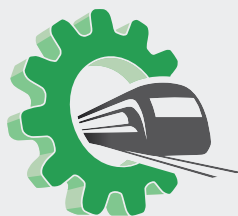


FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI



UTN * SANTA FE

VIII CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA MECÁNICA

III CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA FERROVIARIA

13 AL 15 DE SEPTIEMBRE DE 2023

Facultad Regional Santa Fe

 UNIVERSIDAD
TECNOLÓGICA
NACIONAL

 AJEA
Actas de Jornadas y Eventos
Académicos de UTN

Facultad Regional Santa Fe -UTN

VIII Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica : III Congreso Argentino de Ingeniería Ferroviaria : actas / compilación de Sebastián L. Russillo ; editado por Giuliani, Andrés; Leurino, Rodrigo C.; Marelli, Victor H. J y Russillo, Sebastian L. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Universidad Tecnológica Nacional, 2023.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-950-42-0234-9

1. Ingeniería. 2. Mecánica. 3. Transporte Ferroviario. I. Russillo, Sebastián L., comp. II. Giuliani, Andrés, ed. III. Título.

CDD 625.10071

ISBN 978-950-42-0234-9



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN) no percibe fondos desde los congresos / jornadas, la publicación es gratuita y abierta para eventos realizados u organizados en unidades académicas de la UTN



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.



GENERADORES EÓLICOS DE EJE HORIZONTAL: ESTUDIOS EXPERIMENTALES CON MODELOS A ESCALA REDUCIDA Y SIMULACIONES NUMÉRICAS

Lucas José Maidana¹, Matías Ezequiel López¹, Marcelo Italo Adotti^{1,2}, Roberto Adrián Wittwer¹, Jorge Omar Marighetti¹, Julián Medina¹

¹ Laboratorio de Aerodinámica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste. Av. Las Heras 727. Resistencia, Chaco. Argentina

² Instituto de Modelado e Innovación Tecnológica IMIT (CONICET - Universidad Nacional del Nordeste). Av. Libertad 5460. Corrientes. Argentina

RESUMEN

Con el auge de las energías renovables, los aprovechamientos eólicos han registrado un desarrollo importante en los últimos veinte años. Simultáneamente, se están realizando diferentes tipos de estudios que apuntan a evaluar el comportamiento de los aerogeneradores, las estructuras de soporte y sistemas de control con el fin de optimizar su funcionamiento. Dentro de las herramientas de análisis que se utilizan en estos estudios ocupan un lugar cada vez más importante los ensayos en túneles de viento con modelos a escala y las simulaciones computacionales basadas en métodos numéricos.

El trabajo consta de una primera parte donde se describe la problemática de la generación eólica revisando aspectos de la variabilidad de la fuente eólica y su relación con las características de diseño de las turbinas. La segunda refiere a ensayos con modelos a escala reducida. Finalmente se evalúa el diseño de un modelo a escala reducida de un aerogenerador con el objetivo de proponer soluciones para optimizar su rendimiento aerodinámico.

En esta evaluación, que constituye la parte central del trabajo, se contrastan los resultados experimentales con los datos obtenidos de un análisis teórico mediante la aplicación del método de los elementos de pala (BEM, por Blade Element Method) y una simulación numérica preliminar con el software OpenFOAM. En esta simulación se utiliza el modelo simplificado de disco actuador y se analizan los parámetros principales de la turbina. Complementariamente, se estudia el sistema del control del modelo mediante la automatización del posicionamiento del ángulo de ataque de las palas. Es por ello, que disponer de un sistema de control de este tipo permitirá optimizar la extracción de potencia.

Palabras Clave: aerogenerador, aerodinámica, sistema de control, CFD

1. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables se están constituyendo en una fuente sustancial de la energía a nivel global y, en particular, en nuestro país y en toda la región se viene incrementando la cantidad y dimensiones de los parques eólicos. Desde la perspectiva de la aerodinámica de las palas, los aerogeneradores han sido bastante estudiados pero la interacción entre la propia estructura de los mismos y la capa límite turbulenta de la atmósfera todavía no está totalmente entendida. Este aspecto, sumado a la variabilidad del viento, son muy importantes en términos de la eficiencia



de los parques de generación y pueden ser estudiados mediante modelos a escala reducida en túnel de viento.

