

# Simulador de la operación de parques eólicos

Martín Draper  
*Facultad de Ingeniería,  
UDELAR*  
mdraper@fing.edu.uy

Andrés Guggeri  
*Facultad de Ingeniería,  
UDELAR*  
andresguggeri@gmail.com

Gabriel Usera  
*Facultad de Ingeniería,  
UDELAR*  
gusera@fing.edu.uy

***Palabras clave – energía eólica, mecánica de los fluidos computacional, aerogenerador, estelas***

## 1. INTRODUCCIÓN

La energía eólica ha tenido un gran desarrollo en los últimos años, con tasas de crecimiento próximas a 20% [1]. Uruguay ha tenido un desarrollo muy importante en los últimos años [2], alcanzando una potencia instalada de aproximadamente 870MW, siendo la demanda pico del orden de 1940MW.

La simulación del campo de vientos con presencia de aerogeneradores es requerida en la etapa de desarrollo de un parque eólico a fin de realizar una evaluación energética del proyecto así como para valorar la adecuación de un aerogenerador a un sitio, presentando potenciales aplicaciones durante la vida útil de un parque eólico. En este sentido, la utilización de códigos de mecánica de los fluidos computacional (CFD) para la resolución del flujo y la representación de aerogeneradores constituye el estado del arte [3].

La simulación de la capa límite atmosférica con presencia de aerogeneradores en el marco de mecánica de los fluidos computacional ha presentado importantes avances, destacándose la utilización de simulación de grandes vórtices (LES) [4] y modelos del tipo disco actuador para representar los rotores de los aerogeneradores, en lugar de utilizar una representación directa de la geometría a partir de la malla debido a su elevado costo

computacional [3]. Este trabajo presenta los avances realizados por el Grupo de Mecánica de los Fluidos (GMFC) en el desarrollo de un simulador de la operación de parques eólicos.

El trabajo se organiza de la siguiente manera: en 2 se describe el problema de interés, a continuación en 3 se detalla la metodología seguida presentando el código `caffa3d.MBRi`, posteriormente en 4 se presentan los casos de estudio considerados, en 5 los resultados obtenidos y en 7 las conclusiones junto a líneas futuras de desarrollo.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El costo computacional asociado a la resolución conjunta de la capa límite sobre las palas del rotor y de la capa límite atmosférica (CLA) es demasiado alto para orientar una simulación de la CLA con presencia de aerogeneradores resolviendo todas las escalas presentes.

En lo que concierne a la resolución del flujo, en el marco de LES este problema se aborda mediante la aplicación de un filtro que retiene a partir de ciertas escalas, dado que las escalas menores son más homogéneas y a priori más fáciles de modelar de forma de considerar la interacción entre escalas [4].

Respecto a la representación de los aerogeneradores, recientemente se han desarrollado modelos del tipo disco actuador para representar el rotor de un aerogenerador a un costo admisible [3]. Dentro de estas estrategias se destaca: Actuator Disk Model

with Rotation (ADM-R) [5][6], Actuator Line Model (ALM) [7][8].

El ALM ha sido validado bajo diferentes configuraciones [7][8][9][10][11]. En particular en [11] se utiliza el ALM con resoluciones espaciales y pasos temporales mayores a lo generalmente recomendado, obteniendo resultados aceptables, tanto al caracterizar las estelas generadas como la performance energética, flexibilizando los requerimientos usuales. De esta forma, esta estrategia permite simular la operación de un parque eólico a un costo admisible, permitiendo su uso para valorar situaciones de interés así como para el desarrollo de herramientas de proyecto/gestión con requerimientos de menor costo.

### 3. METODOLOGÍA

El GMFC ha desarrollado el código de CFD `caffa3d.MBRi`. `caffa3d.MBRi` es un código abierto, que utiliza el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de balance de cantidad de movimiento, de balance de masa para un fluido viscoso incompresible, incluyendo la ecuación de balance de un escalor pasivo en caso de corresponder. Este código se inspira en el modelo de dos dimensiones presentado en [12].

