando las turbinas no operativas;
- Evitar las pendientes pronunciadas, implementar medidas contra la erosión y repoblar rápidamente las tierras desbrozadas sólo con especies vegetales autóctonas;

<sup>2</sup> Gipe (1995).

- Mantener un tamaño y diseño uniforme de las turbinas (por ejemplo, la dirección de la rotación, el tipo de turbina y torre, y la altura);
- Pintar las turbinas de un color uniforme, que normalmente se ajustará al color del cielo (gris claro o azul pálido), a la vez que cumplir la normativa de marcas de navegación marítima y aérea;
- Evitar la inclusión de rótulos, insignias, anuncios o gráficos de la empresa en las turbinas.

## Ruido

Durante su operación, las turbinas eólicas producen ruido. El ruido generado procede principalmente de fuentes mecánicas y aerodinámicas. El ruido mecánico puede originarse en la maquinaria en la góndola. El ruido aerodinámico se deriva del movimiento del aire alrededor de las palas de la turbina y la torre. Los distintos tipos de ruido aerodinámico pueden ser de baja frecuencia, baja frecuencia impulsiva, tonal y banda ancha continua. Además, el volumen de ruido puede aumentar con la creciente velocidad de rotación de las palas de las turbinas, por lo que los diseños de turbina que permitan velocidades rotatorias inferiores con vientos más fuertes limitarán el volumen de ruido generado.

Las medidas para prevenir y controlar el ruido están relacionadas principalmente con las normas de diseño de ingeniería. Por ejemplo, el ruido de banda ancha es el resultado de la turbulencia del aire detrás de las palas y aumenta con la velocidad rotatoria de las palas. Este tipo de ruido puede controlarse usando turbinas de velocidad variable o palas inclinadas que reduzcan la velocidad de rotación.

Otras medidas recomendadas para el manejo del ruido incluyen:

- Ubicar adecuadamente las centrales eólicas, evitando los lugares muy próximos a receptores sensibles al ruido (por ejemplo, residencias, hospitales y escuelas);
- Cumplir las normas nacionales o internacionales sobre diseño acústico para turbinas eólicas (por ejemplo, la Agencia Internacional de la Energía, la Comisión Electrotécnica Internacional [CEI], y el American National Standards Institute).

## Mortalidad o daños a las especies y perturbaciones

### *Turbinas en tierra*

La operación de turbinas eólicas en tierra puede resultar en colisiones de aves y murciélagos con las palas de rotor de las turbinas y / o las torres, lo que puede llegar a provocar la muerte o lesión de aves y murciélagos. Los impactos potenciales indirectos para las aves pueden incluir cambios en la cantidad y clase de especies de presa como resultado de la alteración del hábitat en el emplazamiento de la central eólica y los cambios en el tipo y número de lugares de posado y nidificación debido bien a la modificación del hábitat natural o al uso de turbinas eólicas por parte de las aves.<sup>3</sup>

El impacto sobre aves y murciélagos dependerá de la escala del proyecto y de otros factores, incluyendo consideraciones tecnológicas (por ejemplo, dimensión de la torre y diseño de la turbina), iluminación de la turbina eólica y distribución de la central eólica. Además, las características del emplazamiento pueden determinar este impacto, incluyendo las propiedades físicas y paisajísticas del emplazamiento de la central eólica (por ejemplo, la proximidad de un hábitat donde se concentren aves, murciélagos o sus presas), el número de aves y murciélagos circulando por el emplazamiento de la central

---

<sup>3</sup> NWCC (1999).

eólica, el comportamiento de riesgo de aves (por ejemplo, vuelo en altura) y murciélagos (por ejemplo, rutas migratorias) y consideraciones de tipo meteorológico.

Las medidas de prevención y control de estos impactos incluyen:

- Llevar a cabo la selección del emplazamiento teniendo en cuenta las rutas migratorias conocidas o las zonas con una elevada concentración de aves y murciélagos. Ejemplos de zonas de elevada concentración son los humedales, refugios designados para la fauna, zonas de descanso, colonias de reproducción, zonas de hibernación de murciélagos, posaderos, crestas, valles fluviales y zonas ribereñas;
- Configurar las formaciones de turbinas para prevenir la mortalidad de las aves (por ejemplo, agrupando las turbinas en lugar de dispersándolas u orientando las filas de turbinas en paralelo con los movimientos conocidos de las aves);
- Implementar las medidas adecuadas de manejo de las aguas pluviales para evitar la creación de focos de atracción como son los estanques pequeños, que pueden atraer a aves y murciélagos en busca de alimento o lugares de nidificación cercanos a las centrales eólicas.

### *Centrales eólicas marítimas*

Es poco probable que el ruido generado durante la *operación* de las centrales eólicas marítimas aleje a los peces y mamíferos marinos del emplazamiento del proyecto. Las actividades asociadas con la instalación o retirada de turbinas eólicas marítimas y cables subterráneos pueden resultar en un desplazamiento temporal de peces, mamíferos marinos, tortugas de mar y aves. Este desplazamiento puede ser el resultado de los impactos directos de la perturbación auditiva,

visual o vibratoria o los efectos indirectos derivados de unos mayores niveles de sedimentos en la columna de agua a causa de las perturbaciones en el lecho marino.

Las medidas para hacer frente a estos impactos dependerán de las características del hábitat local y pueden incluir:

- Emplear un procedimiento de 'arranque suave' para las actividades de percusión para ayudar a prevenir la exposición de peces, mamíferos marinos y tortugas de mar a niveles acústicos nocivos y proporcionar una oportunidad para que abandonen la zona;
- Utilizar tecnología de arado con hidrojet para la instalación de cables, que se considera la alternativa menos dañina en términos ambientales en comparación con las tecnologías tradicionales;
- Utilizar una base de turbina monopala, que genera una mínima perturbación del lecho marino en comparación con otros tipos de base<sup>4</sup>.

Al igual que en las centrales eólicas terrestres, existe un riesgo de mortalidad y lesiones para las aves a causa de las colisiones con las turbinas eólicas marítimas. Las medidas de prevención y control para minimizar los riesgos de colisión de las aves marinas incluyen:

- Una ubicación adecuada que evite las zonas de uso de las aves de alta densidad, incluyendo las vías migratorias;
- Mantener la altura de las torres de turbinas por debajo de las elevaciones habituales en las vías migratorias de las aves;
- Mantener las palas del rotor a una distancia adecuada de la superficie del océano para evitar los impactos sobre las

<sup>4</sup> CWA (2004).

actividades de las aves marinas cerca de la superficie del océano;

- Utilizar palas de rotor de rotación más lenta para aumentar su visibilidad<sup>5</sup>.

### Parpadeo de sombras y destello de las palas

El parpadeo de sombras se produce cuando el sol pasa por detrás de la turbina eólica y proyecta una sombra. Al girar las palas del rotor, las sombras pasan por el mismo punto, provocando un efecto denominado parpadeo de sombras. El parpadeo de sombras puede constituir un problema cuando existen residencias ubicadas en las proximidades o con una orientación específica hacia la central eólica.

