

Influencia de la disposición de los álabes sobre la eficiencia y el par en un molino de viento de eje vertical

Vladimir Cueto Mahecha*, Luis Vives Puello**,
Francisco Acuña Garrido***, Néstor Durango Padilla****

Resumen

En este artículo se examinan brevemente las principales características y parámetros que deben ser considerados para la evaluación del desempeño de un molino de viento de eje vertical. Se muestra, además, una forma práctica de determinar su potencia, así como la influencia de diferentes factores, tales como: ángulo de ataque, número de álabes, etc., sobre la misma. Toda esto probado en un modelo diseñado especialmente para tal fin.

Palabras claves: Molino de viento, eje vertical, eficiencia, torque, álabes, energía eólica, ángulo de ataque.

Abstract

This article analyzes briefly the principals characteristics and parameters to be considered for the performance evaluation about the wind mill vertical axle. It shows the practice to evaluate the power like the influence of different factors, for example: focusing on the target, helix, etc. All this showed in model designed specially for this purpose.

Key words: Wind mill, vertical axle, helix, focusing on the target, efficiency, torque, aeolic energy.

Fecha de recepción: 14 de febrero de 2001

* Ingeniero Mecánico, Universidad del Norte.

** Ingeniero Mecánico, Universidad del Norte.

*** Ingeniero Mecánico; Diplomado en Educación Universitaria y Diplomado en Gestión Ambiental. Profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica en las asignaturas Termodinámica I y II, Laboratorio de Térmicas y Mecánica de Fluidos. Miembro del Grupo de Investigación Termodinámica y Gas Natural, Universidad del Norte. (e-mail: facuna@uninorte.edu.co)

**** Ingeniero Mecánico, Universidad Industrial de Santander. Maestría en Sistemas de Generación de Energía, Universidad del Valle. Director de Programa Departamento de Ingeniería Mecánica. Miembro del Grupo de Investigación Termodinámica y Gas Natural. (e-mail: ndurang@uninorte.edu.co)

INTRODUCCIÓN

Existe un renovado interés por el uso del viento para aplicaciones de potencia mecánica, tales como: el bombeo de agua, operación de compresores de refrigeración y calentamiento de agua por fricción mecánica.

En este artículo se hará un análisis general de un modelo de molino de viento de eje vertical, el cual fue desa-

rrollado en la línea de investigación sobre energía no convencional en la Universidad del Norte, que permitía la variación de ciertos parámetros dimensionales del mismo, y se pudo identificar hacia dónde deberían tender las variables para obtener los mejores resultados de eficiencia y eficacia; entendiéndose como «eficacia» la utilización adecuada de los materiales.

En el estudio se planteó una serie de premisas como:

- Mientras mayor sea el número instalado de álabes en el molino de viento mayor será su eficiencia.
- Si se aumenta el área del álabe se podrá obtener más energía del viento con mayor eficiencia.
- Al aumentar el ángulo de ataque aumenta la eficiencia del equipo.

1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN MOLINO DE VIENTO

Un molino de viento es una máquina que convierte la energía eólica en otra forma útil de energía. Existen dos principios básicos a través de los cuales se logra este efecto: el principio de arrastre y el de sustentación. Las máquinas de tipo sustentación usan fuerzas aerodinámicas generadas por el viento sobre la superficie de un álabe solidario a un rotor. La fuerza de sustentación se genera perpendicular al álabe, mientras que la de arrastre va paralela a éste en dirección al viento.

2. ROTORES DE EJE VERTICAL

En general, éstos tienen una ventaja mayor sobre los rotores de eje horizontal. Su diseño es menos complejo, y los esfuerzos de giro sobre el rotor son menores.

Los dispositivos de eje vertical tienen torques de arranque relativamente altos, comparados con los aparatos de sustentación, debido a su mayor solidez. Sin embargo, tienen velocidades de viento relativamente bajas y más bajas potencias de salida por tamaño de rotor dado, por peso y por costo.

Entre los tipos de molinos de viento de eje vertical que se han desarrollado se encuentra el Savonius o rotor de sección transversal en forma de S, que suministra realmente alguna fuerza de sustentación, pero son predominantemente aparatos de arrastre. Otro tipo es el Darrieus, considerado el diseño de mayor competencia con los sistemas de eje horizontal.

