

Diseño de un prototipo de turbina eólica clase híbrido para bajas corrientes de aire

Guillermo Alfredo Martheyn Lizarazo

correo electrónico: guillermoalfredomli@ufps.edu.co

Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

Artículo Original

Cristian Ricardo Rubio Ramirez

correo electrónico: cristianricardorr@ufps.edu.co

Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

Resumen

El trabajo presenta una descripción del cálculo del potencial eólico disponible en la ciudad de Cúcuta, capital del departamento Norte de Santander, ubicado al nororiente de Colombia; analizando la velocidad promedio del viento ideal para el aerogenerador según los registros de los últimos años. Se selecciona un modelo de rotor híbrido, en el cual se combinan diseños de turbina tipo Savonius para mejorar el arrastre, con un modelo tipo Giromill para aumentar la sustentación. A partir de esta configuración, se calcula los parámetros de diseño como la geometría, la distribución de las palas y los elementos de sujeción y transmisión. Anexo a esto se construye un prototipo de carácter portátil para evaluar la funcionalidad y el rendimiento, para así fomentar la generación distribuida de energía con fuentes renovables y de igual forma reducir las pérdidas en el transporte de la electricidad.

Palabras claves: arrastre, potencial eólico, rotor Savonius, rotor Giromill, sustentación

Recibido: 8 de noviembre del 2016 Aprobado: 19 de enero del 2017

INTRODUCCIÓN

La energía eólica se ha usado desde la antigüedad, siendo la navegación un ejemplo claro de esto; pues por medio de velas se aprovechaba la fuerza del viento para impulsar barcos de grandes dimensiones. También se empleaba para labores agrícolas o domésticas como en los molinos de grano o sistemas para sacar agua de pozos.

Fue hasta los años setenta en una crisis energética que se concibió la idea de hacer electricidad con la energía del viento, de esa forma, se desarrollaron diseños mejorados de aerogeneradores que podían aprovechar tal recurso. Sin embargo, hoy en día, este problema no se ha solventado del todo, pues según un informe de Paul Gipe en 2004, un tercio de la población mundial vive sin energía eléctrica siendo los países tercermundistas los más afectados, particularmente las zonas rurales alejadas de las ciudades [1]. Esta falta de electricidad tiene graves

implicaciones en el desarrollo, salud y educación de los habitantes de estos lugares, por ello, organismos como el Banco Mundial están interesados en combatir este problema.

Gracias a que la inversión mundial en energías verdes aumentó en un 17% con 270 mil millones de dólares en el 2014, siendo Brasil quien lleva el estandarte de las energías limpias en Suramérica al invertir más de 7 billones de dólares [2]. Como posible solución se ha propuesto la generación distribuida, la cual consiste en generar la energía eléctrica en la cercanía de los centros de consumo, y esta será en pequeña o mediana escala (100 KW-10MW).

Es por eso que en los últimos años, en el campo de la ingeniería se ha buscado la forma de hacer que este tipo de energía marque la pauta por encima de los ya conocidos hidrocarburos, pues comparados con los combustibles como lo son el petróleo, el gas y el carbón; o con

las centrales nucleares, las hoy también llamadas energías alternativas poseen una ventaja sobre las anteriores nombradas ya que al no ser altamente contaminantes no requieren una vigilancia o custodia de residuos tóxicos durante años.

Existen dos tipos de máquinas que aprovechan la energía cinética del viento. Por un lado están los aeromotores, quienes convierten el movimiento del viento en energía mecánica directamente. Su aplicación más notoria es el bombeo de agua de sitios profundos hacia la superficie. Por otra parte se encuentran los aerogeneradores, los que gracias a que el viento mueve un rotor, se crea la energía eléctrica que posteriormente es almacenada y conducida a centrales distribuidoras.

Este proyecto es dirigido a la población de la ciudad de Cúcuta, capital del departamento Norte de Santander, ubicado al nororiente de Colombia, donde según la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) y el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia) con su publicación "Atlas de viento y energía eólica de Colombia" [3], la ciudad cuenta con una velocidad promedio anual de 3,3 m/s, pero según los informes, hay ocasiones en que estas velocidades llegan hasta los 7 m/s entre las 7 de la mañana hasta las 5 de la tarde, en lo que se conocen como ráfagas del día. La ciudad cuenta con un corredor de montañas que ayuda a dirigir los vientos hacia el centro por el sector del municipio de Los Patios. Ayuda también la formación geográfica, pues al ser considerada como una planicie el viento puede transitar sin mayores obstáculos.

