

DISEÑO DE UN AEROGENERADOR QUE APOYE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE
UN HOGAR PROMEDIO EN BOGOTÁ.

Autores

JUAN DAVID LUCERO FIGUEROA

SEBASTIÁN MOYA MONTOYA

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C.

2016

DISEÑO DE UN AEROGENERADOR QUE APOYE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE
UN HOGAR PROMEDIO EN BOGOTÁ.

Autores

JUAN DAVID LUCERO FIGUEROA

SEBASTIÁN MOYA MONTOYA

Proyecto de grado para optar los títulos profesionales de ingenieros mecánicos

Director

Juan Eduardo Rolón Ríos

Ingeniero mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C.

2016

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a nuestros padres por su apoyo incondicional en todo momento.

Juan David Lucero Figueroa

Sebastián Moya Montoya

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todas las personas que nos acompañaron a lo largo de nuestro proceso de formación dentro y fuera de la universidad; a todos los profesores que han impactado de manera positiva en nuestras vidas académicas y finalmente a nuestro director del proyecto Juan Eduardo Rolón por su orientación y apoyo.

NOTA DE ACEPTACIÓN:

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	6
JUSTIFICACIÓN	7
RELEVANCIA SOCIAL.....	7
OBJETIVOS	9
OBJETIVO GENERAL.....	9
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
ESTADO DEL ARTE	10
MARCO TEÓRICO.....	13
Aerogeneradores de eje vertical.....	13
Aerogenerador tipo savonius:.....	13
Aerogenerador tipo Darrieus.....	14
Aerogeneradores de eje horizontal.....	14
Aerodinámica	15
Perfiles aerodinámicos.....	16
Denominación De Perfiles.....	16
Número de Reynolds.....	17
Potencia.....	17
1. PARÁMETROS DE DISEÑO	18
1.1. DETERMINACIÓN DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UN HOGAR PROMEDIO EN BOGOTÁ.....	18
1.2. Selección de la dirección del eje de giro de la turbina y geometría de los álabes.....	20
1.3. Propiedades del viento para el funcionamiento del aerogenerador.....	20
1.3.1. Velocidad Del Viento.....	20
1.3.2. Densidad del aire de Bogotá.....	21

1.3.3.	Potencia disponible en el viento	21
1.3.4.	Eficiencia de la turbina	22
2.	DISEÑO DEL AEROGENERADOR	24
2.1.	DIMENSIONAMIENTO	24
2.2.	Estimación de la viscosidad del aire, cuerda de los perfiles y número de Reynolds	29
2.2.1.	Estimación de la cuerda	29
2.2.2.	Viscosidad del aire.....	30
2.2.3.	Cálculo del número de Reynolds.....	30
2.3.	Selección de perfiles alares	31
2.4.	Simulaciones en el Software Qblade v0.96	33
2.5.	Diseño de elementos de mecánicos.....	34
2.5.1.	Dimensionamiento de los álabes	34
2.5.2.	Diseño del eje del rotor	36
2.5.3.	RODAMIENTOS.....	38
2.5.3.	Diseño de los soportes de los álabes.	39
2.5.4.	Selección de pernos	41
2.5.5.	Selección de generador eléctrico	41
3.	Análisis de resultados	42
4.	Conclusiones	47
5.	Trabajos futuros.....	48
6.	Bibliografía.....	49
7.	ANEXOS.....	52
7.1.	Simulaciones.....	54

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 consumo de energía eléctrica per cápita en la región capital entre 2000 y 2012 (KWh habitante)	18
Tabla 2, velocidad del viento en la superficie, Bogotá D.C.	20
Tabla 3, análisis psicométrico para la obtención de la densidad el aire en Bogotá.	21
Tabla 4, coeficientes de pérdidas de los elementos de la turbina.....	22
Tabla 5, datos obtenidos de la turbina Street Light SAWT	26
Tabla 6,datos obtenidos de la turbina D100 Wind Turbine	26
Tabla 7, datos obtenidos de la turbina Aeolos-V 300w	26
Tabla 8, datos de diámetro y altura para el área deseada de (4,276m ²) según las relaciones consultadas	28
Tabla 9, medidas y relaciones (h/c) de los aerogeneradores a escala	29
Tabla 10, medidas y relaciones (h/c) de los aerogeneradores a escala real	29
Tabla 11, interpolación para hallar la viscosidad	30
Tabla 12, Tabla Geometría de los perfiles alares	32
Tabla 13, variables disponibles para la matriz de combinación.	32
Tabla 14, Matriz de combinación (dh – perfil NACA- cuerda de los perfiles (m))..	32
Tabla 15, Dimensiones correspondientes a la Figura 15	40
Tabla 16, Dimensiones de la turbina seleccionada.....	42
Tabla 17 Masa del aerogenerador	46
Tabla 18, Matriz de selección	52
Tabla 19 , variables relacionadas en el cálculo de esfuerzos para la selección de pernos.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura1, vortexbladeless	10
Figura2, windtree	11
Figura3, turbina Kliux	12
Figura4, Aerogenerador tipo Savonius	13
Figura5, Aerogenerador tipo Darrieus.....	14
Figura6, perfil aerodinámico de una pala	16
Figura7, Aelos v 300w	24
Figura8, D100Wind turbine	24
Figura9, p300V	25
Figura10, Representación área transversal del rotor	25
Figura11,diagrama de la vista superior con las fuerzas que actúan en el perfil alar de una turbina de eje vertical	31
Figura12, vista superior de un corte transversal del álabe (perfil NACA 4415).....	34
Figura13, vista superior del eje del rotor	37
Figura14, representación de las fuerzas que se ejercen en los soportes de los álabes	39
Figura15, indicación de las longitudes de la sección transversal del soporte	40
Figura16, dimensiones del vástago y la rosca del perno seleccionado	41
Figura17, generador PM tech Ne-500.....	42
Figura18 Rotor del aerogenerador	45

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1, consumo mundial de energía primaria (año 2013)	7
Gráfica 2, consumo de energía eléctrica promedio en los hogares bogotanos clasificado por estrato socioeconómico. (KWh por hogar)	19
Gráfica 3, Consumo per cápita de energía eléctrica en Bogotá según estrato socioeconómico, 2012 (KWh por habitante)	19
Gráfica 4, potencia vs velocidad del viento de la turbina seleccionada	43
Gráfica 5, zoom de la Gráfica 4	43
Gráfica 6, Potencia vs Área transversal del rotor en condiciones atmosféricas de Bogotá.	45
Gráfica 7, 1,33 – 0012-0,46, área: 1 649 U2	54
Gráfica 8, 1,33-0012-0,27, Área: 2 570,7 U2	54
Gráfica 9, 1-0012-0,46, área: 1 814,6 U2	55
Gráfica 10, 1-0012-0,27 área: 2 491,6 U2	55
Gráfica 11, 0,971-0012-0,46, área: 1806,2 U2	55
Gráfica 12, 0,971-0012-0,27, área: 2502,1 U2	56
Gráfica 13, 1,33 – 4412-0,46, área: 2240,3 U2	56
Gráfica 14, 1,33-4412-0,27, área: 1492,2 U2	56
Gráfica 15, 1-4412-0,46, área: 1998,4 U2	57
Gráfica 16, 1-4412-0,27, área: 1348,7 U2	57
Gráfica 17, 0,971-4412-0,46, área: 1990,4 U2	57
Gráfica 18, 0,971-4412-0,27, área: 1297,4 U2	58
Gráfica 19, 1,33 – 4415-0,46, área: 3240,7	58
Gráfica 20, 1,33-4415-0,27, área:688,4 U2	58
Gráfica 21, 1-4415-0,46, área: 2722,602193 U2	59
Gráfica 22, 1-4415-0,27, área: 657,62321 U2	59
Gráfica 23, 0,971-4415-0,46, área: 2546,639195 U2	59
Gráfica 24, 0,971-4415-0,27, área: 655,4 U2	60

GLOSARIO DE VARIABLES

Símbolo	magnitud	unidad
A	Área	m^2
C	cuerda de los perfiles alares	m
d (con varios subíndices)	Diámetro	m
E	Módulo de Young	Pa
F	Fuerza	N
h (con varios subíndices)	Altura	m
I(con varios subíndices)	Inercia	$kg\ m^2$
J	Momento polar de inercia	m^4
L	Longitud	m
m	Masa	kg
N	Factor de seguridad	
η	Eficiencia de la turbina	
P	Potencia	W
r	Radio	m
Sy	Limite fluencia elástico	Pa
T	Torque	$N\ m$
V	Volumen	m^3
v	Velocidad del viento	$\frac{m}{s}$
ω	Velocidad angular	$\frac{rad}{s}$ o rpm
ρ	Densidad	$\frac{kg}{m^3}$
μ	viscosidad dinámica	$\frac{Kg}{m\ s}$
Δ	Deflexión	mm
ϕ	Diámetro	m

RESUMEN

El presente documento muestra el diseño de un aerogenerador de eje vertical, que debe satisfacer como mínimo la demanda del 20% del consumo de energía eléctrica de un hogar promedio en Bogotá. Todo esto a partir de las variables del aire que se presentan en la ciudad mencionada. Además, la apariencia es un factor importante en el diseño del aerogenerador, para que además de producir energía, este adorne el lugar donde sea ubicado.

A través del documento describen los procesos matemáticos, métodos de diseño y argumentos de las decisiones tomadas que son relevantes para el desarrollo del diseño.

Palabras clave

AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL, ENERGÍA ELÉCTRICA, DISEÑO, HOGAR PROMEDIO, AIRE, APARIENCIA.

INTRODUCCIÓN

El consumo de energía mundial ya sea por entidades empresariales o el simple hecho de actividades en el hogar, han generado que el consumo de energía aumente cada año, esto se debe a factores de desarrollo tecnológico, investigativo, consumismo, industrialización y sobrepoblación de cada país.

En el caso de Colombia en los últimos 10 años tuvo en promedio un crecimiento en el consumo de 2.9 % cada año¹, siendo el 2011 el año con mayor aumento con un 3.8% con valores registrados de 59 370 GWh (4)² y se estima un aumento a largo plazo de 4.6 % anual en el periodo de 2016 -2026 (6)³ utilizando como la mayor fuente de producción con 75 % en el 2012 (3)⁴ la energía por medio de centrales hidroeléctricas, pero como sabe la producción de esta energía causa en impacto ambiental en flora y fauna de los lugares en donde se asientan dichas centrales el porcentaje restante se produce por fuentes de energías menos limpias como derivados del petróleo, carbón y gas natural.

Como es tan poca la producción de energía con fuentes limpias y energías renovables, algunos gobiernos están desarrollando políticas e ideas para que el porcentaje que cubre el consumo de energía limpia, sea cada vez mayor como es el caso del gobierno de Chile en donde se encuentra la Estrategia Nacional de Energía(ENE), organización para ideas de energías limpias a largo plazo; y en Colombia se cuenta con el sistema de gestión de información y conocimiento en fuentes no convencionales de energía renovable en Colombia (SGI&C-FNCER) .

Es por eso que en este documento se desarrollará una idea de implementación y aprovechamiento de una fuente limpia como es la energía eólica para esto se diseñará un aerogenerador. Como es para hogares se tendrá como pilar su aspecto visual, decorativo e innovador y se discutirá si es viable el uso de aerogeneradores para la producción de la energía de un hogar bogotano.