El rotor tipo Darrieus es un aparato de tipo sustentación, caracterizado por sus aspas curvadas con secciones transversales de superficies de sustentación. Estos tienen baja solidez y torque de arranque, y alta potencia de salida por costo y peso del rotor.

3. EQUIPO

El tamaño del modelo de molino de viento con eje vertical se hizo de 40 cm de alto por 40 cm de diámetro (ver

figura 1). La velocidad del viento para el diseño fue de 25 km/hr (velocidad promedio a la que se utilizan estos dispositivos). La eficiencia esperada sería, en el peor de los casos, de 5%, y se esperaba una potencia aproximada de un vatio.

El tipo de modelo diseñado tiene las siguientes partes:

- Disco superior e inferior (iguales)
- Alabes radiales y en ángulos
- Pernos
- Bujes
- Eje vertical
- Freno tipo Prony

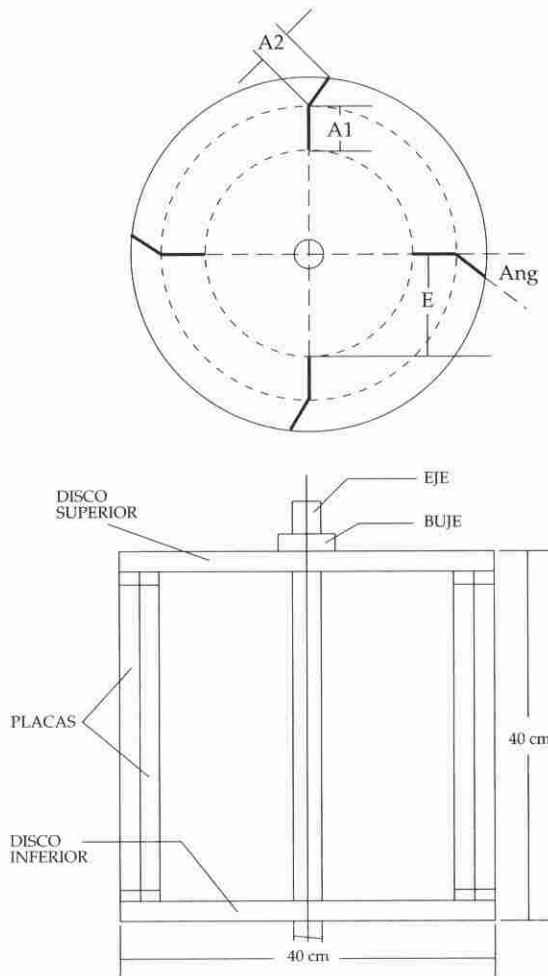


Figura 1. Vistas del molino de viento de eje vertical de álabe recto

La potencia mecánica se obtiene a partir de un freno tipo Prony. Entre las características principales de este dispositivo se encuentra su capacidad para medir torques pequeños, tales como los que se generan en este molino.

4. IDENTIFICACIÓN DE LOS MODELOS

Para identificar rápidamente un modelo se le ha dado una codificación, que consta de siete dígitos; por ejemplo: 1212460. Los dos primeros dígitos representan el ancho de la placa radial en cm (A2), los dos siguientes representan el espaciamiento del eje al álabe en cm (E), el cual puede ser 04, 08 o 12; el quinto número representa la cantidad de álabes (Nº álabes), el cual puede ser 2, 3, 4, 6 u 8; y los dos últimos dígitos representan el ángulo de ataque de los álabes (Áng.), el cual puede ser 15, 30, 45 o 60 grados.

5. FÓRMULAS UTILIZADAS EN EL CÁLCULO DE LA POTENCIA

Para medir la energía cinética del viento se conectan las dos señales del tubo Prandtl al medidor. Para medir la energía cinética más la energía de presión se conecta la señal central al micromanómetro y se deja la otra señal abierta a la atmósfera, funcionando de esta forma como tubo Pitot.

