

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Departamento de Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE DIPLOMA

Título del trabajo: Metodología de selección de materiales para los álabes de un aerogenerador de eje horizontal.

Autor del trabajo: Romell Hurtado Hernández

Tutor del trabajo: Dr. Ing. Kirenia Abreu González

Santa Clara, junio de 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Resumen

En el presente trabajo de diploma se realizó una búsqueda de información sobre los tipos de aerogeneradores de eje horizontal que se utilizan actualmente, así como sus principales características y las ventajas que presentan con respecto a los aerogeneradores de eje vertical. También se indagó sobre los materiales más utilizados en la fabricación de los componentes de dichos aerogeneradores y se analizaron las cargas a las que están sometidas las palas de los aerogeneradores a partir de las variables y características climatológicas en Cuba. Se estableció una metodología de selección de materiales para las palas mediante el método de Michael Ashby y con la utilización del software Granta CES EduPack 2013. Finalmente, se preseleccionaron los materiales recomendados para las palas de los aerogeneradores de eje horizontal con la aplicación de dicha metodología, con el fin de obtener materiales y procesos de bajo costo con un impacto medioambiental despreciable.

Abstract

In the present work was carried out a search of information on the types of horizontal axis wind generators that are currently used, as well as their main characteristics and the advantages they have with respect to vertical axis wind turbines. We also inquired about the most used materials in the manufacture of the components of these wind turbines and analyzed the loads to which the blades of the wind turbines are subjected based on the variables and climatic characteristics in Cuba. A methodology for the selection of materials for the blades was established using the Michael Ashby method and with the use of the Granta CES EduPack 2013 software. Finally, the recommended materials for the blades of the horizontal axis wind generators were pre-selected with the application of said methodology, in order to obtain materials and processes of low cost with a negligible environmental impact.

Dedicatoria

Con amor infinito.

A mi padre **Romelio R. Hurtado Paz**, que sé, que donde quiera que este, me está cuidando, apoyando, he iluminado siempre mis caminos, para que pueda triunfar en la vida y convertir mis sueños en realidad. Por toda la enseñanza y el apoyo que me brindó durante mi infancia. Por ser mi figura a seguir y superar, por influir en mis valores y en mi forma de pensar y mirar el mundo.

Agradecimientos

Especialmente a mi madre **María Elena Hernández Jiménez**, por traerme a la vida, amarme y respetarme siempre, por todo el amor y cariño que me has brindado en todos los aspectos de la vida, por la enseñanza que me inculcaste y por todo el apoyo que me has brindado siempre. A quien nunca tendré la forma de cómo pagarle todo lo que un día hizo por mí.

A mi compañera y amiga, **Beatriz Betancourt Pérez**, por todos estos años de preocupación por mí y por mis estudios. Por todas las cosas buenas y momentos felices que pasamos juntos. Gracias por entenderme, ayudarme y quererme tal como soy.

A toda mi familia, por ayudarme desde mi infancia hasta el día de hoy, apoyándome en los asuntos académicos y personales, dándome enseñanzas y aprendizajes que no se encuentran en las aulas. Gracias a ellos por influir en mis valores y en mi forma de pensar y mirar el mundo.

A mi tutor, la Dra. Ing. **Kirenia Abreu González**, por todo el apoyo y tiempo que me ha brindado durante estos años de estudio y como su alumno ayudante. Por ayudarme, guiarme y creer en mí en este proceso, dándome sus consejos y orientándome constantemente para realizar este trabajo.

A mis compañeros y amigos de la universidad, por hacer este proceso de estudio más agradable y ameno. Gracias por ayudarme con sus conocimientos, tanto académicos como de la vida. Serán inolvidables todos los momentos que logramos superar juntos, muchas gracias *Frank Luis, Armando, Jeison, Arlen, Edgar, Jesús, Pablo y Luis Alberto*.

Índice

| | |
|--|----|
| Introducción..... | 1 |
| Planteamiento del problema..... | 2 |
| Hipótesis | 2 |
| Justificación..... | 2 |
| Objetivo General: | 2 |
| Objetivos Específicos: | 2 |
| Capítulo I: Estado del arte sobre la producción de energía eólica en Cuba y en el mundo | 4 |
| 1.1 Introducción..... | 4 |
| 1.2. La energía eólica..... | 4 |
| 1.3 Los Aerogeneradores..... | 4 |
| 1.4 Historia de los aerogeneradores..... | 5 |
| 1.5 Tipos de aerogeneradores | 6 |
| 1.5.1 Aerogeneradores de eje horizontal..... | 7 |
| 1.5.2 Aerogeneradores de eje vertical..... | 12 |
| 1.6 Comparación entre tipos de aerogeneradores..... | 17 |
| 1.6.1 Ventajas de los aerogeneradores de eje vertical frente a los de eje horizontal | 18 |
| 1.6.2 Ventajas de los aerogeneradores de eje horizontal frente a los de eje vertical | 18 |
| 1.7 Principales componentes de los aerogeneradores | 18 |
| 1.7.1 Subsistema de captación | 18 |
| 1.7.2 Subsistema de transmisión mecánica | 19 |
| 1.7.3 Subsistema de generación eléctrica | 19 |
| 1.7.4 Subsistema de regulación y control | 20 |
| 1.7.5 Subsistema de soporte..... | 20 |
| 1.7.6 Subsistema de almacenamiento de energía..... | 20 |
| 1.7.7 Partes específicas de un aerogenerador de eje horizontal | 20 |
| 1.7.8 Partes específicas de un aerogenerador de eje vertical | 21 |
| 1.8 Preselección de los materiales de los alabes de los aerogeneradores | 22 |
| 1.9 Descripción geométrica del álabe..... | 23 |
| 1.10 Parámetros geométricos del álabe | 26 |
| 1.11 Aspectos sociales y medioambientales en nuestro país | 27 |
| Conclusiones Parciales | 29 |
| Capítulo II: Método de cálculo de los aspectos fundamentales de un aerogenerador y dimensionamiento del álabe..... | 30 |
| 2.1 Introducción..... | 30 |
| 2.2 Ley de Betz | 30 |
| 2.3 Variación del viento | 31 |
| 2.4 Potencia eólica..... | 32 |
| 2.5 Rendimiento de los aerogeneradores..... | 35 |
| 2.6 Coeficiente de solidez de los alabes..... | 36 |
| 2.6 Potencia de la transmisión | 37 |
| 2.7 Potencia eléctrica | 38 |
| 2.7 Potencia total extraída..... | 38 |
| 2.8 Fuerzas y Momentos Aerodinámicos..... | 38 |
| 2.8.1 Sustentación (Lift) | 39 |
| 2.8.2 Arrastre (Drag) | 40 |
| 2.8.3 Momento Aerodinámico..... | 40 |
| 2.8.4 Coeficientes adimensionales | 42 |
| Conclusiones Parciales | 44 |

| | |
|---|----|
| Capítulo III: Selección de los materiales mediante la metodología de selección de Michael Ashby | 45 |
| 3.1 Introducción..... | 45 |
| 3.2 Metodología de selección de materiales de Michael Ashby | 45 |
| 3.2 Parámetros para los criterios de selección | 50 |
| 3.3 Restricciones de la selección | 51 |
| 3.4 Filtrado de la base de datos industrial del Granta CES Edupack 2013 | 53 |
| 3.5 Ranqueo de los materiales que cumplen con los criterios de diseño y depuración de los más ineficientes | 54 |
| 3.6 Documentación y examinación del ciclo de vida de los materiales seleccionados.. | 55 |
| 3.7 Aplicación de la metodología para la selección de los materiales de los álabes de un aerogenerador de producción nacional | 56 |
| 3.7.1 Aplicación de la metodología para la selección de los materiales del soporte de las palas | 58 |
| 3.7.2 Aplicación de la metodología para la selección de los materiales de la cubierta de las palas..... | 60 |
| Conclusiones Parciales | 63 |
| Conclusiones Generales | 64 |
| Recomendaciones..... | 65 |
| Bibliografía | 66 |
| Anexos | 68 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. 1 El primer aerogenerador. | 6 |
| Figura 1. 2 Algunos tipos de aerogeneradores de eje horizontal..... | 7 |
| Figura 1. 3 Aerogenerador tripala. | 8 |
| Figura 1. 4 Aerogenerador bipala..... | 9 |
| Figura 1. 5 Aerogenerador monopala. | 9 |
| Figura 1. 6 Aerogenerador multipala..... | 10 |
| Figura 1. 7 Orientación a barlovento de un aerogenerador. | 11 |
| Figura 1. 8 Orientación a sotavento de un aerogenerador. | 11 |
| Figura 1. 9 Aerogenerador Darrieus..... | 13 |
| Figura 1. 10 Aerogenerador Savonius. | 14 |
| Figura 1. 11 Aerogenerador híbrido. | 14 |
| Figura 1. 12 Aerogenerador Giromill. | 15 |
| Figura 1. 13 Aerogenerador Windside. | 16 |
| Figura 1. 14 Aerogenerador WM..... | 16 |
| Figura 1. 15 Aerogenerador Lenz II. | 17 |
| Figura 1. 16 Esquema conceptual de un generador eléctrico..... | 20 |
| Figura 1. 17 Partes específicas de un aerogenerador de eje horizontal..... | 21 |
| Figura 1. 18 Partes específicas de un aerogenerador de eje vertical. | 21 |
| Figura 1. 19 Malla unidimensional de una sección transversal de un álabe típico..... | 24 |
| Figura 1. 20 Sección transversal de un perfil alar. | 25 |
| Figura 2. 1 Distribución de Weibull..... | 31 |
| Figura 2. 2 Secuencia de los rendimientos y potencias de los componentes del aerogenerador. | 33 |
| Figura 2. 3 Rendimiento aerodinámico de varios aerogeneradores. | 36 |
| Figura 2. 4 Diagrama de Fuerzas sobre un perfil alar. | 39 |
| Figura 2. 5 Coeficientes de arrastre (C_x) y de sustentación (C_y) en función de α | 39 |
| Figura 2. 6 Sustentación superior (L_e) no colineal con la sustentación inferior (L_i), lo que origina un momento aerodinámico..... | 41 |
| Figura 2. 7 Diagrama de Fuerzas sobre un perfil alar para cualquier fluido..... | 42 |
| Figura 3. 1 Ranqueo inicial de todos los materiales. Módulo de Young (GPa) vs. Densidad (kg/m^3)..... | 46 |
| Figura 3. 2 Interacción entre los requerimientos del diseño, el material, la forma y los procesos. | 47 |
| Figura 3. 3 Estrategia para la selección de materiales de Michael Ashby. | 49 |
| Figura A 1 Primer ranqueo de los materiales para los soportes. Young's modulus (GPa) vs. Density (kg/m^3)..... | 74 |
| Figura A 2 Primer ranqueo de los materiales para los soportes. Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Density (kg/m^3)..... | 75 |
| Figura A 3 Primer ranqueo de los materiales para los soportes. Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Young's modulus (GPa)..... | 75 |
| Figura A 4 Segundo ranqueo de los materiales para los soportes. Young's modulus (GPa) vs. Density (kg/m^3)..... | 76 |
| Figura A 5 Segundo ranqueo de los materiales para los soportes. Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Density (kg/m^3)..... | 76 |
| Figura A 6 Segundo ranqueo de los materiales para los soportes. Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Young's modulus (GPa)..... | 77 |
| Figura A 7 Primer ranqueo de los materiales para la cubierta. Young's modulus (GPa) vs. Density (kg/m^3)..... | 81 |
| Figura A 8 Primer ranqueo de los materiales para la cubierta. Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Density (kg/m^3)..... | 81 |

| | |
|--|----|
| Figura A 9 Primer ranqueo de los materiales para la cubierta. Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Young's modulus (GPa). | 82 |
| Figura A 10 Segundo ranqueo de los materiales para la cubierta. Young's modulus (GPa) vs. Density (kg/m ³). | 82 |
| Figura A 11 Segundo ranqueo de los materiales para la cubierta. Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Density (kg/m ³). | 83 |
| Figura A 12 Segundo ranqueo de los materiales para la cubierta. Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Young's modulus (GPa). | 83 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 2. 1 Velocidades medias del viento en cada mes medidas entre los años 2010 y 2018. . | 34 |
| Tabla 2. 2 Niveles de rugosidad del terreno. | 35 |
| Tabla 2. 3 Números de palas en función del TSR. | 37 |
| Tabla 3. 1 Comparación de los 10 materiales recomendados para los soportes, en cuanto a densidad y precio. | 59 |
| Tabla 3. 2 Comparación de los 10 materiales recomendados para la cubierta, en cuanto a densidad y precio. | 61 |
| Tabla A 1 Modelos comerciales de aerogeneradores de baja potencia. | 68 |
| Tabla A 2 Escala de Beaufort de la fuerza de los vientos. | 68 |
| Tabla A 3 Características principales calculadas. | 70 |
| Tabla A 4 Propiedades de los aceros de bajo carbono. | 70 |
| Tabla A 5 Propiedades del Aluminio 6063 forjado. | 71 |
| Tabla A 6 Propiedades de una Madera dura: roble, en la dirección de las fibras. | 72 |
| Tabla A 7 Propiedades de un polímero compuesto GFRP de Matriz Epoxídica reforzada con Fibra de Vidrio. | 72 |
| Tabla A 8 Propiedades de un polímero compuesto CFRP de Matriz Epoxídica reforzada con Fibra de Carbono. | 73 |
| Tabla A 9 Propiedades del Polipropileno. | 73 |
| Tabla A 10 Propiedades del Polietileno. | 74 |

Introducción

Las energías renovables son una fuente inagotable, siendo explotada por los humanos desde mucho tiempo atrás. Las energías renovables más utilizadas son la solar, la eólica y la hidráulica. Algunos ejemplos de ello son: los molinos de viento, aerogeneradores, calentadores solares, paneles solares, entre otros. No obstante, debido al inminente cambio climático por el efecto invernadero, es necesario incrementar el uso de tecnologías que apropien este tipo de energía.

Con la aparición de los motores de combustión las energías renovables fueron cada vez menos utilizadas, llegando así la época de las nuevas tecnologías. (Arteaga, 2016)

La mayoría de sistemas energéticos tradicionales hacen uso de recursos no renovables para la generación de energía, lo que ha causado que el daño al medio ambiente vaya en aumento con el paso de los años. El calentamiento global, la disminución de reservas de petróleo y gas, la incertidumbre en el precio y sostenibilidad en el suministro de combustibles fósiles y su impacto negativo sobre el medio ambiente, están influyendo para que las organizaciones, los gobiernos y las instituciones educativas se interesen cada vez más en encontrar tecnologías para el aprovechamiento de la energía renovable, que sean eficientes, menos contaminantes y que satisfagan diferentes necesidades energéticas.

Como solución al incremento en la demanda de energía que se ha venido presentando en los últimos años, se ha planteado la generación de energía a partir de fuentes renovables como el viento, la radiación solar, corriente natural de fuentes fluviales, el calor interior de la tierra, etc. El aprovechamiento de estas fuentes de energía, junto al importante factor del mejoramiento de las condiciones del medio ambiente, son unas de las causas por las cuales la ingeniería, con tecnologías aplicables al uso de energías renovables, ha tenido un gran desarrollo durante los últimos años, los aerogeneradores, los colectores, cocinas y paneles solares son un ejemplo de ello. (Morimitsu, 2015)

En la actualidad, la energía eólica, se considera una importante fuente de energía porque es una fuente de energía limpia que no genera contaminación y no daña el medio ambiente. Las grandes turbinas o aerogeneradores, se colocan en áreas abiertas donde se puede obtener una buena cantidad de viento. Y a través del movimiento capturado por un generador, se puede generar electricidad. En la actualidad, solo el 1% de la energía

generada en el mundo proviene de este tipo de fuente de energía eólica. Sin embargo, el potencial de explotación es grande. (Anon., 2014)

Planteamiento del problema

En nuestro país existen zonas rurales en localizaciones montañosas y de difícil acceso, por lo cual el suministro de energía eléctrica se ve afectado y es sustituido por sistemas de autogeneración mediante los paneles de energía solar. Por lo que se hace necesario realizar el diseño de aerogeneradores de producción nacional para considerar la instalación de un sistema de aerogeneradores en dichas localidades.

Hipótesis

Es posible diseñar las palas de un aerogenerador de eje horizontal con materiales de bajo costo e impacto medioambiental, considerando el diseño del alabe y la selección de los materiales, con un desempeño óptimo para para las cargas y variables climatológicas presentes en Cuba, principalmente en las zonas rurales y localidades montañosas.

Justificación

Una solución viable sería la microgeneración mediante aerogeneradores de capacidad entre 10 kW y 15 kW, teniendo en cuenta que como promedio una familia de la clase media cubana consume de 5 a 12 kW. Por ello, al existir la producción de aerogeneradores de eje horizontal en el territorio nacional a bajos costos se le facilitaría a la población una instalación rentable con lo cual podrían reducir su consumo energético y depender menos de la Unión Eléctrica Nacional (UNE), fuentes alternativas y conexiones ilegales.

Objetivo General:

Proponer una metodología para la selección de los materiales de fabricación de las palas de un aerogenerador de eje horizontal para las variables y cargas climatológicas de Cuba basados en el diseño del alabe y la selección de materiales mediante el método de selección de Michel Ashby.

Objetivos Específicos:

- Estado del arte y selección de materiales de los aerogeneradores de eje horizontal.

- Analizar los materiales que se utilizan actualmente en la fabricación de aerogeneradores de eje horizontal para identificar las propiedades y debilidades mediante la investigación de la familia del material.
- Analizar las cargas a las que se someten los álabes de un aerogenerador de eje horizontal para determinar los criterios de diseño a utilizar a partir de las características del viento en Cuba.
- Establecer una metodología de selección de materiales mediante el método de Michael Ashby para los aerogeneradores de eje horizontal.
- Preseleccionar los materiales a utilizar para las palas de los aerogeneradores de eje horizontal mediante la metodología de selección de Michael Ashby, con el fin de obtener materiales y procesos de bajo costo con un impacto medioambiental despreciable.

Capítulo I: Estado del arte sobre la producción de energía eólica en Cuba y en el mundo

1.1 Introducción

Uno de los principales inconvenientes de la producción de energía eléctrica a nivel mundial, es el uso de combustibles fósiles, ya que este tipo de combustibles emiten gases nocivos como CO, CO₂, NO_x causantes de la degradación de los ecosistemas del mundo, además de provocar la destrucción progresiva de la capa de Ozono y cambios drásticos del clima por el calentamiento global del planeta.

Considerando lo anterior es necesario tener en cuenta otro tipo de tecnología para generar energía en todo el mundo. Por lo que es posible utilizar una energía natural como es la del viento, que es limpia e inagotable. (García Martínez, et al., 2008)

1.2. La energía eólica

La energía eólica es la energía cuyo origen proviene del movimiento de masa de aire, es decir, del viento. En la tierra el movimiento de las masas de aire se debe principalmente a la diferencia de presiones existentes en distintos lugares de esta, moviéndose de alta a baja presión, este tipo de viento se llama viento geostrofico.

Para la generación de energía eléctrica a partir de la energía del viento es necesario conocer el origen de los vientos en zonas más específicas del planeta, estos vientos son los llamados vientos locales, entre estos están las brisas marinas que son debida a la diferencia de temperatura entre el mar y la tierra , también están los llamados vientos de montaña que se producen por el calentamiento de las montañas y esto afecta en la densidad del aire y hace que el viento suba por la ladera de la montaña o baje por esta dependiendo si es de noche o de día. (Anon., 2014)

1.3 Los Aerogeneradores

Una turbina eólica es un sistema mecánico que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica. Ésta energía mecánica puede usarse directamente o bien ser transformada en energía eléctrica. Dentro de las turbinas eólicas existen dos grandes familias, las turbinas de eje vertical (Vertical Axis Wind Turbine, VAWTs) y las turbinas de eje horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWTs). (Ávila, 2014)

Las turbinas de eje horizontal (HAWTs) son las más comunes hoy en día. Dentro de la familia de los aerogeneradores (turbinas que generan electricidad) son las más estudiadas y constituyen la mayoría de la capacidad eléctrica instalada actualmente, estas se caracterizan por tener su rotor paralelo al piso al igual que el vector de giro.

Las turbinas de eje vertical (VAWTs) se caracterizan por tener su rotor de forma perpendicular al piso al igual que el vector de giro. Son menos conocidas y estudiadas que las turbinas de eje horizontal. A diferencia de las HAWTs no necesitan una torre de estructura poderosa ya que se pueden ubicar cerca del suelo. Su mantención es más sencilla ya que no se trabaja en altura.

1.4 Historia de los aerogeneradores

Las energías renovables se están convirtiendo en un recurso indispensable para el desarrollo mundial porque son fuentes ilimitadas de energía, y la eólica es una de las más atractivas. Los aerogeneradores han tenido un desarrollo tecnológico considerable, pero todo el crecimiento de las energías renovables ha llevado consigo un lastre común: los costos de operación y mantenimiento de los parques eólicos ya que estos se encuentran situados en zonas de difícil accesibilidad. Alejados de las poblaciones aún más si se trata de parques *offshore*; los aerogeneradores soportan condiciones climáticas extremas y muy variadas.

El viento ha sido ocupado desde siglos para impulsar barcos y mover molinos, para bombear agua y moler trigo. En el siglo XIII aparecieron los molinos y se extendieron por toda Europa, el primer aerogenerador capaz de generar corriente continua fue fabricado por Charles Bruhs en los años 1886-1887, ver Figura 1.1, tenía un rotor de 17 m de diámetro y estaba constituido por 144 palas de madera, podía generar hasta 12 kW de potencia. (Association, Danish Wind Industry, 2003)

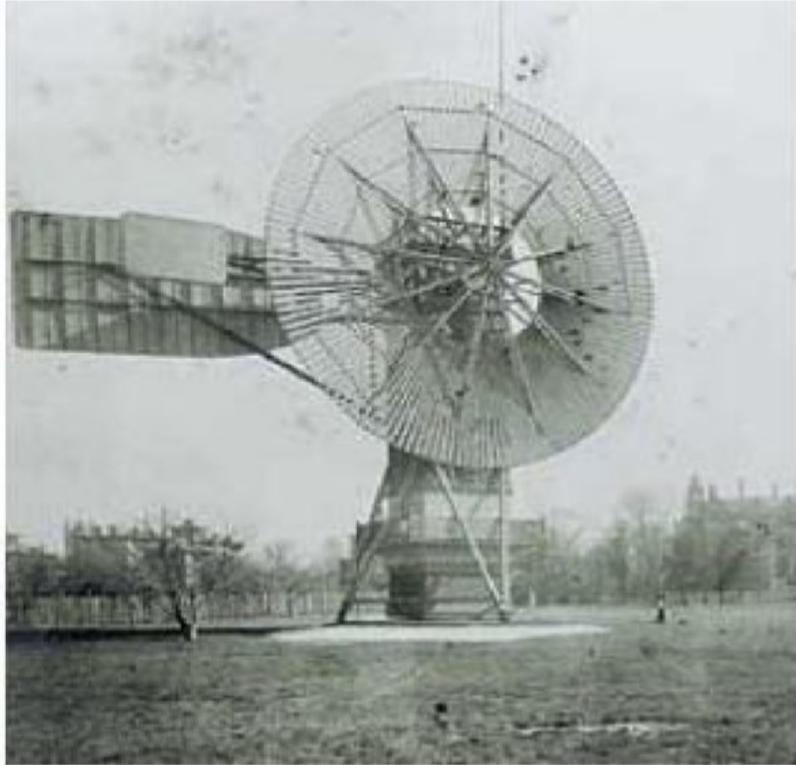


Figura 1. 1 El primer aerogenerador.

Los aerogeneradores empezaron adquirir fuerza en las guerras mundiales como consecuencia de los progresos técnicos de las hélices de aviación y con ellas los proyectos de grandes aerogeneradores de dos o tres palas.

Los aerogeneradores de eje horizontal provienen indirectamente del primer molino de viento utilizado por la civilización persa en año 600 [d.C.]. En 1941 la NASA construyó un bipala de 53 m de diámetro para una potencia máxima de 1250 kW que se instaló en Vermont, en el nordeste de EEUU. Las primeras pruebas, iniciadas en octubre de 1941, continuaron durante unos 15 meses. Vuelto a poner en marcha, el aerogenerador proporcionó energía al sector durante veintitrés días, luego se rompió una de las palas y se abandonó el proyecto. (Arteaga, 2016)

1.5 Tipos de aerogeneradores

Un aerogenerador es un generador eléctrico que funciona convirtiendo la energía cinética del viento en energía mecánica a través de una hélice y en energía eléctrica gracias a un alternador. Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina. En este caso, la energía eólica, en realidad la energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor de hélice que,

a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica. (Baldomero, 2012)

Existen diferentes tipos de aerogeneradores, dependiendo de su potencia, la disposición de su eje de rotación, el tipo de generador, etc.

Los aerogeneradores pueden trabajar de manera aislada o agrupados en parques eólicos o plantas de generación eólica, distanciados unos de otros, en función del impacto ambiental y de las turbulencias generadas por el movimiento de las palas.

Para aportar energía a la red eléctrica, los aerogeneradores deben estar dotados de un sistema de sincronización para que la frecuencia de la corriente generada se mantenga perfectamente sincronizada con la frecuencia de la red.

1.5.1 Aerogeneradores de eje horizontal

Los aerogeneradores de eje horizontal, ver Figura 1.2, son lo más utilizados y son los más comunes que se encuentran en los grandes parques eólicos donde se puede llegar a usar este tipo de aerogeneradores por encima de 1 MW de potencia. (Arteaga, 2016)



Figura 1. 2 Algunos tipos de aerogeneradores de eje horizontal.

Son máquinas rotacionales en el que el movimiento se produce por la energía cinética del viento. Con relación a los aerogeneradores de eje horizontal, se encuentran varios tipos los cuales se nombran a continuación:

1. En cuanto a la cantidad de álabes se clasifican en: (OPEXenergy Operación y Mantenimiento S.L., 2018)
 - De tres alabes (tripala): Es el más empleado en la actualidad, consta de 3 palas colocadas formando 120° entre sí. Un mayor número de palas aumenta el peso y

coste del aerogenerador, por lo que no se emplean diseños de mayor número de palas para fines comerciales en los que se utilizan como generadores de energía, aunque si para fines mecánicos como bombeo de agua, etc.



