



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

OPTIMIZACION AERODINAMICA DE TURBINAS EOLICAS DE BAJA POTENCIA MEDIANTE CFD

Ignacio Peralta ^{*1}, Sebastián Careno ¹, Bruno Storti ¹, y Alejandro Albanesi ^{1,2}

^{*1} Laboratorio de Flujometría (FLOW) – Facultad Regional Santa Fe
Universidad Tecnológica Nacional
Lavaise 610, Santa Fe (S3000ZAA), Argentina
flow@frsf.utn.edu.ar

² Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC) – (UNL-CONICET)
Predio CONICET Santa Fe – Colectora Ruta Nac. 168, Km 472, Paraje El Pozo
3000 Santa Fe, Argentina
aalbanes@santafe-conicet.gov.ar

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es obtener diseños óptimos de turbinas eólicas de baja potencia mediante simulación por computadora, utilizando modelos numéricos de dinámica de fluidos (CFD). La eficiencia aerodinámica de los álabes es por lo general el parámetro que tiene mayor influencia sobre la potencia que produce una turbina eólica debido a diversas pérdidas, entre las cuales se encuentran aquellas originadas por la geometría (perfil aerodinámico), por el efecto de punta, por el número finito de álabes (pérdidas de Schmitz), y por el cambio de dirección del viento al atravesar el rotor (pérdidas de Whirlpool).

Se plantean modificaciones paramétricas en la punta (tip) de los álabes con el fin de mejorar la producción de energía y el torque de arranque, y disminuir los vórtices y desprendimientos de flujo. Posteriormente, se determinando la convergencia en malla para capturar correctamente la energía de la estela de flujo aguas abajo de la turbina.

Se comparan tres geometrías de puntas y raíces, para dos álabes distintos, presentando en cada caso las curvas características de potencia en función de la velocidad, y de potencia en función del parámetro característico TSR (tip speed ratio), el cual representa la razón entre la velocidad tangencial del álabe y la velocidad del viento.

Los resultados de estos estudios son satisfactorios, donde se observan mejoras en la eficiencia aerodinámica, y además se concluye que la geometría de la punta (tip) tiene mayor incidencia que la geometría raíz (root) de los álabes.

Palabras Claves: CFD, Turbulencia, Turbinas eólicas.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

La potencia generada por una turbina eólica depende principalmente del coeficiente aerodinámico de sus álabes. La geometría de los mismos cumple un rol fundamental en la transformación de la energía cinética del viento en energía mecánica que se traduce al eje de la turbina.

Este trabajo surge como continuación de las actividades que realiza el grupo de trabajo sobre simulación en aerodinámica de turbinas [1], donde se logró validar el modelo computacional CFD, y se obtuvieron mediante simulación computacional resultados que tenían bajísimo error respecto a mediciones en túnel de viento, menor al 2%.

Se presenta aquí un estudio paramétrico comparativo, agregando 3 dispositivos de puntas alares o “winglets” [2, 3, 8], con el fin de mejorar la producción de energía y el torque de arranque, y disminuir los vórtices y desprendimientos de flujo.

Se comparan las curvas características de potencia en función de la velocidad, y de potencia en función del parámetro característico TSR (tip speed ratio), el cual representa la razón entre la velocidad tangencial del álabe y la velocidad del viento.

2. DEFINICIONES

2.1 Winglets

Los winglets son esencialmente extensiones del álabe. Estos actúan sobre la zona de mayor generación de potencia de la turbina, por lo que su desarrollo geométrico debe ser minuciosamente estudiado para lograr el diseño óptimo de los mismos. La cuerda y el ángulo de torsión son muy importantes para la eficiencia de estos apéndices y el objetivo del diseño es determinar estos parámetros.

Al colocar un winglet en un álabe se busca disminuir la resistencia que estos ofrecen al viento y de este modo, aumentar la eficiencia aerodinámica de la turbina. El objetivo es diseñarlo de tal manera que se optimice la reducción de la fricción con el aire, se maximice la producción de energía y se minimiza el empuje generado por la interacción con el viento.

