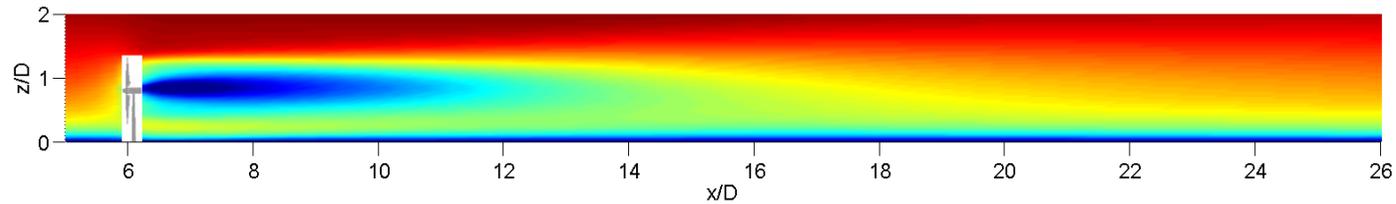
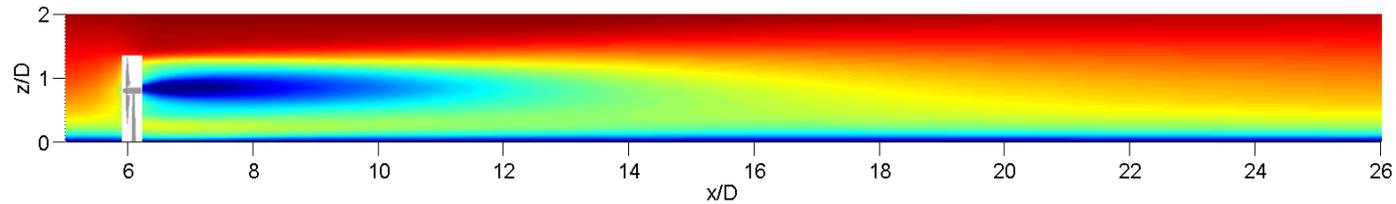


SIMULADOR DE LA OPERACIÓN DE PARQUES EÓLICOS (SOCPE)

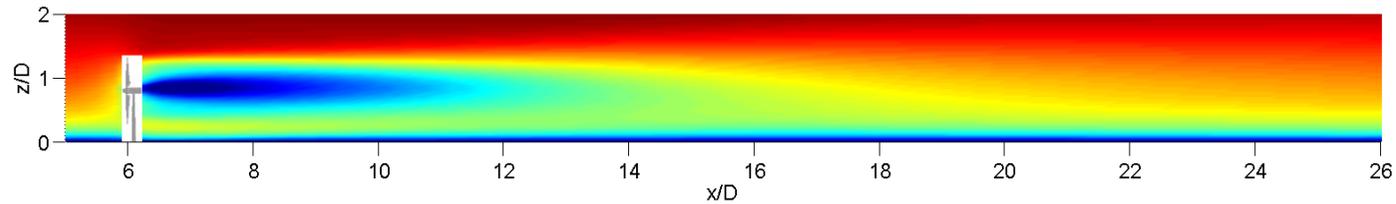
GRUPO DE MECÁNICA DE LOS
FLUIDOS COMPUTACIONAL
(GMFC)



1. Objetivo
2. Descripción del código `caffa3d.MBRi`
3. Aerogeneradores
 1. Alternativas para representar el rotor/Modelos tipo disco actuador
 2. Modelos implementados: ADM-R y ALM
4. Casos de validación
 1. Caso A: modelo de aerogenerador en túnel de viento
 2. Caso B: parque eólico offshore Horns Rev
5. Futuras líneas de investigación



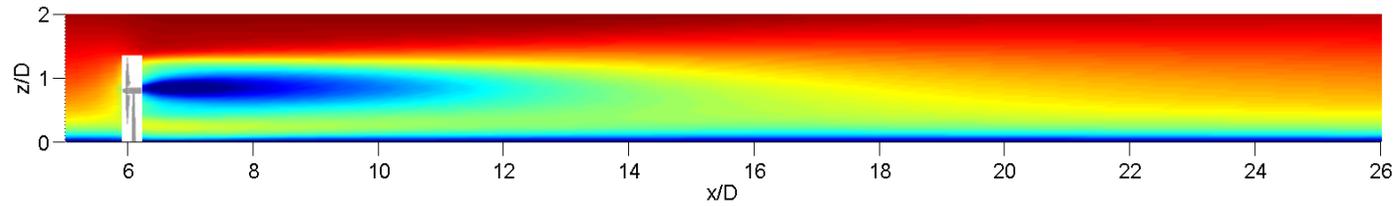
1. **Objetivo**
2. Descripción del código `caffa3d.MBRi`
3. Aerogeneradores
 1. Alternativas para representar el rotor/Modelos tipo disco actuador
 2. Modelos implementados: ADM-R y ALM
4. Casos de validación
 1. Caso A: modelo de aerogenerador en túnel de viento
 2. Caso B: parque eólico offshore Horns Rev
5. Futuras líneas de investigación



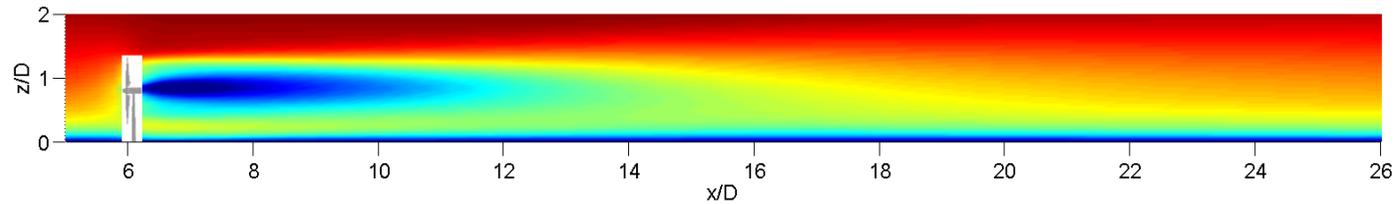
- Desarrollar una herramienta que permita simular el flujo en un parque eólico, partiendo de un código CFD abierto, desarrollado por el Grupo de Mecánica de los Fluidos Computacional (GMFC) del IMFIA, dotándolo de las capacidades para representar la presencia de aerogeneradores y la interacción entre estos.

- Este desarrollo se enfoca en:
 - Caracterizar las estelas generadas particularmente a través del déficit de velocidad resultante y la intensidad de turbulencia asociada.
 - Determinar la performance energética de los aerogeneradores considerados en una simulación.

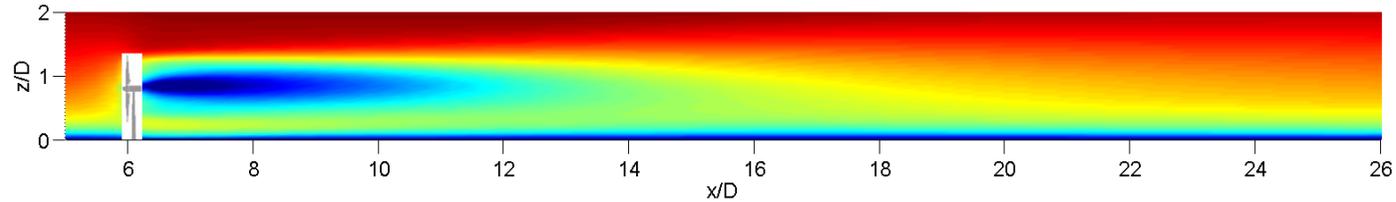
- Esta etapa constituye un primer paso en el desarrollo de un simulador virtual de parques eólicos.



1. Objetivo
2. Descripción del código `caffa3d.MBRi`
3. Aerogeneradores
 1. Alternativas para representar el rotor/Modelos tipo disco actuador
 2. Modelos implementados: ADM-R y ALM
4. Casos de validación
 1. Caso A: modelo de aerogenerador en túnel de viento
 2. Caso B: parque eólico offshore Horns Rev
5. Futuras líneas de investigación



- `caffa3d.MBRi`
 - Código abierto, utiliza método de volúmenes finitos (FV) para resolver ecuaciones de balance de cantidad de movimiento y de balance de masa para un fluido incompresible viscoso, incluyendo ecuación de balance de un escalar pasivo.
 - Discretización del dominio mediante bloques no estructurados de mallas estructuradas. Esta discretización por bloques constituye la base de la estrategia de paralelización implementada mediante MPI.
 - Propiedades geométricas y propiedades del flujo, expresadas en variables primitivas, se expresan en un sistema cartesiano almacenando la información en los centros de cada volumen de control que compone la malla (`collocated arrangement`).