Figura 1. 3 Aerogenerador tripala.

- De doble alabe (bipala): Ahorra 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. Para evitar el efecto desestabilizador necesitan de un diseño mucho más complejo, con un rotor basculante (bujes oscilante), es decir, el rotor tiene que ser capaz de inclinarse, con el fin de evitar fuertes sacudidas en la turbina cada vez que una de las palas pasa por la torre. Así pues, el rotor está montado en el extremo de un eje perpendicular al eje principal, y que gira junto con el eje principal. Esta disposición puede necesitar de amortiguadores adicionales que eviten que las palas del rotor choquen contra la torre.



Figura 1. 4 Aerogenerador bipala.

- De un solo alabe (monopala): Tienen, en mayor medida, los mismos inconvenientes que los bipala, necesitan un contrapeso en el lado opuesto de la pala, por lo que el ahorro en peso no es tan significativo. Además, introducen en el eje esfuerzos muy variables que acortan la vida útil de la instalación.



Figura 1. 5 Aerogenerador monopala.

- De alabes múltiples (multipalas): Mayormente se utilizan en labores domésticas y agrícolas con un número impar de palas, debido a su complejidad de diseño. Los ingenieros de modernos aerogeneradores evitan construir grandes máquinas con

un número par de palas. La razón más importante es la estabilidad de la turbina. Un rotor con un número impar de palas (y como mínimo tres palas) puede ser considerado como un disco a la hora de calcular las propiedades dinámicas de la máquina. Un rotor con un número par de palas puede dar problemas de estabilidad en una máquina que tenga una estructura rígida. Uno de los mayores ejemplos de este tipo son los molinos de viento de granja de los Estados Unidos, también llamado modelo americano.



Figura 1. 6 Aerogenerador multipala.

2. Por la posición del equipo respecto al viento se clasifican en: (Leal Rubio, et al., 2014)
 - Orientados a barlovento: Cuando el rotor se encuentra enfocado de frente a la dirección del viento dominante, consigue un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento, pero necesita un mecanismo de orientación hacia el viento. La principal ventaja de estos diseños es que se evita el abrigo del viento detrás de la torre. Por otro lado, también se produce abrigo en el frente de la torre, es decir, el viento empieza a desviarse de la torre antes de alcanzarla, incluso si la torre es redonda y lisa. Así pues, cada vez que el rotor pasa por la torre la potencia del aerogenerador cae ligeramente. Es el caso inmensamente preferido para el diseño actual de aerogeneradores. Su principal inconveniente es que el rotor necesita ser bastante inflexible y estar situado a una cierta distancia de la torre.

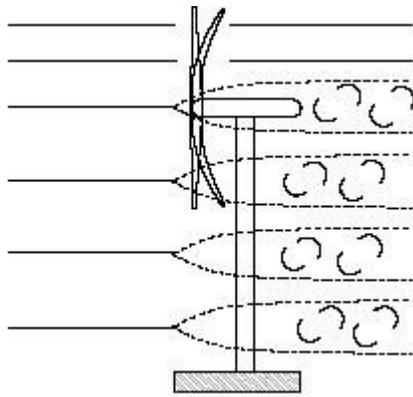


Figura 1. 7 Orientación a barlovento de un aerogenerador.

- Orientados a sotavento: Cuando el rotor se encuentra enfocado en sentido contrario a la dirección del viento dominante, la estructura de la torre y la góndola disminuye el aprovechamiento del viento por el rotor, en este caso el viento es el que orienta con su propia fuerza a la góndola, por lo que no son necesarios elementos de reorientación automatizada en la teoría, aunque si suelen utilizarse como elemento de seguridad. Las palas y la góndola son construidos con una mayor flexibilidad en este caso, esto supone una ventaja tanto en cuestión de peso como de dinámica de potencia de la máquina, es decir, las palas se curvarán a altas velocidades del viento con lo que quitarán parte de la carga a la torre. El principal inconveniente es la fluctuación de la potencia eólica, debido al paso del rotor a través del abrigo de la torre, lo que puede crear más cargas de fatiga.

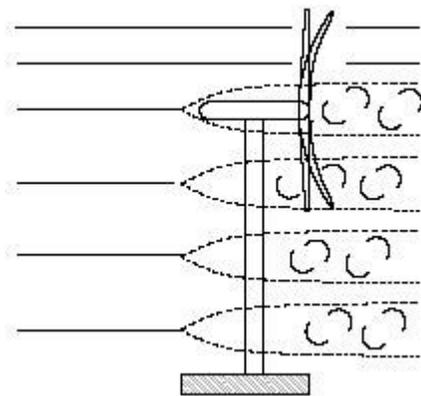


Figura 1. 8 Orientación a sotavento de un aerogenerador.

3. De acuerdo a su velocidad de giro son clasificados en: (Cuesta Santianes, et al., 2008)

- Aerogeneradores lentos: En general, están constituidos por un número alto de palas, multipalas, que cubren casi toda la superficie del rotor. Poseen un elevado par de arranque, gracias al cual pueden ponerse en marcha incluso con velocidades de viento muy bajas. Su baja velocidad de rotación hace que sean poco útiles para la producción de electricidad, siendo su uso más frecuente para el bombeo de agua.
- Aerogeneradores rápidos: Presentan un par de arranque pequeño y requieren velocidades de viento del orden de 4 a 5 m/s para su puesta en marcha. La mayoría poseen tres palas y se utilizan para la producción de electricidad, a través de su acoplamiento con un alternador. Su gama de potencias es muy amplia.
- Aerogeneradores de velocidad intermedia: Tienen entre 3 y 6 palas y sus prestaciones están comprendidas entre las correspondientes a los dos casos anteriores. Se utilizan cuando las condiciones de viento no son muy favorables y en general son de pequeña potencia. Su aplicación principal es en equipos autónomos para producción de electricidad.

1.5.2 Aerogeneradores de eje vertical

Los aerogeneradores de eje vertical tienen una ventaja con respecto a los de eje horizontal la cual les permite adaptarse a cualquier dirección del viento. Estos aerogeneradores operan con vientos de baja velocidad en el cual no superan 200 rpm. Otra característica de los aerogeneradores de eje vertical es que son mucho más fáciles de reparar ya que todos los elementos de transformación de la energía del viento se encuentran a nivel del suelo. Algunos tipos de aerogenerador de eje vertical son: (Baldomero, 2012)

- Savonius
- Savonius de alabes múltiples
- De copa
- Darrieus
- Deflector
- Giromill
- Winside
- WM

- Lenz II

Su eje de rotación es perpendicular a la dirección del viento. Actualmente existen varios diseños (Cuesta Santianes, et al., 2008), que son:

- Darrieus: patentadas por G. Darrieus el año 1931 y desarrolladas luego por el Laboratorio Sandia en los años 70. Están formados por dos o tres palas de forma ovalada de perfil aerodinámico y tienen características parecidas a las de eje horizontal como se puede observar en la Figura 1.9, presentando un par de arranque muy pequeño. Los laboratorios Sandia construyó en 1974 un primer prototipo de 5 m de diámetro Su potencia es pequeña y aunque su aplicación es similar a los aerogeneradores rápidos de eje horizontal, están poco implantados. Es el modelo de los aerogeneradores de eje vertical de más éxito comercial. Permite mayores velocidades que las del rotor Savonius, pero no alcanza a las de un rotor de eje horizontal.



Figura 1. 9 Aerogenerador Darrieus.

- Savonius: patentada por el finlandés Sigurd Savonius en 1922. Su principal ventaja consiste en trabajar con velocidades de viento muy bajas. Se compone de dos semicilindros de igual diámetro situados paralelamente al eje vertical de giro, en el diseño original estaban separados una pequeña distancia el uno del otro, ver Figura 1.10. La fuerza que el viento ejerce en las caras de los cilindros (cara cóncava y cara convexa) es distinta, por lo que las hace girar alrededor del eje.

Este sistema presenta buenas características aerodinámicas para el autoarranque y la autorregulación. Su campo de aplicación está en la producción autónoma de electricidad o el bombeo de agua.

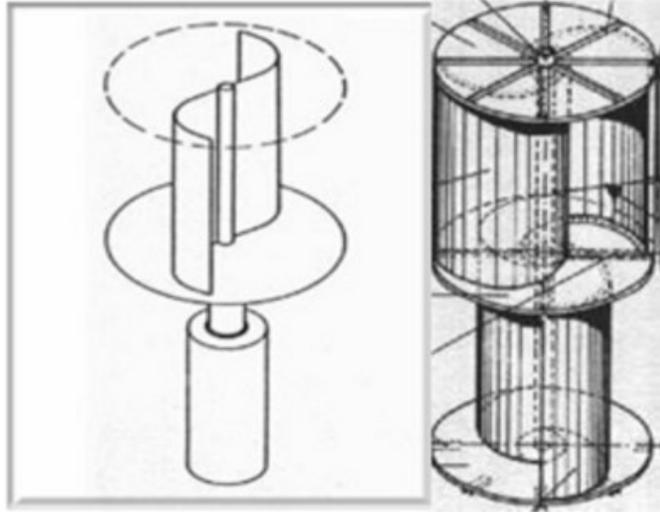


Figura 1. 10 Aerogenerador Savonius.

- Sistema híbrido: Es una combinación entre un modelo Savonius y un Darrieus, ver Figura 1.11. El aerogenerador Darrieus arranca con velocidades más altas que el Savonius; debido a ello se puede hacer una combinación sobre un mismo eje de ambas máquinas, de forma que el Savonius actúe durante el arranque y el Darrieus sea el que genere la energía para mayores velocidades del viento.



Figura 1. 11 Aerogenerador híbrido.

- Giromill: este tipo de generadores también fueron patentados por G. J. M. Darrieus. Consisten en palas verticales unidas al eje por unos brazos horizontales, que pueden salir por los extremos del aspa e incluso desde su parte central. Una variante del Giromill es la “*Cycloturbine*”, con palas verticales que cambian su orientación a medida que se produce el giro del rotor para un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento, como se puede observar en la Figura 1.12. A diferencia del Darrieus original este si puede comenzar a girar por sí mismo.

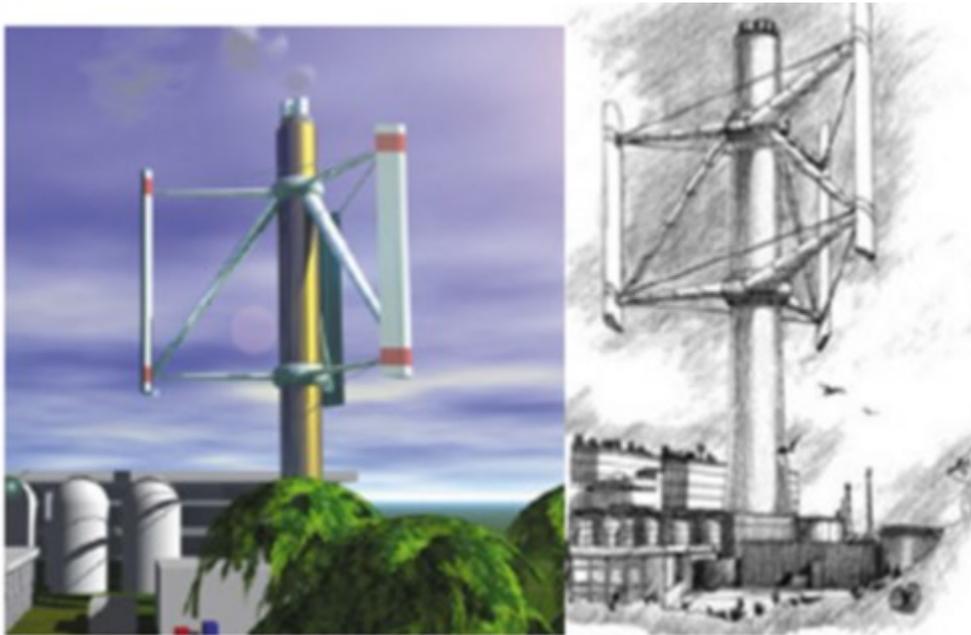


Figura 1. 12 Aerogenerador Giromill.

- Windside: este novedoso aerogenerador de eje vertical es un prototipo concebido por la empresa finlandesa Windside, tiene la particularidad de producir energía con velocidades del viento de 1.5 m/s y soportar velocidades de hasta 60 m/s. Es un sistema similar al rotor Savonius, en la figura 1.13 se puede observar que, en vez de la estructura cilíndrica para aprovechamiento del viento, consiste en un perfil alabeado con torsión que asciende por el eje vertical. La principal diferencia frente a otros sistemas de eje vertical es el aprovechamiento del concepto aerodinámico, que le acerca a las eficiencias de los aerogeneradores de eje horizontal.



Figura 1. 13 Aerogenerador Windside.

- WM (palas abatibles): consiste en un molino provisto de brazos giratorios alrededor de un eje de giro con la particularidad de que a dichos brazos se unen articuladamente unas palas abatibles, ver Figura 1.14. Las palas abatibles ofrecen la máxima resistencia al viento cuando se sitúan en la zona de avance de giro y prácticamente nula resistencia al viento cuando están en la zona de retorno del generador.



Figura 1. 14 Aerogenerador WM.

- El aerogenerador Lenz II: es uno de los mejores aerogeneradores de ejes vertical pues utiliza una combinación de arrastre y sustentación debido al viento para producir energía. Además, tiene un excelente torque y eficiencia inicial. El Lenz II fue diseñado por Ed Lenz en 2005, quien lo construyó basándose en su propia investigación sobre aerogeneradores de ejes vertical. Gracias a su diseño, el Lenz II saca el máximo de las corrientes de aire aprovechando las sobrepresiones ocasionadas por el viento, lo que le permite entregar una mayor potencia en el tiempo. El diseño comercial a evaluar es más eficiente en ráfagas de 6 a 20 mph (2.68 - 8.94 m/s), por lo que es ideal para colocarlo en áreas relativamente de bajo viento. La instalación del aerogenerador conlleva un costo de unos US\$ 300.00 y un tiempo de ensamble e instalación de 3 días, ver Figura 1.15.



Figura 1. 15 Aerogenerador Lenz II.

1.6 Comparación entre tipos de aerogeneradores

Actualmente existen muchos tipos de aerogeneradores, el diseño de cada uno de ellos se basa principalmente en las características del viento de la zona donde serán instalados. Para elegir el tipo de aerogenerador a implementar o diseñar, se deben tener en cuenta las ventajas principales que presentan unos sobre otros. A continuación, se exponen algunas de las ventajas de las turbinas eólicas de eje horizontal frente a las de eje vertical y viceversa.

1.6.1 Ventajas de los aerogeneradores de eje vertical frente a los de eje horizontal

Las siguientes son consideradas las principales ventajas de los aerogeneradores de eje vertical frente a los de eje horizontal según (Carta González, et al., 2009) y (Díez, 1993):

- No necesitan sistemas de orientación.
- Los elementos que requieren un cierto mantenimiento pueden ir situados a nivel del suelo.
- Pueden ser instalados en lugares donde las velocidades de viento sean bajas.
- Su fabricación presenta bajo costo.

1.6.2 Ventajas de los aerogeneradores de eje horizontal frente a los de eje vertical

Las siguientes son las principales ventajas que presentan los aerogeneradores de eje horizontal frente a los de eje vertical, mencionadas por (Díez, 1993) y (López, 2013):

- Tienen un mayor rendimiento.
- Presentan mayores velocidades de giro (multiplicadores más sencillos).
- Menor superficie de pala a igualdad de área barrida.
- Se pueden instalar a mayor altura, donde la velocidad del viento es más intensa.

1.7 Principales componentes de los aerogeneradores

La energía cinética del aire se convierte en energía de rotación (del rotor) y, por tanto, en energía mecánica. Normalmente, las turbinas eólicas disponen de un sistema de transmisión mecánica con el propósito de incrementar el número de revoluciones del rotor hasta el número de revoluciones del generador eléctrico. Posteriormente, la energía mecánica es transformada en energía eléctrica mediante un generador eléctrico. De forma general pueden señalarse los siguientes subsistemas componentes según lo expuesto por (Carta González, et al., 2009):

1.7.1 Subsistema de captación

Es el encargado de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación. Está integrado por el rotor, el cual se compone principalmente de los álabes, las tapas y el árbol.

Los componentes más importantes del rotor son los álabes. Ellos son los dispositivos que convierten la fuerza del viento en el par necesario para generar potencia útil. La forma

básica y dimensiones de los álabes vienen dadas inicialmente por la aerodinámica y el diseño global de la turbina.

El álabe es una parte vital del generador eólico; la dependencia del rendimiento de la máquina, de su comportamiento aerodinámico y estructural ha convertido al diseño de álabes en un tópico de investigación importante. Para máquinas de gran escala, los materiales compuestos son utilizados casi exclusivamente; sus características de fatiga superiores, su baja relación peso - rigidez y la posibilidad de fabricar geometrías complejas son algunas de las razones que justifican dicha tendencia.

El cálculo computacional de las propiedades estructurales del álabe requiere no solo la utilización de técnicas computacionales avanzadas sino también nuevos desarrollos teóricos. La complejidad del mapeo de materiales y de la forma seccional del álabe hace difícil la tarea.

1.7.2 Subsistema de transmisión mecánica

Está compuesto por todas las partes en rotación de la turbina. Éstas incluyen un árbol de baja velocidad (en el lado del rotor), acoplamientos, caja multiplicadora de engranajes, y un árbol de alta velocidad (en el lado del generador).

Toda turbina tiene un árbol principal, algunas veces denominado árbol de baja velocidad o árbol del rotor. El árbol principal transfiere el par torsor desde el rotor al resto del tren de potencia. Los acoplamientos tienen como función conectar los árboles. El multiplicador tiene como función adaptar la baja velocidad de rotación del eje del rotor a las mayores velocidades de operación del generador eléctrico.

1.7.3 Subsistema de generación eléctrica

El sistema eléctrico de un aerogenerador incluye todos los dispositivos que intervienen en el proceso de conversión de la energía mecánica en energía eléctrica. El generador es el dispositivo más importante de este subsistema.

Generador eléctrico: Conceptualmente, un generador eléctrico es un sistema que convierte la energía mecánica (rotación de un eje a una cierta velocidad y con un cierto par) en energía eléctrica (que se transmite por un circuito eléctrico). (Figura 1.16)

Los generadores eléctricos se pueden clasificar básicamente en generadores de corriente continua (CC) y de corriente alterna (CA).

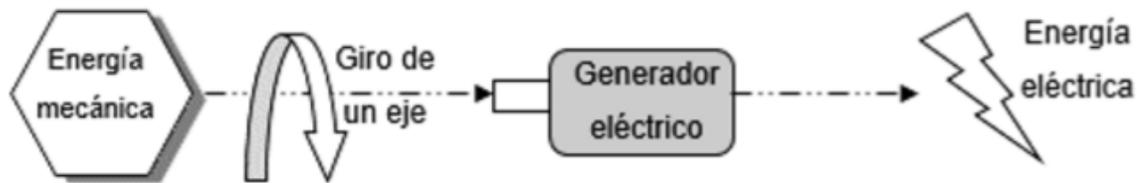


Figura 1. 16 Esquema conceptual de un generador eléctrico.

1.7.4 Subsistema de regulación y control

Para generar potencia de forma óptima los subsistemas de las turbinas necesitan de un subsistema de control que enlace la operación de todos ellos.

Aunque los detalles de los sistemas de control varían significativamente de una turbina a otra, todos los aerogeneradores tienen un propósito común: convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica. Este objetivo central establece los elementos comunes que es necesario considerar en el diseño o selección de cualquier sistema de control.

1.7.5 Subsistema de soporte

El subsistema está constituido por la torre o estructura de soporte. El cuál es el elemento encargado de elevar el rotor de la máquina respecto del nivel del suelo. Las dimensiones de la estructura están condicionadas por el diámetro del rotor del subsistema de captación y la altura, su material será establecido por el costo y comercialización, así mismo, para su diseño se tienen en cuenta parámetros como estabilidad y resistencia. Puede ser maciza o hueca, tubular o de celosía, metálica o de hormigón.

1.7.6 Subsistema de almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía persigue un objetivo principal: conseguir que la generación de electricidad no tenga que producirse en el mismo momento en que la demandan los consumidores. De este modo, es posible recuperar la energía generada y almacenarla para ser utilizada luego. Para tal fin, se usan baterías capaces de almacenar la energía producida por el sistema eólico.

1.7.7 Partes específicas de un aerogenerador de eje horizontal

1. Cimientos
2. Conexión a la red
3. Torre
4. Escalera de acceso
5. Sistema de orientación
6. Góndola
7. Generador
8. Anemómetro
9. Freno
10. Caja de cambios
11. Pala o alabe
12. Acople del alabe
13. Rueda del rotor o hub

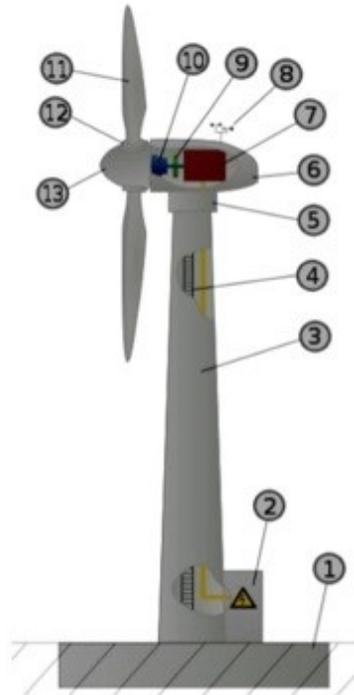


Figura 1. 17 Partes específicas de un aerogenerador de eje horizontal.

1.7.8 Partes específicas de un aerogenerador de eje vertical

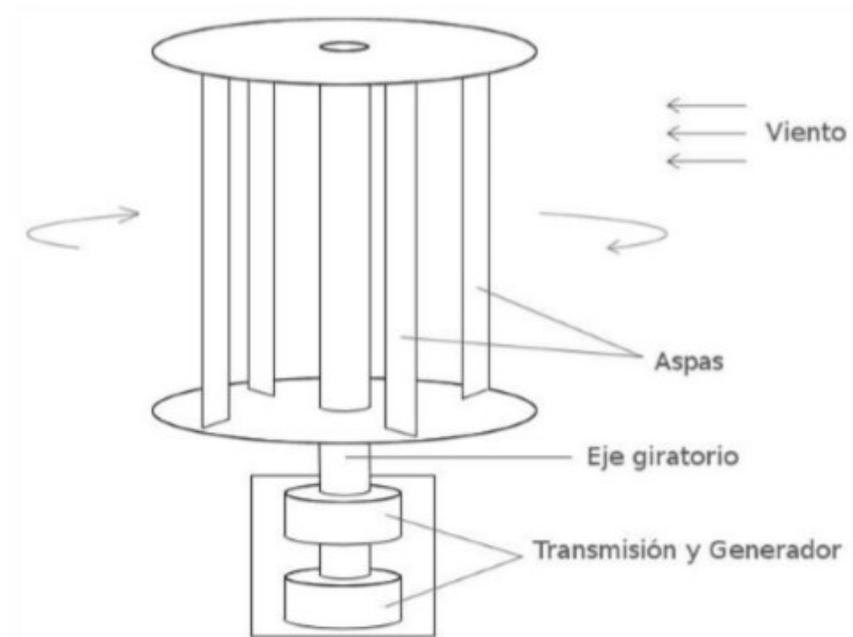


Figura 1. 18 Partes específicas de un aerogenerador de eje vertical.

1.8 Preselección de los materiales de los alabes de los aerogeneradores

De acuerdo a (Conde, 2012), los primeros materiales que se utilizaron en palas de aerogeneradores, por sus antecedentes aeronáuticos, son:

- El Acero que es una aleación de hierro y carbono entre 0.02 y 2.11 %, a mayor contenido de carbono se incrementa la resistencia y dureza, pero disminuye la ductilidad. Tiene buena resistencia a la fatiga y tenacidad; no obstante, posee una elevada densidad y su deformabilidad es desfavorable al momento de trabajarlo.
- El Aluminio que es un material maleable y ligero, el segundo metal más abundante sobre la tierra. Posee una vida útil larga gracias a su gran resistencia a la corrosión y es 100 % reciclable, pero posee una baja resistencia a la fatiga.
- La Madera que es un material anisotrópico con baja densidad, facilidad de mecanizado, buen comportamiento a la fatiga y bajo costo. Sin embargo, puede presentar irregularidades que conduzcan a fisuras, su duración es relativamente corta y también su resistencia disminuye al absorber agua del medio ambiente. Hoy en día se utiliza la madera junto con resina epóxica.
- La Fibra de Carbono que es un material polimérico con alta rigidez, resistencia mecánica y módulo de elasticidad. Su rigidez es comparable a las estructuras de acero además posee buena resistencia a la fatiga y poca corrosión. Tiene un costo elevado, así como también los costos de producción son altos, por lo que suele utilizarse en combinación con la fibra de vidrio.
- La Fibra de Aramida (Kevlar) que es un nilón obtenido de reactivos aromáticos. Tiene buenas propiedades mecánicas, comparables a la de carbono; proporciona rigidez y no se corroe en agua salada.
- La Fibra de Vidrio que es el material más aplicado en la fabricación de palas de pequeña, mediana y de gran potencia. Posee propiedades mecánicas extraordinariamente buenas, aunque su módulo de elasticidad es muy alto y su manufactura es algo complicada porque carece de automatización.

