

Propuesta metodológica para el diseño de las aspas de turbinas de viento de eje horizontal

Recibido para evaluación: 9 de Oct de 2004
Aceptación: 21 de Feb de 2005
Entrega de versión final: 1 de Mayo de 2005

Juan M. Mejía ^a, Farid Chejne ^{a*}, Ricardo Smith
^a, Luis F. Rodríguez ^b
Oscar Fernández ^b, Isaac Dyner ^a

RESUMEN

Se desarrolla una metodología para estimar la distribución de la cuerda del perfil y el ángulo de paso a lo largo de radio del aspa, por medio de las ecuaciones de conservación del momento axial y angular, la teoría del elemento de aspa y el proceso de optimización. Esta metodología toma en consideración el concepto de obtener la potencia eólica para diferentes valores de la cuerda del perfil y seleccionar aquel que suministre el máximo valor de la potencia del viento.

Este trabajo está basado en el proyecto “Mercado de la Energía Eólica en Colombia: Operación, Riesgo y Posibilidades de Expansión.

PALABRAS CLAVES: Energía eólica, turbinas de viento de eje horizontal, Modelo matemático.

ABSTRACT

A methodology is developed to estimate the chord distribution airfoil and blade twist along the radius of the blade by using axial and angular moment conservation equations, blade element theory and optimization processes. This methodology takes into account the concept related with getting wind power for different chord blade values and selecting one that facilitates to get the maximum value for wind power.

This work is based on project “Wind Energy Market in Colombia: Operation, Risk and Expansion Possibilities”.

KEYWORDS: Wind energy, horizontal axis wind turbine, mathematical modeling.

^a Instituto de Energía,
Universidad Nacional de
Colombia, sede Medellín.
Cr. 80 N 65-223. Medellín

^b Empresas Públicas de
Medellín. Cr. 58 N 42 125.
Medellín

*Tel.: +57-4-4255000; fax:
+57-4-2341002.
fchejne@unalmed.edu.co

1. Introducción

La energía eólica es una tecnología alternativa limpia que está siendo eficientemente integrada al sistema eléctrico interconectado en muchos países alrededor del mundo [1]. Además, estos sistemas eólicos pueden generar energía en zonas aisladas que no tienen acceso al sistema eléctrico interconectado.

En general, el diseño de los sistemas de conversión de energía eólica (WECs) es una tarea difícil, porque involucra complejos aspectos de diseño de un amplio rango de disciplinas. Bansal y otros [2] presentan una discusión completa acerca de los siguientes aspectos: factores que afectan la energía eólica, requerimientos, problemas relacionados con la red interconectada, clasificación de los diferentes esquemas de generación eólica, criterios para la selección de WECs, selección del generador, tres filosofías de diseño básicos, principales consideraciones en el diseño de aerogeneradores, selección de dos o tres aspas, consideraciones de tamaño y peso y aspectos ambientales. Varol y otros. [3] estudiaron los aspectos relacionados con la posición correcta del perfil con respecto a la dirección del viento.

Para estudiar la energía eólica en la región de la guajira y el impacto de esta tecnología tanto en los mercados de energía como en la estabilidad del sistema eléctrico [4]; [5]; [6], se hace necesario contar con modelos flexibles que permitan predecir el aprovechamiento energético en la región de interés. Los resultados de los modelos deben proveer elementos para el diseño de las aspas de la turbina y para evaluar la potencia extraída del viento.

El futuro de ésta tecnología está relacionado con el diseño confiable, seguro y económico de las aspas de la turbina [7]. Un modelo que ha sido ampliamente usado, extraído de la teoría del momentum de elemento de aspa de Glauert [8], ha sido adaptado para el propósito del presente trabajo. Molenaar y Dijkstra [9] presentan un resumen de las correcciones usuales hechas al modelo de Glauert. Existen muchos métodos basados en la teoría del momentum de elemento de aspa que han sido propuestos para la optimización de turbinas de viento ([8], [10], [11], [12]) que permitan el diseño preliminar de las aspas maximizando la potencia extraída.

En este trabajo se presenta un modelo matemático; el cual permite predecir la potencia eólica basado en el modelo de Glauert. La investigación introduce conceptos relacionados con el proceso de optimización que facilite la obtención de parámetros tales como la distribución de la cuerda del perfil y la torsión (ángulo de paso) a lo largo del radio del aspa. Para el desarrollo de la simulación, la información aerodinámica del perfil fue obtenida por medio del túnel de viento virtual *Design Foil Demo R5.32* obteniendo los coeficientes de arrastre y sustentación para diferentes valores del número de Reynolds y el ángulo de ataque. El software requiere como datos de entrada: el radio del aspa, velocidad angular del rotor, y velocidad de diseño, fundamentalmente.

Desde el análisis teórico se puede concluir que el uso efectivo de esta tecnología debe considerar factores como la variabilidad de la velocidad del viento en la zona de interés, la curva de diseño del aerogenerador y las interferencias que se generan al integrar WECs al sistema eléctrico.

2. Teoría Fundamental de los Aerogeneradores de Eje Horizontal.

La teoría que se aplicará para predecir tanto la potencia suministrada por la turbina, como el diseño óptimo de la misma, está basada en la unificación de tres formulaciones diferentes:

- Teoría de cantidad de movimiento axial,
- Teoría de cantidad de momento angular,
- Teoría del elemento de aspa.

Las cuales han sido bastante utilizadas en la literatura (ver por ejemplo [10], [12], [13], [14] y [15]).

