

## ESTUDIO AEROELÁSTICO DE UNA TURBINA EÓLICA POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS DE PALA

A. Brocchi, M. Herrera, A. Scarabino.

Grupo de Fluidodinámica Computacional, GFC, Dpto. Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48.

### Introducción

Las energías renovables, como la solar, la eólica y las provenientes de los recursos energéticos de las biomásas son una excelente alternativa frente a los combustibles fósiles. Dentro de los dispositivos que aprovechan la energía cinética del viento, podemos encontrar los aerogeneradores de eje horizontal, que son los que se estudian en este trabajo. La Academia Europea de Energía Eólica identifica entre los varios desafíos actuales que enfrenta la industria de energía eólica, 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].

Hay una tendencia a reducir los pesos de los componentes estructurales, en particular de las palas, lo que conduce a una pérdida de rigidez estructural favoreciendo el fenómeno de aeroelasticidad. Por otra parte, las turbinas de baja potencia para uso domiciliario se sitúan a alturas menores, donde la influencia del terreno produce niveles de turbulencia mayores, asimismo son afectadas por vibraciones que inducen fatiga, averías y roturas de equipos. La aeroelasticidad es un fenómeno altamente complejo en el que se da un acoplamiento entre fuerzas aerodinámicas, elásticas e inerciales y ha sido objeto de estudios durante muchos años, siendo actualmente una temática de investigación en diferentes ámbitos de la ingeniería, no solo en aeronáutica, sino también en mecánica y civil [2], y muy especialmente en turbinas eólicas [3].

En este trabajo se analiza mediante el software QBlade [4] la influencia de diferentes campos de vientos turbulentos sobre un aerogenerador tripala de baja potencia (1587 Watt), y sus efectos sobre tres tipos de materiales de construcción utilizados: Fibra de Vidrio y Polímero Reforzado con Fibra de Carbono y un material más flexible que los anteriores. Además, se evaluó en función del tiempo la influencia de dichos parámetros sobre el coeficiente de potencia ( $C_p$ ), la máxima deflexión, los momentos en la raíz de la pala en el plano y fuera del plano.

### Metodología

Para el estudio se parte de una pala diseñada previamente con el Método del Elemento de Pala (BEM), para una dada condición de operación, y teniendo en cuenta factores de corrección por efectos tridimensionales y por corrección de cantidad de palas, entre otros. A

partir de los datos geométricos, los mismos son cargados en el software QBlade para la realización de las simulaciones. A continuación, en la Figura 1 se observa la geometría de las palas.

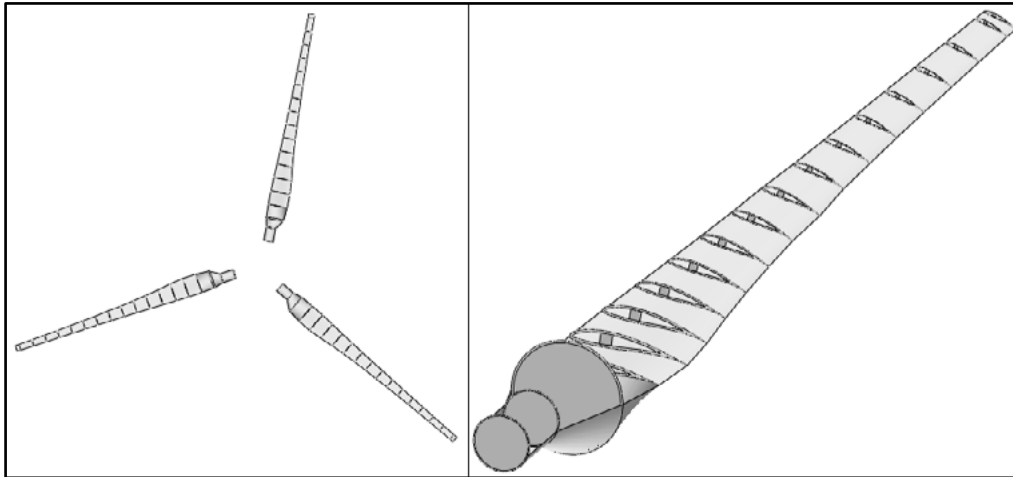


Figura 1. Geometría del Aerogenerador.

