

# Diseño y análisis del rendimiento del rotor del aerogenerador Elisa

## Design and analysis of the performance of the Elisa aerogenerator's rotor

Marlen Veleiro<sup>1\*</sup>, Raúl Franceschi<sup>2</sup> & Nacari Marin<sup>3\*</sup>

38

<sup>1</sup>Licenciatura en Ingeniería Naval – Facultad de Ingeniería Mecánica – Universidad Tecnológica de Panamá

<sup>2</sup>Licenciatura en Ingeniería Mecánica – Facultad de Ingeniería Mecánica – Universidad Tecnológica de Panamá

<sup>3</sup>Docente de pregrado– Licenciatura en Ingeniería Mecánica – Facultad de Ingeniería Mecánica – Universidad Tecnológica de Panamá

**Resumen** La energía eólica es la tecnología que el mundo está contando para proporcionar una fuente de energía sostenible. El viento es abundante, limpio y renovable, a diferencia de las reservas fósiles que se distribuyen ampliamente en los cinco continentes. Por este motivo, rediseñamos un aerogenerador, el cual hemos denominado ELISA, el rotor posee una forma de disco parabólico capaz de capturar y convertir más energía cinética del viento en energía mecánica, además que dicho rotor se ha desarrollado en base a una resina de poliuretano reforzada con nanotubos de carbono, la cual es más liviana y posee mejores propiedades mecánicas; en consecuencia, permitirá optimizar al máximo la producción energética del aerogenerador.

**Palabras claves** Aerogenerador, resina de poliuretano, nanotubos de carbono, perfil aerodinámico.

**Abstract** The world is counting on wind energy to provide a sustainable energy source. Wind is abundant, clean and renewable, instead of fossil reserves that are widely distributed in the five continents. For this reason, we have designed an aerogenerator, called ELISA, the rotor has a parabolic dish shape which can capture and convert more kinetic energy of the wind into mechanical energy, and the rotor is made of polyurethane resin reinforced with carbon nanotubes, which is lighter and has better mechanical properties, in consequence this allow to optimize the energy production of the aerogenerator.

**Keywords** Aerogenerator, polyurethane resin, carbon nanotubes, aerodynamic profile.

\*Corresponding author: nacari.marin@utp.ac.pa

## 1. Introducción

Los aerogeneradores son una de las tecnologías más innovadoras para obtener energía limpia y sostenible. En este trabajo se propone el rediseño de un aerogenerador, el cual lo hemos llamado ELISA, que significa “Energía Limpia Sustentable y Amigable”. El diseño consiste en un cambio total de su estructura y rotor, pues este posee la forma de un disco parabólico, en lugar de las aspas convencionales empleadas en las turbinas eólicas.

El diseño del rotor fue inspirado en la tecnología de los veleros, ya que una vela es el único sistema capaz de capturar y convertir la mayoría de la energía cinética del viento en energía mecánica. El disco parabólico tiene un movimiento 3D rotacional el cual sigue una trayectoria recíproca capaz de capturar mayor energía cinética del viento. El coeficiente de potencia es mayor gracias a su innovador diseño; por lo que se sitúa en un rango mucho más alto de eficiencia que una turbina convencional (30%-35%), además que sus pérdidas aerodinámicas son mucho menores a su geometría.

Hoy día el mercado de la energía eólica está experimentando serios desafíos, hay enormes presiones para reducir los costos para competir con otras formas de energía. A causa de esta demanda hemos decidido desarrollar el disco parabólico a base de una resina de poliuretano reforzada con nanotubos de carbono.

ELISA no representa una amenaza para las aves que son golpeadas por las aspas de las turbinas tradicionales, además, produce menos contaminación acústica, ya que las vibraciones de las aspas producen dolores de cabeza, náusea e insomnio, y que la rotación de las aspas interfiere en las señales de radio y televisión.

### 1.1 Obtención del mordiente tánico

ELISA se compone de un cimiento, una torre, una góndola y un rotor como se puede observar en la figura 1.