- FÓRMULA PARA EL TUBO DE PITOT

$$\frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\gamma_{aire}} = \frac{9764}{11.537} 0.1654 * R = 139.98142 * R$$

donde:

R: Lectura que se tiene del micromanómetro

V: Velocidad

P: Presión

γ : Peso específico

- TUBO DE PRANDTL

La ecuación que rige al tubo de Prandtl es:

$$V = \sqrt{16602.095 \frac{m}{s^2} * 0.1654 * R}$$

- TORSOR

Para el torsor se realiza una relación lineal en la cual

$$\frac{Da}{305} = \frac{Dr}{318}$$

$$Dr = Da * (318/305) = Da * 1.0426$$

$$Kr = 0.98 \text{ gr/mm} = 0.98 \text{ Kg/m}$$

$$Tr = Da * (318/305) * 0.98 * 9.82 \text{ N/m} * (310/10000) \text{ m}$$

$$Tr = 3.19 Da$$

donde:

D_a : Brazo hasta la reglilla del freno

D_r : Brazo real del freno

K_r : Constante del resorte

- CÁLCULO DEL FLUJO

El flujo se calcula por

$$Q = V * Ap$$

donde:

A_p : Area efectiva de aprovechamiento del flujo

El área efectiva para calcular el flujo se obtiene por la proyección de dos álabes a 180° sobre un plano perpendicular a la dirección del flujo.

$$Ap = 2(A_1 + A_2 \cos(\text{Ang})) * 0.4m$$

donde:

A_1 = Ancho de la placa radial en metros

A_2 = Ancho de la placa generadora del ángulo de ataque en metros

Ang = Angulo de ataque

• CÁLCULO DE LA EFICIENCIA

$$\text{eficiencia} = \frac{P_{sal}}{P_{ent}}$$

$$P_{sal} = (Tr * n(2\pi / rad)rad / seg)$$

P_{sal} : Potencia de salida

P_{ent} : Potencia de entrada

T_r : Torsor

n : Velocidad de rotación en rpm

π : Cte, 3.1416

$$P_{ent} = \gamma Q H_e \text{ donde } H_e: \text{pérdidas del sistema}$$

$$H_e = 139.98 * R - 0.016605 \left(\frac{s^2}{m} \right) * V^2$$

6. DATOS CONSTANTES EN LOS MODELOS

- Altura del modelo (H): 40 cm
- Diámetro del eje del modelo (D): 25 mm
- Placa radial de los álabes (A1): 40 mm

7. DATOS OBTENIDOS

En las tablas 1 a la 5 se presentan los datos obtenidos de las experiencias realizadas con los diferentes modelos.

8. CÁLCULO TIPO PARA HALLAR LA EFICIENCIA

Según los siguientes datos (correspondientes al modelo 1204860 y en apertura N° 1), tenemos:

- Prandtl = 21 mm
- Pitot = 22 mm
- Defor = 81 mm
- n = 196.2 rpm
- Ang = 60°
- A1 = 40 mm
- A2 = 120 mm

• CÁLCULO DE LA VELOCIDAD

$$V = \sqrt{16602.095 \frac{m}{s^2} * 0.1654 * R}$$

donde R corresponde al Prandtl en metros

$$V = \sqrt{16602.095 * 0.1654 * 0.02}$$

$$V = 7.5938m / seg$$

• TORSOR

$$T_r = 3.19 * Da \quad \text{donde}$$

$$D_a = (Defor - 65 mm)$$

$$T_r = 3.19 (0.081 - 0.065)$$

$$T_r = 0.0511Nm$$

• POTENCIA DE SALIDA

$$P_{sal} = Tr * n * \frac{2\pi}{60}$$

$$P_{sal} = (0.0511)(196.2)(2\pi/60)$$

$$P_{sal} = 1.0499W$$

• POTENCIA DE ENTRADA

$$P_{ent} = gQH_e \quad \text{pero}$$

$$Q = VA_p$$

$$A_p = 2(A_1 + A_2 \cos(\text{Ang})) * 0.4$$

$$A_p = 2(0.04 + 0.12 \cos 60) * 0.4$$

$$A_p = 0.08m^2$$

$$Q = (7.5938)(0.08)$$

$$Q = 0.607504 \frac{m^3}{seg}$$

Para H_e ,

$$H_e = 139.98 * R_{pitot} - 0.016605 * V^2$$

$$H_e = (139.98 * 0.022) - (0.016605 * 7.5938^2)$$

$$H_e = 2.122m$$

$$P_{ent} = 11.537(0.607504)(2.122)$$

$$P_{ent} = 14.8726W$$

• EFICIENCIA

$$\varepsilon = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} * 100$$

$$\varepsilon = \frac{1.0499}{14.8726} * 100$$

$$\varepsilon = 7\%$$

Tabla 1

Datos de prueba al freno en molinos de viento con eje vertical. *Modelo 1204830*
 $A_1 = 4 \text{ cm}$; $A_2 = 12 \text{ cm}$; $H = 40 \text{ cm}$; $D = 2.54 \text{ cm}$; $N^\circ \text{ Alabes} = 8$; $\text{Ang} = 45^\circ$; $E = 4 \text{ cm}$