¹[citado en 2015-10-29] disponible en http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/proyeccion_demanda_ee_Abr_2013.pdf

² [citado en 2015-10-29] disponible en <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/614096/4-Energia.pdf/97e512a3-3416-4f65-8dda-d525aa616167>

³[citado en 2015-10-29] disponible en <http://www.minenergia.cl/estrategia-nacional-de-energia-2012.html>

⁴[citado en 2015-10-29] disponible en http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/proyeccion_demanda_ee_Mar_2014.pdf

JUSTIFICACIÓN

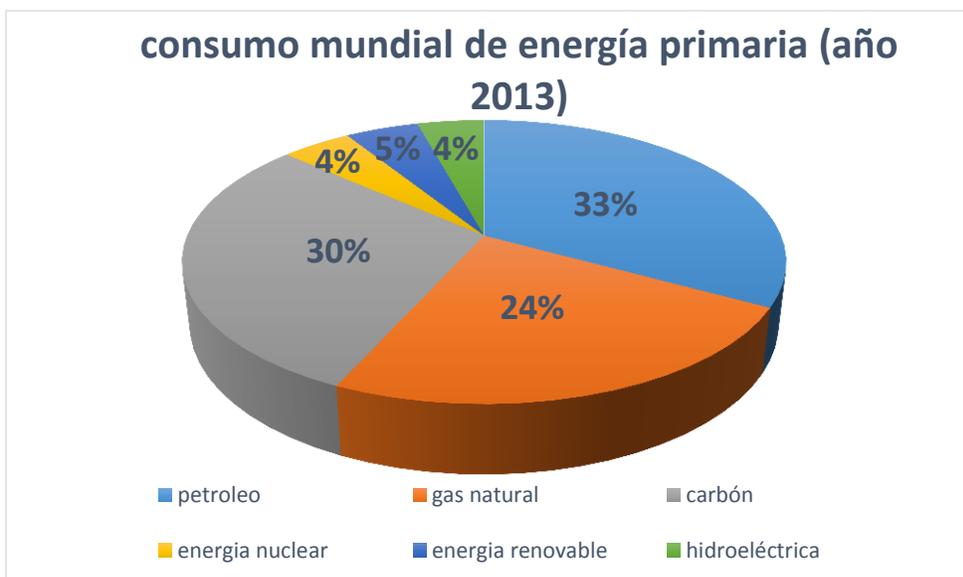
“La energía eólica para obtener trabajo y con él energía eléctrica, es el recurso más antiguo de los tres que configuran las energías renovables de uso doméstico basadas en los rayos del sol”⁵.para ver la relevancia del proyecto, se hace un análisis alrededor del ámbito social que involucra la caracterización del consumo energético y adicionalmente argumenta la realización de este proyecto.

RELEVANCIA SOCIAL

El diseño de un aerogenerador que apoye la demanda energética de un hogar promedio en Bogotá contribuye a una disminución de consumo energético proveniente de fuentes no renovables y contaminantes, además de embellecer el recinto en el que estaría ubicado.

Según Bp la mayor parte del consumo energético mundial es a partir de fuentes no renovables véase *Gráfica 1* que muestra el consumo de estos combustibles en el año 2013.

Gráfica 1, consumo mundial de energía primaria (año 2013)



Fuente: http://www.bp.com/es_es/spain/conozca-bp/informes-y-publicaciones/bp-statistical-review.html

⁵ Perales Benito, Tomás. Guía del instalador de energías renovables, aplicaciones de los aerogeneradores, 4ª edición, España. Limusa Noriega, 2006, 70 p ISBN 9789681868529

Los gases emitidos por la combustión de hidrocarburos son contaminantes⁶, por lo cual es necesaria una fuente alternativa que cumpla y satisfaga los requerimientos energéticos de estos recursos, además de que sea menos contaminante.

Una alternativa es un aerogenerador. Algunas de las ventajas de la energía eólica son las siguientes.

Las principales ventajas de la energía eólica son las siguientes:

- No emite gases contaminantes, ni efluentes líquidos, ni residuos sólidos. Tampoco utiliza agua.
- Reduce emisiones de CO₂. En España, en 2009, la producción eólica fue de 36.188 GWh, lo que se tradujo en un ahorro de emisiones de 16,6 millones de toneladas de CO₂, (considerando una emisión específica de CO₂ asociada a la producción de electricidad de 460 toneladas de CO₂ por GWh eléctrico).
- No requiere minería de extracción subterránea o a cielo abierto.
- Su uso y los posibles incidentes durante su explotación no implican riesgos ambientales de gran impacto (derrames, explosiones, incendios, etc.).
- Ahorra combustibles, diversifica el suministro y reduce la dependencia energética.
- Tiene un período de recuperación energética pequeño. Se requiere solo unos pocos meses de funcionamiento para recuperar la energía empleada en la construcción y montaje de un gran aerogenerador eólico.⁷

⁶ Citado en [2016-08-24] disponible en http://www.as-sl.com/pdf/tipos_gases.pdf

⁷Villarrubia López, Miguel. Ingeniería de la energía eólica, introducción, 1ra edición, España. S.A. MARCOMBO, 2011, 13 p ISBN 9788426715807

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un aerogenerador que apoye la demanda energética de un hogar promedio en Bogotá.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las condiciones ambientales mínimas de trabajo.
- Establecer el consumo promedio de energía eléctrica en un hogar promedio.
- Evaluar el aerogenerador para determinar cuál es el diseño más eficiente en energía producida y parte estética.
- Realizar análisis aerodinámicos a los álabes.
- seleccionar el generador eléctrico.
- Asegurar que el diseño cumpla con los factores de seguridad
- Diseñar elementos mecánicos pertinentes de la turbina.
- Seleccionar elementos mecánicos que necesite la turbina.
- Elaborar los planos necesarios del ensamblaje de la turbina eólica.

ESTADO DEL ARTE

En la actualidad hay diversas opciones de aerogeneradores disponibles como:

- Una empresa española llamada Deutechno ha creado un aerogenerador sin partes móviles que ganó el primer premio de la categoría Energy en el The South Summit 2014. Su tecnología funciona de tal manera que utiliza la deformación producida por la vibración que es provocada por el viento al entrar en resonancia en un cilindro vertical semirrígido y anclado en el terreno.⁸ Puede generar desde 1KW hasta 1 MW, su nombre comercial es vortexbladeless (ver Figura 1)

Figura1, vortexbladeless



Fuente: <http://www.renovablesverdes.com/aerogeneradores-verticales/>

- Un proyecto bastante innovador es el WindTree que está siendo desarrollado por NewWind y que está compuesto por 72 hojas artificiales. Cada una de ellas es una turbina vertical con una forma cónica y tiene una pequeña masa que puede llegar a generar energía con ligera brisa de 2 metros por segundo. Esto le permite generar energía durante 280 días en el año y su producción total es de 3.1 KW con 72 turbinas funcionando. 11 metros de altura y 8 metros de diámetro, el WindTree se acerca al

⁸ Citado el [25/11/2016], disponible en <http://www.renovablesverdes.com/aerogeneradores-verticales/>

tamaño de un árbol real por lo que puede encajar perfectamente en ese espacio urbano⁹.(ver Figura 2.)

Figura2, windtree



Fuente: <http://www.alternative-energy-news.info/tree-shaped-wind-turbines-paris/>

- La turbina de eje vertical KliuxZebra, Diseñado. Para para su instalación en entornos residenciales y urbanos como paseos peatonales, plazas, parques y carriles bici. También es posible la aplicación directa en edificios, comunidades de vecinos, viviendas particulares, alojamientos rurales y hoteles.¹⁰ (Ver Figura 3).

⁹ Ibíd.

¹⁰Citado el [2016/11/25] disponible en: <http://www.kliux.com/productos/aerogenerador-de-eje-vertical/>

Figura3, turbina Kliux



Fuente: <http://www.kliux.com/productos/aerogenerador-de-eje-vertical/>

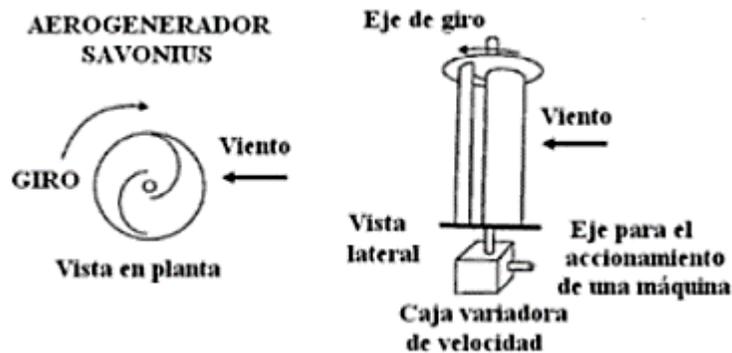
MARCO TEÓRICO

Aerogeneradores de eje vertical.

Estas máquinas están basadas en dos desarrollos de los años treinta del siglo XX; el finlandés Savonius y el francés Darrieux. Ambos dieron su apellido a sus arquitecturas que, perfeccionadas posteriormente como consecuencia del avance tecnológico, se siguen fabricando, aunque para aplicaciones muy específicas y en número muy reducido con respecto a las de eje horizontal.¹¹

Aerogenerador tipo savonius:

Figura4, Aerogenerador tipo Savonius



Fuente: Villarrubia López, Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 136 p

El viento ejerce fuerzas de valor diferente en los semicilindros, empujando en uno y desplazándose lateralmente en el otro, lo que provoca la rotación con independencia de la dirección del viento. El eje vertical se encuentra acoplado en la parte inferior sobre la superficie, al generador. En los últimos años se han desarrollado otros modelos que ofrecen mayor rendimiento, conservando el principio indicado.¹²

¹¹ Perales Benito, Tomás. Guía del instalador de energías renovables, eje vertical, 4º edición, España. Limusa Noriega, 2006, 76 p ISBN 9789681868529

¹² Perales Benito, el universo de las energías renovables, Savonius, 1 edición, España, Marcombo, 2012, cap. 7.4, ISBN 978 84 267 2041 2

Aerogenerador tipo Darrieus.

Figura5, Aerogenerador tipo Darrieus



Fuente: Villarrubia López, Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 136p

Este tipo de aerogenerador está formado por dos o tres palas ovaladas de perfil aerodinámico. Tienen características parecidas a los de eje horizontal, con un par de arranque pequeño.¹³

La principal ventaja que presenta el savonius frente al Darrieus es la sencillez de su construcción y mayores valores del par de arranque a bajas velocidades. El rotor Darrieus permite alcanzar potencias mayores que el savonius. Puede decirse que el rotor savonius solo es útil para pequeñas potencias y aplicaciones limitadas como el bombeo de agua, mientras que el Darrieus es más adecuado para la producción eléctrica.¹⁴

Aerogeneradores de eje horizontal.

Corresponde al tipo de aerogenerador más empleado, independientemente del tamaño de la instalación de la aplicación a la que esté destinado los aerogeneradores de eje horizontal presentan algunas ventajas.

¹³Villarrubia López, Miguel. Ingeniería de la energía eólica, aerogeneradores de eje vertical, 1ra edición, España. S.A. MARCOMBO, 2011, 136p ISBN 9788426715807

¹⁴Ibíd., p.142

- velocidad de giro es superior lo que repercute directamente en la potencia
- el área de barrido ante el viento es mayor con ello se puede fabricar aerogeneradores de mayor potencia.