El acero comercial es el más barato de los metales estructurales, el cual posee buena resistencia mecánica, pero se corroe fácilmente y presenta problemas de peso. Las aleaciones de aluminio son ligeras, pueden ser resistentes, son fáciles de trabajar y poseen muy buena resistencia a la corrosión. Las aleaciones de aluminio de alta resistencia se basan en el endurecimiento por envejecimiento, llegando a obtener un

cociente de resistencia - peso superior al correspondiente del más fuerte de los aceros. Sin embargo, las aleaciones de aluminio, aunque tienen una densidad menor que los aceros, presentan problemas de fatiga. (Granta CES EduPack, 2013)

Los polímeros reforzados (poliéster, epoxi) tienen una excelente resistencia al agua y a los rayos ultravioletas, pero suelen tener un costo más elevado, y dicho costo aumenta al utilizar fibras (carbono, kevlar) que les proporcionan mayor resistencia mecánica a los componentes. El vidrio ofrece alta resistencia a bajo coste. El carbono tiene muy alta resistencia, rigidez y baja densidad. El kevlar aporta alta resistencia y baja densidad, es ignífugo y transparente para las ondas de radio (a diferencia del carbono). Las matrices más ampliamente utilizadas son las de poliéster, ya que ofrecen propiedades razonables a un costo relativamente bajo. Las resinas epoxi tienen propiedades superiores, y el rendimiento en temperatura de las poliamidas puede justificar su uso en determinadas aplicaciones, pero son caras. (Granta CES EduPack, 2013)

En los anexos se muestran las propiedades de los principales materiales utilizado en el conformado de los álabes de los aerogeneradores de eje horizontal.

1.9 Descripción geométrica del álabe

La forma seccional del alabe es impuesta por el diseño aerodinámico, perfiles alares y longitudes de cuerda que la restringen. Las cargas de inercia y aerodinámicas restringen el diseño estructural del alabe, el cual se enfoca principalmente en la definición de la posición y número de "*shear webs* //", la definición de la secuencia de laminado y la distribución de materiales. El pandeo local y la fatiga son cuestiones esenciales del diseño estructural. Un enfoque moderno para la determinación de las propiedades seccionales de un álabe debe contener necesariamente desarrollos teóricos y procedimientos computacionales concebidos para modelar alabes realísticos. La naturaleza no lineal del ambiente aeroelástico en el que trabaja el álabe hace difícil predecir el impacto de las simplificaciones geométricas y de materiales sobre la precisión de la formulación. Un modelo realístico basado en la teoría de vigas de pared delgada debería ser capaz de predecir de forma precisa la dinámica tridimensional del álabe, así como también obtener una distribución de tensiones razonable. Este requerimiento implica necesariamente una buena predicción de las propiedades seccionales del álabe. La distribución de materiales

de un álabe moderno es compleja, desde la superficie externa a la superficie interna, el mapeo de materiales incluye: (Martín Saravia, et al., 2014)

- “*Gelcoat*”: un recubrimiento para mejorar las propiedades aerodinámicas del álabe.
- “*Nexus*”: una capa absorbente de material para mejorar la adhesión del recubrimiento de “*gelcoat*”.
- “*Double-bias composite*”: capas unidireccionales de fibra de vidrio, fibra de carbono, kevlar, etc., orientadas a 45° para mejorar la rigidez torsional.
- “*Core Material*”: material muy liviano usado como relleno para mejorar la inercia local y evitar el pandeo.
- “*Unidirectional ply*”: material compuesto con alta rigidez axial para incrementar la rigidez flexional del álabe.

Ya se ha dicho que el diseño estructural del álabe comienza luego de la definición inicial de la superficie exterior de la sección transversal, la idea del enfoque aquí presentado es utilizar esa definición como único dato de entrada. Para ello, el perfil alar se divide en segmentos de longitud arbitraria, generando así una malla unidimensional de tramos rectos. A cada tramo se le asignan luego las propiedades de material y la secuencia de laminado correspondientes. La Figura 1.19 muestra una malla de segmentos típica. (Martín Saravia, et al., 2014)

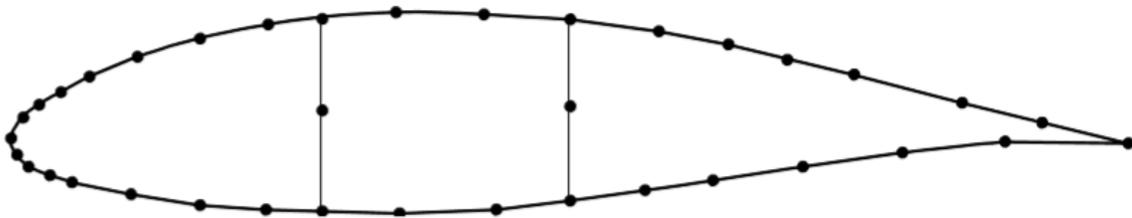


Figura 1. 19 Malla unidimensional de una sección transversal de un álabe típico.

Las palas de los aerogeneradores de eje horizontal, se pueden separar en dos partes fundamentales: el soporte y la cubierta. (Ashby, 2011)

- El soporte es la estructura básica de la pala y va unido al eje de rotación de la máquina, se encarga de transmitir la energía recibida por la cubierta al eje. El soporte suele ser de un acero bajo en carbono (AISI 1117, AISI 1118, AISI 1020, AISI 1022, AISI 1015, AISI 1025) o aluminio (6063).

- La cubierta es la parte cuya superficie recibe la incidencia del viento, siendo arrastrado por el mismo, y va unida al soporte, se encarga de transmitir la energía del viento al soporte. La cubierta suele ser de un polímero reforzado con fibra (fibra de vidrio) o plástico (polipropileno o polietileno). Otros diseños fabrican el conjunto de palas, soporte y cubierta, totalmente de un polímero reforzado con fibra.

Para estudiar la aerodinámica de los álabes o perfiles alares es necesario estudiar las alas de los aviones. Esto es porque la mayoría de los aerogeneradores de eje horizontal utilizan estos tipos de perfiles para obtener la fuerza resultante total (sustentación más arrastre) y generar el giro.

En aeronáutica se denomina perfil alar, perfil aerodinámico o simplemente perfil, a la forma del área transversal de un elemento, que al desplazarse a través del aire es capaz de crear a su alrededor una distribución de presiones, como se muestra a continuación en la Figura 1.20.

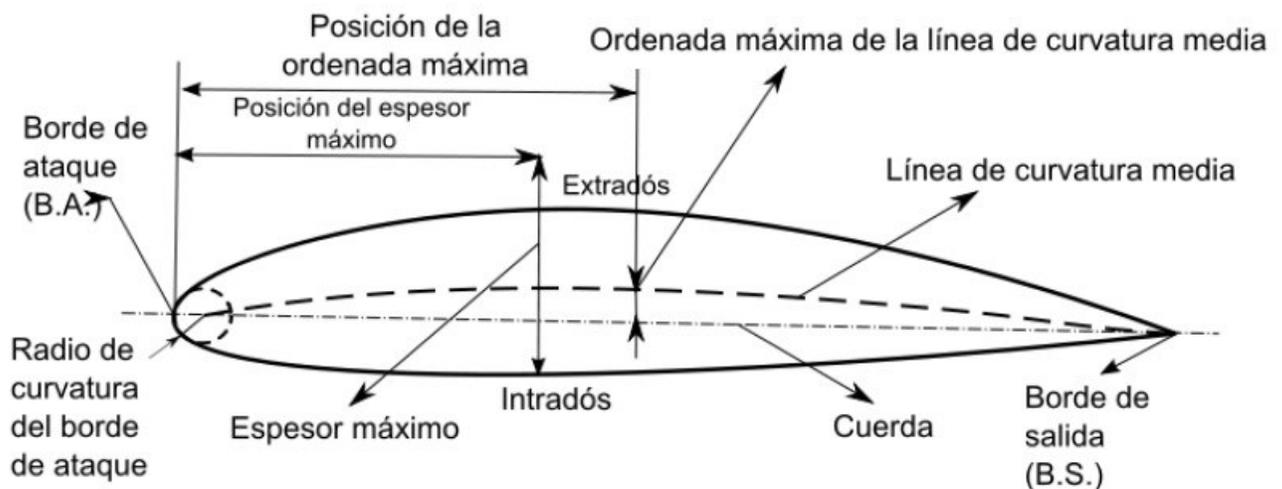


Figura 1. 20 Sección transversal de un perfil alar.

Algunas partes de este perfil alar se definen a continuación: (Ávila, 2014)

- Borde de ataque (“*leading edge*”): Es la parte delantera del perfil alar. Se le denomina borde de ataque ya que es la primera parte que toma contacto con la corriente de aire, provocando que esta se bifurque hacia el intradós y el extradós.
- Borde de salida (“*trailing edge*”): Llamado también borde de fuga. Corresponde al punto en el que las corrientes de aire provenientes del intradós y extradós

confluyen y abandonan el perfil. Aunque en la mayoría de los gráficos se le trace de forma aguda, no siempre suele ser así, teniendo en algunos casos una terminación cuadrada.

- Intradós (“*lower Surface*”): Término genérico que denota la parte interior de una estructura. En un perfil de superficies corresponde a la parte inferior del mismo.
- Extradós (“*upper Surface*”): Llamado también “trasdós”, es un término genérico que denota la parte exterior de una estructura. En un perfil de superficies corresponde a la parte exterior del mismo.
- Región de curvatura máxima: Área de un perfil de superficies comprendida entre la abscisa (eje X) del punto de inicio del borde de ataque y la abscisa de la curvatura máxima.
- Región de espesor máximo: Área de un perfil de superficies comprendida entre la abscisa del punto de inicio del borde de ataque y la abscisa del espesor máximo.

1.10 Parámetros geométricos del alabe

Las características geométricas de un perfil tienen un gran impacto en sus características aerodinámicas. Estas se pueden listar como sigue: (Ávila, 2014) y (Wikipedia, 2017)

1. Radio del borde de ataque: Define la forma del borde de ataque y es un valor que influye de forma importante en la pérdida. Geométricamente corresponde al radio de un círculo trazado de la siguiente forma:
 - Debe ser tangente tanto al intradós como al extradós
 - Su centro debe estar ubicado en una tangente al origen de la línea de curvatura media
 - Su longitud se mide en % del valor de la cuerda, oscilando entre valores:
 - Muy pequeños (próximos a 0): Genera un borde de ataque bastante agudo (afilado), que puede causar desprendimiento temprano de la capa límite. Ideal para vuelo supersónico.
 - 2 % de la cuerda: Genera un borde de ataque más obtuso (achatado).
2. Cuerda (“*chord*”): Corresponde a la línea recta que une el borde de ataque y el borde de salida. Su valor es una característica particular de cualquier perfil. Si se desconoce se puede estimar como el 6 % de la longitud del álabe (radio r).

3. Línea de curvatura media ("*mean camber line*"): Es una línea equidistante entre el extradós y el intradós. Define la curvatura del perfil de la siguiente manera:
 - Si esta cae por encima de la cuerda (como se muestra en la Figura 1.20), se dice que el perfil posee curvatura positiva.
 - Si esta cae por debajo de la cuerda, se dice que el perfil posee curvatura negativa.
 - Si esta cae por encima y también por debajo de la cuerda, se dice que el perfil posee una doble curvatura.
4. Curvatura máxima ("*maximum camber*"): Corresponde a la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la cuerda. El valor de su ordenada y la posición de esta se expresa por lo general en % de la longitud de la cuerda. Un valor típico es 4% de la cuerda.
5. Espesor ("*thickness*"): El espesor es un segmento trazado desde un punto referencial del perfil. Existen dos maneras de expresar este concepto, de estas dos formas resultan dos segmentos de longitudes distintas:
 - Convención americana: El espesor es trazado de forma perpendicular a la línea de curvatura media.
 - Convención británica: El espesor es trazado de forma perpendicular a la línea de la cuerda.
6. Espesor máximo ("*maximum thickness*"): Corresponde a la longitud máxima posible del espesor de un perfil de superficies. El valor de su ordenada y abscisa como valor de posición, se expresa por lo general en % de la longitud de la cuerda, oscilando entre los siguientes valores:
 - Ordenada igual a 3 % de la cuerda, para perfiles muy delgados (vuelo supersónico).
 - Valores típicos: Ordenada igual a 12 % y abscisa igual a 30 % de la cuerda.
 - Ordenada igual a 18 % de la cuerda, para perfiles gruesos (vuelo a baja velocidad).

1.11 Aspectos sociales y medioambientales en nuestro país

El sector de la energía en Cuba ha sido tradicionalmente, y todavía lo es, un cuello de botella para el crecimiento económico del país. Una prolongada crisis eléctrica e ineficaces medidas correctivas han llevado a un círculo vicioso de apagones habituales,

altos costos operativos de la Empresa Eléctrica Nacional, grandes pérdidas (incluyendo robo de electricidad a través de conexiones ilegales), elevadas tarifas minoristas para cubrir estas ineficiencias, bajas tasas de cobro, una significativa carga fiscal para el gobierno a través de subsidios directos e indirectos. La mayor parte de la generación de electricidad proviene de fuentes fósiles.

La energía eólica presenta grandes ventajas de acuerdo con las normas de seguridad ambiental y protección del medio ambiente según (Wikipedia, 2017):

- Es una energía limpia al no requerir una combustión, por lo que no produce emisiones atmosféricas ni residuos contaminantes, evitando así un incremento del efecto invernadero y el cambio climático.
- Puede instalarse en espacios no aptos para otros fines, por ejemplo, en zonas desérticas, próximas a la costa, en laderas áridas o muy empinadas para ser cultivables.
- Puede convivir con otros usos del suelo, por ejemplo: prados para uso ganadero o cultivos bajos como trigo, maíz, papas, entre otros.
- Su inclusión en una red eléctrica permite, cuando las condiciones del viento son adecuadas, ahorrar combustible en las centrales termoeléctricas y agua en los embalses de las centrales hidroeléctricas.

Conclusiones Parciales

- Dentro de las turbinas eólicas existen dos grandes familias, uno de eje vertical (VAWTs) y uno de eje Horizontal (HAWTs). Los aerogeneradores de eje vertical tienen una gran ventaja con respecto a los de eje horizontal la cual les permite adaptarse a cualquier dirección del viento.
- Los materiales más utilizados en palas de aerogeneradores, por sus antecedentes aeronáuticos, son: acero, aluminio, madera, fibra de carbono, fibra de aramida (kevlar) y fibra de vidrio.
- El acero comercial es el más barato de los metales estructurales, posee buena resistencia mecánica, pero se corroe fácilmente y presenta problemas de peso. Las aleaciones de aluminio son ligeras, pueden ser resistentes, son fáciles de trabajar y poseen muy buena resistencia a la corrosión.
- Los polímeros reforzados (poliéster, epoxi) tienen una excelente resistencia al agua y a los rayos ultravioletas, pero suelen tener un costo más elevado, y dicho costo aumenta al utilizar fibras (carbono, kevlar) que le proporcionan mayor resistencia mecánica.

Capítulo II: Método de cálculo de los aspectos fundamentales de un aerogenerador y dimensionamiento del álabe

2.1 Introducción

El viento constituye uno de los elementos fundamentales en el campo del conocimiento atmosférico, permite identificar el estado dinámico del aire y se reconoce como el aire en movimiento. El peso del aire sobre un objeto ejerce una fuerza por unidad de área en el mismo, esta fuerza es conocida como la presión. Las variaciones en la presión llevan a que se desarrollen los vientos (UPME, 2006).

La velocidad del viento, v , es una magnitud vectorial. Aunque el vector de la velocidad tiene tres componentes, en aplicaciones de energía eólica solo se consideran las componentes en el plano horizontal (plano paralelo a la superficie terrestre). La velocidad del viento se caracteriza por el módulo de la componente de la velocidad en el plano horizontal y su dirección (López, 2013).

2.2 Ley de Betz

De todo el potencial de energía del viento, solo será posible extraer una parte, ya que, si le quitáramos toda esa energía cinética al aire, detrás de la turbina éste estaría quieto. El límite de extracción teórico máximo fue calculado por Albert Betz (1885-1968), físico alemán que participó en la elaboración de las bases teóricas de los modernos aerogeneradores, quién publicó en 1919 una teoría, conocida como Ley de Betz. Según esta ley no puede convertirse más del 16/27 (el 59.3 %) de la energía cinética del viento en energía mecánica mediante una turbina eólica (Díez, 1993).

Por ello, las turbinas reales podrán extraer una energía inferior a la planteada por Betz; el cociente entre la potencia extraída y la potencia total del fluido, se denomina coeficiente de potencia del aerogenerador (C_p), el cual será, siempre inferior a 0.593 que es el coeficiente de Betz.

Lo que significa, según la ecuación 2.1, que:

$$P_{\text{máx}} = 0.593 * P_w \quad (2.1)$$

Donde P_w es la potencia eólica disponible a través de una superficie de sección A , perpendicular al flujo de viento, v , viene dada por el flujo de la energía cinética por unidad de tiempo.

2.3 Variación del viento

Para la industria eólica es muy importante ser capaz de describir la variación de la velocidad del viento. Esto es así ya que los proyectistas necesitan la información para optimizar el diseño de los aerogeneradores y poder minimizar sus costes. Un modelo utilizado para describir la variación del viento en un emplazamiento dado es la Distribución de Weibull.

El gráfico de la Figura 2.1 muestra una distribución de probabilidad. El área bajo la curva siempre vale exactamente 1, ya que la probabilidad de que el viento sople a cualquiera de las velocidades, incluyendo el cero, debe ser del 100 %. La Distribución de Weibull indica que la probabilidad de que sople el viento a bajas velocidades es más alta que en el caso de que sople a altas velocidades; si mide las velocidades del viento a lo largo de un año se puede observar que en la mayoría de áreas los fuertes vendavales son raros, mientras que los vientos frescos y moderados son bastante comunes.

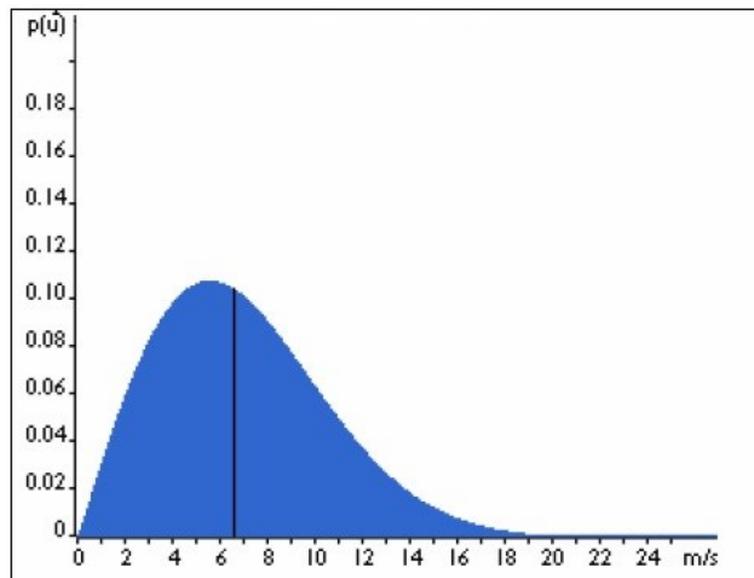


Figura 2. 1 Distribución de Weibull.

La Distribución de Weibull tiene la siguiente expresión:

- Función de densidad de probabilidad:

$$f(v) = \frac{k}{c} * \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.2)$$

- Función de distribución:

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.3)$$

Donde **c** es el factor de escala, **k** es el factor de forma y **v** es la velocidad del viento

La distribución estadística de las velocidades del viento varía de un lugar a otro del globo, dependiendo de las condiciones climáticas locales, del paisaje y de su superficie.

Un aspecto a destacar en el momento de diseñar un aerogenerador es que no basta con tomar datos de las velocidades y después utilizar la velocidad media para los cálculos, hay que ponderar la probabilidad de cada velocidad del viento con la correspondiente cantidad de potencia que es capaz de extraer a esa velocidad.

2.4 Potencia eólica

La potencia eólica de una zona se determina mediante la ecuación 2.4, y ésta depende de la densidad del aire, de la velocidad del viento y del área barrida por las palas.

$$P_w = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (2.4)$$

Dónde **A** es el área barrida por el rotor, **ρ** la densidad del aire y **v** la velocidad del viento.

Esta ecuación es un límite teórico ideal, ya que no considera algunos factores reales de operación como lo son: (Díez, 1993)

- Resistencia aerodinámica de los álabes.
- La compresibilidad del fluido.
- La interferencia de los álabes.

Además, habrá que tener en cuenta el rendimiento de los diversos mecanismos que componen el aerogenerador, como e muestra en la Figura 2.2.



Figura 2. 2 Secuencia de los rendimientos y potencias de los componentes del aerogenerador.

Como ya se ha explicado con anterioridad, es imposible que una turbina eólica extraiga toda la potencia del viento. Por lo tanto, para determinar las dimensiones del rotor se deben considerar los rendimientos eléctrico y mecánico, y el coeficiente de potencia de la máquina. (Morimitsu, 2015)

La eficiencia mecánica total (n_m) equivale al producto de todas las eficiencias de los componentes mecánicos del sistema. Para el presente análisis, la eficiencia mecánica depende del sistema de transmisión y de los rodamientos.

$$n_m = n_{st} * n_{rod} = 0.94 \quad (2.5)$$

Donde n_{rod} es la eficiencia mecánica de los rodamientos y n_{st} es la eficiencia del sistema de transmisión.

La eficiencia eléctrica total (n_e) equivale al producto de todas las eficiencias de los componentes eléctricos del sistema. Para el presente análisis, la eficiencia eléctrica depende del generador y el controlador.

$$n_e = n_{gen} * n_{cont} = 0.90 \quad (2.6)$$

Donde n_{gen} es la eficiencia eléctrica del generador y n_{cont} es la eficiencia del controlador.

Para ello se tiene según (Ocampo, 1993), (Aliexpress, 2015) y (Figueredo, 2015) que:

- eficiencia mecánica de rodamientos $n_{rod} = 0.98$
- eficiencia del sistema de transmisión $n_{st} = 0.95$
- eficiencia eléctrica del generador $n_{gen} = 0.95$
- eficiencia del controlador $n_{cont} = 0.95$

El área A barrida por el rotor es un parámetro que se utiliza con cierta frecuencia en los cálculos de energía eólica. Para una hélice, esta área es la superficie total barrida por las

palas del rotor, perpendicular a la dirección del viento. Para un rotor de hélice, de eje horizontal, paralelo a la dirección del viento, de diámetro D y de radio r el valor de A es:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} = \pi * r^2 \quad (2.7)$$

La zona de instalación del aerogenerador es en zonas de difícil acceso en las localidades montañosas de Cuba. Esto se tiene en cuenta para estimar la media de velocidad del viento en la isla.

En la Tabla 2.1 se muestran las velocidades medias del viento en cada mes medidas entre los años 2010 y 2018 en las instalaciones meteorológicas del Aeropuerto Internacional José Martí de La Habana. (Weather Online, 2018)

Tabla 2. 1 Velocidades medias del viento en cada mes medidas entre los años 2010 y 2018.

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sept | Oct | Nov | Dic |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| Velocidad media (km/h) | 11.3 | 11.0 | 11.9 | 11.5 | 10.7 | 9.7 | 8.5 | 8.2 | 8.0 | 10.1 | 10.6 | 10.0 |
| Disponibilidad de datos (%) | 100 | 100 | 100 | 97 | 94 | 90 | 93 | 97 | 97 | 100 | 100 | 97 |

Como promedio de estos valores se tiene una velocidad de 10.1 km/h, lo que equivale aproximadamente a 2.8 m/s

Pero debido a que la variación de velocidad depende del terreno y de la altura a la que se tome, hay que corregir la velocidad media calculada según la ecuación 2.8:

$$V_{h2} = V_{h1} * \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^b \quad (2.8)$$

Donde v_{h1} , v_{h2} representan las velocidades del viento a las alturas h_1 y h_2 , y b es un coeficiente que depende del nivel de rugosidad del terreno. En la Tabla 2.2 (Gil, 1997) se detallan diferentes valores del coeficiente b en función de distintos tipos de terreno.

Tabla 2. 2 Niveles de rugosidad del terreno.

| Nivel de rugosidad del terreno | b |
|---|-------------|
| No rugoso (arena, nieve, mar) | 0.10 – 0.13 |
| Poco rugoso (hierba, campo de cereales) | 0.13 – 0.20 |
| Rugoso (bosque, casas pequeñas) | 0.20 – 0.27 |
| Muy rugoso (edificios grandes y ciudades) | 0.27 – 0.40 |

2.5 Rendimiento de los aerogeneradores

Como se describió anteriormente, no se puede convertir toda la energía cinética del viento en energía mecánica rotacional, por ello para conocer la potencia mecánica de una turbina eólica se debe tener en cuenta lo siguiente: (Carta González, et al., 2009)

$$P_m = C_p \left(\frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \right) \quad (2.9)$$

$$P_m = C_p * P_w \quad (2.10)$$

Dónde **A** es el área barrida por el rotor, **ρ** la densidad del aire, **v** la velocidad del viento y **C_p** es el coeficiente de potencia del aerogenerador (que depende de la forma aerodinámica de la pala), el cual no puede superar el límite de Betz y puede ser hallado en las curvas de la Figura 2.3.

Para relacionar el coeficiente de potencia del aerogenerador en la Figura 2.3, es necesario conocer el Tip Speed Ratio, más conocida como **TSR** por sus siglas en inglés, la cual relaciona la velocidad tangencial del álabe y la velocidad del viento, lo que nos sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, por lo que también se le suele denominar **velocidad específica**. Su valor óptimo para maximizar la potencia oscila entre 6 y 10, y se define en la ecuación 2.11: (Carta González, et al., 2009)

$$TSR = \frac{2\pi * n * r}{v * 60} \quad (2.11)$$

Donde **r** es el radio de giro de las palas del aerogenerador en metros (m), **n** son las revoluciones por minuto y **v** es la velocidad del viento en metros por segundo (m/s).