POSICIONES DEL DISCO REGULADOR DE FLUJO

1				2				3				4				5			
Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)
22	21	65	102.8	21	19	67	48.7	18	17	67	40.41	16	15	66	16.38	12	11	67	13.63
21	20	70	79.77	20	19	70	36.2	18	17	70	25.2	16	15	72	0	12	11	69	0
21	20	78	56.75	20	18	72	23.8	18	17	72	10								
22	20	80	30.76	19	18	76	14.9	18	17	77	0								
22	20	92	0	19	18	80	0												

Prand: Prandtl; Def: Deformación.

Tabla 2

Datos de prueba al freno en molinos de viento con eje vertical. *Modelo 1204845*

$A_1 = 4 \text{ cm}$; $A_2 = 12 \text{ cm}$; $H = 40 \text{ cm}$; $D = 2.54 \text{ cm}$;

$N^\circ \text{ Alabes} = 8$; $\text{Ang} = 45^\circ$; $E = 4 \text{ cm}$.

POSICIONES DEL DISCO REGULADOR DE FLUJO

1				2				3				4				5			
Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)
19	18	68	203.2	18	17	68	137	18	15	67	100	16	14	67	93.5	13	12	67	94.9
20	19	76	154.8	18	17	76	100.1	17	15	77	88.5	16	15	72	89.9	13	12	71	91.3
21	19	83	123.8	19	17	83	65.29	17	16	81	57.6	16	14	75	65.5	12	11	75	55.6
20	19	87	100	19	17	90	32.23	17	16	85	26.75	16	14	77	41.2	11	10	81	38.8
21	19	93	78.97	18	17	100	0	17	16	95	0	15	14	93	0	11	10	88	0
21	19	10	64.91																
20	19	11	0																

Prand: Prandtl; Def: Deformación.

Tabla 3

Datos de prueba al freno en molinos de viento con eje vertical. *Modelo 1204860*

$A_1 = 4 \text{ cm}$; $A_2 = 12 \text{ cm}$; $H = 40 \text{ cm}$; $N^\circ \text{ Alabes} = 8$; $\text{Ang} = 60^\circ$; $E = 4 \text{ cm}$.

POSICIONES DEL DISCO REGULADOR DE FLUJO

1				2				3				4				5			
Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)
23	21	68	229.6	19	18	69	184	15	14	68	173.1	15	14	68	143	12	11	67	133
22	21	84	196.2	20	20	74	143	17	15	74.5	128.1	16	14	72	135	12	11	72	110
22	21	86	164	19	18	80	120	17.4	15	82	108.3	15	14	80	97.4	13	11	82	63.37
23	21	96	117.4	21	20	88	89.3	16	15	89	63.31	15	14	86	47.75	13	11	86	31.68
21	18	99	100	21	20	105	0	16	15	94	0	15	14	90	0	13	11	90	0
21	18	107	76.2																
21	19	110	0																

Prand: Prandtl; Def: Deformación.

Tabla 4

Datos de prueba al freno en molinos de viento con eje vertical. *Modelo 1204445*

$A_1 = 4 \text{ cm}$; $A_2 = 12 \text{ cm}$; $H = 40 \text{ cm}$; $D = 2.54 \text{ cm}$;

$N^\circ \text{ Alabes} = 4$; $\text{Ang} = 45^\circ$; $E = 4 \text{ cm}$.

POSICIONES DEL DISCO REGULADOR DE FLUJO

1				2				3				4				5			
Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)
17	15	67.4	90.53	17	16	66	78.91	14	13	67	49.72	12	11	67	42.47	13	10	66	58.7
17	15	76	80.07	17	15	71	69.49	14	13	71	36.81	12	11	72	22.23	13	10	71	39.1
17	15	83	56.54	17	15	75	47.55	14	13	83	18.4	13	11	75	0	13	10	73	18.2
17	14	89	42.19	16	14	79	25.61	14	13	90	0					12	10	75	0
19	15	100	0	15	14	85	0												

Prand: Prandtl; Def: Deformación.