De manera muy resumida, la variabilidad de la fuente eólica está relacionada con la variación de la velocidad del viento respecto al tiempo. En un mismo lugar, los valores promedio de velocidad del viento atmosférico sobre periodos no muy largos pueden ser caracterizados probabilísticamente mediante una distribución de Weibull [1]. Por otro lado, se puede analizar la distribución vertical de velocidad mediante la ley potencial de velocidades o alguna variante de la ley logarítmica, pero siempre a mayor altura sobre el terreno existe mayor velocidad lo que optimiza el aprovechamiento energético. Asimismo, la turbulencia del viento incidente, que depende del tipo de terreno, las condiciones meteorológicas y la altura [2], afecta el rendimiento del aerogenerador. Recientemente, se ha comenzado a incorporar al cálculo estructural de aerogeneradores algunas condiciones de viento no convencionales, tales como las corrientes descendentes o “downburst”, producto de algunos accidentes registrados en este tipo de instalación por ese tipo de fenómeno [3]. Finalmente, la variación direccional del viento en un determinado lugar, lo que define la rosa de los vientos, que también tiene influencia a la hora del diseño y selección de la disposición y tipo de dispositivo.

La interacción entre aerogeneradores de un parque eólico y, en particular, el estudio de la estela turbulenta que se genera a sotavento de un dispositivo resulta muy importante para poder establecer y prever rendimientos de este tipo de aprovechamiento. Existen antecedentes de estudios experimentales realizados recientemente en túneles de viento de Europa, Asia y América [4, 5, 6]. Un estudio de este tipo ha sido realizado en el túnel de viento “J. P. Gorecki” del Laboratorio de Aerodinámica de la UNNE [7] y otros en el túnel de viento “J. Blessmann” del Laboratório de Aerodinâmica das Construções de la UFRGS [8, 9, 10]

Además de los parques eólicos convencionales, es importante destacar el crecimiento de aprovechamiento off-shore a nivel mundial. En Sudamérica, Brasil ha emprendido recientemente un ambicioso plan para la implementación este tipo de emprendimiento [11]. El desafío es muy importante debido a que se requiere un enfoque interdisciplinario que incluye nuevos aspectos de Ingeniería Estructural y Meteorología que se suman a los necesarios para aprovechamientos convencionales, sin embargo, las ventajas que se presentan debido al gran potencial de la costa atlántica brasileña han impulsado al desarrollo de este importante programa.

El objetivo general del trabajo es el análisis teórico a partir de una serie de ensayos en túnel de viento con un modelo a escala de un aerogenerador de eje horizontal [12, 13], complementados con simulaciones de fluido-dinámica computacional (CFD). Estos análisis preliminares están orientados en la evaluación del rendimiento aerodinámico de los aerogeneradores y maximización de la extracción de energía renovable disponible mediante el diseño de las palas



y su configuración. Además, en este trabajo se evalúa el mecanismo de posicionamiento de las palas del aerogenerador. Modelando el funcionamiento dinámico del mismo por medio de la teoría de control clásica a partir de las variables de ángulo de ataque y revoluciones del rotor.

2. ENSAYOS EXPERIMENTALES

El laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE cuenta con un túnel de viento de baja velocidad del tipo de capa límite, cuya cámara de ensayos tiene 2,4 m de ancho por 1,8 m de alto y 22,4 m de longitud, lugar donde se llevaron a cabo los ensayos del modelo a escala reducida del aerogenerador. La configuración utilizada en el ensayo puede observarse en la Figura 1.

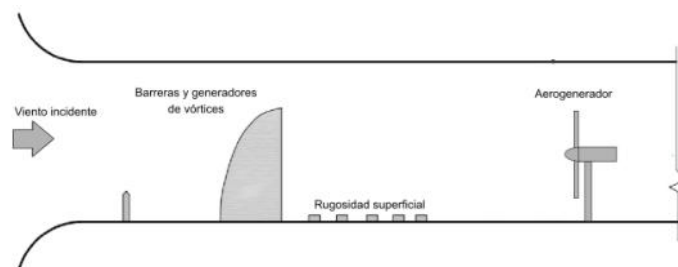


Figura 1: Esquema de configuración del Túnel de Viento Jacek Gorecki y posicionamiento del aerogenerador en la segunda sección de ensayo.

