

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA AEROELÁSTICA DE UNA TURBINA EÓLICA POR EL MÉTODO DE ELEMENTO DE PALA

A. Brocchi, M. Herrera, A. Scarabino

Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería, La Plata, Argentina. .

Autor principal: ana.brocchi@alu.ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se analiza la interacción entre las cargas aerodinámicas y las características estructurales de una pala de turbina eólica. A partir de tener un modelo aerodinámico de la misma, se analizará el efecto que se produce al modificar sus características estructurales, con el fin de evaluar si es posible aprovechar la deformación que producen las cargas en la pala, para optimizar su comportamiento y aumentar la potencia generada o disminuir los esfuerzos estructurales, aumentando su vida útil. Este estudio se llevará a cabo mediante simulaciones realizadas en el software Qblade, integrando sus módulos aerodinámicos (basado en el modelo de cantidad de movimiento – elementos de pala, “Blade Element – Momentum”) y estructural (basado en elementos finitos estructurales). Además, se analiza la respuesta de la turbina frente a vientos con turbulencia correspondiente a distintos tipos de terreno.

Palabras clave: GENERADOR EÓLICO, INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA, BEM (BLADE ELEMENT MOMENTUM)

INTRODUCCIÓN

Las fuentes de energía renovable, tales como la solar, la eólica y aquellas derivadas de los recursos energéticos de la biomasa, forman una destacada y viable alternativa en comparación con los combustibles fósiles. En el ámbito de los dispositivos orientados a la captura de la energía cinética del viento, merecen particular atención los aerogeneradores de eje horizontal, los cuales constituyen el objeto de estudio en el presente trabajo. La Academia Europea de Energía Eólica identifica entre los varios desafíos actuales que enfrenta la industria de energía eólica, a dos altamente pertinentes a este trabajo: la caracterización del flujo turbulento en el que trabajan las turbinas eólicas, y la determinación y mitigación de los efectos de la turbulencia sobre la estructura y generación de energía de las turbinas [1].

Se observa en la industria una tendencia hacia la reducción de las masas de los componentes estructurales, en especial las palas, lo cual conlleva una disminución en la rigidez estructural, favoreciendo el fenómeno de la aeroelasticidad. Por otro lado, las turbinas de baja potencia destinadas al uso doméstico se instalan a altitudes inferiores, donde la topografía del terreno provoca niveles de turbulencia más notorios. Estas turbinas también son susceptibles a vibraciones que inducen fatiga, fallas y daños en los equipos.

La aeroelasticidad constituye un fenómeno caracterizado por la interacción de fuerzas aerodinámicas, fuerzas elásticas e inerciales. A lo largo de numerosos años, ha sido objeto de estudio en diversos ámbitos de la ingeniería, no solo en la aeronáutica, sino también en la mecánica y la ingeniería civil [2], destacándose su especial relevancia en el contexto de las turbinas eólicas [3].

En el marco de esta investigación, se procede a analizar mediante el empleo del software QBlade [4] la influencia ejercida por diferentes campos de vientos turbulentos en un aerogenerador tripala de baja potencia (1587 Watt nominales). Adicionalmente, se examinan los efectos de estos campos turbulentos en tres variantes de materiales de construcción: fibra de vidrio, polímero reforzado con fibra de carbono y un material de mayor flexibilidad que los mencionados anteriormente. Además, se realiza una evaluación temporal de cómo dichos parámetros inciden en el coeficiente de potencia (C_p), la máxima deflexión y los momentos en la base de las palas, tanto en el plano como fuera del mismo.

METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el análisis, se parte de una pala que ha sido previamente diseñada mediante la aplicación del Método del Elemento de Pala (BEM), en el contexto de una condición de operación específica. Los parámetros del diseño se detallan en la Tabla 1. En este proceso, se consideran diversos factores de corrección destinados a abordar los efectos tridimensionales y las implicancias de la cantidad de palas, entre otros aspectos relevantes.