2.2 Área frontal, potencia, rendimiento aerodinámico

Siendo A el área del rotor de la turbina, la potencia del viento en dicha área es [4]:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

La potencia eléctrica generada por la turbina resulta de la multiplicación de cuatro parámetros: de la potencia cubica de la velocidad del viento, del área del rotor (función de la potencia cuadrada del largo de los álabes), del factor de operación de la turbina, y de la densidad del aire [2]:



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

$$P_T = \frac{1}{2} \rho C_p A V^3 \quad (2)$$

A su vez, el factor de operación C_p resulta del producto de tres términos: de la eficiencia aerodinámica de los álabes η_A , de la eficiencia de la transmisión η_T , y de la eficiencia del generador η_E y de la eficiencia de la transmisión mecánica η_M [2,5]:

$$C_p = \eta_A \eta_T \eta_E \eta_M \quad (3)$$

El término de menor valor es la eficiencia aerodinámica de los álabes η_A , y tiene un límite teórico máximo conocido como "límite de Betz", cuyo valor es de 0,593. En la práctica, resulta sensiblemente menor debido a diferentes pérdidas: aquellas originadas por la geometría (perfil aerodinámico), por el efecto de punta, por el número finito de álabes (pérdidas de Schmitz), y por el cambio de dirección del viento al atravesar el rotor (pérdidas de Whirlpool) [6]. El mismo se calcula como:

$$\eta_A = \frac{P_T}{P_V} = \frac{T_q \omega}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (4)$$

Este coeficiente es función del número de Mach:

$$M = \frac{V}{a} = 0,138 \quad (5)$$

siendo a la velocidad del sonido en el fluido (para el aire a 20°C es aproximadamente 343,2 m/s). Para flujos incompresibles (donde el número de Mach es menor a 1/3), el coeficiente aerodinámico es independiente de la velocidad y del número de Reynolds Re

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} = 1 \times 10^6 \quad (6)$$

donde L la longitud de la cuerda del perfil aerodinámico en la punta y μ la viscosidad dinámica del aire (para 20°C es aproximadamente 1,747 Pa s), y por lo tanto η_A se puede considerar constante. En este trabajo calculamos el torque de la turbina mediante simulación computacional con software de dinámica de fluidos computacional (CFD), que consiste en discretizar el dominio en los códigos computacionales de CFD en volúmenes discretos sobre los cuales se resuelven las ecuaciones de Navier Stokes.

3. ÁLABE BAJO ESTUDIO

El estudio se realizara sobre un álabes formado por ocho perfiles NACA distintos (NACA 4424, 4422, 4420, 4419, 4417, 4416, 4416, 4412), equiespaciados y con transición lineal entre ellos (Figura 1). Las dimensiones generales se presentan en la Figura 2.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

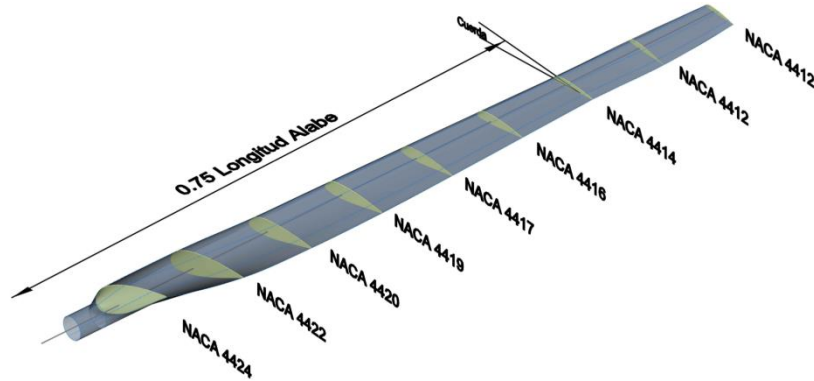


Figura 1: Perfiles NACA a lo largo del álabe.

