

Metodología para el diseño de parámetros en una máquina eólica vertical

Marlo Leyva Tarafa

mltarafa@ismm.edu.cu

Geovanys Martínez Ruiz

Aliet Lamorú Reyes

Mailiet Guilarte Breff

Alejandro Fernández Peña

Dioelis Rafael Guerra Santiesteban

Universidad de Moa (Cuba)

Resumen: Se establecieron los parámetros de diseño de los componentes de un aerogenerador rápido de baja potencia, compuesto por rotor, palas, palas suplementarias y el árbol, combinando materiales de madera, aluminio al 13 % silicio y acero AISI 1045; para generar una potencia eólica de 305,75 W obtenida de una potencia del viento de 120,102 W donde el equipo será capaz de entrega 305,75 W/h con un rendimiento eólico del 32 %. Los componentes mecánicos, debido al momento torsor ocasionado por la fuerza centrífuga del viento, podrán girar hasta 477 r/min y transmitir un par torsional igual a 2 294 Nm. El cálculo de las condiciones de resistencia arroja a tracción es de 68,75 MPa y el esfuerzo admisible, teniendo en cuenta el coeficiente de seguridad y la resistencia a la rotura de $7,75 \times 10^7$ Pa, ambos parámetros inferiores a los valores permisibles. A través del análisis de los esfuerzos por el método de elementos finitos y aplicando los criterios de Von Mises se muestran las tensiones que se distribuyen a lo largo del árbol sometido a la torsión, valores máximos que soporta el árbol central de 1,577 MPa; el desplazamiento máximo de $6,62 \times 10^{-6}$ MPa y mínimo $1,13 \times 10^{-10}$ MPa en los elementos 7 063 y 3 128, respectivamente.

Palabras clave: aerogenerador vertical; resistencia mecánica; paletas suplementarias; potencia eólica; ángulo de ataque.

Methodology for the design of parameters in a vertical wind machine

Abstract: The present research aims to establish the design parameters of the components of a low power fast wind turbine, composed of a rotor, blades, supplementary blades and the shaft, combining materials of wood, aluminum 13% silicon and AISI 1045 steel; to generate a wind power of 305,75 W obtained from a wind power of 120,102 W where the equipment will be capable of delivering 305,75 W/h with a wind performance of 32%. The mechanical components, due to the torsional moment caused by the centrifugal force of the wind, will be able to rotate up to 477 r/min and transmit a torsional torque equal to 2 294 Nm. The calculation of the tensile strength conditions is 68.75 MPa and the allowable stress taking into account the safety factor and the breaking strength of $7,75 \times 10^7$ Pa, both parameters below the allowable values. Through the analysis of the stresses by the finite element method and applying the Von Mises criteria, the stresses that are distributed along the tree subjected to torsion are shown, maximum values that the central tree supports of 1,577 MPa. The maximum displacement of 6.62×10^{-6} MPa and minimum $1,13 \times 10^{-10}$ MPa in elements 7 063 and 3 128 respectively.

Key words: vertical wind turbine; mechanical resistance; supplementary blades; wind power; angle of attack.

Introducción

En la actualidad los materiales utilizados para el diseño y la construcción de los aerogeneradores son costosos y tienen características específicas como la durabilidad, livianos, para que exista poca incidencia del rozamiento con el viento, logrando así un mayor movimiento de las palas. Entre los materiales más utilizados se encuentran fibras de carbono, fibra de vidrio, la tela reforzada y el plástico PVC, aunque suelen ser escasos y costosos.

La madera resulta ser uno de los materiales de mayor uso en los primeros molinos de viento. En la actualidad su costo es elevado, pero inferior al aluminio y el acerolos. Por tanto, se propone el diseño con la combinación de madera y aluminio al 13 % de silicio, ya que estos son relativamente fáciles de encontrar y según sus propiedades serían útiles a la hora de la propuesta del diseño para facilitar el trabajo de los rotores.

Estos rotores, en esencia, funcionan por el aprovechamiento de la potencia del viento, a partir de un estudio de la prospección eólica, para la utilización de los aerogeneradores axiales y molinos de vientos (Fernández, 2000).

Las palas de aerogenerador se encargan de recoger la potencia eólica. Su diseño se rige por varias normas, en cuanto a la forma y los materiales a emplear; una de las más utilizadas es la ACA, para alcanzar mayor eficiencia en la recogida de la potencia del viento (Lecuona, 2002).

En la construcción de estos equipos se utilizan las diferentes formas para generar y tener un mayor aprovechamiento de la potencia eólica, por lo que se deben estudiar los diferentes diseños que existen como las turbinas horizontales de dos o tres palas de fibras de plástico, que necesitan orientación para el aprovechamiento (Moreno *et al.*, 2007).

Las de barrido horizontal no es necesario su orientación, donde se encuentra el diseño de aeromotores verticales de cazoletas robinson, (Rodríguez, 2002), para disminuir los efectos turbulentos para que no incidan en el resto de las partes del rotor que, de acuerdo con las vibraciones y del ruido, provocan la rotura de estos equipos.