En la Tabla 1, se detallan las condiciones de operación para el cual fue diseñada la pala.

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad de la corriente	9	[m/seg]
Radio r	1.7	[m]
Tip Speed Ratio $\lambda$	7	
N° palas	3	
r.p.m	353.9	[1/min]
Velocidad de punta de pala	63	[m/s]
Ángulo de la pala	9	[°]
Viscosidad cinemática	0.00001505	[m <sup>2</sup> /seg]
Densidad	1.225	[Kg / m <sup>3</sup> ]

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

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

	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	

Tabla 2. Parámetros de performance del aerogenerador.

Una vez definida la geometría de la pala y estimado la performance del aerogenerador con una disposición de tres palas, se procedió al modelado de las condiciones del viento incidente a estudiar.

La superficie de la tierra ejerce sobre el aire en movimiento, una fuerza de fricción que retarda el flujo, generando la capa límite atmosférica y contribuye a la generación de turbulencias. Esta variación de la velocidad depende fuertemente de la rugosidad del terreno circundante, y por lo tanto resulta fundamental la elección del sitio donde se desea instalar la turbina.

Existen diferentes modelos matemáticos para definir el campo de viento y sus características; en este informe se utilizó la teoría presentada en el libro *Wind Loading of Structures* [2].

En la Tabla 3, se presentan las características de los campos de viento modelados en QBlade:

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	%

Tabla 3. Características principales de los campos de viento.

El efecto de cada campo de viento fue estudiado sobre la estructura del aerogenerador, teniendo en cuenta su construcción basada en 3 diferentes materiales: Material Flexible, Fibra de Vidrio y CFRP (Polímero Reforzado con Fibra de Carbono).

En la Tabla 4, se presentan las propiedades de los materiales analizados.

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

Tabla 4. Propiedades de los materiales.

Como se puede observar, el "Material Flexible" es un material cuyo módulo de elasticidad (E) fue propuesto con el objetivo de disminuir la rigidez de las palas y conseguir grandes deformaciones elásticas en condiciones de operación nominal. El CFRP es un material de

altas prestaciones, que nos permite modelar una pala con gran rigidez, lo que en principio disminuiría las deformaciones elásticas, por último, la Fibra de Vidrio es un material de propiedades intermedias. Se realizó esta elección de materiales para poder comparar la respuesta del generador con palas de distintas rigideces.

## Resultados

La Figura 2 y la Figura 3 muestran los resultados obtenidos para los tres materiales analizados, sometidos a una operación con campo de viento correspondiente a una zona rural.

