

UN NUEVO PARADIGMA PARA EL DISEÑO DE PARQUES EÓLICOS BASADO EN EL ACOPLAMIENTO MESO-MICRO



Javier Sanz Rodrigo
Departamento de Energía Eólica de CENER (Centro Nacional de Energías Renovables)

Resumen

El acoplamiento mesoescala-microescala entre modelos meteorológicos e ingenieriles de viento, permite mejorar las capacidades de simulación de las herramientas de diseño empleadas en energía eólica, gracias a una caracterización más realista de la relación existente entre los fenómenos atmosféricos y las condiciones de viento existentes en los emplazamientos. El proyecto MesoWake ha desarrollado una metodología de acoplamiento relativamente simple para permitir a los ingenieros del viento superar el paradigma tradicional de sus herramientas, que están basadas en condiciones de contorno idealizadas.

Palabras clave: Energía eólica, mesoescala, microescala, validación, CFD, RANS, LES, CENER

Introducción: hacia modelos integrados multidisciplinares

La beca global Marie Curie “MesoWake” ha permitido durante los últimos tres años a Javier Sanz Rodrigo, investigador senior del Centro Nacional de Energías Renovables (CENER), trabajar en el desarrollo de métodos de acoplamiento entre modelos meteorológicos y modelos ingenieriles de simulación de viento, basados en mecánica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés). La beca se ha realizado en colaboración con el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL), el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) y el Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS). Tradicionalmente estos modelos se han desarrollado en paralelo, sin apenas interacción, debido al alto coste computacional que supone el proceso de simulación desde escalas climáticas (mesoescalas), del orden de decenas de kilómetros, a escalas de turbulencia atmosférica (microescalas) del orden de metros. Conforme a las capacidades de supercomputación actuales ya es posible plantearse el reto de unificar esta cadena de modelos a partir de una mayor interacción entre la comunidad meteorológica y la de ingeniería eólica.

En el contexto de la energía eólica la necesidad de acometer modelización multiescalar es el resultado del desarrollo de la tecnología que, a lo largo de las últimas cuatro décadas, ha explotado el escalado del rotor hasta llegar a diámetros de más de 150 m y alturas de buje por encima de los 100 m. Por otro lado, los grandes parques eólicos desarrollados hoy en día abarcan áreas de más de 10 km e interactúan en gran medida con la capa límite atmosférica. Estas grandes escalas de simulación suponen un reto para los modelos ingenieriles tradicionales que consideran al parque eólico dentro de un entorno idealizado microescalar donde se aplican las teorías de capa límite superficial. Estas simplificaciones drásticas son, a menudo, fuentes de incertidumbre que penalizan la financiación de los proyectos eólicos. Se espera que mediante el uso de modelos con un mayor nivel de integración multidisciplinar se consigan reducir los costes de la energía eólica a niveles competitivos con respecto a las energías convencionales y, de esta manera, alcanzar los objetivos de implantación de renovables que son necesarios en la lucha contra el cambio climático. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), la energía eólica debería poder suministrar un 11% de la energía global en el año 2030 a nivel mundial, frente al 2% que se registraba en el año 2010 (IRENA, 2016). Este escenario sitúa a la eólica como la fuente de energía con mayor crecimiento anual en los próximos años.

MesoWake se ha desarrollado en paralelo a dos programas de investigación que se realizaban en Estados Unidos y en Europa y que tienen como objetivo una mejorara sustancial del conocimiento de la física de la atmósfera aplicada al entorno de los parques eólicos. Estas mejoras tienen un potencial de reducción de pérdidas de energía de un 20% de acuerdo al programa Atmosphere to Electrons (A2e) del Departamento de Energía de Estados Unidos. En Europa, el proyecto del Nuevo Atlas Eólico Europeo (NEWA), financiado conjuntamente por la Comisión Europea y 8 entidades nacionales que en el caso de España es a través del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, pretende reducir las incertidumbres en la evaluación del recurso por debajo del 10%. Durante los próximos años estos programas de I+D darán como resultado una nueva generación de modelos con capacidad de simulación multiescalar, validados a partir de experimentos de alta calidad y envergadura. La evaluación sistemática mediante comparación de modelos se está ofreciendo internacionalmente bajo el paraguas de “Wakebench”, la Tarea 31 de la Agencia Internacional de la Energía (IEA-Wind) liderada por CENER.