Para utilizar estas máquinas es preciso determinar funcionamiento y composición del aerogenerador a partir de su potencia y de los factores que influyen en el

comportamiento para optimizar el funcionamiento de los mecanismos (Monterrubio & De Marco, 2006).

Materiales y métodos

Para el desarrollo de los conceptos fundamentales relacionados con la metodología de cálculo y el análisis del diseño de los componentes del rotor eólico, se analizaron los parámetros que determinan los niveles normales de rendimiento de estas máquinas en condiciones de operación. El objetivo es la obtención de los criterios tecnológicos relacionados con la delineación de los elementos del aerogenerador.

Instrumentos de medición

Para las mediciones de las velocidades periódicas del viento se utilizó el anemómetro de Cazoleta Robinson marca THIES y para la determinación de la dirección predominante del viento se empleó una Veleta marca THIES, ambos de fabricación alemana. El punto de ubicación del aerogenerador (según coordenadas Lambert) se sitúa entre los puntos (693500; 694000) y (223500; 224000) a una altura de 100 m, y para determinar su altura real se utilizaron conjuntamente los planos de arquitectura y el método de interpolación de Lagrange (Álvarez, Guerra y Lau, 2004).

Cálculo de la potencia eólica

La potencia eólica es la variable fundamental que se emplea para obtener el movimiento de las paletas y así obtener el rendimiento del equipo; esta se determina según Lecuona (2002) como:

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot V_m^3 \cdot D_r^2; [W] \quad (1)$$

Donde:

C_p : coeficiente de potencia del viento

V_m : velocidad media (m/s).

Para determinar el coeficiente C_p se tienen los criterios de la curva de Glauvert (Lecuona, 2002), que relaciona el tipo de aerogenerador eólico, la velocidad promedio del viento y la velocidad específica que alcanza el aerogenerador.

En correspondencia con esta curva para la selección del coeficiente, para el cálculo de la potencia real del viento se empleó la ecuación (1), pero en este caso se utiliza el valor del promedio de la velocidad media registrada que es 5 m/s.

Para el cálculo de la potencia del viento en el área de barrido del rotor, la cual está referida al área que ocupa las paletas en su giro para generar la potencia eólica necesaria durante su movimiento, Rodríguez (2002) propone calcularla como:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_c^3 \cdot A_b; [W] \quad (2)$$

Donde:

ρ : densidad del viento, (kg/m³)

V_c : velocidad crítica del viento, (m/s)

A_b : área de barrido del aerogenerador, (m²).

El momento torsor producido por el viento, como esfuerzo para transmitir potencia desde las paletas hacia los elementos móviles del equipo eólico, a partir de la potencia del viento que recoge el área de barrido del rotor, se puede determinar según Rodríguez (2002) por la ecuación:

$$\mu_t = \frac{P}{\omega}; [Nm] \quad (3)$$

Donde:

P: potencia del aerogenerador, (W)

ω : velocidad angular, (rad/s).

El número de revoluciones para rotores eólicos, donde se considera el número de revoluciones, teniendo en cuenta el tipo de rotor y las paletas que se construirán según Franquesa (2005) como:

$$n = \frac{(60 \cdot \lambda \cdot V_c)}{\pi \cdot D_r}; [r/min] \quad (4)$$

Donde:

λ : Coeficiente de la velocidad específica.

El cálculo del rendimiento aerodinámico, asociado a la relación que existe entre el aprovechamiento de la potencia eólica y la potencia del viento que recogen las paletas, Lecuona (2002), sugiere determinarlo por la ecuación siguiente:

$$\eta = \frac{P_e}{P_v}; \quad (5)$$

Donde:

P_v : potencia del viento con la velocidad media, (W)

P_e : Potencia eólica, (W).

Para el diseño de las paletas, como elementos esenciales para recoger en su recorrido el aprovechamiento eólico y se diseñan teniendo en cuenta las condiciones climáticas, sus condiciones geométricas y la determinación del ancho entre el 1/20 o 1/25 de diámetro descrito por la rotación de ellas, con ángulo de calaje (β) entre 3° y 8° .

La relación de la velocidad periférica o específica (TSR) es seleccionada por la cantidad de paletas que presenta el equipo (Lecuona 2002), en este caso es 6. Esta velocidad se relaciona para obtener la cantidad de paletas a diseñar en el aerogenerador.

Para conocer los esfuerzos que generará el trabajo del aerogenerador, cuando reciba la influencia del viento como variable fundamental durante el tiempo de trabajo del equipo, se determinó el cálculo de la resistencia aerodinámica del rotor, según Fernández (2000) como:

$$F_{cent} = \frac{0,01034 \cdot G \cdot (SR \cdot V_m^2)}{r_G}; [N] \quad (6)$$

Donde:

G : peso de la pala, (N)

V_m : velocidad media del viento, (m/s)

r_G : distancia desde el eje de rotación al centro de gravedad de la pala, (m).