Antes de hablar de dichas teorías, es importante conocer la potencia del viento y la máxima potencia teórica que le puede transferir a la turbina eólica.

2.1 Potencia del viento

La energía cinética contenida en una masa de aire m con movimiento uniforme unidireccional de velocidad V_1 está dada por:

$$E = \frac{1}{2} m V_1^2 \quad (1)$$

El flujo másico \dot{m} , con la densidad ρ , a través de una superficie de control estacionaria de sección frontal A , se puede expresar como:

$$\dot{m} = \rho A V_1 \quad (2)$$

Luego, la potencia eólica de la corriente de viento a través de A será:

$$P_{Aire} = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \quad (3)$$

2.2 Teoría de cantidad de movimiento axial

Los aerogeneradores son equipos que convierten la energía cinética del viento en energía mecánica, por lo tanto, los principios básicos que se aplican en estos casos son las leyes de conservación de la masa, del momentum y de la energía.

La teoría considera que un rotor en movimiento es un disco poroso que experimenta una fuerza axial o empuje por efecto del viento incidente, denominado teoría del momentum axial (ver Fig. 1).

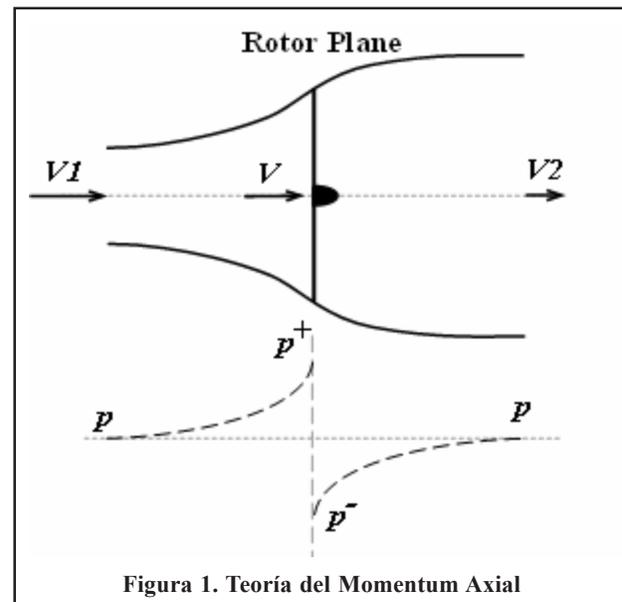


Figura 1. Teoría del Momentum Axial

Para aplicar la teoría del momento axial se proponen las siguientes hipótesis:

1. El aire es un fluido ideal, sin viscosidad.
2. La corriente incidente es unidimensional y con presión, densidad y velocidad uniforme.
3. La turbina está lo suficientemente alejada de todo obstáculo para que su influencia sea despreciable.
4. Se considera estado estacionario.

Tal como se puede ver en la Figura 1, el viento antes de cruzar el rotor poroso posee una velocidad V_1 y una presión P_1 . En la medida que el viento se acerca al rotor, su velocidad disminuye y su presión aumenta en virtud del principio de Bernoulli, hasta alcanzar una velocidad V justo en el plano del rotor y un valor mínimo V_2 después de alejarse del rotor. Entre tanto, la presión parte de un valor mínimo P después de cruzar el rotor hasta alcanzar el valor un valor P_2 igual a P_1 . En resumen, la presión recupera su valor, sin embargo, la velocidad del viento no lo hace como consecuencia de transformar la energía cinética en energía mecánica:

Ecuación de Continuidad: El flujo másico se conserva a lo largo del tubo de corriente.

$$\rho A_1 V_1 = \rho A V = \rho A_2 V_2 \quad (4)$$

Siendo A_i el área transversal de flujo, en el plano i .

Ecuación de cantidad de movimiento: La fuerza del disco que actúa sobre el fluido con el sentido de la corriente $-F$ es igual a la diferencia de flujos de cantidad de movimiento entre la salida y la entrada.

$$F = -\dot{m}(V_2 - V_1) = \rho A_T V (V_1 - V_2) \quad (5)$$

Ecuación de energía: Se aplica la ecuación de Bernoulli entre A_1 y A , y entre A y A_2 .

$$p^+ + \frac{1}{2} \rho V^2 = p + \frac{1}{2} \rho V_1^2 \quad (6)$$

$$p^- + \frac{1}{2} \rho V^2 = p + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (7)$$

Ecuación de fuerzas de equilibrio en el disco (plano del rotor): Como el disco es estacionario, la sumatoria de fuerzas sobre él ha de ser nula.

$$F = A_T (p^+ - p^-) \quad (8)$$

Al combinar las ecuaciones anteriores y simplificando se obtiene que:

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (9)$$

Se define el factor de inducción axial (a) como:

$$a = \frac{V_1 - V}{V_1} \quad (10)$$

en consecuencia,

$$V = V_1(1 - a) \quad (11)$$

$$V_2 = V_1(1 - 2a) \quad (12)$$

De ésta forma, la potencia captada será:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V (V_1^2 - V_2^2) = 2 \rho A V_1^3 a(1 - a)^2 \quad (13)$$

Como no toda la potencia del viento es transformada en su totalidad en energía mecánica, se define el coeficiente de potencia (C_p):

$$C_p = \frac{\text{Potencia Mecánica}}{\text{Potencia del Viento}} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V_1^3} = 4a(1 - a)^2 \quad (14)$$

(14)

El alemán Alfred Betz, al maximizar (14) con respecto al coeficiente de inducción axial, encontró que el (su) valor que maximiza la potencia es $1/3$, donde se deduce que el valor máximo del coeficiente de potencia es $0,593$, o sea que solo se puede obtener el 60% de la energía cinética del viento en condiciones ideales. En situaciones reales, la fricción, la rotación de estela detrás de las aspas y el diseño mecánico hacen que la potencia extraída sea inferior al valor máximo mencionado anteriormente.