Al igual que el parpadeo de sombras, el destello de la pala o torre se produce cuando el sol ilumina una pala de rotor o la torre con una orientación especial. Esto puede tener un impacto sobre la comunidad, dado que el reflejo de la luz solar en la pala del rotor puede proyectarse sobre las residencias cercanas. El destello de las palas es un fenómeno temporal propio de las turbinas nuevas exclusivamente, y suele desaparecer cuando las palas se ensucian después de unos meses de operación.

Las medidas de prevención y control de estos impactos incluyen:

- Ubicar y orientar las turbinas eólicas de forma que se eviten las residencias situadas dentro de las bandas estrechas, normalmente al sudoeste y sudeste de las turbinas, donde se registra una elevada frecuencia de parpadeo de sombras. Puede utilizarse software comercial de modelación para identificar una 'zona' de parpadeo y así ubicar la central eólica de forma adecuada;

<sup>5</sup> CWA (2004).

- Pintar la torre de la turbina eólica con un revestimiento no reflectante para evitar los reflejos proyectados desde las torres.

### Alteración del hábitat

#### *Terrestre*

Las probabilidades de alteración del hábitat terrestre asociadas con la construcción y operación de turbinas eólicas en tierra son limitadas gracias al impacto individual relativamente menor de dichas instalaciones. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** describen las medidas para evitar y minimizar dichos impactos. No obstante, la construcción de carreteras de acceso para la ubicación de las centrales eólicas en lugares remotos podría traducirse en riesgos adicionales de alteración de los hábitats terrestres. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad para carreteras** proporcionan recomendaciones adicionales para prevenir y controlar los impactos asociados con la construcción y operación de la infraestructura viaria.

#### *Marítimas*

La instalación de turbinas eólicas marítimas puede resultar en la pérdida del hábitat marino existente debido a la excavación del fondo marino. Dependiendo de la ubicación de la turbina eólica, esto podría resultar en la pérdida de hábitat clave para el ciclo de vida (por ejemplo, desove, cría), entornos de ocio o hábitat pesqueros comerciales, aunque las probabilidades de que se produzcan impactos negativos son bajas teniendo en cuenta la limitada huella individual de estas instalaciones.<sup>6</sup> La presencia física de la parte submarina de la torre de turbina eólica y la base puede proporcionar un nuevo sustrato (hábitat artificial), lo que resultaría en la colonización de ciertas especies marinas en

<sup>6</sup> CWA (2004).

el mismo. La base de la turbina también puede constituir un nuevo hábitat de refugio para peces marinos y otra biota.<sup>7</sup>

Los impactos negativos potenciales pueden evitarse o minimizarse mediante el emplazamiento adecuado de las turbinas fuera de zonas ambientalmente sensibles.

## Calidad del agua

### *Terrestre*

La instalación de las bases de turbinas, cables subterráneos y carreteras de acceso puede traducirse en una mayor erosión y la sedimentación de aguas superficiales. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** y las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad para carreteras** describen las medidas para prevenir y controlar la erosión y la sedimentación.

### *Marítimas*

La instalación de las bases de las turbinas y cables subterráneos puede perturbar el lecho marino e incrementar temporalmente los sedimentos en suspensión en la columna de agua, disminuyendo la calidad del agua y pudiendo afectar de forma negativa las especies marinas y las pesquerías comerciales o recreativas.

Las medidas de prevención y control de estos impactos incluyen:

- Realizar un proceso de selección del emplazamiento que tenga en cuenta las probabilidades de interferencia de los componentes estructurales del proyecto con las pesquerías comerciales o recreativas y hábitat de las especies marinas;

<sup>7</sup> Diversos estudios han demostrado que las estructuras submarinas artificiales pueden reducir la tasa de mortalidad de las especies de peces, incrementar la disponibilidad de alimentos y proporcionar refugios (Bombace 1997).

- Planificar la instalación de componentes estructurales teniendo en cuenta los períodos sensibles para el ciclo de la vida;
- Usar cortinas antiturbidez, siempre que sea factible, para contener la turbidez procedente de la construcción bajo el agua.

## 1.2 Higiene y seguridad ocupacional

Los riesgos para la higiene y la seguridad ocupacional durante la construcción, operación y desmantelamiento de los proyectos de conversión de energía eólica en tierra y mar suelen ser parecidos a los que afectan a la mayoría de las instalaciones industriales y proyectos de infraestructura de gran envergadura. Estos pueden incluir riesgos físicos como el trabajo en altura, el trabajo en espacios cerrados, el trabajo con maquinaria giratoria y la caída de objetos. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** describen las medidas de prevención y control de estos y otros riesgos físicos, químicos, biológicos y radiológicos.

Los riesgos para la higiene y la seguridad ocupacional específicos de las instalaciones y actividades de generación de energía eólica incluyen principalmente:<sup>8</sup>

- Trabajo en altura
- Trabajos sobre el agua

### Trabajo en altura

Puede ser necesario trabajar en altura durante las actividades de construcción, incluyendo el montaje de los componentes de la torre eólica y las actividades de mantenimiento general durante las operaciones. La prevención y el control de los riesgos asociados con el trabajo en altura incluyen:

<sup>8</sup> Para un conjunto exhaustivo de guías para los procedimientos de trabajo seguro durante la construcción, operación y mantenimiento de las turbinas eólicas marítimas, véase BWEA (2005).

- Antes de emprender el trabajo, someter la estructura a pruebas de integridad;
- Implementar un programa de protección contra caídas que incluya, entre otras cosas, capacitación en técnicas de subida y uso de medidas de protección contra caídas; inspección, mantenimiento y reemplazo de los equipos de protección contra caídas y rescate de trabajadores que han quedado suspendidos en el aire;
- Establecer criterios respecto del uso de sistemas que ofrecen total protección contra caídas (generalmente, cuando las actividades se realizan a más de 2 metros de altura sobre la superficie de trabajo; dependiendo de la actividad, la altura puede llegar a los 7 metros). El sistema de protección contra caídas debe adecuarse a la estructura de la torre y los movimientos de la misma, que incluyen ascenso, descenso y traslado de un punto a otro;
- Instalar en los componentes de la torre dispositivos que faciliten el uso de sistemas de protección contra caídas;
- Establecer un sistema adecuado de dispositivos de posicionamiento en el lugar de trabajo para los obreros. Los conectores de los sistemas de posicionamiento deben ser compatibles con los componentes de la torre a los que van enganchados;
- Garantizar que los equipos elevadores estén adecuadamente calibrados y mantenidos y que los operadores de estos equipos reciban la capacitación adecuada;
- Los cinturones de seguridad deben ser de nailón de dos cabos de 15,8 milímetros (5/8 pulgadas) como mínimo, o de un material con igual resistencia. Los cinturones de seguridad de sogas deben ser reemplazados antes de que comiencen a observarse señales de desgaste o ruptura de las fibras;
- En caso de utilizarse herramientas mecánicas en trabajos de altura, los obreros utilizarán dos correas de seguridad (una de ellas, de respaldo).
- Se retirarán las señales y otros obstáculos de postes y estructuras antes de iniciar las labores;
- Se utilizará una bolsa de herramientas aprobada para elevar o bajar herramientas y materiales hasta los trabajadores en las estructuras.
- No se llevará a cabo la instalación de la torre ni las labores de mantenimiento en condiciones meteorológicas adversas y especialmente cuando exista el riesgo de relámpagos;

### Trabajo sobre el agua

Las medidas de prevención y control relativas al trabajo sobre aguas abiertas incluyen los principios básicos anteriormente descritos para el trabajo en altura, incluyendo además:

- Elaborar una evaluación de riesgos y un plan de manejo de las condiciones del agua, el viento y el clima antes de realizar las tareas;
- Utilizar equipos de flotabilidad aprobados (por ejemplo, chaquetas y chalecos salvavidas, líneas de flotación, boyas anulares) siempre que los trabajadores estén sobre el agua o adyacentes a ésta y exista un riesgo de ahogamiento;
- Orientar a los trabajadores para evitar la niebla salina y el contacto las olas;
- Disponer de naves marítimas adecuadas y operadores de barco y personal de emergencia cualificados.