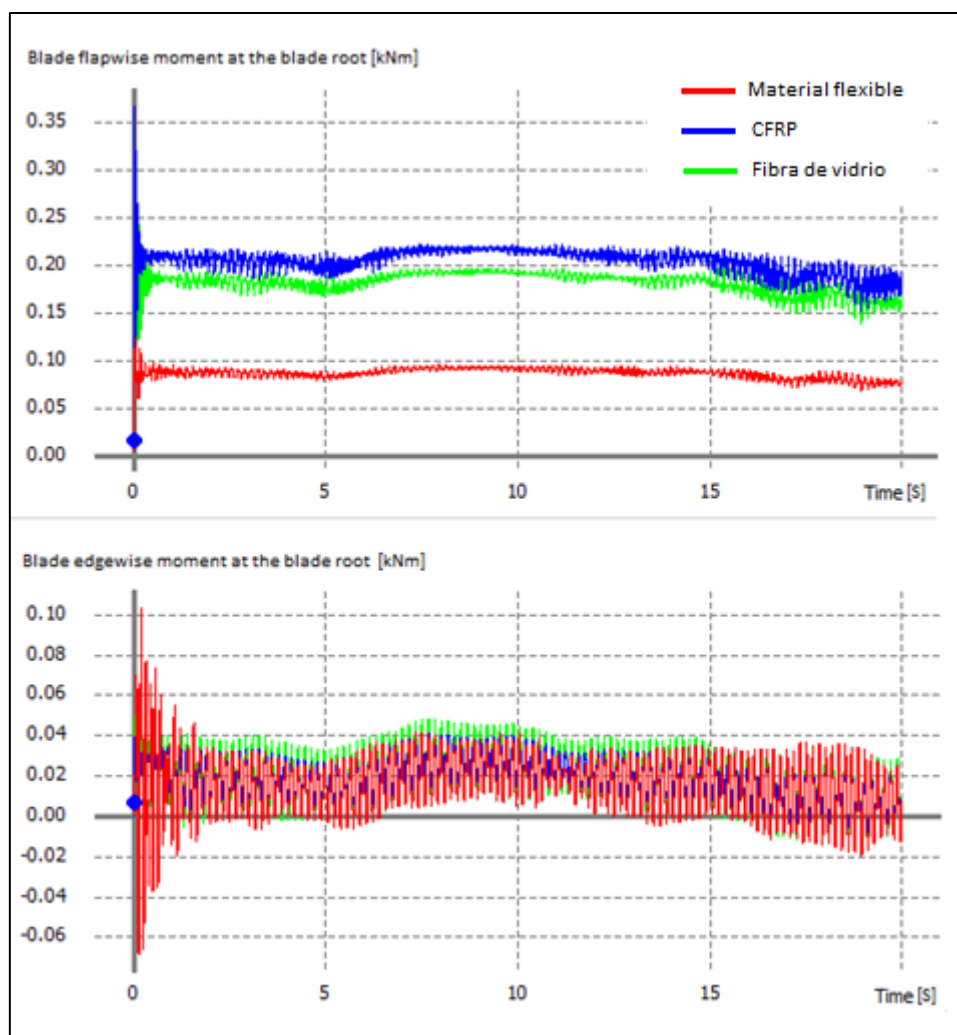


Figura 2. Resultados con campo de viento de zona rural. Arriba, momento fuera del plano en la raíz de la pala vs. tiempo. Abajo, momento en el plano en la raíz de la pala vs. tiempo.

