

Estado Del Arte Sobre Materiales Utilizados Para La Fabricación De Las Palas De Turbinas
Eólicas Offshore.

Mateo Abril Martínez y Laura Carolina Rodríguez Rodríguez

Universidad Militar Nueva Granada

Notas del autor

Mateo Abril Martínez y Laura Carolina Rodríguez Rodríguez, Facultad de Ingeniería Civil,

Universidad Militar Nueva Granada

Tutor del Proyecto: Diego Palma Cuero

Facultad de Ingeniería Civil Sede Bogotá, Universidad Militar Nueva Granada, Carrera 11

No.101-80

Contacto: u1102396@unimilitar.edu.co y u1102232@unimilitar.edu.co

Abstrac

El presente trabajo tiene como objeto explicar el estado del arte para la fabricación de palas de turbinas eólicas offshore, definiendo las características de las mismas, equiparando las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la fabricación de las aspas con la finalidad de indicar el óptimo, de acuerdo a los requerimientos establecidos con base a la instalación de las turbinas, para que soporte las condiciones a las que están expuestas estas estructuras offshore.

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	6
OBJETIVOS	6
1. JUSTIFICACIÓN	7
2. ANTECEDENTES	9
3. MARCO TEÓRICO	10
4. METODOLOGÍA	14
5. RESULTADOS	15
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
7. CONCLUSIONES	42
8. REFERENCIAS	43

Lista de figuras

Figura 1. Distribución de energía en Colombia año 2015	8
Figura 2. Parque eólico offshore y distribución a tierra. Fuente	12
Figura 3. Metodología del trabajo. Fuente: propia.	14
Figura 4. Variación de la velocidad del viento con la altura sobre el suelo	18
Figura 5. Turbinas eólicas offshore. Identificación de elementos y secciones.	19
Figura 6. Coeficiente de potencias vs razón de velocidad. Fuente:	23
Figura 7. Diseño de turbina eólica offshore tipo tripala.	24
Figura 8. Diseño de turbina eólica offshore tipo bipala.	25
Figura 9. Diseño de turbina eólica offshore tipo bipala.	26
Figura 10. Coeficiente de potencia, (C_p) vs λ , para diferente número de palas.	27
Figura 11. Influencia de la calidad aerodinámica para una Hélice tripala.	29
Figura 12. Pasos mínimos y máximos en la hélice al generar momento....	30
Figura 13. Velocidades máximas registradas por el IDEAM en el territorio nacional.	32
Figura 14. Vista típica de una pala con posibles materiales empleados.	35

Lista de tablas

Tabla 1. Valor respectivo de potencia según velocidad del viento.....	21
Tabla 2. Descripción y valores de tracción y compresión de materiales.....	22

INTRODUCCIÓN

Como se informa en el diario El Tiempo, (Vivas, 2019), en Colombia actualmente se presenta un incremento del 3.25% anual en la demanda de energía, esto sin contemplar las más de 1710 localidades rurales en 11 municipios que actualmente usan métodos rudimentarios para iluminar (como velas) sus hogares, a causa de la inexistencia de energía eléctrica, esto por la gran desigualdad y centralización del país.

Se propone la implementación de energías renovables, con el fin, de aprovechar las condiciones óptimas del país, respecto al clima y la geografía; Para lo cual se debe definir de manera eficiente y eficaz el estado del arte para las aspas de las turbinas eólicas, puesto que, en Colombia la velocidad del viento oscila, según su ubicación geográfica entre los 5 m/s y los 11 m/s (Ruiz J, Serna J, & Zapata H, 2017), siendo capaz de generar entre 2 y 5 MW al año; Capaz de cubrir las necesidades de 5000 hogares.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Definir el estado del arte para la fabricación de Aspas de turbinas eólicas offshore, evaluando materiales competentes.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

1. Definir las características de las turbinas existentes y evaluar cuál tiene mejor desempeño y potencial de Generación de Energía.
2. Comparar las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la fabricación de las aspas de turbinas eólicas offshore.
3. Proponer diferentes tipos de materiales que cumplan con las características mecánicas y físicas, similares a los utilizados en la fabricación de las aspas de la turbina eólica.
4. Elaborar una matriz de propiedades de materiales que permita proponer opciones para la fabricación de las aspas de la turbina eólica.

1. JUSTIFICACIÓN

Según (DANE, 2018), en Colombia habitan aproximadamente 45.5 millones de personas (con una tasa de crecimiento anual de 0.8%), para las cuales el consumo diario medio es de 1.27 kWh, es decir, que al día se consumen en total aproximadamente 57.79 millones kWh. (Esto considerando que toda la población cuenta con acceso completo a este servicio).

En 2016 los colombianos alcanzaron una capacidad energética instalada de 16.4 GW, por lo cual claramente podemos observar la gran deficiencia energética que tiene el país, esto sin contemplar que esta energía no está distribuida de manera uniforme en el amplio territorio nacional.

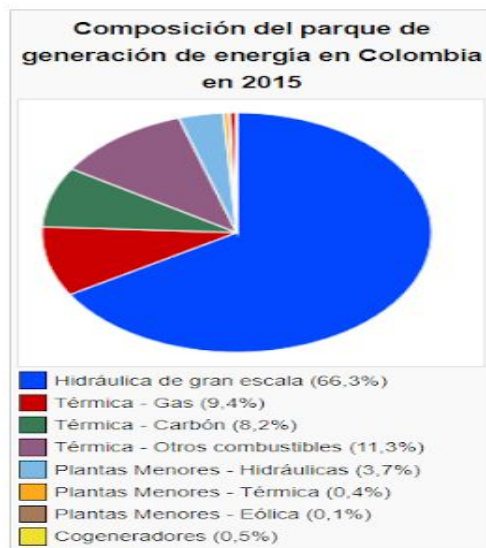


Figura 1. Distribución de energía en Colombia año 2015

Como se puede observar en la distribución de energía suministrada por el (World Bank, 2019); Colombia genera más del 60% de energía a través de sistemas hidráulicos de gran escala, mientras que el uso de energía eólica es casi del 0.1% de la producción total del país, aun cuando por su posición geográfica, Colombia cuenta con una gran disponibilidad de corrientes de viento por convergencia hacia la línea del Ecuador. De manera que, “La implementación de energías renovables reducirá en un 70% el costo de la electricidad”, afirma (Rozo, 2018) , a pesar de representar un alto costo inicial respecto a los métodos tradicionales, la recuperación de la

inversión se hará mucho más pronto mediante el uso de sistemas de energía renovable, además de que a grandes masas, la adquisición de energía será mucho mayor y permitirá la ampliación de las redes eléctricas, permitiendo que las zonas desconectadas por fin tengan acceso a este servicio en su total y completa operación.

2. ANTECEDENTES

El recurso eólico en nuestro país tiene gran potencial en el Caribe Colombiano gracias a las dinámicas y eventos meteorológicos que originan gran influencia del viento en esta zona del país.

Colombia es un país que aún no cuenta con plataformas de energías eólicas offshore ya que se ha centrado en explotar el recurso hídrico por medio de las hidroeléctricas. Además, Colombia cuenta con muy pocos profesionales formados en diversos niveles y áreas de este conocimiento.

Pero es de resaltar que en Colombia existe una gran motivación por cambiar e incrementar la oferta de energía interna con iniciativas en el aprovechamiento de energía renovables como las tecnologías offshore.

Colombia, debido a estas iniciativas, ha decidido reglamentar la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, según (Bayona, 2017), mediante la ley 1715 de 2014, donde pretende promover y desarrollar la utilización de las fuentes no convencionales de energía renovables en primera medida, y en el artículo 5 numeral nueve, en

segunda instancia, definir a la energía renovable que proviene de las mareas, el oleaje, las corrientes marinas, los gradientes térmicos y halinos del océano. (pág. 16)

La perspectiva general de energías eólicas en Colombia inicia con el parque eólico Jepirachi, ubicado en el Municipio de Uribia, en la Alta Guajira colombiana, cerca de Puerto Bolívar y del Cabo de la Vela. Es el primer parque construido en Colombia para la generación de energía eólica. Tiene una potencia instalada de 19.5 MW con 15 aerogeneradores. La construcción del proyecto eólico estuvo a cargo de Empresas Públicas de Medellín. La construcción del parque eólico Jepirachi fue realizada entre los años 2002 y 2003, y fue inaugurado oficialmente el 21 de diciembre de 2003, iniciando operación en abril de 2004.

Dentro de otros planes estratégicos para la explotación de energía eólica en Colombia según (Bayona, 2017) La Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), con la intención de garantizar la confiabilidad energética, presentó en el 2016 el “Plan de expansión de generación 2015-2029”, el cual pretende instalar nueva capacidad hidroeléctrica y una proyección de crecimiento de plantas menores, integrando tecnologías tradicionales como las plantas térmicas e hidroeléctricas, así como la integración de fuentes renovables no convencionales: eólica, geotérmica, biomásica y solar. El plan pretende impulsar la generación de 1.2 GW a partir de energía eólica en el norte de La Guajira. Adicionalmente, el plan efectuó un análisis para la conexión de 3.13 GW de capacidad eólica en el departamento de La Guajira mediante la implementación de nuevas tecnologías. (pág. 18)

3. MARCO TEÓRICO

La industria eólica offshore está revolucionando el mercado de la energía y se ha posicionado como una de las energías renovables con más futuro y donde existe más interés de explotación.