Sin embargo, requieren, a diferencia de los de eje vertical, la incorporación de un sistema de orientación al viento, ya que no pueden funcionar con cualquier dirección, que es la gran ventaja de los primeros. Sus palas pueden presentar dos posiciones al viento que son:

- **A barlovento.** En este modo, el viento entra de frente al aerogenerador y el sistema de orientación se sitúa en la parte posterior. Es el modo más empleado.
- **A sotavento.** El viento encuentra primero el sistema de orientación y, finalmente, las palas del rotor que están en la parte posterior.¹⁵

Las ventajas de los aerogeneradores de eje vertical frente a los de eje horizontal son:

- Dada su simetría vertical, no necesita sistemas de orientación para colocarse en posición favorable al viento.
- Su mantenimiento es más sencillo, dada su menor altura respecto al suelo.¹⁶

Aerodinámica

En esta parte se abordarán los temas de aerodinámica y mecánica de fluidos que se involucran en el desarrollo del proyecto.

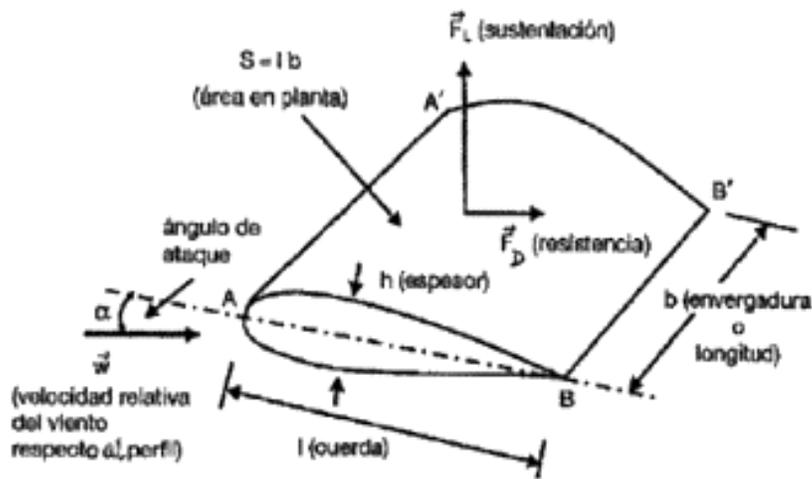
¹⁵ Perales Benito, Tomás. Guía del instalador de energías renovables, eje horizontal, 4º edición, España. Limusa Noriega, 2006, 79 p ISBN 9789681868529

¹⁶ Villarrubia. Op.cit., p143.

Perfiles aerodinámicos

Los alabes de los aerogeneradores se diseñan usando perfiles aerodinámicos de forma que las fuerzas de sustentación y arrastre sea adecuadas para que se optimice la extracción de energía del viento y facilite la regulación de la turbina la Figura 6 muestra las partes más importantes de un perfil aerodinámico.

Figura6, perfil aerodinámico de una pala



Fuente: Villarrubia López, Miguel. Ingeniería de la energía eólica, 115p

Denominación De Perfiles

Los perfiles tienen diferentes denominaciones según su forma. En muchos casos se especifican por la denominación NACA (*national advisory committee of aeronautics*) junto a cuatro cifras que definen su geometría.

Los dígitos definen: El primero indica la máxima flecha de la línea media de la cuerda en porcentaje, proporcionando la curvatura máxima.

El segundo indica la distancia desde el borde de ataque hasta la posición de máxima flecha en decima de cuerda.

Los dos últimos indican el espesor máximo en porcentaje de la cuerda

Por ejemplo NACA 2412 indica una flecha máxima del perfil del 2% de la cuerda, situada en el 40 % de la cuerda y con un espesor máximo del 12% de la cuerda.¹⁷

Número de Reynolds

El número de Reynolds representa la transición del flujo laminar a turbulento y depende de la geometría de la superficie, rugosidad de la superficie, velocidad corriente arriba, temperatura de la superficie y tipo de fluido entre otros factores y para flujos externos se calcula de la siguiente manera¹⁸:

$$Re = \frac{\rho V C}{\mu}$$

Donde:

ρ = densidad del fluido

V= velocidad corriente arriba

C= es la longitud característica de la geometría en el caso de los perfiles alares se toma la cuerda

μ = viscosidad dinámica del fluido

Potencia

La potencia es la cantidad de trabajo realizada por unidad de tiempo.

La potencia transmitida por un eje en cualquier sistema de rotación es el producto de la par torsión por la velocidad angular.¹⁹

$$P = T \omega$$

¹⁷Ibíd., p 116.

¹⁸ , Cengel, A, yunus, Cimbala M John, mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones, flujo paralelo sobre placas planas, 2da edición, México df, mc Graw hill,2012.602 p, ISBN 9786071507792.

¹⁹ Norton, Robert, diseño de máquinas, potencia en la flecha, 1ra edición, México, Pearsonl,1999,568 p, ISBN9789701702574

1. PARÁMETROS DE DISEÑO

1.1. DETERMINACIÓN DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UN HOGAR PROMEDIO EN BOGOTÁ.

Para poder realizar el diseño del aerogenerador es necesario conocer cuánta energía debe producir este, para esto se consultó el dato de cuánta energía eléctrica es consumida en promedio en un hogar bogotano, ya que el aerogenerador se diseña para producir un porcentaje de esta.

Tabla1 consumo de energía eléctrica per cápita en la región capital entre 2000 y 2012 (KWh habitante)

año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
KWh habitante por año	413	408	406	406	411	417	423	430	444	445	444	444	440

Fuente: Análisis de la situación energética de Bogotá y Cundinamarca, 89 p

La determinación del consumo de un hogar promedio se obtiene usando los datos de la Tabla 1, de la siguiente manera.

$$\bullet \frac{413+408+406+406+411+417+423+430+444+445+444+444+440}{13}$$

$$= 425,46 \frac{kWh}{habitante \text{ año}} * \frac{1año}{12meses} = 35,5 \frac{kWh}{habitante \text{ mes}}$$

Según en el último censo del DANE la cantidad promedio de personas que hay un hogar en Bogotá es 3,5 personas.²⁰

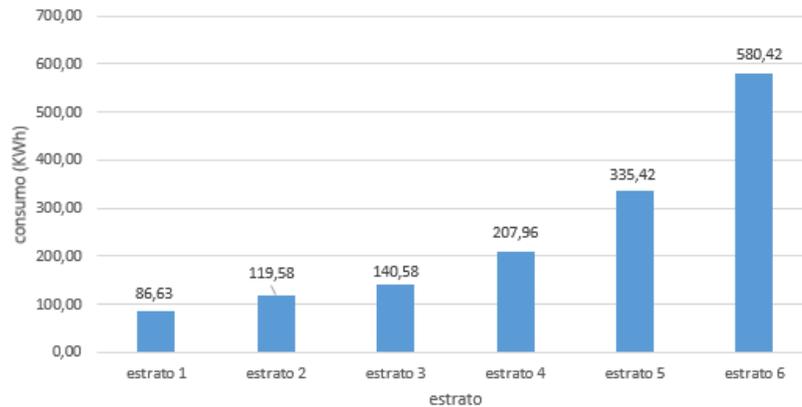
Es decir que el consumo promedio en los hogares bogotanos es:

$$\bullet 35,5 \frac{kWh}{habitante \text{ mes}} * 3,5 \text{habitantes} = 124,09 \frac{kWh}{mes} \text{hogar}$$

²⁰Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), BOLETÍN CENSO GENERAL 2005, BOGOTÁ, 2005, 1P

Este consumo permite conocer que el aerogenerador podrá ser utilizado por personas que pertenecen a los estratos 1, 2 y 3, ya que el valor obtenido está entre los valores de estos (vease Gráfica 2).

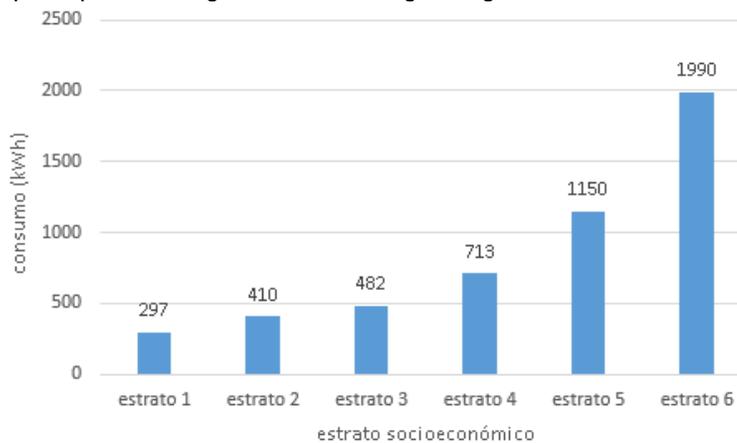
Gráfica2, consumo de energía eléctrica promedio en los hogares bogotanos clasificado por estrato socioeconómico. (KWh por hogar)



Fuente: Elaboración propia con base en información de análisis de la situación energética de Bogotá Cundinamarca y el DANE

La Gráfica consumo de energía eléctrica promedio en los hogares bogotanos clasificado por estrato socioeconómico (ver Gráfica 2) se elaboró a partir de la grafica de Consumo per cápita de energía eléctrica en Bogotá según estrato socioeconómico, 2012 (véase grafica 3). Ya que para el proyecto es necesario el dato de consumo energético mensual y esta Gráfica nos arroja los datos en consumo por habitante anual.

Gráfica3, Consumo per cápita de energía eléctrica en Bogotá según estrato socioeconómico, 2012 (KWh por habitante)



Fuente: Análisis de la situación energética de Bogotá y Cundinamarca, 67 p.

1.1.1. Selección de la dirección del eje de giro de la turbina y geometría de los álabes

Se seleccionó una turbina de eje vertical ya que estas presentan unas ventajas que se acoplan a las condiciones de diseño, por ejemplo la principal aplicación de estas turbinas es la producción autónoma de electricidad; además no necesitan de un sistema de orientación para aprovechar los flujos de viento y la razón más importante es que los generadores verticales alcanzan su mayor rendimiento aerodinámico para velocidades bajas.²¹

El rotor de la turbina cuenta con 3 álabes debido a que tienen un par de arranque pequeño y requieren velocidades de viento entre 3 y 4 $\frac{m}{s}$ para su arranque²². La geometría de los álabes es helicoidal ya que se eligió de la matriz de selección de modelos (ver anexos, Tabla 18) e incluye un factor de apariencia que también es tenido en cuenta en este proyecto.

1.2. Propiedades del viento para el funcionamiento del aerogenerador.

1.2.1. Velocidad Del Viento.

El IDEAM (*Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*) ha puesto en línea el mapa eólico colombiano del cual se obtuvieron los datos de velocidad del viento en Bogotá para el diseño del aerogenerador.²³ (Ver Tabla 2).

Tabla2, velocidad del viento en la superficie, Bogotá D.C.

velocidad del viento en Bogotá D.C.(entre el suelo y 50m de altura)		
velocidad promedio en la superficie	(4-5)	m/s
velocidad máxima en la superficie	(27-30)	m/s

Fuente: elaboración propia con base en los datos del IDEAM

²¹Villarrubia López, Miguel. Ingeniería de la energía eólica, tipos de aerogeneradores, 1ra edición, España. S.A. MARCOMBO, 2011, 134 p ISBN 9788426715807

²²Ibíd., p135.

²³ [citado en 2016-06-16]disponible en: atlas.ideam.gov.co

1.2.2. Densidad del aire de Bogotá.

Debido a los cambios que se presentan continuamente en el aire, la densidad de este se determina por medio del uso de la carta psicrométrica de Bogotá²⁴.

En la Tabla 3 se muestran las temperaturas y humedades relativas que fueron tomadas de las Tablas del atlas climatológico de Colombia del IDEAM para emplearlas en la carta psicrométrica.