Tabla 5

Datos de prueba al freno en molinos de viento con eje vertical. *Modelo 1204460*

$A_1 = 4 \text{ cm}$; $A_2 = 12 \text{ cm}$; $H = 40 \text{ cm}$; $D = 2.54 \text{ cm}$; $N^\circ \text{ Alabes} = 4$; $\text{Ang} = 60^\circ$; $E = 4 \text{ cm}$.

POSICIONES DEL DISCO REGULADOR DE FLUJO

1				2				3				4				5			
Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)	Pitot (mm)	Prand (mm)	Def (mm)	n (rpm)
20	18	66	190.3	18	17	67	110	16	16	67	81.83	18	16	66	102.6	14	13	67	78
20.3	17.4	75	141	17	16	72	97.68	18	16	72	74	18	16	71	72.29	14	13	72	65
20.3	17	83	116.9	16	14	80	79.79	18	17	78	49.2	19	16	76	55.14	14	13	76.5	37.5
20.3	17	89	80.9	17	16	85	51.49	18	17	85	24	19	16	80	38	13	12	81	0
20.3	17	95	62.63	17	16	105	0	18	17	95	0	18	16	90	0				
20.3	17	100	31.3																
20	18	110	0																

Prand: Prandtl Def: Deformación

9. TABLA DE RESULTADOS

A continuación se presentan las tablas con los cálculos realizados a los diferentes modelos.

Tabla 6

Cálculos de la prueba al freno en molinos de viento con eje vertical. *Modelo 1204830*
 $A_1 = 4$ cm; $A_2 = 12$ cm; $H = 40$ cm; $D = 25.4$ cm; N° Alabes = 8; $Ang = 30^\circ$; $E = 4$ cm.

POSICIONES DEL DISCO REGULADOR DE FLUJO

1					2					3					4					5				
V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %
7.59	0	0	19.99	0	7.22	0.006	0.032	19.89	0.16	6.83	0.006	0.027	15.83	0.17	6.417	0.003	0.005	13.26	0.041	5.496	0.006	0.009	8.6	0.106
7.41	0.016	0.133	19.96	0.67	7.22	0.016	0.06	18.55	0.33	6.83	0.016	0.042	15.83	0.27	6.417	0.022	0	13.26	0	5.496	0.013	0	8.6	0
7.41	0.025	0.151	19.96	0.76	7.03	0.022	0.056	18.48	0.30	6.83	0.022	0.023	15.83	0.14										
7.41	0.047	0.154	21.34	0.72	7.03	0.035	0.055	17.17	0.32	6.83	0.038	0	15.83	0										
7.41	0.086	0	21.34	0	7.03	0.048	0	17.17	0															

Tr: Torque; Psal: Potencia de salida; Pent: Potencia de entrada; Efic: Eficiencia.

Tabla 7

Cálculos de la prueba al freno en molinos de viento con eje vertical. *Modelo 1204845*
 $A_1 = 4$ cm; $A_2 = 12$ cm; $H = 40$ cm; $D = 25.4$ cm; N° Alabes = 8; $Ang = 45^\circ$; $E = 4$ cm.

POSICIONES DEL DISCO REGULADOR DE FLUJO

1					2					3					4					5				
V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %
7.034	0.009	0.203	14.89	1.37	6.832	0.009	0.137	13.73	0.99	6.418	0.006	0.066	13.57	0.49	6.2	0.006	0.062	11.54	0.55	5.74	0.063	0.063	8.418	0.753
7.223	0.035	0.569	16.09	3.53	6.832	0.035	0.368	13.73	2.68	6.418	0.038	0.354	12.54	2.83	6.4	0.022	0.21	11.51	1.82	5.74	0.183	0.183	8.418	2.173
7.223	0.057	0.739	17.26	4.29	6.832	0.057	0.393	14.84	2.65	6.628	0.051	0.308	12.60	2.44	6.2	0.032	0.22	11.44	1.91	5.50	0.186	0.186	7.461	2.849
7.223	0.070	0.735	16.09	4.57	6.832	0.079	0.269	14.84	1.81	6.628	0.063	0.179	12.60	1.42	6.2	0.038	0.165	11.44	1.44	5.24	0.207	0.207	6.544	3.168
7.223	0.099	0.739	17.26	4.28	6.832	0.111	0	13.73	0	6.628	0.96	0	12.60	0	6.2	0.089	0	10.44	0	5.24	0	0	6.544	0
7.223	0.111	0.760	17.26	4.4																				
7.223	0.143	0	16.09	0																				