La velocidad angular ω en radianes por segundo (rad/s) se expresa de la siguiente manera:

$$\omega = 2 * \pi * n \quad (2.12)$$

Por lo que el **TSR** se define de forma simplificada, sustituyendo la ecuación 2.12 en la ecuación 2.11, como:

$$TSR = \frac{\omega * r}{v} \quad (2.13)$$

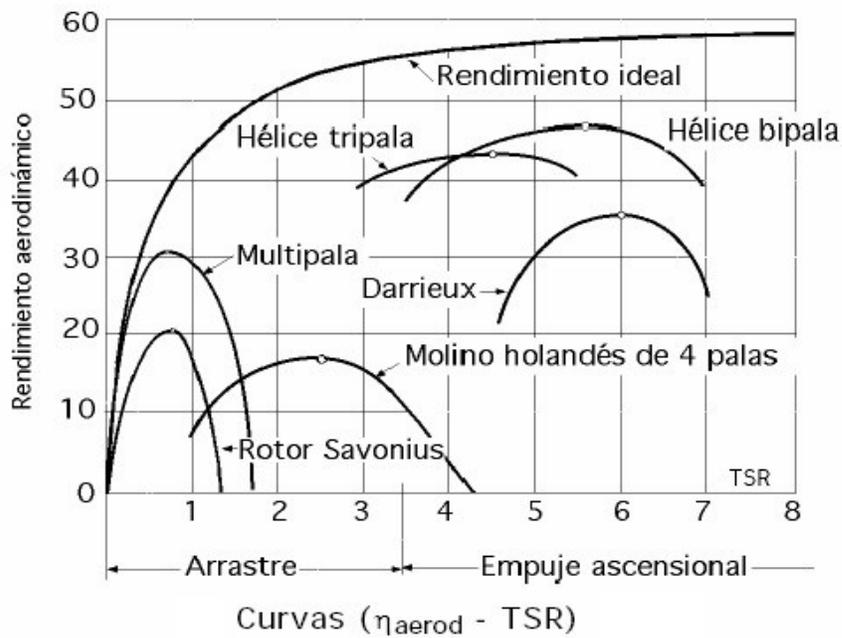


Figura 2. 3 Rendimiento aerodinámico de varios aerogeneradores.

2.6 Coeficiente de solidez de los álabes

Cuando una máquina eólica dispone de un número determinado de palas, la superficie total de las mismas se puede calcular mediante la ecuación 2.14: (Bastianon, 2008)

$$A_{total\ palas} = Z * S = Solidez * A_{barrida\ rotor} = \Omega * A$$

$$Z * S = \Omega * A \quad (2.14)$$

Por lo que la solidez del rotor se puede interpretar como la relación entre el área geométrica de la pala y el área barrida por ella en su giro (área barrida por el rotor en la ecuación 2.7), como se muestra a continuación en la ecuación 2.15:

$$S = r * C \quad (2.15)$$

Sustituyendo y simplificando las ecuaciones 2.7 y 2.15 en la ecuación 2.14 se obtiene:

$$\Omega = \frac{Z*S}{A} = \frac{Z*r*C}{\pi*r^2} = \frac{Z*C}{\pi*r} \quad (2.16)$$

Donde Ω es el coeficiente de solidez de las palas del aerogenerador, Z es el número de palas del aerogenerador, S es el área geométrica de la pala, A es el área barrida por el rotor, r es el radio de giro de la pala y C es la longitud transversal del área proyectada de la pala (cuerda).

El coeficiente de solidez Ω guarda una relación inversa con el **TSR**. Las máquinas con un coeficiente de solidez grande son más lentas. A partir del **TSR**, con la Tabla 2.3 podemos determinar el número de palas: (Díez, 1993)

Tabla 2. 3 Números de palas en función del TSR.

| TSR | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 – 8 | 8 – 15 |
|------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| Número de palas | 6 – 20 | 4 – 12 | 3 – 8 | 3 – 5 | 2 – 4 | 1 – 2 |

2.6 Potencia de la transmisión

La potencia después de la transmisión mecánica vendrá afectada por un rendimiento de la siguiente forma, según la ecuación 2.18: (Giner, 2013)

$$P_t = n_m * C_p * P_w \quad (2.17)$$

$$P_t = n_m * P_m \quad (2.18)$$

Donde P_t es la potencia de la transmisión mecánica y n_m es la eficiencia de la transmisión.

Las pérdidas de transmisión se deben sobre todo a la fricción entre engranajes, así como las debidas a los cojinetes. Las pérdidas no varían fuertemente con el esfuerzo de torsión

transmitido, siendo, por lo tanto, razonable asumir que la pérdida de transmisión es un porcentaje de la calidad de la transmisión.

2.7 Potencia eléctrica

La potencia eléctrica en el aerogenerador está definida por la eficiencia de todos los componentes del mismo, tanto eléctricos como mecánicos, que se relacionan entre sí como un solo conjunto. A continuación se muestra la expresión para transformar la potencia eólica a potencia eléctrica en la ecuación 2.20: (Gil, 1997)

$$P_e = n_e * n_m * P_m \quad (2.19)$$

$$P_e = n_e * P_t \quad (2.20)$$

2.7 Potencia total extraída

La cantidad de energía eólica que puede transformar un equipo en electricidad, depende principalmente de la velocidad del viento en el sitio donde estará instalado. Por diferentes razones, como ya se ha mencionado anteriormente, se hace difícil extraer toda la energía cinética existente en una corriente de aire. Es por ello que se debe determinar el rendimiento total que podría presentar el aerogenerador, considerando las diferentes pérdidas de energía presentes en el sistema. (Morimitsu, 2015)

La potencia total extraída viene dada por la ecuación 2.21:

$$P_{te} = n_m * n_e * C_p * \left(\frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \right) \quad (2.21)$$

Donde, n_e es la eficiencia de la máquina eléctrica, n_m es la eficiencia de la transmisión mecánica, C_p el coeficiente de potencia del aerogenerador, ρ la densidad del fluido, A el área barrida por la turbina y v la velocidad del viento.

2.8 Fuerzas y Momentos Aerodinámicos

Cuando un flujo pasa a través de un perfil alar, se generan fuerzas aerodinámicas y momentos. La razón de estas fuerzas y momentos es clara: la distribución de presiones del flujo, y el esfuerzo de corte en la superficie. El efecto de estos dos fenómenos combinados puede ser representado con una sola fuerza, F , y un momento, M . (Ávila, 2014)

Usualmente, la fuerza F se descompone en dos fuerzas aerodinámicas elementales: Sustentación y Arrastre, o como se conocen en inglés, Lift (L) y Drag (D), estas fuerzas se aprecian en la Figura 2.4.

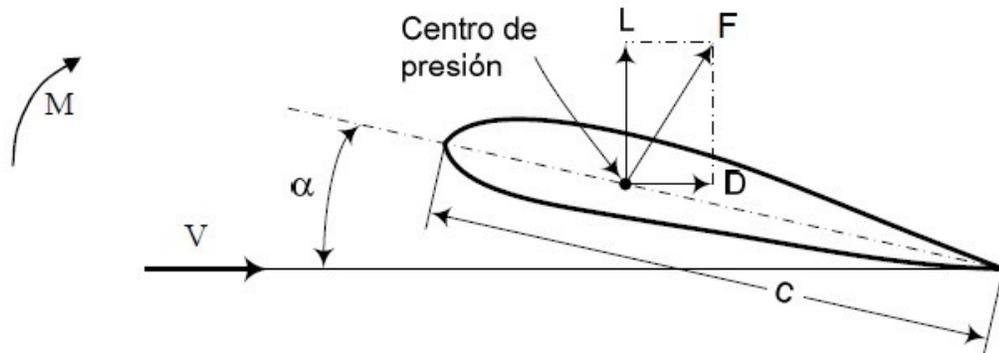


Figura 2. 4 Diagrama de Fuerzas sobre un perfil alar.

El ángulo de incidencia (α) de la pala es de 6° , con esto se determina los coeficientes de sustentación y arrastre a partir de la Figura 2.5:

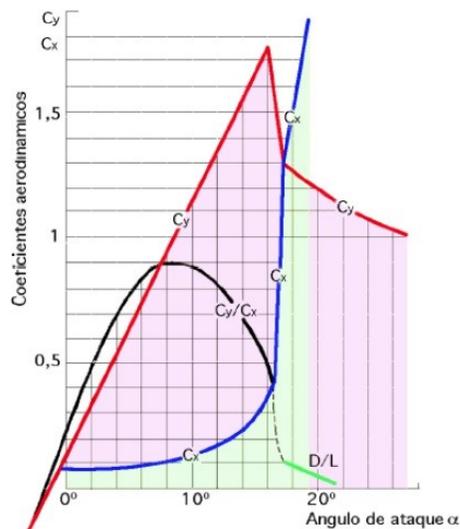


Figura 2. 5 Coeficientes de arrastre (C_x) y de sustentación (C_y) en función de α .

Para el caso presente se estima que $C_y = C_L = 0.7$ y $C_x = C_D = 0.1$

2.8.1 Sustentación (Lift)

La sustentación es la presión generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, de dirección perpendicular a la velocidad de la corriente incidente. Esta es la principal presión que genera el giro en las turbinas.

Como con otras fuerzas aerodinámicas, en la práctica se utilizan coeficientes adimensionales que representan la efectividad de la forma de un cuerpo para producir sustentación y se usan para facilitar los cálculos y los diseños. El modelo matemático de la fuerza de sustentación se expresa en la ecuación 2.22: (Ávila, 2014)

$$L = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A * C_L \quad (2.22)$$

Donde **L** es la fuerza de sustentación en Newton, **ρ** es la densidad del fluido en kg/m³, **v** es la velocidad en m/s, **A** es el área de referencia del cuerpo, representado por m² y **C_L** es el coeficiente de sustentación. Como el resto de coeficientes aerodinámicos, es adimensional.

2.8.2 Arrastre (Drag)

El arrastre o fricción de fluido es la fricción entre un objeto sólido y el fluido (un líquido o gas) por el que se mueve. Para un sólido que se mueve por un fluido o gas, el arrastre es la suma de todas las fuerzas aerodinámicas o hidrodinámicas en la dirección del flujo del fluido externo. Por tanto, actúa opuestamente al movimiento del objeto, y en un vehículo motorizado esto se resuelve con el empuje. (Ávila, 2014)

El modelo matemático de la fuerza de arrastre se expresa en la ecuación 2.23:

$$D = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A * C_D \quad (2.23)$$

Donde **D** es la fuerza de arrastre en Newton, **ρ** es la densidad del fluido en kg/m³, **v** es la velocidad en m/s, **A** es el área de referencia del cuerpo en m² y **C_D** es el coeficiente de arrastre. Como el resto de coeficientes aerodinámicos, es adimensional.

2.8.3 Momento Aerodinámico

La distribución de las presiones estáticas locales sobre el contorno del perfil produce no solamente una fuerza aerodinámica resultante sino también un momento aerodinámico. La fuerza aerodinámica resultante es precisamente la resultante de todas las fuerzas locales, producto de la presión estática local, por la unidad de superficie. Si consideramos separadamente las fuerzas sobre la superficie superior y las que actúan sobre la inferior, se tendrían resultantes parciales. Se aprecian fuerzas parciales de sustentación en el

extradós e intradós a un ángulo de ataque $\alpha=0^\circ$. Se observa que la sustentación resultante de la superficie superior no es colineal con la de la superficie inferior por lo tanto habrá un momento aerodinámico que tiende a inclinar hacia abajo el borde de ataque. La fuerza resultante de la sustentación superior e inferior estará ubicada en un punto intermedio. Este punto de aplicación de la fuerza total resultante se denomina centro aerodinámico o centro de presión. La localización de este punto varía normalmente para cada perfil y para cada ángulo de ataque, es decir, está en función de la forma del perfil, particularmente de la forma de la línea media y del coeficiente de sustentación. (Gil, 1997)

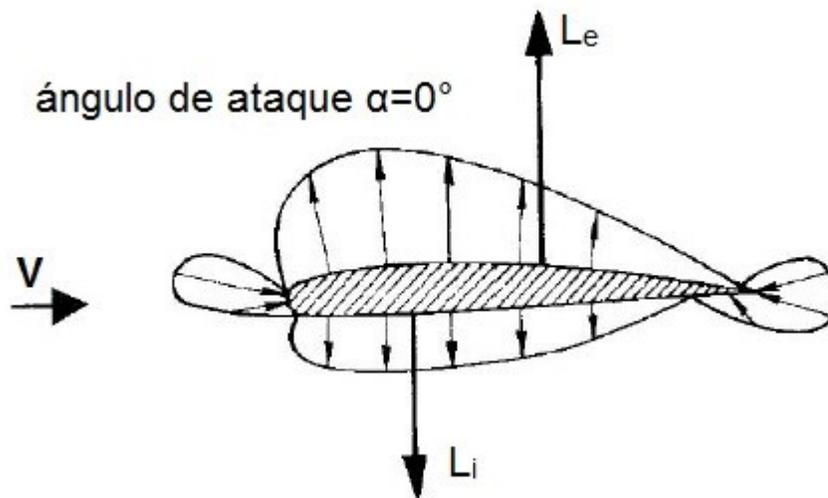


Figura 2. 6 Sustentación superior (L_e) no colineal con la sustentación inferior (L_i), lo que origina un momento aerodinámico.

La sustentación y la resistencia que actúan sobre el perfil pueden considerarse como aplicadas en un determinado punto y para definir en forma completa la acción de las fuerzas sobre el perfil, es necesario, además, especificar el momento alrededor del mismo punto como se muestra en la Figura 2.4.

El ángulo que se forma entre la velocidad relativa y la cuerda, se denomina ángulo de ataque α y la acción del momento M tiende a modificar este ángulo. El momento M , de cabeceo, se considera positivo cuando tiende a levantar la nariz del perfil y puede expresarse según la ecuación 2.24:

$$M = C_m * \frac{1}{2} * \rho * v^2 * S * C \quad (2.24)$$

Donde M es el momento flector aerodinámico, C_m es el coeficiente de momento, S es el área geométrica de la pala (definida en la ecuación 2.15), ρ la densidad del aire, v la velocidad del viento y C es la longitud de la cuerda.

2.8.4 Coeficientes adimensionales

Si se aplica el teorema *Pi de Buckingham*, se obtiene la versión adimensional de las fuerzas definidas en la Figura 2.6. Para ello, se define un nuevo parámetro, la Presión Dinámica.

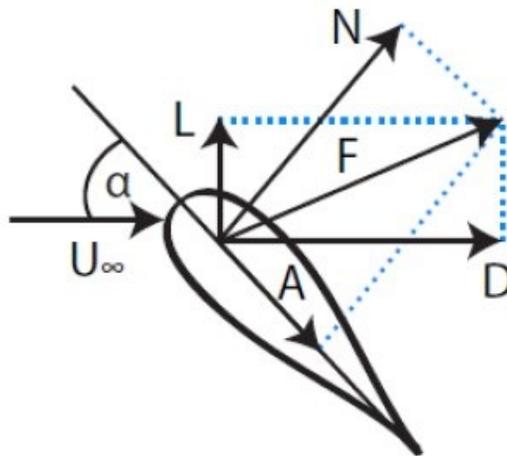


Figura 2. 7 Diagrama de Fuerzas sobre un perfil alar para cualquier fluido.

Sean ρ_∞ y U_∞ la densidad y velocidad en el flujo, entonces se tiene que la presión dinámica q_∞ se define en la ecuación 2.25:

$$q_\infty = \frac{1}{2} * \rho_\infty * U_\infty^2 \quad (2.25)$$

Sean además un área de referencia S y un largo de referencia l . Haciendo un análisis dimensional con la presión dinámica, las fuerzas aerodinámicas y momentos, y estas dimensiones de referencia, se obtienen los siguientes coeficientes adimensionales: coeficiente de sustentación (C_L), coeficiente de arrastre (C_D), coeficiente de la fuerza normal (C_N), coeficiente de la fuerza axial (C_A), y el coeficiente de momento (C_M):

$$C_L = \frac{L}{q_\infty * S} \quad (2.26)$$

$$C_D = \frac{D}{q_\infty * S} \quad (2.27)$$

$$C_N = \frac{N}{q_\infty * S} \quad (2.28)$$

$$C_A = \frac{A}{q_\infty * S} \quad (2.29)$$

$$C_M = \frac{M}{q_\infty * S} \quad (2.30)$$

Conclusiones Parciales

- De todo el potencial de energía del viento, solo será posible extraer el 59.3 % según la Ley de Betz, ya que, si le quitáramos toda esa energía cinética al aire detrás de la turbina éste estaría quieto.
- La potencia eólica de un aerogenerador ubicado en una determinada zona depende de la densidad del aire, de la velocidad del viento y del área barrida por las palas, siendo esto un límite teórico ideal, ya que no considera algunos factores reales de operación y habrá que tener en cuenta el rendimiento de los diversos mecanismos que componen el aerogenerador.
- Para determinar las dimensiones del rotor se deben considerar los rendimientos eléctrico y mecánico, y el coeficiente de potencia de la máquina ya que el área barrida por el rotor es un parámetro que se utiliza con frecuencia en los cálculos de energía eólica.
- La cantidad de energía eólica que puede transformar un equipo en electricidad, depende principalmente de la velocidad del viento en el sitio donde estará instalado, por lo que se debe determinar el rendimiento total del aerogenerador, considerando las diferentes pérdidas de energía presentes en el sistema.

Capítulo III: Selección de los materiales mediante la metodología de selección de Michael Ashby

3.1 Introducción

La selección de un material para construir una parte de una máquina o elemento estructural es una de las decisiones más importantes del diseñador, incluso esto ocurre antes de dimensionar las partes. Existen diferentes enfoques sistemáticos y de optimización para seleccionar el material. El desarrollo de nuevos materiales vuelve aún más demandante la selección de los apropiados.

Una visión global del comportamiento relativo a las diversas clases de materiales de ingeniería ha sido dada por Michael Ashby mediante los mapas de materiales, que representan una pareja de propiedades para tantos materiales como se desee incluir en la gráfica. El método gráfico se apoya en estos mapas de materiales y fue diseñado exclusivamente para ser utilizado durante la etapa conceptual de la selección de materiales. En dichos mapas se puede hacer una aproximación del material más adecuado con base en la relación de las propiedades más importantes que debe poseer el componente, ya que rara vez el comportamiento de este depende de solo una propiedad. (Shackelford, 2010)

3.2 Metodología de selección de materiales de Michael Ashby

Claramente, las distintas categorías de materiales se agrupan entre sí formando grupos que se ubican en áreas cerradas, zonas o campos. Esto dice que una misma familia de materiales puede tener una apreciable variación en sus propiedades. En la Figura 3.1, cada elemento con un color sólido representa una clase de material y las zonas con colores transparentes, que engloban dos o más elementos de colores sólidos, representan una familia de materiales. (Cabrera, 2016)

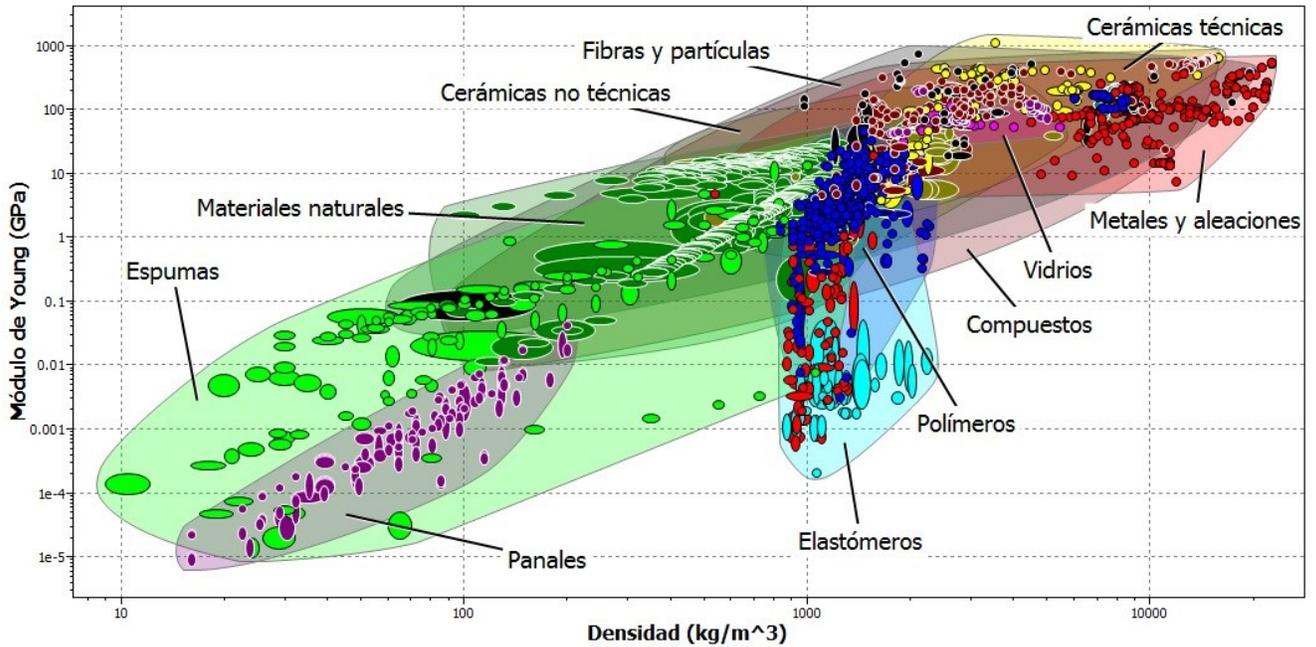


Figura 3. 1 Ranqueo inicial de todos los materiales. Módulo de Young (GPa) vs. Densidad (kg/m³).

El uso de los mapas de Ashby para la selección de los materiales sigue una filosofía de diseño de cuatros pasos según lo planteado por (Shackelford, 2010):

- Expresar los requisitos del diseño como una especificación del material.
- Eliminar los materiales que no satisfacen las especificaciones.
- Ordenar los materiales candidatos por su capacidad para resolver los objetivos del diseño (usando parámetros apropiados).
- Buscar información adicional para los candidatos prometedores.

El diseño empieza por la necesidad del mercado. La necesidad es analizada, y se expresa como conjunto de requerimientos de diseño. La selección de los materiales y los procesos evolucionan en paralelo. La selección del material no puede ser separada del proceso y de su forma como se muestra en la Figura 3.2 según (Ashby, et al., 2007).

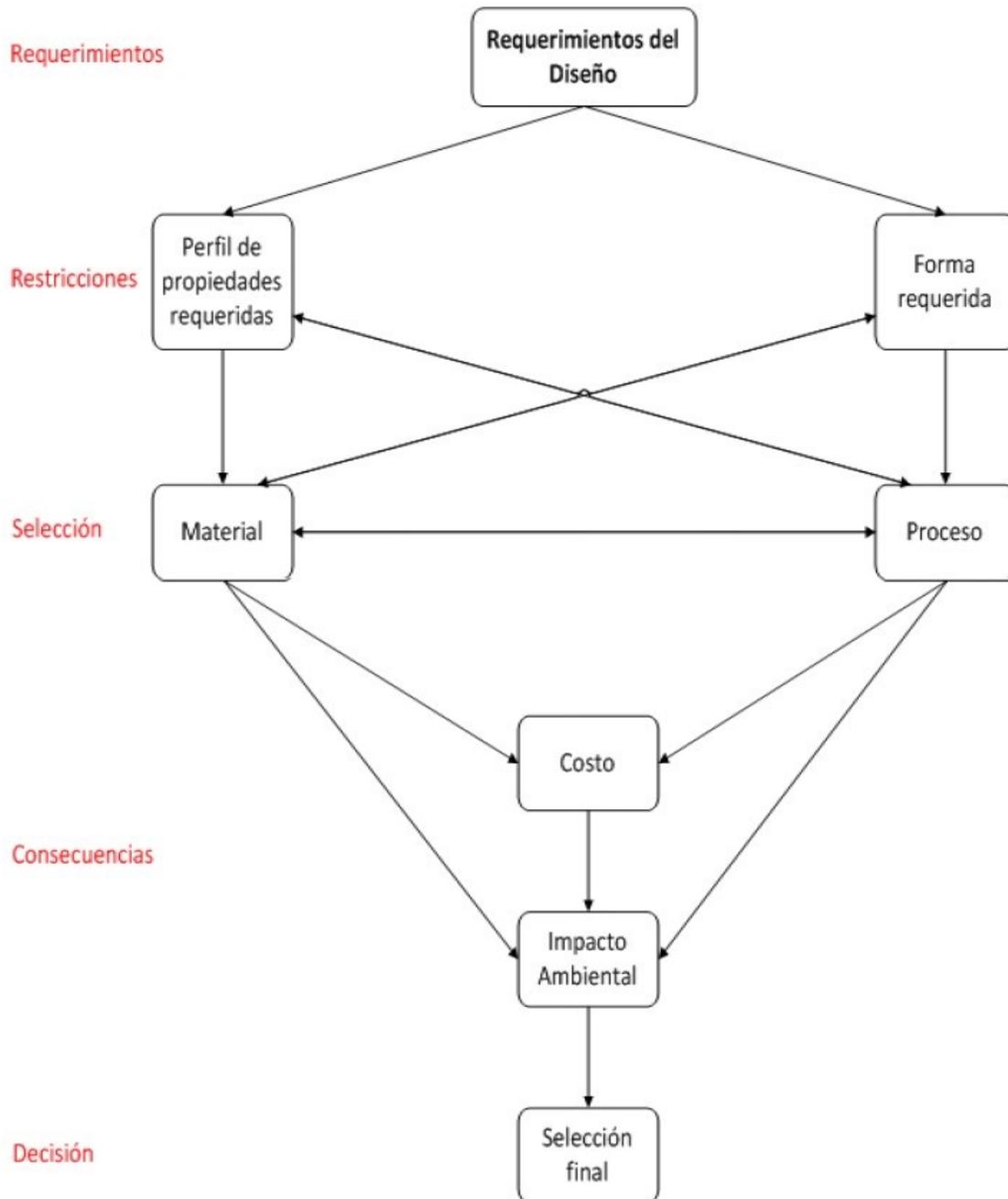


Figura 3. 2 Interacción entre los requerimientos del diseño, el material, la forma y los procesos.

Para hacer una forma, el material se somete a un proceso que colectivamente se le llama manufactura. Con estos antecedentes se puede desarrollar una estrategia de selección. Dicha estrategia involucra cuatro pasos: traducción, filtrado, ranqueo y documentación, ver Figura 3.3. La selección involucra buscar el material que mejor responda a los atributos requeridos por el diseño, al perfil del material y al perfil de procesos. (Ashby, 2011)

- La salida del paso de la traducción es un inventario de propiedades limitantes del diseño y restricciones con las que debe cumplir. Cualquier componente tiene una o más funciones que debe lograr teniendo en cuenta ciertas limitaciones. También, el diseñador se plantea uno o más objetivos que se pueden optimizar con las variables libres.
- El filtrado elimina todos los candidatos que no pueden hacer el trabajo porque uno o más de sus atributos está fuera de los límites establecidos en las limitaciones.
- En el paso del ranqueo se necesita un criterio de excelencia para encontrar los materiales que mejor desempeñen la función requerida. Para esto, Ashby desarrolló los índices de material teniendo en cuenta que el rendimiento o desempeño a veces está limitado por una propiedad y a veces por una combinación de propiedades. (Ashby, 2011)

El índice de material es la propiedad o grupo de propiedades que maximiza el rendimiento de un diseño. Hay muchos índices asociados a maximizar algunos aspectos de rendimiento y proveen el criterio de excelencia para ranquear los materiales de acuerdo a su habilidad de desempeñarse eficientemente en la aplicación dada. Se plantean diversos índices de materiales en función de requerimientos del diseño mecánico generales, pero no hay ninguno en específico señalado para aerogeneradores.