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \rho \frac{\partial u}{\partial t} d\Omega + \int_A \rho u (\vec{v} \cdot \hat{n}_S) dA \\ = \int_{\Omega} \rho \beta (T - T_{ref}) \vec{g} \cdot \hat{e}_1 d\Omega \\ + \int_A -p \hat{n}_S \cdot \hat{e}_1 dA \\ + \int_A (2\mu S \cdot \hat{n}_S) \cdot \hat{e}_1 dA \end{aligned} \quad Eq. 3-1$$

$$\int_A (\vec{v} \cdot \hat{n}_S) dA = 0 \quad Eq. 3-2$$

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} d\Omega + \int_A \rho \phi (\vec{v} \cdot \hat{n}_S) dA \\ = \int_A \Gamma (\nabla \phi \cdot \hat{n}_S) dA \end{aligned} \quad Eq. 3-3$$

donde

- $\vec{v} = (u, v, w)$  velocidad del fluido
- $\rho$  densidad del fluido
- $\beta$  coeficiente de expansión térmico
- $T$  temperatura del fluido
- $T_{ref}$  temperatura de referencia
- $\vec{g}$  aceleración de la gravedad
- $p$  presión
- $\mu$  viscosidad dinámica del fluido
- $S$  tensor de velocidad de deformación
- $\phi$  escalar pasivo
- $\Gamma$  coeficiente de difusión del escalar pasivo

El dominio se discretiza en bloques no estructurados de malla estructurada. La división del dominio en bloques es la base de la estrategia de paralelismo mediante MPI.

Cada ecuación de balance se discretiza y linealiza, si corresponde, obteniendo una ecuación lineal que relaciona el valor de la variable de interés en el centro de cada volumen de control que compone la malla con el de sus seis vecinos. De esta forma, cada ecuación de balance constituye un sistema de ecuaciones lineales a resolver. Para el acople entre el campo de velocidades y el campo de presiones se utiliza el método SIMPLE [12].

Por más detalles ver [13] [14].

Recientemente, se han incorporado en el código `caffa3d.MBRi` diferentes estrategias para representar la presencia de aerogeneradores en

una simulación [15]. A continuación se presenta el modelo ALM.

En el ALM cada pala que compone el rotor se representa por una línea que gira a la misma velocidad angular, de esta forma un aerogenerador "convencional" tripala de eje horizontal se representa por tres líneas separadas 120° en dirección azimutal que giran a la misma velocidad angular que el rotor. Cada línea se discretiza en N secciones radiales, para cada sección radial se conoce la geometría de la pala (cuerda, ángulo de torsión, perfil aerodinámico con sus correspondientes coeficientes de sustentación y arrastre). De esta forma, en cada sección radial se tiene el siguiente esquema:

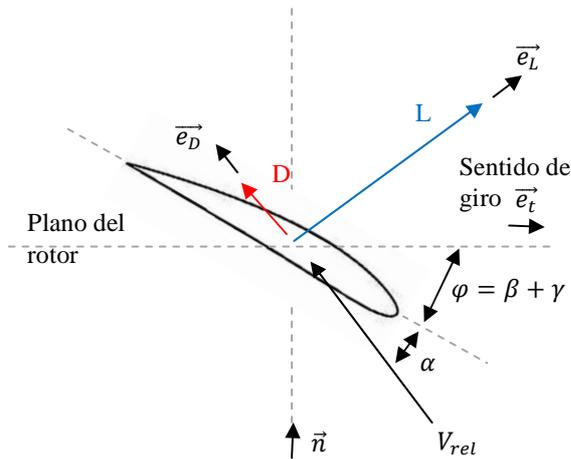


Fig. 1. Sección radial en una pala.

A partir de la velocidad local se determina la velocidad relativa y con ella el ángulo de ataque que determina los coeficientes de sustentación y arrastre, calculando la fuerza en cada sección radial como

$$f = -\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2 c (C_L \hat{e}_L + C_D \hat{e}_D) dr \quad \text{Eq. 3-4}$$

donde

- $\rho$  densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )
- $V_{rel}$  velocidad relativa (m/s)
- $c$  longitud de la cuerda (m)
- $C_L$  coeficiente de sustentación

- $C_D$  coeficiente de arrastre
- $\hat{e}_L$  vector unitario con dirección de la fuerza de sustentación
- $\hat{e}_D$  vector unitario con dirección de la fuerza de arrastre
- $dr$  longitud de pala de la sección radial (m)

Una vez que se calculan las fuerzas aerodinámicas en cada sección radial del modelo de rotor, es necesario proyectarlas a las celdas que componen el dominio. Para ello se utiliza una función de proyección tipo Gaussiana, donde el factor de ponderación de cada fuerza depende de la distancia entre la celda y la sección radial correspondiente.