□ `caffa3d.MBRi`

▣ Modelo matemático:

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

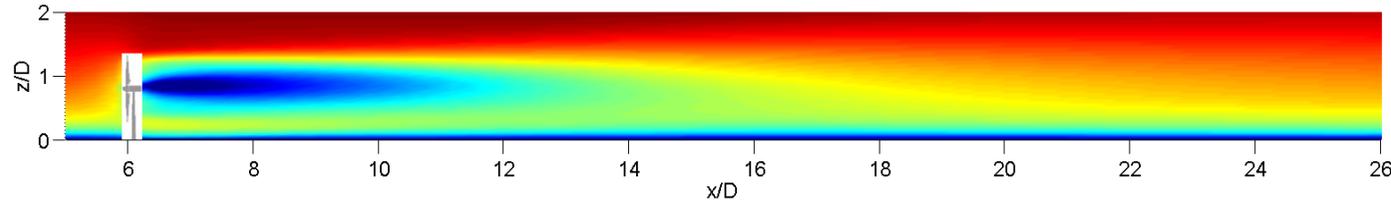
$$\int_A (\vec{v} \cdot \hat{n}_S) dA = 0$$

$$\int_{\Omega} \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} d\Omega + \int_A \rho \phi (\vec{v} \cdot \hat{n}_S) dA = \int_A \Gamma (\nabla \phi \cdot \hat{n}_S) dA$$

- ▣ Cada ecuación de balance se discretiza y linealiza (si corresponde), obteniendo una ecuación lineal que involucra el centro de cada volumen de control (P) con sus 6 vecinos (W,E,N,S,T,B).

$$A_P^{\phi} \phi_P + A_N^{\phi} \phi_N + A_S^{\phi} \phi_S + A_W^{\phi} \phi_W + A_E^{\phi} \phi_E + A_T^{\phi} \phi_T + A_B^{\phi} \phi_B = Q_P^{\phi}$$

Simulador de la Operación de Parques Eólicos (SOcPE)



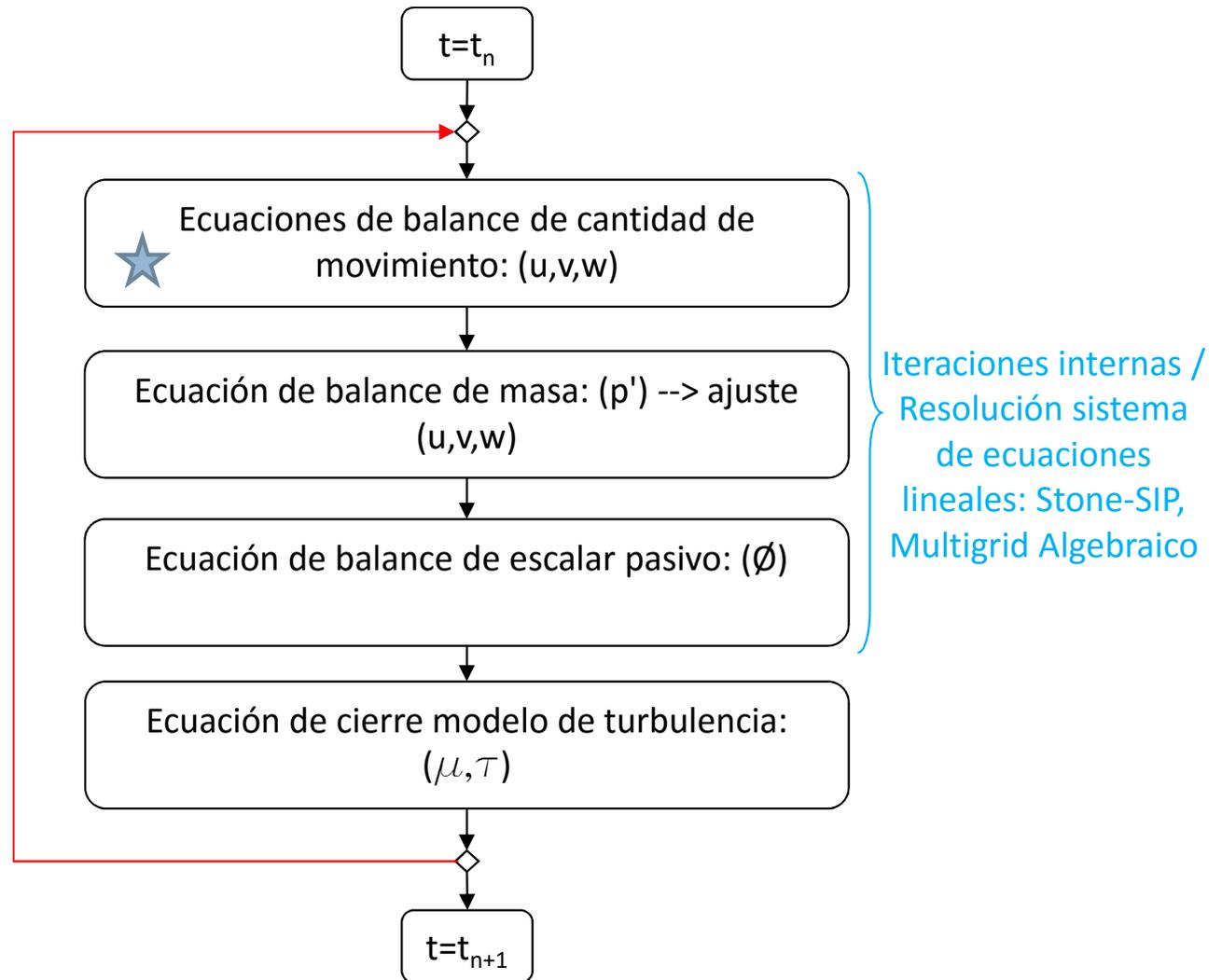
8

Descripción del código `caffa3d.MBRi`

□ `caffa3d.MBRi`

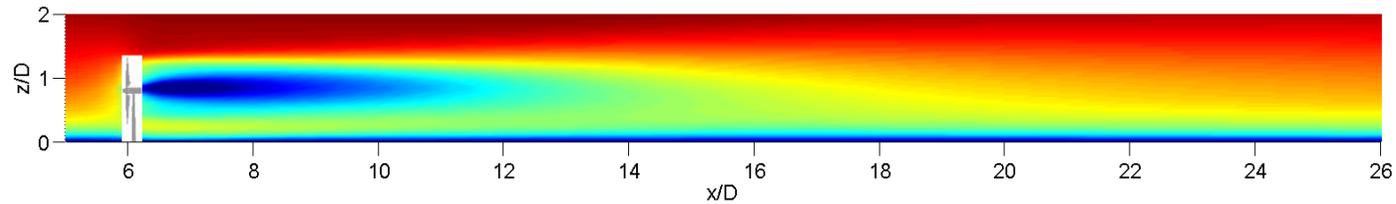
□ Esquema de resolución:

Iteraciones
externas



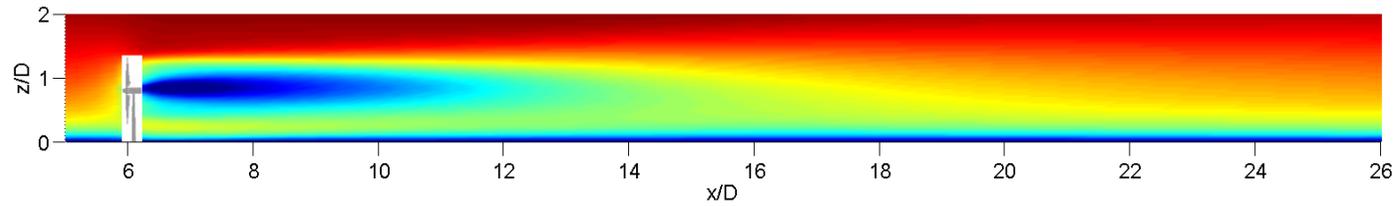
★ La representación del rotor en la simulación participa en las ecuaciones de balance de cantidad de movimiento como término fuente adicional.

□ Por más información ver Usera et al. 2008, Mendina et al. 2014.



1. Objetivo
2. Descripción del código `caffa3d.MBRi`
3. Aerogeneradores
 1. Alternativas para representar el rotor/Modelos tipo disco actuador
 2. Modelos implementados: ADM-R y ALM
4. Casos de validación
 1. Caso A: modelo de aerogenerador en túnel de viento
 2. Caso B: parque eólico offshore Horns Rev
5. Futuras líneas de investigación

Simulador de la Operación de Parques Eólicos (SOcPE)