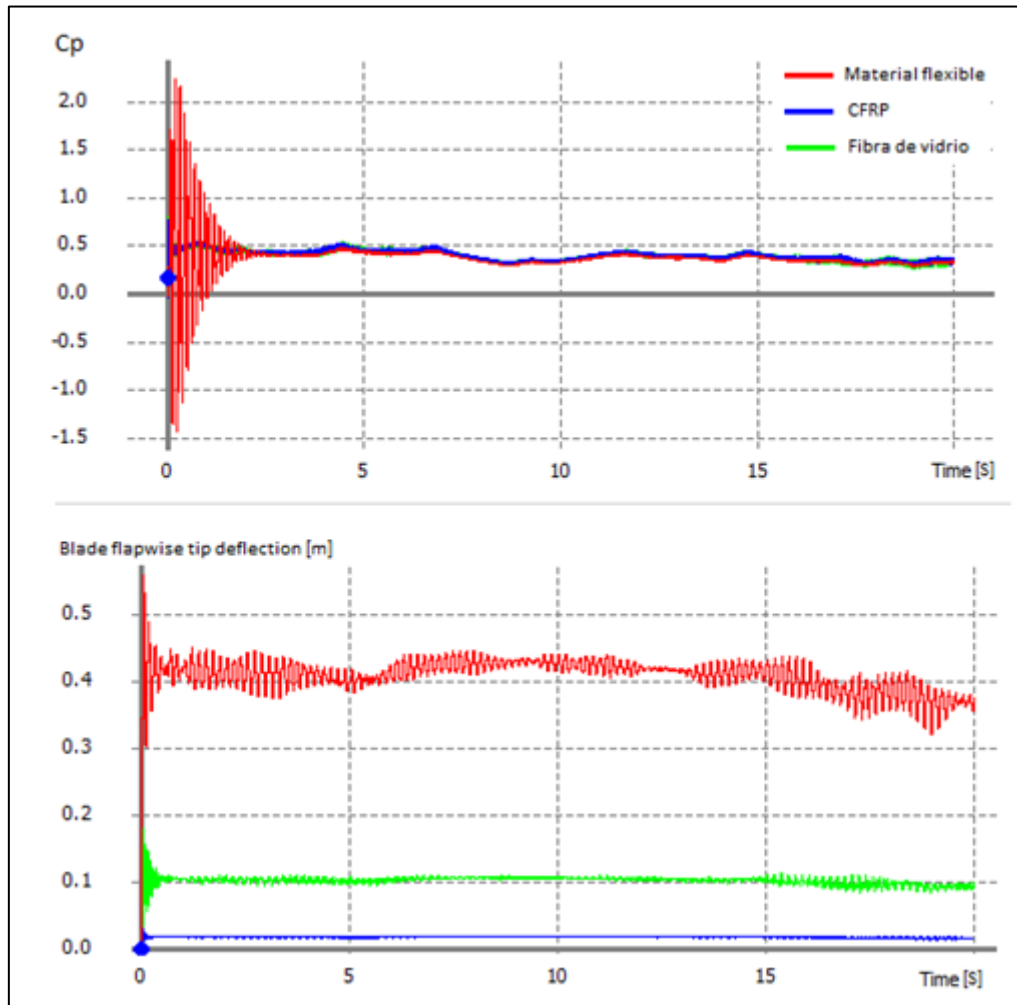


Figura 3. Resultados con campo de viento de zona rural. Arriba, coeficiente de potencia vs. tiempo. Abajo, deflexión de la punta de pala vs. tiempo.

Los parámetros analizados son el coeficiente de potencia ( $C_p$ ), que representa la potencia captada por el generador respecto a la máxima potencia extraíble del viento, la máxima deflexión de punta de pala, los momentos en la raíz de la pala tanto en el plano de rotación (momento edgewise) y fuera del plano de rotación (momento flapwise).

Como es de esperarse, se puede observar que a medida que el material se vuelve más flexible (menor módulo de elasticidad  $E$ ), los desplazamientos de punta de pala son mayores. Sin embargo, el coeficiente potencia prácticamente se mantiene constante. Esto se puede explicar entendiendo que, si bien los desplazamientos son grandes, el brazo de palanca de la resultante de las fuerzas aerodinámicas sobre la pala se mantiene aproximadamente constante, por lo que el torque generado se mantiene aproximadamente constante, recordando que la potencia es el producto del torque por la velocidad de rotación de las palas. Sin embargo, hay que destacar que los momentos en la raíz fuera del plano de rotación, disminuyen drásticamente al utilizar un material más flexible, por lo que en principio se podrían disminuir espesores de los materiales utilizados para la fabricación de la pala.

La Figura 4 y la Figura 5 muestra los resultados obtenidos sobre los tres materiales analizados, sometidos a un campo de vientos correspondiente a una zona semiurbana.