Una vez obtenidos los parámetros geométricos pertinentes, estos se introducen en el software QBlade con el propósito de ejecutar las simulaciones correspondientes. En las Figuras 1 y 2 se presentan la configuración geométrica y estructural de las palas.

Tabla 1. Condiciones de operación para el diseño de la pala

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad de la corriente	9	[m/seg]
Radio r	1.7	[m]
Tip Speed Ratio λ	7	
N° palas	3	
r.p.m	353.9	[1/min]
Velocidad de punta de pala	63	[m/s]
Ángulo de ataque óptimo	9	[°]
Viscosidad cinemática	0.00001505	[m ² /seg]
Densidad del aire	1.225	[Kg / m ³]

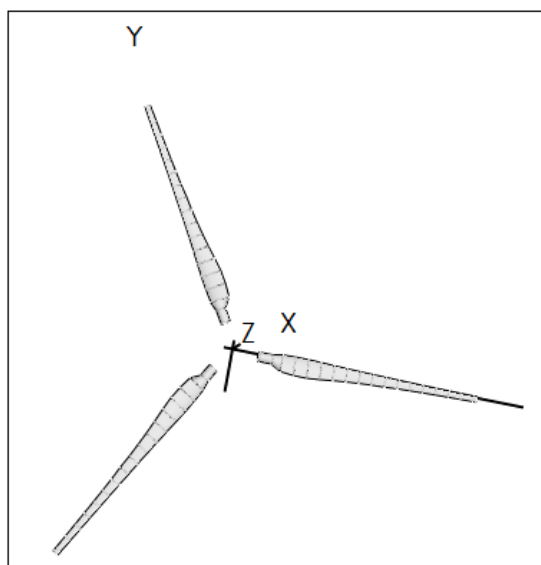


Figura 1. Geometría de la turbina eólica

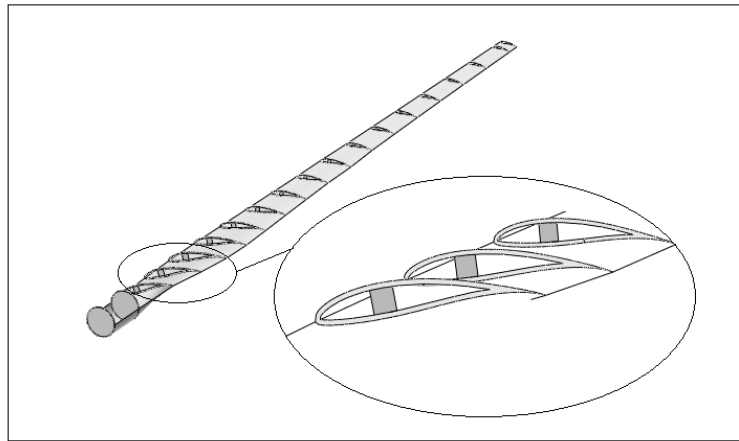


Figura 2. Geometría de la pala

Como se observa en la Figura 2, la estructura de la pala consiste en un larguero rectangular de sección variable hacia la punta, y una piel con espesor en función del porcentaje de cuerda, su valor es 0.02%. Debido a las limitaciones del programa, los materiales se consideraron con propiedades isotrópicas. En lo que respecta a la discretización de la pala, la misma se encuentra discretizada en 34 elementos estructurales tipo viga.

El desarrollo teórico del software QFEM, correspondiente al módulo utilizado para el diseño y análisis estructural en QBlade, se encuentra detallado en la tesis titulada "Development of the QFEM Solver" [6].

En la Tabla 2, se muestran algunos valores de diseño teóricos estimados en el desarrollo y diseño de la pala por el método BEM para condiciones nominales de operación.