10

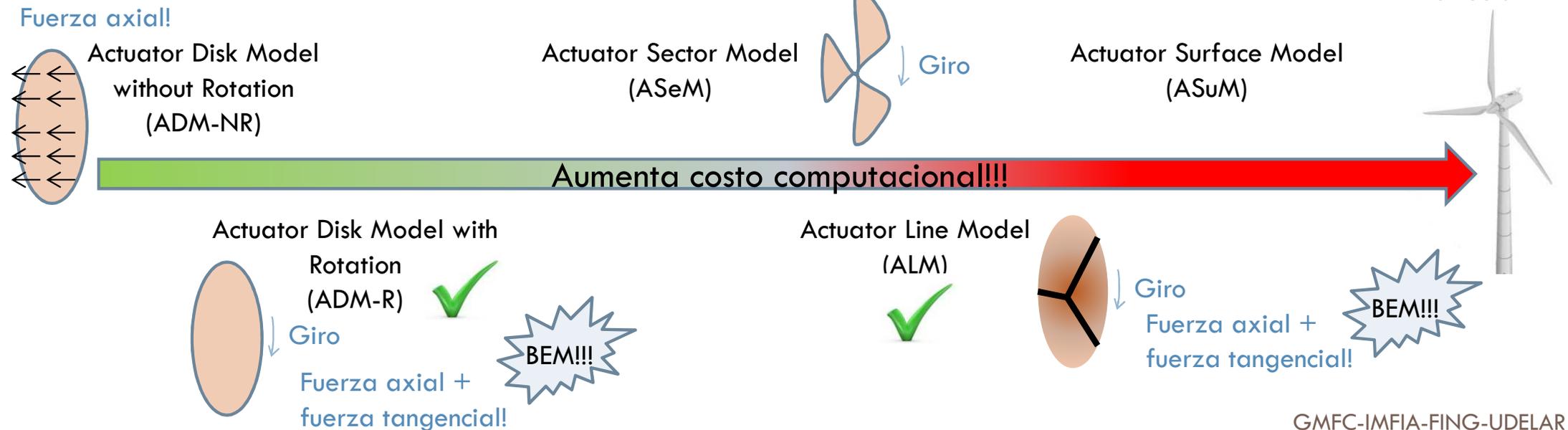
Aerogeneradores: alternativas para representar el rotor

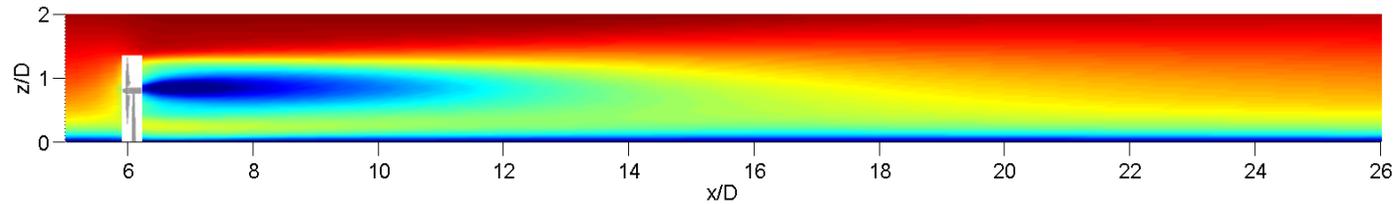
- Existen 2 alternativas para representar un rotor de aerogenerador en una simulación:

- Representación directa de la geometría mediante la malla.
- Modelo del tipo disco actuador.

Elevado costo computacional!!!

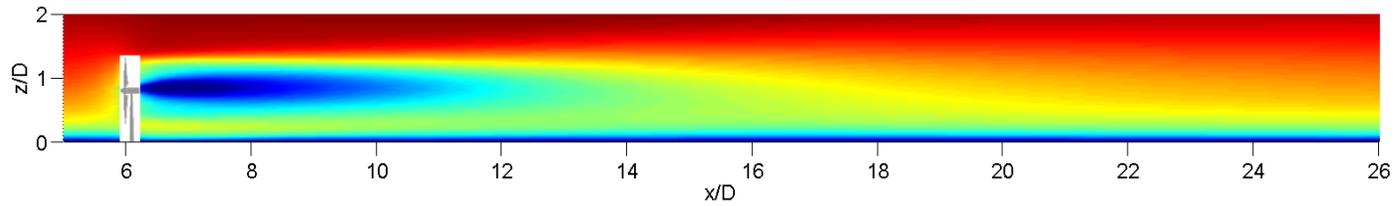
- Modelo del tipo disco actuador.





1. Objetivo
2. Descripción del código `caffa3d.MBRi`
3. Aerogeneradores
 1. Alternativas para representar el rotor/Modelos tipo disco actuador
 2. Modelos implementados: ADM-R y ALM
4. Casos de validación
 1. Caso A: modelo de aerogenerador en túnel de viento
 2. Caso B: parque eólico offshore Horns Rev
5. Futuras líneas de investigación

Simulador de la Operación de Parques Eólicos (SOcPE)

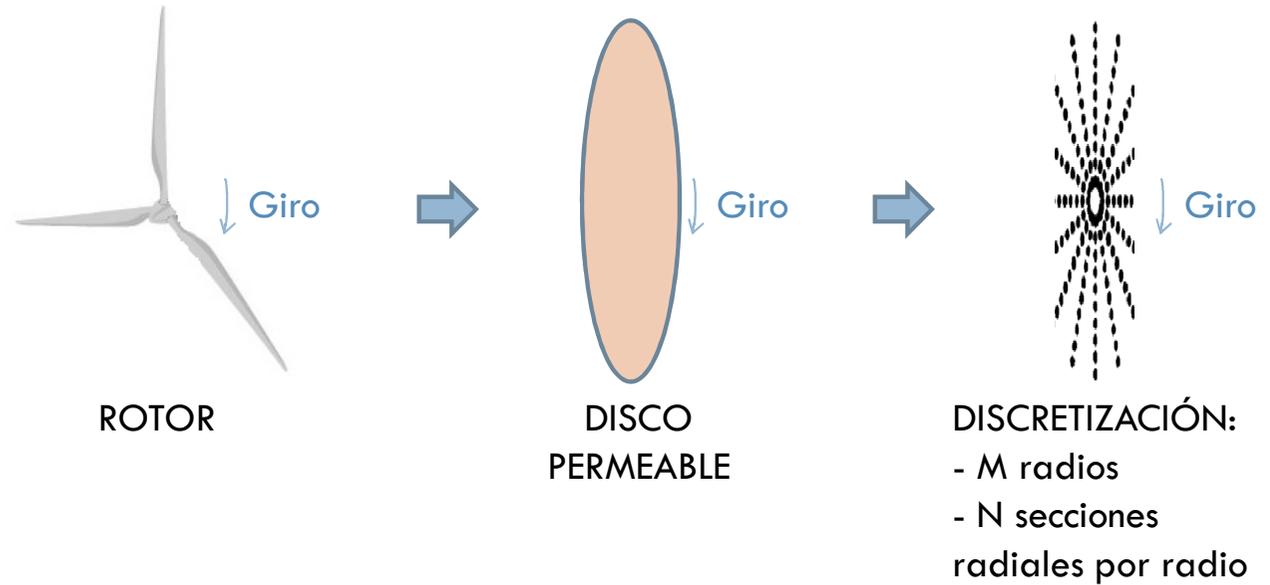


12

Aerogeneradores: modelos implementados ADM-R/ALM

ADM-R

Representación del rotor:



En cada sección radial:

Proyectar al dominio!!!

Fuerzas aerodinámicas

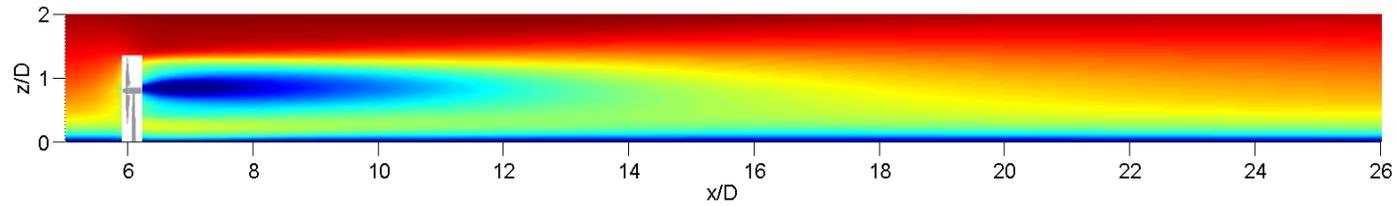
Plano del rotor

Sentido de giro

$$\vec{f} = -\frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c \frac{B}{2\pi r} (C_L \hat{e}_L + C_D \hat{e}_D) dA$$

BEM!!!

Simulador de la Operación de Parques Eólicos (SOcPE)

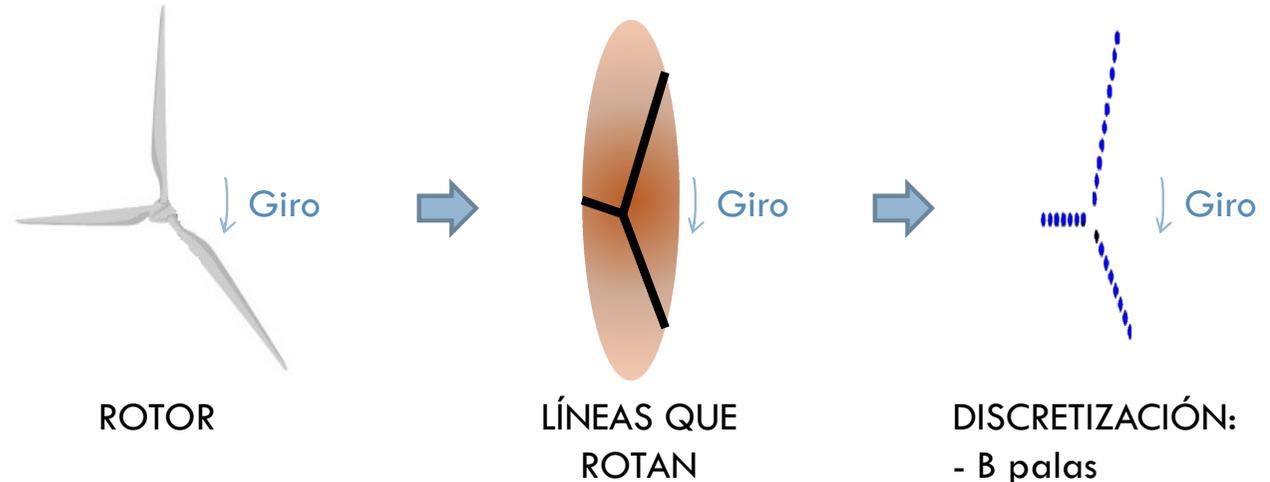


13

Aerogeneradores: modelos implementados ADM-R/ALM

ALM

Representación del rotor:

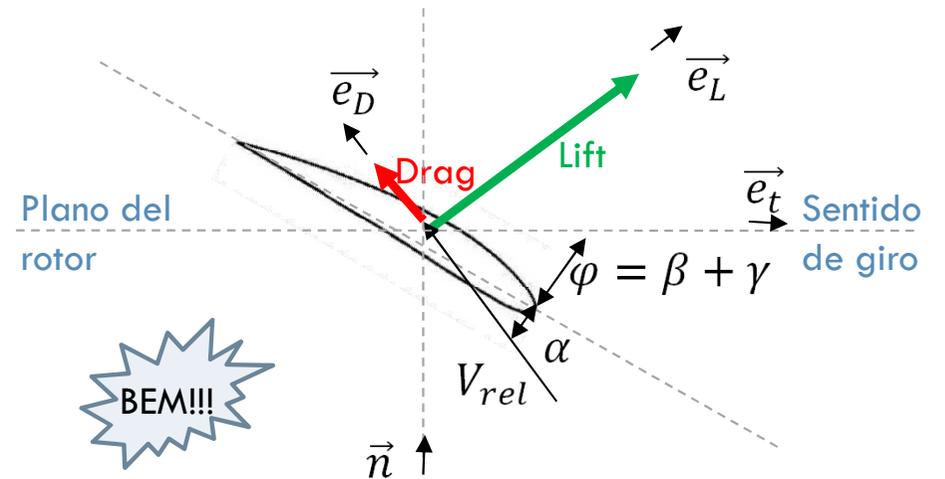


En cada sección radial:

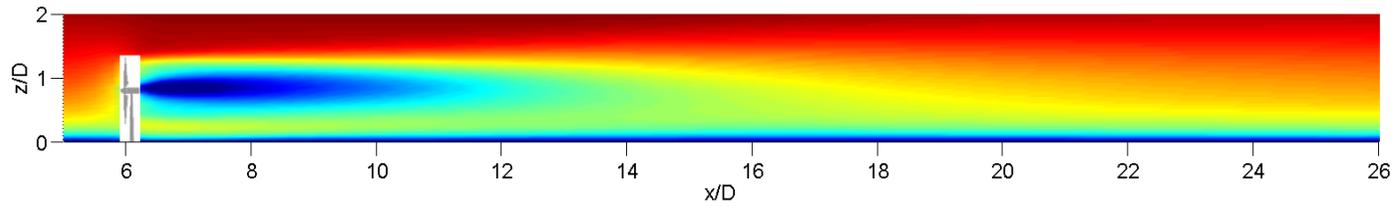


Fuerzas aerodinámicas

$$\vec{f} = -\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2 c(C_L \hat{e}_L + C_D \hat{e}_D) dr$$



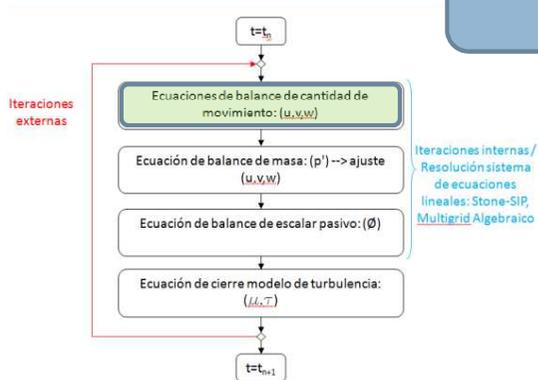
Simulador de la Operación de Parques Eólicos (SOcPE)



14

Aerogeneradores: modelos implementados ADM-R/ALM

ALM

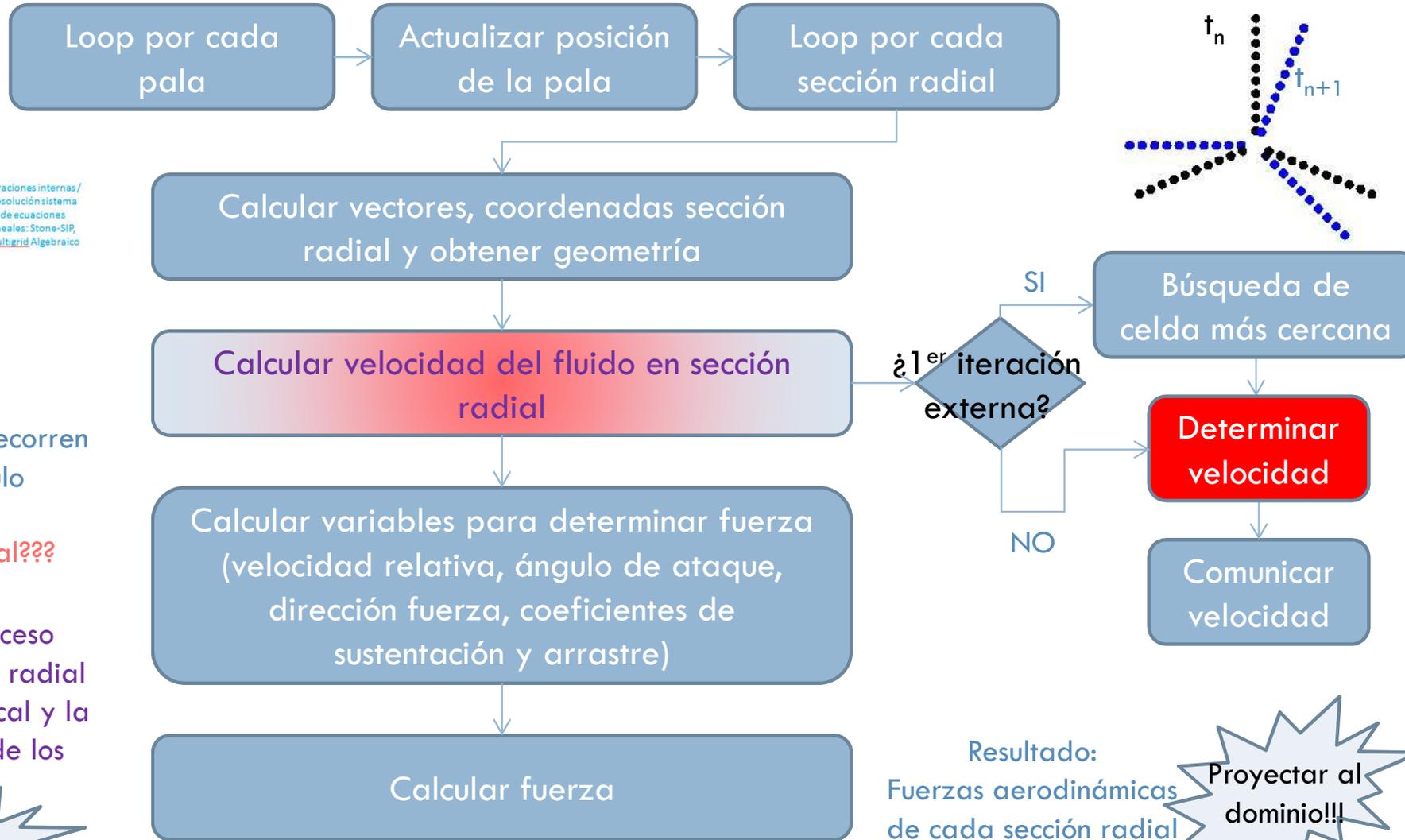


Todos los procesos recorren el esquema de cálculo

¿¿¿Velocidad local???

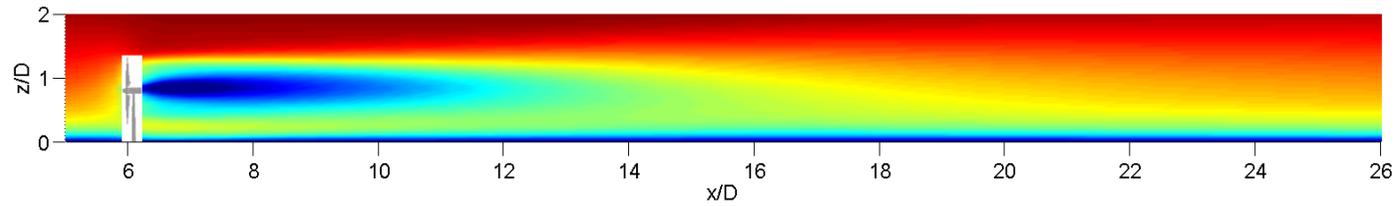
Se requiere que proceso que contiene sección radial calcule velocidad local y la comunique al resto de los procesos

Paralelismo!!!