En este ensayo se pretende caracterizar la dinámica del aerogenerador. Evaluando la variación del ángulo de ataque β de los álabes y el efecto con las revoluciones por minuto RPM del rotor. En donde el ángulo β es el compuesto por el vector velocidad relativo de viento incidente \vec{w} y la línea de cuerda del perfil como se muestra en la Figura 2.

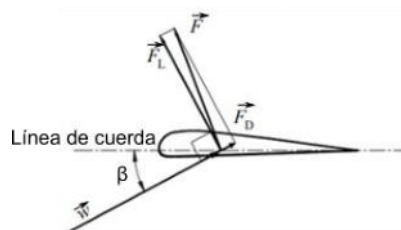


Figura 2: Diagrama de fuerzas e incidencia de viento [12]

3. TEORÍA DEL DISCO ACTUADOR

Este modelo es una simplificación físico-matemática útil para analizar los efectos de la presencia de una hélice o un rotor en un fluido en movimiento, despreciando los efectos rotativos producidos por las palas, solo contemplando la caída de presión producida por el rotor, se conoce como disco actuador [13].

Es posible realizar un análisis preliminar del comportamiento aerodinámico de las turbinas eólicas, simplemente considerando el proceso de extracción de energía producido por la interacción entre el fluido y el disco actuador.

El sistema de ecuaciones que rige este modelo se muestra en la Ecuación (1), Ecuación (2) y Ecuación (3). Las cuales permiten calcular la velocidad promedio del flujo a través del disco v , el empuje axial T y la potencia absorbida P .

$$v = 0,5(v_1 + v_3) = (1 - a)v_1 \quad (1)$$

$$T = 2\rho Av_1^2 a(1 - a) \quad (2)$$

$$P = 2\rho Av_1^3 a(1 - a)^2 \quad (3)$$

Donde ρ es la masa específica del fluido, A es el área frontal del disco actuador o sección barrida por el rotor, v_1 es la velocidad de viento incidente y a es el factor de reducción axial de velocidad.

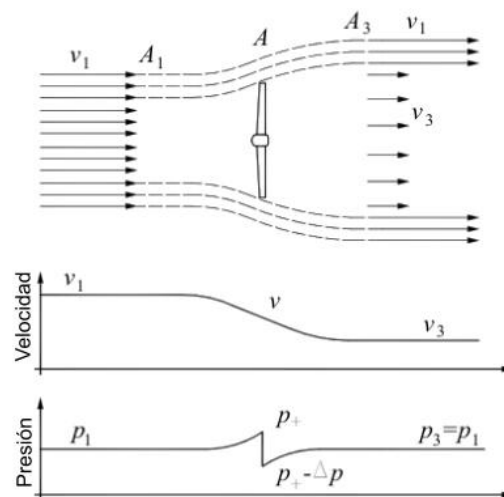


Figura 3. Modelo de tubo de corriente [12]

En Figura 3 se muestra como el flujo al atravesar el disco actuador experimenta una reducción gradual de la velocidad, mientras que la presión experimenta una disminución abrupta. Aguas abajo del disco, la presión se recupera a su valor inicial, mientras que el fluido pierde velocidad. El disco actuador induce una variación de velocidad que se superpone a la velocidad del flujo libre [1].

4. ANÁLISIS GEOMÉTRICO DEL ÁLABE

Uno de los elementos más importante a la hora de diseñar un aerogenerador es el álabe, ya que es el elemento encargado de transformar la energía cinética proveniente del viento en energía



mecánica. Los álabes se componen de perfiles aerodinámicos en el desarrollo de su longitud, es por esto que la selección del mismo es crucial para un óptimo diseño.

El perfil aerodinámico es una forma geométrica diseñada para generar fuerzas de sustentación por efectos de escurrimiento del fluido sobre sus superficies. Estos perfiles están normalizados (NACA, NREL) en función de su aplicación.