De forma similar, se define el coeficiente de cantidad de movimiento C_F como:

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho A V_1^2} = 4a(1 - a) \quad (15)$$

Cuando a alcanza valores superiores a 0.5 , la ecuación anterior no es apropiada. Glauert, (GLAUERT, H. Airplane Propellers, in: Aerodynamics Theory. ed. W. F. Durand. New York. 1963) referenciado por [15], propuso la siguiente corrección empírica cuando $a > 0.5$:

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho A V_1^2} = 4a(a - 1) \quad (16)$$

2.3 Teoría de momento angular

Según la ecuación de equilibrio de Newton, debe existir una reacción en el aire que atraviesa el rotor que compense el par sobre el rotor, manifestándose con un cambio en el momento de la cantidad de movimiento de la corriente con respecto al eje del par. De ésta forma, tras su paso por el rotor debe de adquirir bruscamente un giro medio alrededor del eje con magnitud w , dada por el flujo del

momento con respecto al eje de la corriente, y sentido contrario al del par ejercido. Se define el coeficiente de inducción tangencial a' como:

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (17)$$

donde ω es la velocidad angular del rotor.

Se toma como volumen de control una sección transversal dA antes del rotor con forma de corona circular de radio r y espesor dr , el tubo anular de corriente que pasa por su perímetro exterior e interior y la sección transversal dA resultante inmediatamente aguas abajo. La ecuación de cantidad de movimiento será:

$$dF = 4\pi r \rho V_1^2 (1-a) dr \quad (18)$$

Y la de conservación del momento angular:

$$dT = 4\pi r^3 \rho V_1 (1-a) a' \Omega dr \quad (19)$$

2.4 Teoría del elemento de aspa

Se basa en que es posible reproducir la acción del aspa entera como sumatoria de las acciones individuales de rebanadas del aspa entre r y $r+dr$, desde su raíz hasta su punta.

Para obtener la máxima eficiencia de un rotor aerodinámico de eje horizontal, su diseño debe buscar que el factor de inducción axial (a) sea lo más cercano posible a 1/3 sobre todo el disco del rotor. La teoría del elemento de aspa es la que permite hallar el factor de inducción axial en términos de parámetros de diseño del rotor como el largo y ancho del aspa, ángulo de ataque, etc.

En la Figura 2 se presenta un rotor y un elemento de aspa construido con base en un perfil aerodinámico. Suponga que el elemento de aspa se presenta al viento con un ángulo de paso q (ángulo formado por la cuerda del elemento de aspa y el plano de rotación). La velocidad de viento V_r hará que el rotor gire y por lo tanto un elemento de aspa se moverá con una velocidad lineal de magnitud $v r$ (donde v es la velocidad angular y r el radio del elemento de aspa). Entonces la velocidad de viento relativa, V_r (tal y como la vería un observador que se moviera con el aspa), "entra" al perfil con un ángulo f , definido como ángulo de entrada de flujo. El ángulo de ataque $a = f - q$ es un parámetro muy importante respecto al desempeño del rotor ya que de éste, entre otros factores, depende la fuerza que experimentan los elementos de una aspa y por consecuencia el rotor en su conjunto.

2.4.1 Fuerzas que actúan sobre el elemento de aspa

La fuerza sobre un elemento de aspa se descompone en una fuerza de arrastre dD en la misma dirección de la velocidad relativa y en una fuerza de sustentación dL , perpendicular a la velocidad relativa. La fuerza de sustentación tiende a impulsar el rotor, mientras que la fuerza de arrastre tiende a frenarlo. Proyectando sobre los ejes normal y tangencial al plano del rotor se obtienen las componentes axial y tangencial de la fuerza resultante (la fuerza resultante para cada elemento de aspa esta dada por la diferencia de las componentes dD y dL sobre el plano del rotor).

La fuerza tangencial es

$$dF_T = dL \text{Sen} \phi - dD \text{Cos} \phi \quad (20)$$

y la fuerza axial

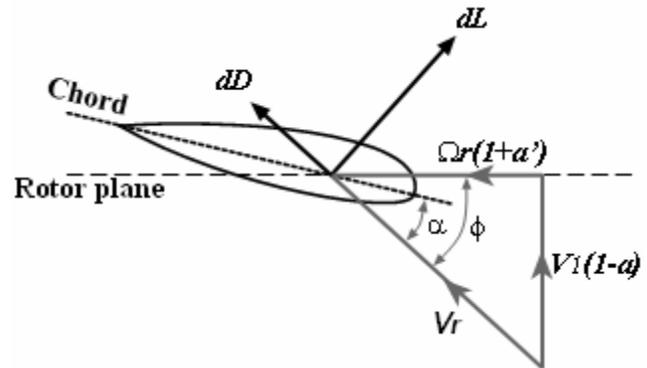


Figura 2. Fuerzas que actúan sobre un elemento de aspa de un rotor aerodinámico de eje horizontal.

Obviamente, dD y dL también dependen de la geometría del perfil aerodinámico y están dadas por:

$$(22)$$

$$dL = \frac{1}{2} C_L(\alpha, Re) \rho V_r^2 c dr \quad (23)$$

donde:

C_L es un coeficiente de sustentación específico del perfil aerodinámico.