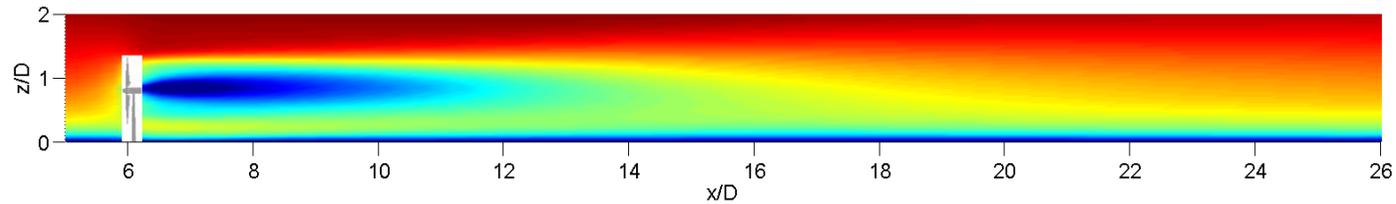


Resultado:
Fuerzas aerodinámicas de cada sección radial

Proyectar al dominio!!!



1. Objetivo
2. Descripción del código `caffa3d.MBRi`
3. Aerogeneradores
 1. Alternativas para representar el rotor/Modelos tipo disco actuador
 2. Modelos implementados: ADM-R y ALM
4. Casos de validación
 1. **Caso A: modelo de aerogenerador en túnel de viento**
 2. Caso B: parque eólico offshore Horns Rev
5. Futuras líneas de investigación



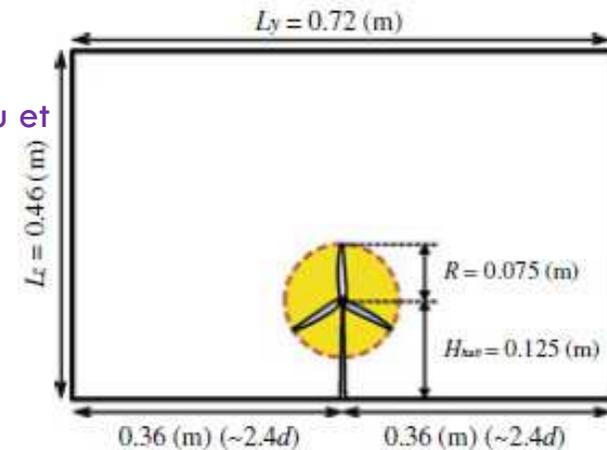
Casos de validación: caso A/modelo de aerogenerador en túnel de viento

- ALM – Casos de validación / Flujo tipo CLA en la entrada, 1 WTG
 - ▣ Modelo de aerogenerador en túnel de viento, Wu et al. 2011 [98]

- ▣ Aerogenerador:

- ▣ Diámetro rotor 0.150m
- ▣ Altura de buje 0.125m
- ▣ Velocidad giro 1120 RPM (fija)

Sección transversal del dominio. Tomado de Wu et al. 2011.



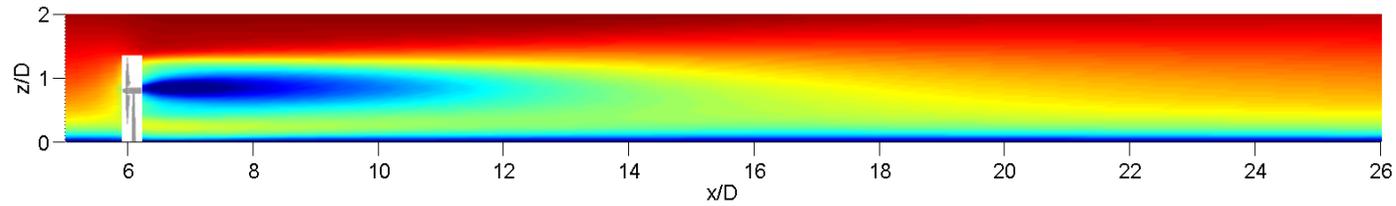
- ▣ Perfil en la entrada

- ▣ Logarítmico, estabilidad neutra

- ▣ Velocidad de fricción
- ▣ Rugosidad superficial
- ▣ Intensidad de turbulencia a altura de buje

0.102m/s
0.03mm
8% } 2.2m/s a altura de buje

Simulador de la Operación de Parques Eólicos (SOcPE)

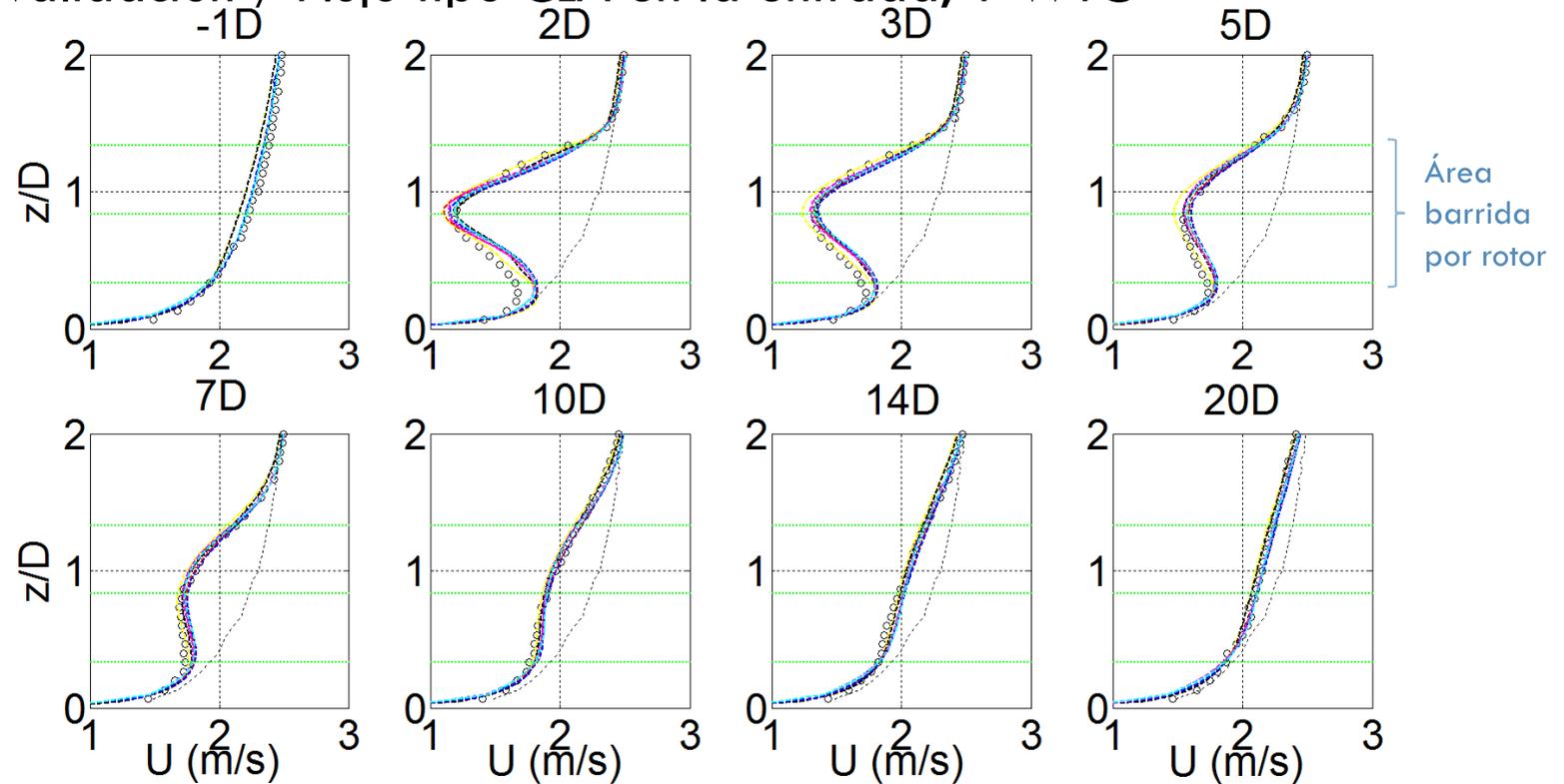
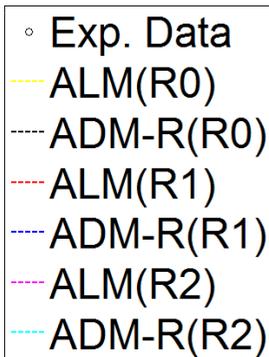


17

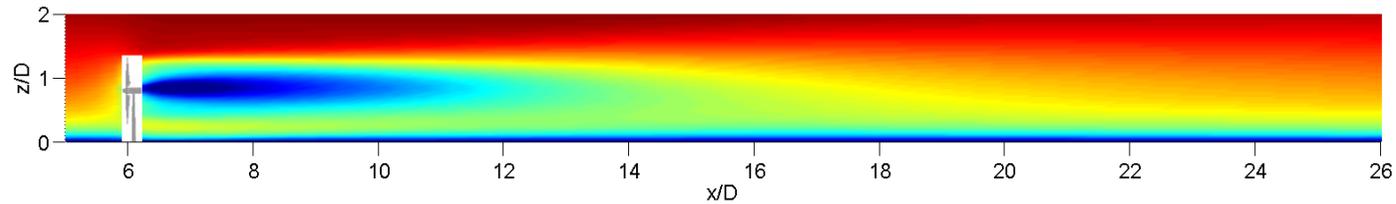
Casos de validación: caso A/modelo de aerogenerador en túnel de viento

ALM – Casos de validación / Flujo tipo CLA en la entrada, 1 WTG

Perfil vertical de velocidad longitudinal media a diferentes distancias en el plano longitudinal medio.