Tabla 2. Parámetros de performance del aerogenerador

	Valor	Unidad
Fuerza de rotación	51.96	[N]
Fuerza de empuje	354.07	[N]
Potencia	1587.58	[W]
Cupla	46.9	[N.m]
Cp	0.39	

Una vez establecida la configuración geométrica de la pala y habiendo realizado una evaluación estimativa del rendimiento del aerogenerador en su disposición de tres palas, se procedió a llevar a cabo el proceso de modelado de las condiciones del viento incidente sobre el objeto de estudio.

La interacción entre la superficie terrestre y el aire en movimiento conlleva la manifestación de una fuerza de fricción que impone una desaceleración al flujo de aire, dando lugar a la formación de la capa límite atmosférica y contribuyendo al surgimiento de fenómenos turbulentos. Esta variación en la velocidad del aire está intrínsecamente vinculada a la rugosidad del terreno circundante. De ahí la importancia de seleccionar de manera criteriosa la ubicación donde se tiene la intención de instalar la turbina eólica.

Existen diversos enfoques matemáticos para caracterizar el campo del viento en términos de sus propiedades. En el presente informe, se optó por emplear la teoría presentada en el libro "Wind Loading of Structures" [2] para llevar a cabo esta definición y delinear las características del campo del viento.

En la Tabla 3, se presentan las características de los campos de viento modelados en QBlade, donde el mismo es generado utilizando el método Sandia [5].

Tabla 3. Características de los campos de viento

Campo de viento	Parámetro	Valor	Dimensión
Zona rural	Altura de medición	20	[m]
	Altura de rugosidad z_0	0.03	[m]
	Intensidad de turbulencia	15.38	%
Zona semiurbana	Altura de medición	20	[m]
	Altura de rugosidad z_0	0.4	[m]
	Intensidad de turbulencia	25.56	%
Zona urbana	Altura de medición	20	[m]
	Altura de rugosidad z_0	1	[m]
	Intensidad de turbulencia	33.38	%

Se procedió a analizar los efectos de cada campo de viento sobre la estructura del aerogenerador, tomando en consideración tres materiales distintos en su composición: Material Flexible, Fibra de Vidrio y CFRP (Polímero Reforzado con Fibra de Carbono). Las propiedades de los materiales sometidos a análisis se detallan en la Tabla 4. Se puede apreciar que el "Material Flexible" se caracteriza por un módulo de elasticidad (E) concebido con el propósito de reducir la rigidez de las palas, buscando generar amplias deformaciones elásticas en condiciones de funcionamiento nominal. En contraste, el CFRP exhibe cualidades de prestaciones altas, lo que nos permite modelar una pala de considerable rigidez, lo cual en principio induciría una disminución de las deformaciones elásticas. Finalmente, la Fibra de Vidrio se distingue por sus atributos intermedios.

Tabla 4. Propiedades de los materiales

Material	Propiedad	Valor	Unidad
Material Flexible	Densidad	1800	[kg/m ³]
	Módulo de elasticidad	70	[MPa]
Fibra de Vidrio	Densidad	2740	[kg/m ³]
	Módulo de elasticidad	70	[GPa]
CFRP	Densidad	1800	[kg/m ³]
	Módulo de elasticidad	210	[GPa]

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados correspondientes a los tres materiales sometidos a una operación con campo de viento propio de un área rural son presentados en la Figura 3. Los parámetros analizados abarcan el coeficiente de potencia (CP), que representa la potencia captada por el generador en relación con la máxima energía disponible del viento, la máxima deflexión en la punta de la pala, y los momentos en la raíz de la pala, tanto en el plano de rotación (momento "edgewise") como fuera de dicho plano (momento "flapwise"). Se puede notar cómo, después de un breve período transitorio de alrededor de 5 segundos, las gráficas se estabilizan.