En la Figura 4, se muestran las principales partes de un perfil aerodinámico. Estas son utilizadas luego para la nomenclatura según la norma a la que pertenezcan.

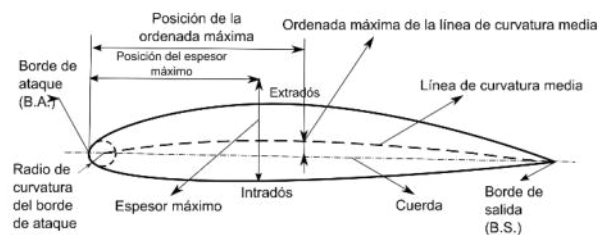


Figura 4. Esquema y partes de un perfil aerodinámico genérico

En la selección de estos perfiles debe primar una alta relación entre la sustentación y la resistencia aerodinámica, representada por la Ecuación (4) [14].

$$GR = C_L/C_D \quad (4)$$

Donde C_L y C_D representan los coeficientes aerodinámicos de sustentación y arrastre respectivamente. En este trabajo se han seleccionado cinco perfiles candidatos que presentan GR elevado, los cuales serán utilizados para la evaluación mediante el método descrito en la siguiente sección.

Mediante el software XFOIL 6.99 [16], se han obtenido los coeficientes aerodinámicos dentro de un rango de ángulos β para las condiciones de viento incidente.

5. MÉTODO DEL ELEMENTO DE ÁLABE

La teoría del elemento de álabes (BEM, por Blade Element Momentum Theory), es un modelo matemático más completo que el disco actuador cuyo objetivo es obtener como resultado la fuerza de empuje y torque que se producen sobre el aerogenerador. Las fuerzas son calculadas mediante la discretización en tramos del álabes.

El álabes de una turbina se enfrenta al flujo de aire y al movimiento de rotación, por lo que es necesario analizar la aerodinámica utilizando el factor de reducción axial a , e introducir el factor de reducción tangencial a' [12].

El método consiste en dividir el álabe en diferenciales y calcular en esas secciones la fuerza resultante de la interacción de la estructura con el viento incidente, ver Figura 5. Una vez obtenidos los resultados para cada sección, integrarlos o sumarlos para obtener el efecto resultante sobre la turbina [13].

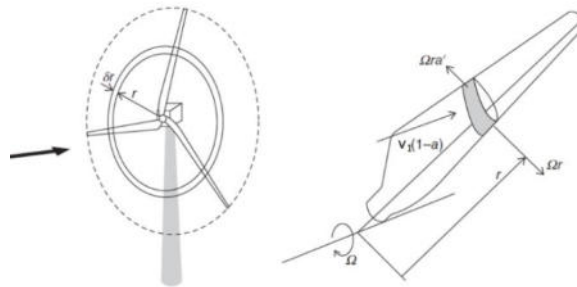


Figura. 5 Ilustración de la discretización de los elementos de álabe [1]

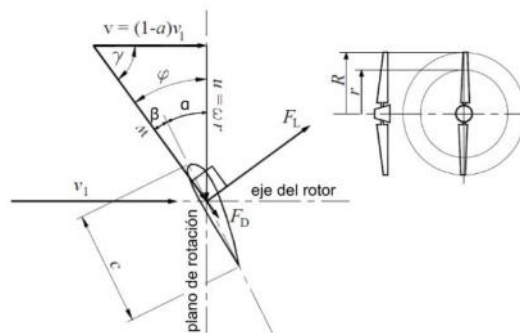


Figura 6. Cinemática del perfil alar [3]

$$T^*(r) = 0,5\rho w^2 c C_D \quad (5)$$

$$U^*(r) = 0,5\rho w^2 c C_L \quad (6)$$

$$T = B \int_0^R T^*(r) dr \quad (7)$$

$$P = \omega B \int_0^R r U^*(r) dr \quad (8)$$

La Ecuación (5) y Ecuación (6) permiten calcular las fuerzas axiales y tangenciales por unidad longitud por cada tramo discretizado. La integración de estas variables, representadas por la Ecuación (7) y Ecuación (8), permiten determinar el empuje axial total y potencia del aerogenerador respectivamente. En la Figura 6 se muestra el triángulo de velocidades y las fuerzas ortogonales que se generan sobre el perfil.