La velocidad media específica se determinó a partir de la selección de la velocidad específica que, con la cantidad de paletas, es utilizada para conocer el aprovechamiento de la potencia que se recogerá del viento, según Fernández (2000) se calcula por la ecuación siguiente:

$$SR = \frac{1}{2} \cdot TSR; \quad (7)$$

Donde:

TSR : velocidad periférica o específica.

La fuerza aerodinámica que incide de forma axial en las paletas en el momento de giro por parte de estas con el efecto del viento, según Fernández (2000), se puede calcular como:

$$F_{aerod} = 0,062 \cdot A_b \cdot V_c^2; [N] \quad (8)$$

La deformación que resiste la pala a partir del efecto de la fuerza aerodinámica, que se produce en el trabajo de la potencia eólica con la incidencia del viento en el área de barrido que genera un momento flector de la paleta puede calcularse como (Fernández, 2000):

$$\mu_{flector} = r_G \cdot F_{aerod}; [Nmm] \quad (9)$$

Donde:

F_{aerod} : fuerza aerodinámica de la pala, (N).

El momento torsor del eje de giro, como par torsional que ocurre a partir de la potencia que se trasmite al árbol recibido por la velocidad media del viento y que permite la rotación de las paletas en el área de barrido que utiliza el equipo eólico, según (Fernández, 2000) se puede calcular como:

$$\mu_t C = \frac{P_{util} D}{2(TSR)V_m}; [Nmm] \quad (10)$$

P_{util} : potencia útil de aerogenerador, (W).

Es la potencia útil que utiliza la paleta del aerogenerador para transmitir al árbol y se obtiene a partir de la densidad del aire y la velocidad media del viento (según Fernández, 2000) se determina como:

$$P_{util} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_m^3; [W] \quad (11)$$

El perfil de la pala a partir de la velocidad media periférica se considera para conocer el porcentaje de aprovechamiento de la potencia eólica y determinar la longitud de la pala del aerogenerador, se calcula como (Fernández, 2000):

$$SR_p = \frac{TSR \cdot dist}{Dist\ total} \quad (12)$$

Donde:

$dist$: distancia de la parte seccionada de la pala, (mm)

Dist total: largo total de la pala, (mm).

Para el cálculo del ancho de las secciones de las paletas, que permite obtener la forma de la pala, la distancia total de la misma y el ancho; lo cual está en función del parámetro de forma, los coeficientes de arrastre y de sustentación, del ángulo en función de la velocidad periférica, Fernández (2000) propone calcularlo como:

$$L = \frac{SP \cdot dist}{C_y \cdot z} \quad (13)$$

SP: parámetro de forma,

C_y : coeficiente de arrastre,

z: cantidad de paletas.

Para establecer la relación largo de la pala y el radio máximo de giro (R/L) se realiza la sumatoria total de todas las longitudes determinadas y divididas por la cantidad de paletas que se presentan en el diseño, según Fernández (2000) por la ecuación siguiente:

$$[L] = \frac{L_a + L_b + L_c + L_d + L_e + L_f + L_g + L_h + L_i + L_j + L_k + L_l + L_m + L_n + L_T}{3}; [mm] \quad (14)$$

Donde:

$L_a \dots L_T$: longitudes de las secciones escogidas, (mm).

Luego de obtener la relación R/L

$$\Delta L = \frac{Dist\ total}{[L]}; [mm] \quad (15)$$

El ajuste del ángulo de ataque de la pala, el cual incide sobre la velocidad promedio del viento, con el objetivo de utilizar y aprovechar la magnitud de la potencia eólica, Fernández (2000) propone calcularlo como:

$$\alpha = -\alpha_0 + \frac{C_y}{0,11} \cdot \left(1 + \frac{3}{\Delta L}\right); [^\circ] \quad (16)$$

Por otro lado, el ángulo de calaje o de inclinación (β), que deben presentar las paletas al estar sujetas al eje del rotor, para aprovechar la velocidad incidente en el aerogenerador, según Fernández (2000) como:

$$\beta_T = \vartheta - \alpha; [^\circ] \quad (17)$$

Donde:

ϑ : ángulo de inclinación,

α : ajuste del ángulo de ataque.

Para el cálculo de las condiciones de resistencia del rotor se tienen en cuenta los elementos fundamentales que integran la instalación como son: paletas, núcleo del rotor, paletas suplementarias; a partir de los cuales y considerando la potencia utilizada por el aerogenerador, se determina la metodología para el cálculo y las condiciones geométricas y de resistencia de sus elementos. Para el diseño del aerogenerador se seleccionó uno del tipo rápidos verticales, propuesto por Fernández (2000).

Para la construcción, las condiciones escogidas fueron propuestas por Franquesa (2005), donde el diámetro exterior 0,40 m y el diámetro interior 0,22m; con una relación entre diámetros 0,5; el espesor del cilindro 0,09 m y el largo de las paletas 1,5 m.