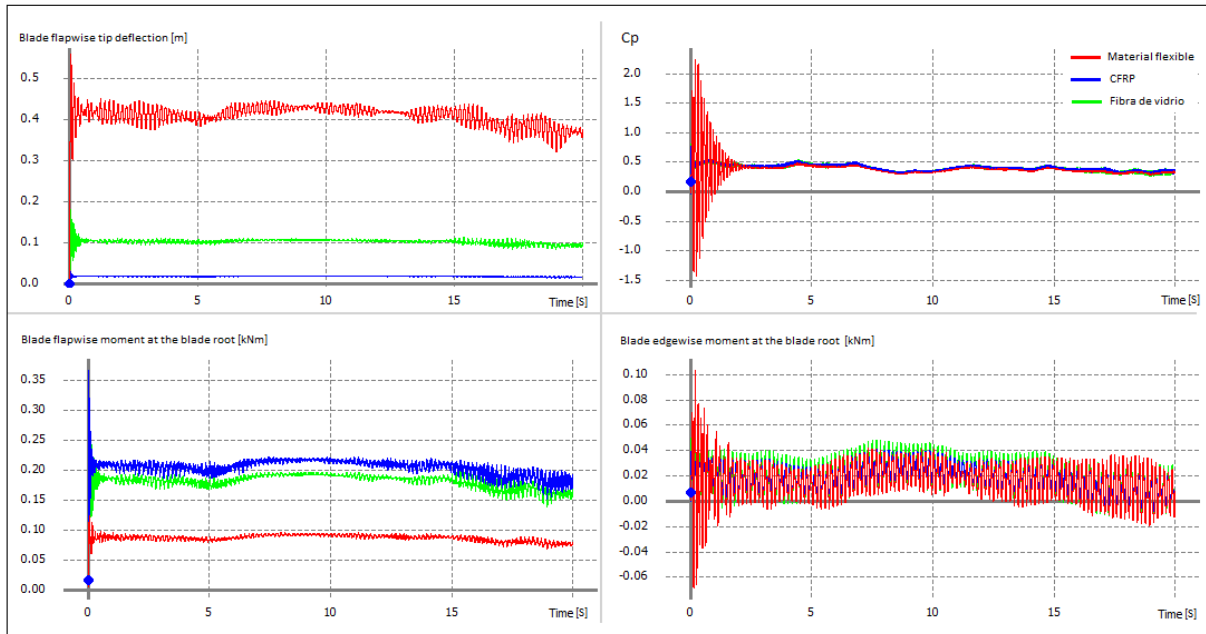


Figura 3. Resultados con campo de viento de zona rural.

Tanto en la Figura 4 y Figura 5, se evidencia un comportamiento análogo al observado en el escenario de viento de zona rural, el cual se ilustra en la Figura 3. Sin embargo, se destaca una diferencia significativa: en los contextos de viento en zonas urbanas y semiurbanas, se aprecia un marcado incremento en las amplitudes de las fluctuaciones. Esta variación se atribuye al notable aumento en la intensidad de turbulencia característica de dichos entornos.