El diseño se basa en un modelo de aerogenerador de eje vertical, cuya característica principal es que el rotor es perpendicular al suelo, además, son utilizados en zonas donde el potencial eólico no es satisfactorio, áreas donde la velocidad promedio del viento es considerablemente baja, por debajo de los 5 m/s [2]. Los de eje vertical poseen la ventaja de captar el viento en cualquier dirección, por cual no necesitan sistemas de direccionamiento, no requieren de gran espacio, por tanto se pueden emplear en las ciudades, no son tan ruidosos comparados con los rotores de eje horizontal, y los sistemas de conversión de energía eléctrica se pueden ubicar en el suelo, lo que facilita su mantenimiento.

El término híbrido hace referencia a que se emplearon dos sistemas de eje vertical: rotor Giromill y rotor Savonius [4]. El Savonius es el modelo de rotor más simple, su diseño consiste en un cilindro hueco partido por la mitad, donde sus dos mitades han sido desplazadas para formar una especie de S. Las partes cóncavas de la S captan el viento mientras que los reversos presentan una menor resistencia al viento. Por otro lado el Giromill consiste en palas verticales unidas al eje por unos brazos horizontales, que pueden salir por los extremos del aspa e incluso desde su parte central. Las palas verticales cambian su orientación a medida que se produce el giro del rotor para un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento.

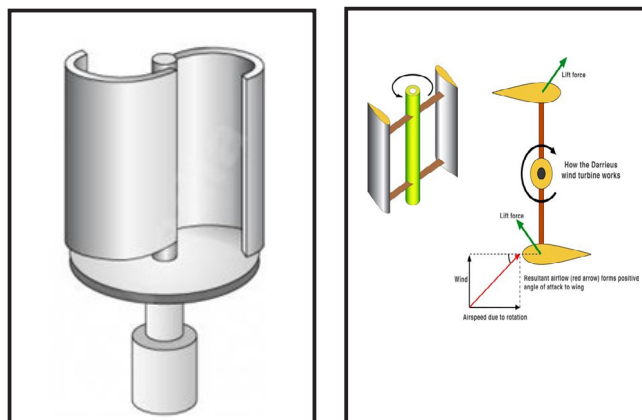


Fig. 1. Esquema de rotores de eje vertical empleados: a) rotor Savonius; b) rotor Giromill.

Para la construcción del prototipo se tiene en cuenta las normas técnicas colombianas que reglamentan la construcción de dispositivos eólicos como:

Norma Técnica Colombiana (NTC) 5725: Aerogeneradores: Requisitos de diseño para aerogeneradores pequeños, expedida el 18 de septiembre de 2009 [5].

Guía Técnica Colombiana (GTC) 172 – Documento ANC 0603-18-01: Guía para la utilización de la energía eólica para generación de energía eléctrica, expedida el 21 de marzo de 2003 [6].

Norma Técnica Colombiana (NTC) 5363: Aerogeneradores: Requisitos de diseño, expedida el 17 de abril de 2013 [7].

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar el diseño del aerogenerador se debe identificar las condiciones externas e internas en las que va a trabajar este. En el estudio de las condiciones externas se considerarán todas las condiciones que no tienen una relación directa con la máquina y su fabricación. En estas condiciones se pueden considerar la temperatura exterior, la densidad del aire, las condiciones del suelo, la altitud, la velocidad promedio del viento. Sumado a esto se debe tener en cuenta la situación y posición geográfica, topografía de la zona, y si son zonas urbanas, construcciones de edificios altos [8]. Todas ellas no son constantes y deben ser tenidas en cuenta para el diseño final del equipo. Para el estudio de las condiciones internas se considera todas las condiciones que están relacionadas con la máquina, es decir, características propias del equipo como podría ser el diseño de las palas, el sistema de transmisión, el generador eléctrico.

Condiciones externas de diseño

Se consideran tanto las condiciones ambientales como los parámetros de posicionamiento del aerogenerador. Una característica importante es la altura sobre el nivel del mar a la cual se encuentra Cúcuta. Se toma un promedio de superficie geográfica para tener una referencia estándar [9]. En la tabla 1 se pueden observar los datos de altitud de Cúcuta.

Además de la altitud, la temperatura promedio de la ciudad influye en cómo se desarrollan las corrientes de aire. El viento es causado por las diferencias de temperatura, esto produce un desigual calentamiento de las diversas zonas de la Tierra y de la atmósfera. Por efectos de diferencia de densidades, las masas de aire más caliente tienden a ascender, y su lugar es ocupado entonces por las masas de aire circundante, más frías.

Tabla 1 Datos de altitud de Cúcuta	
Referencia	Valor
Media	320 m snm
Máxima	1600 m snm
Mínima	80 m snm

En la tabla 2 se presenta un registro promedio de la temperatura ambiente de la ciudad, así como un promedio máximo y mínimo, para tener un margen de variables en los cálculos, todo esto según los meses del año [10].