Actualmente los aerogeneradores regulan su operación mediante ajuste de velocidad de giro, orientación y pitch según condiciones ambientales. En este sentido, se ha incorporado un algoritmo de control de velocidad de giro adaptando el propuesto en [18] para el ADM-R.

#### 4. CASOS DE ESTUDIO

El objetivo de la herramienta desarrollada consiste en simular el campo de vientos con presencia de aerogeneradores, centrado en caracterizar las estelas generadas, principalmente déficit de velocidad media e intensidad de turbulencia, así como la performance energética. De esta forma, como casos de validación se consideran dos buscando cubrir la temática de interés.

En primer lugar se considera la campaña experimental realizada con un modelo de aerogenerador en túnel de viento sujeto a flujo tipo CLA en la entrada utilizada como caso de estudio en [6] (caso A). El modelo de aerogenerador tiene un rotor de tres palas de 0.150m de diámetro, siendo su altura de buje de 0.125m. El flujo en la entrada tiene una velocidad media a altura de buje de 2.2m/s y una intensidad de turbulencia de 8%. Asimismo, la velocidad de giro del rotor es fija, 1120RPM,

de forma de obtener una velocidad en punta de pala (tip speed ratio, TSR) similar a la presente en aerogeneradores de gran porte convencionales. El objetivo de este caso es valorar la capacidad de la herramienta para caracterizar la estela generada por el modelo de aerogenerador.

El segundo caso de validación utilizado consiste en una fila del parque eólico offshore Horns Rev. Este parque eólico consta de 80 aerogeneradores Vestas V80, de 2.0MW de potencia y 70m de altura de buje, dispuestos en una configuración de 8 x 10 separados siete diámetros (7D). Se cuenta con información de la potencia normalizada a lo largo de una fila de diez aerogeneradores cuando los aerogeneradores quedan alineados respecto a la dirección del viento incidente (contemplando diferentes rangos de dirección +/-2.5°), así como del déficit de potencia normalizada para dos aerogeneradores y diferentes direcciones del viento incidente, para estabilidad atmosférica neutra y una velocidad a altura de buje de 8.0m/s +/-0.5m/s e intensidad de turbulencia de 8%. En este caso el objetivo es evaluar la capacidad de la herramienta para estimar la potencia producida por un conjunto de aerogeneradores donde el efecto estela juega un rol relevante.

## 5. CONFIGURACIÓN NUMÉRICA

En cada caso se realiza en primer lugar una corrida precursor sin aerogenerador/es utilizando el mismo dominio que la simulación con el/los aerogenerador/es, de forma de obtener el perfil de entrada objetivo, caracterizado principalmente por su perfil vertical de velocidad longitudinal media e intensidad de turbulencia. En dicha simulación precursor se considera condiciones de borde periódicas en las caras laterales, contemplando un gradiente de presión constante como forzante. A partir de que la corrida alcanza convergencia estadística, se almacena información de un plano transversal, dicha información se utiliza como condición de

entrada en las simulaciones con aerogeneradores.

En el primer caso se considera un dominio de 4.32m x 0.72m x 0.46m, contemplando tres resoluciones espaciales uniformes en cada dirección según la siguiente tabla:

Resolución	Nx	Ny	Nz	$\Delta x$ (m)	$\Delta y$ (m)	$\Delta z$ (m)
R0	192	72	96	0.0225	0.0100	0.0048
R1	128	48	64	0.0338	0.0150	0.0072
R2	96	32	48	0.0450	0.0225	0.0096

Tabla 1. Resolución espacial. Caso A.

Para representar el rotor del modelo de aerogenerador se utiliza el ALM y ADM-R, en ambos casos con ocho secciones radiales en cada radio, usando 60 radios para discretizar el disco permeable que representa el rotor en el ADM-R. Las características geométricas del rotor se toman de [6], considerando placa plana como perfil aerodinámico. La presencia de la torre y de la góndola se modela mediante fuerzas de arrastre que se oponen al flujo, en forma similar a lo realizado en [6].