Metodología: el método de las tendencias

Trabajar entre estos dos programas de I+D ha permitido entender bien las necesidades de modelización según las distintas aplicaciones dentro de la eólica. El proyecto NEWA se centra en el desarrollo de modelos

de viento ingenieriles para la evaluación del recurso (producción anual media esperada, etc.) y la clasificación de emplazamientos de acuerdo a la norma IEC 61400-1 (turbulencia media, etc.). Por otro lado, el proyecto A2e/Meso-Micro se centra en el desarrollo de modelos de alta fidelidad que permitan simular, de la forma más realista posible, el transporte de turbulencia desde mesoescala a microescala, para acoplar el campo fluido resultante con modelos aeroelásticos y así poder predecir la respuesta de los aerogeneradores (cargas en la estructura, etc.). En el contexto de modelización CFD estaríamos distinguiendo entre modelos RANS

(*Reynolds-Averaged Navier Stokes*) y modelos LES (*Large-Eddy Simulation*), según el distinto tratamiento que hacen de la turbulencia, siendo los modelos LES entre 10 y 100 veces más costosos que los modelos RANS. En cualquier caso, ambas familias de modelos tienen como reto común la implementación de condiciones de contorno de entrada no idealizadas, que permitan simular condiciones de forzamiento mesoescalares reales (Sanz Rodrigo et al., 2016).

Al contrario que en CFD, donde existen una gran variedad de códigos, en el ámbito de la investigación en torno a modelos mesoescalares predomina