Mucho antes del siglo XIX se implantaron prototipos y proyectos exitosos en zonas marinas por parte de la industria de la explotación petrolera dando paso a la creación a la ingeniería offshore. (Bayona, 2017) añade que el apoyo del sector de hidrocarburos se materializó en la primera plataforma marina de extracción de petróleo, la cual fue instalada en el Océano Pacífico en el año de 1890. Sin embargo, el año de 1947 es considerado el nacimiento de la industria offshore cuando Kerr-McGee instaló exitosamente la primera plataforma en el Golfo de México. Desde 1947 se han instalado más de 10,000 plataformas petroleras offshore cada vez con mayor profundidad de instalación hasta llegar a profundidades cercanas a los 2500. (pág. 26)

Para continuar con el contexto histórico la ingeniería offshore se conoce que para el año de 1991 se creó la primera granja de turbinas de viento offshore (offshore wind farm) instalada en Dinamarca. (Bayona, 2017) recalca que al año 2017 el parque eólico offshore más grande del mundo fue el London Array 1; este parque se encuentra en el Reino Unido y en 2012 reportó una producción anual de 11.227 GW.h. Para el año 2017 el parque eólico offshore Gemini, ubicado en Países Bajos, producirá 600 MW. La compañía DONG Energy anunció que pondrá en funcionamiento en el año 2020 el parque eólico más grande del mundo, el cual se conocerá como Hornsea Project One, y generará 1.2 GW para aproximadamente 1 millón de hogares en el Reino Unido. (pág. 26)

Durante los últimos años la energía eólica ha tomado un posicionamiento global frente a otras fuentes de energía ya que representa una tecnología que ofrece un gran potencial energético. (Mattar, 2012) Dice, de hecho, la capacidad de energía eólica instalada ha crecido rápidamente en todo el mundo, donde se ha complementado con políticas que incentivan su uso, cruciales para su desarrollo en diferentes países. Según el último informe del Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC), la capacidad instalada de energía eólica alcanzó los 370 GW a finales de 2015, un crecimiento acumulado del mercado del 16%. En vista de esto, se espera que su uso a gran escala aumente en las próximas décadas.

Conociendo el tema investigativo de este trabajo, se procede a desarrollar el estado del arte partiendo de la conceptualización y síntesis sobre la implementación de turbinas eólicas offshore. La principal fuente de información fue la tesis doctoral del Ingeniero Juan Gabriel Rueda Bayona que lleva como título: “Identificación de la Influencia de las Variaciones Convectivas en la Generación de Cargas Transitorias y Su Efecto Hidromecánico en las Estructuras Offshore”. Donde se explica el desarrollo conceptual en temas relacionados con dinámica estructural de las turbinas y cimentaciones, antecedentes de energías offshore en Colombia, hidromecánica, mecánica de fluidos, conocimientos en oceanografía, física e ingeniería costera, entre otros.

Las estructuras offshore son obras de ingeniería instaladas en el océano sin conexión permanente hacia la playa o tierra firme. Para la contextualización y comprensión del uso de este tipo de tecnología el autor (Bayona, 2017) muestra un esquema que representa las estructuras offshore añadiendo lo siguiente: La industria eólica es el sector energético renovable que más ha hecho uso de las estructuras offshore a través de turbinas o molinos de viento. En los proyectos

de extracción de energía eólica offshore, se instalan varias turbinas interconectadas formando una red que conduce energía hacia una subestación offshore, y desde ésta hacia un transformador ubicado en el continente.

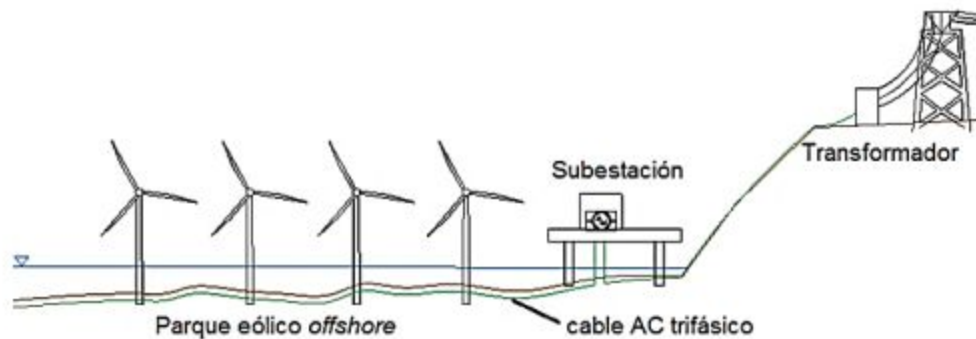


Figura 2. Parque eólico offshore y distribución a tierra. Fuente (Bayona, 2017)

Según (Gimenez J.M., 2012) el costo de generación de energía eólica puede ser reducido si se consideran 5 aspectos:

- 1) Incrementar el tamaño de las turbinas para mayor capacidad de generación,
- 2) optimizar los materiales de construcción,
- 3) Crear nuevas empresas para aumentar la oferta y reducir el costo de implementación de la tecnología,
- 4) Mejorar los sistemas eléctricos y electrónicos de control.
- 5) Evolucionar el diseño de las aspas para mayor captura de energía.

Una de las características principales de los parques eólicos marinos, que enuncia (Mattar, 2012), es su alta densidad de energía, que incluso podría ser comparable a las centrales eléctricas convencionales en términos de su capacidad de producción. Esto se debe a que el viento en la superficie del mar experimenta menos perturbaciones ya que rara vez hay obstáculos que produzcan turbulencias y, por lo tanto, un mejor uso del viento para la generación de energía. La ubicación de los parques eólicos en alta mar también es una alternativa cuando se enfrentan a limitaciones en la disponibilidad de la tierra y los problemas que surgen debido al ruido y la contaminación visual causada por los parques eólicos en tierra. Sin embargo, los parques eólicos marinos terminan siendo más caros de instalar y mantener que las instalaciones en tierra.

4. METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo se centra básicamente en el cumplimiento de los objetivos planteados con el fin de alcanzar los resultados esperados. En primera medida consiste en la revisión del material bibliográfico para la contextualización del tema tratado.

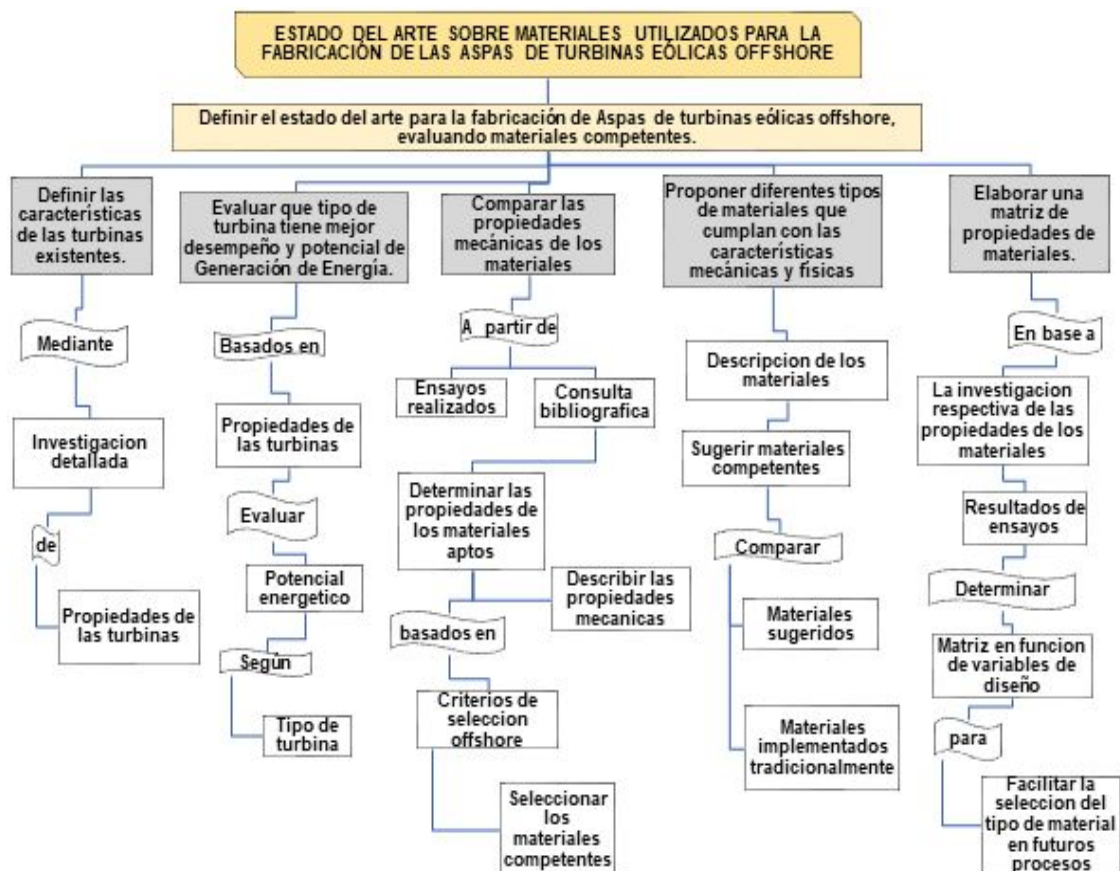


Figura 3. Metodología del trabajo. Fuente: propia.

En el anterior mapa conceptual se plantean los procesos metodológicos que se llevarán a cabo para alcanzar los objetivos propuestos en el desarrollo de esta investigación.

1. Para la definición de las características se llevará a cabo una investigación teórica evaluando las propiedades de las turbinas y seleccionando cuál de ellas cumple con el potencial energético deseado.
2. En base a la investigación realizada se comparan los materiales propuestos con el fin de determinar sus capacidades mecánicas y permitir una óptima selección de este.

3. Seleccionar cual(es) material(es) satisfacen las propiedades físico - mecánicas competentes para la fabricación de las aspas de una turbina eólica offshore, comparados con los materiales tradicionales.
4. Mediante la investigación detallada y descriptiva de cada material propuesto, se elabora una matriz con el fin de permitir una fácil selección del tipo de material evaluando sus propiedades para futuros procesos que lo requieran.