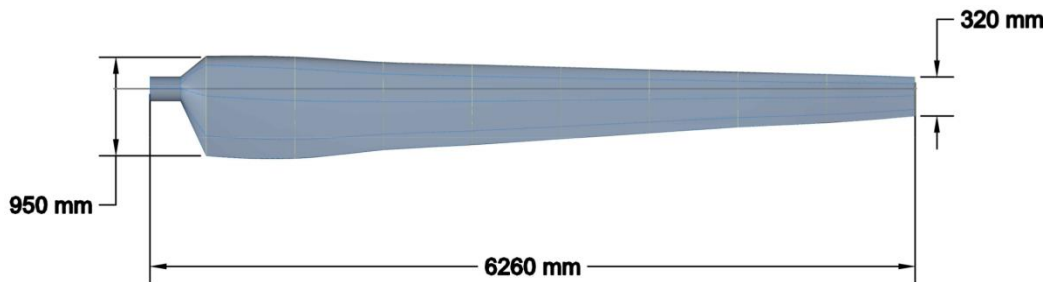


Figura 2: Dimensiones generales del álabe.

4. WINGLETS

Los winglets son extensiones de los álabes con una geometría determinada. En este trabajo, comparamos el desempeño de un álabe sin winglet, y del mismo con tres extensiones distintas, las cuales se describen a continuación.

4.1 Winglet 1: Sharklet o "Aleta de tiburón"

Es un apéndice muy difundido en la industria aeronáutica para rematar las alas de los aviones de pequeña y mediana envergadura. Sus dos principales condiciones geométricas son la altura y el ángulo de inclinación, Figura 3. Se busca disminuir la creación de vórtices, los cuales se forman por el paso del flujo de la zona de mayor presión (superficie posterior del álabe) a la de menor presión (superficie anterior del álabe).

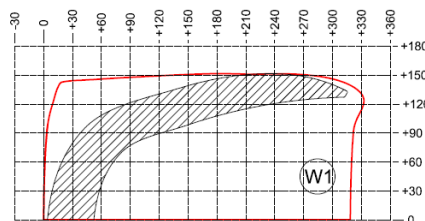


Figura 3: Dimensiones del Winglet 1.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

4.2 Winglet 2: Ogee o “de arco conopial”

Surge como el primero diseñado exclusivamente para turbinas eólicas, y sus dimensiones generales se describen en la Figura 4. Se destaca por su mayor altura en el lado de incidencia de la corriente de aire, en dirección del sentido de giro. Se reduce la creación de vórtices generando un arrastre del flujo de aire que intenta pasar de la zona de mayor a la de menor presión.

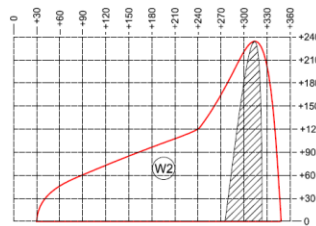


Figura 4: Dimensiones del Winglet 2.

4.3 Winglet 3: Tip Vane o “veleta”

A diferencia del caso anterior, su mayor altura está en la zona posterior, Figura 5. Siendo de fácil fabricación, se elimina de manera sencilla y económica el canto vivo generado por la superficie de cierre del álabo, de manera que se impide parcialmente el paso del flujo de aire en dirección al menor gradiente de presión. Como ventaja sobre los anteriores, se caracteriza por disminuir en buena medida el zumbido producido por la fricción entre el viento y la turbina en su extremo.

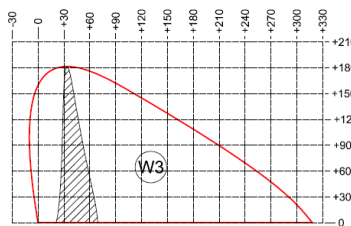


Figura 5: Dimensiones del Winglet 3.

5. NOMENCLATURA GENERAL

Se define al Tip Speed Ratio (cuyas siglas son **TSR** y se simboliza con la letra λ) como la relación entre la velocidad tangencial de la punta del álabo y la velocidad del viento [2,5,6]:

$$\lambda = \frac{\omega r}{V} \quad (7)$$

Es posible calcular un valor aproximado de **TSR** que hace máximo el rendimiento aerodinámico:

$$\lambda_{opt} \cong \frac{4\pi}{N_A} \quad (8)$$



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

donde N_A es la cantidad de álabes de la turbina [2].