Con estos parámetros se determinó la potencia del viento con los valores críticos de velocidad y para las condiciones de resistencia. Para el estudio se escogió 25 m/s, por ser los registrados históricos. Para garantizar los parámetros de resistencia de las paletas, del rotor y los agujeros, los elementos paletas de madera y suplementarias del rotor, estarán acopladas con tronillos con juegos.

En el cálculo de la resistencia admisible a la tracción, los cuales se originan a partir de las deformaciones que surgen en el núcleo de acuerdo con el límite de fluencia del material, Feodosiev (1986) propone determinarlo como:

$$[\sigma]_t = \frac{\sigma_f}{n} \quad (18)$$

σ_f : resistencia a la fluencia del aluminio, (MPa)

n : Coeficiente de seguridad para el nivel de precisión en el diseño y el uso del rotor.

Durante la generación de energía, en las paletas existe incidencia de la fuerza axial, ocasionada por la potencia del viento, la cual es transmitida hasta el eje. Fernández (2000) propone calcular esta fuerza por la ecuación siguiente:

$$F_{ax} = \frac{P + (Vol_p + \gamma_{max})}{V_c}; [N] \quad (19)$$

Donde:

γ_{\max} : peso específico del material, (kg/m³)

V_c : velocidad crítica, (m/s)

Vol_p : volumen de la paleta, (m³).

La selección del volumen de las paletas se toma por el criterio de los perfiles, a partir del cálculo del perfil de la pala y la velocidad periféricas de las paletas.

Para determinar los espesores de las paletas suplementarias se tuvo en cuenta el componente radial que ejerce el viento sobre las paletas y el área de cizallamiento, así como los valores de la tensión tangencial y el número de agujeros que tendrá la superficie de la paleta, Stiopin (2005) es del criterio que puede calcularse como:

$$\delta_p = \frac{A_{neta}}{z(D_a - \delta)}; [mm] \quad (20)$$

Donde:

z : cantidad de agujeros

D_a : diámetro del agujero, (mm)

δ : profundidad de la paleta, (mm).

El ancho de las paletas, en relación con la incidencia de la fuerza axial, el espesor y las tensiones permisibles que permita relacionarla con los parámetros de forma, se calcula según Stiopin (2005) y Fernández (2000) como:

$$a = \frac{F_{ax}}{\delta_p \cdot [\sigma]_t}; [mm] \quad (21)$$

El largo medio de la paleta suplementaria, considerando la fuerza axial y las tensiones tangenciales, según Feodosiev (1986) y Franquesa (2005), se puede determinar por:

$$B = \frac{F_{ax}}{2\delta_p \cdot \tau}; [mm] \quad (22)$$

Donde:

δ_p : espesor de la paleta, (mm)

τ : tensiones tangenciales creadas en la superficie de la paleta, (MPa).

Y el largo real según Feodosiev (1986) se calcula por la ecuación:

$$b = B + \frac{D_a}{2}; [mm] \quad (23)$$

Al producirse el movimiento de las paletas por la inducción del aire, surgen deformaciones por los esfuerzos tangenciales que generan las flexiones de las paletas, el cual se debe a los esfuerzos permisibles del material. El momento flector que actúa en el eje x se calcula como (Beer, 2000):

$$\mu_f = \frac{I}{c} \cdot [\sigma]; [Nmm] \quad (24)$$

Donde:

$[\sigma]$: tensión admisible, (N/mm²)

c : centricidad en el eje x, (mm)

I : momento de inercia, (mm⁴).

Beer (2000) propone calcular el radio de curvatura por la ecuación siguiente:

$$\rho_c = \frac{\mu_f}{E \cdot I \cdot c} \quad (25)$$

Donde:

μ_f : momento flector, (MPa)

E : módulo de elasticidad, (MPa)

I : momento de inercia, (mm⁴).

Análisis de los resultados

Determinación de los parámetros técnicos del rotor eólico

La potencia eólica, utilizando como variables el coeficiente de potencia Glauvert, la relación de los coeficientes de sustentación y arrastre, cuyo resultado es 10; este valor se hace coincidir con la cantidad de paletas y por ser un aerogenerador rápido el valor es 0,25. La velocidad media promedio que es 5,05 m/s y el diámetro de la rotación completa de las paletas del rotor es 4 m.

En la Tabla 1 se muestran los valores de velocidad promedio para los meses relacionados con el estudio, todos obtenidos para una altura de 12 m sobre la base del terreno (Álvarez, Guerra y Lau, 2004).

Tabla 1. Comportamiento de la velocidad promedio mensual (m/s)

Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Marzo	Abr	May
5	5,2	5	5,4		5,1	5	5,2	5	4,85	4,90	4,95

Según Franquesa (2005), el coeficiente de velocidad específica depende del tipo de aerogenerador que se diseña y del número de paletas, en este caso el rotor tiene tres palas; se escoge el valor de 4 para el coeficiente de la velocidad.