C_D es un coeficiente de arrastre específico del perfil aerodinámico.

c es la cuerda del perfil en el elemento del aspa.

Re es el número de Reynolds

Con la fuerza axial se puede hallar la cantidad de movimiento del aspa y con las ecuaciones de la mecánica de fluidos la cantidad de movimiento del fluido.

La cantidad de movimiento en N aspas es

$$dF = \frac{1}{2} \rho V_r^2 c (c_L \text{Cos} \phi + c_D \text{Sen} \phi) N dr \quad (24)$$

Y el torque es:

$$dT = \frac{1}{2} \rho V_r^2 c (c_L \text{Sen} \phi - c_D \text{Cos} \phi) r N dr \quad (25)$$

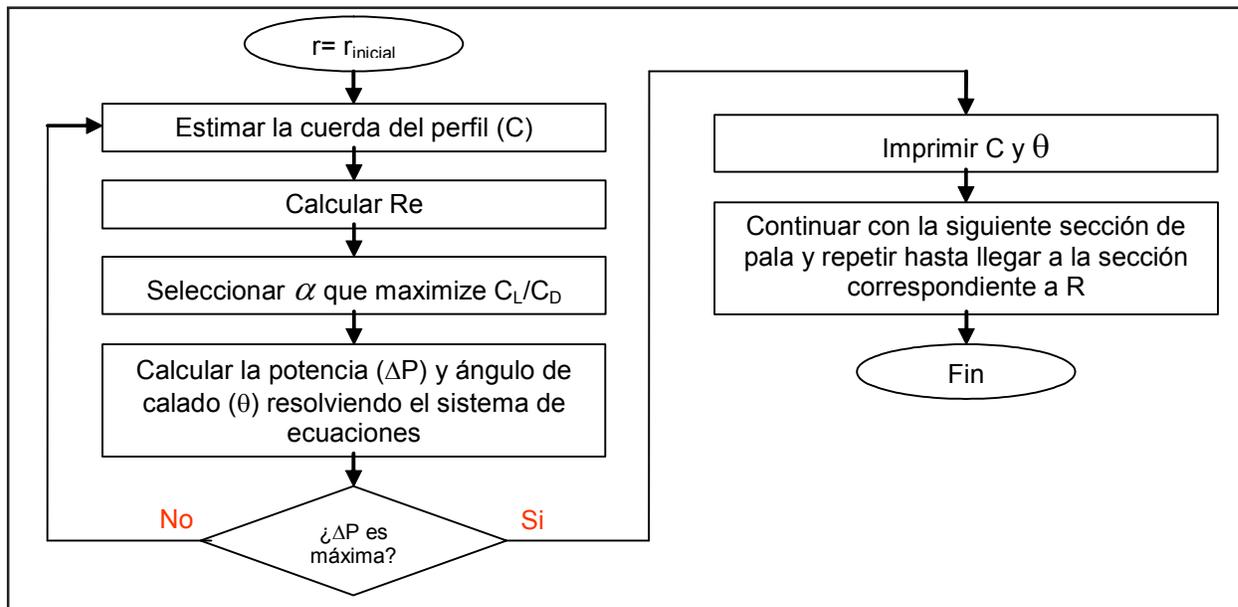


Figura 3. Algoritmo para el diseño del aspa

La potencia suministrada en las aspas ($0 < r < R$) está dada por el producto torque-velocidad angular.

$$P = \int_0^R dT \cdot \Omega$$

Existen varias modificaciones de las ecuaciones (24) y (25), de las cuales, la que más se utiliza es el denominado factor de pérdidas por envergadura finita de Prandtl (f_p) [13]. Éste fenómeno consiste en una generación de pérdidas de energía debido a la desviación de las líneas de flujo desde el intradós del perfil (menor velocidad del aire, mayor presión) hacia el extradós (mayor velocidad, menor presión).

Las ecuaciones (24) y (25) son afectadas por el factor f_p . Este factor es fácilmente evaluable con las siguientes correlaciones y permite obtener la potencia extraída real, multiplicando la teórica por este valor:

$$f_p = \frac{2}{\pi} \text{Cos}^{-1}(e^{-fc}) \tag{26}$$

donde,

$$fc = \frac{R-r}{R} \frac{N}{2 \text{Sen}(\phi)} \tag{27}$$

Los valores típicos del factor de pérdidas son menores a uno. Para los diseños óptimos es factor de pérdidas tiende a uno.

3. Procedimiento de Cálculo para el Diseño y Simulación de la Turbina.

Wilson and Lissaman [8] maximizaron la potencia extraída por cada elemento de aspa variando el coeficiente de inducción

axial. En la presente investigación, una aproximación similar es llevada a cabo con diferencia que se varía la cuerda del perfil.

El procedimiento para el diseño es presentado en la Figura 3. Las teorías expuestas en las secciones previas fueron consideradas para definir una función de potencia para cada elemento como función objetivo, la cual es usada para la maximización y así obtener el ángulo de paso $q(r)$, y la distribución de la cuerda del perfil $c(r)$ a lo largo del radio. También, el procedimiento para simular el comportamiento de diferentes turbinas es presentado en la figura 4.