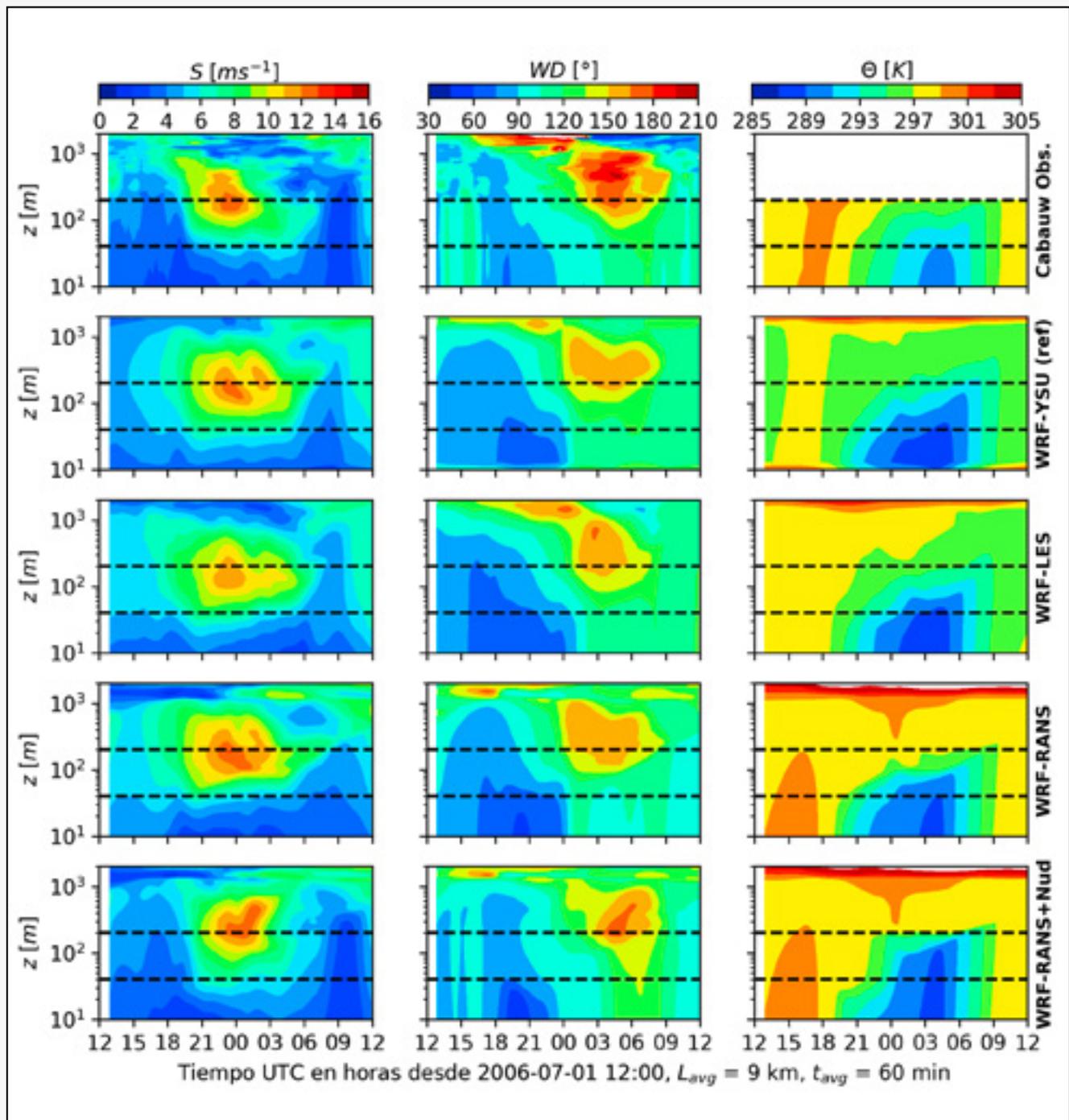


Figura 1. Gráfico de contorno tiempo-altura de la velocidad media horizontal (S), dirección de viento (WD) y temperatura potencial (Θ) de las observaciones en Cabauw y las simulaciones con los modelos: mesoescalar WRF-YSU a 3 km de resolución (referencia de la que se obtienen las tendencias), meso-micro dinámico WRF-LES a 12.5 m de resolución, meso-micro WRF-RANS usando tendencias con el modelo CFD Wind de CENER, y añadiendo un término de *nudging* con una constante de tiempo de 10 min para mitigar el bias (WRF-RANS+Nud). Las dos líneas discontinuas delimitan la extensión de un rotor hipotético de 160 m de diámetro y altura de buje de 120 m.

el uso del modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*), desarrollado por NCAR en código libre. Por este motivo la solución desarrollada en MesoWake parte del modelo WRF que, por otro lado, también es el modelo que se empleará en la producción del atlas eólico europeo. La solución utilizada se inspira en el concepto de “tendencias” de WRF: el desglose de la ecuación de la cantidad de movimiento en los distintos términos de forzamiento, que calcula WRF en cada iteración para resolver el campo fluido. De estos términos nos interesan las componentes del gradiente de presión y de advección para evaluar el forzamiento mesoescalar. Estas tendencias se obtienen fácilmente en los ficheros de salida de WRF (Lehner, 2012) y se deben filtrar para su uso como datos de entrada del modelo microescala. El proceso de filtrado busca eliminar las pequeñas escalas, del orden del tamaño del dominio microescala (~10-40 km), que el modelo mesoescala no resuelve bien. De esta forma, el modelo CFD parte de datos de entrada mesoescalares “limpios”, y se encarga de resolver la microescala aportando una mayor resolución de la topografía y, eventualmente, añadiendo los aerogeneradores para simular las estelas. El método permite acoplar los modelos de forma asíncrona; es decir, simular con mesoescala primero para obtener las tendencias y luego simular con CFD el episodio de interés. Al no tener que comunicar los modelos dinámicamente, no es necesario implementar complejos métodos de acoplamiento. Simplemente hay que introducir las tendencias como fuerzas volumétricas (términos fuente) en las ecuaciones de cantidad de movimiento. De forma similar, habría que introducir la advección térmica mesoescalar como un término fuente en la ecuación de la energía para poder incluir efectos térmicos generados a una escala mayor que la del dominio CFD, por ejemplo, en la simulación de brisas debido a la proximidad del mar.

Resultados: El caso de estudio GABLS3

El método de las tendencias fue empleado en el caso de estudio GABLS3 en el contexto de la evaluación de modelos de capa límite atmosférica para modelos meteorológicos (Bosveld et al., 2014). Este caso corresponde a la simulación de un ciclo diario en la torre de Cabauw en los Países Bajos y se ha empleado también para el desarrollo de modelos CFD para la eólica (Sanz Rodrigo et al., 2017a). La evaluación se realizó en torno a métricas de error, empleando variables de interés para la eólica, como por ejemplo la velocidad equivalente del rotor (REWS). Los resultados demuestran una buena consistencia de los modelos CFD, tanto RANS como LES mediante el uso de tendencias, con respecto a otras metodologías de acoplamiento dinámico (Sanz Rodrigo et al., 2017b), (figuras 1 y 2). Gracias a esta consistencia en el uso de *inputs* comunes se puede explotar la complementariedad entre RANS y LES de forma modular. Un modelo LES validado se usa, como modelo de referencia de alta fidelidad, para el diseño y calibración de modelos ingenieriles RANS. Adicionalmente, si se dispone de medidas *in situ*, se pueden usar para mitigar el *bias* del modelo de forma dinámica, como se demuestra en las figuras 1 y 2 mediante el uso de *nudging*.