Empleando las ecuaciones 9, 10, 11, 18, 19, 20, 21, 22, 23 y 24, se determinó la condición de resistencia y parámetros de trabajo del rotor. En estos resultados se utilizaron las variables: densidad media del viento con valor $1,223 \text{ kg/m}^3$, la velocidad crítica 25 m/s , potencia del viento con la velocidad crítica, velocidad angular $52,36 \text{ rad/s}$. En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 2. Parámetros de potencia y condiciones de resistencia del aerogenerador

No.	Parámetros	Resultados
1	Potencia del viento (W), con la velocidad crítica	120 102
2	Área de barrido (m^2)	12,56
3	Momento torsor (N.m)	2 294
4	Número de revoluciones (r/min)	477,47
5	Módulo de la sección que está sometida a la torsión (m^3)	0,00516
6	Potencia eólica (W)	305,75
7	Potencia del viento (W), con la velocidad media del viento	960
8	Rendimiento aerodinámico (%)	32

Resultados del diseño de las paletas

Los datos obtenidos del diseño garantiza que las paletas tengan prestaciones mecánicas frente a cargas actuantes, para estos resultados se utilizaron las siguientes variables: peso de la pala 10 N , velocidad media promedio del viento 5 m/s , la velocidad media específica 4, la distancia del eje rotacional al centro de gravedad de la pala $0,9115 \text{ m}$; área de barrido del rotor eólico $12,56 \text{ m}^2$.

Tabla 3. Diseño de las palas

No.	Parámetros	Resultados
1	Fuerza centrífuga (N)	85,08
2	Velocidad media periférica	3
2	Fuerza aerodinámica de la pala (N)	19,47
3	Cada pala	6,49
4	Momento flector de la pala (N.m)	17,75
5	Momento torsor del eje de giro (N.m)	10,19
6	Potencia útil de las palas (W)	76,44

Para el cálculo de los perfiles de estructura y geometría de las palas se tiene en cuenta el espesor del perfil de la pala que va disminuyendo desde su calaje hasta el final del cuerpo, por lo que este perfil transmite mayor fuerza al rotor. Como los perfiles gruesos, por razones estructurales, deben estar más próximos al cubo, producen muy poco par, y por ello pueden suprimirse en esa zona; concretamente, en el 10 % o 15

% de la pala próximo al cubo no es necesario poner perfiles aerodinámicos; en la periferia de las palas, estas nunca deben superar espesores del 18 %.

Para perfilar la pala se procedió en primer lugar a hacer un esquema de esta, dividiéndola en varias secciones, exactamente en diez secciones de 100 mm. Estos resultados se muestran en la Tabla 4; los valores que se encuentran reflejados en la tabla anterior permiten establecer el diseño real de la pala y su ángulo de ataque recogido en la Tabla 5.

Tabla 4. Parámetros de forma y volumen de las palas

	L(m)	S(m)	P(m)	Volumen(m ³)	SR	SP	Θ(°)
ST	0,083	1,5	0,02	0,00249	6	0,18	8
S1	0,1851	0,1	0,03	0,0005553	0,4	6	48
S2	0,1851	0,2	0,03	0,0011106	0,8	3	33
S3	0,1759	0,3	0,03	0,0015831	1,2	1,8	27
S4	0,1728	0,4	0,03	0,0020736	1,6	1,4	24
S5	0,1697	0,5	0,03	0,0025455	2	1,1	17
S6	0,1481	0,6	0,025	0,0022215	2,4	0,8	15
S7	0,1296	0,7	0,025	0,002268	2,8	0,6	14
S8	0,1234	0,8	0,025	0,002468	3,2	0,5	12
S9	0,1194	0,9	0,025	0,0026865	3,6	0,4	10
S10	0,1234	1	0,025	0,003085	4	0,4	10
S11	0,1188	1,1	0,025	0,003267	4,4	0,35	8
S12	0,111	1,2	0,02	0,002664	4,8	0,3	6
S13	0,096	1,3	0,02	0,002496	5,2	0,24	6
S14	0,086	1,4	0,02	0,002408	5,6	0,2	5

Al establecer los parámetros de forma y volumen se determinó la relación de longitud y radio de la pala, conociendo la cantidad de palas que se emplearán en el diseño y los ángulos, se estableció el ajuste del ángulo de ataque de la pala para que incida el viento a la hora del recorrido del área de barrido de la máquina eólica, para se pueda utilizar la potencia efectiva en correspondencia con la incidencia de la velocidad media del viento.

Tabla 5. Parámetros de la relación longitud-radio y el ángulo de ataque

No.	Parámetros	Resultados
1	Relación R/L de la pala	2,20
2	Ajuste del ángulo de ataque (°)	18
3	Angulo de calaje o de inclinación (°)	22

Condiciones geométricas y de resistencia del diseño del aerogenerador

Para el diseño de la paletas se parte del área de barrido frontal que tiene la máquina eólica y de la velocidad crítica del viento, estos valores de diseño se emplearon para determinar los valores de las fuerzas que soportan cada una de las paletas en la fase experimental y los valores finales se exponen en la Tabla 6.