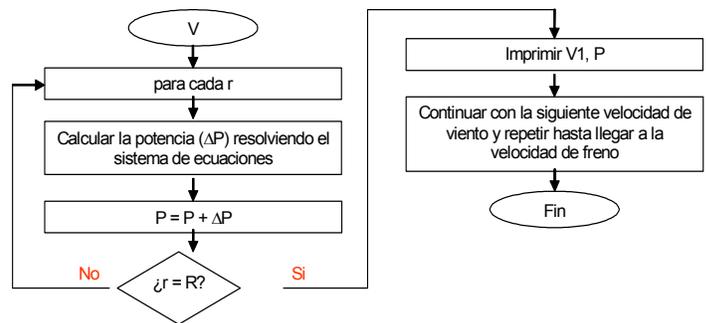


Figura 4. Algoritmo para la simulación de la turbina

4. Resultados y Discusión

Se desarrolló un software, programado en Visual Fortran 2000 con una interfaz gráfica creada en Visual Basic, el cual realiza un diseño óptimo de la turbina, evalúa la potencia generada en un rango de velocidades y, con base en la función de Weibull, calcula el aprovechamiento energético. Para verificar los resultados del software, se simuló la turbina NORDEX N60 1300. La configuración se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Configuración de la turbina NORDEX N60 1300

Número de aspas	3
Radio de el aspa:	30 m
Velocidad Angular del rotor:	12.8 - 19.2 RPM
Densidad del aire	1.225 kg / m ³
Velocidad de arranque	3-4 m / s
Velocidad nominal	15 m / s
Velocidad de freno	25 m / s
Tipo de aspa	LM 29.0

4.1 Diseño de las aspas

Tanto para el diseño de las aspas, como para la predicción de la curva de potencia, se requiere la información del perfil aerodinámico. El aspa LM 29.0 tiene la forma de un perfil NACA 63 – 4xx [16].; Para el presente trabajo se tomó el perfil NACA 63 – 420 (ver Figura 5). Con la ayuda del programa *DesignFoil Demo (R5.32)* [17], de distribución gratuita, se obtuvieron los coeficientes de arrastre y sustentación para el perfil (ver Figuras 6 y 7).

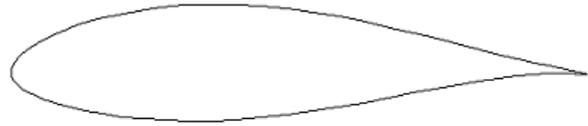


Figura 5. Perfil NACA 63 – 420

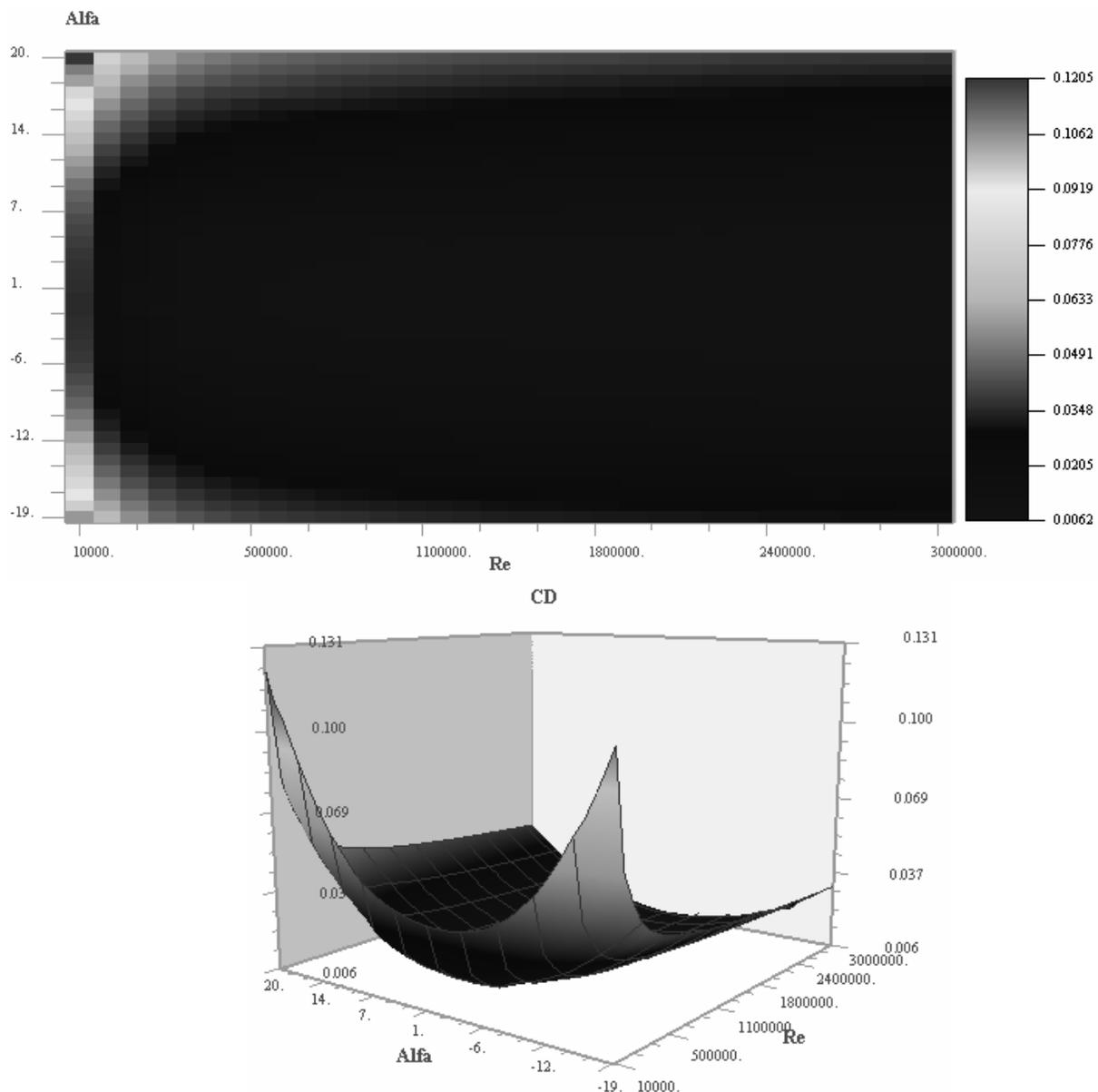


Figura 6. Coeficiente de arrastre contra Reynolds (Re) y ángulo de ataque (α) para el Perfil NACA 63 – 420 obtenido mediante la simulación