Tabla3, análisis psicrométrico para la obtención de la densidad el aire en Bogotá.

	humedad relativa	temperatura		volumen específico	densidad	
	%	°F	°C	(ft ³ /lbm)	(lbm/ft ³)	(kg/m ³)
Máxima	83	66,7	19,3	18,4	0,054	0,867
		46,2	7,9	17,4	0,057	0,916
mínima	77	66,7	19,3	18,4	0,054	0,869
		46,2	7,9	17,5	0,057	0,916
promedio	80	56,6	13,7	17,9	0,056	0,893

Fuente: Elaboración propia con los datos proporcionados del atlas climatológico del IDEAM

El análisis de los datos de la Tabla 3 fue hecho para corroborar que la densidad obtenida con los datos promedio de temperatura y humedad relativa, no fuera muy diferente en magnitud de la densidad obtenida con los datos máximos y mínimos de estas mismas características del aire; por lo tanto, la densidad promedio es la que se usa en los cálculos.

1.2.3. Potencia disponible en el viento

La potencia que se tiene disponible en el viento a través de un área de $4m^2$ con la mínima velocidad se calcula de la siguiente manera.

$$P = \frac{\rho * v^3 * A}{2}$$

²⁴ [citado en 2016-09-07]disponible en: <https://efrainpuerto.files.wordpress.com/2011/12/bogotc3a1-psychrometric-chart.pdf>

$$P = \frac{0,893 \frac{Kg}{m^3} * 4 \frac{m}{s}^3 * 4 m^2}{2}$$

$$p = 114,304 W$$

1.2.4. Eficiencia de la turbina

Para el cálculo de la eficiencia se tienen en cuenta los siguientes parámetros que dependen de los componentes de la turbina.

Tabla4, coeficientes de pérdidas de los elementos de la turbina

0,45	coeficiente de potencia
0,96	rendimiento del alternador
0,98	rendimiento del transformador

Fuente: Elaboración propia con los datos de Villarrubia López, Miguel. Ingeniería de la energía eólica, 128p

Con los coeficientes de la Tabla4, se calcula la eficiencia de la siguiente manera.

- Potencia convertida en mecánica

$$114,304W * 0,45 = 51,41W$$

- Potencia de accionamiento

$$51,41W * 1 = 51,41W$$

- Potencia eléctrica

$$51,41W * 0,96 = 49,35W$$

- Potencia enviada a la red

$$49,35 W * 0,98 = 48,37 W$$

- Eficiencia

$$\eta = \frac{114,304 \text{ W}}{48,37 \text{ W}}$$

$$\eta = 0,42$$

2. DISEÑO DEL AEROGENERADOR

2.1. DIMENSIONAMIENTO

En el inicio del dimensionamiento de la turbina se consultaron diez referencias de aerogeneradores de eje vertical que están disponibles en el mercado.

Debido a que la potencia nominal de las turbinas es cercana a la requerida y funcionan con velocidades de viento baja, se tomaron como referencia las siguientes (ver Figuras 7,8 y 9):

Figura7, Aelos v 300w



Fuente: <http://www.windturbinestar.com/300w-vertical-wind-turbine.html>

Figura8, D100Wind turbine



Fuente: <http://www.newmexicosolarandwind.com/Helix%20Wind.htm>

Figura9, p300V

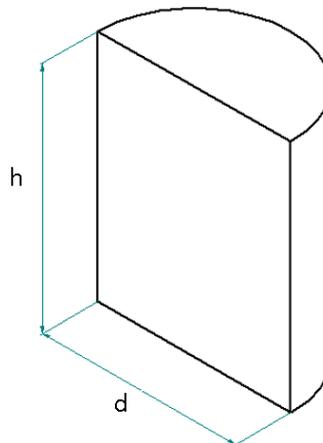


Fuente: <http://www.sawtenergy.com/street-light.html>

De estas referencias se sustrajeron datos como diámetro, cuerda de los álabes y altura del rotor; y con estos datos se obtuvo una relación d/h que se adapte a los requerimientos como potencia y área.

En el procedimiento de determinación del área es necesario tener en cuenta que el rotor del aerogenerador puede estar inscrito en un cilindro (ver Figura10).

Figura10, Representación área transversal del rotor



Las siguientes Tablas presentan la información de cada aerogenerador.

Tabla5, datos obtenidos de la turbina Street Light SAWT

Street Light SAWT		
d	1,36	m
h	1,4	m
d/h	0,971	
potencia	300	W
A	1,904	m^2
η	31,51	%

Fuente: <http://www.sawtenergy.com/street-light.html>

Tabla6, datos obtenidos de la turbina D100 Wind Turbine

D100 Wind Turbine		
d	1	m
h	1	m
d/h	1	
potencia	300	w
A	1	m^2
η	60	%

Fuente: <http://www.newmexicosolarandwind.com/Helix%20Wind.htm>

Tabla7, datos obtenidos de la turbina Aeolos-V 300w

Aeolos-V 300w		
d	1,6	m
h	1,2	m
d/h	1,33333333	
potencia	300	W
A	1,92	m^2
η	31,25	%

Fuente: <http://www.windturbinestar.com/300w-vertical-wind-turbine.html>

Al estimar el área transversal del rotor, se determinó de la siguiente manera la potencia que el aerogenerador debe suplir.

$$\frac{124\,090 \frac{Wh}{mes}}{16 h * 30 dias} = 258,521 W$$

Para el diseño se decidió que este cumpla con el consumo de iluminación de un hogar que es el 16 %²⁵ del consumo total y se concluyó que debe generar el 20% debido a pérdidas durante 16 horas que representa un intervalo desde las 6 hasta las 22 horas del día que es cuando se necesita la energía²⁶.

$$258,521 W * 0,2 = 51,704 W$$

El cálculo del área transversal se realizó por medio de la siguiente ecuación

$$A = \frac{2 P}{\rho v^3 \eta}$$

Reemplazando se obtiene:

$$A = \frac{2 * 51,704 W}{0,893 \frac{kg}{m^3} * 4 \frac{m}{s}^3 * 0,42}$$

$$A = 4,276 m^2$$

Con las tres relaciones $\frac{d}{h}$ obtenidas de los aerogeneradores consultados y a partir del área se calculó el diámetro y la altura de la turbina eólica de la siguiente manera.

²⁵ Análisis de la situación energética de Bogotá y Cundinamarca, factores determinantes de la demanda de energía eléctrica (Tabla 11). Fuentes de información del consumo de energía eléctrica para la Región Capital entre 2000 y 2012., julio de 2013, pg. 100

²⁶ [citado en 2016-10-12] disponible en: <https://www.isagen.com.co/boletines/44/Portada.html>

Se tiene que el área es (ver fig. 10):

$$A = d * h$$

Por otro lado, se tiene que la relación (R) es:

$$R = \frac{d}{h}$$

Despejando el diámetro y haciendo sustitución algebraica en el área se adquiere:

$$d = hR$$

$$A = h^2R$$

Para obtener la altura (h):

$$h = \frac{A}{R}$$

En la Tabla 8 se muestran los valores para d y h de la turbina con las relaciones consultadas.

Tabla8, datos de diámetro y altura para el área deseada de $(4,276m^2)$ según las relaciones consultadas

R=1,333		R=1		R=0,971	
d(m)	h(m)	d(m)	h(m)	d(m)	h(m)
2,388	1,791	2,068	2,068	2,038	2,098

2.2. Estimación de la viscosidad del aire, cuerda de los perfiles y número de Reynolds

2.2.1. Estimación de la cuerda

Ya que en las fichas técnicas de los aerogeneradores consultados no se muestra la cuerda; se decidió medir la altura y la cuerda a escala de las imágenes que están en catalogo y así tener una buena aproximación.

En la Tabla que sigue se muestra las medidas a escala y la relación

Tabla9, medidas y relaciones (h/c) de los aerogeneradores a escala

	Aeolos-V 300w	Street Light SAWT
Altura(mm)	52	61
Cuerda(mm)	20	11,7
Relación(h/c)	2,6	5,18

La determinación de la cuerda real se hizo de la siguiente manera teniendo las alturas reales que están en las fichas técnicas:

$$C = \frac{h}{Relación}$$

La Tabla10 muestra las dimensiones de tamaño real:

Tabla10, medidas y relaciones (h/c) de los aerogeneradores a escala real

	Aeolos-V 300w	Street Light SAWT
Altura (m)	1,2	1,4
Cuerda (m)	0,46	0,27
Relación (h/c)	2,6	5,18

El aerogenerador faltante posee una geometría compleja, la cual no permitió que se pudiera estimar la cuerda por los métodos utilizados en los otros dos aerogeneradores, por tanto, se omitió el uso de esta cuerda.

2.2.2. Viscosidad del aire

Esta variable se determinó mediante métodos teóricos:

Para hallar la viscosidad μ del aire de Bogotá se interpoló en las Tablas termodinámicas, teniendo el valor de la densidad de este fluido $0.892 \frac{Kg}{m^3}$ y se obtuvo como resultado la siguiente Tabla:

Tabla11, interpolación para hallar la viscosidad

Densidad $\frac{Kg}{m^3}$	Viscosidad $\frac{Kg}{m s}$
0,909	$1,6940 * 10^{-5}$
0,892	$1,6874 * 10^{-5}$
0,091	$1,6870 * 10^{-5}$

Fuente: elaboración propia con los datos de mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones Tabla A11, Cengel, A, yunus, Cimbala M John

2.2.3. Cálculo del número de Reynolds

El cálculo de Reynolds se realizó mediante las ecuaciones que se enuncian enseguida y se calculan Re_1 y Re_2 debido a que hay dos cuerdas para los perfiles:

$$Re = \frac{v C \rho}{\mu}$$

Reemplazando:

$$Re_1 = \frac{4 \frac{m}{s} * 0,46 m * 0,893 \frac{kg}{m^3}}{1,6874 * 10^{-5} \frac{kg}{m s}}$$

$$Re_1 = 97 267,44$$

$$Re_2 = \frac{4 \frac{m}{s} * 0,27 m * 0,893 \frac{kg}{m^3}}{1,6874 \times 10^{-5} \frac{kg}{m s}}$$

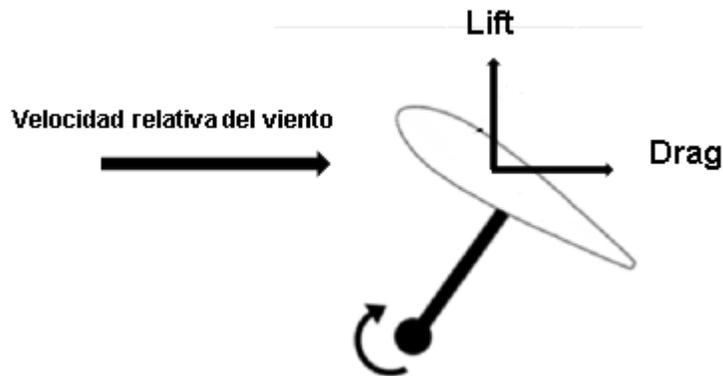
$$Re_2 = 57\,091,76$$

2.3. Selección de perfiles alares

Para que el diseño del aerogenerador sea lo más eficiente posible se debe usar un perfil alar ya que estos están hechos para que se aprovechen las fuerzas que proporciona el aire²⁷.

Como se ve en la Figura11, a causa de la dirección de giro, es necesario seleccionar perfiles NACA que posean mayor coeficiente de arrastre (drag), que es la componente necesaria en el movimiento del rotor de la turbina.