Desde el punto de vista del proyecto NEWA, las tendencias formarán parte de la base de datos del Nuevo Atlas Eólico Europeo. En este sentido, las tendencias son una versión más elaborada del denominado clima eólico generalizado, que introdujo el laboratorio danés Risø (ahora dentro de la Universidad Técnica de Dinamarca) en el Atlas Eólico Europeo de 1989, como una forma de caracterizar el clima eólico, libre de los efectos locales (Troen y Petersen, 1989). Las tendencias permiten tener en cuenta la variabilidad espacio-temporal del clima eólico generalizado, con respecto a la definición original que asumía un clima eólico uniforme en equilibrio

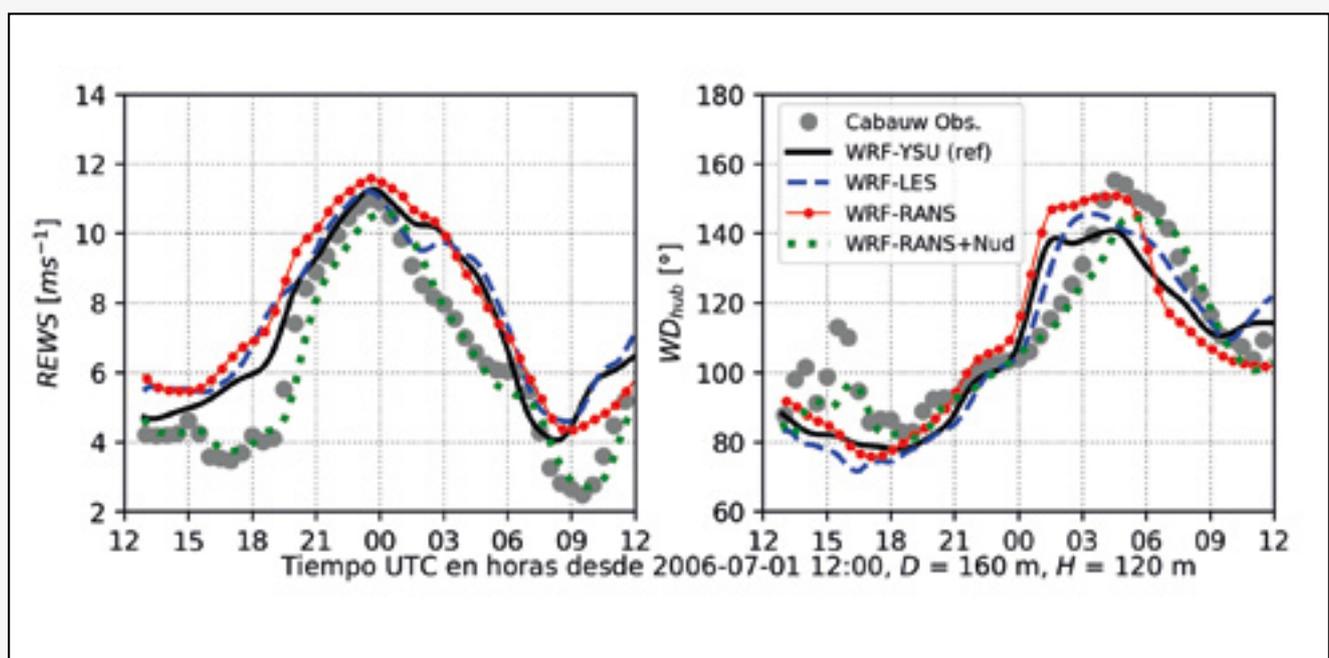


Figura 2. Evolución temporal de la velocidad equivalente de rotor (REWS) y la dirección del viento a la altura del buje, a partir de las medidas obtenidas en la torre de Cabauw y a partir de los modelos descritos en la fig.1.