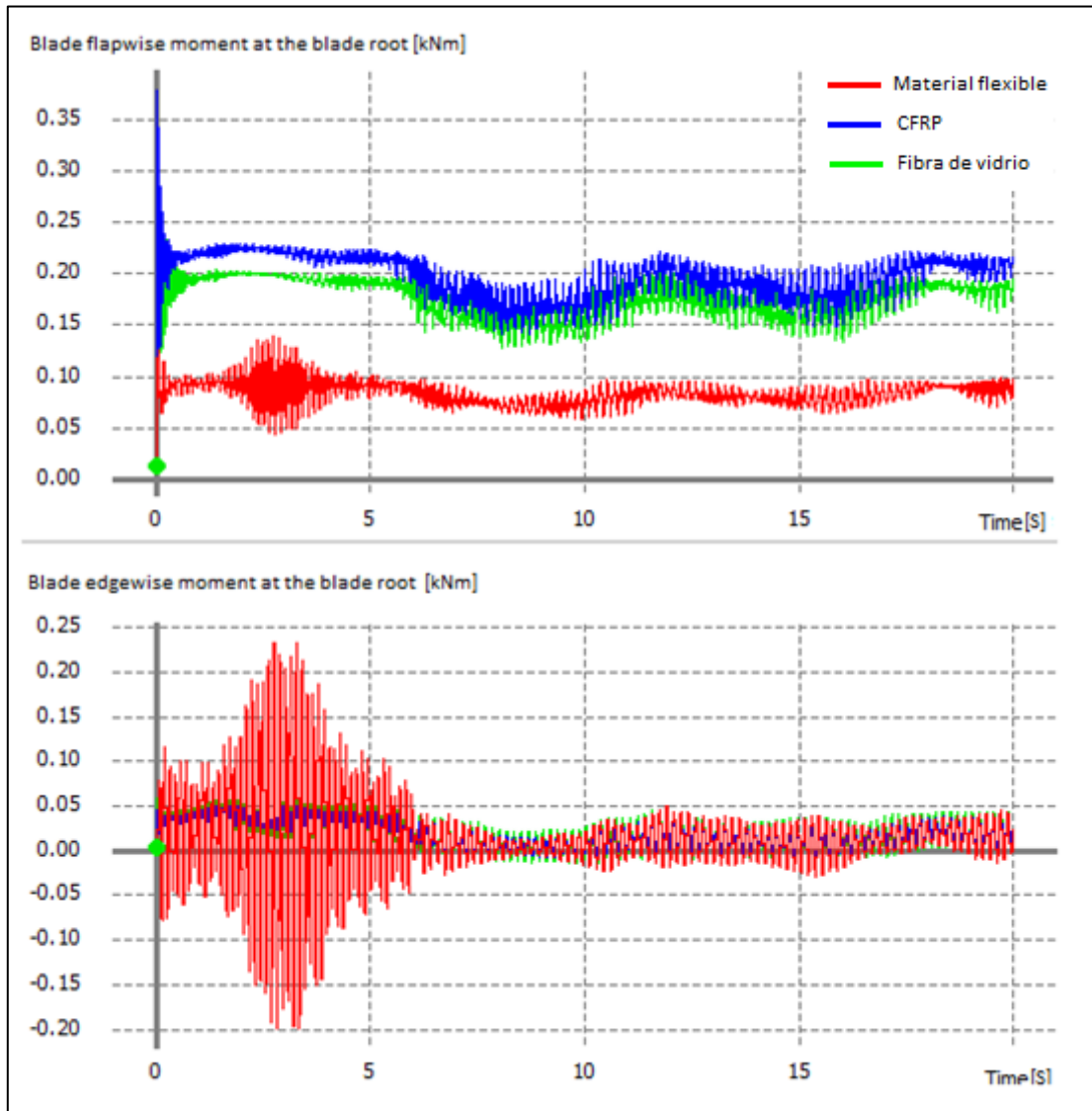


Figura 4. Resultados con campo de viento de zona semiurbana. Arriba, momento fuera del plano en la raíz de la pala vs. tiempo. Abajo, momento en el plano en la raíz de la pala vs. tiempo.