En el segundo caso se consideran dos situaciones: estela simple (interacción entre dos aerogeneradores para diferentes direcciones) y estela múltiple (alineación con diez aerogeneradores). En base a esto se utiliza un dominio de 3200m x 560m x 500m para las simulaciones con dos aerogeneradores y de 6400m x 560m x 500m para las simulaciones con diez aerogeneradores, con resolución uniforme de 25.0m y 11.7m en dirección longitudinal y transversal respectivamente, mientras que en dirección vertical se utiliza una resolución menor en la zona cercana a la superficie (altura de primer celda 3.0m, coeficiente de expansión 1.027). para representar el rotor de cada aerogenerador se utiliza el ALM, contemplando diez secciones radiales. Las características geométricas de las palas se toman de [18], mientras que la relación entre torque aerodinámico y RPM del rotor, input necesario del algoritmo de control de

velocidad de giro, se obtiene de datos del SCADA del parque eólico Caracoles. Para valorar dependencia de los resultados con la malla se simula la situación de diez aerogeneradores alineados considerando las siguientes resoluciones:

Resolución	Nx	Ny	Nz	$\Delta x$ (m)	$\Delta y$ (m)	$\Delta z_{\min}$ (m)
R0	192	32	48	33.33	17.50	4.5
R1	256	48	64	25.00	11.68	3.0
R2	384	72	96	16.67	7.78	2.0

Tabla 2. Resolución espacial. Caso B.

## 6. PRINCIPALES RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en ambos casos de validación seleccionados. Cabe señalar que estos resultados se presentarán en la conferencia The Science of Making Torque from Wind 2016.

### a. CASO A

A continuación se presentan los resultados del caso A, caracterizando en primer lugar la velocidad longitudinal media en la estela del modelo de aerogenerador. En la siguiente figura se presenta, para diferentes distancias respecto al plano del rotor, el perfil vertical de la velocidad longitudinal media en un plano longitudinal que pasa por el centro del rotor.

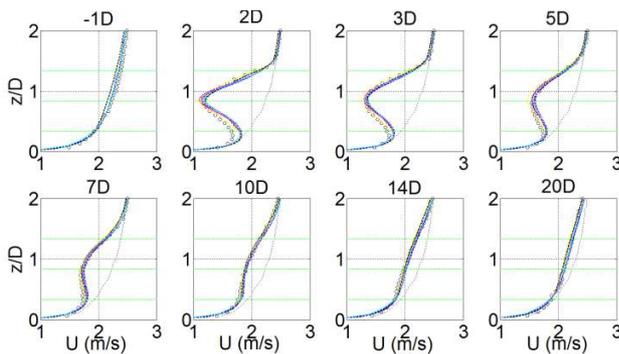


Fig. 2. Velocidad longitudinal media a diferentes distancias del plano del rotor, en un plano vertical que pasa por el centro del rotor. Círculos negros: datos experimentales. Líneas: amarillo-ALM(R0), negro-ADM-R(R0), rojo-ALM(R1), azul-ADM-R(R1), magenta-ALM(R2), cian-ADM-R(R2).

Se observa un buen ajuste de las simulaciones a los datos experimentales, independientemente del modelo y resolución utilizadas.

En la siguiente figura se presenta la intensidad de turbulencia en las mismas posiciones. Se aprecia un ajuste razonable de la intensidad de turbulencia en la estela, sobre todo a partir de 3D de distancia del plano del rotor, captando el pico máximo de intensidad de turbulencia característico a altura máxima de punta de pala. Se identifica un mayor desvío respecto a los datos experimentales al usar la resolución más gruesa.

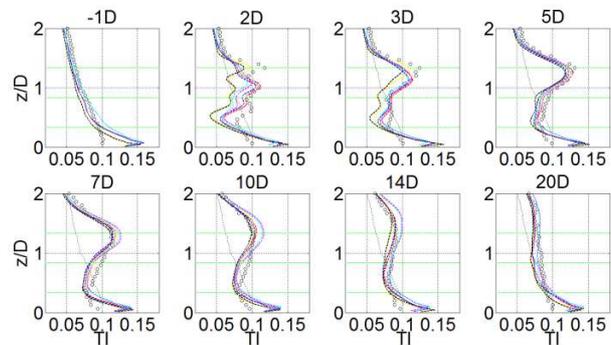


Fig. 3. Intensidad de turbulencia a diferentes distancias del plano del rotor, en un plano vertical que pasa por el centro del rotor.