6. CONTROL DE POSICIONAMIENTO DE ÁLABES

En esta instancia se presenta el modelo sin la optimización del control de posicionamiento del ángulo β respecto de un valor de referencia de giro del rotor.

El bucle de control consiste en modelo simple de primer orden [19], ver Figura 7, realizado con el software de uso libre SciLab específicamente su aplicación XCOS [17]. Este modelo preliminar representa el comportamiento dinámico de la física del aerogenerador teniendo en cuenta las siguientes hipótesis simplificativas:

1. La relación entre el ángulo de las palas y el giro del servo-motor Futaba es de 1:1.
2. Se han despreciado las pérdidas por resistencia y por inductancia en el servo-motor.
3. Se modeló la física del aerogenerador con una relación lineal entre el ángulo β y los valores de RPM en carga, en función a los resultados experimentales.

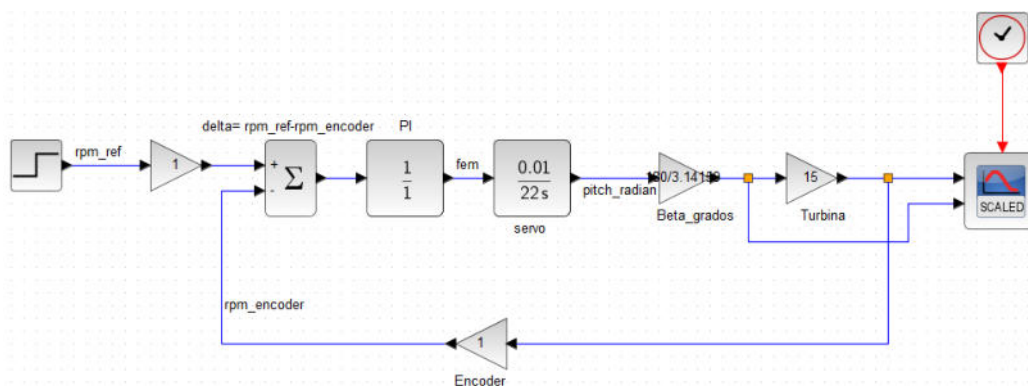


Figura 7: Diagrama de lazo cerrado del sistema de control

7. FLUIDO-DINÁMICA COMPUTACIONAL (CFD)

Es una herramienta usada para resolver las ecuaciones de balance de masa, cantidad de movimiento lineal, expresadas por la ecuación de Navier-Stokes. Estas ecuaciones son discretizadas mediante el método de volúmenes finitos (FVM, por Finite Volume Method) para observar los campos de las variables de interés, tales como la presión, velocidad y parámetros de turbulencia. La simulación fue realizada con la plataforma de código abierto OpenFOAM.

La simulación fue llevada a cabo adoptando las hipótesis de flujo estacionario e incompresible. El flujo turbulento fue modelado con las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas con el número de Reynolds (RANS, Reynolds Average Navier Stokes), utilizando el modelo $\kappa - \epsilon$. Además, se modeló el perfil de velocidad incidente característico del túnel de viento para la condición de ensayo.

La discretización del dominio computacional se realizó mediante elementos hexaédricos, con refinamiento localizado en la zona donde está ubicado el disco actuador. Las condiciones de borde impuestas al dominio y sus dimensiones son representadas en la Figura 8.

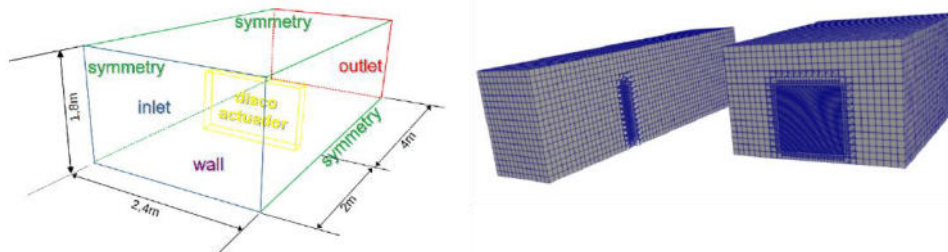


Figura 8. Dimensiones y condiciones de borde - Vista en corte lateral y frontal del dominio computacional

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Resultados de los ensayos experimentales

De los ensayos se obtuvo la relación de revoluciones de giro del rotor para cada ángulo β con un viento incidente de 6,76 m/seg. En la Figura 9, se puede observar un comportamiento lineal entre ambas variables, considerando que 0 grados es la posición de bandera acorde a la configuración propuesta por Gundtoft [12]. Es posible conocer mayores detalles de los ensayos en trabajos previos [15].