Tabla 6. Condiciones geométricas y de resistencia que se emplearán en el diseño

No.	Parámetros	Resultados
1	Espesor de la paleta (mm)	6,118
2	Ancho de la paleta (mm)	132
3	Largo de la paleta (mm)	106
4	Momento de inercia de la sección de la paleta sometida al momento flector (m^4)	$2,032 \times 10^{-5}$
5	Esfuerzo admisible teniendo en cuenta el coeficiente de seguridad y la resistencia a la rotura o esfuerzo final (Pa)	$7,75 \times 10^7$
6	Momento Flector (Nm)	2 971
7	Radio de curvatura (m)	0,021

Calculo de los parámetros para el diseño de las paletas y los agujeros para la selección de los tornillos, bridas y los acoplamientos

Al obtener las condiciones mínimas de resistencia, se determinó seleccionar el orificio pasante de las paletas adyacentes para adquirir los resultados de estas condiciones con el diámetro que se empleará realmente en el diseño, lo cual se encuentra reflejado en la Tabla 7. A través de los criterios de resistencia establecidos por Feodosiev (1986) y Stiopin (2005) se obtuvieron las dimensiones de las paletas, así como los valores de cargas y esfuerzos máximos que pueden soportar los elementos de aerogenerador (Tabla 6).

Tabla 7. Condiciones mínimas de geometría y de resistencia

No.	Parámetros	Resultados
1	Resistencia a la tracción (MPa)	68,75
2	Tensión tangencial permisible (MPa)	41,25
3	Fuerza axial (N)	4 804
4	Espesor de la paleta (mm)	14
5	Ancho de la paleta (mm)	66
6	Largo de la paleta (mm)	53

Análisis de los resultados de la simulación por el método de elementos finitos

En la Figura 1 se muestra la estructura de la malla empleada de forma rectangular con 18 412 nodos, 12 215 elementos.

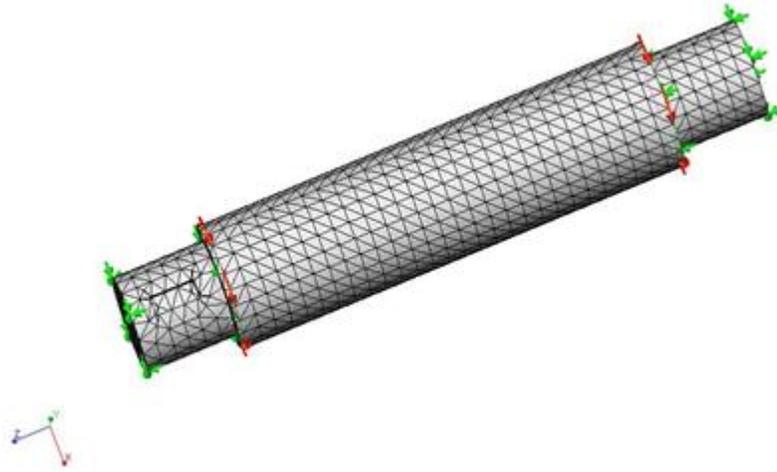


Figura 1. Análisis estructural de la malla.

A través del análisis de los esfuerzos por el método de elementos finitos y aplicando los criterios de Von Mises se muestran las tensiones que se distribuyen a lo largo del árbol sometido a la torsión. Las tensiones máximas que soporta el árbol central alcanzan valores de 1,577 MPa (Figura 2); estos valores no sobrepasan el valor de esfuerzo admisible 100 MPa, por consiguiente, en el elemento no aparecerán grandes deformaciones como se observa en la Figura 3, estas solo alcanzan valores de 0,0012 mm como máximo. El desplazamiento de las tensiones, de acuerdo al sometimiento al momento torsor del árbol 2 294 N.m, alcanzó valores máximos de $6,62 \times 10^{-6}$ MPa y mínimos de $1,13 \times 10^{-10}$ MPa en los elementos 7 063 y 3128, respectivamente (Figura 4).