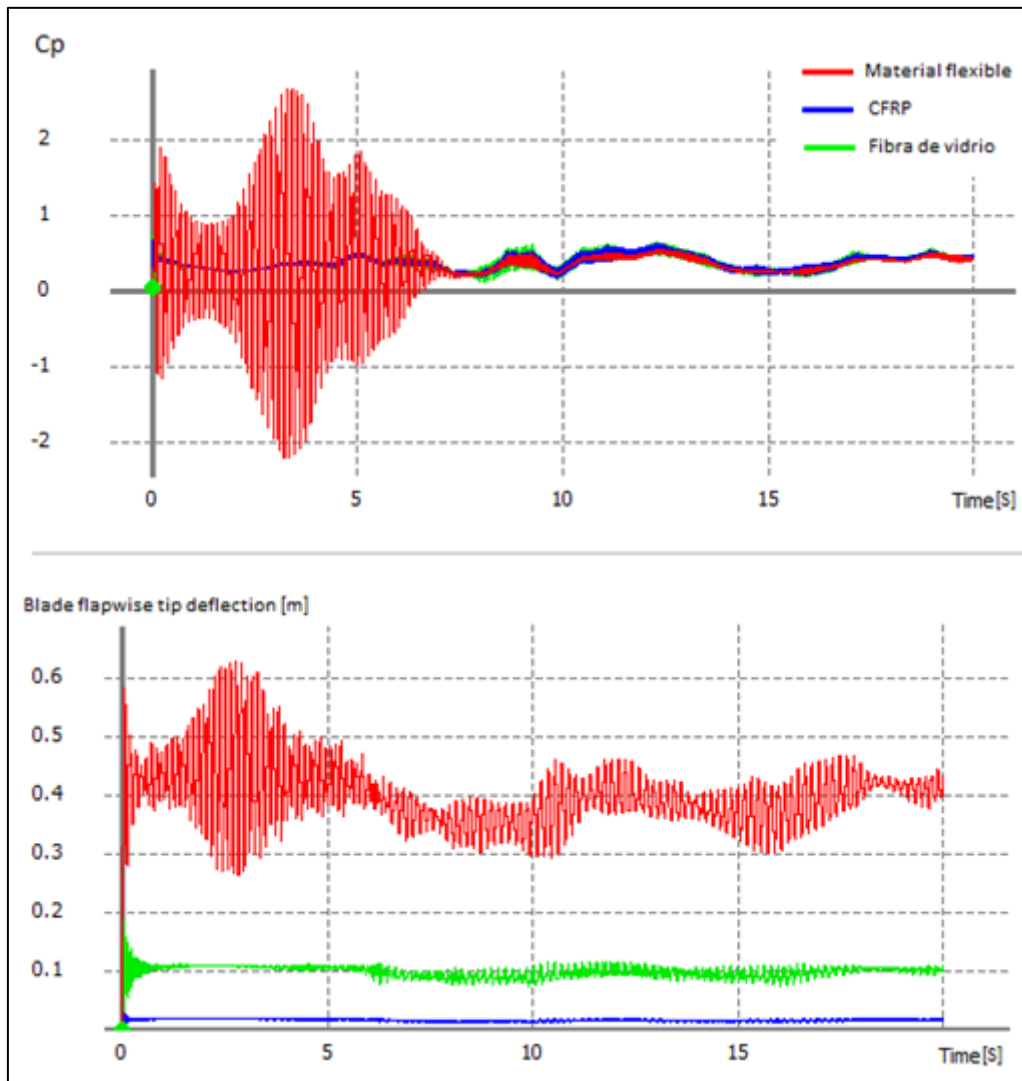


Figura 5. Resultados con campo de viento de zona semiurbana. Arriba, coeficiente de potencia vs. tiempo. Abajo, deflexión de la punta de pala vs. tiempo

La Figura 6 y la Figura 7 muestra los resultados obtenidos sobre los tres materiales analizados, sometidos a un campo de viento correspondiente a una zona urbana.