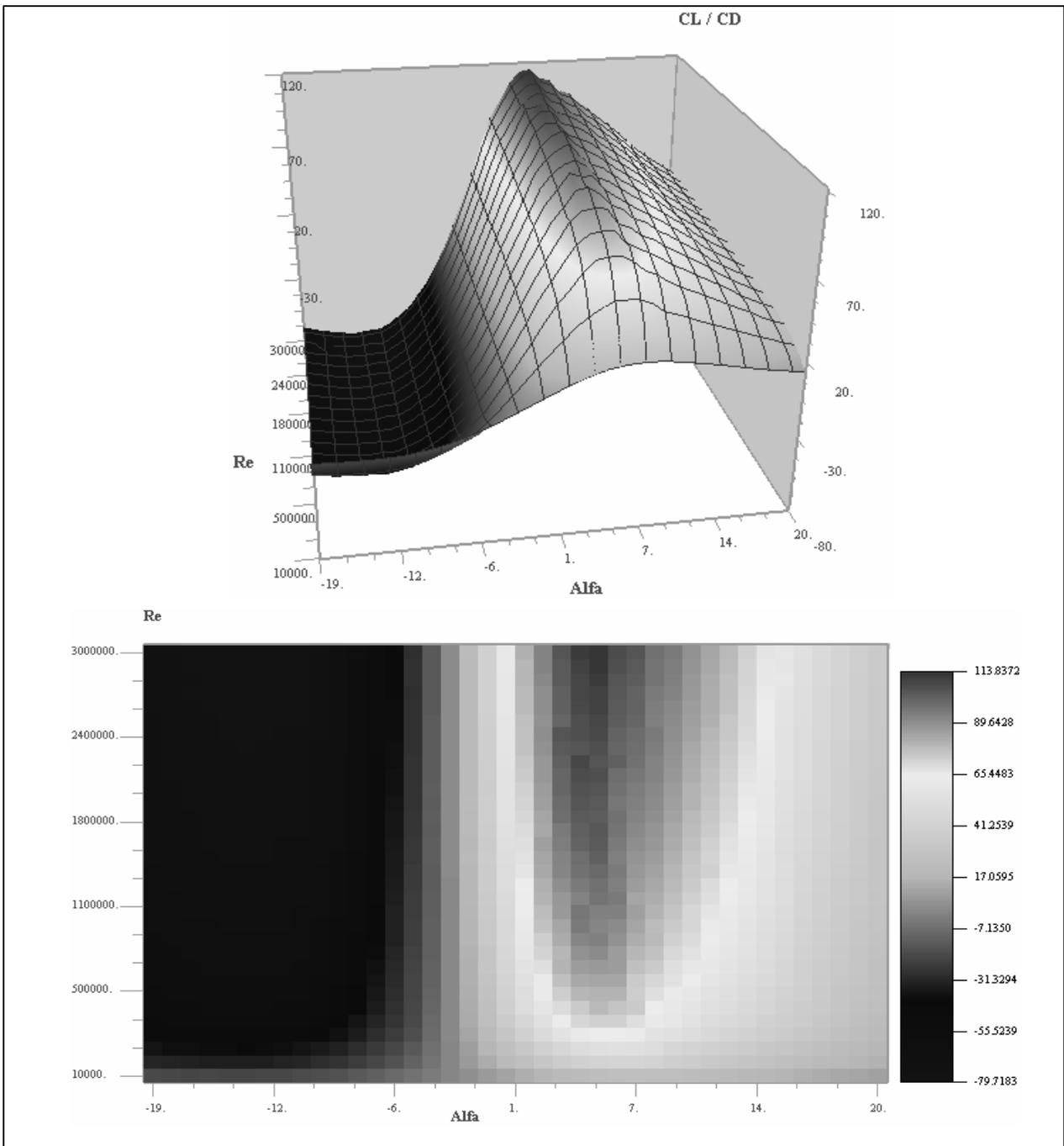


Figura 7. Eficiencia aerodinámica (CL / CD) contra Reynolds (Re) y ángulo de ataque (Alfa) para el Perfil NACA 63 – 420 obtenido mediante la simulación

Con la información relacionada con los coeficientes de arrastre y sustentación y dividiendo el aspa en 50 secciones ($k = 50$), el software desarrollado en el presente trabajo entrega la distribución de la cuerda del perfil y torsión de el aspa a lo largo del radio (ver Figura 8).