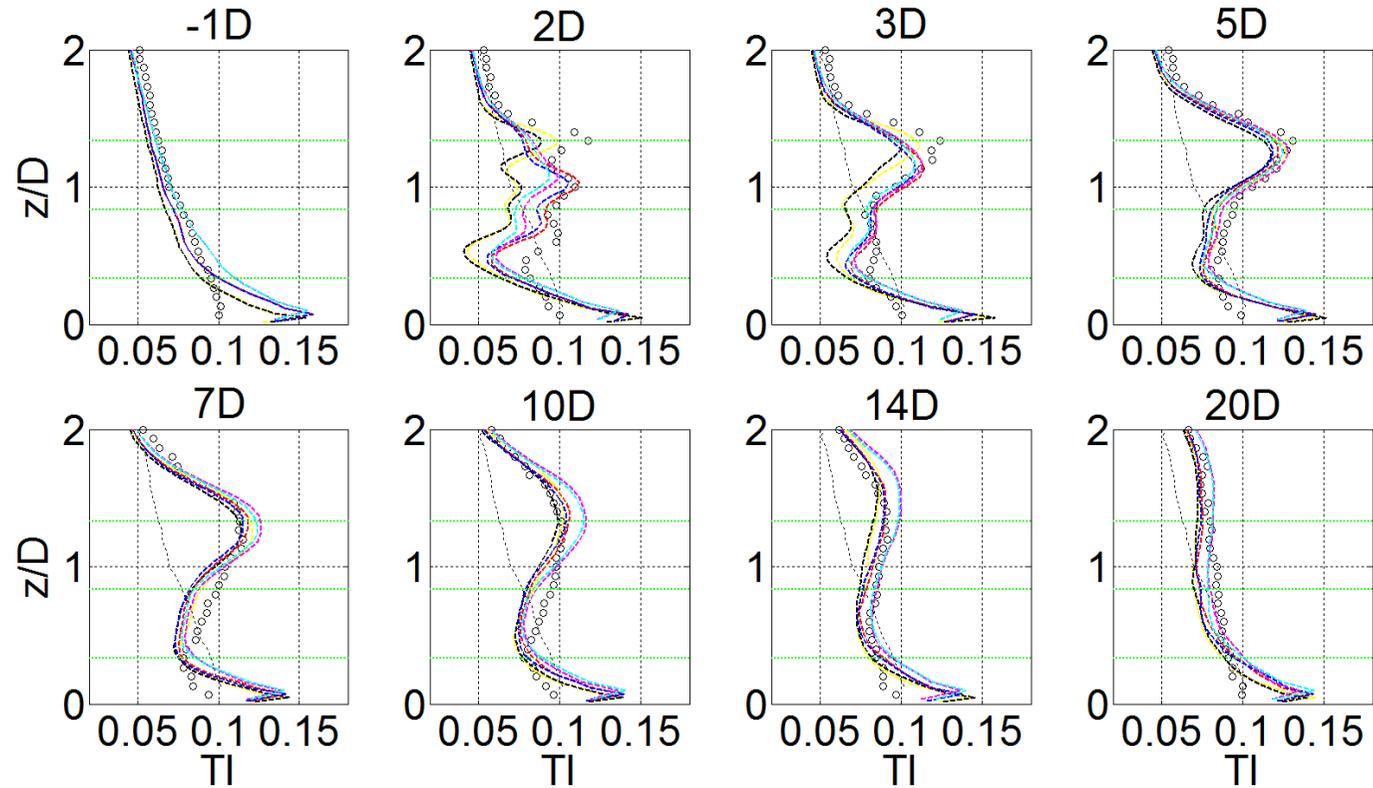
Resol.	Nx	Ny	Nz	R/ Δx	R/ Δy	R/ Δz
R0	192	72	96	6.7	15.0	31.3
R1	128	48	64	4.3	10.0	20.8
R2	96	32	48	3.3	6.7	15.6



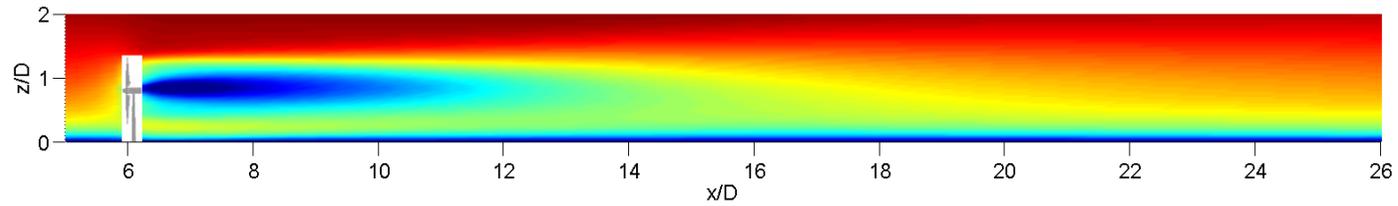
ALM – Casos de validación / Flujo tipo CLA en la entrada, 1 WTG

Perfil vertical de intensidad de turbulencia a diferentes distancias en el plano longitudinal medio.

- Exp. Data
- ALM(R0)
- ADM-R(R0)
- ALM(R1)
- ADM-R(R1)
- ALM(R2)
- ADM-R(R2)