Para garantizar la estabilidad del aerogenerador se construye el cimiento el cual depende de la consistencia del suelo donde se instala. La torre sostiene a la góndola que soporta toda la maquinaria y el rotor es el componente que convierte la energía del viento en energía mecánica.

Los componentes principales para su funcionamiento se muestran en la figura 2 y estos son: el rotor (1), el buje (2), el eje principal (3), el freno de disco hidráulico (4), el generador eléctrico (5) y el sistema de orientación (6).



Figura 1. Aerogenerador ELISA.

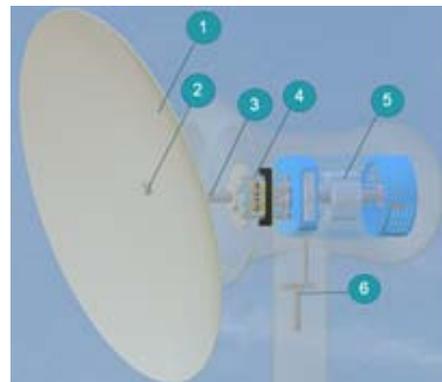


Figura 2. Componentes del Aerogenerador ELISA.

El generador es de anillo multipolo y convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Este tipo de generador trabaja sin la caja multiplicadora y hace que esté acoplado de forma directa al aerogenerador. Cuando se producen errores importantes, o peligros para la integridad del aerogenerador; se aplica el freno de disco hidráulico con la máxima presión.

El sistema de orientación tiene como objetivo, colocar el rotor del aerogenerador en un ángulo óptimo con respecto al viento.

## 2. Modelo matemático

Las fuerzas en el perfil aerodinámico del aerogenerador pueden ser expresadas en función de los coeficientes de arrastre, sustentación y el ángulo del viento. Como se muestra en la figura 3, para el análisis, el disco se puede seccionar en N secciones.

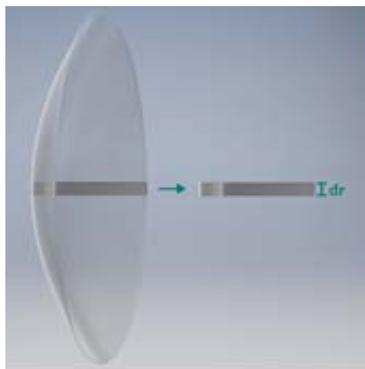


Figura 3. Esquema de la sección N del disco parabólico.

Al analizar las fuerzas en el disco, se nota que la fuerza de arrastre es paralela con el viento relativo y la de sustentación, perpendicular como se muestra en la figura 4 a continuación.

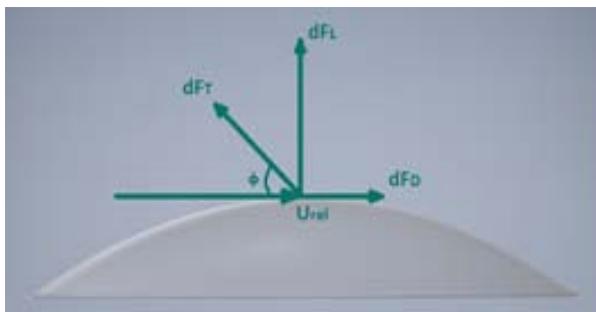


Figura 4. Diagrama de fuerzas del disco parabólico.

A partir de la figura 4, determinamos las siguientes relaciones:

$$dF_L = 1/2 C_l \rho c U_{rel}^2 dr \tag{1}$$

$$dF_D = 1/2 C_d \rho c U_{rel}^2 dr \tag{2}$$

$$dF_T = dF_L \sin \alpha - dF_D \cos \alpha \tag{3}$$

Donde  $dF_L$  es la fuerza diferencial de sustentación,  $C_l$  es el coeficiente de sustentación,  $dF_D$  es la fuerza diferencial de arrastre,  $C_d$  es el coeficiente de arrastre,  $dF_T$  es la fuerza diferencial tangencial,  $U_{rel}$  es la velocidad relativa del viento,  $\varphi$  es el ángulo del viento en la posición óptima y  $c$  es la longitud de la sección, o sea el diámetro del rotor.