- La documentación típicamente suele ser descriptiva, gráfica o pictórica: detalles del comportamiento de su corrosión en un ambiente en particular, su disponibilidad y costo, advertencias de sus impactos medioambientales o toxicidad, o sensibilidad de algunas de sus propiedades a la forma en que se procesa, etc. La documentación permite cerrar la selección final, permitiendo llegar a un material que armonice entre los requerimientos del diseño y los atributos del material y del proceso. (Ashby, et al., 2007)

El método tradicional de selección de materiales es poco confiable y depende mucho de la experiencia del ingeniero o diseñador. Los gráficos permiten comparar diferentes materiales y sus propiedades, pero la cantidad de materiales y propiedades que podemos representar es limitada. Por ello, el método gráfico solo sería práctico en aquellos casos donde tenemos pocas restricciones según (Ashby, 2011). Cuando existen varias restricciones puede ser incomodo tener que verificar que cada material cumpla con cada

una de ellas. Todos estos problemas se solucionan al integrar la metodología mediante un software de selección asistida por computador, como el Granta CES EduPack de selección de materiales y procesos.

Aunque la metodología planteada por el profesor Michael Ashby utilizando el software Granta CES EduPack permite conocer algunos aspectos ecoamigables y medioambientales tanto de los materiales como de los procesos, las directrices se enfocan más en la disminución del consumo de los materiales y su uso eficiente.

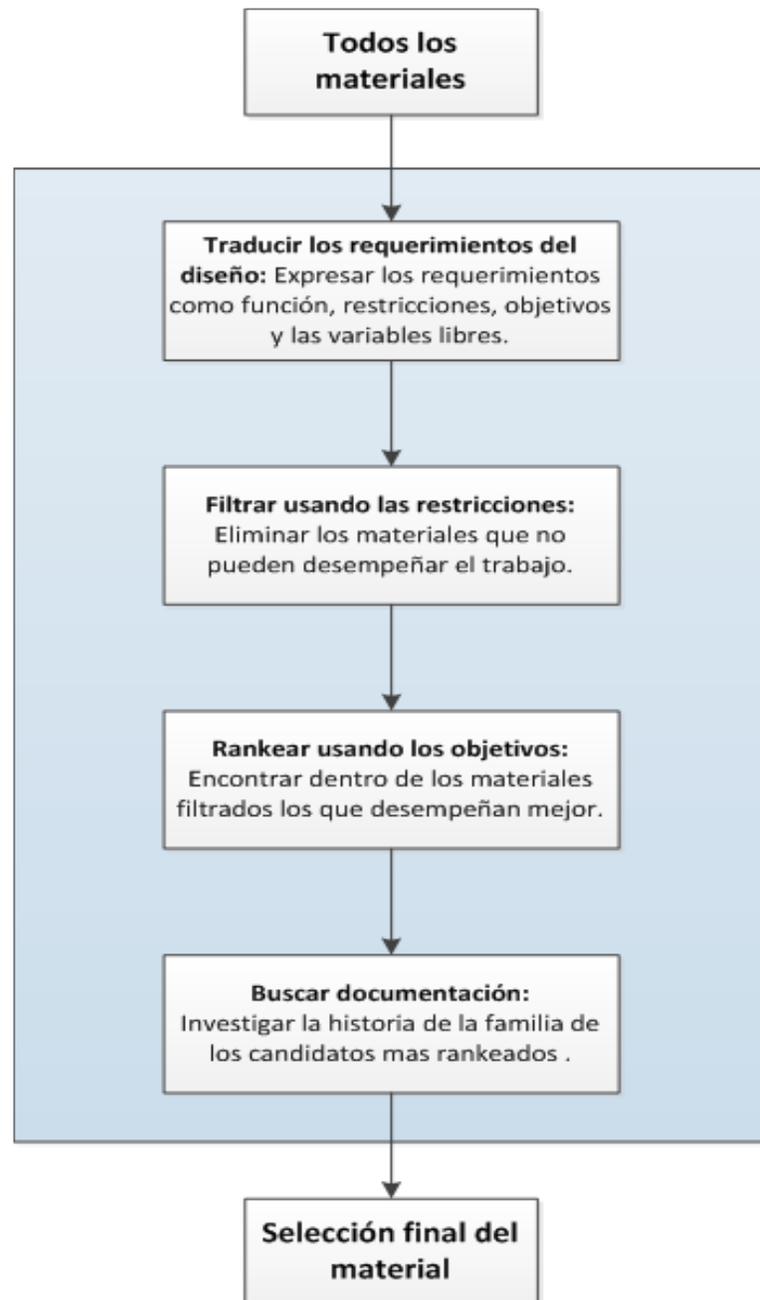


Figura 3. 3 Estrategia para la selección de materiales de Michael Ashby.

3.2 Parámetros para los criterios de selección

Las funciones principales de las palas de un aerogenerador de eje horizontal se orientan a las cargas que debe soportar: la fuerza aerodinámica, la fuerza resultante total (sustentación más arrastre) y el momento flector; conservando cierta rigidez y transmitiendo la fuerza con la mejor eficiencia posible al generador a través del rotor de la máquina.

La norma que se utiliza para certificar los sistemas de generación con turbinas eólicas es la ISO/IEC 61400. La parte 2 de esta norma, ISO/IEC 61400-2, se centra en los requerimientos de diseño para aerogeneradores de pequeña potencia.

Según (Ramírez, 2012), los objetivos planteados para el diseño y selección de materiales para aerogeneradores son:

- Resistencia estructural: Capaces de soportar, sin que se produzca daño, las cargas máximas previsibles de ocurrir durante el período de vida de la máquina.
- Resistencia a fatiga: Capaces de soportar las cargas de fatiga que aparezcan durante la vida de la máquina.
- Desplazamientos inferiores a los máximos permitidos: La rigidez debe de ser mayor que la mínima necesaria para evitar inestabilidades. Las frecuencias propias de vibración suficientemente alejadas de las fuerzas excitadoras para que las cargas dinámicas no resulten amplificadas.
- El peso debe ser el mínimo necesario para tener el mínimo costo y minimizar las cargas de tipo inercial y gravitatorio sobre los diversos componentes de la máquina (es crítico en grandes aerogeneradores).
- Fabricación: Facilidad de fabricación que requiera técnicas de fabricación y materiales adaptados a la maquinaria y tecnología existente en la industria.
- Resistencia a los agentes medioambientales: Resistencia a la corrosión en ambientes marinos y resistencia a la degradación por la radiación solar.

Entonces, los principales criterios de selección para los materiales de las aspas o palas del aerogenerador de eje horizontal para climas tropicales, como el que presenta nuestro país, son:

- Bajo costo, que se adapte a las condiciones de la economía de nuestro país.

- Que sea resistente al calor, a los rayos ultravioletas, la lluvia y la corrosión. Los registros de la temperatura máxima media en Cuba están entre los 27 °C y 32 °C, por lo que se considerara una temperatura de trabajo de 40 °C a 50 °C. También, debido al clima tropical, estamos expuestos a abundantes lluvias en determinadas épocas del año, así como a la exposición continua de rayos ultravioletas, salitre y calor generado por el sol.
- Resistente a las cargas provocadas por el viento: considerando una velocidad máxima de trabajo de 5m/s -10 m/s para nuestro país, equivalente a unos 18 – 38 km/h, lo cual se considerado como una brisa ligera a fuerte en la Tabla A2 de los anexos.
- Resistencia a la fatiga: se considera que el objetivo es que las aspas puedan durar de 15 a 20 años de trabajo con mantenimiento, sino al menos debe reciclarse.
- Baja densidad: el más ligero que se pueda de los materiales de selección, principalmente que se encuentren dentro de la familia de los polímeros.
- Dureza intermedia: el diseño de las aspas requiere que pueda resistir a las partículas sólidas que el viento puede traer e impactar en ellas.
- Resistente a las deformaciones: debe poseer un módulo de elasticidad o limite elástico lo suficientemente alto como para las aspas conserven su rigidez bajo las cargas previstas.
- Tecnología del proceso disponible a nivel nacional: el material seleccionado debe poseer un proceso de fácil fabricación y cuya tecnología se encuentre disponible en el país.
- Reciclable: el aspecto medioambiental es importante hoy en día para mantener la sostenibilidad de nuestro planeta. El cuidado del medio ambiente y del sistema donde vivimos es tan importante como la investigación y la tecnología que se desarrolla para poder habitarlos.

3.3 Restricciones de la selección

Para el diseño y construcción de un aerogenerador, se debe tener en cuenta la resistencia, el comportamiento dinámico y las propiedades de fatiga de los materiales y de todo el conjunto. Al analizar las cargas a las que se somete un aerogenerador y sus condiciones de funcionamiento, se determinan las restricciones no negociables del diseño a considerar: (Cabrera, 2016)

- Tensión de Fluencia (σ_y): Aparte de las fuerzas mencionadas anteriormente, los aerogeneradores también se ven sometidos a cargas extremas cuando el viento sopla a velocidad de huracán. Los fabricantes de aerogeneradores deben certificar sus turbinas garantizando que pueden resistir a vientos. Por ello, para la tensión de fluencia se debe contemplar cierto margen o factor de seguridad del esfuerzo máximo calculado para el diseño. El valor de este factor de seguridad depende del material, en la ISO 61400-2 se proporcionan los mismos, pero como consenso promedio se utilizará un margen de 2 veces el esfuerzo máximo.
- Resistencia a la Fatiga (σ_e): Los aerogeneradores se ven sometidos a cargas fluctuantes, debido a la variación del viento en el tiempo, lo que genera esfuerzos de fatiga en la máquina. Si el material no cumple con la resistencia a la fatiga diseñada para los 20 años, entonces el material debe reciclarse de manera obligatoria.
- Módulo de Young (E): Los aerogeneradores se ven sometidos a cargas de flexión que generan las deflexiones en las partes críticas y es importante para mantener un nivel controlado de deformaciones. La deformación máxima está en el rango de 2 a 5 %.
- Dureza (H): Para garantizar que las palas no se desgasten rápidamente o sean penetradas por el impacto de partículas o fragmentos suspendidos en el aire y accionados por el viento; se determina la dureza necesaria aplicando la ecuación 3.1:

$$H = \frac{\sigma_y}{3} \quad (3.1)$$

- Temperatura de servicio: la isoterma media anual en Cuba es de 22 a 28 °C. Sin embargo, la temperatura más alta registrada en el país fue de 38.8 °C, establecido en Jucarito, provincia de Granma, el 17 de abril de 1999. Considerando la conducción térmica de los materiales y la exposición al sol durante aproximadamente 10 horas continuas, se incluirá un gradiente promedio de 7 °C para el material en el escenario de la máxima temperatura.

Al analizar las características deseadas que no comprometen el desempeño de nuestro modelo se obtienen las restricciones negociables, las cuales se muestran a continuación:

- Resistente a los agentes medioambientales: al menos una resistencia aceptable al agua salada y a la lluvia, así como a los rayos ultravioletas (UV).
- Un material con baja densidad.
- Que posea un proceso de manufactura para la forma requerida disponible nacionalmente.
- Un material que tenga un bajo costo.
- Que posea un proceso de manufactura con un bajo costo de producción.
- Que el material sea reciclable.
- Que el material sea biodegradable, en caso de no ser reciclable.
- Que pertenezca a la familia de los polímeros.

3.4 Filtrado de la base de datos industrial del Granta CES Edupack 2013

Granta CES Edupack 2013: Granta CES es un software con una base de datos para revisar, buscar y seleccionar materiales; muestra sus diferentes propiedades y características (Grantadesign.com, 2015). Con este software de materiales se pueden asistir proyectos de diseños e investigación ya que contiene una base de datos completa para la industria con notas incluidas que ayudan a evitar errores comunes en la selección.

Granta CES proporciona una base de datos completa de los materiales (más de 3 900) y la información acerca de sus procesos (más de 200). Junto con las herramientas del software se puede tener un gran manejo de los diferentes tipos de materiales, así como visualizarlos y aplicar la información del material y de los procesos en específico para un producto. La información de cada material puede ser exportado a programas de simulación o modelado, lo cual permite integrar y evaluar cualquier cambio en la selección del material al análisis de elemento finito. (Grantadesign.com, 2015)

El filtrado se realiza a partir de lo definido en las funciones y limitantes del diseño (las restricciones no negociables). Esta etapa se realiza en la base de datos del software Grantra CES EduPack 2013, con la herramienta “*Select*”. En esta herramienta del software, el primer paso es la selección de los datos (1. “*Selection Data*”). La base de dato que se debe utilizar es la del “*Level 3*”, y dentro de esta se debe seleccionar el universo de materiales bajo el cual se trabajará: “*All materials*”. También se podría seleccionar un conjunto o familia de material en específico para hacer el filtrado dentro de dicha clasificación.

Luego se halla la etapa de selección (2. “*Selection Stage*”), y esta contiene tres opciones o formas diferentes de depuración: gráficas (“*Graph*”), límites (“*Limit*”) o familias (“*Tree*”). El paso del filtrado se realiza mediante la opción de límites, colocando los valores máximos o mínimos (según sea el caso) de las propiedades o características requeridas por el diseño. (Cabrera, 2016)

Lo ideal sería obtener menos de 1500 materiales tras este segundo paso. Si después del filtrado con las restricciones no negociables resultan más de 2000 materiales, debe hacerse una segunda etapa de filtrado utilizando una o más de las restricciones negociables según lo que se considere más pertinente para el diseño. Si resultan menos de 20 materiales, deben revisarse los criterios de selección y los cálculos realizados para determinar el perfil del material; y luego volver a ejecutar el filtrado.

Los materiales resultantes del filtrado aparecerán en la etapa o sección de los resultados (3. “*Result*”) donde inmediatamente pueden ser ranqueados con alguna propiedad específica, en orden ascendente o descendente. (Cabrera, 2016)

3.5 Ranqueo de los materiales que cumplen con los criterios de diseño y depuración de los más ineficientes

El paso del ranqueo de los materiales se centra en los objetivos y las variables libres del diseño. Con la herramienta “*Select*”, en la etapa de selección (2. “*Selection Stages*”) y con la opción “*Graph*” se elaboran una o más gráficas que permitirán visualizar diferentes propiedades de materiales y ranquearlos atendiendo a múltiples criterios simultáneamente.

Si se toman en cuenta los objetivos del diseño, las gráficas por generar son:

- Limite elástico (σ_y) vs Densidad (ρ).
- Módulo de Young (E) vs Densidad (ρ).
- Limite elástico (σ_y) vs Módulo de Young (E).
- Tenacidad a la fractura (k_{ic}) vs Módulo de Young (E).
- Limite elástico (σ_y) vs Temperatura máxima de servicio.

Las gráficas más importantes y necesarias son las tres primeras, sin embargo, también se presentan las últimas dos en caso de requerir mayor información o criterios para descartar aproximadamente la mitad de los candidatos. En este paso se debería reducir

el listado a menos de 100 materiales a través de las pendientes de los índices de material. (Cabrera, 2016)

3.6 Documentación y examinación del ciclo de vida de los materiales seleccionados

La documentación puede ser abrumadora para una gran cantidad de materiales. En este paso, debe quedar un grupo reducido de materiales que cumplen con las propiedades básicas necesarias para desempeñar su función, y además maximizan los criterios de excelencia para este diseño. Los aspectos que se deben evaluar en la documentación por clase de los materiales filtrados y mejores ranqueados son:

- Precio y disponibilidad local.
- Resistencia y comportamiento mecánico.
- Aplicaciones.
- Propiedades y características de sus procesos de manufactura.
- Resistencia a agentes ambientales: como la corrosión, el agua salada o dulce, los rayos ultravioletas, etc.
- Eco-Propiedades del material.
- Reciclaje y final de vida.

Las ecopropiedades principales de un material, las cuales también se utilizarán para el análisis del ciclo de vida del producto con el material seleccionado, son: (Cabrera, 2016)

- Energía incorporada (*“embody energy”*): es la energía que se debe gastar para crear 1 kg de material usable. Se mide en Mega Joule equivalente de petróleo por kilogramo (MJ/kg).
- Huella de carbono (*“CO₂ footprint”*): es la masa de CO₂ liberada a la atmosfera por cada unidad de masa del material. Se mide en kilogramos de CO₂ por kilogramo de material (kg_{CO₂}/kg).
- Uso de agua (*“water usage”*): es la cantidad de agua comercial usada en la producción de 1 kg de material (m³/kg).

Los productos de manufactura requieren que los materiales obtengan una forma, lo cual conlleva energía. De los procesos de los materiales se considerará:

- Energía del proceso (“*processing energy*”): es la energía usada para darle forma al material. Se mide en Mega Joule de energía usada por kilogramo de material (MJ/kg).
- Huella de CO₂ (“*CO₂ footprint*”): se evalúa calculando la energía usada en el proceso y el tipo de combustible. Se mide en kilogramo de CO₂ equivalente por kilogramo de material procesado (kg_{CO₂}/kg).

Para realizar la evaluación del ciclo de vida del producto se utiliza la herramienta “Eco Audit”. Esta herramienta se secciona en seis partes:

- Información del producto: se coloca el nombre o identificación de la parte o del producto.
- Material, manufactura y final de vida: se detalla la lista de materiales del producto (cantidad de piezas, nombre, material, contenido reciclado, masa, proceso de manufactura primario y el final de la vida de cada componente).
- Transporte: se coloca el nombre del transporte, el tipo y la distancia que va a desplazarse. Aquí pueden establecerse diferentes escenarios de transporte.
- Uso: se especifican los años de vida del producto, el país o región de uso, así como el modo de uso: estático o móvil.
- Reporte: esta sección te permite insertar una imagen del producto o componente, generar un gráfico de barras con los aportes de CO₂ de cada etapa (Material, Manufactura, Transporte, Uso y Disposición) o generar el reporte detallado con todas las consideraciones del análisis y la gráfica de barras.

Los materiales que finalmente se seleccionen serán el material o clase de familia de materiales que cumplen con todos los requerimientos no negociables y optimice el rendimiento de cada componente coincidiendo al máximo con los objetivos planteados en la selección y con las características deseadas para cada parte. (Cabrera, 2016)

3.7 Aplicación de la metodología para la selección de los materiales de los álabes de un aerogenerador de producción nacional

Para aplicar y desarrollar paso a paso la metodología planteada para la selección de los materiales de los principales componentes de las palas de un aerogenerador de eje horizontal, se considerará un modelo comercial con las siguientes características:

- Ángulo de ataque de la pala $\alpha = 6^\circ$
- Velocidad del viento promedio $v = 2.8 \text{ m/s}$
- Velocidad del viento máxima $v_{\text{máx}} = 10 \text{ m/s}$
- Potencia requerida máxima $P_{r_{\text{máx}}} = 15 \text{ kW}$
- Temperatura de trabajo mínima $T_{\text{mín}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$

También se calcularon otras características principales, para diferentes casos de aerogeneradores, que se muestran en la Tabla A 3 de los anexos, de las cuales se seleccionan las correspondientes al caso 5.

- Potencia eólica $P_w = 64.12 \text{ kW}$
- Densidad del aire ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) $\rho = 1.19 \text{ kg/m}^3$
- Área barrida por el rotor $A = 4.91 \text{ m}^2$
- Radio de las palas $r = 1.25 \text{ m}$
- Potencia mecánica $P_m = 28.21 \text{ kW}$
- Coeficiente potencia del aerogenerador $C_p = 0.44$
- Velocidad específica TSR = 4.67 m/s
- Velocidad de rotación del rotor $n = 100 \text{ rpm}$
- Coeficiente de solidez $\Omega = 0.057$
- Número de palas $Z = 3$
- Área geométrica de la pala $S = 0.09 \text{ m}^2$
- Longitud de la cuerda $C = 0.08 \text{ m}$
- Potencia de la transmisión $P_t = 26.52 \text{ kW}$
- Potencia eléctrica $P_e = 23.87 \text{ kW}$
- Potencia total extraída $P_{te} = 23.87 \text{ kW}$
- Potencia máxima $P_{\text{máx}} = 38.02 \text{ kW}$

Para realizar el primer ranqueo de los materiales con las características calculadas se debe tener en cuenta que las palas de los aerogeneradores se pueden separar en dos partes fundamentales: el soporte y la cubierta, las cuales están sometidas a diferentes cargas y condiciones de diseño y climáticas.

3.7.1 Aplicación de la metodología para la selección de los materiales del soporte de las palas

El soporte es la estructura básica de la pala y va unido al eje de rotación de la máquina, se encarga de transmitir la energía recibida por la cubierta al eje, por lo que está sometido a la mayor parte de las fuerzas externas e internas que se producen.

Para este paso se requiere del nivel (“Level”) 3 del software Granta CES Edupack. Utilizando la sección de “Select”, se debe escoger el universo de materiales dentro del cual se desea aplicar la herramienta, en este caso serán todos los materiales (“Material Universe: All materials”). El primer ranqueo se ejecuta con la herramienta “Tree”, seleccionando la familia “Polymers: plastics and elastomers”, para definir que los materiales ranqueados pertenezcan a la familia de los polímeros, y con la herramienta “Limit”, se definen los siguientes parámetros:

- Para asegurar un bajo costo del material, y así un diseño más económico, se exigirá un precio del material menor a 50 USD\$/kg
- Se considera una densidad máxima de 8000 kg/m³ para evitar que el material sea más pesado que los que se utilizan actualmente.
- El Módulo de Young se limita al rango de 3 GPa a 25 GPa para lograr que el material se encuentre dentro de los polímeros reforzados con fibras o minerales.

Después de realizado el primer ranqueo para los materiales de los soportes, limitando los materiales a la familia de los polímeros, introduciendo el precio y la densidad máxima del material dentro de la herramienta “Limit” en la pestaña “General properties”, limitando la temperatura mínima de trabajo en la pestaña “Thermal properties” y definiendo el rango del Módulo de Young en la pestaña “Mechanical properties”, se obtiene un total de 283 materiales, ver Figura A 1, A 2 y A 3 de los anexos.

Posteriormente se realiza un segundo ranqueo con las restricciones negociables de los materiales, para que sea reciclable de ser posible, en la pestaña “Material recycling: energy, CO₂ and recycle fraction”, y se decide también:

- Delimitar la resistencia a los agentes medioambientales, con un mínimo de resistencia aceptable a los rayos UV y al menos uso limitado para la lluvia y el agua salada, ya que los soportes están protegidos parcialmente por la cubierta.

Después de realizado el segundo ranqueo para los materiales del soporte, donde se selecciona que sea reciclable y no biodegradable, y definiendo la resistencia a los agentes medioambientales en la pestaña “*Durability: fluids and sunlight*”, se obtuvo un total de 19 materiales recomendados como se muestra en la Figura A 4, A 5 y A 6 de los anexos.

De los 19 materiales recomendados, 9 son polímeros termoplásticos semicristalinos y los desechamos ya que ellos en su estructura tienen parte amorfa, parte cristalino. Con los restantes 10, que son de la clase de los polímeros termoplásticos amorfos, se realiza una tabla comparativa para definir finalmente la selección del material, la cual se muestra a continuación:

Tabla 3. 1 Comparación de los 10 materiales recomendados para los soportes, en cuanto a densidad y precio.

| Materiales recomendados | Densidad en kg/m³ | Precio en USD\$/kg |
|--|-------------------------------------|---------------------------|
| <i>PA transparent (part-cycloaliphatic, amorphous, mid Tg)</i> | 1060 – 1080 | 10.5 – 12.1 |
| <i>PEI (unfilled)</i> | 1260 – 1280 | 17.6 – 19.4 |
| <i>PES (30% carbon filled)</i> | 1510 – 1550 | 21.4 – 24.7 |
| <i>PET (unfilled, amorphous)</i> | 1290 – 1390 | 2.07 – 2.28 |
| <i>PMMA (heat resistant)</i> | 1160 – 1220 | 2.75 – 3.03 |
| <i>PMMA (impact modified)</i> | 1110 – 1180 | 3.75 – 4.12 |
| <i>PMMA (molding and extrusion)</i> | 1170 – 1200 | 2.75 – 3.03 |
| <i>PVC (chlorinated, molding and extrusion)</i> | 1450 – 1560 | 2.77 – 3.04 |
| <i>PVC (rigid, high impact, molding and extrusion)</i> | 1290 – 1460 | 2.43 – 2.67 |
| <i>PVC (rigid, molding and extrusion)</i> | 1300 - 1490 | 1.41 – 1.55 |

Finalmente se decidió seleccionar el material “***PVC (rigid, molding and extrusion)***”, por su accesibilidad económica para nuestro país y siendo este el de menor precio en el

mercado internacional, ya que todos los materiales recomendados para los soportes cumplen las restricciones negociables y no negociables. De este material se muestran todas las propiedades que brinda el software en los anexos.

3.7.2 Aplicación de la metodología para la selección de los materiales de la cubierta de las palas

La cubierta es la parte cuya superficie recibe la incidencia del viento, siendo arrastrado por el mismo, va unida al soporte y se encarga de transmitir la energía del viento al soporte. Recibe principalmente la incidencia de todas las partículas que se mueven con el viento, los rayos ultravioletas y todas las variaciones del clima, tanto las temperaturas como las precipitaciones, incluyendo granizadas y en casos extremos hielo y nevadas. También dependiendo de la localización se someten a variaciones de agua dulce y salada, estando en zonas costeras o dentro del mar.

Para este paso se requiere del nivel (“Level”) 3 del software Granta CES Edupack. Utilizando la sección de “Select”, se debe escoger el universo de materiales dentro del cual se desea aplicar la herramienta, en este caso serán todos los materiales (“Material Universe: All materials”). El primer ranqueo se ejecuta con la herramienta “Tree” y seleccionando la familia “Polymers: plastics and elastomers”, para definir que los materiales ranqueados pertenezcan a la familia de los polímeros reforzados con fibra de vidrio, fibra de carbono o fibra de aramida (kevlar). Después de realizado este ranqueo se logra reducir la lista a 655 materiales, ver Figura A 7, A 8 y A 9 de los anexos.