Tabla 2 Datos promedio de temperatura en Cúcuta			
Mes	Temperatura (°C)		
	Media mínima	Media	Media máxima
Enero	21,3	25,8	30,3
Febrero	21,8	26,3	30,8
Marzo	22,3	26,7	31,1
Abril	22,7	27,0	31,5
Mayo	23,4	27,8	32,8
Junio	23,9	28,1	32,9
Julio	23,6	28,0	33,0
Agosto	23,7	28,5	33,9
Septiembre	23,3	28,4	34,0
Octubre	22,7	27,4	32,7
Noviembre	22,4	26,5	31,2
Diciembre	21,7	25,8	30,1
Anual	22,7	27,2	32,0

La densidad de potencia, parámetro clave para cuantificar el potencial eólico de una zona, depende linealmente de la densidad del aire, por lo que un aire frío presenta una densidad de potencia superior a uno más caliente. Asimismo, y con igualdad de temperatura, un lugar situado a nivel del mar presentará una densidad de potencia mayor a otro a una altitud mayor por el hecho de que la densidad del aire disminuye con la altura. [2].

Es necesario verificar si el cambio de la densidad del aire durante el año está fuera de los márgenes que se recomienda para la densidad $1,225 \pm 0,050 \text{ kg/m}^3$. El proceso utilizado en el artículo, debido a los datos disponibles, fue el cálculo de la media anual de la densidad del aire (ρ) con una entrada de datos de las temperaturas medias [11].

$$\rho = 1,225 e^{\left[\left(\frac{-Z}{8435} \right) - \left(\frac{T-15}{288} \right) \right]} \left(\text{kg / m}^3 \right) \quad (1)$$

siendo:

ρ : Densidad del aire (kg/m^3).

Z : Altitud media de la ciudad (m).

T : Temperatura media anual (°C).

De acuerdo con los datos tomados de la estación meteorológica de la Universidad Francisco de Paula Santander, sede principal, ubicada al sur de la ciudad de Cúcuta, y complementada con registros históricos del IDEAM de los últimos años, se obtiene la tabla de velocidad promedio del viento de la ciudad, según los meses del año (tabla 3).

Condiciones internas de diseño

La potencia del viento se determina a partir de la siguiente expresión:

siendo:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \quad (\text{W / m}^2) \quad (2)$$

P_v : Potencia del viento por unidad de área (W/m^2).

ρ : Densidad del aire (kg/m^3).

V : Velocidad del aire (m/s).

Debido a los efectos que se obtienen al conducir una corriente de aire por una sección de área de reducido tamaño, nunca se transfiere el 100 % de la energía que ofrece el viento.

$$P_{\text{util}} = (C_p) \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (\text{W}) \quad (3)$$

La potencia de un aerogenerador (turbina eólica) se define como:

siendo:

C_p : Coeficiente de potencia (límite de Betz), donde el valor límite que se ha alcanzado es de $16/27 = 59,3 \%$ Coeficiente de potencia máximo (ideal).

A : Área de barrido.

El límite de Betz, es útil para seleccionar el tipo de rotor. Como se evidencia en la figura 2, el Savonius presenta una deficiencia aerodinámica, sin embargo, esto es únicamente un indicador de su estado de desarrollo, es por eso que se combina con un rotor Giromill, perteneciente a la familia Darrieus, para complementar las cualidades de uno y otro (arrastre y sustentación) [12] y [13].

Para lograr el máximo desempeño de un rotor Savonius (figura 3), la mejor configuración del rotor está dada por las siguientes ecuaciones:

$$R = D - 0,5S \quad (4)$$

$$S = 0,1D \quad (5)$$

Tabla 3

Histórico de velocidades de viento por mes

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Promedio de velocidades de viento por día (m/s)		2,10	2,22	2,39	2,28	4,44	6,55	6,37	4,45	5,88	3,77	3,56
		2,23	2,07	3,53	2,23	2,44	6,50	6,67	4,69	4,41	4,38	2,76
		1,90	2,18	2,88	2,57	2,64	5,47	5,06	3,16	2,78	2,75	2,29
		2,26	1,96	2,38	2,90	4,87	5,24	2,95	3,30	2,37	1,79	2,03
	2,33	2,10	1,97	3,68	2,00	3,53	4,14	3,90	3,83	3,13	3,01	2,98
	1,78	1,71	1,89	3,94	2,94	4,56	4,58	5,10	5,89	2,58	2,35	2,29
	1,77	1,50	2,20	4,39	2,66	3,64	5,79	4,64	7,31	2,70	2,38	1,98
	2,39	2,68	2,71	3,42	2,80	3,15	4,97	3,64	6,68	3,09	2,25	2,20
	2,44	1,45	2,70	4,31	1,61	2,95	5,03	5,90	6,35	1,48	1,35	1,54
	2,27	1,88	2,38	4,39	1,72	3,12	5,60	4,68	4,80	1,93	1,89	1,97
	1,66	1,61	2,44	3,46	1,46	3,63	6,34	2,80	4,55	3,00	2,24	2,23
	2,33	1,86	2,61	2,58	2,40	6,25	6,90	5,23	4,05	3,23	2,12	1,97
	1,83	2,01	2,10	2,06	2,06	6,90	5,97	3,85	4,64	4,18	2,92	2,87
	2,15	2,35	2,30	2,73	2,03	4,15	5,69	4,48	3,49	3,78	3,45	2,38
	2,14	1,97	2,39	2,45	2,25	5,88	5,75	5,49	1,70	4,05	4,02	
	1,89	1,28	1,93	2,67	2,43	6,93	6,97	5,47	2,05	2,95	3,43	
	2,00	1,01	1,29	1,77	2,53	7,40	6,80	5,61	2,37	3,37	3,49	
	1,92	1,87	2,03	2,65	2,66	6,34	6,58	5,55	2,32	2,55	2,98	
	1,36	2,39	2,68	3,08	2,81	6,46	6,29	4,91	2,77	1,94	2,09	

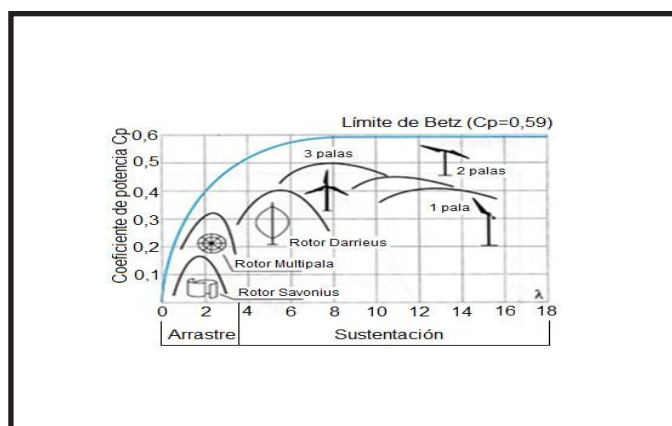


Fig. 2. Coeficientes de potencia para diversos tipos de aerogeneradores [13].

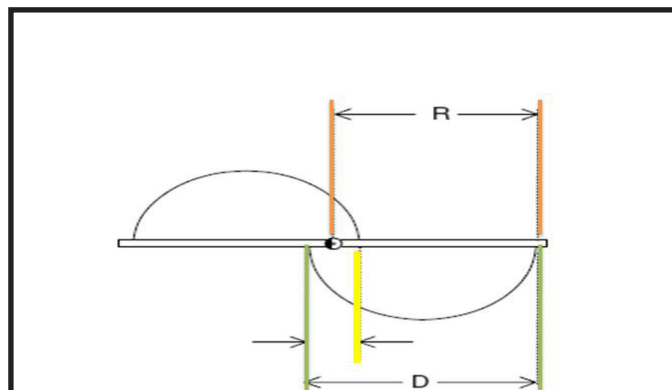


Fig. 3. Disposición de un aerogenerador Savonius [12] y [13].

El área de arrastre del rotor Savonius se define como:

$$A = H \cdot 2R \quad (6)$$

donde:

H : Altura del rotor (m).

R : Radio global del rotor (m).

D : Diámetro de una sección cóncava (m).

S : Área de sujeción del eje (m).

Para el rotor Giromill, (figura 4). Se debe tener en cuenta un perfil aerodinámico, el cual se define como cualquier sección de ala cortada por un plano paralelo a la cuerda de la misma. Los perfiles se pueden dividir en dos grandes tipos: simétricos y asimétricos. Un perfil simétrico no posee combadura, es decir, la línea de curvatura media y la línea de cuerda coinciden. Claramente, en los perfiles simétricos la parte superior del perfil (extrados) es una imagen reflejo de la parte inferior (intrados) [13]. Debido a su condición geométrica los perfiles simétricos tienen un bajo costo y fácil construcción con respecto a un perfil asimétrico. La fórmula de un perfil simétrico se define como:

El área del rotor Giromill simétrico (figura 5) está definida como:

$$L = 4 \cdot b \quad (7)$$

$$A = H \cdot D \quad (8)$$

donde:

H : Altura del rotor (m).