5. RESULTADOS

5.1. Características y propiedades de las turbinas eólicas.

Todas las fuentes de energía renovables (excepto la mareomotriz y la geotérmica), e incluso la energía de los combustibles fósiles, provienen del sol. El sol irradia $1,74 \times 10^{17}$ W de energía por hora hacia la tierra formando así el viento. El viento es aire en movimiento. El viento es aprovechado y convertido en energía cinética gracias a estructuras como los molinos de viento o las turbinas eólicas.

En el transcurso del tiempo la tecnología de las turbinas eólicas ha evolucionado sustancialmente. Con esto (Shikha et al, 2003) afirma que, en las técnicas de investigación actuales, el diseño de las turbinas eólicas está produciendo palas más fuertes, más ligeras y eficientes para las turbinas. La producción anual de energía por turbina ha aumentado enormemente y el peso de la turbina y el ruido que emiten se han reducido a la mitad en los últimos años.

Es por esto por lo que, (Shikha, et al, 2003), el comportamiento de un aerogenerador moderno se compone de una compleja interacción de componentes y subsistemas y su diseño requiere las habilidades de un equipo multidisciplinario de ingenieros con experiencia en diversas áreas: flujo del viento atmosférico, aerodinámica del rotor, control, sistemas mecánicos, sistemas eléctricos, e ingeniería civil.

Las turbinas están diseñadas para atrapar la energía cinética del viento. Por eso se requiere fabricar turbinas con pocas palas, largas y estrechas, con el objetivo de limitar la influencia de los vientos extremos.

Con lo mencionado anteriormente, es de resaltar que esta área de la energía eólica siempre ha estado en constante desarrollo. (Shikha, et al, 2003) añade que desde 1980, los avances en aerodinámica, dinámica estructural y "micrometeorología" han contribuido a un aumento anual del cinco por ciento en el rendimiento energético de las turbinas, incluso antes de tener en cuenta los aumentos en el área del rotor.

Al momento de diseñar y construir aerogeneradores, deben tenerse en cuenta la resistencia, el comportamiento dinámico y las propiedades de fatiga de los materiales y de todo el conjunto.

Dentro de las características de las turbinas eólicas descritas encontradas en el libro de (Yahya, 2011), Turbines, Compressor and Fans, se resaltan las siguientes:

1. Los aerogeneradores proporcionan energía libre de contaminación.
2. No hay costo de combustible. La ausencia de transporte de combustible, su almacenamiento y manejo hacen que la planta de energía sea muy simple.
3. La energía eólica es inagotable.

4. Existe alta densidad de energía medida en su capacidad de producción. Esto debido a que el viento en la superficie del mar experimenta menos perturbaciones ya que rara vez hay obstáculos que produzcan turbulencias y, por lo tanto, un mejor uso del viento para la generación de energía.
5. Las turbinas eólicas se pueden fabricar a partir de una amplia variedad de materiales fácilmente disponibles.
6. Las unidades de aerogeneradores pueden producirse en grandes cantidades en poco tiempo.
7. La opción de aerogeneradores a gran escala puede ahorrar combustibles fósiles en las centrales térmicas.

Según, (Yahya, 2011), se requieren sofisticados instrumentos de medición del viento para generar datos para la selección de un sitio y el diseño de una planta de energía eólica. Se han utilizado mástiles altos para este propósito en varias estaciones prospectivas de medición de viento. Dado que la energía eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento, la potencia de salida de una turbina eólica aumenta rápidamente con su altura sobre el suelo. Sin embargo, el costo de las plantas de energía eólica y su mantenimiento también aumentan con la altura.

En la figura presentada a continuación se muestra una curva típica que representa la variación de la velocidad del viento con la altitud. (Yahya, 2011) , enuncia que, los edificios y los árboles causan una reducción en la velocidad del viento en altitudes más bajas. Los

perfiles de velocidad en las cimas de las colinas se rigen por muchos otros factores. Los sitios de colinas, especialmente cerca del frente marítimo, experimentan mayores velocidades del viento. Colinas aisladas con pendientes empinadas y suaves son sitios ideales.

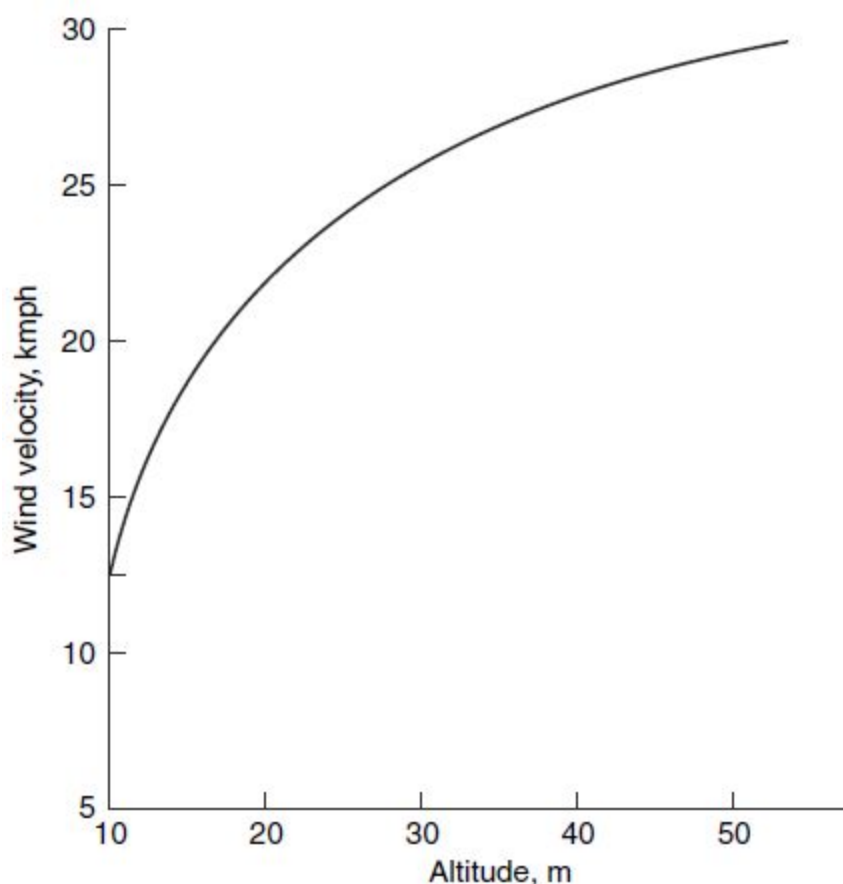


Figura 4. Variación de la velocidad del viento con la altura sobre el suelo. Fuente: (Yahya, 2011)

5.1.1. Aspectos claves para el diseño de turbinas eólicas

Según la literatura consultada, se dispone de 3 aspectos claves para el diseño apropiado de las turbinas eólicas:

- a. Selección de perfiles óptimos.

La selección de los perfiles empleados se fundamenta en los parámetros de diseño y localización de la turbina, con el objeto de evaluar las capacidades energéticas presentes en las corrientes de la ubicación seleccionada, estimar las cargas a las cuales se someterán los materiales y seleccionar el diseño apropiado según los empleados tradicionalmente.

b. Perfilado de la pala para obtener máxima potencia.

Se requiere que el diseño de la pala contemple el flujo de las corrientes de viento a través de esta, con el fin de reducir los esfuerzos a los que el elemento se somete, además de maximizar la capacidad aerodinámica de la pala y así incrementar la capacidad máxima de potencia del sistema.

c. Resistencia estructural de los materiales empleados.

Los materiales estructurales usados en las palas de las turbinas contemplan parámetros de resistencia a la tracción, compresión y cortante, para que al ser implementados logren resistir a los efectos adversos del ambiente y las condiciones mecánicas a los que se someten.

5.1.2. Elementos de las turbinas eólicas.

Una planta de energía de turbina eólica consiste, principalmente, en la hélice o rotor, el engranaje elevador, un generador eléctrico y la paleta de cola, todo montado en una torre o mástil. El diseño real dependerá del tamaño de la planta y su aplicación.

En la figura 5 se muestra el modelo de las estructuras offshore y se identifican los elementos de estas. A continuación, se hace una breve descripción de los elementos:

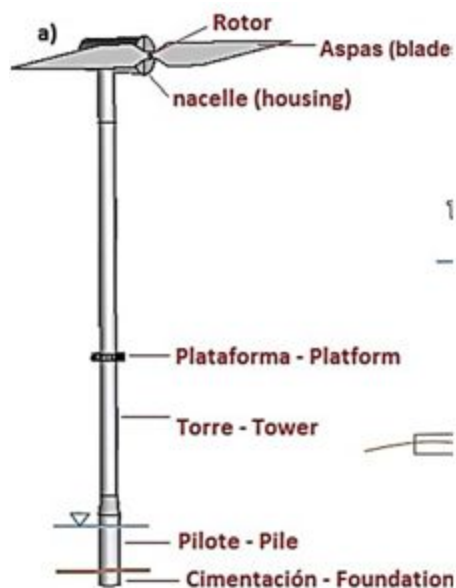


Figura 5. Turbinas eólicas offshore. Identificación de elementos y secciones. Fuente (Bayona, 2017)

ROTOR: Las turbinas del viento modernas de gran escala típicamente se equipan de rotores de tres palas con extensiones de 42 a 80 metros (138 a 262 pies) de diámetro, que mueven el generador de la turbina.

Según (Yahya, 2011) la forma, el tamaño y el número de palas en un rotor de turbina eólica dependen de si se trata de una máquina de eje horizontal o vertical. El número de cuchillas generalmente varía de dos a doce. Un rotor de alta velocidad requiere menos cuchillas para extraer la energía de la corriente del viento, mientras que una máquina lenta requiere un número relativamente mayor de cuchillas.

El rotor, (J.S. Rao, 2004) es el encargado de girar a causa del movimiento generado en las aspas por el viento y transmitir la energía generada.