Posteriormente se realiza un segundo ranqueo con la herramienta “Limit” con los siguientes parámetros:

- Para asegurar un bajo costo del material, y así un diseño más económico, se exigirá un precio del material menor a 50 USD\$/kg
- Se considera una densidad máxima de 2000 kg/m³ para evitar que el material sea más pesado que los que se utilizan actualmente.

Después de realizado el segundo ranqueo para los materiales de la cubierta, introduciendo el precio del material y la densidad máxima dentro de la herramienta “Limit” en la pestaña “General properties”, limitando la temperatura mínima de trabajo en la pestaña “Thermal properties”, se obtiene un total de 576 materiales, que solo reduce la lista anterior en 79 materiales, por lo que se decide:

- Incluir la resistencia a los agentes medioambientales, con una buena resistencia a los rayos UV y un excelente uso para la lluvia y el agua salada, ya que la cubierta es la capa protectora de los soportes y la que más se expone al medio ambiente.

Luego de definida la resistencia a los agentes medioambientales en la pestaña “*Durability: fluids and sunlight*”, se obtuvo un total de 16 materiales recomendados, de los cuales 9 están reforzados con fibra de carbono y 1 reforzado con fibra de vidrio, mientras que se descartan los restantes 6 porque no presentan refuerzo, ver Figura A 10, A 11 y A 12 de los anexos.

También se realizó un ranqueo para el reciclaje y la biodegradabilidad de los materiales, pero los resultantes no presentan refuerzo de fibras, por lo que se omite este paso.

Para definir finalmente la selección del material se realiza una tabla comparativa de los 10 materiales recomendados, la cual se muestra a continuación:

Tabla 3. 2 Comparación de los 10 materiales recomendados para la cubierta, en cuanto a densidad y precio.

| Materiales recomendados | Densidad en kg/m³ | Precio en USD\$/kg |
|--|-------------------------------------|---------------------------|
| <i>PBT (30% carbon fiber)</i> | 1410 – 1420 | 11.2 – 12.3 |
| <i>PEI (30% carbon fiber)</i> | 1390 – 1420 | 22.3 – 24.5 |
| <i>PEI (30% glass fiber)</i> | 1490 – 1510 | 14.7 – 16.2 |
| <i>PET (30% carbon fiber)</i> | 1410 – 1430 | 10.5 – 11.6 |
| <i>Polyester liquid crystal (30% carbon fiber)</i> | 1490 – 1510 | 24.7 – 29.6 |
| <i>PPS (20% carbon fiber)</i> | 1380 – 1400 | 18.8 – 21.4 |
| <i>PPS (30% carbon fiber)</i> | 1420 – 1470 | 20.0 – 22.6 |
| <i>PPS (30% carbon fiber, 15% PTFE)</i> | 1460 – 1480 | 20.0 – 22.6 |
| <i>PPS (40% carbon fiber)</i> | 1460 – 1490 | 21.1 – 23.8 |
| <i>PVDF (30% carbon fiber)</i> | 1720 – 1760 | 20.9 – 23.0 |

Atendiendo a que todos los materiales recomendados para las cubiertas están reforzados con fibras y que cumplen las restricciones negociables y no negociables propuestas en

el software Granta CES Edupack para así satisfacer las posibles condiciones de trabajo de un aerogenerador, se decide seleccionar el material "**PET (30% carbon fiber)**" por su accesibilidad económica, siendo este el de menor precio. De este material se muestran todas las propiedades que brinda el software en los anexos.

Conclusiones Parciales

- El método gráfico de la metodología de selección de materiales de Michael Ashby, implementa la utilización de gráficos y restricciones en conjunto para ir delimitando las propiedades de los materiales y a su vez poder realizar comparaciones entre ellos.
- Los principales criterios de selección para los materiales de las palas de un aerogenerador de eje horizontal, para nuestro país, son el bajo costo del material, que sea resistente a los aspectos medioambientales, resistente a las cargas provocadas por el viento y a la fatiga, que tenga una baja densidad y una tecnología de proceso disponible a nivel nacional.
- Las restricciones no negociables de la selección de materiales a considerar son la tensión de fluencia, la resistencia a la fatiga, el módulo de Young, la dureza y la temperatura de servicio. Las restricciones negociables son la resistencia del material a los agentes medioambientales, la baja densidad, un bajo costo, que sea reciclable o biodegradable.
- Luego de realizar 2 pasos de ranqueo para la selección de materiales para los soportes y la cubierta de las palas del aerogenerador de eje horizontal, se logró reducir la lista de materiales en el primer paso a 283 y 655 materiales respectivamente. Al realizar el segundo paso del ranqueo se determinó mediante el aspecto económico que el más rentable para los soportes es el *“PVC (rigid, molding and extrusion)”* y para la cubierta es el *“PET (30% carbon fiber)”*.

Conclusiones Generales

1. Los materiales más utilizados en las palas de aerogeneradores de eje horizontal son: acero, aluminio, madera, fibra de carbono, fibra de aramida (kevlar) y fibra de vidrio. El acero comercial es el más barato, las aleaciones de aluminio son ligeras y resistentes, y los polímeros reforzados al utilizar fibras (carbono, vidrio, aramida) tienen una excelente resistencia mecánica, al agua y a los rayos ultravioletas.
2. El análisis de los materiales más utilizados actualmente define e identifica las principales propiedades de estos, así como la variación que presenta la familia de dichos materiales. Las principales propiedades identificadas son: precio, densidad, módulo de Young, resistencia a la tracción y la resistencia a la fatiga.
3. Las cargas a las que se someten los álabes de un aerogenerador de eje horizontal son la fuerza F , que se descompone en sustentación y arrastre; y un momento M . Estas están definidas por la velocidad del viento, el área de barrida del rotor, las dimensiones y la resistencia aerodinámica de la pala, y la compresibilidad del fluido. Aunque también actúan otros parámetros como la solidez de los álabes, la velocidad específica y los coeficientes de los componentes del aerogenerador.
4. La metodología de selección de materiales mediante el método de Michael Ashby para los aerogeneradores de eje horizontal involucra una estrategia de 4 pasos, donde se establecen limitantes del diseño y restricciones negociables y no negociables que se deben cumplir. Se realiza un ranqueo para así encontrar los materiales que mejor se desempeñen. Se eliminan todos materiales que no cumplen con las restricciones y se realiza la selección final de un material que armonice los requerimientos de diseño.
5. La preselección de los materiales para las palas de los aerogeneradores de eje horizontal mediante la metodología de selección de Michael Ashby se lleva a cabo por separado para los soportes y la cubierta de las palas. Se determinó mediante el aspecto económico que el más rentable para los soportes es el *“PVC (rigid, molding and extrusion)”* y para la cubierta es el *“PET (30% carbon fiber)”*.

Recomendaciones

- Se recomienda la utilización del software Granta CES Edupack en futuros proyectos de diseño con la aplicación de la metodología de selección de materiales de Michael Ashby, ya que permite definir las limitaciones que estén presentes en el diseño para cada una de las partes por separado.
- Se recomienda tener en cuenta en la metodología para cada una de las partes otras propiedades mecánicas como el límite elástico, la resistencia a la tracción – compresión, la elongación, la dureza y la resistencia a la fatiga. Esto garantiza un rango de selección más específico para el diseño que se realiza y una selección del material más eficaz.
- Se recomienda trabajar con actualizaciones más recientes del software Granta CES Edupack, ya que en un rango de 5 años la metodología de selección ha de desarrollarse, incluyendo toda una gama de nuevos materiales.

Bibliografía

1. Aliexpress, 2015. "Generator - I&A," I&A New Energy.. [Online] Available at: http://es.aliexpress.com/store/group/generator/1398659_259034480.html.
2. Anon., 2014. Energía Eólica. [Online] Available at: <http://www.energiaeolica.org/> [Accessed 23 04 2018].
3. Anon., 2014. web.ing.puc.cl. [Online] Available at: <http://web.ing.puc.cl/~power/alumno03/alternativa.htm>. [Accessed 19 04 2018].
4. Arteaga, D. F. A., 2016. Diseño y construcción de un aerogenerador eólico de eje vertical tipo Savonius utilizando tubería de PVC, s.l.: s.n.
5. Ashby, M., 2011. Materials Selection in Mechanical Design. 4ta Edición, Elsevier, Butterworth-Heinemann (BH). s.l.:s.n.
6. Ashby, M., 2013. Materials and the Environment. Eco-Informed Material Choice. 2da Edición, Elsevier, Butterworth-Heinemann (BH).
7. Ashby, M., Shercliff, H. & Cebon, D., 2007. Materials: engineering, science, processing and design. 1ra Edición, Elsevier, Butterworth-Heinemann (BH)..
8. Association, Danish Wind Industry, 2003. [Online] Available at: <http://www.windpower.org>
9. Ávila, D. E. S., 2014. DETERMINACIÓN DE CARGAS Y MOMENTOS AERODINÁMICOS EN EL ÁLABE DE UNA TURBINA EÓLICA TIPO DARRIEUS DE PEQUEÑA ESCALA, Santiago de Chile: s.n.
10. Baldomero, M. P., 2012. Análisis de diferentes álabes de un aerogenerador de eje vertical para oxigenar estanques de peces.. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Issue 4, pp. 617-623.
11. Bastianon, R. A., 2008. CÁLCULO Y DISEÑO DE LA HÉLICE ÓPTIMA PARA TURBINAS EÓLICAS, s.l.: s.n.
12. Cabrera, L. V. R., 2016. SELECCIÓN DE MATERIALES PARA LAS PALAS DE UN AEROGENERADOR VERTICAL APLICANDO LA METODOLOGÍA DE MIKE ASHBY EN EL GRANTA CES EDUPACK 2015, Santo Domingo: s.n.
13. CAITA, C. E. & MOLINA, L. J. P., 2014. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN MINI AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL, s.l.: s.n.
14. Carta González, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A. & Castro Gil, M. A., 2009. Centrales de Energías Renovables Generación Eléctrica con Energías Renovables. In: s.l.:s.n.
15. Conde, S., 2012. Estudio de la fibra de coco con resina poliéster para la manufactura de palas de aerogeneradores de pequeña potencia..
16. Cuesta Santianes, M. J., Pérez Martínez, M. & Cabrera Jiménez, J. A., 2008. Aerogeneradores de potencia inferior a 100 kW. In: s.l.:s.n., pp. 1-37.
17. Díez, P. F., 1993. Energía eólica. Universidad de Cantabria, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, s.l.: s.n.
18. Figueredo, C. M., 2015. "El rotor de una turbina eólica". EcoSolar, Issue 38.

19. García Martínez, D., Ernesto González Chávez, E. & Vélez Gutiérrez, E., 2008. Diseño De Un Alabe De Un Rotor Eólico Aplicando El Método De Elemento Finito, s.l.: s.n.
20. Gil, M. C., 1997. Energía Eólica, Sevilla: Progensa.
21. Giner, D. T., 2013. Diseño de un aerogenerador de 1.8 Mw., Cartagena: s.n.
22. Granta CES EduPack, 2013.
23. Grantadesign.com, 2015. Granta's teaching resources for materials and process education.. [Online] Available at: <http://www.grantadesign.com/education/edupack>
24. Graterol, A. & Mayoral, G., 2006. Diseño de un aerogenerador de eje horizontal de 1 kW., s.l.: s.n.
25. Leal Rubio, M. et al., 2014. Diseño de Aerogeneradores. In: s.l.:s.n., pp. 17-22.
26. López, M. V., 2013. Ingeniería de la energía eólica. Alfaomega Colombia.. s.l.:s.n.
27. Martín Saravia, C., Saravia, L. J., Iparraguirre, J. & Cortínez, V. H., 2014. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES SECCIONALES DE ALABES DE GENERADORES EOLICOS DE MATERIAL COMPUESTO. pp. 1117-1127.
28. Morimitsu, D. T., 2015. DISEÑO DE UN GENERADOR EÓLICO DE EJE VERTICAL DE BAJA POTENCIA, Pereira: s.n.
29. Ocampo, L. F. G., 1993. Diseño de accionamientos y transmisión de máquinas., Pereira: s.n.
30. OPEXenergy Operación y Mantenimiento S.L., 2018. Eolica. [Online] Available at: <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/aerogeneradores/>
31. Ramírez, R., 2012. "Requerimientos en la selección de materiales". Selección de materiales.. [Online] Available at: <http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/41/inicio.htm>
32. Rossó, A., 2012. "El país tiene potencial para energía eólica" en Periódico Hoy. 2012-07-18, Economía.. [Online] Available at: <http://www.hoy.com.do/economia/2012/7/18/437611/El-pais-tiene-potencial-para-energia-eolica>.
33. Shackelford, J., 2010. Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros., s.l.: s.n.
34. UCLM, Grupo G-9, 2011. Energía Eólica, s.l.: s.n.
35. UPME, 2006. Atlas de Viento y de Energía Eólica de Colombia.. s.l.:s.n.
36. Urieta, E. Y. G., 2011. Diseño y manufactura del Hub y Alabes de una turbina de viento., s.l.: s.n.
37. Varios, 2014. Determinación de propiedades seccionales de alabes de generadores eólicos de material compuesto. [Online] Available at: <http://www.amcaonline.org.ar>
38. Weather Online, 2018. www.woespana.es. [Online] Available at: <https://www.woespana.es/weather/maps/city?FMM=1&FYY=2010&LMM=12&LYY=2018&WMO=78224&CONT=mamk®ION=0020&LAND=CU&ART=WST&R=0&NOREGION=0&LEVEL=162&LANG=es&MOD=tab>
39. Wikipedia, 2017. [Online] Available at: <https://es.wikipedia.org>

Anexos

Tabla A 1 Modelos comerciales de aerogeneradores de baja potencia.

| Marca | Modelo | Potencia (W) | Diámetro (m) | V _{nominal} (m/s) | Peso Neto (Kg.) | Precio |
|-------------------------------|--------------------|--------------|--------------|----------------------------|-----------------|----------|
| Bornay Aerogeneradores | <i>Inclin 250</i> | 250 | 1,4 | 11 | 32 | \$2.250 |
| | <i>Inclin 600</i> | 600 | 2 | 11 | 38 | \$3.030 |
| | <i>Inclin 1500</i> | 1.500 | 2,7 | 12 | 42 | \$4.470 |
| | <i>Inclin 3000</i> | 3.000 | 3,7 | 12 | 125 | \$6.950 |
| | <i>Inclin 6000</i> | 6.000 | 3,7 | 12 | 150 | \$12.220 |
| ARE Wind Generators | <i>ARE110</i> | 2.500 | 3,6 | 11 | 143 | \$11.500 |
| | <i>ARE442</i> | 10.000 | 7,2 | 11 | 610 | \$36.000 |
| Windstream Power | <i>AIR X</i> | 400 | 1,15 | 12,5 | 6 | \$680 |
| | <i>Whisper 100</i> | 900 | 2,1 | 12,5 | 21 | \$2.085 |
| | <i>Whisper 200</i> | 1.000 | 3 | 10,5 | 30 | \$2.490 |
| | <i>Whisper 500</i> | 3.000 | 4,5 | 11,3 | 80 | \$7.095 |
| PROVEN | <i>WT600</i> | 600 | 2,55 | 12 | 32 | \$3.300 |
| | <i>WT2500</i> | 2.500 | 3,5 | 12 | 86 | \$6.200 |
| | <i>WT6000</i> | 6.000 | 5,5 | 12 | 227 | \$12.900 |
| | <i>WT15000</i> | 15.000 | 9 | 12 | 500 | \$23.900 |
| JACOBS | <i>23-10</i> | 10.000 | 7 | 11,17 | 861 | \$24.260 |
| | <i>23-12,5</i> | 12.500 | 7 | 12 | 861 | \$24.260 |
| | <i>26-15</i> | 15.000 | 8 | 11,6 | 861 | \$24.260 |
| | <i>26-17,5</i> | 17.500 | 8 | 12 | 861 | \$24.260 |
| | <i>31-20</i> | 20.000 | 8,5 | 11,6 | 1.134 | \$25.000 |
| AMPAIR | <i>Pacific 100</i> | 100 | 0,9 | 12,5 | - | \$950 |
| | <i>Pacific 300</i> | 300 | 1,2 | 12,5 | - | \$1.650 |
| BERGEY | <i>XL.1</i> | 1.000 | 2,5 | 11 | 34 | \$2.590 |
| | <i>Excel</i> | 10.000 | 7 | 13 | 476 | \$18.400 |
| WESTWIND | <i>3KW</i> | 3.000 | 3,7 | 14 | 190 | \$6.900 |
| | <i>5KW</i> | 5.000 | 5,1 | 14 | 200 | \$10.900 |
| | <i>10KW</i> | 10.000 | 6,2 | 14 | 380 | \$19.500 |
| | <i>20KW</i> | 20.000 | 10,4 | 14 | 750 | \$33.900 |

Tabla A 2 Escala de Beaufort de la fuerza de los vientos.

| Escala de Beaufort | Velocidades de viento a 10 m de altura | | Denominación | Aspecto del mar | Efectos en tierra |
|--------------------|--|-------|--------------|---------------------------------|---|
| | km/h | nudos | | | |
| 0 | < 1 | < 1 | Calma | Despejado. | Calma, el humo asciende verticalmente. |
| 1 | 2 – 5 | 1 – 3 | Ventolina | Pequeñas olas, pero sin espuma. | El humo indica la dirección del viento. |

| | | | | | |
|-----------|-----------|---------|------------------------|--|---|
| 2 | 6 – 11 | 4 – 6 | Brisa débil | Crestas de apariencia vítrea, sin romper. | Se caen las hojas de los árboles, empiezan a moverse los molinos de los campos. |
| 3 | 12 – 19 | 7 – 10 | Brisa ligera | Pequeñas olas, crestas rompientes. | Se agitan las hojas, ondulan las banderas. |
| 4 | 20 – 28 | 11 – 16 | Brisa moderada | Borreguillos numerosos, olas cada vez más largas. | Se levanta polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles. |
| 5 | 29 – 38 | 17 – 21 | Brisa fresca | Olas medianas y alargadas, borreguillos muy abundantes. | Pequeños movimientos de los árboles, superficie de los lagos ondulada. |
| 6 | 39 – 49 | 22 – 27 | Brisa fuerte | Comienzan a formarse grandes olas, crestas rompientes, espuma. | Se mueven las ramas de los árboles, dificultad para mantener abierto el paraguas. |
| 7 | 50 – 61 | 28 – 33 | Viento fuerte | Mar gruesa, con espuma arrastrada en dirección del viento. | Se mueven los árboles grandes, dificultad para caminar contra el viento. |
| 8 | 62 – 74 | 34 – 40 | Viento duro (Temporal) | Grandes olas rompientes, franjas de espuma. | Se quiebran las copas de los árboles, circulación de personas muy dificultosa. |
| 9 | 75 – 88 | 41 – 47 | Temporal fuerte | Olas muy grandes, rompientes. Visibilidad mermada. | Daños en árboles, imposible andar contra el viento. |
| 10 | 89 – 102 | 48 – 55 | Temporal duro | Olas muy gruesas con crestas empenachadas. Superficie del mar blanca. | Árboles arrancados, daños en la estructura de las construcciones. |
| 11 | 103 – 117 | 56 – 63 | Temporal muy duro | Olas excepcionalmente grandes, mar completamente blanca, visibilidad muy reducida. | Destrucción en todas partes, lluvias muy intensas, inundaciones muy altas. |

| | | | | | |
|----|-------|------|-------------------|--|--|
| 12 | > 118 | > 64 | Viento huracanado | Olas excepcionalmente grandes, mar blanca, visibilidad nula. | Voladura de autos, árboles, casas, techos y personas. Puede generar un huracán o un tifón. |
|----|-------|------|-------------------|--|--|

Tabla A 3 Características principales calculadas.

| Pmax (kW) | Pw (kW) | ρ (kg/m ³) | A (m ²) | v (m/s) | r (m) | Pm (kW) | Cp | TSR | n (rpm) | Ω | Z | S (m ²) | C (m) | Pt (kW) | nm | Pe (kW) | ne | Pte (kW) |
|--------------|--------------|-----------------------------|---------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|------------|-------------|----------|---------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| 1.52 | 2.56 | 1.19 | 0.20 | 2.80 | 0.25 | 0.72 | 0.28 | 0.93 | 100 | 0.06 | 3 | 0.00 | 0.02 | 0.68 | 0.94 | 0.61 | 0.90 | 0.61 |
| 6.08 | 10.26 | 1.19 | 0.79 | 2.80 | 0.50 | 3.28 | 0.32 | 1.87 | 100 | 0.06 | 3 | 0.02 | 0.03 | 3.09 | 0.94 | 2.78 | 0.90 | 2.78 |
| 13.69 | 23.08 | 1.19 | 1.77 | 2.80 | 0.75 | 8.31 | 0.36 | 2.80 | 100 | 0.06 | 3 | 0.03 | 0.05 | 7.81 | 0.94 | 7.03 | 0.90 | 7.03 |
| 24.33 | 41.03 | 1.19 | 3.14 | 2.80 | 1.00 | 16.41 | 0.40 | 3.74 | 100 | 0.06 | 3 | 0.06 | 0.06 | 15.43 | 0.94 | 13.89 | 0.90 | 13.89 |
| 38.02 | 64.12 | 1.19 | 4.91 | 2.80 | 1.25 | 28.21 | 0.44 | 4.67 | 100 | 0.06 | 3 | 0.09 | 0.08 | 26.52 | 0.94 | 23.87 | 0.90 | 23.87 |
| 54.75 | 92.33 | 1.19 | 7.07 | 2.80 | 1.50 | 36.93 | 0.40 | 5.61 | 100 | 0.06 | 3 | 0.14 | 0.09 | 34.71 | 0.94 | 31.24 | 0.90 | 31.24 |
| 74.52 | 125.67 | 1.19 | 9.62 | 2.80 | 1.75 | 47.75 | 0.38 | 6.54 | 100 | 0.06 | 3 | 0.18 | 0.11 | 44.89 | 0.94 | 40.40 | 0.90 | 40.40 |
| 97.33 | 164.13 | 1.19 | 12.57 | 2.80 | 2.00 | 59.09 | 0.36 | 7.48 | 100 | 0.06 | 3 | 0.24 | 0.12 | 55.54 | 0.94 | 49.99 | 0.90 | 49.99 |
| 123.19 | 207.73 | 1.19 | 15.90 | 2.80 | 2.25 | 70.63 | 0.34 | 8.41 | 100 | 0.06 | 3 | 0.30 | 0.14 | 66.39 | 0.94 | 59.75 | 0.90 | 59.75 |
| 152.08 | 256.46 | 1.19 | 19.63 | 2.80 | 2.50 | 82.07 | 0.32 | 9.35 | 100 | 0.06 | 3 | 0.38 | 0.15 | 77.14 | 0.94 | 69.43 | 0.90 | 69.43 |
| 184.02 | 310.32 | 1.19 | 23.76 | 2.80 | 2.75 | 93.10 | 0.30 | 10.28 | 100 | 0.06 | 3 | 0.45 | 0.17 | 87.51 | 0.94 | 78.76 | 0.90 | 78.76 |
| 219.00 | 369.30 | 1.19 | 28.27 | 2.80 | 3.00 | 103.40 | 0.28 | 11.22 | 100 | 0.06 | 3 | 0.54 | 0.18 | 97.20 | 0.94 | 87.48 | 0.90 | 87.48 |
| 257.02 | 433.42 | 1.19 | 33.18 | 2.80 | 3.25 | 112.69 | 0.26 | 12.15 | 100 | 0.06 | 3 | 0.63 | 0.20 | 105.93 | 0.94 | 95.33 | 0.90 | 95.33 |
| 298.08 | 502.66 | 1.19 | 38.48 | 2.80 | 3.50 | 120.64 | 0.24 | 13.09 | 100 | 0.06 | 3 | 0.74 | 0.21 | 113.40 | 0.94 | 102.06 | 0.90 | 102.06 |
| 342.18 | 577.04 | 1.19 | 44.18 | 2.80 | 3.75 | 126.95 | 0.22 | 14.02 | 100 | 0.06 | 3 | 0.84 | 0.23 | 119.33 | 0.94 | 107.40 | 0.90 | 107.40 |
| 389.33 | 656.54 | 1.19 | 50.27 | 2.80 | 4.00 | 131.31 | 0.20 | 14.96 | 100 | 0.06 | 3 | 0.96 | 0.24 | 123.43 | 0.94 | 111.09 | 0.90 | 111.09 |
| 439.51 | 741.17 | 1.19 | 56.75 | 2.80 | 4.25 | 133.41 | 0.18 | 15.89 | 100 | 0.06 | 3 | 1.08 | 0.26 | 125.41 | 0.94 | 112.87 | 0.90 | 112.87 |
| 492.74 | 830.93 | 1.19 | 63.62 | 2.80 | 4.50 | 132.95 | 0.16 | 16.83 | 100 | 0.06 | 3 | 1.22 | 0.27 | 124.97 | 0.94 | 112.48 | 0.90 | 112.48 |
| 549.01 | 925.82 | 1.19 | 70.88 | 2.80 | 4.75 | 129.62 | 0.14 | 17.76 | 100 | 0.06 | 3 | 1.35 | 0.29 | 121.84 | 0.94 | 109.65 | 0.90 | 109.65 |
| 608.32 | 1025.84 | 1.19 | 78.54 | 2.80 | 5.00 | 123.10 | 0.12 | 18.70 | 100 | 0.06 | 3 | 1.50 | 0.30 | 115.72 | 0.94 | 104.14 | 0.90 | 104.14 |

Principales propiedades y características de los materiales más usados actualmente