A continuación se presenta para la resolución media, R1, la velocidad longitudinal media y la intensidad de turbulencia a 5D de distancia corriente abajo del plano del rotor en un plano transversal. Con ambos modelos se logran captar las principales características, encontrando un mayor déficit de velocidad media en el centro de la estela y mayor intensidad de turbulencia en la región próxima a la altura máxima de punta de pala. En ambos casos se observa que la estela no es simétrica respecto al eje del rotor, tanto por el tipo de flujo en la entrada como por la presencia de la superficie. El ALM presenta un mejor ajuste respecto al ADM-R, aunque a priori la diferencia es marginal.

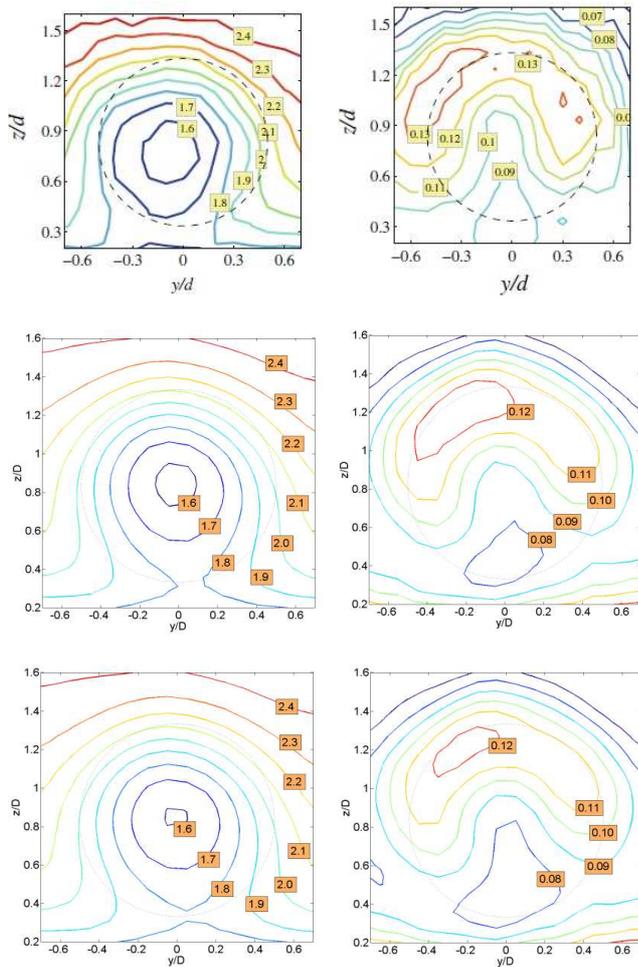


Fig. 4. Velocidad longitudinal media (izquierda) e intensidad de turbulencia (derecha) en un plano transversal a  $5D$  de distancia del plano del rotor. Datos experimentales: arriba, ALM(R1); centro, ADM-R(R1); abajo.

### b. CASO B

En primer lugar se presentan los resultados obtenidos al valorar la situación de estela simple, es decir dos aerogeneradores interactuando, caracterizando dicha interacción mediante el déficit de potencia normalizada. En todas las simulaciones realizadas se considera el borde W del dominio como borde de entrada donde se impone el flujo obtenido de la corrida precursor. Para simular diferentes direcciones de viento incidente se procede según la siguiente

figura, variando la posición relativa de los aerogeneradores, manteniendo su distancia.

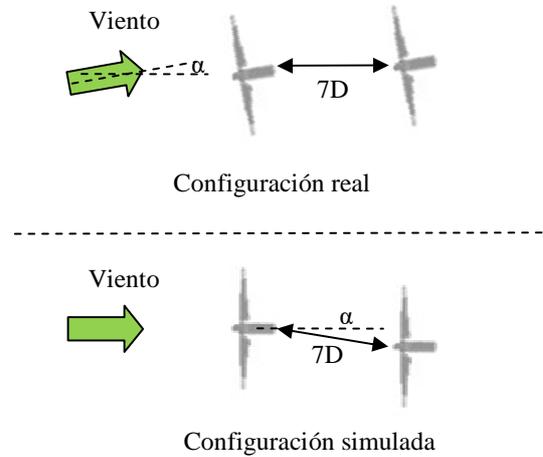


Fig. 5. Esquema utilizado para simular diferentes direcciones de viento incidente.