Figura 6. Rotor de la turbina eólica. Fuente: Google imágenes.
https://cdn.pixabay.com/photo/2017/08/09/22/15/wind-power-2615988_960_720.jpg

CAJA DE ENGRANAJES: Los engranajes se utilizan para aumentar la frecuencia para la producción eléctrica.

En el libro de (Santoso & Wayne, 2018) , se enuncia que una turbina eólica está sujeta a un rango de cargas estructurales causadas por la manera en que las palas del rotor extraen energía del viento. Solo el componente de par que impulsa el generador es útil para producir

electricidad. Las otras cargas, como el empuje, se transfieren al suelo a través de la torre. El tren motriz de un aerogenerador comprende en general un eje de baja velocidad, una caja de engranajes, un eje de alta velocidad y un generador. Además, hay componentes adicionales necesarios, como la electrónica de potencia, que se utilizan para conectar un generador de velocidad variable a la red de CA de frecuencia fija. Estos juegan un papel muy importante en la determinación del rendimiento de la turbina eólica, y también pueden considerarse como parte del tren motriz de la turbina eólica.

GENERADOR: Este es quien genera la electricidad cuando hay suficiente viento como para rotar las paletas. La electricidad se transfiere a la siguiente etapa usando el cableado (para el almacenaje, envió a la red o para el uso directo).

TORRE: La torre eleva el montaje de las turbinas sobre las corrientes de aire turbulentas cerca de la tierra y permite capturar un viento de mayor velocidad. El diseño de torre es particularmente crítico, pues deben ser tan altas como sea económicamente posible (generalmente entre 40 y 100 metros), también deben ser robustas, permitir el acceso a la turbina para su mantenimiento, pero no agregar costo innecesario al sistema.

LOCALIZACIÓN: Los recursos eólicos son caracterizados por una escala de clases de viento según su velocidad, que se extiende de la clase 1 (la más baja) a la clase 7 (la más alta). Los desniveles de la superficie a través de la cual sopla el viento antes de llegar a una turbina determinan la cantidad de turbulencia que ésta turbina experimentará. Los vientos turbulentos ejercen mayores tensiones sobre el rotor y se elevan, reduciendo consecuentemente la expectativa de vida de la turbina.

5.1.3. Evaluación de desempeño y potencial de generación de energía.

Los estudios de potencial eólico son los primeros análisis que se deben realizar al tener un plan de construcción de turbinas eólicas offshore. Estos se extraen a través de análisis de variabilidad climática del viento superficial empleando bases de datos climatológicas y mediciones puntuales. En la tabla 1, presentada a continuación se muestra los valores respectivos de potencia del viento según la clase y velocidad del viento.

Tabla 1. Valor respectivo de potencia según velocidad del viento. Fuente: (Textos Científicos , 2019)

Clase	a 30 m de altura		a 50 m de altura	
	Velocidad del viento (m/s)	Potencia del viento (W/m ²)	Velocidad del viento (m/s)	Potencia del viento (W/m ²)
1	0-5.1	0-160	0-5.6	0-200
2	5.1-5.9	160-240	5.6-6.4	200-300
3	5.9-6.5	240-320	6.4-7.0	300-400
4	6.5-7.0	320-400	7.0-7.5	400-500
5	7.0-7.4	400-480	7.5-8.0	500-600
6	7.4-8.2	480-640	8.0-8.8	600-800
7	8.2-11.0	640-1600	8.8-11.9	800-2000

5.1.4. Pruebas de fatiga.

Las palas se someten a cargas de flexión en la dirección de flap (parte de la pala no rígida) y en la dirección periférica (Zona inmediata al exterior), cíclicamente próximo a la frecuencia natural de la pala. La frecuencia natural es la frecuencia con la que la pala oscila de una parte a otra, si es empujada una vez en una determinada dirección y luego se suelta. Las frecuencias naturales son diferentes en la dirección de flap y en la dirección

periférica: la pala tiende a ser mucho más rígida en la dirección periférica, por lo que tiene una frecuencia natural más alta para la flexión periférica, permitiendo así conseguir evaluar la pala en un estado mucho más próximo al real.

Los ensayos permiten verificar que las laminaciones en la pala son seguras, es decir, que no ocurrirá delaminación ni rotura en las fibras al someterse a cargas cíclicas.

5.1.5. Prueba estática.

(Danish Wind Industry Association, 2003) Las palas de rotor también pasan un ensayo de resistencia (y así su habilidad de soportar cargas extremas) mediante una sola flexión con una fuerza muy elevada. Este ensayo se realiza después de que las palas han sido sometidas al ensayo de fatiga, con el fin de verificar la resistencia de una pala que ha estado en operación durante un periodo de tiempo importante.

5.2. Propiedades físico - mecánicas competentes para la fabricación de las aspas de una turbina eólica offshore.

Las palas comúnmente son fabricados de fibra de vidrio o fibra de carbón reforzado con plástico. Las palas de madera, madera y resina epóxica o madera-fibra-resina epóxica son ya poco empleadas. Las aspas de aluminio y aleaciones de acero son muy pesadas y vulnerables a la fatiga del material. Por lo cual, estos materiales se emplean solo en las turbinas eólicas muy pequeñas.

5.2.1. COEFICIENTE DE POTENCIA

El coeficiente de potencia C_p permite representar las principales características de las hélices, simplemente dividiendo la potencia eléctrica disponible por la potencia eólica de entrada.

$$C_p = P_{ed}/P_{ee}$$

donde,

P_{ed} = Potencia eléctrica disponible.

P_{ee} = Potencia eólica de entrada.

En combinación con otro importante parámetro adimensional λ . Este último, establece la relación entre la velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento.

$$\lambda = \omega R/V$$

donde,

R = radio de la hélice en m.

ω = velocidad angular en rad/seg.

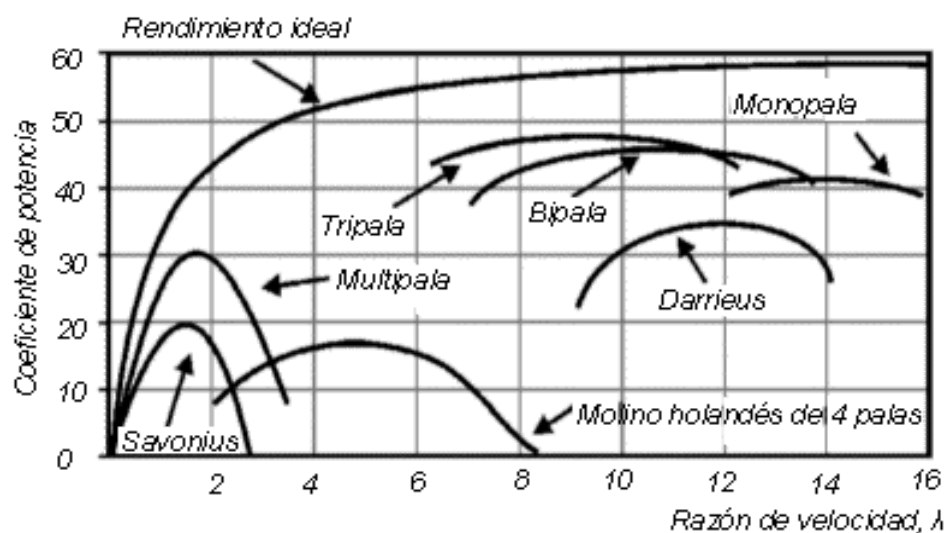


Figura 7. Coeficiente de potencias vs razón de velocidad. Fuente: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia57/HTML/articulo03.htm>

5.2.2. SOLIDEZ

Para una hélice dada, se denomina solidez a la relación entre la superficie proyectada por las palas sobre el disco de la hélice y la superficie frontal barrida por la hélice

$$S = A_p / A_f b$$

$$A_p = N \int_{raiz}^{D/2} c dr = \text{superficie proyectada de las palas}$$

donde,

S = solidez

N = número de palas

c = cuerda

r = radio

D = diámetro de la hélice

$A_{fb} = \pi D^2/4$ = área frontal barrida.

Los aparatos de elevada solidez poseen un fuerte momento de arranque y giran a baja velocidad.

5.2.3. Tipos de turbinas eólicas.

A continuación, se presenta la clasificación de turbinas eólicas según el número de palas.

5.2.3.1. Turbina tripala

Es el más empleado en la actualidad y la gran mayoría de las turbinas más vendidas en los mercados mundiales poseen este diseño. Consta de 3 palas colocadas formando 120° entre sí.



Figura 8. Diseño de turbina eólica offshore tipo tripala.

Fuente: [www. ecoticias.com](http://www.ecoticias.com)

5.2.3.2. Turbina bipala

Los diseños bipala tienen la ventaja de ahorrar el peso y coste de una de las palas respecto a los aerogeneradores tripala, pero necesitan mayores velocidades de giro para producir la misma energía que aquellos.

Las máquinas bipala y monopala requieren de un diseño más complejo, con un rotor basculante (buje oscilante), con el fin de evitar fuertes sacudidas en la turbina cada vez que una de las palas pasa por la torre.



Figura 9. Diseño de turbina eólica offshore tipo bipala. Fuente: www.opex-energry.com

5.2.3.3. Turbina monopala.

Los diseños monopala no están muy extendidos comercialmente. Además de una mayor velocidad de giro, y de los problemas de ruido y de intrusión visual, necesitan un contrapeso en el lado del buje opuesto a la pala que equilibre el rotor. Claramente, esto da un ahorro respecto al peso comparado con un diseño bipala.