5.1 Posición de los álabes en el rotor:

La potencia de generada por la turbina depende del ángulo de ataque de los álabes, y este resulta de la composición vectorial entre la velocidad de rotación y la velocidad del viento. Siendo ϑ el ángulo de pitch (paso – condición geometría del álabe), y conocidas las velocidades del viento V_V y de rotación V_R , se determina el ángulo de ataque α (que es una condición de operación), Figura 6.

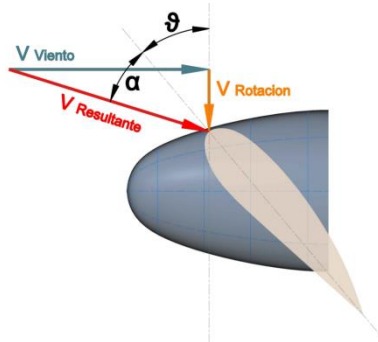


Figura 6: Ángulos característicos.

6. MODELO COMPUTACIONAL

6.1 Dominio

Para discretizar el dominio se utilizó una malla no estructurada de elementos tetraédricos. Debido a la periodicidad del modelo, se discretizó solo un tercio del mismo. Para considerar la rotación de la turbina, fue necesario definir un dominio estacionario y otro móvil. A este último se le impone una rotación sobre el mismo eje de la turbina con una velocidad angular de **72 [RPM]**. Siendo R la distancia normal desde el punto más alejado del álabe respecto al eje de giro de la turbina, el dominio computacional tiene una longitud de **12R** y un diámetro de **4R**, Figura 7. Para vincular ambos dominios (el fijo y el móvil) se utilizó el método GGI (General Grid Interface) [7].

6.2 Condiciones de borde

Se considera una entrada con velocidad uniforme normal al plano, densidad $\rho = 1,2047 \text{ kg/m}^3$ y viscosidad cinemática $\nu = 1,45 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. La salida está a presión atmosférica 101,325 kPa. Además se utilizó una pared tipo Opening con presión atmosférica y una condición de periodicidad en las secciones del subdominio

En cuanto al dominio móvil se le definió una velocidad de rotación Ω de 72 r.p.m. La ley de pared para la turbina es No slip. Para las interfaces se utilizó el modelo de Frozen Rotor con interfaces Fluido – Fluido y se definieron las condiciones de periodicidad correspondientes.

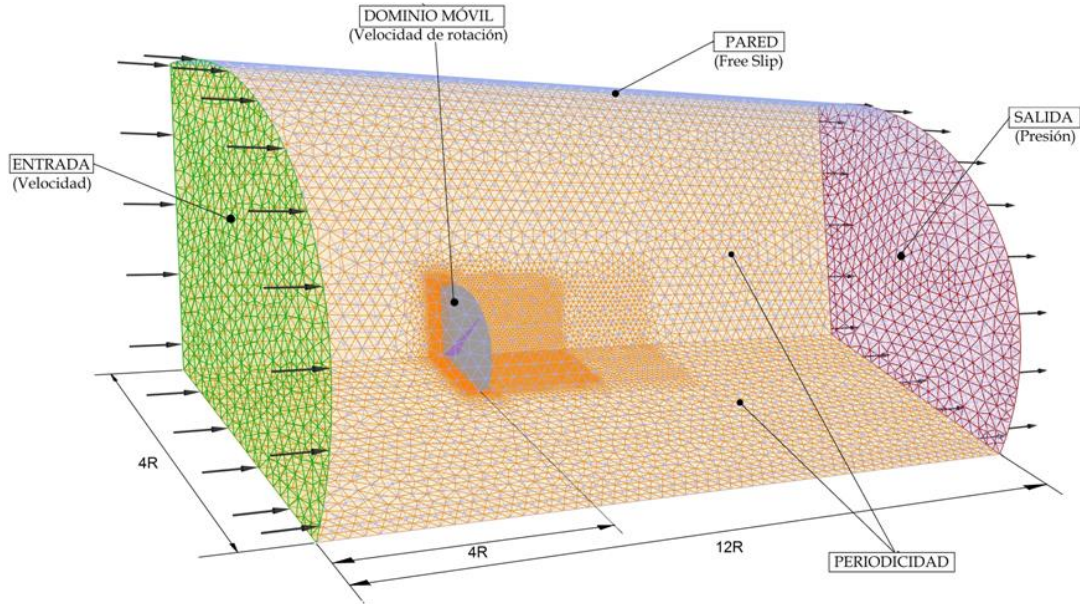


Figura 7: Dominio computacional.