D : Distancia entre palas (m).

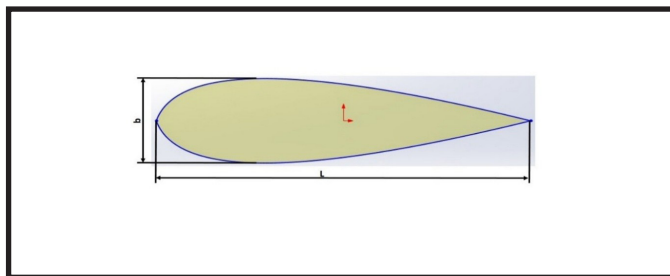


Fig. 4. Perfil aerodinámico simétrico del aerogenerador Giromill.

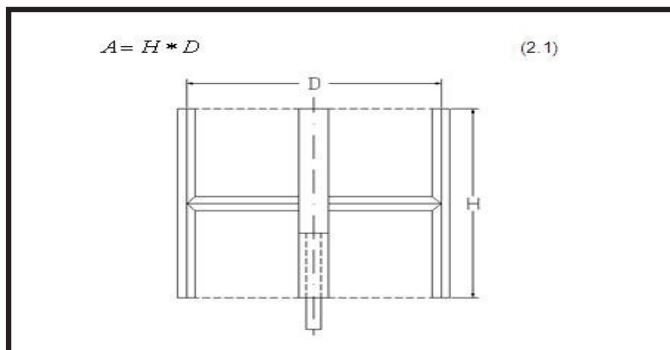


Fig. 5. Disposición de una aerogenerador Giromill [13].

RESULTADOS

Como primer indicador del rendimiento que se obtiene con el aerogenerador híbrido, se organiza la información de la tabla 4, en una tabla estadística de datos ordenados, cuyo objetivo es conocer la frecuencia con la que determinadas velocidades de viento son registradas en la ciudad de Cúcuta.

Tabla 4						
Estadísticas del registro de velocidad de viento						
Velocidad de viento (m/s) [Frontera inf.]	Velocidad de viento (m/s) [Frontera sup.]	x_i (m/s)	f_i	F_i	f_i^*	$f_i^* (\%)$
0	1	0,5	0	0	0	0 %
1,1	2	1,55	39	39	0,1781	18 %
2,1	3	2,55	87	126	0,3973	40 %
3,1	4	3,55	30	156	0,137	14 %
4,1	5	4,55	25	181	0,1142	11 %
5,1	6	5,55	19	200	0,0868	9 %
6,1	7	6,55	17	217	0,0776	8 %
7,1	8	7,55	2	219	0,0091	1 %
8,1	9	8,55	0	219	0	0 %
9,1	10	9,55	0	219	0	0 %
Total			219		1	100 %

siendo:

x_i : Marca de clase.

f_i : Frecuencia absoluta.

F_i : Frecuencia absoluta acumulada.

f_i^* : Frecuencia relativa.

$f_i^* (\%)$: Frecuencia relativa (porcentual).

Según (1), la densidad del aire promedio de la ciudad es de $1,13 \text{ kg/m}^3$

En la figura 6 se observa el histograma de velocidad del viento.

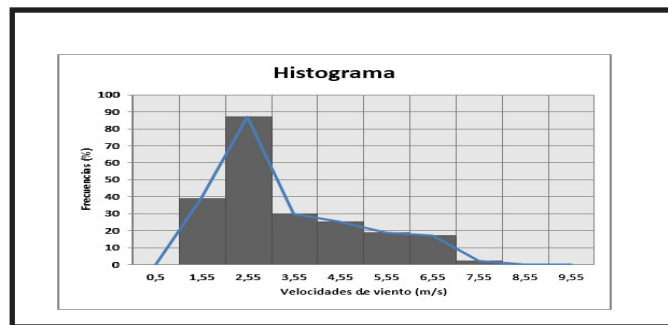


Fig. 6. Histograma de velocidades de viento.

Para obtener la velocidad de diseño es necesario emplear una distribución de Weibull. Mediante los datos de la ecuación de distribución de Weibull, correspondientes al parámetro de escala v en metros por segundos, que determina la velocidad promedio del viento en el lugar de estudio y el parámetro de forma k que indica el grado de dispersión de los registros, con estos se puede establecer la frecuencia con la que se manifiesta una velocidad determinada del viento, la cual será la indicada para conocer el potencial eólico de la zona de Cúcuta. Ver figura 7.

Promedio de velocidades: 3,35 m/s.

Grado de dispersión de los registros: 2,914.