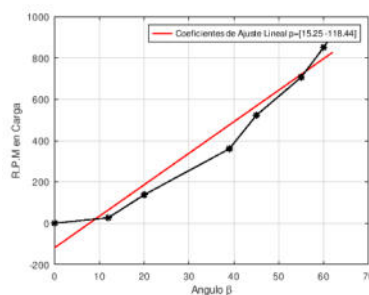


Figura 9. Curva de respuesta del aerogenerador en función al ángulo β

8.2 Resultados del Método BEM

En la búsqueda de maximizar la extracción de energía del viento, se eligieron distintos perfiles aerodinámicos con GR elevado. Para la implementación del método se resolvió el sistema de ecuaciones de forma iterativa mediante un código en lenguaje Octave [18]. Los resultados obtenidos del análisis de los perfiles aerodinámicos mediante la aplicación del BEM con una

discretización de 50 elementos, ante condiciones de flujo turbulento $Re=126.000$, son expresados en la Tabla 1.

De los cuatro candidatos analizados presentados en la Tabla 1, el perfil NACA 4412 es el que mejor rendimiento aerodinámico posee, lo cual permite inferir en que la estrategia de selección de perfiles en función GR es adecuada, debido a una relación proporcional de esta variable con la potencia aprovechada.

Tabla 1. Resultados BEM para 1095 RPM y diámetro 0,6 m

| Perfil | Potencia (W) | Empuje (N) | Rendimiento | Torque total (Nm) | GR |
|-------------|--------------|------------|-------------|-------------------|-------|
| NACA 4412 | 26,73 | 7,97 | 51,67 | 2,33E-04 | 63,82 |
| NACA 4415 | 26,45 | 8,13 | 51,12 | 2,30E-04 | 59,03 |
| NREL S318 | 22,64 | 8,06 | 43,76 | 1,98E-04 | 31,20 |
| NACA 64 421 | 21,28 | 7,81 | 41,13 | 1,86E-04 | 27,62 |

8.3 Resultados del modelo de control de posicionamiento

Se ha simulado la implementación del sistema de control presentado en la Figura 8, imponiendo en la entrada una función escalón de 0 a 200 RPM, con un retardo unitario para un período de 20 segundos. En la Figura 10 se observa la respuesta dinámica del modelo propuesto del aerogenerador. Se evidencian en ellas, un comportamiento estable de ambas variables RPM y β , alcanzando su valor final luego de 15 segundos de aplicación de la función.

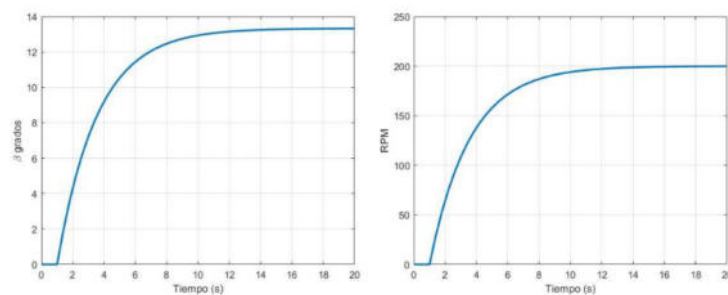


Figura 10. Respuesta dinámica del aerogenerador

8.4 Resultados de la simulación CFD

En la simulación computacional realizada se obtienen los campos de velocidad y presión relativa afectados por la presencia del disco actuador. En las Figura 11 se muestra en una vista en corte el campo de presiones, además se muestra el gradiente de presión y velocidad, sobre el eje del disco. Se observa que la presión en la zona del disco alcanza valores máximos de 7,3 Pa, para luego reducir abruptamente hasta -3,6 Pa, donde se encuentra emplazado el disco actuador,

aguas abajo del mismo la presión se recupera hasta un valor cercano a 0 Pa. La velocidad U_x sufre una reducción gradual en las cercanías al disco actuador, alcanzando un valor mínimo de 7,5 m/s. Aguas abajo del disco la velocidad se recupera gradualmente hasta un valor un valor de 8,1 m/s.