En la siguiente figura se presenta el déficit de potencia normalizada para diferentes direcciones del viento incidente. En azul se representan los resultados obtenidos con el código desarrollado, mientras que en verde se presentan los valores medios calculados a partir de datos de SCADA, incluyendo con sombreado de distintas tonalidades de verde 1, 2 y 3 incertidumbres estándar. Asimismo, en la figura se incluyen resultados de otros códigos/modelos para comparación. Se observa que la herramienta desarrollada logra captar el andamio esperado, presentando un pico en el déficit de potencia cuando los aerogeneradores se encuentran alineados respecto al viento incidente, disminuyendo a medida que se aleja de esa situación. En general se obtienen mejores resultados que los obtenidos con otras estrategias, en particular modelos analíticos habitualmente utilizados en el sector para la valoración del efecto estela en un conjunto de aerogeneradores.

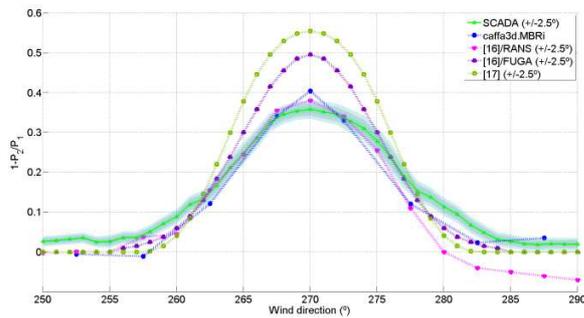


Fig. 6. Déficit de potencia entre aerogenerador 1 y 2 dentro de una fila del parque eólico Horns Rev.

A continuación se presenta la potencia normalizada a lo largo de una línea de diez aerogeneradores. En la gráfica superior se consideran diferentes direcciones del viento incidente dentro del rango  $270^\circ \pm 2.5^\circ$ , incluyendo el promedio obtenido con los datos de SCADA, representando en sombreado zonas de 1, 2 y 3 incertidumbres estándar. Se observa que la mayor diferencia de potencia normalizada se da entre el primer y segundo aerogenerador, siendo menores los cambios corriente abajo. En la gráfica inferior se presenta el promedio obtenido, junto a los datos de SCADA y resultados de otras estrategias, similares al código presentado [18][19] y de menor complejidad/costo computacional [16][17]. A partir de estos resultados se concluye que la herramienta desarrollada estima razonablemente la potencia de un conjunto de aerogeneradores interactuando, presentando ventajas respecto a esquemas más simples.

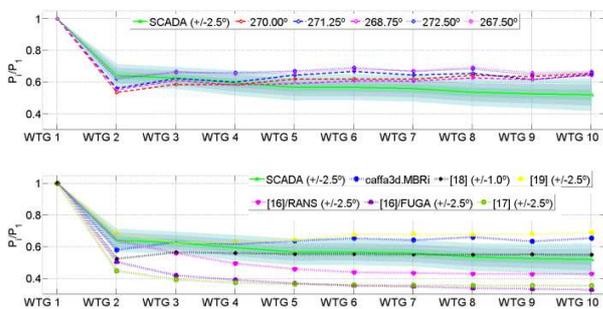


Fig. 7. Potencia normalizada a lo largo de línea de diez aerogeneradores en parque eólico Horns Rev para diferentes direcciones del viento incidente (superior) y promedio (inferior).

En la siguiente figura se presenta, para dirección  $270^\circ$  del viento incidente, la potencia normalizada obtenida con tres resoluciones espaciales diferentes. Se observa cierta influencia de la resolución, no obstante el andamio es similar y en todos los casos los resultados se encuentran dentro de la dispersión de los datos de SCADA.

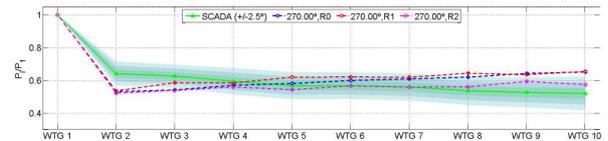


Fig. 8. Potencia normalizada a lo largo de línea de diez aerogeneradores en parque eólico Horns Rev para diferentes resoluciones espaciales.

## 7. CONCLUSIONES

Existen diferentes motivos debido a los cuales es necesario simular el campo de vientos con presencia de aerogeneradores, desde valorar el recurso eólico en un emplazamiento y realizar una evaluación energética de un proyecto a analizar una determinada situación durante la operación de un parque eólico. En este sentido, el estado del arte consiste en simular mediante mecánica de los fluidos computacional el campo de vientos representando los aerogeneradores mediante modelos del tipo disco actuador.