Así pues, tenemos que el torque diferencial con respecto a la fuerza tangencial a la distancia del radio desde el centro está dado por:

$$dQ = r dF_T \tag{4}$$

Reemplazando, el torque diferencial resulta como:

$$dQ = 1/2 \rho c U_{rel}^2 (C_l \sin \alpha - C_d \cos \alpha) r dr \tag{5}$$

El cálculo del coeficiente de potencia se obtiene a partir de la ecuación:

$$dP = \Omega dQ \tag{6}$$

$$P = \int dP = \int \Omega dQ \tag{7}$$

Donde  $dP$  es la potencia diferencial,  $\Omega$  la velocidad rotacional del rotor.  $P$  es la potencia generada y  $R$  es el radio del rotor, por último,  $r_h$  es el radio del rodamiento en el eje del disco parabólico.

$$C_p = \xi / R = [P_{wind}] / [4 / R] n^2 \tag{8}$$

Además,  $C_p$  es el coeficiente de potencia,  $P_{wind}$  es la potencia,  $\rho$  es la densidad del aire y  $U$  es la velocidad del viento [1]

$$C_p = \rho * U [P_{wind}] / [4 / R] n^2 \tag{9}$$

### 3. Materiales de fabricación

El costo de la energía del aerogenerador está relacionado con su costo de instalación, mantenimiento y su eficacia para convertir la energía mecánica en energía eléctrica.

El disco parabólico representa alrededor del 22% del costo del aerogenerador, donde aproximadamente el 30% de la materia prima del disco es la resina, una reducción de esta y del coste de manufactura ofrecerá ahorros significativos [2].

La resina de poliuretano reforzada con nanotubos de carbono, podría servir para reducir el coste total de fabricación hasta un 16% [3].

La resina de poliuretano se produce a través de una reacción entre un polialcohol y un diisocianato que se obtiene mediante un catalizador. El poliuretano posee un sistema de baja viscosidad, posee una excelente resistencia a la tracción (2.96TPa), a la abrasión (86MPa) y un alargamiento a la rotura de más de 7.5%.

El poliuretano es muy atractivo gracias a sus ventajas de procesamiento, los tiempos de endurecimiento son mucho más veloces, por lo que se reduce el tiempo de fabricación y aumenta la productividad. Otra ventaja es que la resina de poliuretano no contiene estireno y no genera contaminantes orgánicos volátiles [4].

Los resultados de los ensayos mecánicos para la resina de poliuretano muestran que este material supera a las resinas de epoxi y vinil éster reforzadas con fibra de vidrio, que son utilizadas actualmente para la fabricación de las aspas convencionales de una HAWT.

Los ensayos de fatiga (ver figura 5) muestran que el poliuretano reforzado dura cerca de 9 y 14.8 veces más que las resinas de vinil éster y epoxi, respectivamente. Al considerar una carga máxima de 68.9MPa aproximadamente, el epoxi se fracturó a 93.216 ciclos, el vinil éster a 57,507 ciclos, mientras que el poliuretano se fracturó solo después de 849,881 ciclos [5].

Además, el esfuerzo último de la resina de poliuretano (155.3 MPa) es mayor que los de la resina de epoxi (133.3 MPa) y la de vinil éster

(129.5 MPa) [6]. Gracias a su alta tenacidad, la resina de poliuretano es superior en operaciones secundarias tales como la perforación, mecanizado y montaje.

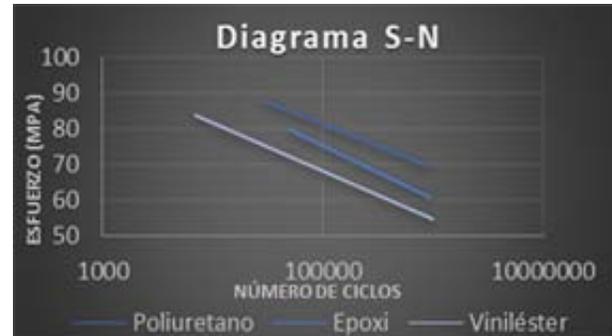


Figura 5. Esfuerzo máximo y números de ciclos de las resinas.