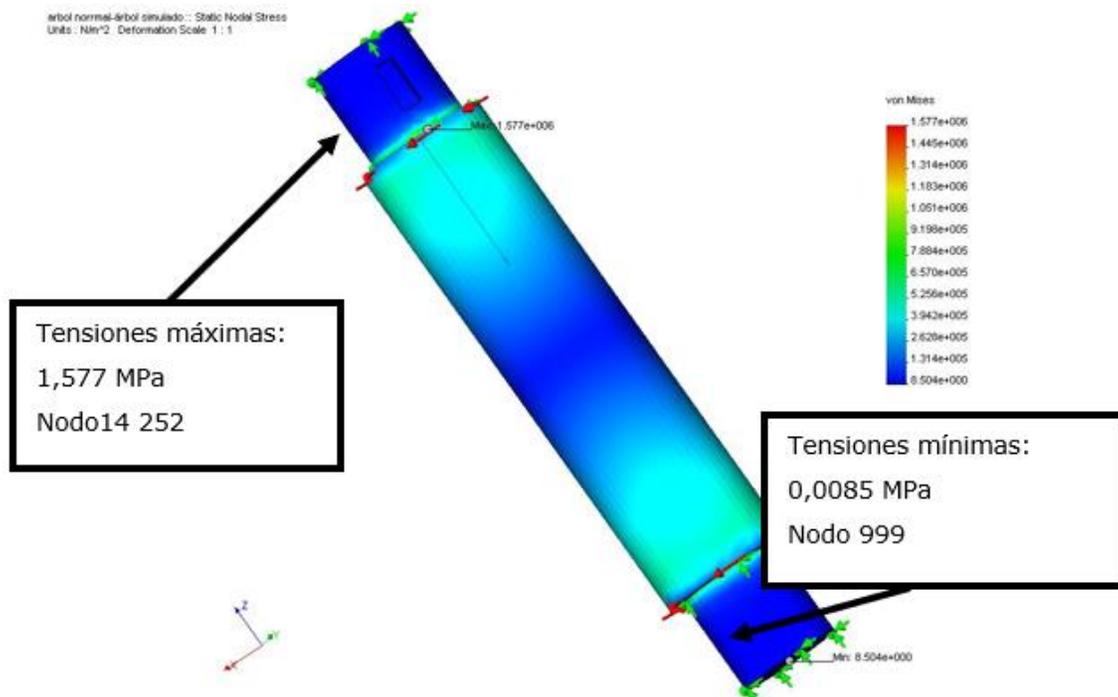


Figura 2. Análisis de las cargas y esfuerzos a que está sometido el árbol.

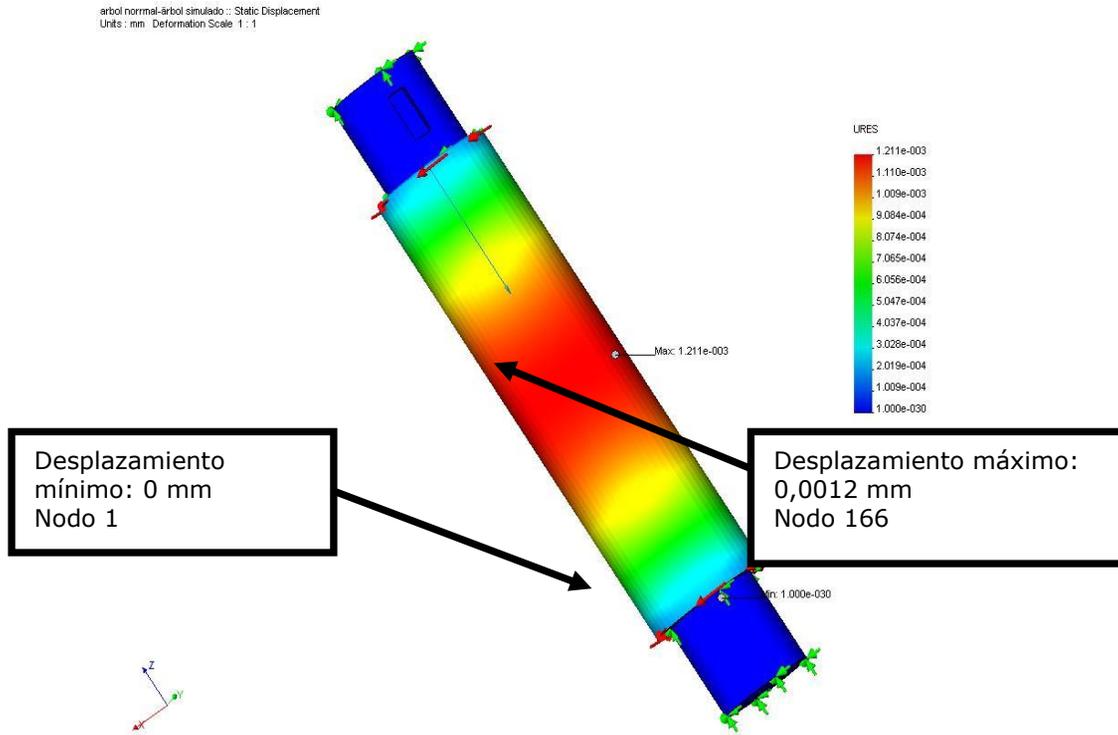


Figura 3. Deformaciones en el árbol.