Este trabajo presenta los avances realizados por el Grupo de Mecánica de los Fluidos Computacional en el desarrollo de un simulador de la operación de parques eólicos. Se presentan las principales características del código desarrollado, validándolo con casos reconocidos internacionalmente, enfocados por un lado en caracterizar la estela generada por un aerogenerador aislado y por otro lado en determinar la interacción entre aerogeneradores de un parque eólico offshore a partir de la potencia generada. En ambos casos se encuentra un buen ajuste de los resultados de la simulación respecto a los datos experimentales disponibles.

A futuro se plantea continuar evaluando la capacidad de la herramienta para simular el

campo de vientos con presencia de aerogeneradores, contemplando otros parques eólicos. Asimismo, se plantea contemplar otras situaciones de interés, como diferentes condiciones de estabilidad atmosférica, así como incluir otras estrategias de control de aerogeneradores, evaluando la capacidad de la herramienta para valorar cargas sobre componentes claves.

#### REFERENCIAS

- [1] Global Wind Energy Council 2016 Global wind Report Annual Market Update 2015 (Brussels).
- [2] Cornalino E 2015 Descripción del comportamiento del recurso eólico nacional para su modelado dentro del SIN *Tesis Maestría en Energía*, UDELAR.
- [3] Sanderse B, van del Pijl S P and Koren B 2011 Review of computational fluid dynamics for wind turbine wake aerodynamics *Wind Energy* **14** 799-819.
- [4] Sagaut P 2006 Large eddy simulation for incompressible flows *Springer*.
- [5] Mikkelsen R 2003 Actuator Disc Methods Applied to Wind Turbines *PhD tesis*, Technical University of Denmark.
- [6] Wu Y T and Porté-Agel F 2011 Large-eddy simulation of wind-turbine wakes: evaluation of turbine parametrisations *Boundary Layer Meteorology* **138** 345-66.
- [7] Sørensen J N, Shen W Z 2002 Numerical modelling of wind turbine wakes *Journal of Fluids Engineering* **124** 2 393-99.
- [8] Troldborg N 2008 Actuator Line Modeling of Wind Turbine Wakes *PhD tesis*, Technical University of Denmark.
- [9] Churchfield M J, Lee S, Moriarty P, Martínez L A, Leonardi S, Vijayakumar G and Brasseur J G 2012 A large-eddy simulation of wind-plant aerodynamics *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting* (Nashville, Tennessee).
- [10] Porté-Agel F, Lu H and Wu Y T 2010 A large-eddy simulation framework for wind energy applications *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering* (North Carolina).
- [11] Draper M, Usera G 2015 Evaluation of the actuator line model with coarse resolutions *Wake Conference* (Visby).
- [12] Ferziger J H, Peric M 2002 Computational methods for fluid dynamics *Springer*, Berlín.
- [13] Usera G, Vernet A, Ferré J A 2008 A parallel block-structured finite volume method for flows in complex geometry with sliding interfaces *Flow, Turbulence and Combustion* **81** 471-495.
- [14] Mendina M, Draper M, Kelm Soares A P, Narancio G and Usera G 2014 A general purpose parallel block structured open source incompressible flow solver *Cluster Computing* **17** 2 231-41.
- [15] Draper M 2015 Simulación del campo de vientos y de la interacción entre aerogeneradores *PhD tesis*, UDELAR.
- [16] Réthoré P-E, Hansen K S, Barthelmie R J, Pryor S C, Sieros G, Prospathopoulos J, Palma J M L M, Gomes V C, Schepers G, Stuart P, Young T, Rodrigo J S, Larsen G C, Larsen T J, Ott S, Rathmann O, Peña A, Gaummond M, Hasager C B 2013 Benchmarking of wind farm scale wake models in the EERA - DTOC Project International Conf. on Aerodynamics of Offshore Wind Energy Systems and Wakes (Lyngby).
- [17] Katic I, Hojstrup J, Jensen N O 1986 A Simple Model for Cluster Efficiency *European Wind Energy Association Conference and Exhibition* (Roma).
- [18] Wu Y T, Porté-Agel F 2015 Modeling turbine wakes and power losses within a wind farm using LES: An application to the Horns Rev offshore wind farm *Renewable Energy* **75** 945-55.
- [19] Eriksson O, Mikkelsen M, Hansen K S, Nilsson K, Ivanell S 2012 Analysis of long distance wakes of Horns Rev I using actuator disc approach *The Science of Making torque from Wind* (Oldenburg).