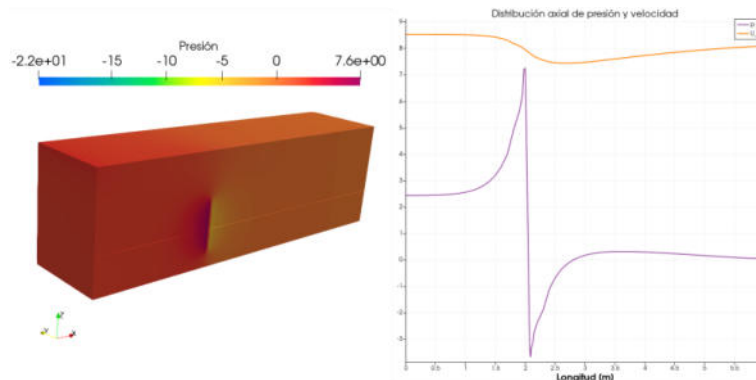


Figura 11. Vista en corte del campo de presión del dominio – gradiente longitudinal de presiones y velocidad axial

Además fueron evaluados los perfiles de velocidad al ingreso y egreso del disco actuador, respectivamente a 1 metro del mismo. En la Figura 12 se muestran los perfiles de velocidad. En el ingreso se observa la distribución generada por la capa límite, y además el perfil de velocidades aguas abajo del disco actuador, con una demarcada disminución de velocidad para esta región.

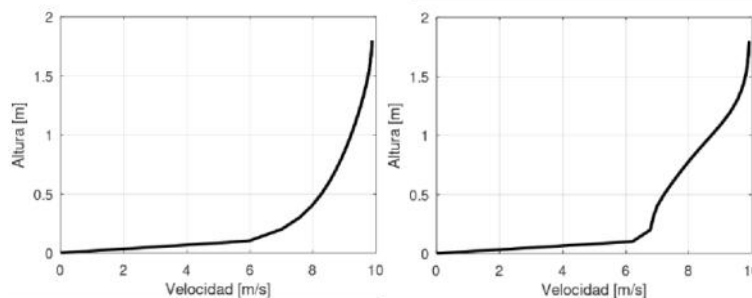


Figura 12. Perfiles de velocidad aguas arriba y abajo del disco actuador

9. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha evaluado el comportamiento aerodinámico del aerogenerador en forma teórica, experimental y numérica. Se ha presentado un análisis de cada metodología especificando las hipótesis simplificadoras adoptadas respectivamente. Además, se incluyó un



análisis de la dinámica del sistema de posicionamiento de los álabes. Estos análisis son resultados preliminares que serán profundizados en trabajos futuros.

El análisis experimental ha permitido caracterizar en forma simple la relación de RPM y el ángulo β . Relación que luego es usada como dato de entrada para el modelo de control de posicionamiento de los álabes. El cual es una primera aproximación al comportamiento dinámico del aerogenerador. Resta evaluar mediante ensayos futuros las constantes de las funciones de transferencia y el chequeo de la relación de ángulos entre álabes y el giro del servo-motor. Debiendo evaluarse en forma más precisa la inercia del sistema de posicionamiento.

El BEM resulta una herramienta útil para el diseño de álabes, permitiendo la evaluación en forma rápida de distintos tipos de geometrías, permitiendo seleccionar así los más óptimos y obteniendo, una primera instancia de análisis, la potencia generada y fuerzas que debe resistir el álabes. Además, por el tipo de discretización realizada, el método permite el análisis de distintos tipos de perfiles por tramo para un mismo álabes. En trabajos futuros se desarrollará un diseño óptimo contemplando esta estrategia.