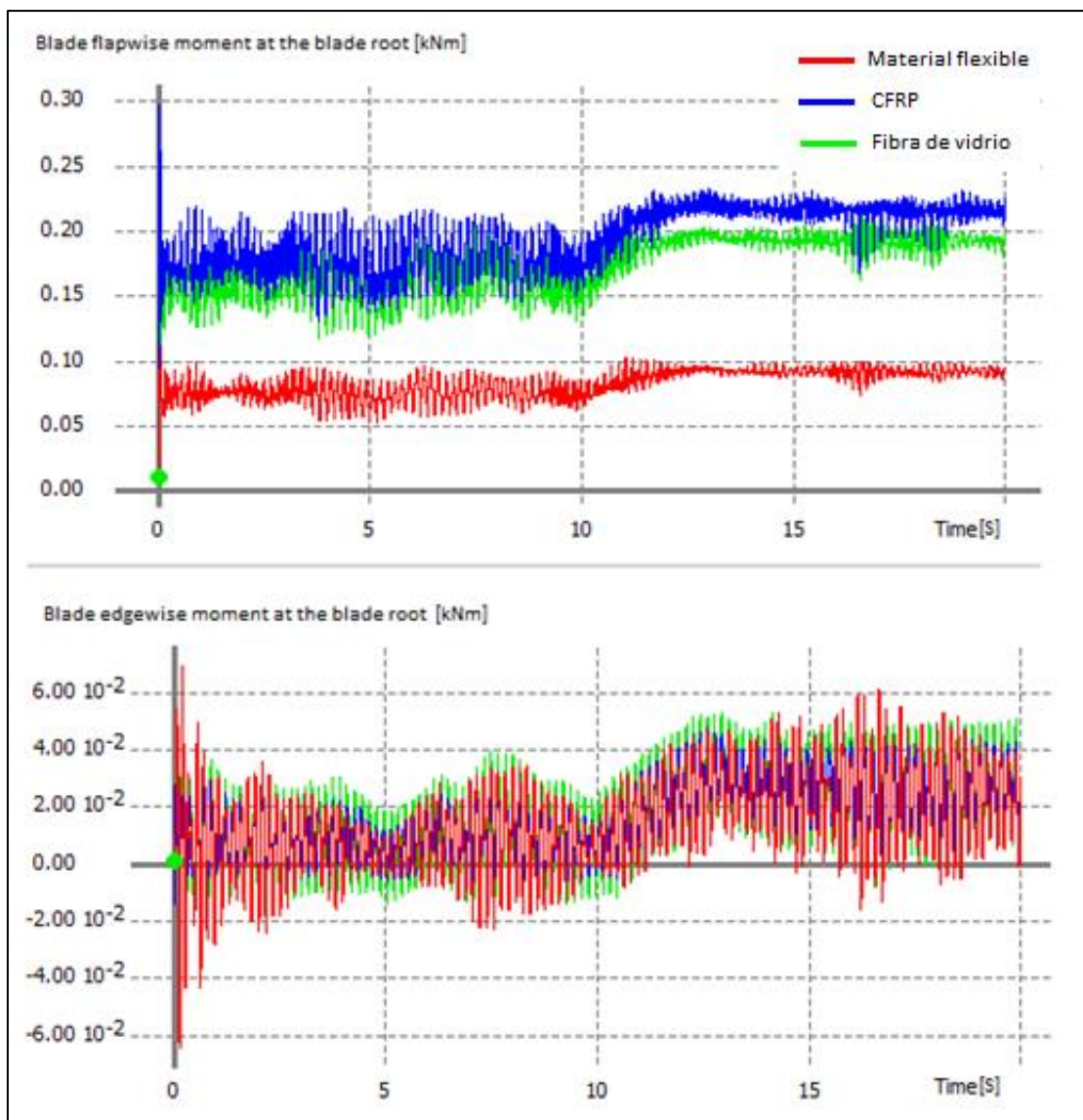


Figura 6. Resultados con campo de viento de zona urbana. Arriba, momento fuera del plano en la raíz de la pala vs. tiempo. Abajo, momento en el plano en la raíz de la pala vs. tiempo.