El factor de escala v (m/s) indica la velocidad promedio del lugar de estudio, y el factor de forma k es un índice de dispersión de los datos y la frecuencia con la que se presenta la velocidad promedio. Se determina la velocidad de diseño del viento en el lugar de estudio como el valor entero próximo del análisis estadístico. Ver tabla 5 y figura 8.

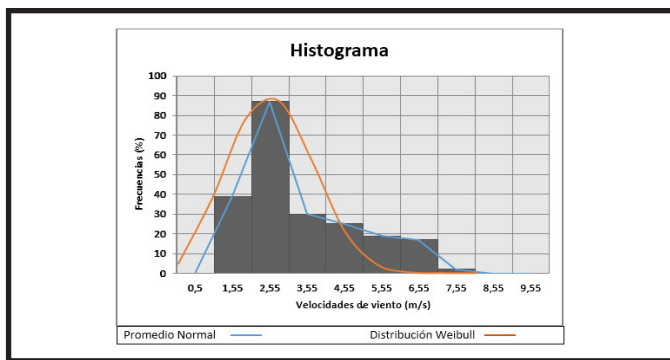


Fig. 7. Diagrama de Weibull del registro de velocidades de viento.

mendaciones empíricas la relación entre la altura y el diámetro en los rotores Savonius debe ser $H=0,5D$. Según las ecuaciones (4) – (8) la altura calculada es de 0,5 m y el diámetro del eje es 50 mm. Ver figura 9.

Este esquema muestra la disposición bajo la cual se deben ubicar los alerones tipo Giromill en el sistema aerogenerador. Por otro lado, el esquema ayuda a percibir las trayectorias de los vientos y cómo sus vectores inciden en los dos tipos de rotor, tanto el Savonius como el Giromill. Esta es la base para obtener el plano de construcción de la turbina eólica (figura 10).

Tabla 5
Evaluación de parámetros de diseño

Area = 1,00 m ²							
Cp = 0,10		Cp = 0,15		Cp = 0,20		Cp = 0,25	
velocidad (m/s)	potencia (W)	velocidad (m/s)	potencia (W)	velocidad (m/s)	potencia (W)	velocidad (m/s)	potencia (W)
1	0,06	1	0,09	1	0,12	1	0,15
2	0,47	2	0,70	2	0,94	2	1,17
3	1,58	3	2,38	3	3,17	3	3,96
4	3,76	4	5,64	4	7,51	4	9,39
5	7,34	5	11,01	5	14,68	5	18,34
6	12,68	6	19,02	6	25,36	6	31,70
7	20,13	7	30,20	7	40,27	7	50,34
8	30,05	8	45,08	8	60,11	8	75,14
9	42,79	9	64,19	9	85,58	9	106,98
10	58,70	10	88,05	10	117,40	10	146,75

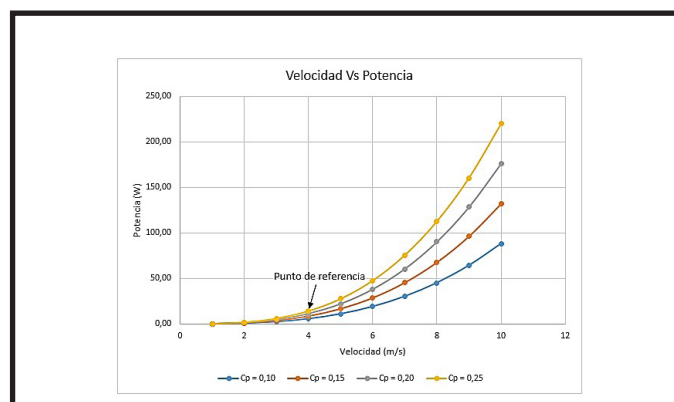


Fig. 8. Comparación entre velocidad y potencia generada.

De acuerdo con las tablas de potencia previamente calculadas, se observa que para la velocidad de 4 m/s y para generar una potencia aproximada de 9,8 watts, el coeficiente aerodinámico correcto es $c = 0,25$.

El área de barrido en base a (3) es igual a 1,084 m².