La simulación numérica del disco actuador inmerso en un flujo turbulento aporta información detallada de los campos de presión y velocidad en la región de emplazamiento del aerogenerador. El post-proceso ofrecido por la CFD permitió evaluar los perfiles de velocidad aguas arriba y abajo respectivamente, obteniendo información detallada de la reducción de velocidad por efectos del disco actuador. Este modelo, resulta de una implementación sencilla y con bajo costo computacional. Permitiendo aplicarlo a la evaluación de granjas de generación eólica de aerogeneradores de eje horizontal en trabajos futuros. Además, se prevé la incorporación de los efectos de reducción tangencial, y en un modelo final la simulación del aerogenerador 3D.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Faleh H. Mahmood, Ali K. Resen, Ahmed B. Khamees (2020). Wind characteristic analysis based on Weibull distribution of Al-Salman site, Iraq. Energy Reports 6, 79-87.
- [2] J. Blessmann. O vento na Engenharia Estrutural. Editora da Universidade/UFRGS, 1995.
- [3] M. R. Ahmed, A. A. el Damatty, K. Dai, A. Ibrahim, and W. Lu. Parametric study of the quasi-static response of wind turbines in downburst conditions using a numerical model. Eng Struct. (2022) 250. 113440.
- [4] N. Coudou, S. Buckingham, J. van Beeck. Experimental study on the wind-turbine wake meandering inside a scale model wind farm placed in an atmospheric-boundary-layer wind tunnel. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 854 (2017) 012008.



- [5] Fernando Porté-Agel, Majid Bastankhah, Sina Shamsoddin. Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review. *Boundary-Layer Meteorology* (2020) 174:1–59.
- [6] Ricardo Castillo, Suhas Pol. Wind tunnel studies of wind turbine yaw and speed control effects on the wake trajectory and thrust stabilization. *Renewable Energy* 189 (2022) 726-733.
- [7] A. R. Wittwer, R. Dorado, G. Alvarez y Alvarez, G. A. Degrazia, A. M. Loredou-Souza, B. Bodmann, Flow in the Wake of Wind Turbines: Turbulence Spectral Analysis by Wind Tunnel Tests, *American Journal of Environmental Engineering*, 6(4A): 109-115, 2016.
- [8] Wittwer; Dorado; Loredou-Souza; Bones; Capeller; Contini; Bodmann; Degrazia. Características da esteira turbulenta do modelo de um aerogerador. *ciência e natureza*, v. 40, p. 155-161, 2018.
- [9] WITWTER, A. R.; DORADO, R.; LOREDO-SOUZA, A. M.; BODMANN, B. E. J.; DEGRAZIA, G. A.; BONES, A. P.; CAPELLER, B.; CONTINI, A. Fluctuating Velocity Measurements in the Turbulent Wake of a Wind Turbine Model. *American Journal of Environmental Engineering*, v. 8, p. 105-111, 2018.
- [10] M. A. Zúñiga Inestroza, J. M. Mattuella, A R Wittwer, A. M. Loredou-Souza. Wind tunnel experiments for investigating wake effects in atmospheric boundary layers using a simplified miniature model wind turbine. *The Science of Making Torque from Wind (TORQUE 2022)* IOP Publishing. *Journal of Physics: Conference Series* 2265, 2022.
- [11] Empresa de Pesquisa Energética-EPE. Brazilian Offshore Wind Roadmap: Learn about the outlook for offshore wind power development in the country, 2020 (<https://www.epe.gov.br/>).
- [12] Gundtoft, S. (2009), "Wind turbines", University College of Aarhus
- [13] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2011). *Wind energy handbook*.
- [14] Energía del viento y diseño de turbinas eólicas (1994). Ricardo A. Bastianon
- [15] Milich, F., Chuaiere, M., Wittwer, A., Alvarez y Alvarez, G., Veroli, G., Basterra, J., Adotti, M. "Desarrollo de modelos a escala reducida para el análisis aerodinámico de aerogeneradores". XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Universidad Nacional de San Juan. 2017.
- [16] [Drela M. \(1989\) XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils.](#)
- [17] Software SciLab, paquete [XCOS](#).
- [18] [Software Octave GNU](#)
- [19] Ogata, K. (1988). *Ingeniería de Control Moderna* (3a. ed.). Madrid: Prentice Hall Hispanoamericana.