### 1.3 Higiene y seguridad en la comunidad

Los riesgos para la higiene y la seguridad de la comunidad durante la construcción, operación y desmantelamiento de los proyectos de energía eólica en tierra y mar suelen ser parecidos a los que afectan a la mayoría de las instalaciones industriales y proyectos de infraestructura de gran envergadura. Pueden referirse a la seguridad estructural de la infraestructura del proyecto, a la seguridad de la vida humana y contraincendios, la accesibilidad pública y las situaciones de emergencia, cuestiones todas ellas cuyo manejo describen las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

Los riesgos para la higiene y la seguridad de la comunidad específicos de las instalaciones y actividades de generación de energía eólica incluyen:

- La seguridad para la navegación aérea y marítima
- Desprendimiento de palas/hielo
- Interferencia electromagnética y radiación
- Acceso público

#### Seguridad en la navegación aérea y marítima<sup>9</sup>

Las puntas de las palas de las turbinas eólicas pueden alcanzar en su punto más alto alturas superiores a los 100 metros. Cuando las centrales eólicas se sitúan cerca de aeropuertos o rutas conocidas de vuelo, pueden afectar directamente a la seguridad aérea debido a la colisión o alteración de las rutas de vuelo. Igualmente, las turbinas eólicas marítimas localizadas cerca de puertos o vías de transporte conocidos pueden afectar a la seguridad del transporte debido a la colisión o alteración del tráfico de embarcaciones.

<sup>9</sup> Para las guías internacionales de marcado para la seguridad en la navegación, véase IALA (2004). Un ejemplo de marcas para la seguridad en la navegación aérea puede consultarse en CASA (2004).

Las medidas de prevención y control de estos impactos incluyen:

- Consultar a las autoridades de regulación del tráfico aéreo y marítimo antes de instalar las centrales y cumplir con las normas de seguridad del tráfico aéreo y marítimo;
- Siempre que sea posible, se evitará ubicar las centrales eólicas cerca de aeropuertos o puertos y dentro de las rutas envolventes de vuelo o derrotas conocidas;
- Utilizar sistemas de alumbrado y marcado anticolidión en las torres y palas.

#### Desprendimiento de palas/hielo

Un fallo en la pala del rotor o la formación de hielo pueden provocar que se desprenda una pala del rotor o de hielo procedente de la turbina eólica<sup>10</sup>, lo que puede afectar a la seguridad pública, aunque el riesgo de desprendimiento de hielo sólo será relevante en los climas fríos y el riesgo general de desprendimiento de una pala es extremadamente bajo<sup>11</sup>.

Se recomiendan las siguientes estrategias de gestión para los desprendimientos de palas:

- Establecer espacios de seguridad y diseñar / ubicar las centrales eólicas de modo que no existan edificios ni zonas pobladas en el posible rango de la trayectoria de la pala. Es improbable que este rango de seguridad supere los 300 metros, aunque el rango puede variar con el tamaño, forma, peso y velocidad del rotor y con la altura de la turbina<sup>12, 13</sup>;

<sup>10</sup> El riesgo de sufrir un golpe por las piezas de una turbina o fragmentos de hielo a una distancia de 210 metros es de 1:10.000.000. (Taylor y Rand, 1991)

<sup>11</sup> Los datos indican que la mayoría de los fragmentos de hielo descubiertos en el suelo se sitúan entre los 0,1 y 1 kilogramo de masa y se encuentran a 15 - 100 metros de distancia de la turbina eólica. (Morganet al. 1998)

<sup>12</sup> Para más información sobre consideraciones relativas al espacio de seguridad, véase Larwood (2005).

- Equipar las turbinas eólicas con sensores de vibración que puedan reaccionar a cualquier desequilibrio en las palas del rotor y detener la turbina cuando sea necesario;
- Llevar a cabo el mantenimiento periódico de la turbina eólica;
- Utilizar señales de advertencia para alertar al público sobre el riesgo existente.

Las estrategias para manejar los desprendimientos de hielo incluyen<sup>14</sup>:

- Limitar las operaciones de las turbinas eólicas durante los períodos de formación de hielo;
- Colocar señales como mínimo a 150 metros de la turbina eólica en cualquier dirección;
- Equipar las turbinas con calefactores y sensores de hielo;
- Utilizar acero resistente al frío para fabricar la turbina eólica;
- Usar lubricantes sintéticos aptos para temperaturas frías;
- Emplear palas revestidas de fluoroetano negro;
- Proporcionar calefacción a toda la superficie de las palas siempre que sea posible o bien utilizar calefactores de borde de ataque con una anchura al menos de 0,3 m.

## Interferencia electromagnética

Las turbinas eólicas pueden provocar interferencia electromagnética con los radares aéreos y los sistemas de telecomunicaciones (por ejemplo, microondas, televisión y radio). Esta interferencia puede ser el resultado de tres mecanismos principalmente, a saber, los efectos de campo próximo, la difracción y la reflexión o difusión<sup>15, 16</sup>. La naturaleza

de los impactos potenciales depende mayormente de la ubicación de la turbina eólica en relación con el transmisor y el receptor, las características de las palas de rotor, del receptor de frecuencia de señal y de la propagación de las ondas radioeléctricas en la atmósfera local<sup>17</sup>.

### *Radar aéreo*

Las centrales eólicas ubicadas cerca de los aeropuertos pueden afectar al funcionamiento de los radares aéreos al provocar distorsiones en la señal, lo que puede provocar pérdidas de señal y / o señales erróneas en el monitor del radar. Estos efectos son consecuencia de la reflexión de la torre y el componente de rotor y troceado del radar<sup>18</sup>.

Las medidas de prevención y control de estos impactos incluyen:

- Tener en cuenta diseños de componentes de los equipos de generación de energía que minimicen la interferencia del radar, incluyendo la forma de la torre de turbina, la forma y materiales con que se fabrica la góndola y el uso de tratamientos de superficie absorbentes (por ejemplo, palas de rotor hechas de epóxido o poliéster reforzadas

<sup>16</sup> El campo próximo se refiere al potencial de una turbina eólica para provocar interferencias debido a los campos electromagnéticos emitidos por el generador de la turbina y los componentes de conmutación. La difracción se produce cuando la turbina eólica no sólo refleja sino que además absorbe una señal de telecomunicaciones. La reflexión y la difusión se dan cuando una turbina eólica obstruye o refleja una señal entre transmisor y receptor.