Para calcular la geometría del aerogenerador se debe tener en cuenta que el sistema del rotor será un híbrido entre un rotor Savonius y un rotor Giromill. La principal característica que debe tener es que arranque a bajas velocidades por eso es predominante el uso del Savonius. El uso de la fuerza de sustentación y arrastre para extraer grandes potencias al viento lo aporta el Giromill. Por reco-

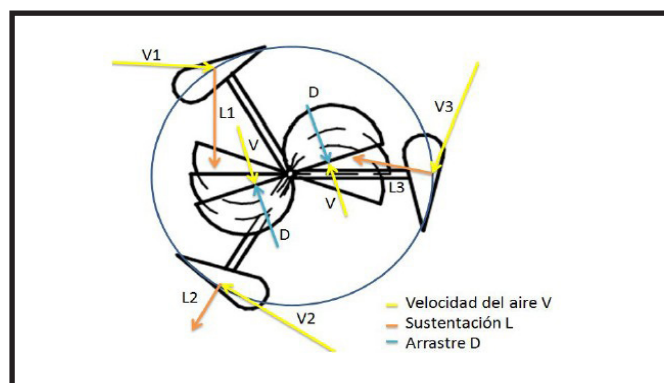


Fig. 9. Diagrama de fuerzas del aerogenerador [12].

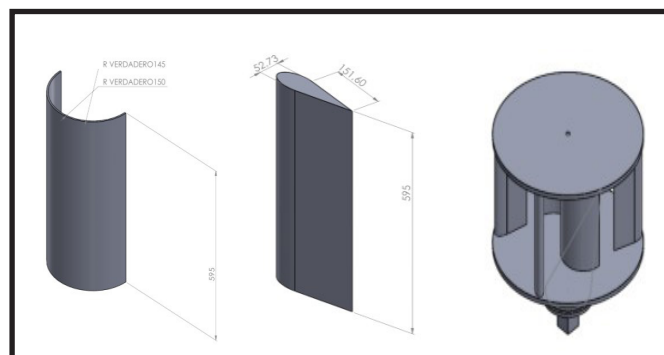


Fig. 10. Planos de construcción del prototipo de energía eólica: a) sección de Savonius; b) alerón Giromill; c) prototipo completo.

Basado en los planos de la figura 10, se construye un prototipo genérico y sencillo, (figura 11), con materiales reciclables, para comprobar parámetros de dimensionamiento, y verificar la estabilidad del aerogenerador cuando éste gire.



Fig. 11. Prototipo del aerogenerador.

DISCUSIÓN

Para cuestiones de construcción, se ha seleccionado un rodamiento rígido de bolas marca Lucas 6205 2RS autocontenido, el cual se adapta específicamente al diámetro del eje de construcción.

El sistema de transmisión cuenta con dos poleas construidas en madera con diámetros acanalados de 30 cm y 2,5 cm respectivamente, con una relación de 1:12.

La correa de tipo plana fue elaborada por los autores, en material de caucho, cuenta con una longitud de 85 cm y un espesor de 1,5 cm, para evitar deformaciones al momento de girar el dispositivo.

Por cuestiones de disponibilidad de material y con el fin de aumentar el área de arrastre para beneficios de potencia, se decide aumentar la altura del rotor a 0,6 m. Debido a que un eje de ese tamaño no es considerado técnicamente adecuado para usos de generación de energía eólica, se recomienda reducir el dato a la mitad de su magnitud 25 mm. Se compensa la reducción del diámetro del eje con la altura del rotor.

Se determina la velocidad de diseño del viento en el lugar de estudio como el valor entero próximo del análisis estadístico. Es por eso que en la evaluación de parámetros la velocidad del viento es 4 m/s

CONCLUSIONES

El diseño del aerogenerador intenta dar solución al problema de la excesiva contaminación causada por las empresas generadoras de energía eléctrica a gran escala, de una manera sencilla y aunque, desde el punto de vista ingenieril, todavía quedan muchos detalles por fijar, mediante este proyecto se quiere dar un primer paso que serviría para la construcción de un prototipo fiable.

Este tipo de aerogeneradores, nuevos en su función híbrida, presenta grandes ventajas entre las cuales se encuentra una gama de funcionamiento grande debido a

que inicia su ciclo de trabajo a bajas velocidades de viento y continúa generando mediante la fuerza de sustentación para alcanzar altas velocidades, mayores a la del viento.

La ciudad de Cúcuta no se encuentra entre las principales regiones en potencia eólica, sin embargo, los últimos estudios meteorológicos indican que bajo las medidas técnicas adecuadas y siguiendo las normas de construcción indicadas, el nivel regular de viento de 4 m/s puede ser usado en un futuro como pieza fundamental en el desarrollo de energías alternativas.

La construcción de este aerogenerador se basa en materiales asequibles y que estén al alcance de las personas, sin tener dispuesto un elevado presupuesto

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Jorge Iván López Caballero, estudiante de ingeniería Mecánica de la Universidad Francisco de Paula Santander, sede principal Cúcuta, por el apoyo al momento de realizar los estudios, adquisición de datos y desarrollo del prototipo.