6.3 Malla

Se utilizaron seis capas de elementos de pequeña escala (tamaño máximo 10 mm) sobre los álabes y cono (hub) de la turbina para capturar los efectos viscosos generados por el desprendimiento de la capa límite, Figura 8. La malla final tiene aproximadamente 5.800.000 elementos tetraédricos y 1.000.000 de nodos.

6.4 Convergencia en malla

Se realizó un análisis de la influencia del tamaño del dominio sobre los valores del torque generado por la turbina, y se determinó una diferencia máxima del 3% entre el dominio con dimensiones $L = 18R$ y $R = 6R$ de otro de $L = 12R$ y $R = 4R$, por lo cual se concluye que los dominios de mayores dimensiones tiene baja influencia sobre los resultados, y aumentan el tiempo de cálculo innecesariamente.

6.5 Modelo matemático

Las ecuaciones de Navier-Stokes (ecuaciones diferenciales parciales acopladas, no lineales y de segundo orden) restringidas a un fluido viscoso e incompresible, se resuelven en forma numérica con el modelo RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes), un método de flujo viscoso en el cual se promedian las variables en el tiempo y se resuelve el problema para el flujo medio mediante el método de los volúmenes finitos (FVM). En este trabajo se utilizó el software comercial ANSYS CFX 13.

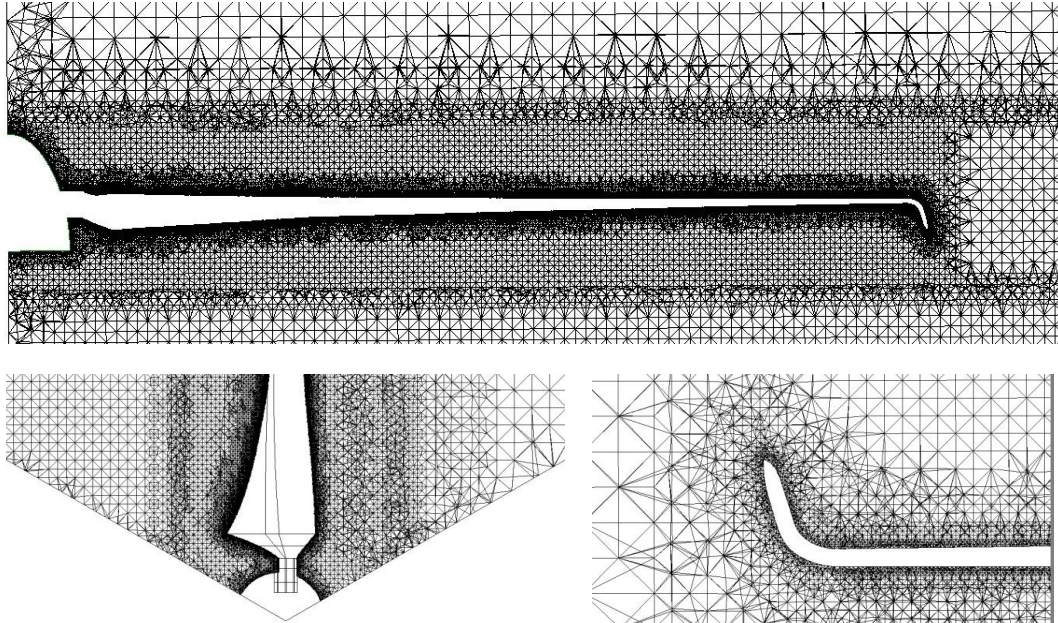


Figura 8: Detalles de la malla, y estrategia de refinado sobre la superficie.