<sup>17</sup> Sengupta y Senior (1983).

<sup>18</sup> Reflexión de la torre: las torres de turbina de metal pueden reflejar una elevada proporción de la señal transmitida de vuelta al radar y por tanto reducir la detección de aeronaves en la proximidad de la torre de turbina. La reflexión del componente del rotor: las palas giratorias pueden provocar un "destello de pala", un término empleado para describir una señal de radar fuertemente reflejada por la pala del rotor. El riesgo de que se produzca este fenómeno es muy reducido y cuando se da tiene una duración breve. Los componentes giratorios dentro de la góndola (por ejemplo, ejes y generadores) pueden interferir con el radar. Troceado del radar: la rotación de las palas pueden provocar la modulación o "troceado" de la señal del radar detrás de la pala, al oscurecer de forma intermitente las palas del rotor los retornos de objetos por parte del radar detrás de las palas (AWEA, 2004a).

<sup>13</sup> Taylor y Rand (1991).

<sup>14</sup> Laakso et al. (2003).

<sup>15</sup> Bacon (2002).

con vidrio) que no deberían generar perturbaciones eléctricas;

- Tener en cuenta diseños de centrales eólicas que incluyan la distribución geométrica y la ubicación de las turbinas y los cambios en las rutas de tráfico aéreo;
- Tener en cuenta las alteraciones en el diseño del radar, incluyendo la reubicación del radar afectado, el bloqueo del radar en la zona afectada o el uso de sistemas alternativos de radar para cubrir la zona afectada<sup>19</sup>.

### *Sistemas de telecomunicaciones*

Las medidas de prevención y control de los impactos a los sistemas de telecomunicaciones incluyen:

- Modificar la colocación de las turbinas eólicas para evitar la interferencia física directa de los sistemas de comunicaciones punto a punto;
- Instalar una antena directiva<sup>20</sup>;
- Modificar la antena existente;
- Instalar un amplificador para reforzar la señal<sup>21</sup>.

### *Televisión*

Las medidas de prevención y control de los impactos a la retransmisión televisiva incluyen:

- Ubicar la turbina lejos del alcance visual del transmisor de la emisora;
- El uso de palas de turbina no metálicas;
- Cuando se detecten interferencias durante la operación:
  - Instalar una antena directiva o de alta calidad;

- Dirigir la antena hacia un transmisor de retransmisión alternativo;
- Instalar un amplificador;
- Reubicar la antena;
- Cuando la zona afectada sea de gran tamaño, estudiar la posibilidad de construir una nueva estación repetidora<sup>22</sup>.

### **Acceso público**

Pueden surgir problemas de seguridad relacionados con el acceso público a las turbinas eólicas (por ejemplo, la subida no autorizada a la turbina) o a la subestación de la central eólica.

Las medidas de prevención y control para manejar las cuestiones relativas al acceso público incluyen:

- El uso de esclusas en las carreteras de acceso;
- Vallar el emplazamiento de la central eólica para prohibir el acceso público en las proximidades de la turbina;
- Impedir el acceso a las escalerillas de la torre de la turbina;
- Colocar tableros informativos alertando sobre los riesgos para la seguridad pública y con datos de contacto en caso de emergencia.

## **2.0 Indicadores y seguimiento del desempeño**

### **2.1 Medio ambiente**

#### **Guías sobre emisiones y efluentes**

La operación de las instalaciones dedicadas a la generación de energía eólica no suele generar emisiones y efluentes. Los valores de referencia para las emisiones y efluentes de proceso en este sector son indicativos de la buena práctica industrial

<sup>19</sup> AWEA (2004a).

<sup>20</sup> AWEA (2004b).

<sup>21</sup> URS (2004).

<sup>22</sup> AWEA (2004b).

internacional según las normas relevantes de los países que disponen de marcos normativos al respecto. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** describen las emisiones a la atmósfera, descargas de aguas residuales y residuos sólidos relacionados con las actividades de construcción y desmantelamiento.

### Guías sobre el ruido

Los impactos del ruido no deberán exceder los niveles consignados en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** ni resultar en un aumento máximo de los niveles de ruido de fondo de 3 dB en la ubicación receptora más cercana.

Sin embargo, el ruido generado por las centrales eólicas tiende a aumentar con la velocidad del viento, al igual que el ruido de fondo general aumenta con la fricción del aire con los elementos existentes en el paisaje. Una velocidad superior del viento también puede enmascarar el ruido emitido por la propia central eólica, mientras que la velocidad y dirección del viento pueden afectar a la dirección y el alcance de la propagación del ruido. Por lo tanto, la aplicación de valores de referencia para el ruido y la evaluación de los niveles de ruido de fondo tendrán en cuenta estos factores.

También puede ser preciso considerar el factor de molestia asociado con las características impulsivas o tonales del ruido (los sonidos con una frecuencia específica, similares a notas musicales) emitido por las configuraciones de ciertas centrales eólicas<sup>23</sup>.

### Seguimiento ambiental

Se llevarán a cabo programas de seguimiento ambiental para este sector en todas aquellas actividades identificadas por su

<sup>23</sup> Algunas jurisdicciones aplican una "penalización" de 5 dB(A) que se añade a los niveles previstos.

potencial impacto significativo en el medio ambiente, durante las operaciones normales y en condiciones alteradas. Las actividades de seguimiento ambiental se basarán en indicadores directos e indirectos de emisiones, efluentes y uso de recursos aplicables al proyecto concreto.

Para el seguimiento de las lesiones y la mortalidad entre aves y murciélagos, la búsqueda de aves muertas – la carcasa entera, restos parciales y plumas – es la forma más habitual de supervisar las colisiones contra las centrales eólicas<sup>24</sup>.

Además, el entorno marino de las centrales eólicas marítimas debería supervisarse tanto temporal como espacialmente atendiendo a parámetros que engloben a los organismos bentónicos, los mamíferos y los peces. Los parámetros pueden incluir la infauna (sedimentos y comunidades de infauna); el hábitat del sustrato duro; los peces; el lanzón (especie indicadora de cambios en las características del sedimento); aves; y mamíferos marinos (focas y marsopas).

La frecuencia del seguimiento debería permitir obtener datos representativos sobre los parámetros objeto del seguimiento. El seguimiento deberá recaer en individuos capacitados, quienes deberán aplicar los procedimientos de seguimiento y registro y utilizar un equipo adecuadamente calibrado y mantenido. Los datos de seguimiento se analizarán y revisarán con regularidad, y se compararán con las normas vigentes para así adoptar las medidas correctivas necesarias. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen orientaciones adicionales sobre los métodos de muestreo y análisis de emisiones y efluentes.

<sup>24</sup> Véase Brett Lane & Assoc. (2005) para más información sobre el seguimiento de colisiones de aves y murciélagos. Para más información, véase también Environment Canada (2005).