Los bordes perforados y mecanizados exhiben muy poca o ninguna microgrieta en comparación con las demás resinas [7].

Los nanotubos de carbono son una forma alotrópica del carbono, en su forma más perfecta, consta de una lámina de grafito que plegada sobre sí misma genera una estructura acicular hueca. La estructura de los nanotubos de multicapa o MWNTs (*multiwalled nanotubes*) se asemeja a la de una serie de tubos concéntricos, incluidos unos dentro de otros con grosores crecientes desde el centro a la periferia.

Los modelos predicen que la conductividad térmica de los nanotubos puede llegar a ser de 6000 W/m · K a temperatura ambiente, más alta en comparación del diamante que presenta 3320 W/m · K.

De igual modo, son estables térmicamente, siendo estables a 2800°C en el vacío y a 750°C en el aire [8].

Si las propiedades térmicas son sorprendentes, las propiedades mecánicas lo son aún más, la estabilidad y robustez de los enlaces entre los átomos de carbono les proporciona la capacidad de ser la fibra más resistente que se puede fabricar hoy día, los nanotubos son 100 veces más resistentes que el acero y seis veces más ligeros [9].

Por otro lado, frente a esfuerzos de deformación muy intensos los nanotubos son capaces de deformarse notablemente y de mantenerse en un régimen elástico, experimentalmente se ha obtenido un módulo de Young de hasta 0.8 TPa [10].

Así pues, los nanotubos se comportan como resortes extremadamente firmes ante pequeños esfuerzos y, frente a cargas altas, pueden deformarse drásticamente y retornar a su forma original.

Además, aunque se fracturase un nanotubo, como se comportan como unidades independientes, la fractura no se propagaría a los otros colindantes.

En una comparación con otros materiales de refuerzo, se demostró que los nanotubos de carbono son más ligeros por unidad de volumen que la fibra de carbono y aluminio, y conjuntamente, tienen más de 5 veces la resistencia a la tracción de fibra de carbono y más de 60 veces mayor que la de aluminio [11].

#### 4. Resultados

Con el fin de perfeccionar el rendimiento de los perfiles aerodinámicos, se llevan a cabo estudios sobre las fuerzas de sustentación y de arrastre que experimentan en función del ángulo de ataque.

Dichas características aparecen reflejadas en diagramas en los cuales se representan el coeficiente de sustentación  $C_l$ , el coeficiente de arrastre  $C_d$ , como función del ángulo de ataque y su cociente  $C_l/C_d$ .

Utilizando el *software* Xfoil [12] y asignando las propiedades atmosféricas correspondientes del perfil aerodinámico [13], procedimos a simular para el perfil aerodinámico NACA 4415 de una HAWT [14] en comparación del perfil aerodinámico ELISA, como el mostrado en la figuras 6, 7, 8, 9, 10 y 11 y en las tablas 1 y 2 .

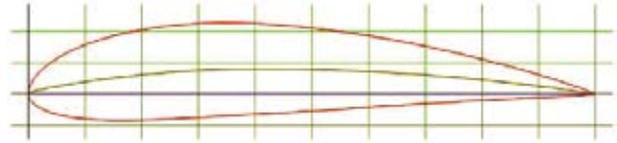


Figura 6. Perfil Aerodinámico NACA 4415.

Tabla 1. Perfil Aerodinámico NACA 4415

Reynolds	$\alpha$	Max $C_l/C_d$
100.000	8°	49.2
200.000	6.5°	71.1
500.000	5.75°	97
1.000.000	5.5°	119.1

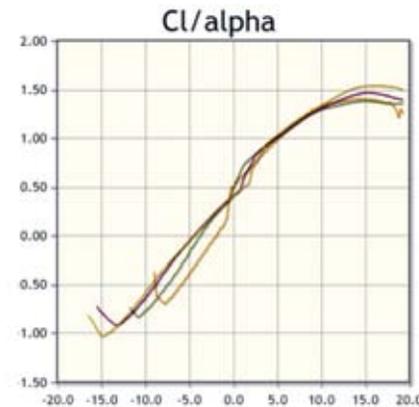


Figura 7. Gráfico  $C_l$  vs  $\alpha$  del Perfil Aerodinámico NACA 4415.