Acero ordinario de bajo carbono (AISI 1117, AISI 1118, AISI 1020, AISI 1022, AISI 1015, AISI 1025): No hay ningún otro material que al mismo tiempo sea tan fuerte, tan tenaz y tan barato. Los aceros al carbono son aleaciones de hierro con carbón y a menudo un poco de manganeso, níquel y silicio. Son los más baratos de todos los metales estructurales (Granta CES EduPack, 2013). Las palas de acero son muy pesadas lo cual limita su aplicación en turbinas comerciales, sin embargo, el acero es clave en otros componentes del aerogenerador. Aporta una gran inercia a la máquina, lo cual amortigua los cambios en la velocidad de rotación haciendo que la potencia de salida sea más estable. Sus propiedades se muestran en la siguiente tabla:

Tabla A 4 Propiedades de los aceros de bajo carbono.

| Propiedad o Característica | Valor promedio | Valor máximo |
|----------------------------|----------------|--------------|
|----------------------------|----------------|--------------|

| | | |
|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| Precio | 0.56 USD\$/kg | 0.61 USD\$/kg |
| Densidad | 7800 kg/m ³ | 7900 kg/m ³ |
| Módulo de Young | 200 GPa | 215 GPa |
| Resistencia a la tracción | 345 MPa | 580 MPa |
| Fatiga (10 ⁷ ciclos) | 203 MPa | 293 MPa |

Aleaciones de Aluminio (6063): Esta aleación de aluminio tiene una resistencia mecánica media, puede ser tratada térmicamente y es soldable (Granta CES EduPack, 2013). El mayor problema de las aleaciones aluminio en las palas es su baja resistencia a la fatiga, sus niveles de esfuerzos admisibles disminuyen marcadamente en aplicaciones dinámicas a medida que incrementa los ciclos de esfuerzos. Sus propiedades se muestran en la siguiente tabla:

Tabla A 5 Propiedades del Aluminio 6063 forjado.

| Propiedad o Característica | Valor promedio | Valor máximo |
|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| Precio | 2.35 USD\$/kg | 2.74 USD\$/kg |
| Densidad | 2670 kg/m ³ | 2740 kg/m ³ |
| Módulo de Young | 67.2 GPa | 73 GPa |
| Resistencia a la tracción | 90.3 MPa | 291 MPa |
| Fatiga (10 ⁷ ciclos) | 55 MPa | 137 MPa |

Madera: Fue la materia prima principal de la ingeniería hasta finales del siglo XVII, y sigue siendo utilizada en escala masiva para viviendas y pequeños edificios comerciales. Los materiales naturales como la madera muestran una mayor variabilidad que los materiales artificiales como el acero (Granta CES EduPack, 2013). Sus propiedades se muestran en la siguiente tabla:

Tabla A 6 Propiedades de una Madera dura: roble, en la dirección de las fibras.

| Propiedad o Característica | Valor promedio | Valor máximo |
|---------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Precio | 0.68 USD\$/kg | 0.76 USD\$/kg |
| Densidad | 850 kg/m ³ | 1030 kg/m ³ |
| Módulo de Young | 20.6 GPa | 25.2 GPa |
| Resistencia a la tracción | 132 MPa | 162 MPa |
| Fatiga (10 ⁷ ciclos) | 42 MPa | 52 MPa |

Polímero reforzado con Fibra de Vidrio: Es el material para álabes de turbinas de viento más popular, tanto para turbinas pequeñas y grandes. El problema es que tiene dificultades para ser producido en hogares o empresas pequeñas pues necesitan tecnología y equipos profesionales (Granta CES EduPack, 2013). Las ventajas que presenta este material para las palas es su rigidez moderada, alta resistencia y densidad media. Sus propiedades se muestran en la siguiente tabla:

Tabla A 7 Propiedades de un polímero compuesto GFRP de Matriz Epoxídica reforzada con Fibra de Vidrio.

| Propiedad o Característica | Valor promedio | Valor máximo |
|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| Precio | 24.3 USD\$/kg | 34.4 USD\$/kg |
| Densidad | 1750 kg/m ³ | 1970 kg/m ³ |
| Módulo de Young | 15 GPa | 28 GPa |
| Resistencia a la tracción | 138 MPa | 241 MPa |
| Fatiga (10 ⁷ ciclos) | 55 MPa | 96 MPa |

Polímero reforzado con Fibra de Carbono: Es un material con excelente resistencia al agua y buena protección contra los rayos ultravioleta. Aquellos con mayor rigidez y resistencia se fabrican con fibras continuas, incrustadas en una resina termoestable (Granta CES EduPack, 2013). En los últimos años ha crecido el interés en las fibras de

carbono para las palas ya tiene una excelente combinación de alta rigidez y resistencia con una baja densidad y peso ligero. Su principal desventaja es que la fibra de carbono es cara, por eso se utiliza comúnmente en combinación con fibra de vidrio. Sus propiedades se muestran en la siguiente tabla:

Tabla A 8 Propiedades de un polímero compuesto CFRP de Matriz Epoxídica reforzada con Fibra de Carbono.

| Propiedad o Característica | Valor promedio | Valor máximo |
|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| Precio | 37.4 USD\$/kg | 41.6 USD\$/kg |
| Densidad | 1500 kg/m ³ | 1600 kg/m ³ |
| Módulo de Young | 69 GPa | 150 GPa |
| Resistencia a la tracción | 550 MPa | 1050 MPa |
| Fatiga (10 ⁷ ciclos) | 150 MPa | 300 MPa |

Plástico (PP – Polipropileno): La calidad estándar de PP es barata, ligera y dúctil, pero tiene poca resistencia. Es más rígido que el PE y puede ser utilizado a temperaturas más altas. Posee gran estabilidad ante la radiación UV (Granta CES EduPack, 2013). Sus propiedades se muestran en la siguiente tabla:

Tabla A 9 Propiedades del Polipropileno.

| Propiedad o Característica | Valor promedio | Valor máximo |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Precio | 1.92 USD\$/kg | 2.21 USD\$/kg |
| Densidad | 890 kg/m ³ | 910 kg/m ³ |
| Módulo de Young | 896 GPa | 1550 GPa |
| Resistencia a la tracción | 27.6 MPa | 41.4 MPa |
| Fatiga (10 ⁷ ciclos) | 11 MPa | 16.6 MPa |

Plástico (PE – Polietileno): Tiene una extraordinaria rigidez mecánica y resistencia, por lo que se usa en estructuras. Es barato, fácil de conformar, biológicamente inerte y

reciclable (Granta CES EduPack, 2013). Sus propiedades se muestran en la siguiente tabla:

Tabla A 10 Propiedades del Polietileno.

| Propiedad o Característica | Valor promedio | Valor máximo |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Precio | 1.76 USD\$/kg | 1.94 USD\$/kg |
| Densidad | 939 kg/m ³ | 960 kg/m ³ |
| Módulo de Young | 621 GPa | 896 GPa |
| Resistencia a la tracción | 20.7 MPa | 44.8 MPa |
| Fatiga (10 ⁷ ciclos) | 21 MPa | 23 MPa |

Ranqueo de los materiales para los soportes de las palas del aerogenerador.

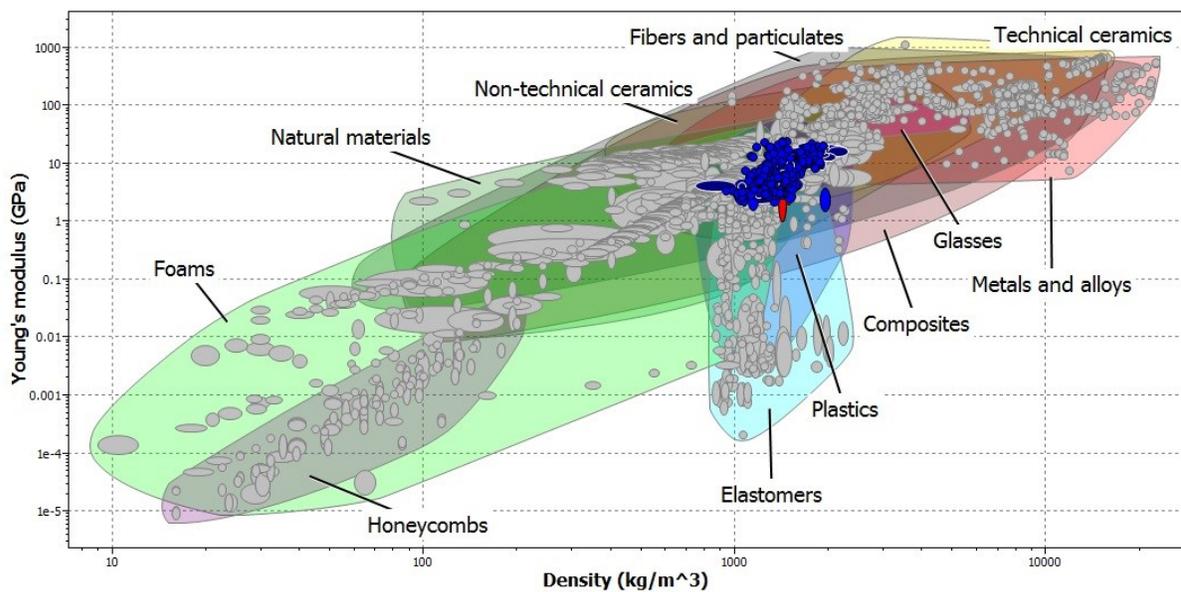


Figura A 1 Primer ranqueo de los materiales para los soportes. Young's modulus (GPa) vs. Density (kg/m³).

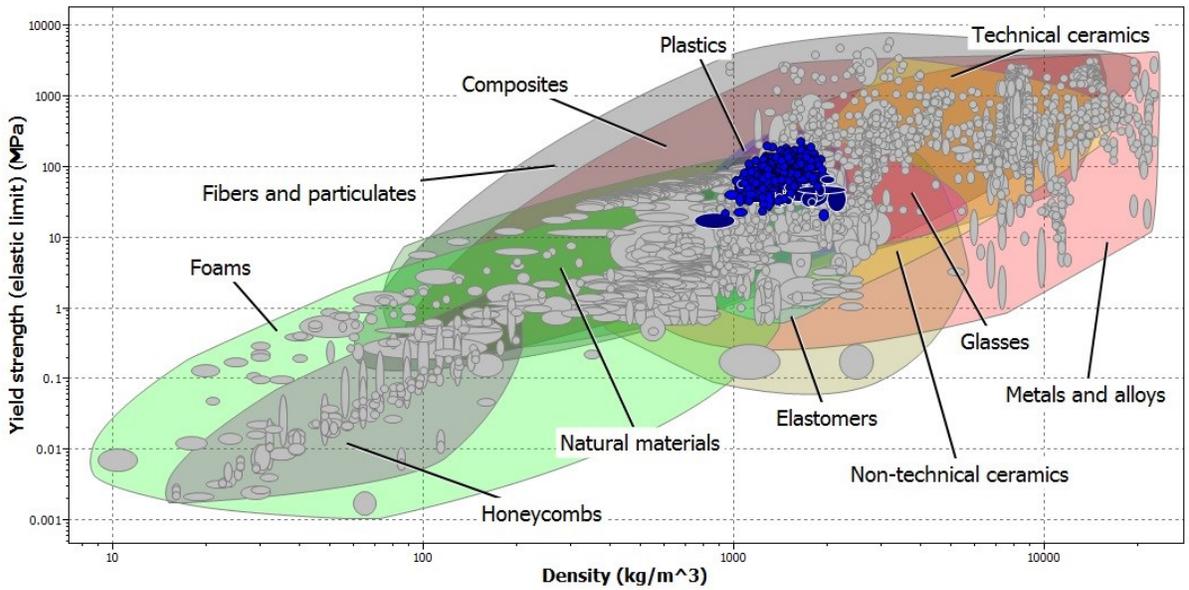


Figura A 2 Primer ranqueo de los materiales para los soportes. Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Density (kg/m³).

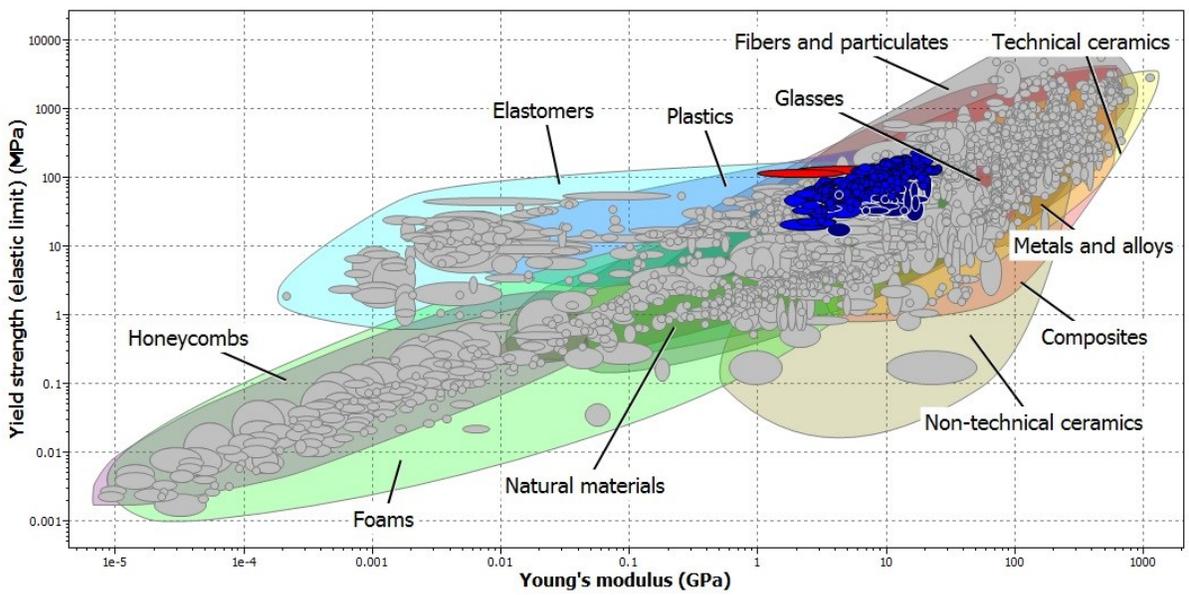


Figura A 3 Primer ranqueo de los materiales para los soportes. Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Young's modulus (GPa).

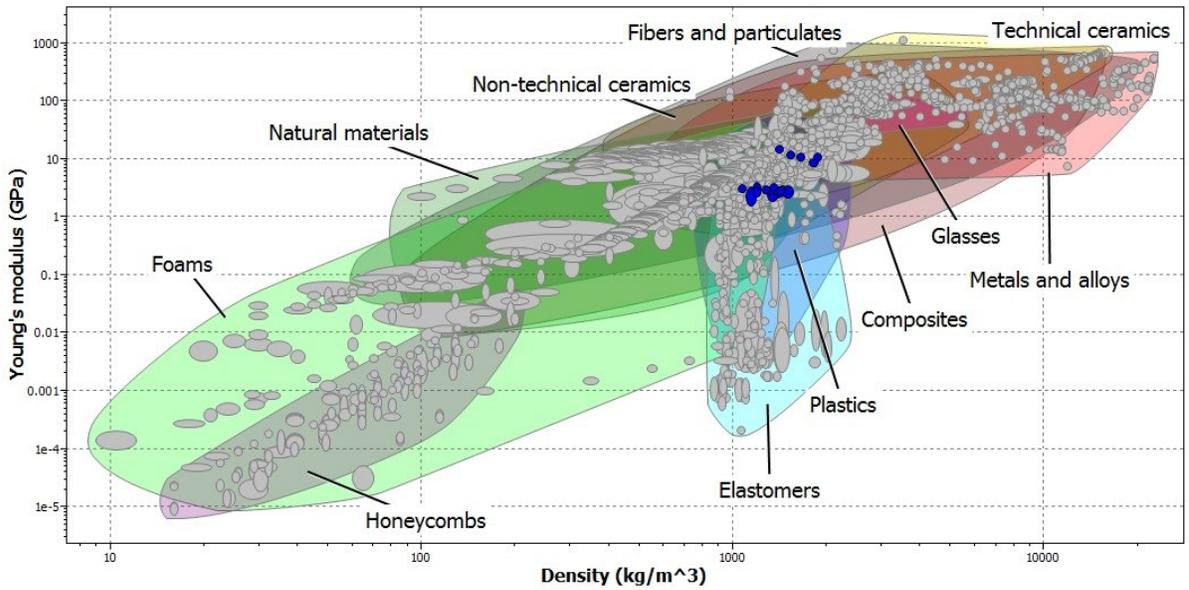


Figura A 4 Segundo ranqueo de los materiales para los soportes. Young's modulus (GPa) vs. Density (kg/m³).

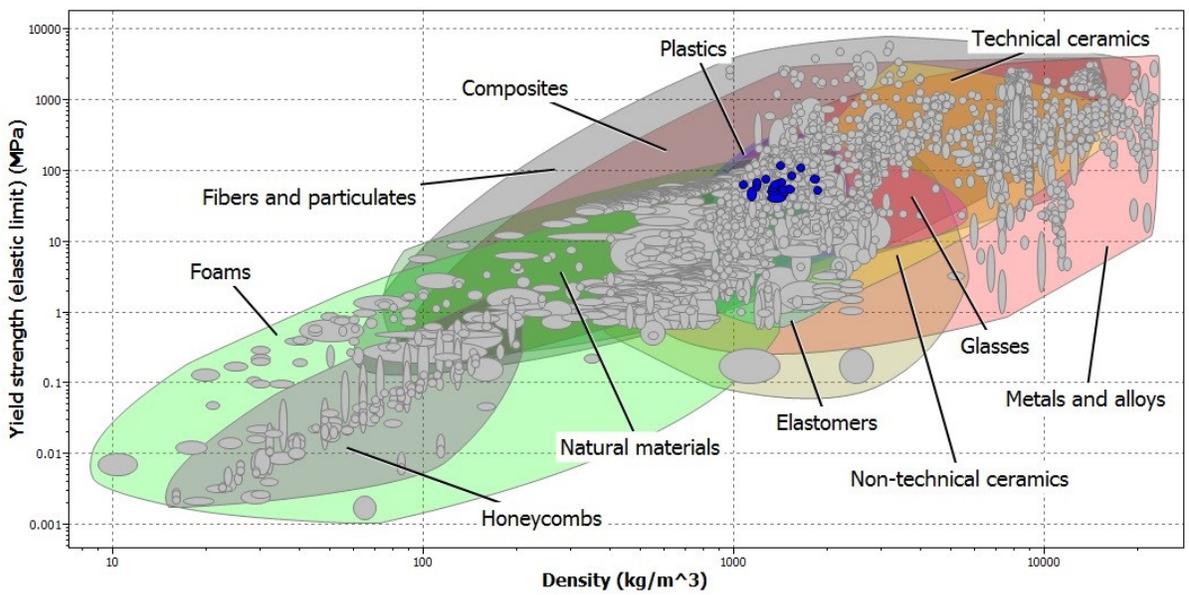


Figura A 5 Segundo ranqueo de los materiales para los soportes. Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Density (kg/m³).

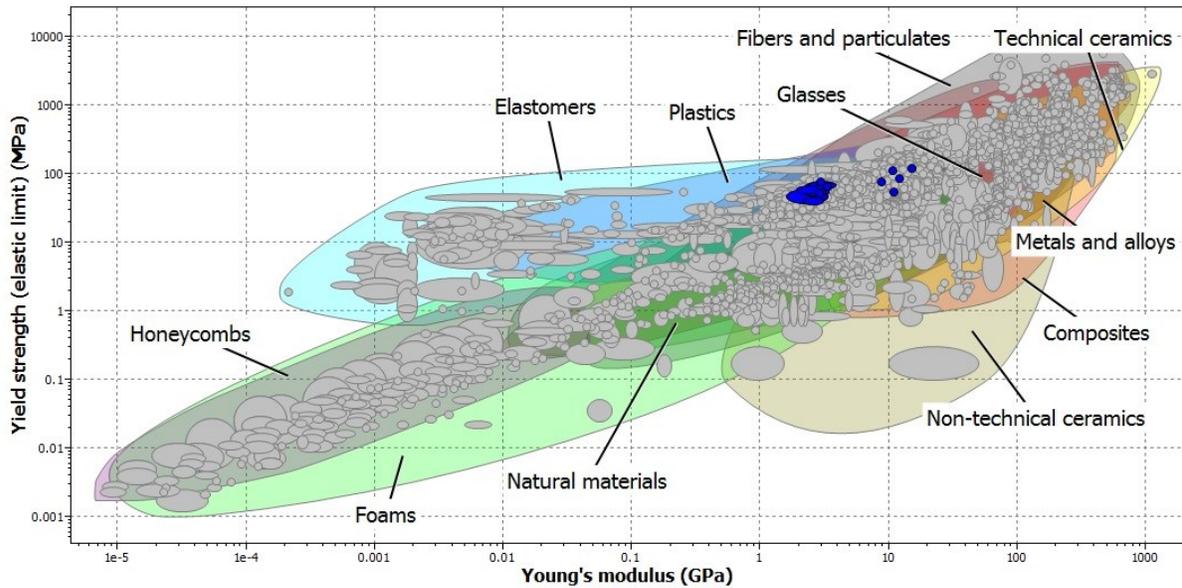


Figura A 6 Segundo ranqueo de los materiales para los soportes. Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Young's modulus (GPa).

Propiedades del material seleccionado “PVC (rigid, molding and extrusion)” para los soportes de las palas del aerogenerador.

PVC (rigid, molding and extrusion)

Identification

Designation

Poly Vinyl Chloride (Rigid, Molding); Type I

Tradenames

Acvitron; Advex; Alphacan; Apex; Apiflex; Arlinyl; Asnil; Benvic; Boltaron; Celtec; Certavin; Clealite; Crossvinil; Crylac; Decelith; Dural; Duromix; Ecolvin; Ecovil; Epivyl; EslonPlate; Etinox; Evicom; Evilon; Fiberloc; Formolon; Geon; GeonFiberloc; Hishiplate; Hy-Vin; Indovin; Kaneka; Lacovyl; Lajavinyl; Lucalor; Marvelate; Marvylan; Mazpound; Mecian; Mron; Nakan; NanYa; Neralit; Nipolit; Nordvil; Norvinyl; Novablend; Novacycle; Novatemp; Nuvin; Oxyclear; OxyVinyls; Palvinyl; Petvinil; Pevikon; Polanvil-S; Polyvin; Reon; Rimtec; Simona; Sinvoprene; Slovanyl; SolVin; Sumilite; Sunprene; Superkleen; Suvyl; Sylvil; Tanegum; Tarvinyl-S; Tecavinyl; Tefanyl; Treglum; Trocal; Tygon; Unichem; Vinidur; Vinika; Vinnolit; Vinoflex; Vintec; Vinuran; Vinycel; Vynychlon; Vinyfoil; Vistel

General Properties

| | | | | |
|---------|--------|---|--------|-------------------|
| Density | 1.3e3 | - | 1.49e3 | kg/m ³ |
| Price | * 1.41 | - | 1.55 | USD/kg |

Composition overview

Composition (summary)

Compound of PVC, (CH₂CHCl)_n, with stabilizer (commonly tin-based)

| | |
|------------------------|--|
| Base | Polymer |
| Polymer class | Thermoplastic : amorphous |
| Polymer type | PVC |
| Polymer type full name | Polyvinyl chloride, rigid, unplasticized |
| Filler type | Unfilled |

Composition detail (polymers and natural materials)

| | | |
|---------|-----|---|
| Polymer | 100 | % |
|---------|-----|---|

Mechanical properties

| | | | | |
|--|-----------|---|--------|----------------------|
| Young's modulus | 2.48 | - | 3.3 | GPa |
| Compressive modulus | * 2.41 | - | 3.3 | GPa |
| Flexural modulus | 2.7 | - | 3.4 | GPa |
| Shear modulus | * 0.883 | - | 1.18 | GPa |
| Poisson's ratio | * 0.395 | - | 0.405 | |
| Shape factor | 6.7 | | | |
| Yield strength (elastic limit) | 41.4 | - | 52.7 | MPa |
| Tensile strength | 41.4 | - | 52.7 | MPa |
| Compressive strength | * 37 | - | 44.3 | MPa |
| Flexural strength (modulus of rupture) | 83 | - | 92 | MPa |
| Elongation | 40 | - | 80 | % strain |
| Hardness - Vickers | * 12.4 | - | 15.8 | HV |
| Hardness - Rockwell M | * 72 | - | 90 | |
| Hardness - Rockwell R | 105 | - | 130 | |
| Hardness - Shore D | 80 | - | 85 | |
| Fatigue strength at 10 ⁷ cycles | * 16.6 | - | 21.1 | MPa |
| Fracture toughness | * 3.63 | - | 3.85 | MPa.m ^{0.5} |
| Mechanical loss coefficient (tan delta) | * 0.00966 | - | 0.0166 | |

Impact properties

| | | | | |
|----------------------------------|-----|---|-----|-------------------|
| Impact strength, notched 23 °C | 3.8 | - | 5.4 | kJ/m ² |
| Impact strength, notched -30 °C | * 1 | - | 2 | kJ/m ² |
| Impact strength, unnotched 23 °C | 590 | - | 600 | kJ/m ² |