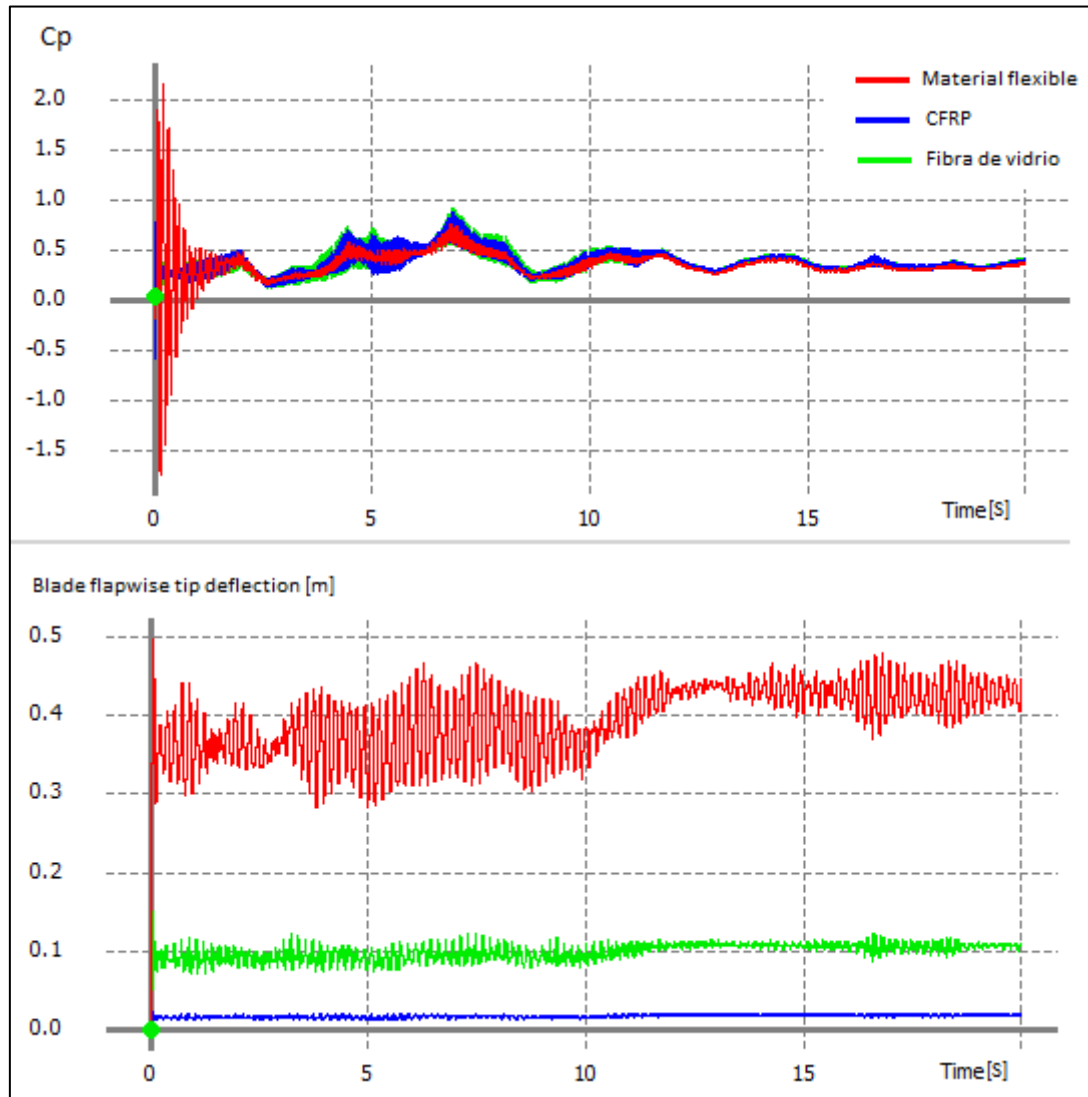


Figura 7. Resultados con campo de viento de zona urbana. Arriba, coeficiente de potencia vs. tiempo. Abajo, deflexión de la punta de pala vs. tiempo.

Tanto en la Figura 4 y en la Figura 5 como en la Figura 6 y en la Figura 7, se puede observar un comportamiento similar de los modelos al caso del campo de viento de zona rural que se muestra en la Figura 2 y en la Figura 3. Una diferencia es que, en los casos de campo de viento de la zona urbana y semiurbana se percibe un aumento considerable en las amplitudes de las fluctuaciones debido al incremento en la magnitud de la intensidad de turbulencia.

## Conclusiones

Se puede concluir, a partir de los resultados obtenidos:

- Para un dado campo de vientos, en general al utilizar materiales más flexibles se disminuyen los esfuerzos de momentos en la raíz de las palas, aun manteniendo el coeficiente de potencia constante.
- En general, al incrementar la turbulencia se observa un incremento en la amplitud de la fluctuación en el coeficiente de potencia y en los momentos en la raíz de la pala.

- No se observan cambios en el valor medio del coeficiente de potencia para los distintos tipos de rugosidad superficial, el cual se mantiene en un valor aproximado de 0,4.

### Trabajo futuro

Estudiar el comportamiento aeroelástico fuera de la condición nominal de operación, y explorar la posibilidad de mejorar la captación de energía y la vida útil de las palas a partir de modificaciones de geometría y elasticidad de estas.

### 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/>