## 2.2 Higiene y seguridad ocupacional

### Guías sobre higiene y seguridad ocupacional

Para evaluar el desempeño en materia de higiene y seguridad en el trabajo deben utilizarse las guías sobre la materia que se publican en el ámbito internacional, entre ellas: guías sobre la concentración máxima admisible de exposición profesional (TLV®) y los índices biológicos de exposición (BEIs®) publicados por la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)<sup>25</sup>, la Guía de bolsillo sobre riesgos químicos publicada por el Instituto Nacional de Higiene y Seguridad en el Trabajo de los Estados Unidos (NIOSH)<sup>26</sup>, los límites permisibles de exposición publicados por la Administración de Seguridad e Higiene en el Trabajo de los Estados Unidos (OSHA)<sup>27</sup>, los valores límite indicativos de exposición profesional publicados por los Estados miembros de la Unión Europea<sup>28</sup> u otras fuentes similares.

### Tasas de accidentes y letalidad

Deben adoptarse medidas para reducir a cero el número de accidentes entre los trabajadores del proyecto (ya sean empleados directos o personal subcontratado), especialmente los accidentes que pueden causar la pérdida de horas de trabajo, diversos niveles de discapacidad e incluso la muerte. Como punto de referencia para evaluar las tasas del proyecto puede utilizarse el desempeño de instalaciones en este sector en países desarrollados, que se obtiene consultando las fuentes publicadas (por ejemplo, a través de la Oficina de Estadísticas

Laborales de los Estados Unidos y el Comité Ejecutivo de Salud y Seguridad del Reino Unido)<sup>29</sup>.

### Seguimiento de la higiene y la seguridad ocupacional

Es preciso realizar un seguimiento de los riesgos que pueden correr los trabajadores en el entorno laboral del proyecto concreto. Las actividades de seguimiento deben ser diseñadas y realizadas por profesionales acreditados<sup>30</sup> como parte de un programa de seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo. En las instalaciones, además, debe llevarse un registro de los accidentes y enfermedades laborales, así como de los sucesos y accidentes peligrosos. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen orientaciones adicionales sobre los programas de seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo.

<sup>25</sup> Disponibles en: <http://www.acgih.org/TLV/> y <http://www.acgih.org/store/>

<sup>26</sup> Disponible en: <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>

<sup>27</sup> Disponibles en: [http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show\\_document?p\\_table=STANDARDS&p\\_id=9992](http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9992)

<sup>28</sup> Disponibles en: [http://europe.osha.eu.int/good\\_practice/risks/ds/oel/](http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oel/)

<sup>29</sup> Disponibles en: <http://www.bls.gov/iif/> y <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>

<sup>30</sup> Los profesionales acreditados pueden incluir a higienistas industriales certificados, higienistas ocupacionales diplomados o profesionales de la seguridad certificados o su equivalente.

### 3.0 Referencias y fuentes adicionales

- Asociación Europea de Energía Eólica. European Best Practice Guidelines for Wind Energy Development.
- Asociación Internacional de Señalización Marítima (AISM). 2004. IALA Recommendation O-117 on the Marking of Offshore Windfarms Edition 2.
- Australian Wind Energy Association (AWEA) (Asociación Australiana de Energía Eólica). 2002. Best Practice Guidelines for Implementation of Wind Energy Projects in Australia. AWEA (Australian Wind Energy Association). 2004a. Wind Farm Safety in Australia. Fact Sheet.
- AWEA. 2004b. The Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Field Implications for Wind Farms in Australia. Fact Sheet.
- AWEA. 2004c. Wind Farm Siting Issues in Australia. Fact Sheet.
- Bombace, G. 1997. Protection of Biological Habitats by Artificial Reefs. In A.C. (ed) European.
- Brett Lane & Assoc. 2005. Interim Standards for Assessing Risks to Birds from Wind Farms in Australia. Australian Wind Energy Association.
- British Wind Energy Association (BWEA) (Asociación Británica de Energía Eólica). 1994. Best Practice Guidelines for Wind Energy Development.
- BWEA. 2005a. Guidelines for Health and Safety in the Wind Energy Industry.
- BWEA. 2005b. BWEA Briefing Sheet: Wind Turbine Technology.
- BWEA. 2005c. BWEA Briefing Sheet: Offshore Wind.
- BWEA. 2005d. BWEA Briefing Sheet: Wind Power and Intermittency: The Facts.
- Civil Aviation Safety Authority (CASA) (Autoridad para la Seguridad de la Aviación Civil). 2004. Obstacle Lighting and Marking of Wind Farms AC 139-18(0).
- Condado Contra Costa (California). 1996. Código municipal (Sistemas de conversión de energía eólica), artículo 88-3 sección 612.
- CWA (Cape Wind Associates, LLC). 2004. Cape Wind Energy Project Draft Environmental Impact Statement.
- Departamento de Comercio e Industria del Reino Unido. 1997. Report ETSU-R-97, The Assessment and Rating of Noise from Wind Farms.
- Elsam Engineering A/S. 2005. Elsam Offshore Wind Turbines—Horns Rev Annual Status Report for the Environmental Monitoring Program January 1–December 2004.
- Environment Canada. 2005. Wind Turbines and Birds—A Guidance Document for Environmental Assessment, Final Draft. Canadian Wildlife Service.
- Erikson, W.P. et al. 2001. Avian Collision with Wind Turbine: A Summary of Existing Studies and Comparisons to Other Sources of Avian Collision Mortality in the U.S. A National Wind Coordinating Committee Resource Document. Western Ecosystems Technology, Inc.
- Estado de Wisconsin. 2003. Draft Model Wind Ordinance for Wisconsin.
- Gardner, P., A. Garrad, P. Jamieson, H. Snodin, G. Nicholls y A. Tindal. 2003. Wind Energy—The Facts. Volume 1 Technology. Asociación Europea de Energía Eólica (EWEA).
- Gipe, P.B. 1995. Wind Energy Comes of Age. New York: John Wiley and Sons.
- Irish Wind Energy Association (Asociación Irlandesa de Energía Eólica). Wind Energy Development Best Practice Guidelines.
- Laakso, T., H. Hottinen, G. Ronsten, L. Tallhaug, R. Horbaly, I. Baring-Gould, A. Lacroix, E. Peltola y B. Tammelin. 2003. State-of-the-art of Wind Energy in Cold Climates.
- Larwood, S. 2005. Permitting Setbacks for Wind Turbines in California and Blade Throw Hazard. Prepared for California Wind Energy Collaborative. Report Number CWEC-2005-01.
- Lowther, S. 2000. The European Perspective: Some Lessons from Case Studies. Proc. National Avian-Wind Power Planning Meeting III, San Diego, CA, May 1998. National Wind Coordinating Committee, Washington, DC.
- Morgan, C., E. Bossanyi y H. Seifert. 1998. Assessment of Safety Risks Arising from Wind Turbine Icing. Actas de la Conferencia Internacional sobre producción de energía eólica en climas fríos, BOREAS IV, celebrada en Hetta, Finlandia, 31 de marzo–2 de abril de 1998. Publicado por el Instituto Meteorológico Finandés.
- Natural Resources Canada. 2003. Environmental Impact Statement Guidelines for Screenings of Inland Wind Farms under the Canadian Environmental Assessment Act.
- National Wind Coordinating Committee (NWCC). 1999. Methods for Studying Energy/Bird Interactions. A Guidance Document.
- NWCC. Siting Committee. 2002. Permitting of Wind Energy Facilities. A Handbook.
- Ontario, Ministerio de Medio ambiente (Ministry of the Environment). 2004. Interpretation for Applying MOE Technical Publication to Wind Turbine Generators.
- Sengupta, D. and T. Senior. 1983. Large Wind Turbine Siting Handbook: Television Interference Assessment, Final Subcontract Report.
- Taylor, D. and M. Rand. 1991. How to Plan the Nuisance out of Wind Energy. Town and Country Planning 60(5): 152-155.
- URS (URS Australia Pty. Ltd.). 2004. Woodlawn Wind Farm Environmental Impact Statement.
- Westerberg, H. 1999. Impact Studies of Sea-based Windpower in Sweden. Technische Eingriffe in Marine Lebensraume.
- Winkelman, J.E. 1995. Bird/wind Turbine Investigations in Europe. Proc. of National Avian-Wind Planning Meeting, Denver, CO, julio de 1994.