Figura 10. Diseño de turbina eólica offshore tipo bipala. Fuente: <http://ecovive.com>

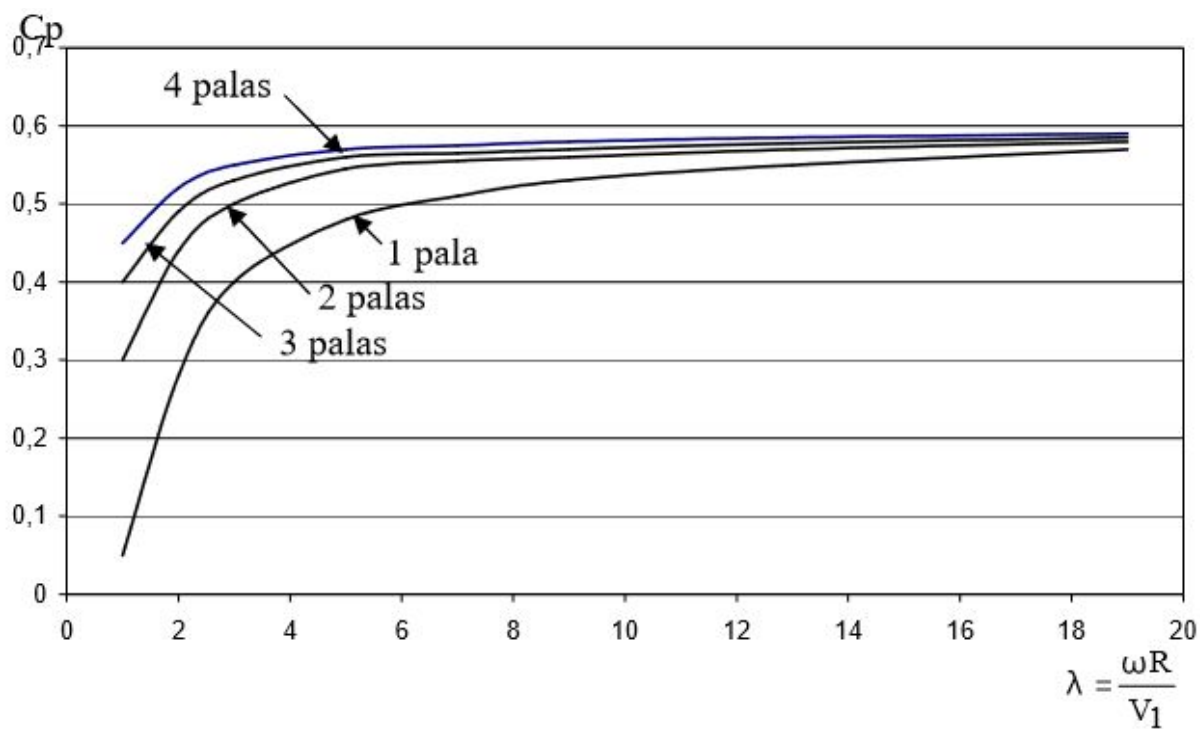


Figura 11. Coeficiente de potencia, (C_p) vs λ , para diferente número de palas. Fuente: (Kotik, 2016)

5.2.4. TAMAÑO DE LA HÉLICE

Para determinar el tamaño de la hélice es necesario conocer la potencia eléctrica requerida por el usuario y los rendimientos de los distintos elementos que integran la turbina.

El rendimiento global de la turbina será:

$$\eta = \eta_e \eta_m C_p$$

donde,

η_e = Rendimiento eléctrico.

η_m = Rendimiento del multiplicador.

C_p = Coeficiente de potencia.

De este modo la potencia eléctrica de salida será,

$$P_e = 1/2 \rho V^3 A_{fb}$$

donde, $A_{fb} = \frac{2P_e}{\eta \rho V^3}$

y como $A_{fb} = \pi R^2$, el radio de la hélice resulta

$$R = \sqrt{2P_e / \Pi \eta \rho V^3}$$

En esta expresión, V es la velocidad del viento instantánea que al incidir sobre la turbina con una hélice de radio R, genera una potencia eléctrica P_e .

5.2.5. INFLUENCIA DE LA CALIDAD AERODINÁMICA

Las características y el espesor de algunos perfiles que pueden ser buenos para alas de aviones pueden resultar inadecuados para las hélices. El número de Reynolds varía considerablemente entre la raíz y la punta de la pala principalmente por la variación de la velocidad tangencial. Cerca de la raíz donde el número de Reynolds es bajo se suele desarrollar una burbuja laminar cuyo comportamiento es sumamente variable.

La forma geométrica de los perfiles determina la sustentación y resistencia aerodinámica que estos producen. Los coeficientes de sustentación y resistencia C_L y C_D , como así también su relación C_L/C_D , varían en función del ángulo de ataque. El valor máximo alcanzado, $(C_L/C_D)_{\text{máx.}}$, es uno de los parámetros fundamentales para el análisis del comportamiento de las hélices y determinan cual es el perfil más adecuado para cada aplicación particular. En 1976 se propuso la siguiente expresión para calcular el valor de $C_{p\text{max}}$.

$$C_{p\text{max}} = 0.593 \left[\frac{\lambda N^{0.67}}{1.48 + (N^{0.67} - 0.04)\lambda + 0.0025\lambda^2} - \frac{1.92\lambda^2 N}{1 + 2\lambda N} \left(\frac{C_D}{C_L} \right) \right]$$

Donde,

N = Numero de palas de la hélice.

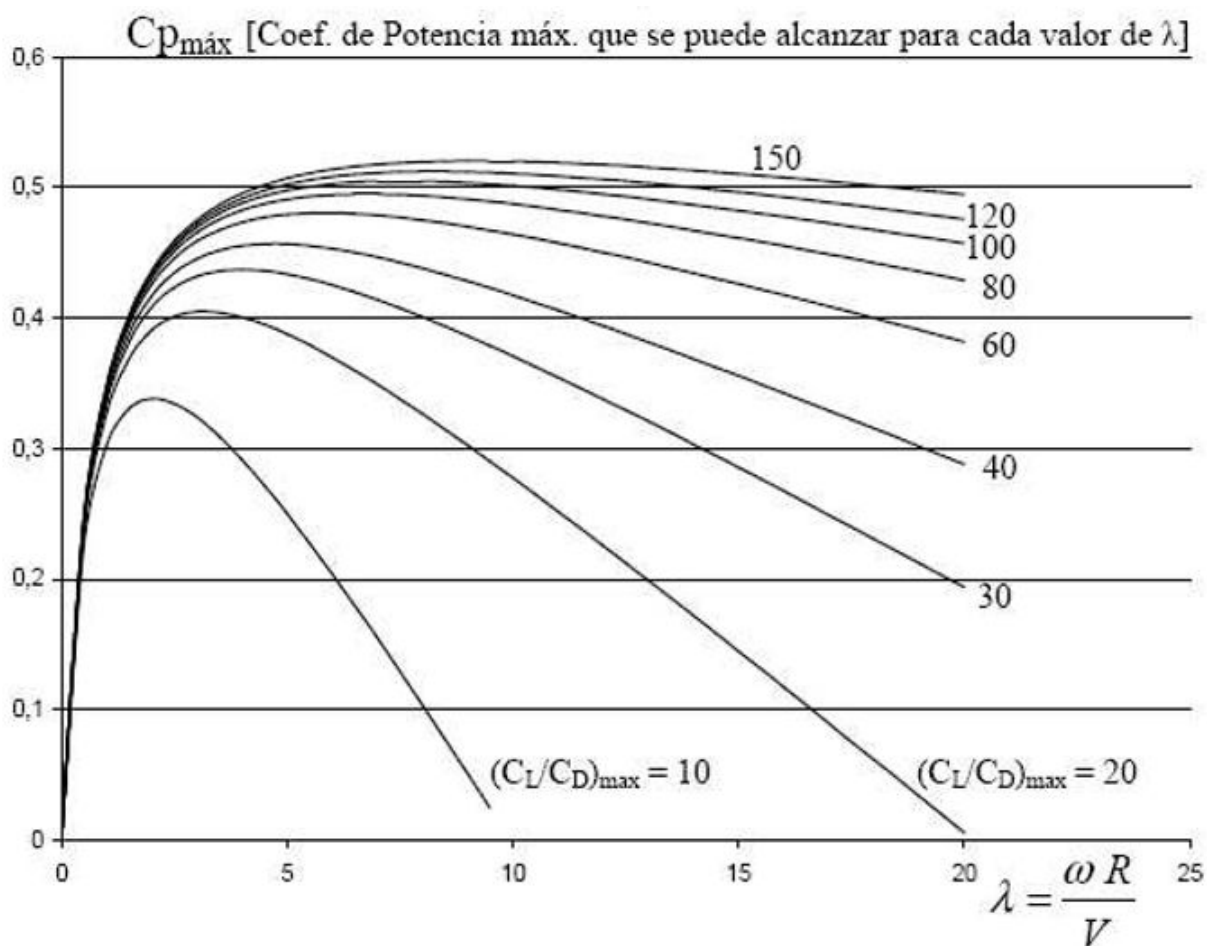


Figura 12. Influencia de la calidad aerodinámica para una Hélice tripala. Fuente: (Kotik, 2016)

En la práctica el valor de $(C_L/C_D)_{máx}$ está limitado por la calidad de fabricación de las palas, ya que, a mayor calidad aerodinámica, se requiere mayor calidad de terminación, estado superficial, curvatura del perfil, etc.

El valor de $(C_L/C_D)_{máx}$ es un factor importante para elegirlo lo más alto posible, pero deberá tenerse en cuenta que los perfiles con elevados $(C_L/C_D)_{máx}$ poseen mucha curvatura y

como consecuencia de ésta, el momento aerodinámico M suele ser muy elevado. Si el sistema de control es mecánico, este efecto puede producir inestabilidad en su funcionamiento. Al aumentar el número de revoluciones, el momento M aumenta muy rápidamente y entonces, la pala gira hasta su valor de paso máximo donde la hélice capta poca energía del viento. Captando poca energía, su velocidad de giro disminuye en forma abrupta y el momento se reduce. La hélice vuelve al paso mínimo de máxima captación y comienza a acelerarse nuevamente, produciendo ciclos peligrosos de ida y vuelta entre el paso mínimo y el paso máximo.