Thermal properties

| | | | | |
|-------------------------------------|----|---|----|----|
| Glass temperature | 80 | - | 88 | °C |
| Heat deflection temperature 0.45MPa | 68 | - | 76 | °C |

| | | | | |
|---|--------------------|---|-------|---|
| <i>Heat deflection temperature 1.8MPa</i> | 65 | - | 73 | °C |
| <i>Maximum service temperature</i> | 50 | - | 65 | °C |
| <i>Minimum service temperature</i> | -10 | - | 0 | °C |
| <i>Thermal conductivity</i> | 0.147 | - | 0.209 | W/m.°C |
| <i>Specific heat capacity</i> | 1e3 | - | 1.1e3 | J/kg.°C |
| <i>Thermal expansion coefficient</i> | 90 | - | 180 | µstrain/°C |
| <u><i>Processing properties</i></u> | | | | |
| <i>Linear mold shrinkage</i> | 0.2 | - | 0.6 | % |
| <i>Melt temperature</i> | 177 | - | 199 | °C |
| <i>Mold temperature</i> | 20 | - | 40 | °C |
| <i>Molding pressure range</i> | 68.8 | - | 275 | MPa |
| <u><i>Electrical properties</i></u> | | | | |
| <i>Electrical resistivity</i> | 1e20 | - | 1e22 | µohm.cm |
| <i>Dielectric constant (relative permittivity)</i> | 3 | - | 3.2 | |
| <i>Dissipation factor (dielectric loss tangent)</i> | 0.02 | - | 0.03 | |
| <i>Dielectric strength (dielectric breakdown)</i> | 13.8 | - | 19.7 | MV/m |
| <i>Comparative tracking index</i> | 400 | - | 600 | V |
| <u><i>Optical properties</i></u> | | | | |
| <i>Refractive index</i> | 1.53 | - | 1.54 | |
| <i>Transparency</i> | Transparent | | | |
| <u><i>Absorption, permeability</i></u> | | | | |
| <i>Water absorption @ 24 hrs</i> | 0.04 | - | 0.4 | % |
| <i>Water vapor transmission</i> | 0.836 | - | 0.924 | g.mm/m ² .day |
| <i>Permeability (O2)</i> | 3.49 | - | 6.96 | cm ³ .mm/m ² .day.atm |
| <u><i>Durability: flammability</i></u> | | | | |
| <i>Flammability</i> | Self-extinguishing | | | |
| <u><i>Durability: fluids and sunlight</i></u> | | | | |
| <i>Water (fresh)</i> | Excellent | | | |
| <i>Water (salt)</i> | Excellent | | | |
| <i>Weak acids</i> | Excellent | | | |
| <i>Strong acids</i> | Excellent | | | |
| <i>Weak alkalis</i> | Excellent | | | |
| <i>Strong alkalis</i> | Excellent | | | |
| <i>Organic solvents</i> | Limited use | | | |
| <i>UV radiation (sunlight)</i> | Good | | | |

| | | | |
|--|---------------------|----------|--------------|
| <i>Oxidation at 500C</i> | <i>Unacceptable</i> | | |
| <u><i>Primary material production: energy, CO2 and water</i></u> | | | |
| <i>Embodied energy, primary production</i> | * 55.4 | - 61.2 | <i>MJ/kg</i> |
| <i>CO2 footprint, primary production</i> | * 2.37 | - 2.62 | <i>kg/kg</i> |
| <i>Water usage</i> | * 197 | - 218 | <i>l/kg</i> |
| <u><i>Material processing: energy</i></u> | | | |
| <i>Polymer extrusion energy</i> | * 5.65 | - 6.25 | <i>MJ/kg</i> |
| <i>Polymer molding energy</i> | * 14 | - 15.4 | <i>MJ/kg</i> |
| <i>Coarse machining energy (per unit wt removed)</i> | * 0.751 | - 0.83 | <i>MJ/kg</i> |
| <i>Fine machining energy (per unit wt removed)</i> | * 3.24 | - 3.58 | <i>MJ/kg</i> |
| <i>Grinding energy (per unit wt removed)</i> | * 6 | - 6.63 | <i>MJ/kg</i> |
| <u><i>Material processing: CO2 footprint</i></u> | | | |
| <i>Polymer extrusion CO2</i> | * 0.424 | - 0.469 | <i>kg/kg</i> |
| <i>Polymer molding CO2</i> | * 1.05 | - 1.16 | <i>kg/kg</i> |
| <i>Coarse machining CO2 (per unit wt removed)</i> | * 0.0564 | - 0.0623 | <i>kg/kg</i> |
| <i>Fine machining CO2 (per unit wt removed)</i> | * 0.243 | - 0.268 | <i>kg/kg</i> |
| <i>Grinding CO2 (per unit wt removed)</i> | * 0.45 | - 0.498 | <i>kg/kg</i> |
| <u><i>Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction</i></u> | | | |
| <i>Recycle</i> | <i>True</i> | | |
| <i>Embodied energy, recycling</i> | * 18.8 | - 20.8 | <i>MJ/kg</i> |
| <i>CO2 footprint, recycling</i> | * 0.805 | - 0.89 | <i>kg/kg</i> |
| <i>Recycle fraction in current supply</i> | 1.43 | - 1.58 | <i>%</i> |
| <i>Downcycle</i> | <i>True</i> | | |
| <i>Combust for energy recovery</i> | <i>True</i> | | |
| <i>Heat of combustion (net)</i> | * 17.5 | - 18.4 | <i>MJ/kg</i> |
| <i>Combustion CO2</i> | * 1.37 | - 1.44 | <i>kg/kg</i> |
| <i>Landfill</i> | <i>True</i> | | |
| <i>Biodegrade</i> | <i>False</i> | | |
| <i>A renewable resource?</i> | <i>False</i> | | |

Notes

Typical uses

Pipe and pipe fittings; building products; bottles; film; records; floor tiling.

Ranqueo de los materiales para la cubierta de las palas del aerogenerador.

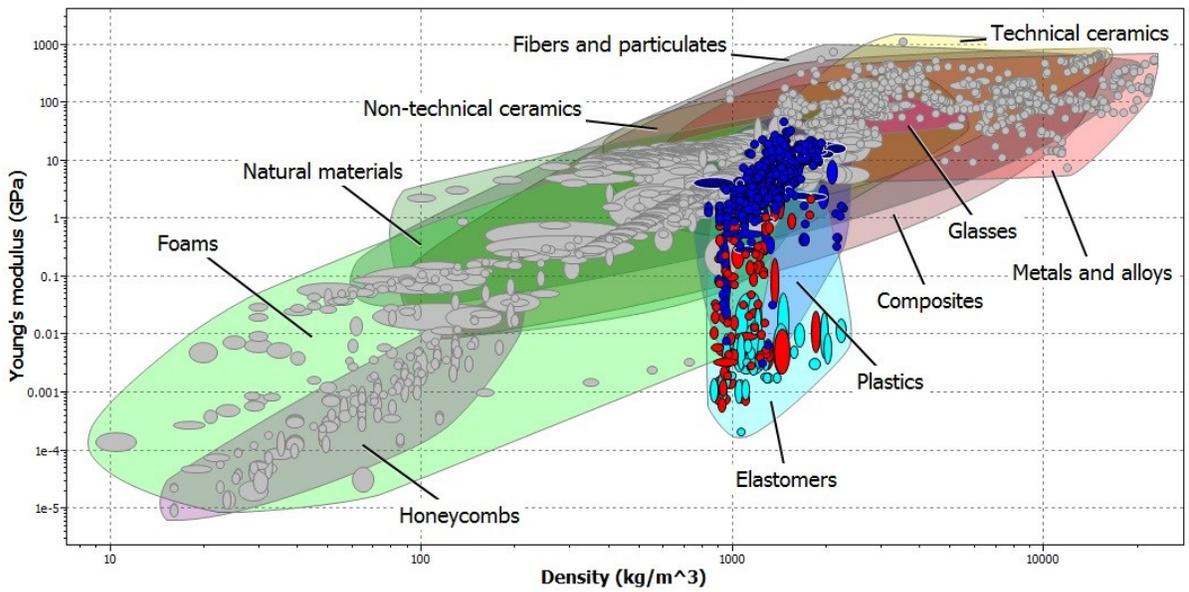


Figura A 7 Primer ranqueo de los materiales para la cubierta. Young's modulus (GPa) vs. Density (kg/m³).

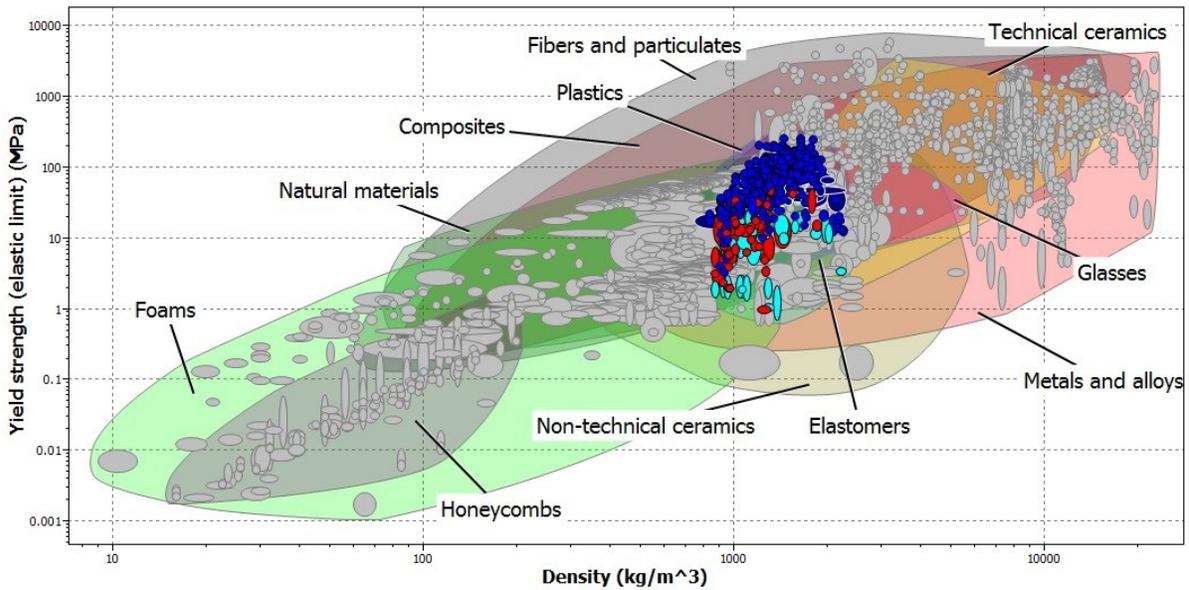


Figura A 8 Primer ranqueo de los materiales para la cubierta. Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Density (kg/m³).

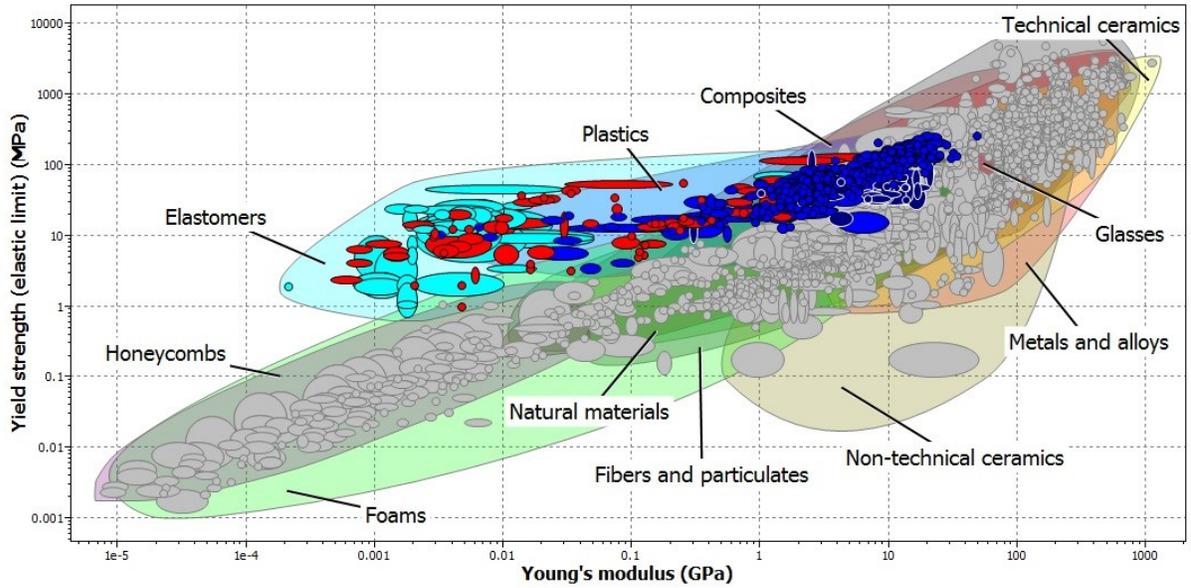


Figura A 9 Primer ranqueo de los materiales para la cubierta. Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Young's modulus (GPa).

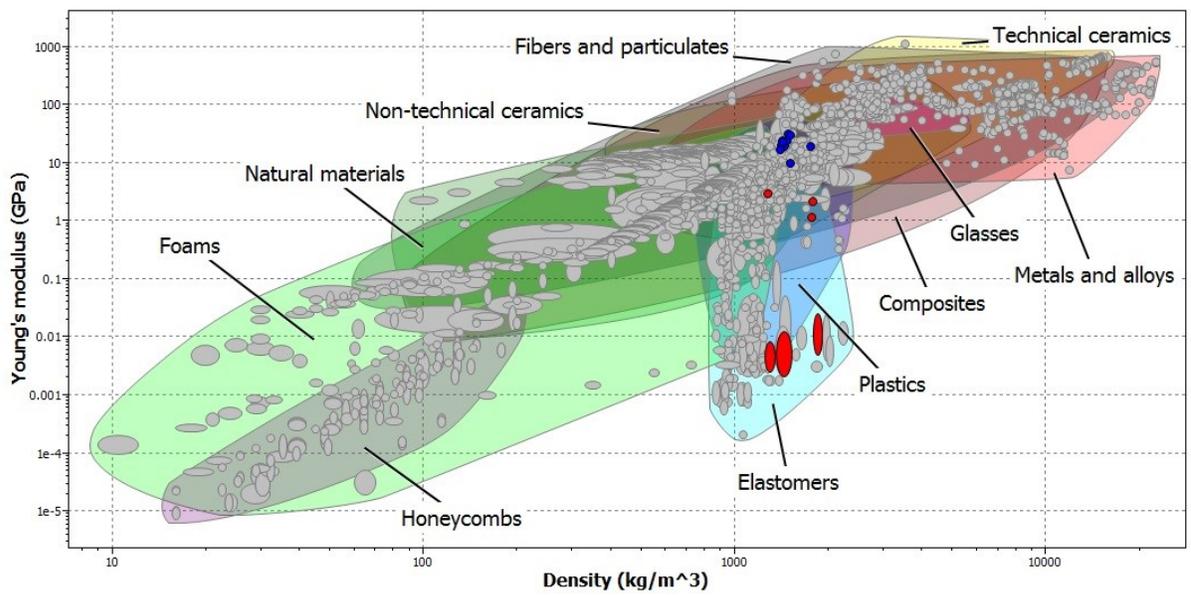


Figura A 10 Segundo ranqueo de los materiales para la cubierta. Young's modulus (GPa) vs. Density (kg/m³).

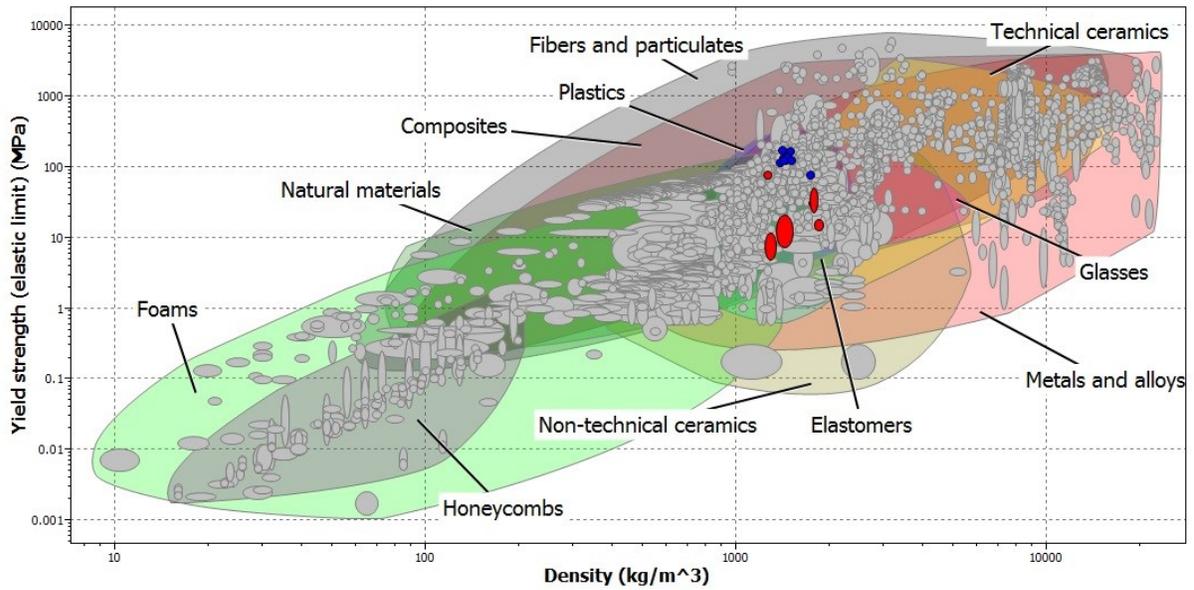


Figura A 11 Segundo ranqueo de los materiales para la cubierta. Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Density (kg/m³).

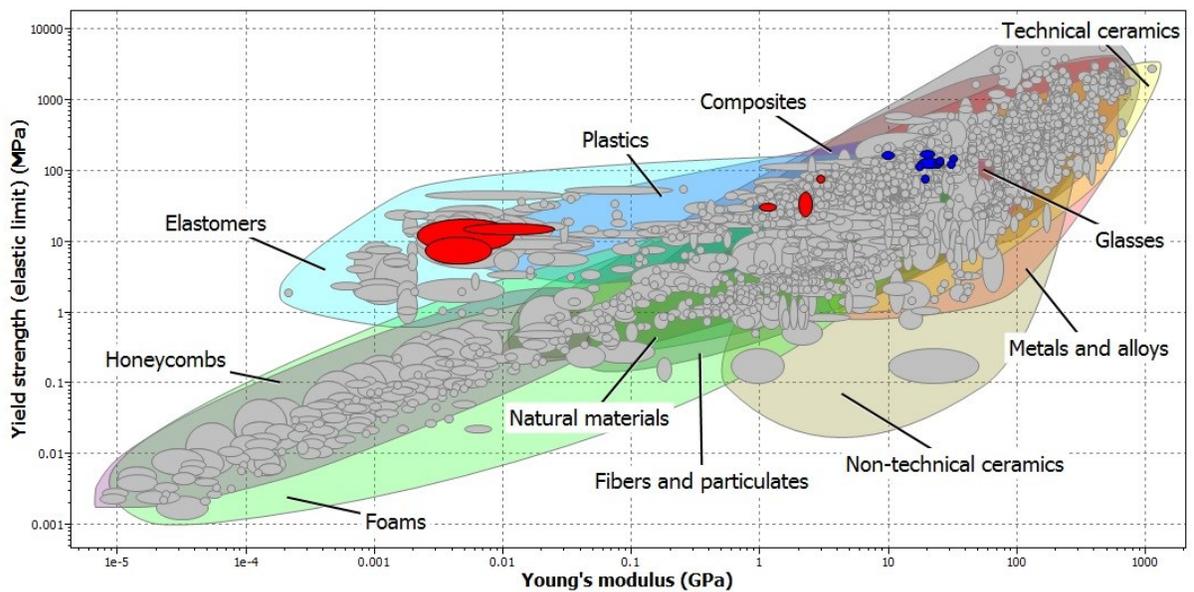


Figura A 12 Segundo ranqueo de los materiales para la cubierta. Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Young's modulus (GPa).

Propiedades del material seleccionado “PET (30% carbon fiber)” para la cubierta de las palas del aerogenerador.

PET (30% carbon fiber)

Identification

Designation

Polyethylene Terephthalate (30% PAN Carbon Fiber, Conductive - EMI Shielding)

Tradenames

Anjadur; Arnite; Aspect; Axpet; Azdel; Cleartuf; Cobiter; Cronar; Crystar; Dialamy; Eastabond; Eastapak; Ekolon; Ektar; Encore; Enpla; Ensitemp; Ertalyte; Eslon; Esmo; HiPET; Hostaglas; Hylox; Hyperite; Impet; Kodapak; Kopel; Kopet; Lamapet; Laser+; Lupet; Maxnite; Melinar; Melinex; Murylat; Mylar; Nopla; Novapet; Permastat; Petra; Pibiter; Raditer; Relpet; Rynite; Sedapet; Selar; Serapet; Shinite; Shinlon; Shinpet; Skypet; Sustadur; Tairilin; Tarolox; Tarolux; Tecadur; Terphane; Tetron; Texpet; Thermx; Trelgum; Tripet; Tynep; Valox; Vivak; Vylopet

General Properties

| | | |
|---------|-----------------|-------------------|
| Density | 1.41e3 - 1.43e3 | kg/m ³ |
| Price | * 10.5 - 11.6 | USD/kg |

Composition overview

Composition (summary)

(CO-(C6H4)-CO-O-(CH2)2-O)_n + C filler

| | |
|------------------------|----------------------------------|
| Base | Polymer |
| Polymer class | Thermoplastic : semi-crystalline |
| Polymer type | PET |
| Polymer type full name | Polyethylene terephthalate |
| % filler (by weight) | 30 % |
| Filler type | Carbon fiber |

Composition detail (polymers and natural materials)

| | | |
|----------------|----|---|
| Polymer | 70 | % |
| Carbon (fiber) | 30 | % |

Mechanical properties

| | | |
|---------------------|-----------------|-----|
| Young's modulus | 24.2 - 25.4 | GPa |
| Compressive modulus | * 24.2 - 25.4 | GPa |
| Flexural modulus | 18.1 - 19 | GPa |
| Shear modulus | * 9.18 - 9.64 | GPa |
| Bulk modulus | * 22.1 - 23.2 | GPa |
| Poisson's ratio | * 0.311 - 0.324 | |

| | | | |
|--|-----------|----------|----------------------|
| Shape factor | 12 | | |
| Yield strength (elastic limit) | * 131 | - 145 | MPa |
| Tensile strength | 164 | - 181 | MPa |
| Compressive strength | * 157 | - 174 | MPa |
| Flexural strength (modulus of rupture) | 250 | - 275 | MPa |
| Elongation | 1.3 | - 1.51 | % strain |
| Hardness - Vickers | * 39.4 | - 43.4 | HV |
| Hardness - Rockwell M | * 100 | - 110 | |
| Hardness - Rockwell R | * 121 | - 133 | |
| Fatigue strength at 10 ⁷ cycles | * 60.5 | - 78.7 | MPa |
| Fracture toughness | * 4.84 | - 6.71 | MPa.m ^{0.5} |
| Mechanical loss coefficient (tan delta) | * 0.00416 | - 0.0043 | |
| <u>Impact properties</u> | | | |
| Impact strength, notched 23 °C | 7.5 | - 8.3 | kJ/m ² |
| <u>Thermal properties</u> | | | |
| Melting point | 246 | - 266 | °C |
| Glass temperature | 60 | - 84 | °C |
| Heat deflection temperature 0.45MPa | * 223 | - 273 | °C |
| Heat deflection temperature 1.8MPa | 198 | - 246 | °C |
| Maximum service temperature | * 177 | - 195 | °C |
| Minimum service temperature | * -58 | - -38 | °C |
| Thermal conductivity | * 0.68 | - 0.707 | W/m.°C |
| Specific heat capacity | * 1.36e3 | - 1.42e3 | J/kg.°C |
| Thermal expansion coefficient | * 21.1 | - 21.5 | µstrain/°C |
| <u>Processing properties</u> | | | |
| Linear mold shrinkage | 0.1 | - 0.2 | % |
| Melt temperature | 234 | - 310 | °C |
| Mold temperature | 110 | - 135 | °C |
| Molding pressure range | * 68.8 | - 138 | MPa |
| <u>Electrical properties</u> | | | |
| Electrical resistivity | * 1e6 | - 1e7 | µohm.cm |
| Galvanic potential | 0.14 | - 0.22 | V |
| <u>Optical properties</u> | | | |
| Transparency | Opaque | | |
| <u>Absorption, permeability</u> | | | |

| | | | | |
|---|------------------|---|-------|-------|
| Water absorption @ 24 hrs | 0.0455 | - | 0.055 | % |
| <u>Durability: flammability</u> | | | | |
| Flammability | Highly flammable | | | |
| <u>Durability: fluids and sunlight</u> | | | | |
| Water (fresh) | Excellent | | | |
| Water (salt) | Excellent | | | |
| Weak acids | Acceptable | | | |
| Strong acids | Unacceptable | | | |
| Weak alkalis | Acceptable | | | |
| Strong alkalis | Limited use | | | |
| Organic solvents | Limited use | | | |
| UV radiation (sunlight) | Excellent | | | |
| Oxidation at 500C | Unacceptable | | | |
| <u>Primary material production: energy, CO2 and water</u> | | | | |
| Embodied energy, primary production | * 143 | - | 159 | MJ/kg |
| CO2 footprint, primary production | * 9.3 | - | 10.3 | kg/kg |
| Water usage | * 681 | - | 753 | l/kg |
| <u>Material processing: energy</u> | | | | |
| Polymer extrusion energy | * 5.89 | - | 6.5 | MJ/kg |
| Polymer molding energy | * 20.5 | - | 22.6 | MJ/kg |
| Coarse machining energy (per unit wt removed) | * 1.58 | - | 1.75 | MJ/kg |
| Fine machining energy (per unit wt removed) | * 11.5 | - | 12.7 | MJ/kg |
| Grinding energy (per unit wt removed) | * 22.6 | - | 25 | MJ/kg |
| <u>Material processing: CO2 footprint</u> | | | | |
| Polymer extrusion CO2 | * 0.441 | - | 0.488 | kg/kg |
| Polymer molding CO2 | * 1.53 | - | 1.7 | kg/kg |
| Coarse machining CO2 (per unit wt removed) | * 0.119 | - | 0.131 | kg/kg |
| Fine machining CO2 (per unit wt removed) | * 0.865 | - | 0.956 | kg/kg |
| Grinding CO2 (per unit wt removed) | * 1.69 | - | 1.87 | kg/kg |
| <u>Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction</u> | | | | |
| Recycle | False | | | |
| Recycle fraction in current supply | 0.1 | | | % |
| Downcycle | True | | | |
| Combust for energy recovery | True | | | |
| Heat of combustion (net) | * 25.7 | - | 27 | MJ/kg |

| | | | | |
|------------------------------|---------------|----------|-------------|--------------|
| <i>Combustion CO2</i> | <i>* 2.64</i> | <i>-</i> | <i>2.77</i> | <i>kg/kg</i> |
| <i>Landfill</i> | <i>True</i> | | | |
| <i>Biodegrade</i> | <i>False</i> | | | |
| <i>A renewable resource?</i> | <i>False</i> | | | |

Notes

Typical uses

Electrical fittings and connectors; blow molded bottles; packaging film; film; photographic and X-ray film; audio/visual tapes; industrial strapping; capacitor film; drawing office transparencies; fibers.