6.6 Modelado de la turbulencia

Para modelar la turbulencia se utilizó el modelo SST [9], un modelo de dos ecuaciones basado en la hipótesis de Boussinesq. Este modelo se basa en la hipótesis de Boussinesq que establece en qué momento se cambia del modelo de turbulencia de pared al del seno del fluido, y es el recomendado para los estudios aerodinámicos. En SST se define la viscosidad cinemática turbulenta como [11],

$$vT = \frac{a1 k}{\max(a1 \omega, S F2)}$$

donde la constante $a1 = 0.31$, k es la energía cinética turbulenta, ω es la tasa de disipación de energía cinética, S es una medida invariante del tensor de deformaciones, y $F2$ es una función de combinación. (9)

6.7 Características de las simulaciones

Las simulaciones se llevaron a cabo en dos PC con arquitectura Intel I7 de 8 núcleos de 3.8 GHz, y 16 GB de memoria RAM DDR3 de 1600 MHz. En promedio cada simulación tarda 3 horas, y los resultados ocupan 600 MB de espacio en disco. Se realizaron 72 corridas (4 modelos de alabes, con 3 ángulos de ataque distinto, y medido a 6 velocidades: $4 \times 3 \times 6 = 72$). Por lo tanto, el tiempo total de simulación fue superior a las 200 horas, y se obtuvieron más de 40 GB de resultados.



7. RESULTADOS NUMERICOS

A continuación se presentan los resultados numéricos obtenidos. Para cada modelo (álabo sin winglet, y álabo con winglet 1, 2, o 3) se analizaron tres ángulos de pitch distintos (2, 5 y 8 grados), y velocidades de viento de 4, 6, 8, 10, 12 y 14 m/s.

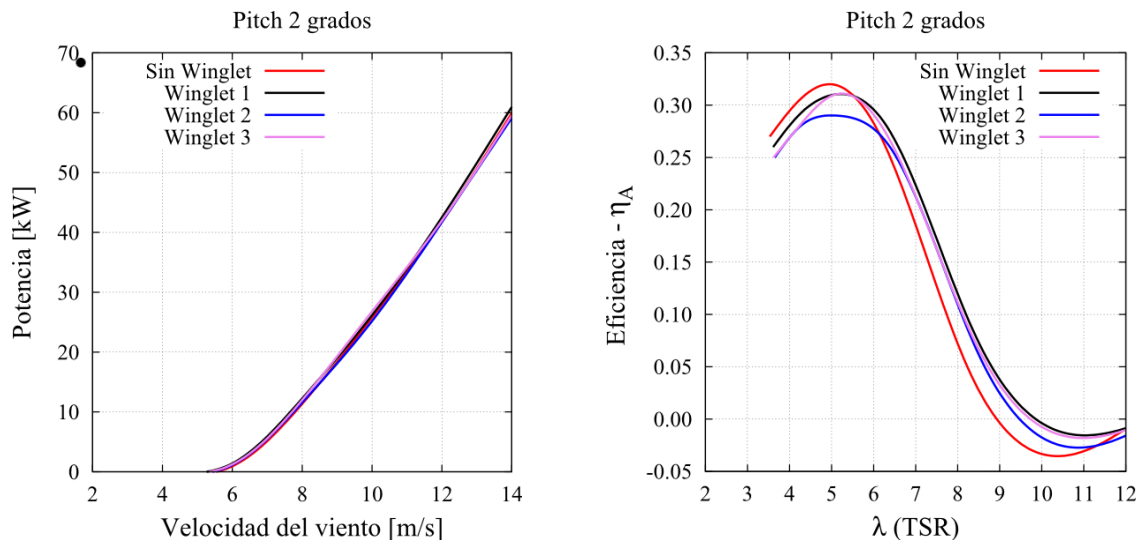


Figura 9: Curva de potencia (izquierda), y curva de eficiencia aerodinámica (derecha) para pitch 2 grados.

En la Figura 9 se presentan las curvas de potencia (izquierda) y eficiencia aerodinámica (derecha) para el álabo con pitch 2 grados. Para la velocidad nominal de 10 m/s, el modelo con winglet 3 fue el que entregó mayor potencia.