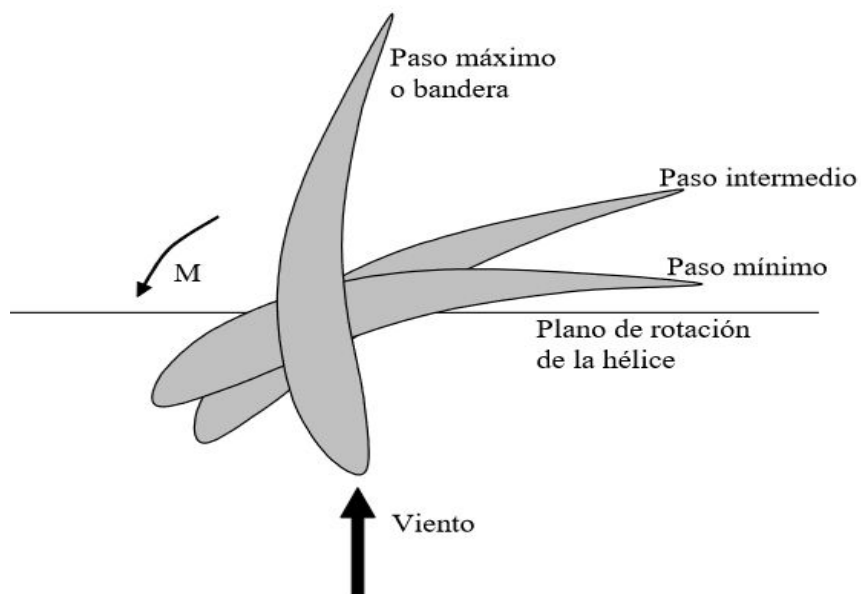


Figura 13. Pasos mínimos y máximos en la hélice al generar momento. Fuente: kimerius.com/app/.../Cálculo+y+diseño+de+la+hélice+óptima+para+turbinas+eólicas.p...

Si bien para turbinas eólicas que generan electricidad se desea que giren lo más rápido posible es necesario mencionar que a medida que la velocidad de punta de pala aumenta, el efecto de compresibilidad del aire incrementa el valor de C_D . Para evitar este efecto, el número de Mach de la punta no debe superar 0,5 ($M < 0,5$).

La velocidad de punta de pala no debe exceder los 160 m/seg. Si bien este valor es alto, en algunos casos especiales debe ser tenido en cuenta, mediante la expresión:

$$C = 20.045\sqrt{T}$$

donde T es la temperatura absoluta en °K y C la velocidad del sonido en m/seg.

5.2.6. VELOCIDAD DE ROTACIÓN

Determinado el valor de λ , se calcula la velocidad de rotación de la hélice en número de revoluciones por minuto (n):

$$n = \frac{30\omega}{\pi}$$

Es importante a esta altura, distinguir el tipo de utilización que se dará a la turbina eólica, ya que éstas podrán ser instaladas en forma agrupada constituyendo las denominadas "Granjas Eólicas" o en instalaciones individuales, normalmente aisladas. En el primer caso, las granjas eólicas son verdaderas centrales de generación eléctrica, en forma similar a una central hidroeléctrica o nuclear. Generalmente son grandes instalaciones de varios MW y la energía generada es entregada a la red de distribución. En este caso, la localización de la granja se efectúa después de una cuidadosa selección, teniendo especialmente en cuenta que el régimen de vientos sea suficientemente elevado, con una velocidad media anual de 8 a 10 m/seg o más, medida a 10 m de altura sobre el suelo.

5.2.7. ANÁLISIS DE CARGAS ESTÁTICAS

Cuando se tengan observaciones directas de las velocidades básicas del viento, se podrán calcular las presiones básicas características del viento en una superficie normal a su dirección, mediante la ecuación:

$$Q_{10} = \frac{V_{10}^2}{1.6 \cdot 10^3} \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

donde,

Q_{10} = Presión básica característica del viento en terrenos llanos y abiertos a 10m sobre el terreno.

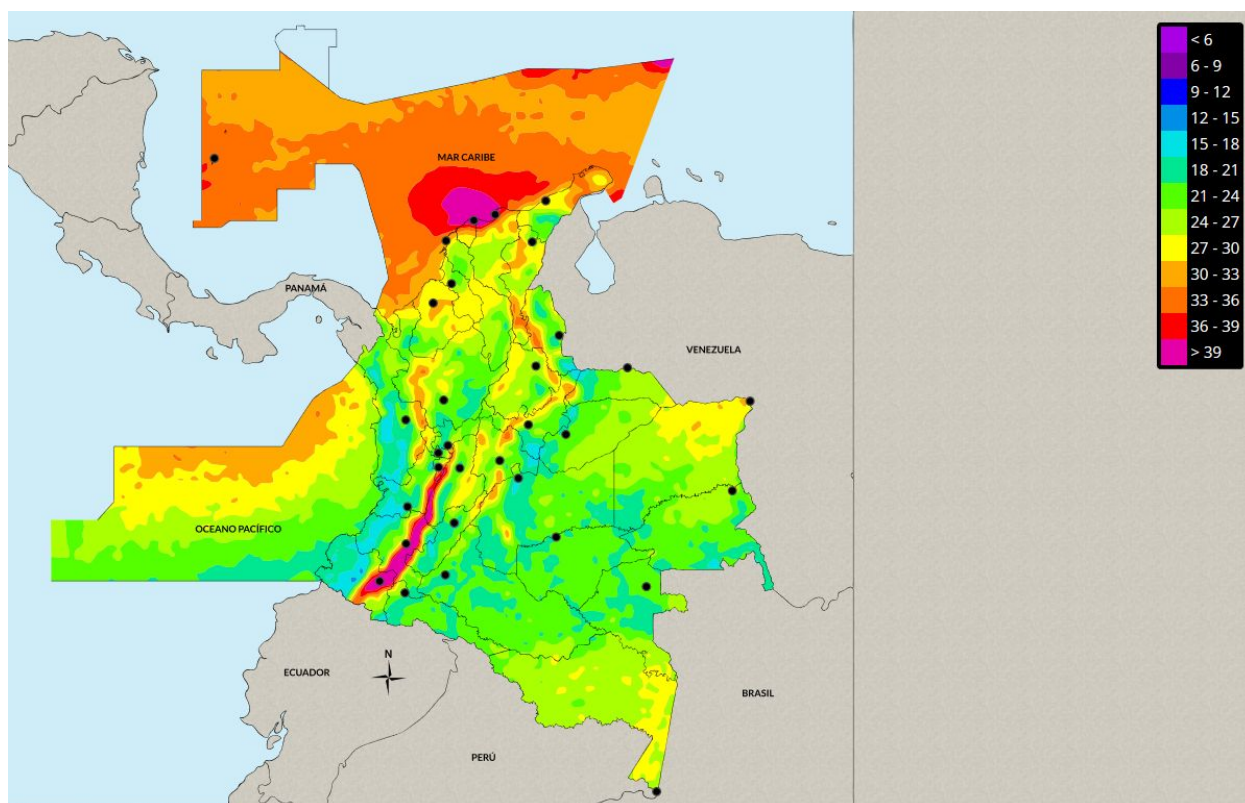


Figura 14. Velocidades máximas registradas por el IDEAM en el territorio nacional. Fuente: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>

Según la información suministrada por el IDEAM, se obtienen velocidades máximas mayores a 39 m/s para la región del caribe, para lo cual la presión obtenida para estas velocidades sería igual a:

$$Q_{10} = \frac{(39 \frac{m}{s})^2}{1.6 \times 10^3} = 0.03 \frac{KN}{m^2}$$

5.3. Tipos de materiales que cumplen con las características físico - mecánicas de diseño.

A continuación, se presenta los principales materiales utilizados en la fabricación de las palas según la breve descripción del trabajo de (Kotik, 2016):

5.3.1. Fibra de vidrio

La clase de fibra de vidrio más empleada en las palas de aerogeneradores es el tipo E.

Éstas tienen un costo relativamente bajo, son aislantes eléctricos, isotrópicas y sus propiedades tienen poca variabilidad, (Dannenberg, 2014) enuncia en su libro.

5.3.2. Fibra de carbono

Según (Sørensen BF, 2010) las fibras de carbono poseen módulos de elasticidad más elevados que las de vidrio, su costo es relativamente alto, son conductores eléctricos, con elevado grado de anisotropía, son más difíciles de trabajar que las de vidrio. Su resistencia última a tracción y su límite a la fatiga son más elevados que las correspondientes de vidrio. Su resistencia a la compresión puede ser más baja que la de la fibra de vidrio, siendo además mucho más

sensible a defectos propios del proceso de fabricación del material compuesto como desalineación u ondulación de las fibras o láminas.

5.3.3. Matrices.

A continuación, se define los tipos de resinas utilizados en las palas de las turbinas.

(Dannenbergh, 2014):

- 5.3.3.1. Resinas poliéster insaturadas: Son las más empleadas en compuestos reforzados con fibras de vidrio para palas, son baratas, fáciles de trabajar, con relativamente baja viscosidad y buena impregnación de las fibras. Sus desventajas radican en la relativa baja resistencia que otorga al compuesto reforzado con fibra y un envejecimiento más rápido respecto a las otras resinas. Requieren estireno para su endurecimiento.
- 5.3.3.2. Resinas vinil-éster: Son algo más costosas y proveen compuestos laminados de mejor performance que las anteriores. En general, las propiedades mecánicas son más elevadas que las de poliéster insaturadas.
- 5.3.3.3. Resinas epoxi: Son más costosas y proveen las propiedades mecánicas cuasiestáticas más elevadas (ejemplo, resistencia a la compresión 10-15% mayor que con resinas vinil-éster) como así también su comportamiento a la fatiga. Su viscosidad es más alta que las dos familias de resinas antes nombradas, lo que origina la necesidad de solventes para lograr una buena fluidez. Son las más empleadas con fibra de carbono. Sus procesos de curado hacen que la fabricación del compuesto sea más compleja que con las resinas anteriores.