Tr: Torque; Psal: Potencia de salida; Pent: Potencia de entrada; Efic: Eficiencia.

Tabla 8

Cálculos de la prueba al freno en molinos de viento con eje vertical. *Modelo 1204860*
 $A_1 = 4$ cm; $A_2 = 12$ cm; $H = 40$ cm; $D = 25.4$ cm; N° Alabes = 8; $Ang = 8^\circ$; $E = 4$ cm

POSICIONES DEL DISCO REGULADOR DE FLUJO

1			2			3			4			5												
V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %					
7.593	0.01	0.23	15.85	1.45	7.03	0.013	0.245	11.93	2	6.2	0.01	0.173	8.36	2	6.2	0.09	0.143	8.36	1.71	5.49	0.006	0.088	5.976	1.487
7.593	0.051	1.048	14.87	7.05	7.41	0.029	0.43	12.91	3.33	6.417	0.032	0.427	10.04	4.26	6.2	0.022	0.316	9.16	3.45	5.49	0.022	0.025	5.976	4.305
7.593	0.067	1.15	14.87	7.74	7.03	0.048	0.601	11.93	5.04	6.417	0.054	0.615	10.04	6.12	6.2	0.048	0.488	8.36	5.83	5.49	0.054	0.36	6.685	5.383
7.593	0.098	1.216	15.85	7.67	7.41	0.073	0.686	13.87	4.95	6.417	0.076	0.507	9.21	5.5	6.2	0.067	0.335	8.36	4	5.49	0.067	0.213	6.685	3.19
7.03	0.108	1.136	13.75	8.26	7.41	0.127	0	13.87	0	6.417	0.093	0	9.21	0	6.2	0.08	0	8.36	0	5.49	0.079	0	6.685	
7.03	0.134	1.069	13.75	7.78																				
7.03	0.144	0	13.75	0																				

Tr: Torque; P_{sal}: Potencia de salida; Pent: Potencia de entrada; Efic: Eficiencia.

Tabla 9

Cálculos de la prueba al freno en molinos de viento con eje vertical. *Modelo 1204445*
 $A_1 = 40$ cm; $A_2 = 12$ cm; $H = 40$ cm; $D = 25.4$ cm; N° Alabes = 4; $Ang = 45^\circ$; $E = 4$ cm

POSICIONES DEL DISCO REGULADOR DE FLUJO

1			2			3			4			5												
V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %					
6.418	0.006	0.06	12.54	0.48	6.628	0.003	0.026	12.60	0.21	5.974	0.006	0.033	9.41	0.35	5.49	0.006	0.028	7.46	0.38	5.24	0.003	0.019	8.23	0.238
6.418	0.035	0.294	12.54	2.35	6.418	0.019	0.139	12.54	1.11	5.974	0.019	0.074	9.41	0.78	5.49	0.022	0.052	7.46	0.70	5.24	0.019	0.078	8.23	0.952
6.418	0.057	0.340	12.54	2.71	6.418	0.031	0.159	12.54	1.27	5.974	0.037	0.11	9.41	1.18	5.49	0.031		8.35	0	5.24	0.025	0.049	8.23	0.591
6.200	0.076	0.338	12.44	2.72	6.200	0.044	0.120	11.44	1.05	5.974	0.08	0	9.41	0	5.24	0.031		8.35	0	5.24	0.031	0	7.39	0
6.418	0.111	0	14.61	0	6.200	0.063	0	10.44	0															

Tr: Torque; P_{sal}: Potencia de salida; Pent: Potencia de entrada; Efic: Eficiencia.