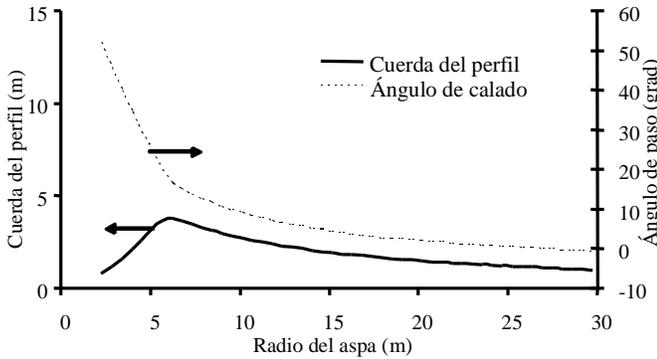


Figura 8. Distribución de la cuerda del perfil y ángulo de paso a lo largo del radio del aspa

Se puede apreciar una disminución del valor de la cuerda en la medida que avanza el radio del aspa con el objetivo de garantizar una mejor sustentación y una óptima potencia generada. Así mismo, el ángulo de paso (φ) va disminuyendo con el fin de garantizar una máxima eficiencia aerodinámica a lo largo del aspa.

4.2 Estimación de la potencia suministrada por la turbina eólica

En la Figura 9 se compara la curva de potencia reportada por el fabricante con la obtenida con el software, a condiciones atmosféricas estándar ($\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$). Se observa que el modelo se ajusta bien hasta la velocidad de 17 m/s. A partir de esta velocidad, los resultados teóricos no son validados satisfactoriamente, debido principalmente, a que no se dispone de datos confiables para el coeficiente de arrastre y de sustentación para velocidades mayores a 17 m/s.

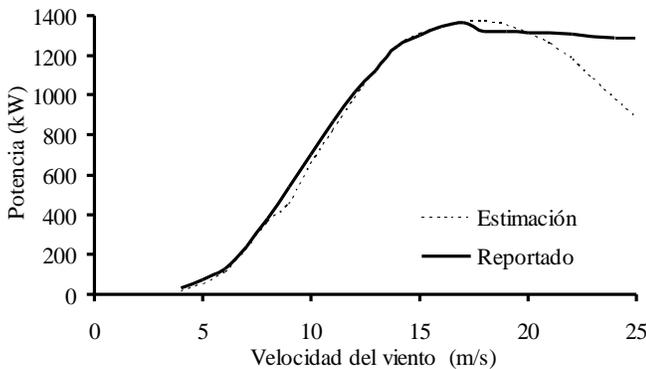


Figura 9. Comparación de la curva de potencia del modelo Nordex N60 1300 con la estimación hecha por el software.

Con base en la disponibilidad de viento durante el día, con el modelo desarrollado se puede evaluar la potencia generada hora-

hora, tal como se ilustra en la Figura 10. Para el caso particular analizado, las hora de mayor generación de presenta entre las 13 y 18 horas.

La potencia generada hora a hora durante un día específico corresponde a una información valiosa para los estudios de mercados de este tipo de generación. De esta manera el grupo de tecnología se integra con el grupo de mercados, para logra obtener resultados de conjunto, de acuerdo con lo propuesto en el proyecto.

Con el objetivo de buscar un aerogenerador óptimo para la Guajira; se analizaron diferentes modelos de la NORDEX, cuyas curvas de potencias versus velocidad del viento fueron reproducidas satisfactoriamente utilizando el modelo matemático desarrollado en este trabajo, tal como se puede observar en la Figura 11 en donde las curvas punteadas son las obtenidas por el modelo matemático y los puntos corresponden a los valores reportados por el fabricante. También se puede apreciar en la Figura 11 que la velocidad de diseño de estos equipos es similar y ubica en valores cercanos 8.3 m/s.

Todo parece indicar que la velocidad de diseño es una constante para diseñar estos equipos. Con una velocidad de diseño de aproximadamente 8.3 m/s, se dimensionan equipos para que operen a una velocidad nominal de aproximadamente 14.0 m/s o menos.

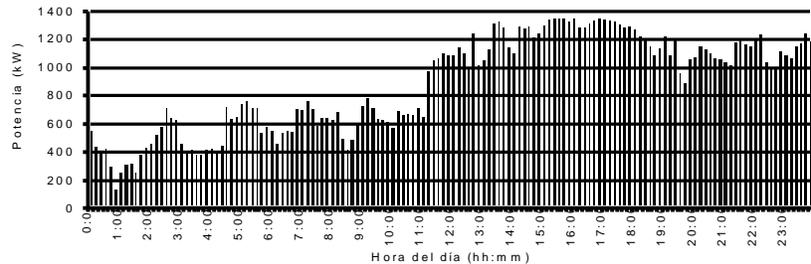


Figura 10. Potencia horaria en 19/08/2001 a 50 metros de altura. [Estación Casibourin a 20 metros de altura -sensor Alwin_Thiess]

Modelo	Velocidad de diseño (m/s)
N62	7.95
N54	8.3
N50	8.0
N43	8.1
N29	7.9

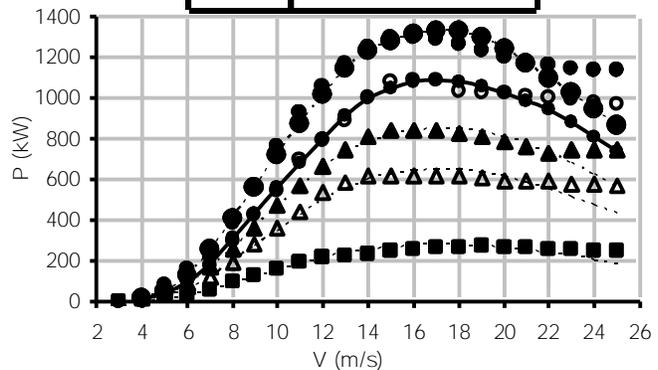


Figura 11. Curvas de potencia teórica y real de varios equipos aerogeneradores de la NORDEX. Línea punteada: simulación para cada turbina. Círculo sólido: 62 m; círculo vacío: 54m; Triángulo sólido: 50m; Triángulo vacío : 43 m; Cuadrado sólido: 29m. Datos tomados de www.windpower.org

Basándose en los regímenes de viento de la región, la densidad de energía de cada uno de estos equipos analizados se presenta en la Figura 12, donde también se puede observar el factor de planta que tendrían estos equipos cuando operan con regímenes de vientos similares a los observados en la zona de la Guajira (Colombia). Se puede apreciar en el Figura 12 que tanto la densidad de energía, como el factor de planta son aproximadamente constantes para diferentes diseños y radios de las aspas; estos valores se ubican en 2000 kW.-h/m² y 0.55 respectivamente.