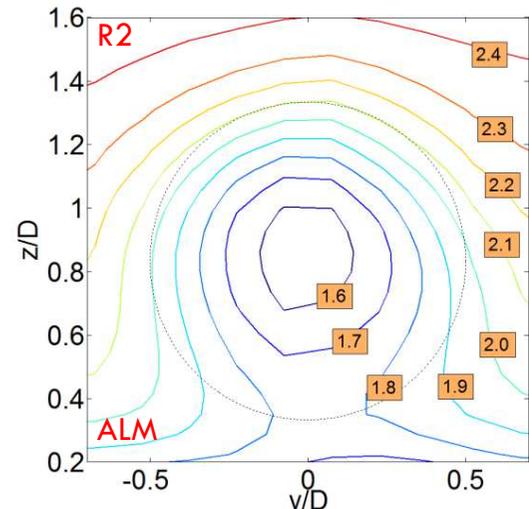
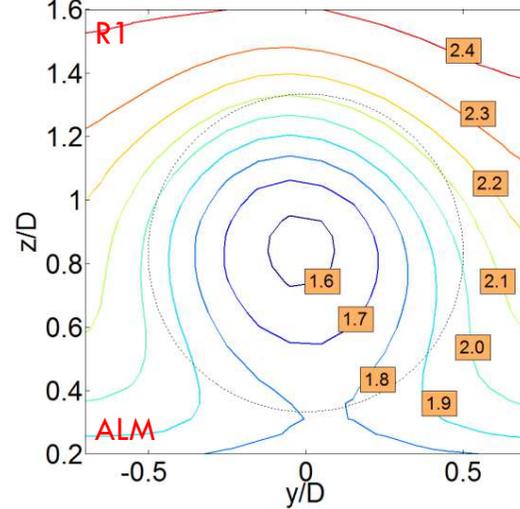
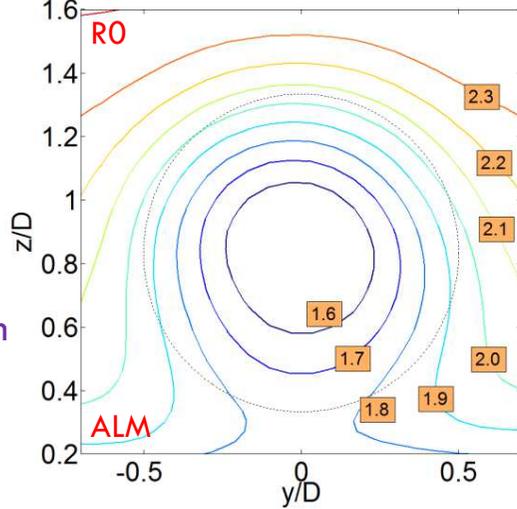
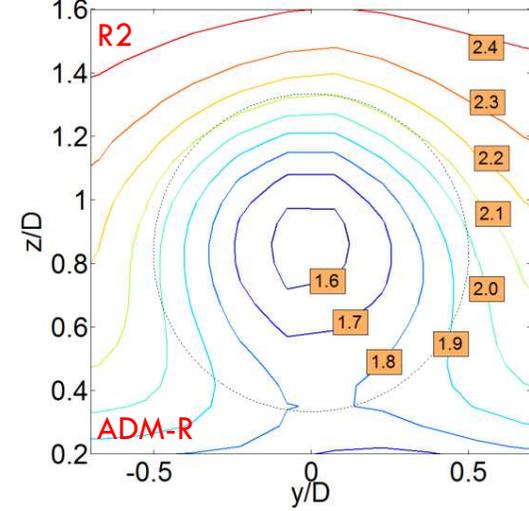
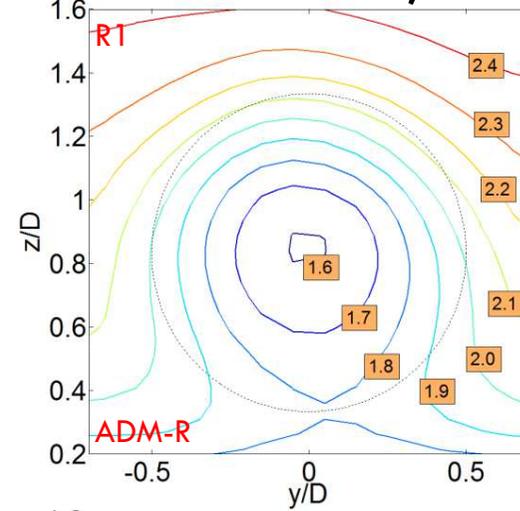
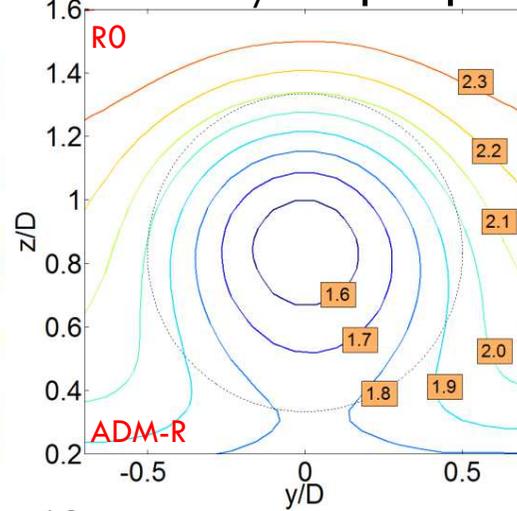
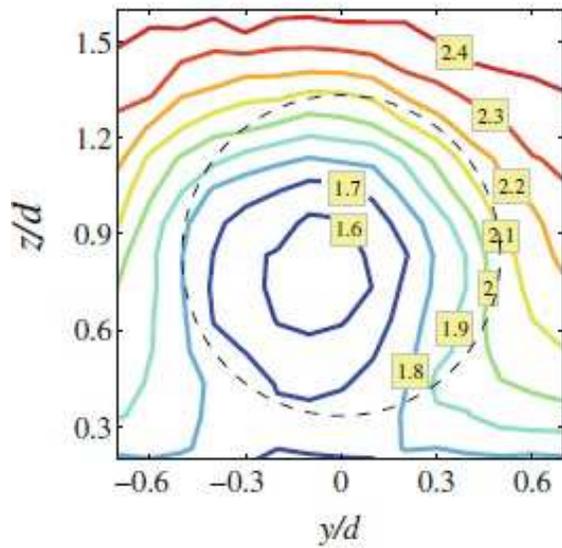
Simulador de la Operación de Parques Eólicos (SOcPE)



19

Casos de validación: caso A/modelo de aerogenerador en túnel de viento

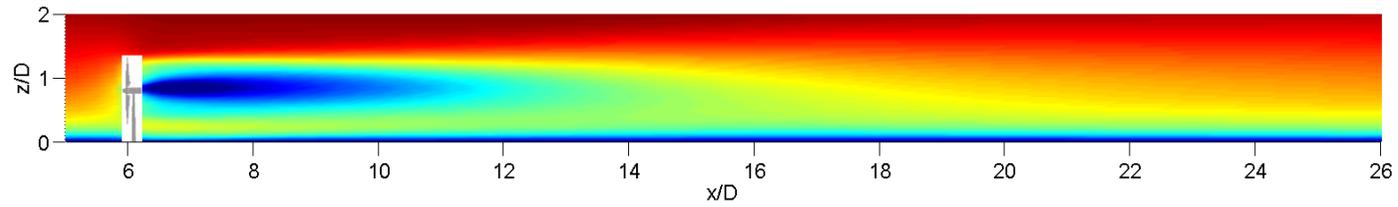
□ ALM – Casos de validación / Flujo tipo CLA en la entrada, 1 WTG



Datos experimentales, tomado de Wu et al. 2011.

Velocidad longitudinal media en la estela a 5D de distancia del plano del rotor, en plano transversal.

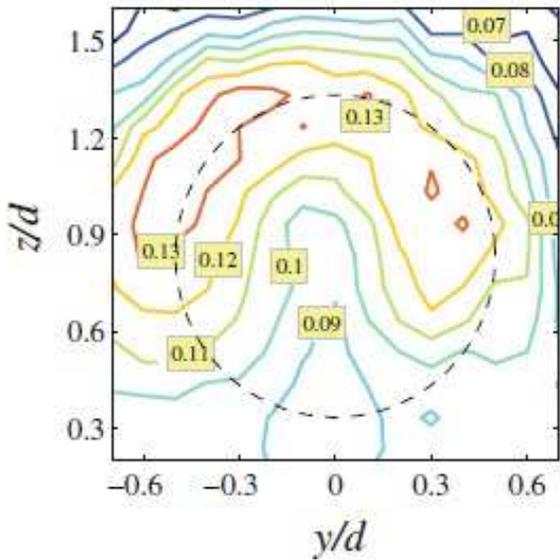
Simulador de la Operación de Parques Eólicos (SOcPE)



20

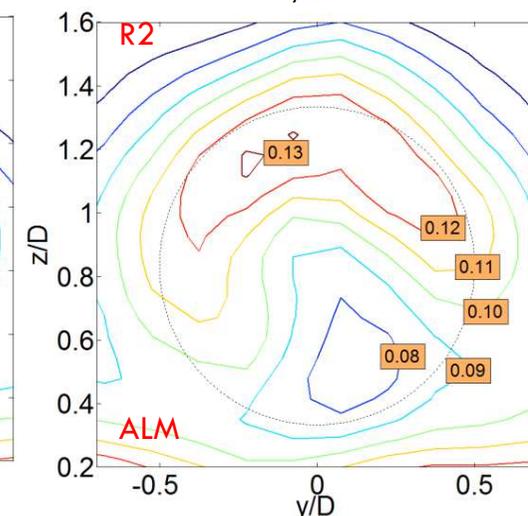
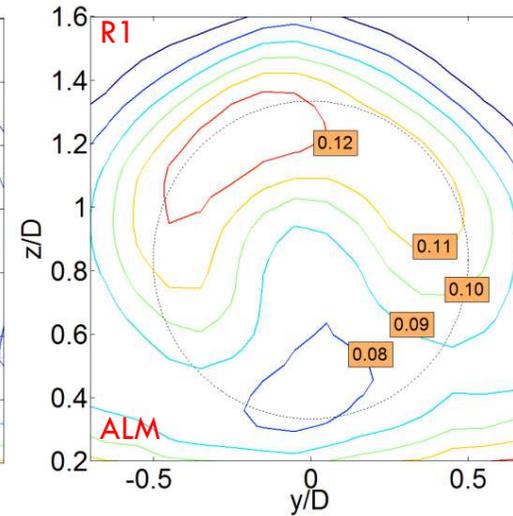
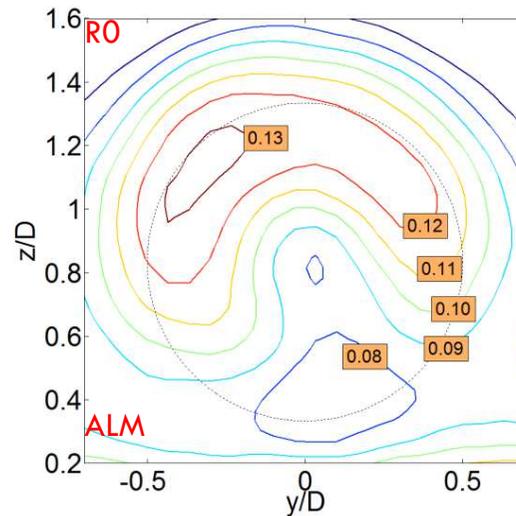
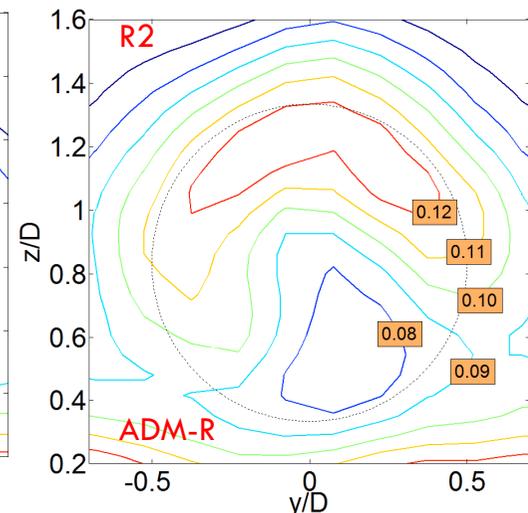
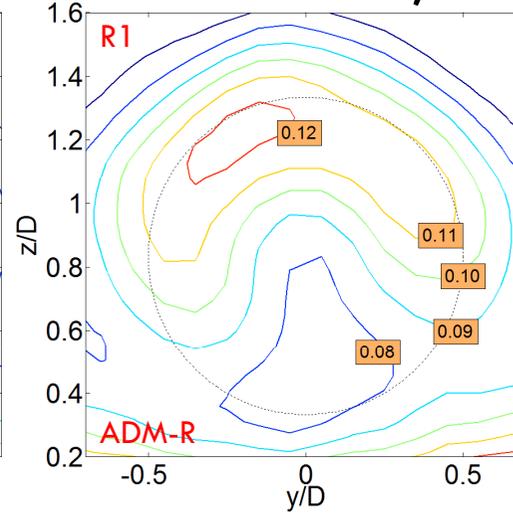
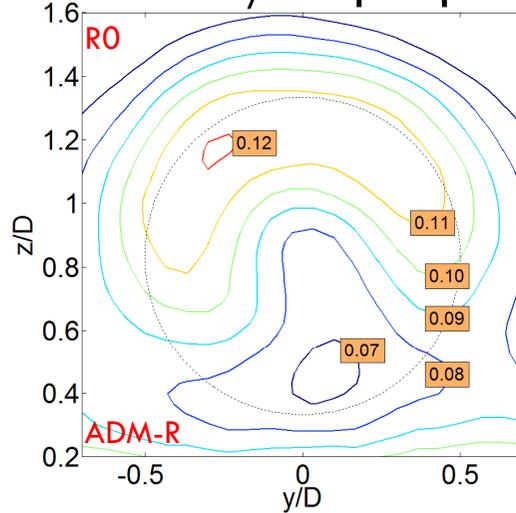
Casos de validación: caso A/modelo de aerogenerador en túnel de viento