## Anexo A: Descripción general de las actividades de la industria

Los proyectos de conversión de energía eólica se basan en el aprovechamiento del viento natural y su conversión en energía eléctrica. Este tipo de proyectos de energía ha aumentado en número durante los últimos 20 años y están convirtiéndose en una fuente cada vez más importante de energía renovable. Los proyectos pueden situarse en ubicaciones en tierra o mar. El factor primordial que determina el emplazamiento de una central eólica es la presencia de buenos recursos eólicos. Antes de ubicar, diseñar y construir una central eólica, se lleva a cabo una evaluación del uso de recursos eólicos para valorar las características del viento. Otros factores son el costo financiero de la construcción, el acceso a las líneas de transmisión, las condiciones ambientales, el uso del suelo y el apoyo comunitario.

Como sucede con otros sectores industriales, el ciclo de vida de un proyecto de conversión de energía eólica consiste en una evaluación del uso de los recursos eólicos y las fases de construcción, operación, mantenimiento y desmantelamiento. Las actividades normalmente asociadas con la fase de construcción incluyen la construcción o renovación de carreteras de acceso, preparación del emplazamiento, transporte de los componentes de la turbina eólica e instalación de los componentes del proyecto de energía eólica (por ejemplo, anemómetros, turbinas eólicas, transformadores, subestaciones). Las actividades de desmantelamiento dependen del uso posterior propuesto para el emplazamiento, aunque suelen consistir en la retirada de infraestructura (por ejemplo, turbinas, subestaciones, carreteras) y recuperación del emplazamiento del proyecto, que puede suponer la repoblación vegetal de los proyectos situados en tierra. La siguiente sección proporciona una descripción de las instalaciones y actividades comunes a la construcción y operación de los proyectos de conversión de energía eólica en tierra y mar. Las características exclusivas de los proyectos marítimos de energía eólica se describen en un subapartado separado a continuación.

### Instalaciones y actividades comunes a las centrales eólicas terrestres y marítimas

Las turbinas eólicas suelen encarar el viento con la góndola y la torre detrás y se disponen de tal forma que una turbina no interfiera con la captación de viento por parte de otra. Para los proyectos de energía eólica de mayor envergadura, las turbinas suelen disponerse en bandas o líneas perpendiculares a la dirección predominante del viento o siguiendo los contornos de las crestas para obtener vientos de mayor velocidad. El factor primordial en la separación de las turbinas individuales dentro de una misma central eólica es la velocidad y turbulencia del viento. La norma general para la separación a sotavento de las turbinas es de 5 a 7 veces el diámetro del rotor. La zona necesaria para un proyecto de turbinas eólicas varía en función del número propuesto para las turbinas. Sin embargo, la zona efectiva de perturbación de un proyecto de energía eólica (por ejemplo, la zona requerida para las turbinas y las carreteras de acceso) es mucho menor que la superficie total del proyecto. Por ejemplo, una central eólica convencional de 20 turbinas puede abarcar un área de 1 kilómetro cuadrado, aunque es posible que sólo llegue a utilizarse un 1 por ciento del terreno<sup>31</sup>.

Los elementos estructurales de un proyecto de energía eólica incluyen turbinas eólicas, transformadores, cables subterráneos colectores de transmisión entre las turbinas eólicas, subestaciones y líneas de transmisión sobre el nivel del suelo para conectar una malla eléctrica existente y las carreteras de acceso (Gráfico A-2). Las turbinas eólicas se colocan espaciadas para maximizar el potencial de energía eólica a la vez que se minimiza el uso del espacio. Los factores principales para determinar el espaciamiento de las turbinas individuales son la velocidad del viento y la turbulencia. Por lo general, las turbinas eólicas se separan de 3 a 5 veces el diámetro del rotor a través de la dirección predominante de la energía eólica y de

<sup>31</sup> AWEA 2004c.

5 a 7 el diámetro del rotor alineadas con la dirección predominante de la energía eólica.<sup>32</sup> En algunas jurisdicciones, la distancia mínima recomendada entre las turbinas eólicas es de 200 metros para no inhibir el movimiento de aves entre las turbinas<sup>33</sup>. Cuando las turbinas se sitúan dentro del espacio de 5 veces el diámetro del rotor en una dirección habitual del viento, es probable que se produzcan elevadas pérdidas de corriente de salida<sup>34</sup>.

El generador de la turbina eólica es el componente fundamental en los proyectos de energía eólica y el responsable de aprovechar el viento y convertirlo en electricidad. Históricamente, el diseño dominante de turbina eólica ha sido la máquina a barlovento de pala tripala, controlada mediante pérdida aerodinámica pasiva, de velocidad constante. El siguiente diseño más habitual es parecido, pero en este caso la regulación es por cambio del ángulo de paso o por pérdida aerodinámica activa. La capacidad declarada (por ejemplo, el tamaño) de las turbinas eólicas ha aumentado de forma constante de 50 kilovatios en 1980 a 5 megavatios en 2003, siendo el tamaño promedio de una turbina eólica terrestre en 2005 de 2 megavatios<sup>35</sup>. El aumento en la capacidad generadora de las turbinas eólicas se ha traducido en un incremento del diámetro del rotor y de la altura de la torre.

La turbina consiste en una base, torre, góndola, palas de rotor, cabeza de rotor y luces (Gráfico A-1). La torre se inclina hacia la base, que en tierra suele consistir en una plancha gruesa de cemento reforzado que mide entre 12 y 15 metros en cada plano a una profundidad de 2 a 3 metros<sup>36</sup>.

Para captar el viento, las palas del rotor se elevan sobre el nivel del suelo empleando torres. Las torres de turbina consisten

principalmente en cilindros cónicos hechos de acero cuya altura puede oscilar entre los 25 y los más de 100 metros. Suelen pintarse de gris claro, aunque pueden presentar distintas marcas pintadas para la seguridad del tráfico aéreo y marítimo (centrales eólicas marinas) en función de los requisitos específicos de cada país.