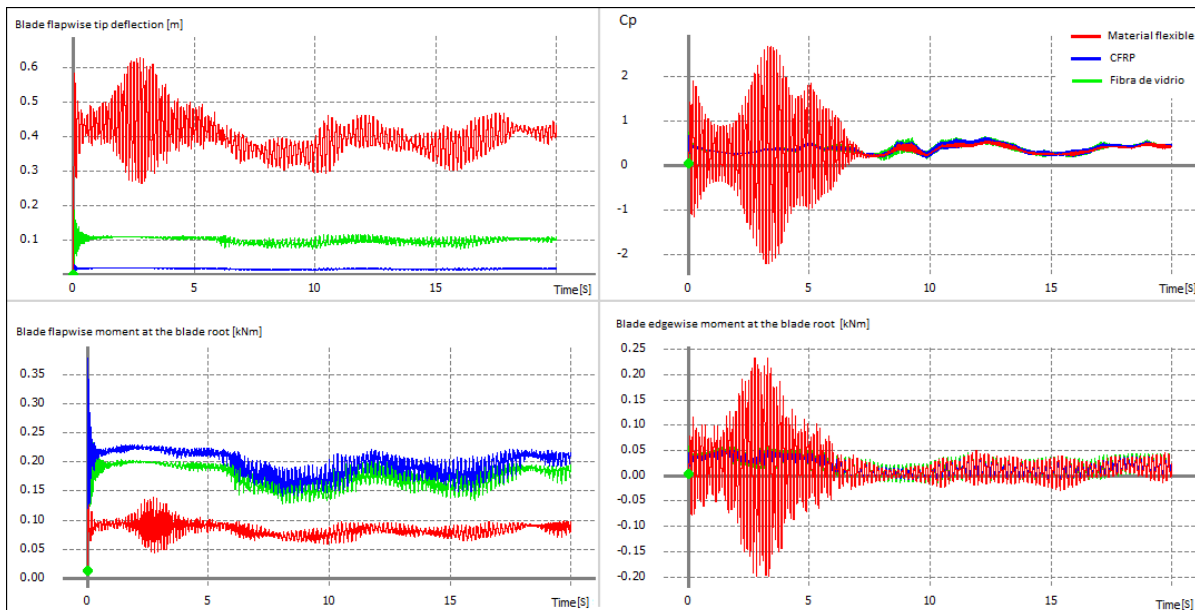


Figura 4. Resultados con campo de viento de zona semiurbana.

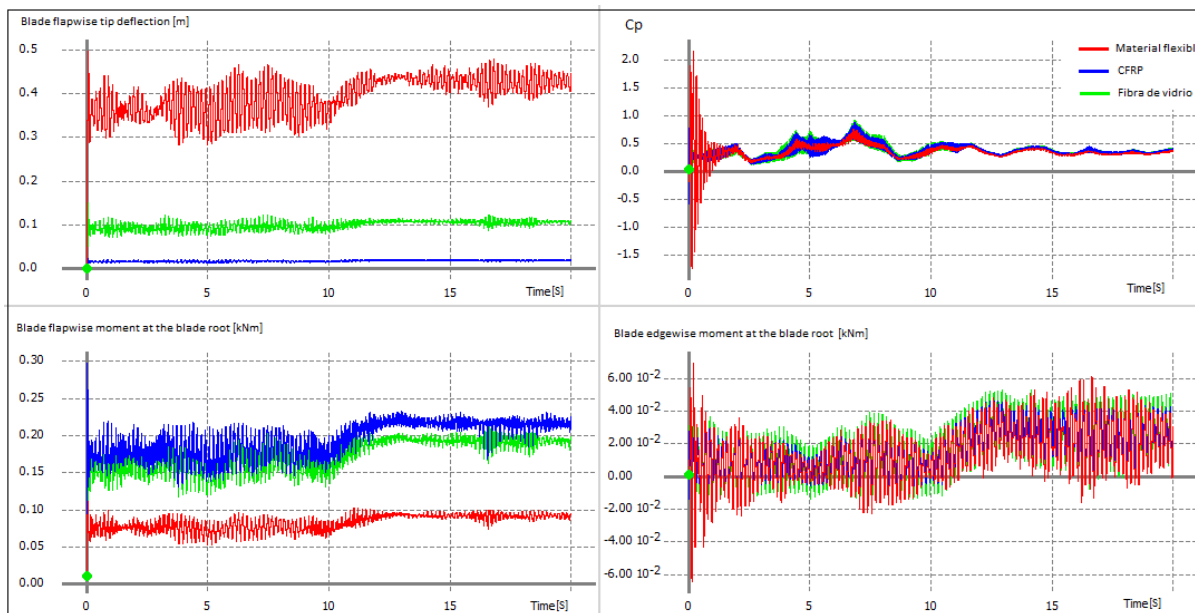


Figura 5. Resultados con campo de viento de zona urbana

Como es previsible, se puede observar que con materiales más flexibles (con un menor módulo de elasticidad E), los desplazamientos en la punta de la pala aumentan. No obstante, el coeficiente de potencia se mantiene prácticamente constante. Esta situación se explica por el hecho de que, aunque los desplazamientos son notables, el brazo de palanca de la suma de las fuerzas aerodinámicas en la pala se mantiene casi constante. Esto a su vez resulta en un momento impulsor en el eje que permanece aproximadamente invariable, ya que la potencia se calcula a partir de la multiplicación de este momento por la velocidad de rotación de las palas.