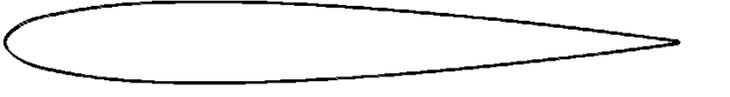
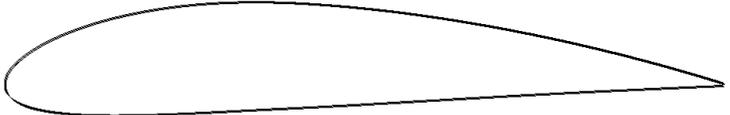
Figura11,diagrama de la vista superior con las fuerzas que actúan en el perfil alar de una turbina de eje vertical



Teniendo claro lo anterior se seleccionaron los siguientes perfiles (ver Tabla 12) debido a su alto coeficiente de arrastre²⁸.

²⁷Moragues, Jaime y Rapallini, Alfredo, Energía eólica, principio de operación de las máquinas eólicas, 2003,8p.

Tabla12, Tabla Geometría de los perfiles alares

Geometría del perfil alar	Denominación
	NACA 0012
	NACA 4412
	NACA 4415

Al realizar las posibles combinaciones de las opciones de la Tabla 13 se obtienen los datos de la Tabla 14. El orden de los valores de cada casilla es; relación, perfil, cuerda del perfil alar.

Tabla13, variables disponibles para la matriz de combinación.

$\frac{d}{h}$	Perfiles NACA	Cuerdas de los perfiles (m)
1,33	0012	0,46
1	4412	0,27
0,971	4415	

Con los perfiles, las posibles cuerdas y las longitudes de altura y diámetro; se realizó una matriz (ver Tabla 14) donde se evidencian las posibles combinaciones de estas dimensiones para ser simuladas y obtener la opción con mejor desempeño.

Tabla14, Matriz de combinación ($\frac{d}{h}$ – perfil NACA- cuerda de los perfiles (m))

²⁸Spera David, A, models of lift and drag coefficients of stalled and unstalled airfoils in wind turbines and wind tunnels, 2008, 8p.

1,33 – 0012-0,46	1,33-0012-0,27	1-0012-0,46	1-0012-0,27	0,971-0012-0,46	0,971-0012-0,27
1,33 – 4412-0,46	1,33-4412-0,27	1-4412-0,46	1-4412-0,27	0,971-4412-0,46	0,971-4412-0,27
1,33 – 4415-0,46	1,33-4415-0,27	1-4415-0,46	1-4415-0,27	0,971-4415-0,46	0,971-4415-0,27

2.4. Simulaciones en el Software Qblade v0.96

El software Qblade es una herramienta informática ejecutable de libre uso que se especializa en el análisis de turbinas eólicas.

Una de las grandes ventajas que tiene este software es que permite modelar aerogeneradores en 3d tanto verticales como horizontales, según los parámetros de entrada como altura del rotor, diámetro del rotor, perfiles alares, ángulo de la circunferencia y cuerda del perfil, para darle la forma helicoidal a los perfiles.

Esta herramienta ayuda a simular la geometría deseada, datos y gráficas de diversas variables, algunas de estas son: potencia, velocidad angular, fuerza de drag, fuerza de lift, torque, coeficiente de lift, coeficiente de drag y ángulo de ataque.

Una de las desventajas es que al exportar los modelos en 3d el programa los exporta en .stl que es un formato incompatible con los programas de diseño; por otro lado, es necesario tener un equipo de altos requerimientos para que opere con rapidez.

La limitación que presenta el software es que en el análisis aerodinámico de los álabes se realiza de manera general, es decir, que las condiciones de los flujos en los álabes no se analizan a profundidad debido a que es altamente complejo analizar particularmente cada turbina modelada en el software, además, para este análisis se necesita un software CFD (*computational fluid dynamics*).²⁹

Se realizaron las simulaciones de la matriz de la Tabla 14 y se obtuvo que las dimensiones más eficientes para el rotor de la turbina, teniendo en cuenta la velocidad del viento y la potencia de salida, fueron: la relación $\frac{d}{h} = 1,33$ que

²⁹ Marten David, Wendler Juliane, Qblade guidelines, Blade design and simulation in the wind turbine Industry, V 0.6, 2013, 6 P.

cumple con el área requerida con $d=2,33$ m y $h= 1,791$ m, el perfil alar NACA 4415 y la cuerda del perfil de 0,46 m.

A partir de estos resultados se procedió a diseñar los elementos mecánicos.

2.5. Diseño de elementos de mecánicos

En este segmento del capítulo se muestra las ecuaciones y los resultados de dimensionamiento y selección de materiales del eje, alabes y uniones.

2.5.1. Dimensionamiento de los álabes

Los materiales de las palas deben reunir las siguientes características básicas:

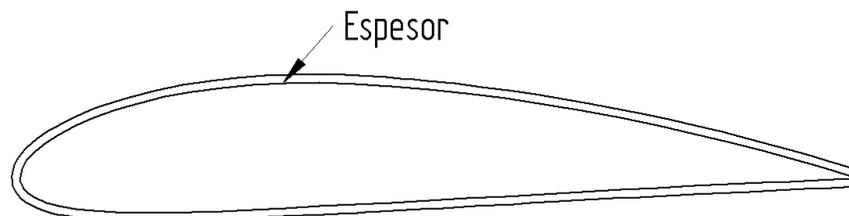
Resistencia estructural y en particular a la fatiga originada por tensiones alternas debidas a vibraciones, baja densidad, resistencia a lluvia, nieve, cambios de clima, fabricación sencilla.

Pero son dos los factores principales en la selección de materiales:

Relación resistencia/peso y coste económico

Es por esto que las palas suelen fabricarse en fibra de vidrio impregnadas con un material plástico como resina epoxi ya que permite construir palas ligeras con mayor flexibilidad y mejor comportamiento frente a cambios de temperatura y acción del agua.³⁰

Figura12, vista superior de un corte transversal del álabes (perfil NACA 4415)



³⁰Villarrubia López, Miguel. Ingeniería de la energía eólica, Rotor, 1ra edición, España. S.A. MARCOMBO, 2011, 155 p ISBN 9788426715807

En la Figura12, se muestra el espesor de la fibra de vidrio que tiene una medida de 3mm, para obtener un volumen que resulta del área comprendida por el espesor del material multiplicado por la longitud del álabe que es de 3 metros.

El volumen resultante es:

$$V = 0,0053 \text{ m}^3$$

La densidad de la fibra de vidrio más la resina epoxi es³¹:

$$1700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Usando la siguiente ecuación se determinó la masa de un álabe:

$$m = \rho * V$$

$$m = 9,1193 \text{ kg}$$

Además, los perfiles alares llevan en su interior cinco refuerzos en lámina de aluminio de 3 mm de espesor para tener una estructura resistente y se determinó un ángulo de paso de la construcción helicoidal en cada alabe de 35,7 ° y se distribuirán en el perímetro del rotor cada 120 °.

Al acabar este procedimiento se obtiene una masa total de cada alabe de 10,31 kg.

Una vez se obtienen las masas, el paso a seguir es calcular la inercia de la siguiente manera:

$$I = 3 * m * r^2$$

$$I = 3 * 10,31 \text{ kg} * 1,19\text{m}^2$$

$$I = 44,09 \text{ kgm}^2$$

Donde:

$$m = \text{masa}$$

³¹Citado en [2016-10-10], disponible en <http://www.lorkindustrias.com/downloads/fichastecnicas/FichaTecnicaFibradeVidrioEpoxiG-11-155.pdf>

$r = \text{radio del rotor}$

Con esta inercia se procedió a calcular la velocidad angular:

$$\omega = \frac{2 * P}{I}$$

$$\omega = \frac{2 * 51.7 \text{ W}}{44,09 \text{ kg m}^2}$$

$$\omega = 1,53 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\omega = 14,62 \text{ rpm}$$

Y finalmente se reemplazan estos valores para obtener el torque del aerogenerador:

$$T = \frac{P}{\omega}$$

$$T = \frac{51,7 \text{ W}}{1,53 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}$$

$$T = 33,76 \text{ Nm}$$

Con este torque se procede a diseñar el eje del rotor.

2.5.2. Diseño del eje del rotor

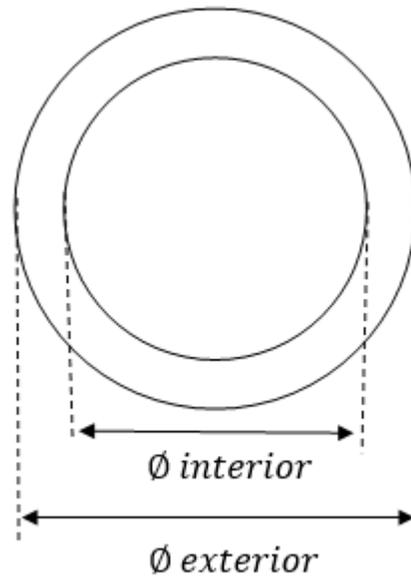
Para iniciar con el diseño del eje se tiene en cuenta que cada álabe aporta $33,76 \text{ Nm}$ de torque por lo tanto el eje está sometido a:

$$T = 33,76 \text{ Nm} * 3$$

$$T = 101,3 \text{ Nm}$$

En el diseño de este elemento mecánico se determinó que debe ser hueco con el objetivo de que tenga menor peso (ver Figura13).

Figura13, vista superior del eje del rotor



La ecuación que se usó para conocer el diámetro exterior del eje es la siguiente:

$$\frac{S_y}{N} = \frac{T * r}{J}$$

El acero más conveniente para su aplicación en el eje es el SAE/AISI 1020 laminado en frío, límite elástico a la tensión $S_y = 393 \text{ Mpa}$ ³² y se usó un factor de seguridad de 2.

El momento polar de una sección circular hueca es:

$$J = \frac{\pi(d_{ext}^4 - d_{int}^4)}{32}$$

³² Norton, L. Robert, diseño de máquinas, propiedades de los materiales apéndice C, 1ra edición, México, Pearson, 1999, 998 p, ISBN 9789701702574

En la industria se usa comúnmente una relación de 1.2 veces más grande el diámetro exterior que el interior en la elaboración de ejes huecos.

En términos del diámetro exterior el momento polar de inercia se describe así:

$$J = \frac{\pi d_{ext}^4 - \frac{d_{ext}^4}{1,2^4}}{32}$$

Realizando las operaciones algebraicas pertinentes se obtiene la ecuación:

$$d_{ext} = \sqrt[4]{\frac{32 T N}{\pi S y \left(1 - \frac{1}{1,2^4}\right)}}$$

$$d_{ext} = 0,06m$$

$$d_{int} = 0,047m$$

$$h_{eje} = 2 m$$

Antes de dar el acabado final a las superficies metálicas se recomienda anticorrosivo para protegerlas de los efectos de factores como la humedad.

2.5.3 RODAMIENTOS

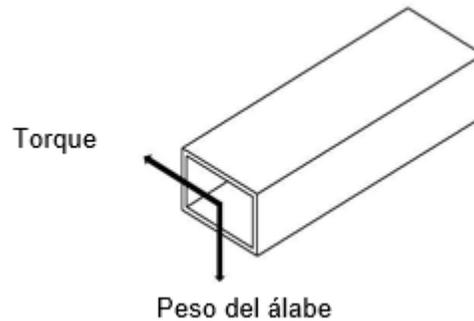
La forma en que se seleccionó el rodamiento depende del diámetro del eje, una vez se conoce este valor se eligió de la Figura 10-23 del capítulo cojinetes y lubricación de diseño de máquina de Robert L. Norton el rodamiento número 6312. La chumacera que se seleccionó para este rodamiento es sf 60dec.