La mayoría de las palas de rotor se fabrican con resina de poliéster de vidrio, termoplásticos o resina epoxídica (la resina epoxídica es el material predominante en la actualidad). La fibra de carbón se utiliza cada vez más como parte de la estructura compuesta. Estos materiales tienen una gran resistencia, peso ligero y flexibilidad. El diámetro del rotor ha aumentado en los últimos 40 años de 24 metros en 1960 a 114 metros en 2003.<sup>37</sup> Las palas de casi todos los rotores modernos de turbina eólica giran en el sentido de las agujas del reloj cuando miran hacia la turbina con la cabeza enfrente.<sup>38</sup> El diámetro de los rotores terrestres suele oscilar entre los 60 y los 80 metros.

<sup>32</sup> AWEA 2004c.

<sup>33</sup> EC 2005.

<sup>34</sup> Gardner et al. 2003.

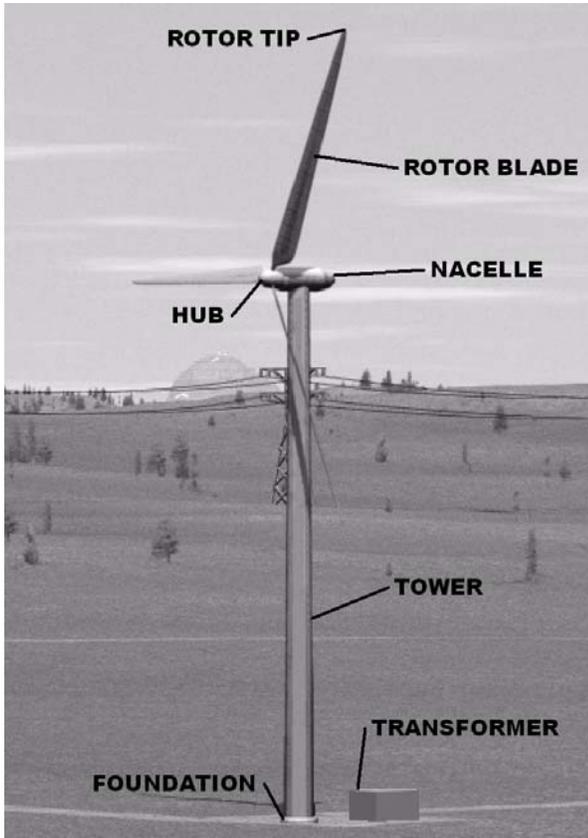
<sup>35</sup> Gardner et al. 2003.

<sup>36</sup> AWEA 2004d.

<sup>37</sup> Gardner et al. 2003.

<sup>38</sup> AWEA 2004d.

Gráfico A-1. Componentes estructurales típicos de una turbina eólica.



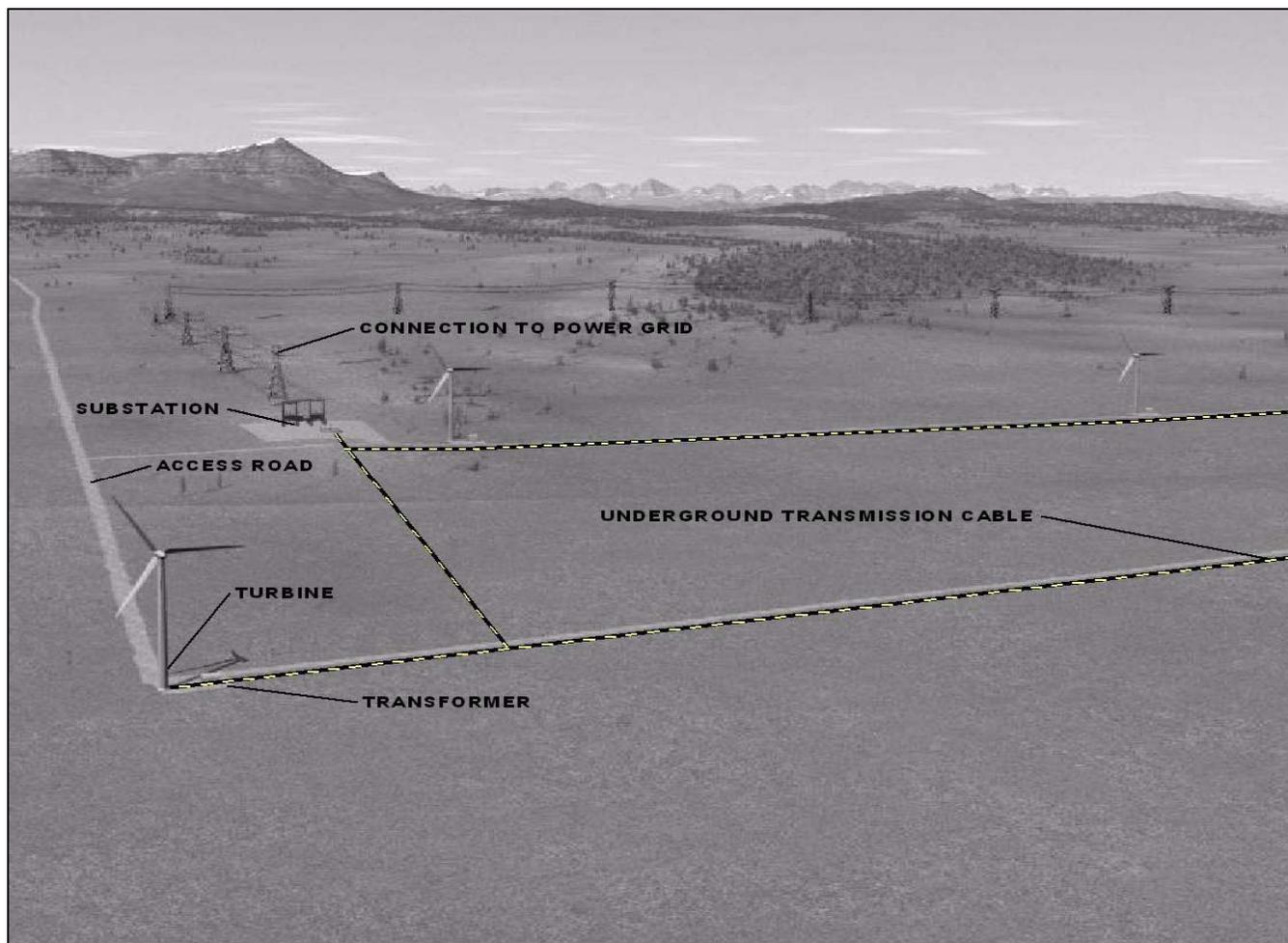


Gráfico A-2. Componentes típicos de una central eólica terrestre

Los procedimientos típicos de erección de las turbinas eólicas terrestres incluyen la preparación de los cimientos; el montaje de la torre; la elevación de la cabeza, el rotor y la góndola; y el montaje del rotor.<sup>39</sup>

A medida que aumenta la velocidad del viento, las palas del rotor empiezan a girar. Esta rotación hace girar al generador dentro de la góndola, convirtiendo así parte de la energía eólica en electricidad. La mayor parte de las turbinas eólicas comienzan a generar electricidad a velocidades del viento de aproximadamente 3–4 m/segundo (10,8–14,4 km/hora), generando una electricidad máxima a velocidades del viento de

alrededor de 15 m/segundo (54 km/hora) e interrumpiéndose para impedir daños a los 25 m/segundo (90 km/hora) aproximadamente<sup>40</sup>. La máxima velocidad de la punta de la pala puede situarse aproximadamente en los 89 m/s o 320 km/hora<sup>41</sup>. Si la velocidad del viento es elevada, existen tres formas de limitar la potencia del rotor: la regulación por pérdida aerodinámica, la regulación variable por cambio del ángulo de paso y la regulación por pérdida aerodinámica activa. Con la regulación por pérdida aerodinámica, el diseño aerodinámico de la pala del rotor regula la potencia del rotor. A elevadas velocidades del viento, una pala regulada por pérdida

<sup>39</sup> Gardner et al. 2003.