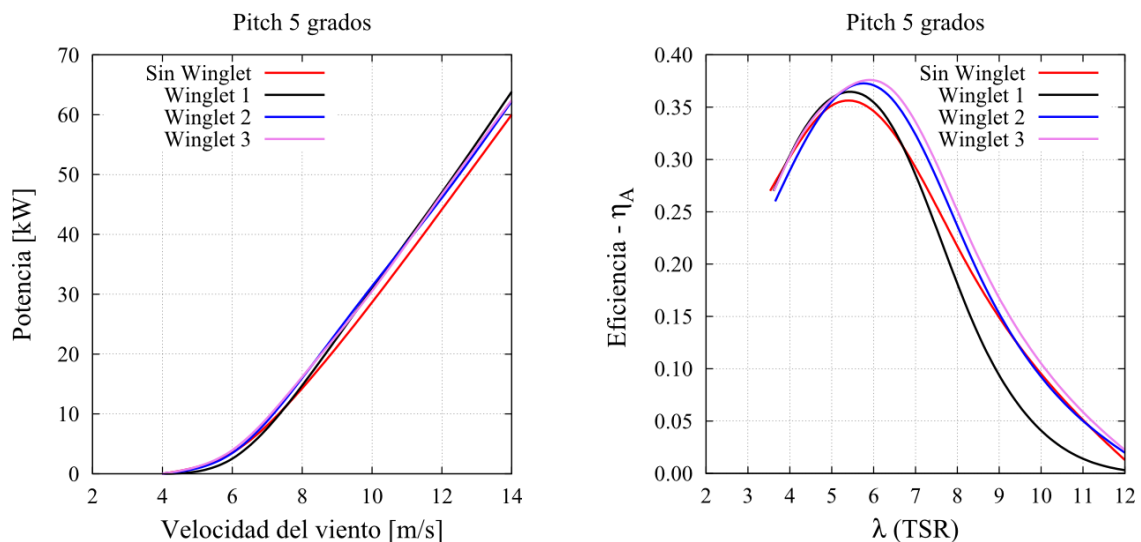


Figura 10: Curva de potencia (izquierda), y curva de eficiencia aerodinámica (derecha) para pitch 5 grados.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Si analizamos la eficiencia aerodinámica, vemos que el álabe sin winglet tiene mayor eficiencia a bajos valores de TSR (y a altas velocidades de viento respectivamente). Para mayores valores de TSR, vemos que los tres winglets dan mayor eficiencia que el modelo sin ellos, siendo el winglet 1 ha dado mayor eficiencia sobre los demás. Esto implica que los modelos con winglets tienen mayor torque de arranque.

Los resultados para pitch 5 grados se presentan en la Figura 10. Observamos que al cambiar el ángulo de pitch, se invierte la situación del caso anterior, y el álabe sin winglet tiene menor rendimiento para todo el rango de valores de TSR. Esto indica, para este ángulo de pitch, los winglets trabajan mejor y mejoran la eficiencia aerodinámica de forma significativa. El aumento de potencia máximo ha sido del 8%, si se compara la potencia del modelo con winglet 1 con el modelo sin winglet, a una velocidad de viento de 10 m/s.