5.3.3.4. Resinas termoplásticas: Actualmente están siendo evaluadas resinas como el tereftalato de polibutileno (PBT) para reemplazar las resinas anteriores. La principal ventaja de esta familia de resinas es la posibilidad de reciclarlas una vez finalizada la vida útil de la pala.

5.3.4. Núcleos de vigas tipo sándwich

Se clasifican de la siguiente manera, (Sørensen BF, 2010):

5.3.4.1. Madera balsa: Está conformado por bloques de madera pegados entre sí. Poseen relativamente buena resistencia específica al corte y rigidez específica. Son fáciles de trabajar, pero su porosidad hace que ingrese resina en su interior aumentando su peso. Necesita protección contra hongos y ante posible putrefacción.

5.3.4.2. Espumas: La mayoría de las espumas empleadas en palas son de policloruro de vinilo (PVC). También se utilizan espumas de polimetacrilimida que poseen mejores resistencias específicas, pero son más costosas que las de PVC.

En la figura 13, se pueden visualizar tanto la ubicación de distintos materiales como sus posibles métodos de fabricación.

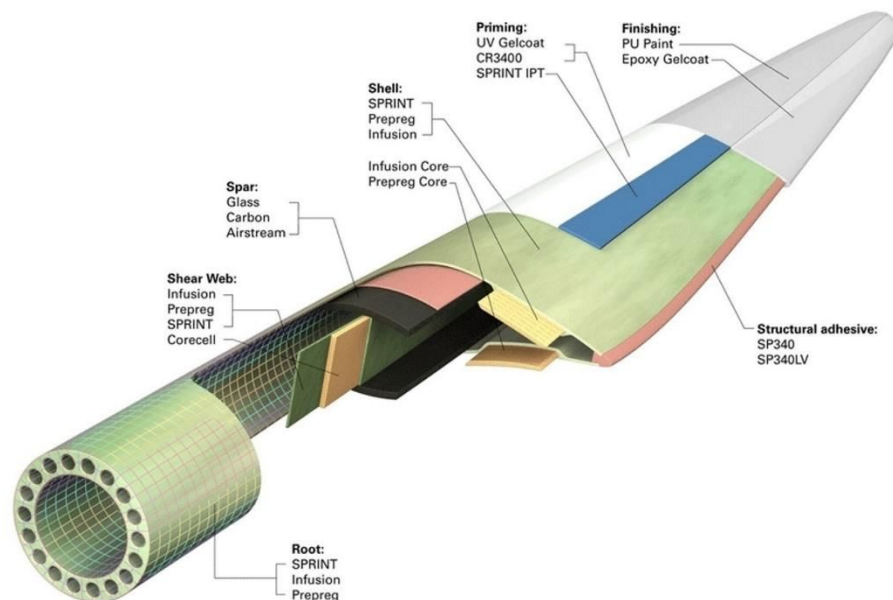


Figura 15. Vista típica de una pala con posibles materiales empleados. Fuente: (Kotik, 2016)

5.4. Matriz de materiales de diseño competentes.

En el diseño de una turbina eólica, es muy importante calcular por anticipado como se comportarán los diferentes componentes, tanto individualmente como en conjunto; asimismo es primordial calcular las fuerzas que participan en cada flexión y estiramiento de un componente.

En la tabla 2 se expone una lista de diferentes materiales que pueden llegar a perfilarse como materiales idóneos para la construcción de las aspas de las turbinas eólicas offshore. En la tabla enunciada se encuentra la descripción de una variedad de materiales escogidos, y los valores de esfuerzos a tracción y compresión de estos, con el fin de poder evaluar y distinguir el material más resistente respecto al tipo de propiedades que se están

valorando en la tabla; además de eso poder considerar el material que tenga un comportamiento competente en ambientes agresivos como se encuentran en el mar. Las instalaciones eólicas marítimas deben ser resistentes a la corrosión proveniente del aire de mar, que es altamente húmedo y contiene sal.

Tabla 2. Descripción y valores de tracción y compresión de materiales.

MATERIAL	RESUMEN	TRACCIÓN (lb/in ²)	COMPRESIÓN (lb/in ²)
Aluminio	(Morral, Jimeno, & Molera, 1982) Posee propiedades mecánicas convenientes y la suficiente estabilidad química para ser utilizados en la producción de aleaciones ligeras. Tiene poco peso, aceptable resistencia a la corrosión, conductividad elevada, tanto térmica como eléctrica y una gran reflectividad de la energía radiante.	45000	-
Bronce	(Kalpakjan, Schmid, & Sanchez, 2002) Es una aleación de cobre y de estaño. Tiene buena resistencia y dureza, es fácil de fundir. Los broncees son muy resistentes a los agentes atmosféricos, a las aguas ácidas y alcalinas	20000	-
Cobre	(Kalpakjan, Schmid, & Sanchez, 2002) Posee propiedades similares a las del aluminio. Es de los mejores conductores de electricidad y del calor y tiene buena resistencia a la corrosión. es un material liviano y de fácil procesamiento mediante técnicas de formado, maquinado fundido y soldado	35000	-
Vidrio	(Smith & Hashemi, 2006) Son materiales cerámicos, inorgánicos, de fusión que se ha enfriado a una condición rígida sin cristalizarse. Tiene como característica principal la resistencia a la corrosión, además de la fácil maleabilidad y una alta resistencia a la compresión.	10000	-
Plástico	(Smith & Hashemi, 2006) Puede considerarse como material polimérico sólido aquel que contiene múltiples partes o unidades enlazadas químicamente y que están unidas entre sí para formar un sólido. Material sintético capaz de ser moldeado. Tiene una amplia variedad de propiedades, además de su bajo costo el plástico ofrece menos operaciones de acabado, simplificación de embales, menor peso, y tiene propiedades aislantes.	9000	-
Titanio	(Kalpakjan, Schmid, & Sanchez, 2002) Es atractivo por su elevada relación resistencia a peso y su resistencia a la corrosión a las temperaturas ambiente y elevadas.	155000	-
Madera	(Smith & Hashemi, 2006) Es un material compuesto que se presenta en forma natural y consistente principalmente en un complejo de células de celulosa reforzadas con una sustancia polimérica llamada lignina y otros compuestos orgánicos.	2133	5000

Guadua	La guadua es una gramínea gigante que puede alcanzar 30 metros de altura o más, y cuyo diámetro puede variar de 1 a 22 cm Haciendo uso del vocablo indígena "guadua" que significa "hoja angosta" (Newell, 2012) Enuncia que, es un material poroso de origen vegetal y constituido por células, sus fibras están dispuestas axial y longitudinalmente, es un material anisotrópico ya que sus propiedades físicas, mecánicas y de trabajabilidad según su sentido o plano considerado.	18332	7887
Termofijos	Según (Smith & Hashemi, 2006) los plásticos no deformables al calor o termofijos están formados por una estructura molecular reticular de enlaces covalentes primarios. tiene alta estabilidad térmica, alta rigidez, alta estabilidad dimensional, peso ligero y propiedades aislantes eléctricas y térmicas.	15000	-
Cerámicas	(Smith & Hashemi, 2006) Debido a sus características deseables como alta dureza, resistencia al desgaste, estabilidad química, resistencia a altas temperaturas y bajo coeficiente de expansión térmica, son materiales más seleccionados para múltiples aplicaciones.	25000	112000
Materiales compuestos	(Smith & Hashemi, 2006) Sistema de materiales constituido por una mezcla y combinación de dos o más micro o macroconstituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí. Tiene propiedades tales como la alta conductividad térmica y es bajo coeficiente de expansión térmica, indican que el material resistente al choque térmico.	160000	-
Fibra de Vidrio	(Smith & Hashemi, 2006) La fibra de vidrio se obtiene gracias a la intervención de ciertos hilos de vidrio muy pequeños, que al entrelazarse van formando una malla, patrón o trama. (Miravete, 1995) Por otra parte, cabe mencionarse que estos hilos son obtenidos mediante el paso (que se lleva a cabo industrialmente) de un vidrio líquido a través de un elemento o pieza sumamente resistente, que además debe contar con diminutos orificios.	500000	156000
Fibras de Carbono	(Besednjak Dietrich, 2005) Es un tejido muy resistente mecánicamente, duradero, flexible. Este polímero es obtenido a partir de otro polímero llamado poliacrilonitrilo, el cual consiste en hebras muy finas de carbono (Velez Moreno, 2008) (tan delgadas como el cabello humano) que son trenzadas, las cuales se tuercen y se agrupan continuamente para la formación de un hilo de varias hebras, se coloca sobre un molde y encima se le vierte una resina o plástico para pegar estos hilos tejidos y darles forma a sus diversas aplicaciones.	363000	150000

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La realización de este proyecto permitió comprender y exponer las premisas teóricas de las características de las turbinas eólicas offshore, destacando como principales las siguientes: La implementación de tecnologías offshore frente a otras fuentes de energía representa una alternativa que ofrece un gran potencial energético, los aerogeneradores proporcionan energía libre de contaminación, la energía eólica es inagotable y abarca el hecho de que trabaja con alta densidad de energía provocando, así mismo, una elevada capacidad de producción. Esto a consecuencia de que el viento en la superficie del mar experimenta menos perturbaciones ya que no es común que existan obstáculos que produzcan turbulencias y, por lo tanto, un mejor uso del viento para la generación de energía. Finalmente, y es de gran consideración que las turbinas eólicas se pueden fabricar a partir de una amplia variedad de materiales fácilmente disponibles.