Número	Perforación mm	Diámetro exterior mm	Ancho mm	Peso lb	Velocidad limitante rpm	Carga dinámica lb
6312	60	130	31	3,81	5 000	14 000

2.5.3. Diseño de los soportes de los álabes.

El análisis de fuerzas que se realizó para diseñar los soportes se muestra en la Figura 14.

Figura14, representación de las fuerzas que se ejercen en los soportes de los álabes



Cabe aclarar que cada álabe es sostenido por 3 soportes equidistantes a lo largo del eje, soportando así un tercio de las fuerzas totales.

Las dimensiones del soporte se determinaron realizando iteraciones de tal manera que se llegara a una deflexión permisible menor a 1mm . Estas dimensiones se muestran en la Figura15.

En el caso de la fuerza ejercida debido al peso del alabe, el cálculo de la deflexión es el siguiente:

$$\Delta = \frac{1}{3} * \frac{FL^3}{EI_x}$$

$$\Delta = \frac{1}{3} \frac{33,6 \text{ N } 1,119^3 \text{ m}}{2 \times 10^{11} \text{ Pa } 7,9 \times 10^{-8} \text{ m}^4} * 1000$$

$$\Delta = 0,98 \text{ mm}$$

La deflexión que sucede debido a la fuerza del torque se determinó así:

$$\Delta = \frac{1}{3} * \frac{PL^3}{EI_y}$$

$$\Delta = \frac{1}{3} \frac{40,3 \text{ N } 1,119^3 \text{ m}}{2 \times 10^{11} \text{ Pa } 1,24 \times 10^{-7} \text{ m}^4} * 1000$$

$$\Delta = 0,7 \text{ mm}$$

Las dimensiones que cumplen con el momento de inercia y con el análisis de deflexión anterior son:

Figura15, indicación de las longitudes de la sección transversal del soporte

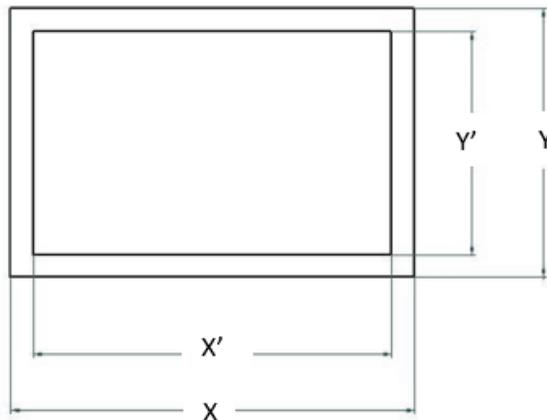


Tabla15, Dimensiones correspondientes a la Figura15

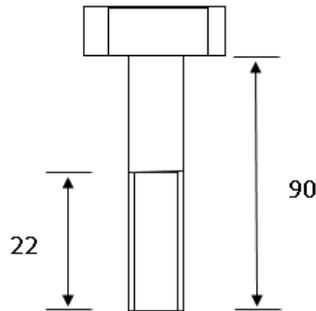
Y	0,0381	m
X	0,0508	m
Y'	0,0341	m
X'	0,0468	m

2.5.4. Selección de pernos

El procedimiento de cálculo que permite seleccionar los pernos para sujetar los elementos necesarios es tomado del libro de Norton capítulo llamado “tornillos y sujetadores” de la sección pernos precargados dinámicamente, (para más información ver anexos Tabla 19)

El perno que cumple con los cálculos es M8 x 1,25 grado 9,8 con un factor de seguridad de 3.7.

Figura16, dimensiones del vástago y la rosca del perno seleccionado



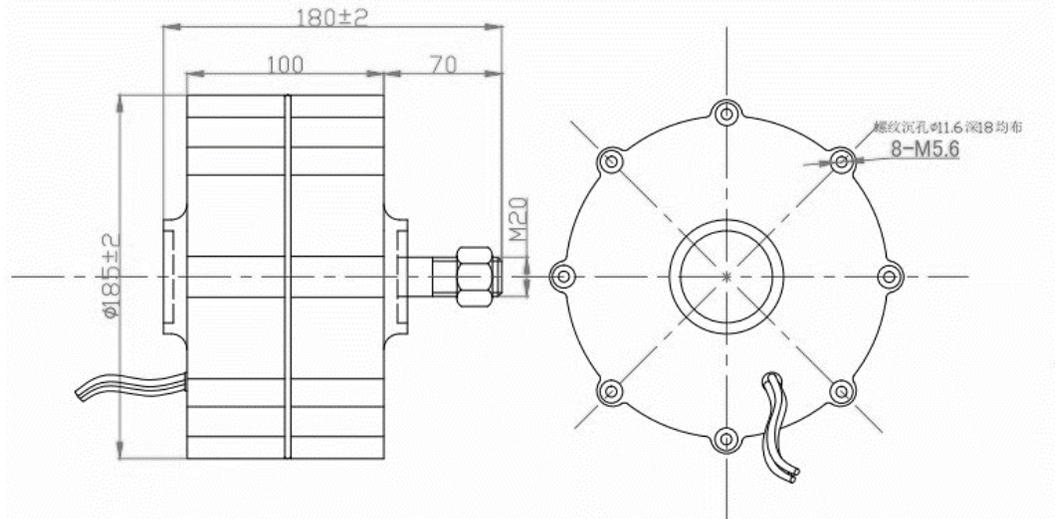
El tornillo prisionero para el acople del eje de la turbina al generador es tornillo Allen sin cabeza, paso 0,7 longitud 6 mm, diámetro 4 mm³³

2.5.5. Selección de generador eléctrico.

El generador se seleccionó bajo parámetros de velocidad y potencia generada. La referencia de este es PM Tech Ne-500 (ver Figura 17)

³³ Citado el [2016/11/24], disponible en: <http://www.bulmetal.com.ar/pdf/catalogo-buloneria.pdf> 12p

Figura17, generador PM tech Ne-500



Fuente: <https://es.aliexpress.com>

3. Análisis de resultados

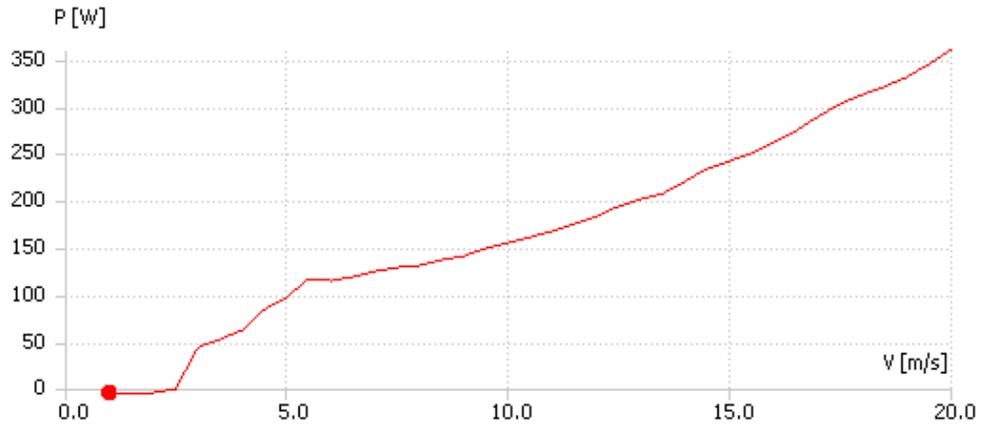
- Como se mencionó anteriormente, el diseño que cumple con los requerimientos es el que tiene las dimensiones mencionadas en la Tabla 16:

Tabla16, Dimensiones de la turbina seleccionada

Díámetro del rotor	Altura del rotor	Cuerda del perfil	Perfil
2,3 m	1,791 m	0,46 m	NACA 4415

Esta turbina se seleccionó debido a que su grafica de potencia vs velocidad del viento es más eficiente por que la integral de la curva de potencia tiene más área que las demás opciones ($3\ 240,73U^2$) (ver anexos 7,3).A continuación se presenta la Gráfica mencionada.

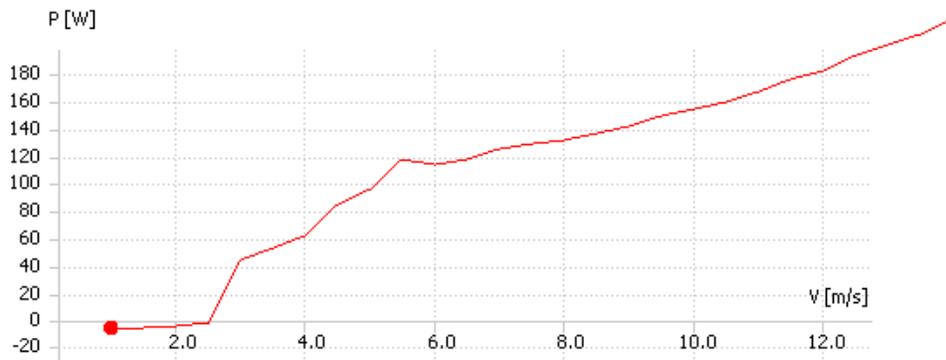
Gráfica4, potencia vs velocidad del viento de la turbina seleccionada



Fuente: Software Qblade

- Como se ve en la Gráfica 4 la mínima velocidad del viento para que la turbina empiece a generar potencia es de $2,5 \frac{m}{s}$ denominada velocidad de corte o v cut in y trabaja hasta los $20 \frac{m}{s}$ llamada también v cut out porque después de esta velocidad se empiezan a generar problemas de ruido y sobrecalentamiento del generador.
- Se evidencia en la Gráfica 5 que para la velocidad mínima del viento que se analizó en el capítulo 1, en Bogotá es de $4 \frac{m}{s}$ y la potencia generada es mayor a la requerida de 51,7 W. cabe aclarar que la potencia requerida del diseño se alcanza a 70 rpm.

Gráfica5, zoom de la Gráfica4

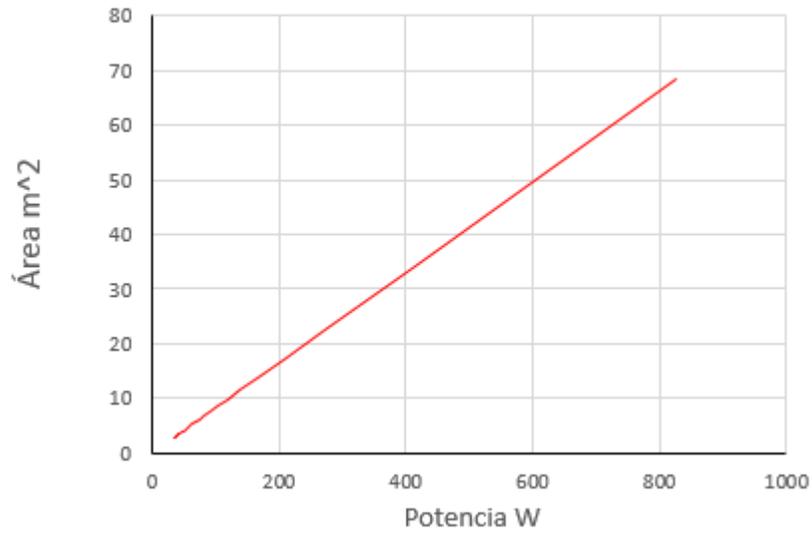


Fuente: software Qblade

La ventaja que presenta la turbina que se diseñó en este proyecto frente a otras que hay en el mercado, es que esta está diseñada para la velocidad del viento de Bogotá, que es menor comparada con la velocidad a la que están diseñadas los demás aerogeneradores.