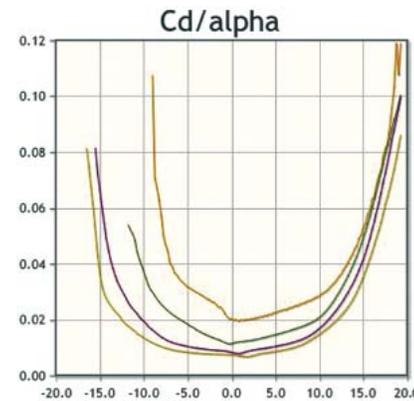


Figura 8. Gráfico  $C_d$  vs  $\alpha$  del Perfil Aerodinámico NACA 4415.

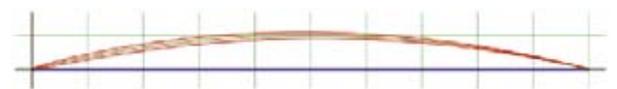
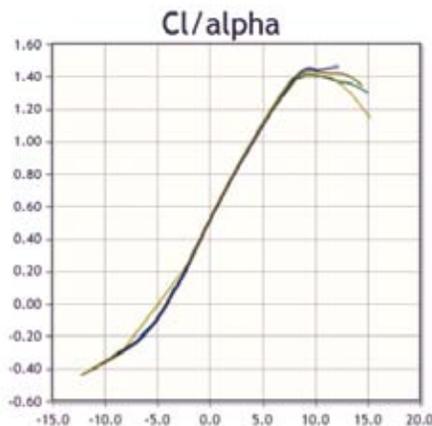


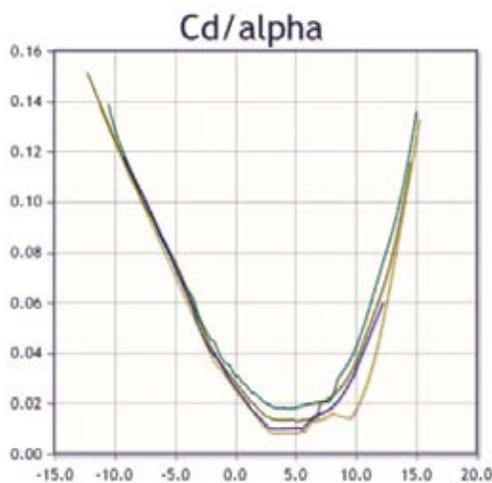
Figura 9. Perfil Aerodinámico ELISA.

**Tabla 2.** Parámetros del Perfil Aerodinámico ELISA

Reynolds	$\alpha$	Max $C_l/C_d$
100.000	7.75°	66.8
200.000	6.75°	91.2
500.000	5.5°	118.6
1.000.000	5.25°	135.6



**Figura 10.** Gráfico 4.  $C_l$  vs  $\alpha$  del Perfil Aerodinámico ELISA.



**Figura 11.** Gráfico 5.  $C_d$  vs  $\alpha$  del Perfil Aerodinámico ELISA.

### 5. Resultados y discusión

La relación equivalente entre los coeficientes  $C_l$  y  $C_d$  para diversos ángulos de ataque, es el retrato del perfil aerodinámico. Las tablas nos muestran el rendimiento aerodinámico, el cual es mayor a medida que la relación  $C_l/C_d$  incrementa sus valores, la relación recibe el

nombre de finura aerodinámica. La tangente desde el origen de las coordenadas a la curva polar proporciona la finura aerodinámica máxima para cada ángulo de ataque como se aprecia en las tablas 1 y 2.