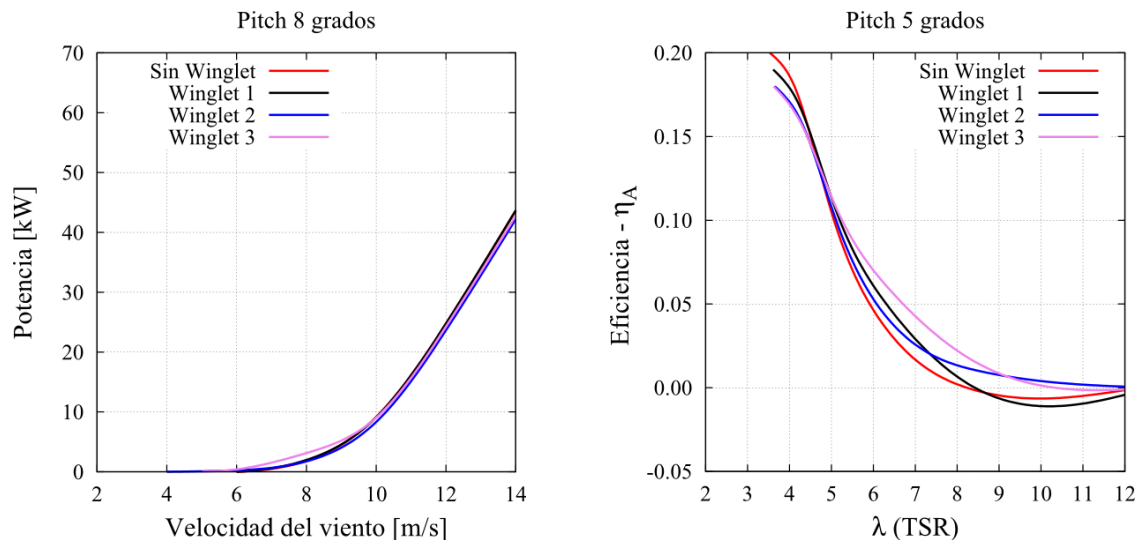


Figura 11: Curva de potencia (izquierda), y curva de eficiencia aerodinámica (derecha) para pitch 5 grados.

Por último, los resultados de pitch 8 grados se presentan en la Figura 11. El modelo sin winglet tiene mayor eficiencia a bajos valores de TSR. Para mayores valores de TSR, vemos que el winglet 3 ha dado mayor eficiencia sobre los demás. Este modelo tiene mayor torque de arranque que los demás. Se observa además que este ángulo de pitch es excesivo para las velocidades analizadas, y que es necesario evaluar los modelos a mayor velocidad de viento para obtener resultados representativos.

8. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron modificaciones paramétricas en la punta de los álabes de una turbina. Se utilizó CFD para calcular las curvas características de la turbina en cada caso, y se han



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

comparado entre sí. Estos estudios se realizaron con el software comercial ANSYS CFX-13.0, con un modelo de turbulencia tipo SST. Aunque computacionalmente es costoso, el CFD es el método más utilizado para este tipo de simulaciones por reducir al mínimo las simplificaciones en los modelos, y por predecir resultados muy precisos comparado con otros métodos existentes.

En general el agregado de los winglets permitió aumentar la potencia generada, y elevar el rendimiento aerodinámico de los álabes. En el mejor de los casos, para ángulo de pitch 5, fue posible conseguir un aumento de potencia de 8% agregando el modelo winglet 1 a los álabes, medido a la velocidad de 10 m/s.

Por último, se observa que los resultados dependen de forma no-lineal de la velocidad del viento, del modelo de winglet, y del ángulo de pitch. Se concluye que no existe un winglet que sea mejor en todo el rango de velocidad y ángulo de pitch, sino que se deberá diseñar un winglet para cada turbina según su velocidad nominal y su ángulo de pitch de operación.

9. REFERENCIAS

- [1] B. Storti, I. Peralta, S. Careno y A. Albanesi. Aerodinámica de turbinas eólicas de baja potencia. XXXII Congreso de Métodos Numéricos y sus Aplicaciones ENIEF 2013. Mendoza, Argentina, 2013.
- [2] E. Hau. Wind turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. Springer. 2005.
- [3] J. Johansen. N. Sorensen. Numerical analysis of winglets on wind turbines using CFD. Riso National Laboratory. Technical University Of Denmark. 2010.
- [4] W. Tong. Wind power generation and wind turbine design. Wit Press. USA. 2010.
- [5] M. O. L. Hansen. Aerodynamics of Wind Turbine. Earthscan. USA. 2008
- [6] R. Gasch, J. Twele. Blade geometry according to Betz and Schmitz. Wind Power Plants. 168-2017. 2012.
- [7] ANSYS-CFX. User Manual. ANSYS Incorporated, 2005.
- [8] M. Dossing. Vortex lattice modeling of winglets on wind turbines blades. Riso National Laboratory. Technical University Of Denmark. 2007.
- [9] ANSYS-CFX. Innovative Turbulence Modelling: SST Model in ANSYS CFX. ANSYS Incorporated, 2005.
- [10] D. Wilcox. Turbulence Modeling for CFD. DWC Industries, La Cañada, California, 1994.
- [11] F. R. Menter, M. Kuntz, y R. Langtry. Ten years of industrial experience with the sst turbulence model. Turbulence, Heat and Mass Transfer 4, pages 1–8, 2003.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó con financiación de la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe (UTN-FRSF), y del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).