- Como se muestra en la Gráfica 6, la potencia generada depende de que tanta área transversal tenga el rotor del aerogenerador debido a las condiciones de viento de Bogotá como por ejemplo la baja velocidad; se obtienen grandes áreas de rotor comparadas con los aerogeneradores comerciales.

Gráfica6, Potencia vs Área transversal del rotor en condiciones atmosféricas de Bogotá.



La Gráfica 6 es descrita por la siguiente ecuación, que muestra que a menor velocidad del viento mayor área.

$$A = \frac{1}{2} \frac{P}{\eta \rho v^3}$$

En la Figura 18 se puede observar los elementos ensamblados que conforman el rotor y el peso de este se relaciona en la Tabla 17.

Figura18 Rotor del aerogenerador

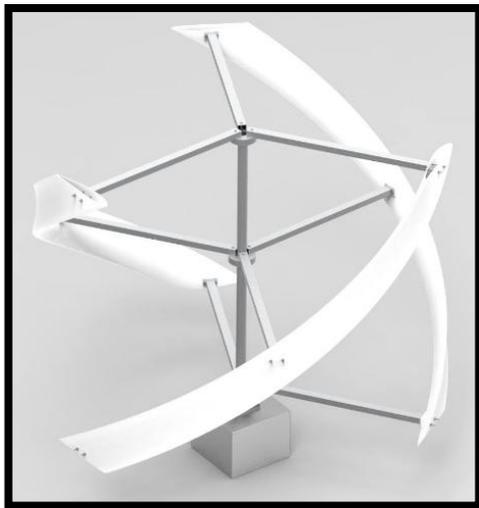


Tabla17 Masa del aerogenerador

Elemento	cantidad	Masa (kg)
Alabe	3	30,93
Eje	1	12
Soportes	9	17
buje	3	6
	Total	66

De la Tabla 17 se obtiene la masa total del aerogenerador de 66 kg, la cual es aceptable para un adecuado funcionamiento.

4. Conclusiones

- El diseño del aerogenerador teóricamente apoya el 20% de la demanda energética de un hogar promedio en Bogotá, debido a que, según el análisis desarrollado, este porcentaje es 51 W y la turbina produce 60 W con las condiciones ambientales mínimas de trabajo.
- Debido a las condiciones atmosféricas de Bogotá, las dimensiones del aerogenerador de este proyecto son robustas, no obstante, en lugares con mayor densidad y mayor velocidad del flujo del aire, esta misma podría suplir porcentajes mayores. Por ejemplo, según el IDEAM, los lugares con mayor velocidad del viento en Colombia son barranquilla y santa marta con velocidades promedio de $13 \frac{m}{s}$ y densidades de $1,5 \frac{kg}{m^3}$ ³⁴ allí la turbina del proyecto teóricamente produciría 2 978,5 W.
- El aerogenerador está en capacidad de apoyar la demanda de electricidad pero es necesario agregar un sistema de almacenamiento y/o un sistema de conexión a la red energética, ya que para suplir el 100% de la demanda de un hogar promedio en Bogotá, con la turbina diseñada en este proyecto, la velocidad necesaria es de $16 \frac{m}{s}$, que es posible ya que en Bogotá se han registrado velocidades de hasta $30 \frac{m}{s}$ (ver Tabla 2) en cortos periodos de tiempo.
- Refiriéndose al aspecto visual de la turbina, tiene un diseño llamativo y poco frecuente, pero cabe aclarar que concluir que es agradable o no, es relativo y difícil de medir.

³⁴ [citado en 2016-11-18] disponible en: atlas.ideam.gov.co

5. Trabajos futuros.

- Uno de los trabajos futuros es la optimización de las dimensiones para la Construcción del prototipo y seleccionar el sistema de almacenamiento de energía eléctrica y la transferencia a la red.
- Realizar simulaciones en software CFD para tener datos más cercanos a la realidad del comportamiento del aire en el rotor de la turbina. Aplicando modelos de turbulencia para obtener los perfiles de presión en los álabes.
- Usar recursos tecnológicos como la estación meteorológica y la impresora 3D de la universidad para generar un modelo a escala y realizar pruebas físicas.

6. Bibliografía

- Aeolos wind turbine, (2016-11-17)<http://www.windturbinestar.com/300w-vertical-wind-turbine.html>
- Análisis de la situación energética de Bogotá y Cundinamarca, factores determinantes de la demanda de energía eléctrica (Tabla 11). Fuentes de información del consumo de energía eléctrica para la Región Capital entre 2000 y 2012., julio de 2013, pg 100
- Andrade Mahecha Jaime, Aponte, Gutiérrez Juan, (2015-10-29) Proyección de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia disponible en: http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/proyeccion_demanda_ee_Abr_2013.pdf
- Bp España,(2015-10-7) http://www.bp.com/es_es/spain/conozcambp/informes-y-publicaciones/bp-statistical-review.html
- Bulmetal, catálogo de bulonería, Argentina [2016/24/11] <http://www.bulmetal.com.ar/pdf/catalogo-buloneria.pdf>
- Cengel, A, Yunus, Cimbala M John, mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones, flujo paralelo sobre placas planas, 2da edición, México DF, mc Graw hill,2012.602 p, ISBN 9786071507792
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), BOLETÍN CENSO GENERAL 2005, BOGOTÁ, 2005, 1P
- Efraín Puerto, carta psicrométrica de Bogotá, (2016-09-07] disponible en: <https://efrainpuerto.files.wordpress.com/2011/12/bogotc3a1-psychrometric-chart.pdf>

- Estrategia nacional de energía(2015-10-29) Disponible en <http://www.minenergia.cl/estrategia-nacional-de-energia-2012.html>
- Helixwind, D100 Cut Sheet (2016-11-17)<http://www.newmexicosolarandwind.com/Helix%20Wind.htm>
- ICONTEC, norma técnica colombiana 1486, sexta edición, Colombia, 2008, documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación.
- IDEAM, atlas de viento, [2016-06-16] disponible en: atlas.ideam.gov.co
- Isagen, Consumir igual y pagar menos ,(2016-10-12] disponible en: <https://www.isagen.com.co/boletines/44/Portada.html>
- Lork industrias, fibra de vidrio epoxy (2016-10-10)<http://www.lorkindustrias.com/downloads/fichastecnicas/FichaTecnicaFibradeVidrioEpoxiG-11-155.pdf>
- Marten David, Wendler Juliane, Qblade guidelines, Blade design and simulation in the wind turbine Industry, V 0.6,2013, 6 P.
- Minminas, Energía eléctrica [2015-10-29]disponible en: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/614096/4-Energia.pdf/97e512a3-3416-4f65-8dda-d525aa616167>
- Moragues, Jaime y Rapallini, Alfredo, Energía eólica, principio de operación de las maquinas eólicas, 2003,8p.
- Norton, L, Robert, diseño de máquinas, potencia en la flecha, 1ra edición, México, PearsonI,1999,568 p,ISBN 9789701702574

- Perales Benito, Tomás. Guía del instalador de energías renovables, aplicaciones de los aerogeneradores, 4º edición, España. Limusa Noriega, 2006, 70 p ISBN 9789681868529
- -----, el universo de las energías renovables, Savonius,1 edición, España, Marcombo,2012, cap. 7.4, ISBN 978 84 267 2041 2
- Sawtinc ,p300 a-b,(2016-11-17) <http://www.sawtenergy.com/street-light.html><http://www.sawtenergy.com/street-light.html>
- Spera David, A, models of lift and drag coefficients of stalled and unstalled airfoils in wind turbines and wind tunnels, 2008, 8p.
- Tipos de gases producidos en la combustión y sus consecuencias. [2016-08-24] disponible en http://www.as-sl.com/pdf/tipos_gases.pdf
- unidad de planeación minero energética, proyección de demanda de energía eléctrica en Colombia (2015-10-29)disponible en http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/proyeccion_demanda_ee_Mar_2014.pdf
- Villarrubia López, Miguel. Ingeniería de la energía eólica, introducción, 1ra edición, España. S.A. MARCOMBO, 2011, 13 p ISBN 9788426715807

7. ANEXOS

7.1. Matriz de selección

Tabla18, Matriz de selección

criterios de selección	porcentaje asignado %	CONCEPTO I				CONCEPTO II				CONCEPTO III				CONCEPTO IV			
		calificación	evaluación ponderada														
apariencia	0,1	2	0,2	4	0,4	5	0,5	2	0,2								
manufatura	0,05	3	0,15	5	0,25	3,5	0,175	5	0,25								
tamaño	0,1	0	0	4	0,4	5	0,5	5	0,5								
mantenimiento	0,02	4	0,08	4	0,08	4	0,08	4	0,08								
potencia	0,09	4,5	0,405	4	0,36	4,2	0,378	1	0,09								
cimentación anclaje	0,06	1	0,06	3	0,18	4	0,24	5	0,3								
vida útil	0,08	5	0,4	5	0,4	5	0,4	5	0,4								
producción de energía	0,1	5	0,5	4	0,4	4,5	0,45	1	0,1								
ruido	0,06	2,5	0,15	4,3	0,258	4,2	0,252	4	0,24								
menor peso	0,06	3	0,18	4	0,24	4,5	0,27	3,8	0,228								
complejidad de piezas	0,07	4	0,28	5	0,35	2	0,14	5	0,35								
numero de piezas	0,03	4	0,12	5	0,15	4	0,12	5	0,15								
área de contacto con el viento	0,08	3	0,24	4	0,32	4	0,32	5	0,4								
Auto arranque, ¿requiere energía externa para su arranque?	0,07	2	0,14	2	0,14	2	0,14	4	0,28								
impacto ambiental	0,03	3	0,09	4	0,12	3	0,09	4	0,12								
mapa de vientos velocidad y dirección		4		4		4		4									
total putos	1	4	2,995	4	4,048	4	4,055	4	3,668								

7.2. Pernos

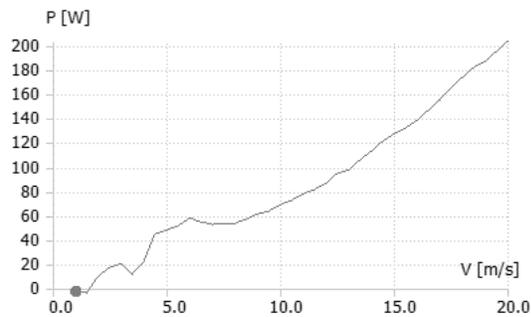
Tabla19 , variables relacionadas en el cálculo de esfuerzos para la selección de pernos

d tornillo	0,008	m	k1 constante del resorte	147 839 654	N/m
d ext arandela	0,016	m	k2	1 408 076 923	N/m
Distancia entre arandelas	0,0732	m	kb rigidez del perno	133 792 266	N/m
Longitud de la rosca	0,022	m	km rigidez del material	412 012 151	N/m
Longitud del vástago	0,09	m	C contante rigidez de la unión	0,2	
Lt	0,0052	m	fi fuerza de precarga	17 847,4	N
Ls	0,068	m	fb fuerza máxima del perno	17 877,6	N
resistencia de prueba Sp	650 000 000	Pa	fbmin	17 847,4	N
Sy	720 000 000	Pa	fba	15,1	N
Área de esfuerzo a tensión at	0,00 003 661	m ²	fbm	17 862,5	N
módulo de Young E	2E+11	Pa	σb	412 209,7	Pa
factor de esfuerzo a fatiga kf	2,2		σbm	487 912 209	Pa
factor de esfuerzo a fatiga promedio kfm	1		sf'	250 000 000	Pa
Sut	500 000 000	Pa	sf	175 000 000	Pa
p carga	123,1272	N	σa	906 861	Pa
			σm	487 912 209	Pa
Grado 9,8			σi	487 005 348	Pa
			factor N	3,7	

7.3. Simulaciones

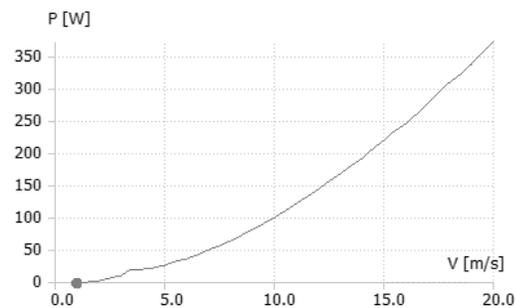
En el siguiente apartado se enseñan las simulaciones que se realizaron para determinar cuál turbina de la matriz de combinaciones (Tabla 14) posee más área en unidades cuadradas (U^2), la que fue determinada por medio de integrales, usando el método trapezoidal puesto que el programa suministra los datos de cada Gráfica.