<sup>40</sup> BWEA 2005b.

<sup>41</sup> NZWEA 2005.

aerodinámica comenzará a entrar en pérdida al superar un límite de potencia predeterminado por el diseño aerodinámico de la pala del rotor. En la regulación por cambio del ángulo de paso, el paso de las palas de rotor puede modificarse hasta en 90° para maximizar la captación de viento. Una vez alcanzado el límite de potencia, el paso se cambia para comenzar a liberar energía desde el rotor. La regulación por pérdida aerodinámica activa es una combinación de regulación por pérdida aerodinámica y regulación por cambio del ángulo de paso por el cual las palas se diseñan de forma parecida a las palas de Regulación por pérdida aerodinámica, pero pueden manipularse para ajustar el paso. Hasta la década de 1990, la estrategia preferida era la regulación por pérdida aerodinámica pasiva. Sin embargo, regulación por cambio del ángulo de paso y la regulación por pérdida aerodinámica activa son actualmente los métodos preferidos para limitar la potencia del rotor en las turbinas de gran tamaño<sup>42</sup>.

Una turbina puede generar normalmente electricidad entre el 70 y el 85 por ciento del tiempo<sup>43</sup>. La cantidad de energía en el viento es proporcional al cubo de la velocidad del mismo. Dicho de otro modo, la duplicación de la velocidad del viento resulta en ocho veces el volumen de energía presente en el viento. Sin embargo, la producción de energía eólica de la turbina no cambia en la misma proporción, sino que lo hace aproximadamente con el cuadrado de la velocidad del viento. La electricidad generada por una turbina eólica suele rondar los 700 voltios, lo que no resulta apto para la transmisión de electricidad<sup>44</sup>. Por consiguiente, cada turbina hace uso de un transformador para 'aumentar' el voltaje y cumplir con los niveles de distribución de voltaje de unos servicios específicos. Esta energía se transmite a una subestación cercana que recoge la energía de todas las turbinas de una central eólica. La conexión entre el transformador de una turbina y la subestación

y la malla eléctrica puede realizarse mediante cables de transmisión subterráneos o a nivel del suelo. Dependiendo de la distribución del proyecto, los transformadores de las turbinas pueden conectarse de forma independiente a la subestación, bien las turbinas pueden interconectarse entre ellas y luego conectarse a una subestación.

La vida útil de una turbina eólica es de aproximadamente 20 años, aunque en la práctica las turbinas pueden durar más tiempo en emplazamientos con escasa turbulencia. Las palas del rotor están diseñadas de acuerdo con estas rigurosas normas, de modo que rara vez se sustituyen una vez superada su vida útil, mientras que, con base en las experiencias más recientes, podría ser necesario sustituir las cajas de cambios, antes de alcanzar el final de su vida útil. La operación de un proyecto de energía eólica no suele requerir la presencia de personal en el emplazamiento.

El mantenimiento rutinario se llevará a cabo durante la vida útil de la turbina eólica, lo que supone por lo general aproximadamente 40 horas al año<sup>45</sup>. Las actividades de mantenimiento pueden consistir en el mantenimiento de turbinas y rotores, la lubricación de piezas, la revisión completa del generador y el mantenimiento de los componentes eléctricos cuando sea necesario.

La operación y mantenimiento de las centrales eólicas no suele generar emisiones a la atmósfera ni descargas de efluentes. Los fluidos y otros materiales residuales asociados con las actividades de mantenimiento más habituales no suelen almacenarse en el emplazamiento sino que se eliminan según establezcan las normas regionales o nacionales adecuadas y/o las mejores prácticas de manejo.

<sup>42</sup> AWEA 2004d.

<sup>43</sup> BWEA 2005d.

<sup>44</sup> BWEA 2005b.

<sup>45</sup> Gardner et.al. 2003.

## Instalaciones exclusivas de las centrales eólicas marítimas

Los elementos estructurales y la operación de una central eólica marítima son similares a los de las centrales eólicas terrestres. Las principales diferencias entre las turbinas terrestres y marítimas son el tamaño de las turbinas, la altura de las torres de las turbinas y el diámetro de las palas del rotor. Una turbina eólica marítima suele tener una altura hasta la punta de entre 100 y 120 metros, una altura de la torre de aproximadamente 60 a 80 metros y palas de rotor cuya longitud oscile entre los 30 y 40 metros.<sup>46</sup> Otra diferencia es que las centrales eólicas marítimas suelen utilizar cables subterráneos (marinos y terrestres) para transmitir la electricidad procedente de las turbinas al transformador y del transformador a una subestación ubicada en tierra (Gráfico A-3).

Los materiales de los componentes estructurales (por ejemplo, las torres) serán similares a los de sus homólogos en tierra, aunque se utilizan distintos métodos para adaptar la estructura al entorno marino, incluyendo el revestimiento de las piezas metálicas para protegerlas de la corrosión; se emplean góndolas selladas; se diseñan cimientos / torres distintas para hacer frente al viento, las olas, las corrientes, la marea y las interacciones del lecho marino (ver el Gráfico A-2); y se dispone de plataformas de acceso especial para el mantenimiento.

Las centrales eólicas marítimas suelen construirse en aguas relativamente poco profundas a menos de 30 metros de profundidad. La distancia a la costa variará según el proyecto, dependiendo de los requisitos de emplazamiento (por ejemplo, características del viento) y las restricciones (por ejemplo, cuestiones ambientales como el paisaje visual).

Las actividades más frecuentes durante la construcción de turbinas eólicas marítimas incluyen el establecimiento de los cimientos de la turbina; el transporte marítimo de los

componentes de la turbina; el montaje de la torre; la elevación de la góndola y los rotores hasta la torre eólica; y el montaje del rotor/ góndola.

Las distintas cimentaciones y aplicaciones asociadas disponibles para las turbinas eólicas marítimas incluyen:

- Monopila: aptas para la mayor parte de las condiciones, preferentemente empleadas en aguas poco profundas y no para materiales profundos blandos;
- Trípode: aptas para la mayor parte de las condiciones, preferentemente no para materiales profundos blandos y a profundidades en el agua superiores a los 30 m;
- Gravedad con cajón de hormigón: sirve para casi todos los sedimentos;
- Gravedad con cajón de acero: sirve para casi todos los sedimentos, y a profundidades superiores que los cimientos de hormigón;
- Cajón de monosucción: arenas, arcilla blanda;
- Cajón de succión múltiple: arenas, arcilla blanda; para aguas más profundas que la monosucción; y
- Flotante: aguas a profundidades de hasta 100 metros.

<sup>46</sup> BWEA 2005c.

Gráfico A-3 Componentes típicos de una central eólica marítima