En los gráficos 4 y 5, se logra apreciar como las curvas polares ascienden más que las curvas polares de los gráficos 2 y 3; por lo tanto, el coeficiente de potencia del perfil aerodinámico ELISA aumenta; en consecuencia, el aerogenerador tiene un rendimiento mayor que el perfil aerodinámico de una turbina convencional.

### 6. Conclusiones

Con el análisis de los resultados hemos llegado a las siguientes conclusiones:

- El aerogenerador ELISA ofrece una eficiente y fiable manera de aprovechar el viento para generar energía limpia y sustentable, y aborda eficazmente el creciente problema del cambio climático al contribuir en los esfuerzos mundiales para lograr un planeta más verde para las generaciones futuras.
- Al sustituir los álabes de una HAWT por un disco parabólico y gracias al movimiento específico, el aerogenerador ELISA es capaz de capturar más energía cinética del viento, ya que posee un gran coeficiente de arrastre. Los gráficos demuestran que es más eficiente debido a que su coeficiente de arrastre y sustentación superan al de una HAWT. El nivel de eficiencia se sitúa en un nivel sobresaliente y su energía generada se incrementa a medida que aumenta la velocidad del viento.
- Además, se demostró que el disco parabólico posee mejores propiedades mecánicas y térmicas, es decir, el rotor es mucho más resistente, ligero y tiene una vida útil mayor que las aspas convencionales, gracias a la resina de poliuretano reforzada con nanotubos de carbono con la cual es fabricada.

En la industria el uso de nanotubos de carbono es más habitual; de manera que, al aumentar la demanda, los costos disminuyen. Por eso al sustituir las aspas costosas, reducir el tamaño del rotor y el peso de la máquina, es posible reducir significativamente los costos de fabricación.

- Al eliminar las aspas y la caja de engranes, las emisiones acústicas y vibraciones son muy bajas, y no contribuye a la contaminación ambiental por ruido. También, por su movimiento recíproco, no se ven afectadas las ondas de radio, de televisión y el sistema de detección por radar.
- Todo esto permite que el aerogenerador ELISA se pueda instalar en zonas urbanas, donde cambiaría la vida de muchas personas que viven en zonas remotas y pobres que no tiene acceso a la electricidad.
- Generar energía limpia, sustentable y amigable es rentable pues abre una nueva perspectiva a los proveedores de servicios públicos grandes, ya que hay una menor dependencia de las fluctuaciones del petróleo, del gas y del precio del carbón.

- [8] K. Jiwon, K. Hyuntae, P. Jaehyung, O. Seunggyun, “Carbon Nanotube”, KUMHO PETROCHEMICAL, Seoul, Jung-Gu, Seoul, Korea.
- [9] S. Mirsky, “A Dose of Our Own Medicine”, Scientific American Magazine, pp. 25, June 2000.
- [10] B. G. Demczyk, Y.M. Wang, J. Cumings, M. Hetman, W. Han, A. Zettl, R.O. Ritchie, “Direct mechanical measurement of the tensile strength and elastic modulus of multiwalled carbon nanotubes”, pp. 177, August 2001.

## REFERENCIAS

- [1] J. F. Manwell, J. G. McGowan, A.L. Rogers, “Wind Energy Explained: Theory, Design and Application”, 2nd ed, John Wiley & Sons Ltd., pp. 118-121, 2009.
- [2] Kevin Lambrych, “Composites in Wind Energy”, Ashland Performance Material, 2013.
- [3] Sharon Papke, “Bayer’s New Composite Technology”, Bayer Material Science LLC, 2011.
- [4] Michael Connolly, “A new tunable polyurethane could revolutionize composites”, Composites Technology, February 2011.
- [5] U.E Younes, F.W. Bradish, “Polyurethane Composites for Wind Turbine Blades”, ResearchGate, November 2012.
- [6] U. Younes, “Polyurethane in Composites”, Bayer MaterialScience, SANDIA, 2012.
- [7] L. Manolis Sherman, “Polyurethane Composites: New Alternative to Polyester and Vinyl Ester”, Huntsman Polyurethanes, 2006.