Los aspectos claves para el diseño apropiado de las turbinas eólicas en primera medida incluyen la identificación de los parámetros de diseño y localización de la turbina para la selección de perfiles óptimos, con el fin de poder definir la capacidad energética presente en las corrientes de la ubicación seleccionada. En segunda medida, al seleccionar el perfilado de la pala se debe incorporar obligatoriamente el concepto de diseñar un elemento en el que se obtenga la máxima potencia energética, reduciendo así mismo los esfuerzos a los que este es sometido. Finalmente, se define la resistencia estructural de los materiales empleados. Estos materiales usados en las palas de las turbinas contemplan parámetros de resistencia a la tracción,

compresión y cortante, con el fin de resistir las condiciones y esfuerzos mecánicos a los que se exponen.

El generador es la parte destinada enteramente a producir la electricidad cuando existen corrientes de viento a altas velocidades suficientes para rotar las paletas. La electricidad se transfiere a la siguiente etapa usando el cableado (para el almacenaje, envío a la red o para el uso directo). La localización de la granja se define luego de una cuidadosa selección, teniendo especialmente en cuenta que el régimen de vientos sea suficientemente elevado, con una velocidad media anual de 8 a 10 m/seg o más, medida a 10 m de altura sobre el suelo.

De acuerdo con los ensayos de fatiga investigados se puede afirmar que la pala tiende a ser mucho más rígida en la dirección periférica, por esta razón tiende a poseer una frecuencia natural más alta para la flexión, permitiendo así analizar el comportamiento que tendrá la pala en un ámbito más próximo al real. Adicionalmente estos ensayos permiten verificar que las laminaciones en la pala son seguras, es decir, que no ocurrirá delaminación ni rotura en las fibras al someterse a cargas cíclicas.

Las palas del rotor también pasan por un ensayo de resistencia donde se mide la característica de resistencia a flexión estática. Este ensayo se realiza después de que las palas han sido sometidas al ensayo de fatiga, con el fin de verificar la resistencia de una pala que ha estado en operación durante un periodo de tiempo importante.

Es posible inferir que un rotor con un número par de palas o un rotor monopala puede dar problemas de estabilidad en una máquina que tenga una estructura rígida. La explicación a esto es que en el preciso instante en que la pala más alta se flexiona hacia atrás, debido a que obtiene

la máxima potencia del viento, la pala más baja pasa por la sombra del viento de enfrente de la torre. Por ende, el diseño de turbina eólica recomendado es el tripala ya que otorga el suficiente potencial energético y se acerca al rendimiento ideal comparado con los otros diseños y que, aunque tiene mayor peso y coste, ofrece estabilidad en la estructura.

Según la información suministrada por el IDEAM, se obtienen velocidades máximas mayores a 39 m/s para la región del caribe, para lo cual la presión obtenida para estas velocidades sería igual a:

$$Q_{10} = \frac{(39 \frac{m}{s})^2}{1.6 \times 10^3} = 0.03 \frac{KN}{m^2}$$

La fibra de vidrio más empleada en las palas de aerogeneradores es el tipo E. Este tipo se caracteriza por sus propiedades dieléctricas, tienen un costo relativamente bajo y es un material isotrópico. En cambio, las fibras de carbono poseen módulos de elasticidad más elevados que las de vidrio, pero su costo es relativamente alto, son conductores eléctricos, con elevado grado de anisotropía y son más difíciles de trabajar que las de vidrio.

Las resinas epoxi es otro material utilizado en la fabricación de las palas ya que proveen propiedades mecánicas cuasi estáticas más elevadas, así como también, su comportamiento a la fatiga.

Los núcleos de vigas tipo sándwich hechas de madera de balsa poseen relativamente buena resistencia específica al corte y rigidez específica. Son fáciles de trabajar, pero su porosidad hace que ingrese resina en su interior aumentando su peso. La mayoría de las

espumas empleadas en palas son de policloruro de vinilo (PVC) y espumas de polimetacrilimida que poseen mejores resistencias específicas.

7. CONCLUSIONES

Colombia presenta grandes capacidades de potencial para la generación de energía mediante el uso de sistemas eólicos en las zonas del Caribe, debido a las altas concentraciones de viento. Cabe mencionar que la implementación de parques eólicos en el país, no son enteramente la solución a la problemática energética latente, ya que exclusivamente se presentan velocidades elevadas de corrientes de viento en el norte del país, por lo que, si se emplean turbinas en otras zonas del país, se requerirán mayor número de turbinas para equiparar a un número menor ubicado en el Caribe, haciendo que el sistema se vuelva muy costoso y no brinde la tasa de retorno de inversión ni las utilidades, como se espera con los sistemas de energías renovables.

Se recomienda la implementación de turbinas de tres palas (Tripala), debido a que, para grandes velocidades de viento, se requiere una estructura estable, de mayor rigidez que no implique mayores esfuerzos en la torre debido a momentos, causados por el desplazamiento del rotor y que permita aprovechar al máximo las corrientes que se presenten en la zona. Es importante contemplar un diseño aerodinámico óptimo reducir los esfuerzos mecánicos en la pala por efectos de resistencia al movimiento y proporcionar al rotor un movimiento

mucho más natural, donde el viento se desplaza de manera que el choque con la placa no genere esfuerzos excesivos y permita que las palas se muevan con menor requerimiento eólico.

Se definió las resinas epoxi reforzadas con fibra de vidrio como el material óptimo para la fabricación de las palas de las turbinas eólicas offshore ya que además de tener buena impregnación con las fibras, son un material con resistencia a los rayos ultravioleta y al agua, es por eso que son utilizadas en la marina. Se caracterizan por ser termoestables y cuentan con una gran flexibilidad y una alta resistencia a la tensión.

REFERENCIAS

- Santos, S., & Wayne, H. (2018). *Standard Handbook for Electrical Engineers, Seventeenth Edition*. New York: McGraw-Hill Education.
- Azaña, L. (2016). *Proyecto Integral: Planta Industrial para Ensamblaje*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- World Bank. (2019). ¿Por qué el mundo está fomentando los vehículos eléctricos teniendo en cuenta que se necesita más electricidad para alimentarlos, impulsando así las centrales de energía a la producción masiva y aumentando así la contaminación a nivel industrial? *World Bank*.
- Bayona, J. (2017). Identification of the Influence of Convective Variations in the Generation of Transient Loads and their Hydromechanical Effect over the Offshore Structures. 394.
- Besednjak Dietrich, A. (2005). *Materiales compuestos: procesos de fabricación de embarcaciones*. Barcelona: Edicions UPC.
- Bir, G., & Migliore, P. (2004). *Preliminary Structural Design of Composite Blades for Two- and Three-Blade Rotors*. Colorado.
- DANE. (2018). *Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. Bogotá.
- Danish Wind Industry Association. (9 de Junio de 2003). Obtenido de Wind Power: <http://www.windpower.org/es/tour/manu/bladtest.htm>

- Dannenber, L. (2014). *Rotor Blades*. In: Schaffarczyk A, editor. *Underst. Wind Power Technol. Theory, Deploy. Optim.* 1st ed., John Wiley & Sons, Ltd.
- Eólica, A. D. (6 de Junio de 2003). *Wind Power*. Obtenido de <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/pictures/index.htm>
- Gimenez J.M., G. J. (2012). An overview of wind energy, taking into consideration several important issues including and analysis of regulatory requirements for the connection of wind generation into the power system. . *DYNA*, 108-117.
- Kalpakistan, S., Schmid, A., & Sanchez, G. (2002). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Pearson Education.
- Kotik, H. (2016). Fractura y Fatiga de Materiales Compuestos de Matriz Polimérica Empleados en Palas de Generadores Eólicos de Alta Potencia. En *Tesis de Doctor en Ingeniería* (pág. 171). Bahía Blanca, Argentina: Universidad Nacional Del Sur.
- Mattar, C. (2012). Una evaluación técnico-económica de la energía eólica marina en Chile. *Elsevier*, 191-205.
- Miravete, A. (1995). *Los Nuevos Materiales En la Construcción. Segunda Edición*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Morral, F., Jimeno, E., & Molera, P. (1982). *Metalurgia General*. Reverté.
- Newell, J. (2012). *Ciencia de Materiales. Aplicaciones en Ingeniería Primera Edición*. Mexico D.F.: Alfaomega Grupo Editor.
- Pixabay. (8 de Mayo de 2019). Obtenido de https://cdn.pixabay.com/photo/2017/08/09/22/15/wind-power-2615988_960_720.jpg
- Rao, J. (2004). *Rotor Dynamics. Third Edition*. New Delhi: New Age International Publishers .
- Rozo, Y. (26 de Abril de 2018). Energías renovables reducen 70% el costo de electricidad. *La República*.
- Ruiz Murcia, J. F., Serna Cuenca, J., & Zapata Lesmes, H. J. (2017). *Atlas de Viento de Colombia. IDEAM*. Bogotá D.C. .
- Shikha, Bhatti, T. S., & Kothar, D. P. (2003). Aspects Of Technological Development Of Wind Turbines. *Journal of Energy Engineering, Vol. 129, No. 3*.
- Smith, W., & Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Cuarta edición*. Mc Graw Hill.
- Sørensen BF, H. J. (2010). Blade materials, testing methods and structural design. *Wind Power Gener.*, 60-417.
- Textos Científicos . (20 de Abril de 2019). Obtenido de <https://www.textoscientificos.com/energia/turbinas>

Velez Moreno, L. (2008). *Materiales Industriales. Teoría y aplicaciones*. Instituto Tecnológico Metropolitano.

Vivas, J. (2019 de Febrero de 2019). Los 1.710 poblados que aún se alumbran con velas en el país. *El Tiempo*.

Yahya, S. (2011). *Turbines, Compressors and Fans, Fourth Edition*. New York: McGraw-Hill Education.