Tabla 10

Cálculos de la prueba al freno en molinos de viento con eje vertical. Modelo 1204460
 $A_1 = 4$ cm; $A_2 = 12$ cm; $H = 40$ cm; $D = 25.4$ cm; N° Alabes = 4; $Ang = 60^\circ$; $E = 4$ cm.

POSICIONES DEL DISCO REGULADOR DE FLUJO

V m/s	1				2				3				4				5							
	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %	V m/s	T_r N.m	P_{sal} W	P_{ent} W	Efic %
7.03	0.003	0.063	12.84	0.5	6.83	0.006	0.073	11.00	0.67	6.83	0.006	0.054	9.23	0.59	6.62	0.003	0.034	10.95	0.31	5.97	0.006	0.062	7.54	0.69
7.03	0.031	0.471	11.02	4.27	6.63	0.022	0.228	10.09	2.26	6.83	0.022	0.173	11.00	1.57	6.62	0.019	0.145	10.95	1.32	5.97	0.022	0.152	7.54	2.02
6.83	0.057	0.703	11.88	5.92	6.63	0.048	0.397	9.23	4.30	6.62	0.041	0.214	10.95	1.95	6.62	0.035	0.203	11.81	1.72	5.97	0.036	0.125	7.54	1.66
6.83	0.076	0.649	11.88	5.46	6.63	0.064	0.344	10.09	3.40	6.62	0.064	0.160	10.95	1.46	6.62	0.048	0.191	11.81	1.61	5.74	0.051	0	6.74	0
6.83	0.096	0.628	11.00	5.71	6.63	0.127	0	10.09	0	6.62	0.096	0	10.95	0	6.62	0.080	0	10.95	0					
6.83	0.111	0.366	11.00	3.33										*										
6.83	0.143	0	12.76	0																				

Tr: Torque; P_{sal}: Potencia de salida; Pent: Potencia de entrada; Efic: Eficiencia.

CONCLUSIONES

- Las más altas eficiencias se obtienen cuando el número de álabes es elevado, pero no supera los 8.
- Mientras más elevado es el ángulo de ataque (hasta 60°), más altos son la eficiencia y el torque para velocidades altas de viento.
- Si el número de álabes del modelo es elevado, se producen menos vibraciones en el equipo.
- Si se varía el ancho de la placa generadora del ángulo de ataque y el espaciamiento existente entre el álabe y el eje, la eficiencia se incrementa.
- Si aumenta el espaciamiento entre el álabe y el eje para altas velocidades de viento, aumenta el torque.
- Para bajas velocidades de viento (19.8 Km/h o menos) se tiene un mejor comportamiento del torque en la medida en que se haga más ancha la placa generadora del ángulo de ataque.
- Existe un ángulo de ataque óptimo a partir del cual la eficiencia, después de haber alcanzado su máximo, comienza a disminuir. Experimentalmente se determinó, para el modelo, que esto sucede después de los 60° .

Bibliografía

- AZAR, Afif; LLANOS, César. «Diseño, construcción, montaje y operación de un molino de viento experimental». Tesis de grado, Universidad del Norte, División de Ingenierías. Barranquilla, 1988.
- BEER, Ferdinand. *Mecánica Vectorial para ingenieros: Dinámica*. México, McGraw-Hill, 1998.
- BERTIN, John. *Mecánica de Fluidos para ingenieros*. México, Prentice-Hall, 1986.
- DE BONO, Edward. *EUREKA, Historia de la invención*. Londres, Labor, 1974.
- ENCICLOPEDIA de la técnica y la mecánica. Barcelona, Ediciones Nauta, 1973.
- ENCICLOPEDIA Visual Salvat. *Hombre y Técnica*. España, Salvat editores, 1978.
- MERCADO, Luis; TINOCO, José. «Diseño y validación de un programa para la selección de un molino de viento, montaje y operación». Tesis de grado, Universidad del Norte, División de Ingenierías. Barranquilla, 1991.
- OLERT, G. *Aspectos económicos de los sistemas de energía renovable. Una guía para diseñar proyectos*. Barranquilla, 1987.
- RODRÍGUEZ, Julio Mario. *Mecánica de Fluidos para todos*. Bogotá, Publicaciones SENA, 1988.
- . *Comparación entre molinos de viento*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingenierías. Bogotá, 1984.
- STREETER, Victor. *Mecánica de los Fluidos*. México, McGraw-Hill, 1997.