Gráfica7, 1,33 – 0012-0,46, área: 1 649 U^2



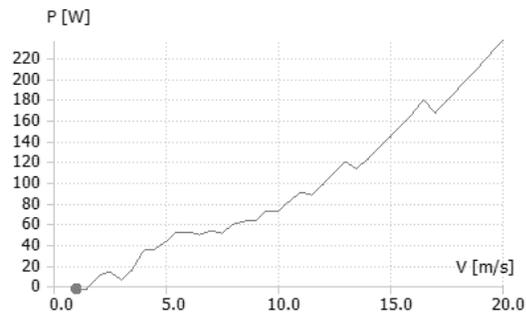
Fuente: software Qblade

Gráfica8, 1,33-0012-0,27, Área: 2 570,7 U^2



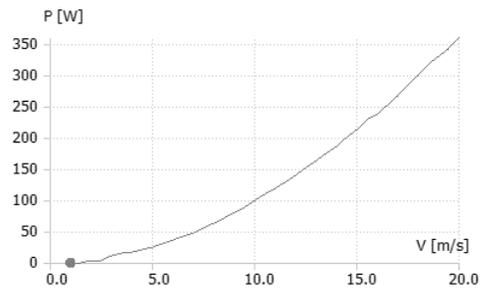
Fuente: software Qblade

Gráfica9, 1-0012-0,46, área: 1 814,6 U^2



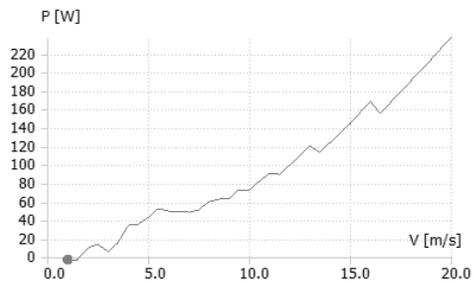
Fuente: software Qblade

Gráfica10, 1-0012-0,27 área: 2 491,6 U^2



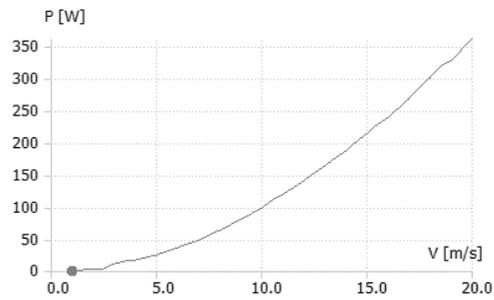
Fuente: software Qblade

Gráfica11, 0,971-0012-0,46, área: 1806,2 U^2



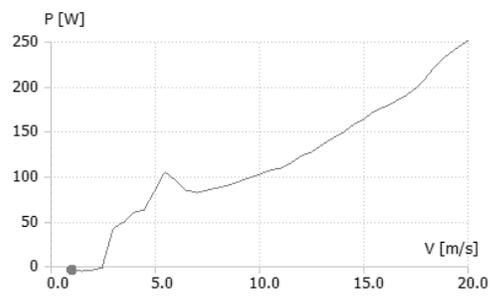
Fuente: software Qblade

Gráfica12, 0,971-0012-0,27, área: 2502,1 U^2



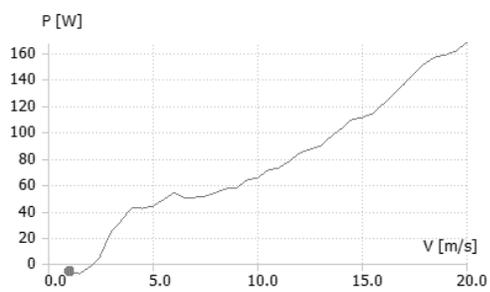
Fuente: software Qblade

Gráfica13, 1,33 – 4412-0,46, área: 2240,3 U^2



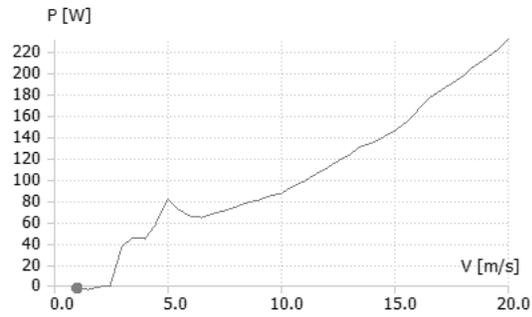
Fuente: software Qblade

Gráfica14, 1,33-4412-0,27, área: 1492,2 U^2



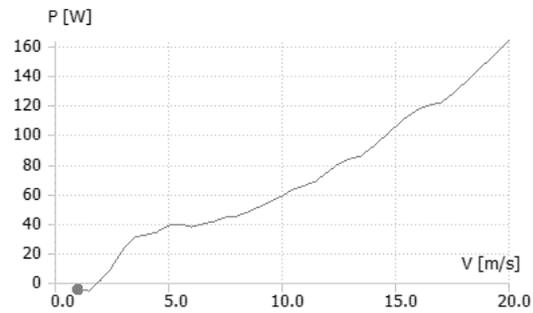
Fuente: software Qblade

Gráfica15, 1-4412-0,46, área: 1998,4 U^2



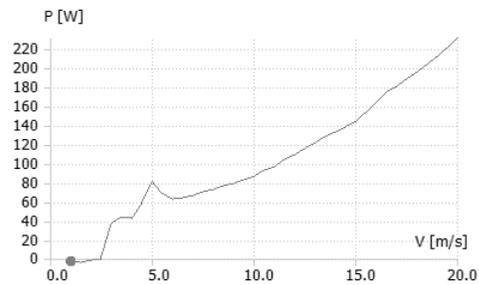
Fuente: software Qblade

Gráfica16, 1-4412-0,27, área: 1348,7 U^2



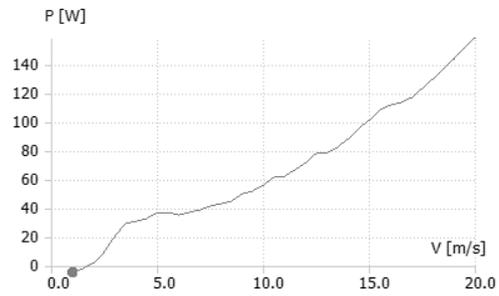
Fuente: software Qblade

Gráfica17, 0,971-4412-0,46, área: 1990,4 U^2



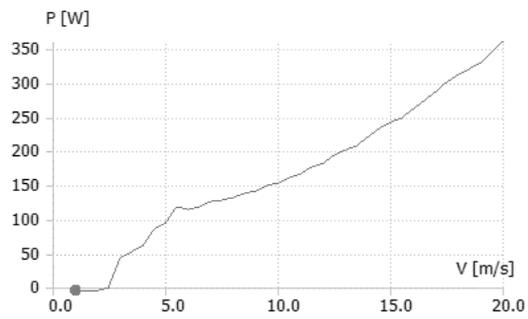
Fuente: software Qblade.

Gráfica18, 0,971-4412-0,27, área: 1297,4 U^2



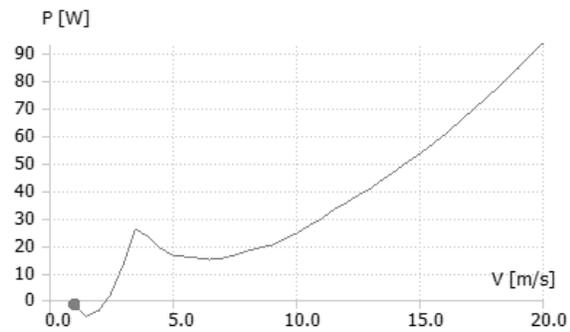
Fuente: software Qblade.

Gráfica19, 1,33 – 4415-0,46, área: 3240,7



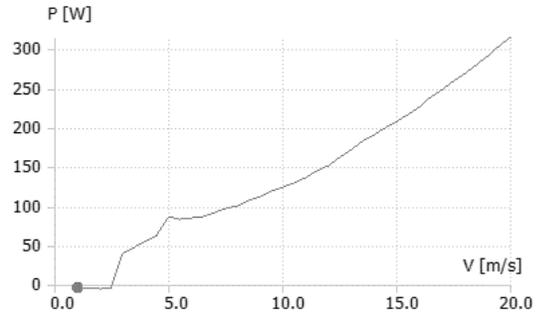
Fuente: software Qblade.

Gráfica20, 1,33-4415-0,27, área:688,4 U^2



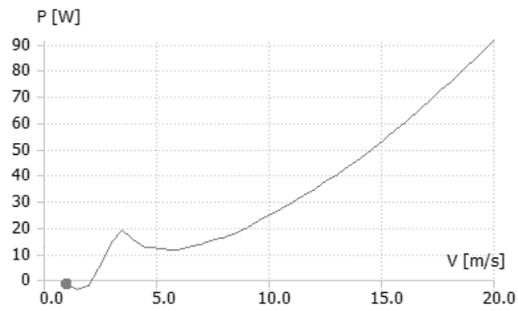
Fuente: software Qblade.

Gráfica21, 1-4415-0,46, área: 2722,602193 U^2



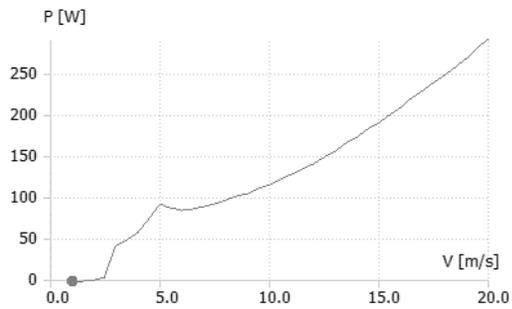
Fuente: software Qblade.

Gráfica22, 1-4415-0,27, área: 657,62321 U^2



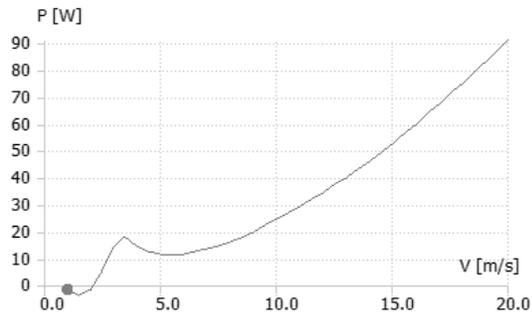
Fuente: software Qblade.

Gráfica23, 0,971-4415-0,46, área: 2546,639195 U^2



Fuente: software Qblade.

Gráfica24, 0,971-4415-0,27, área: 655,4 U^2



Fuente: software Qblade.