REFERENCIAS

1. **GIPE, Paul.** "Wind energy for the rest of us: a comprehensive guide to wind power and how to use it" wind-works.org. First edition. Nov. 17, 2016. pp. 576. ISBN: 0997451815. Disponible en web: <https://www.abebooks.com/9780997451818/Wind-Energy-Rest-Comprehensive-Guide-0997451815/plp> [consultado enero 2017].
2. **ARBELOA, Lorena; ZURITA, Jesús.** "Diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius para electrificación rural". Tesis de grado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España, 2012.
3. **UPME, UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA.** "Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia". IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, Colombia, 2006, pp. 19 – 75.
4. **ABB, ASEA BROWN BOVERI S.A.** "Plantas eólicas". *Cuaderno de Aplicaciones Técnicas N° 12*. Code: 1SD-C007112G0201, 2012, pp. 13 -14.
5. **INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN.** *Norma Técnica Colombiana (NTC) 5725: Aerogeneradores: Requisitos de diseño para aerogeneradores pequeños*. ICONTEC I CS: 27.180.00, 106 pp, Bogotá, Colombia, 2009.
6. **UPME, UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA** *Guía Técnica Colombiana (GTC) 172 – Documento ANC 0603-18-01: Guía para la utilización de la energía eólica para generación de energía eléctrica*, Unión Temporal ICONTEC – AENE. 52 pp, Bogotá, Colombia, 2003.
7. **INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN.** *Norma Técnica Colombiana*

- (NTC) 5363: *Aerogeneradores: Requisitos de diseño*. ICONTEC IEC: 61400-1:2005, 97 pp, Bogotá, Colombia, 2013.
8. **AVELLANEDA, José**. "Estudio del potencial de generación de energía eólica en la zona del páramo de chontales, municipios de Paipa y Sotaquirá. Departamento de Boyacá". Director: Ernesto Torres. Tesis de Maestría, Universidad Libre, Bogotá, Colombia, 2012.
 9. **ALCALDÍA DEL MUNICIPIO**. "Información general de Cúcuta" [en línea]. Cúcuta, Norte de Santander, Colombia [ref. 2013]. Disponible en web: http://www.cucuta-nortedesantander.gov.co/informacion_general.shtml [Consultado en mayo de 2015].
 10. **INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES IDEAM**. Boletines climatológicos 2010-2016. Bogotá, Colombia [ref. Agosto de 2016]. Disponible en web: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/climatologico-mensual> [Consultado en agosto 2016].
 11. **ARAUJO, Alex; MELO, Gilberto et. al.** "Simulación de la Producción de Energía Eléctrica con Aerogeneradores de Pequeño Tamaño". *Revista Información Tecnológica*. Sept – Dic. 2009, vol. 20, núm.3, pp. 37-44. ISSN: 0718-0764. Disponible en web: doi:10.1612/inf.tecnol.4054it.08 [consultado en septiembre 2015].
 12. **CHÁVEZ, Sandra**. "Diseño de un micro aerogenerador de eje vertical". Director: José Fernández. Tesis de Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 2010.
 13. **FARIÑAS, Ernesto; LÓPEZ, Yoandy; CABEZA, Javier**. "Estudio para el diseño aerodinámico de los aerogeneradores verticales tipo Giromill" [en línea] Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad de Santa Clara, Cuba [ref. 2014]. Disponible en web: <http://www.monografias.com/trabajos94/estudio-diseno-aerodinamico-aerogeneradores-verticales-tipo-giromill2/estudio-diseno-aerodinamico-aerogeneradores-verticales-tipo-giromill2.shtml#ixzz4Y1H4egVu> [consultado en enero 2017].

AUTORES

Guillermo Alfredo Martheyn Lizarazo

Ingeniero Mecánico, Grupo de Investigación de Desarrollo en Procesos Industriales (GIDPI), Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

Cristian Ricardo Rubio Ramírez

Ingeniero Mecánico, Grupo de Investigación de Desarrollo en Procesos Industriales (GIDPI), Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

Design of a Hybrid Class Wind Turbine Prototype for Low Air Currents

Abstract

The following work presents a description of the calculation of the available wind potential in the city of Cúcuta, Norte de Santander's department, located to the northeast of Colombia; analyzing the average wind speed ideal for the wind turbine according to the records of the last years. A hybrid rotor model is selected, in which Savonius turbine designs are combined to improve drag, with a Giromill type model to increase lift. From this configuration, design parameters such as geometry, blade distribution, and clamping and transmission elements are calculated. Annex to this, a portable prototype is built to evaluate functionality and performance, in order to promote distributed generation of energy with renewable sources and to reduce losses in the transportation of electricity.

Key words: drag, wind potential, rotor Savonius, rotor Giromill, lift