Referencias

- [1]. Bellarmine GT, Urquhart J. Wind Energy for the 1990s and beyond. *Energy Conversion and Management*. 1996; 37(12):1741-1752
- [2]. Bansal RC, Bhatti TS, Kothari DP. On some of the design aspects of wind energy conversion systems. *Energy Conversion and Management*, 2002; 43:2175-2187
- [3]. Varol A, Olk111ç C, Varol Y. Increasing the efficiency of wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001; 89:809-815
- [4]. Rodriguez JM. et al . Incidence on power system dynamics of high penetration of fixed speed and doubly fed wind energy systems: study of the Spanish case. *IEEE Transactions on power systems* , 2002;17(4) :1089-1095
- [5]. Rajesh K. Reliability/cost implications of PV and wind energy utilization in small isolated system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2001; 16(4):368-373
- [6]. Pamakumar RA, Abouzahr I, Krishnan k, Ashenayi K. Design scenarios for integrated renewable energy systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1995; 40(4):736 - 746
- [7]. Scherer R. Blade design aspects. *Renewable energy*, 1999; 16:1272-1277
- [8]. Maalawi KY, Badawy MT. A direct method for evaluating performance of horizontal axis wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2001; 5:175-190.
- [9]. Molenaar DP, Dijkstra S. State-of-the-art of wind turbine design codes: main features overview for cost-effective generation. *Wind engineering*. 1999; 23(5): 295-311
- [10]. Wilson RE. In: Spera DA, editor. *Wind turbine technology. Aerodynamic behavior of wind turbines*.
- [11]. Maalawi KY, Badr MA. A practical approach for selecting optimum wind rotors. *Renewable Energy*, 2003; 28:803-822
- [12]. Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E. *Wind energy handbook*. Chichester: John Wiley and Sons. (reprinted England: Chichester; 2002).
- [13]. Kotb MA, Soliman HA. Performance of a staggered multi-rotor horizontal axis wind turbine system. *Journal of Wind Engineering Industrial and Aerodynamics*. 1993; 45: 139-152.
- [14]. Habalia SM, Salehb IA. Local design, Testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics. Part I: Design of the blade and root. *Energy Conversion & Management*. 2000; 41:249 -280.
- [15]. Sørensen JN, Kock CW. A model for unsteady rotor aerodynamics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1995; 58: 259-275.
- [16]. <http://www.lm.dk>
- [17]. <http://www.dreesecode.com>

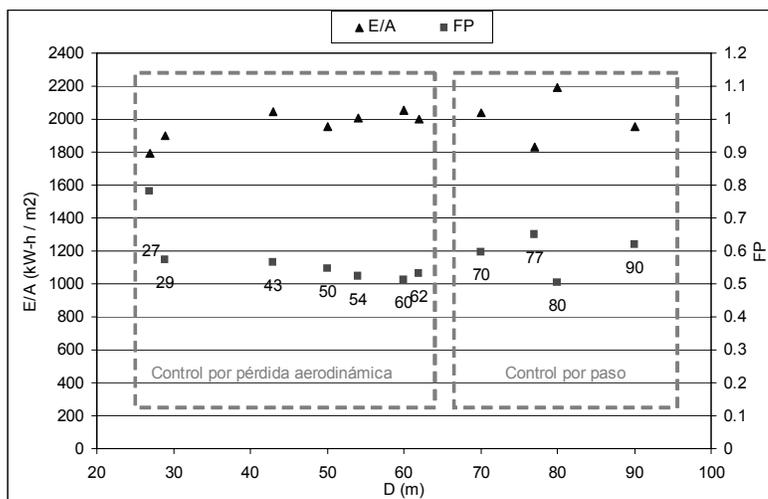


Figura 12. Densidad de Energía y Factor de Planta obtenidos de diferentes equipos NORDEX con diferentes diámetros de aspas.

En la Figura 12 se observa que la densidad de energía no varía apreciablemente con el diámetro, como tampoco se observa variación en el factor de planta; y por consiguiente, si se desea generar más energía por equipos, solo basta seleccionar un diámetro mayor a un costo proporcionalmente mayor.

5. Conclusiones

El modelo matemático propuesto en el presente trabajo representa bien los datos suministrados por el fabricante. Permite predecir la distribución de la cuerda del perfil y el ángulo de paso a lo largo del radio, y simular las curvas de potencia. Además puede ser usado para simular el efecto del radio, velocidad angular del rotor y velocidad de diseño en la densidad de energía y factor de planta operando en las condiciones de la Guajira.

Se comprobó que la metodología propuesta es útil, la cual está basada en el proceso de optimización y permite simular razonablemente bien el comportamiento de los aerogeneradores.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a COLCIENCIAS, Empresas Públicas de Medellín y a la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, por el apoyo logístico y financiero.