Cabe resaltar, sin embargo, que los momentos en la raíz fuera del plano de rotación, disminuyen significativamente al emplear un material más flexible. En consecuencia, en teoría sería posible reducir los espesores de los materiales utilizados en la confección de las palas.

En la Tabla 5 se presentan los datos de desvío estándar y promedios de las distintas variables calculadas.

Tabla 5. Resumen de los valores correspondientes al desvío estándar y el promedio de las variables calculadas.

		CFRP		FIBRA DE VIDRIO		MATERIAL FLEXIBLE	
		desvío estándar	promedio	desvío estándar	promedio	desvío estándar	promedio
Cp [-]	zona rural	0.0673	0.3571	0.0674	0.3559	0.0602	0.3373
	zona semi-urbana	0.0852	0.3853	0.086	0.384	0.1619	0.362
	zona urbana	0.1241	0.3539	0.1248	0.3526	0.1092	0.3322
Momento fuera del plano en la raíz de la pala [Nm]	zona rural	16.40	195.06	15.01	173.26	6.91	83.20
	zona semi-urbana	17.70	194.56	16.42	172.76	7.98	82.80
	zona urbana	23.44	193.91	21.57	172.22	10.40	82.69
Momento en el plano en la raíz de la pala [Nm]	zona rural	11.24	15.54	14.71	15.45	15.00	12.17
	zona semi-urbana	11.47	15.71	14.79	15.61	16.55	12.23
	zona urbana	12.95	16.81	15.81	16.70	15.24	13.13
Deflexión de punta de pala [m]	zona rural	0.0013	0.0179	0.0068	0.0996	0.0304	0.3934
	zona semi-urbana	0.0014	0.0179	0.008	0.0997	0.0345	0.3938
	zona urbana	0.0019	0.0178	0.0103	0.0992	0.0456	0.3926

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En términos generales, al emplear materiales más flexibles para un determinado campo de viento, se logra una reducción en los esfuerzos de momento en la base de las palas, incluso manteniendo constante el coeficiente de potencia.
- En un sentido general, se evidencia que aumentar los niveles de turbulencia se traduce en un incremento de la amplitud de las fluctuaciones tanto en el coeficiente de potencia como en los momentos en la base de la pala.
- Respecto a los diferentes tipos de rugosidad superficial, no se identifican variaciones en el valor promedio del coeficiente de potencia, que se mantiene alrededor de un valor aproximado de 0,36.

REFERENCIAS

1. Van Kuik, G. and Peinke, J. (ed.). Long Term Research Challenges in Wind Energy – A Research Agenda by the European Academy of Wind Engineering. Springer. 2016
2. John D. Holmes. Wind Loading of Structures. Spon Press. 2001
3. Ageze, M., Hu, Y. and Wu, H., Wind Turbine Aeroelastic Modeling: Basics and Cutting-Edge Trends. Int. J. of Aerospace Eng. 2017, <https://doi.org/10.1155/2017/5263897>
4. D. Marten. 2023. QBlade Documentation. <https://docs.qblade.org/>
5. Veers, P. S.: Three-Dimensional Wind Simulation. Sandia Report. Albuquerque, New Mexico, Sandia National Laboratories, 1988
6. Lennie M. D. Development of the QFEM Solver: The development of modal analysis code for wind turbine blades in QBlade. Master's thesis. KTH. Heat and Power Technology. 2013