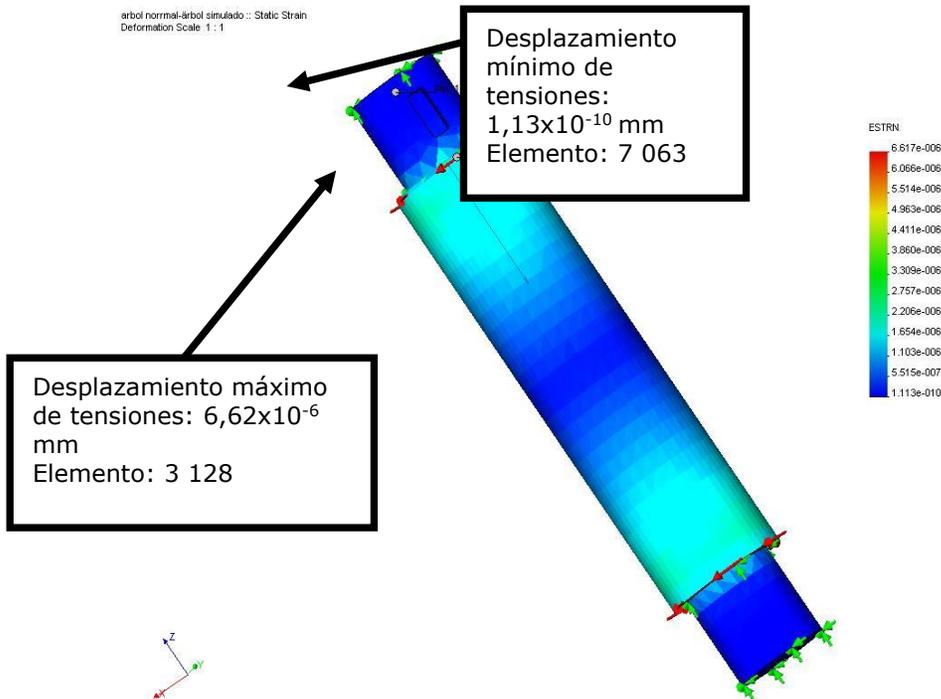


Figura 4. Valores de los desplazamientos sometidos al esfuerzo torsor.

Conclusiones

La propuesta de diseño de la máquina eólica tendrá cuatro elementos fundamentales: el rotor, las palas suplementarias, las palas de madera y el árbol central.

El cálculo de los diferentes parámetros de diseño para el establecimiento de las condiciones de resistencia arroja que: la resistencia a la tracción es 68,75 MPa inferior a la resistencia permisible de 120 MPa; el esfuerzo admisible, teniendo en cuenta el coeficiente de seguridad y la resistencia a la rotura o esfuerzo final $7,75 \times 10^7$ Pa, inferior al valor de 100 MPa permitido.

El diseño del aerogenerador eólico vertical es capaz de producir una potencia eólica de 305,75 W, de girar hasta 477,47 rev/min y de soportar un par torsional de 2 294 N.m; este aerogenerador es apto para alcanzar un rendimiento aerodinámico del 32 %.

El análisis de los esfuerzos por el método de elementos finitos, y aplicando los criterios de Von Mises, muestra que las tensiones que se distribuyen a lo largo del árbol sometido a la torsión, las tensiones máximas que soporta el árbol central, alcanzan valores de 1,577 MPa, con desplazamientos máximos en el orden $6,62 \times 10^{-6}$ MPa.

Referencias bibliográficas

- ÁLVAREZ, M.; GUERRA, A. Y LAU, R. 2004. *Matemática Numérica*. 2da ed. Pueblo y Educación, La Habana.
- BEER, F. 2000. *Mecánica de materiales*. Parte 1. Félix Valera, La Habana.
- FEODOSIEV, V. I. 1986. *Resistencia de materiales*. Vol. I y II. Pueblo y Educación, La Habana.
- FERNÁNDEZ, P. 2000. *Energía Eólica*. Universidad de Cantabria, España.
- FRANQUESA, M. 2005. Manual Eolo. Consulta: 14/11/2019. Disponible en: http://www.amics21.com/laveritat/generador_savonius.pdf
- LECUONA, A. 2002. *La energía eólica: principios básicos y tecnología*. Universidad Carlos III de Madrid, Leganés.
- MONTEERRUBIO, J. A. & DE MARCO, N. 2006. *Especificación técnica para la réplica en la UPC de un aerogenerador de baja potencia destinado a la cooperación para el desarrollo humano*. Trabajo final de carrera. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.

MORENO, C.; MARTÍNEZ, J.; LEIVA, G.; ROQUE, A.; NOVO, R.; COSTA, A.; ... & LIMIA, M. 2007. *Diez preguntas y respuestas sobre energía eólica*. CUBASOLAR, La Habana. 335 p. ISSN: 978-959-7113-34-8.

RODRÍGUEZ, I. 2002. *Diseño de un Aeromotor a escala de laboratorio para la región de Moa*. Tesis de maestría. Universidad de Holguín. Cuba.

STIOPIN, P. A. 2005. *Resistencia de Materiales*. Félix Valera, La Habana.