(estacionario y horizontalmente homogéneo), con las condiciones de superficie.

Perspectiva

En el marco del proyecto NEWA, se está trabajando para demostrar la aplicabilidad de esta y otras metodologías meso-micro en distintos climas eólicos y en distintas condiciones de terreno (*offshore*, costa, terreno complejo, en presencia de bosques, etc.). Para ello se explotará la base de datos experimental en la definición de una jerarquía de casos de validación que permitan, de forma sistemática, cuantificar el rendimiento de los modelos de viento y su impacto en las herramientas de evaluación del recurso y diseño de parques eólicos. La estrategia de validación formará parte de la segunda edición del *Protocolo de Evaluación de Modelos* impulsado desde la IEA Task 31 Wakebench (Sanz Rodrigo y Moriarty, 2015), donde se fomentará el uso de Ciencia Abierta en la definición de los procedimientos de evaluación, tal y como se hizo en GABLS3 como caso de demostración (Sanz Rodrigo, 2017).

Reconocimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto "MesoWake" Marie Curie International Outgoing Fellowship (FP7-15 PEOPLE-2013-IOF, Comisión Europea, proyecto número 624562).

Referencias

Bosveld, F.C., Baas, P., van Meijgaard, E., de Bruijn, E.I.F., Steeneveld, G.J., y Holtslag, A.A.M. (2014). *The third GABLS intercomparison case for evaluation studies of boundary-layer models*, Part A: case selection and setup. *Boundary-Layer Meteorol.* 152: 133-156, doi: 10.1007/s10546-014-9917-3

IRENA (2016). *REmap: Roadmap for a Renewable Energy Future*, 2016 Edition. International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, www.irena.org/remap

Lehner, M. (2012). *Observations and large-eddy simulations of the thermally driven cross-basin circulation in a small, closed basin*. Ph.D. thesis, University of Utah, 2012

Mann, J., Angelou, N., Arnqvist, J., Callies, D., Cantero, E., Chávez Arroyo, R., Courtney, M., Cuxart, J., Dellwik, E., Gottschall, J., Ivanell, S., Kühn, P., Lea, G., Matos, J.C., Veiga Rodrigues, C., Palma, J.M.L.M., Pauscher, L., Peña, A., Sanz Rodrigo, J., Söderberg, S., y Vasiljevic, N. (2017). *Complex terrain experiments in the New European Wind Atlas*. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 20160101, doi: 10.1098/rsta.2016.0101

MesoWake (2017). <http://windbench.net/meso-wake-2014-2017>

Sanz Rodrigo, J. (2017). *Assessment of meso-micro offline coupling methodology based on driving CFDWind single-column-model with WRF tendencies: the GABLS3 diurnal cycle case* (Version v1.0). Zenodo, doi:10.5281/zenodo.834356

Sanz Rodrigo, J., y Moriarty, P. (2015). *WAKEBENCH Model Evaluation Protocol for Wind Farm Flow Models*. Edition 1. IEA Task 31 Report to the IEA-Wind Executive Committee. May 2015.

Sanz Rodrigo, J., Allaerts, D., Avila, M., Barcons, J., Cavar, D., Chávez Arroyo, R., Churchfield, M., Kosović, B., Lundquist, J.K., Meyers, J., Muñoz Esparza, D., Palma, J.M.L.M., Tomaszewski, J.M., Troldborg, N., van der Laan, M.P., y Veiga Rodrigues, C. (2017b). *Results of the GABLS3 diurnal cycle benchmark for wind energy applications*. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 854: 012037, doi: 10.1088/1742-6596/854/1/012037

Sanz Rodrigo, J., Chávez Arroyo, R.A., Moriarty, P., Churchfield, M., Kosović, B., Réthoré, R.-E., Hansen, K.S., Hahmann, A., Mirocha, J.D., y Rife, D. (2016). *Mesoscale-to-Microscale Wind Farm Flow Modelling and Evaluation*. *WIREs Energy Environ.*, doi: 10.1002/wene.214

Sanz Rodrigo, J., Churchfield, M., y Kosović, B. (2017a). *A methodology for the design and testing of atmospheric boundary layer models for wind energy applications*. *Wind Energ. Sci.* 2: 1-20, doi:10.5194/wes-2-1-2017

Troen, I., y Petersen, E.L. (1989) *European Wind Atlas*. Risø National Laboratory, Roskilde.