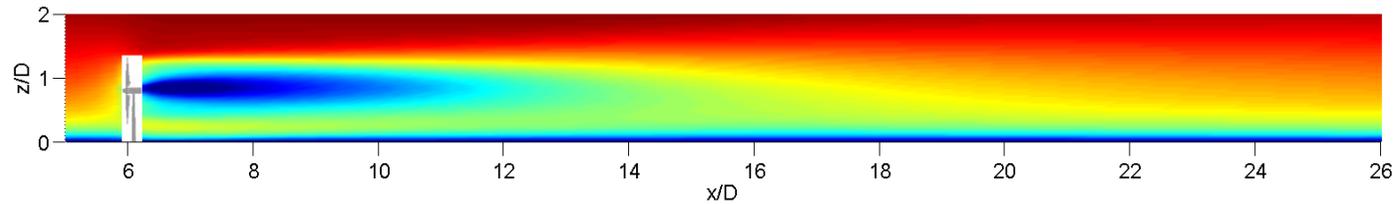
□ ALM – Casos de validación / Flujo tipo CLA en la entrada, 1 WTG



Datos experimentales, tomado de Wu et al. 2011.

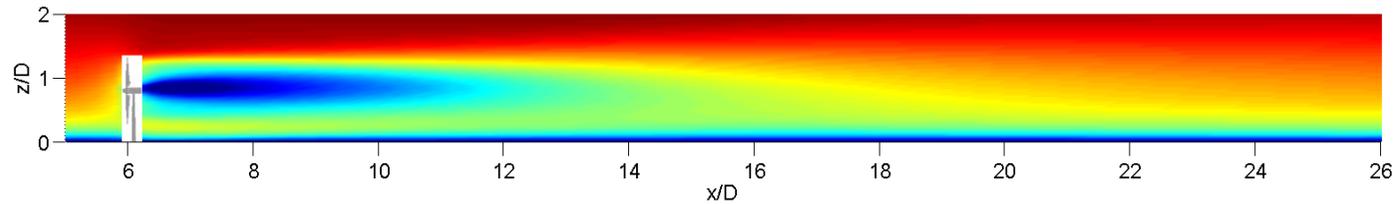
Intensidad de turbulencia en la estela a 5D de distancia del plano del rotor, en plano transversal.





1. Objetivo
2. Descripción del código `caffa3d.MBRi`
3. Aerogeneradores
 1. Alternativas para representar el rotor/Modelos tipo disco actuador
 2. Modelos implementados: ADM-R y ALM
4. Casos de validación
 1. Caso A: modelo de aerogenerador en túnel de viento
 2. Caso B: parque eólico offshore Horns Rev
5. Futuras líneas de investigación

Simulador de la Operación de Parques Eólicos (SOcPE)



22

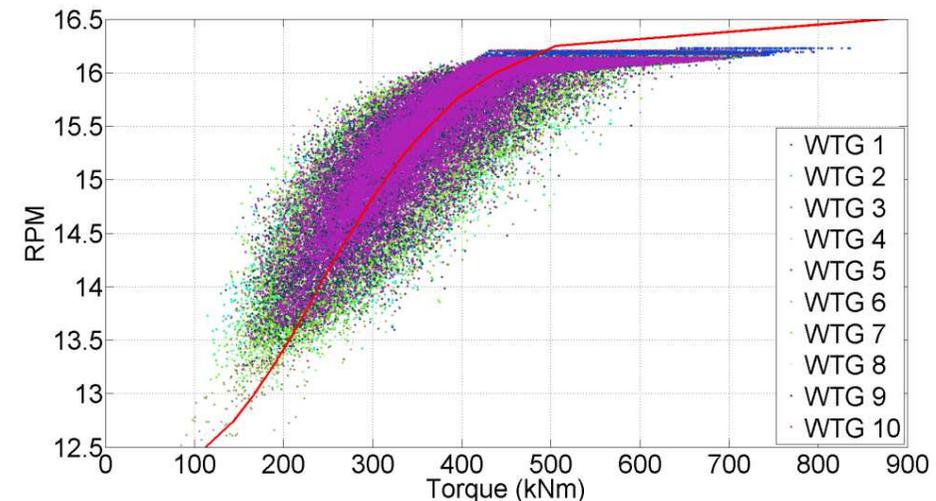
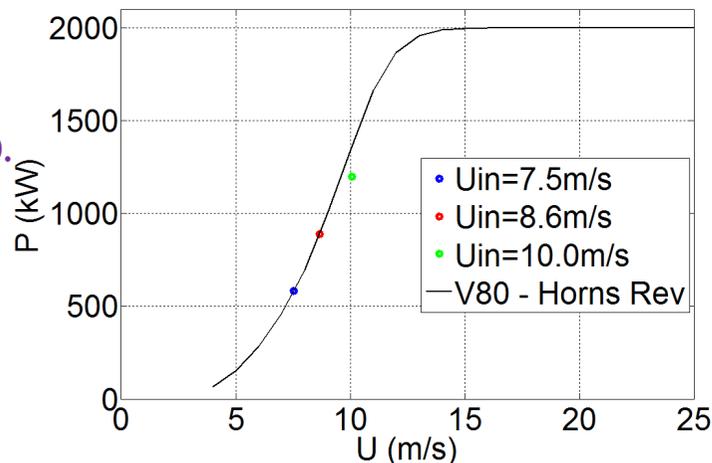
Casos de validación: caso B/parque eólico offshore Horns Rev

- Simulación de parques eólicos / Algoritmos de control individual
 - ▣ Los aerogeneradores actuales operan regulando velocidad de giro/pitch según condiciones ambientales.
 - ▣ Se incorpora control de velocidad de giro al modelo ALM, en base a la propuesta presentada en Wu et al. 2015 para el ADM-R.

Validación: aerogenerador Vestas V80

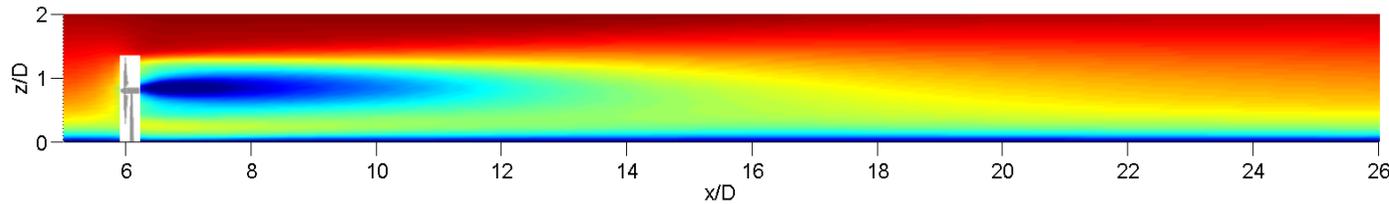
Curva de potencia aerogenerador Vestas V80.

Potencia estimada para 3 perfiles de velocidad en la entrada.



Curva RPM-torque en simulación de una línea de 10 aerogeneradores Vestas V80.

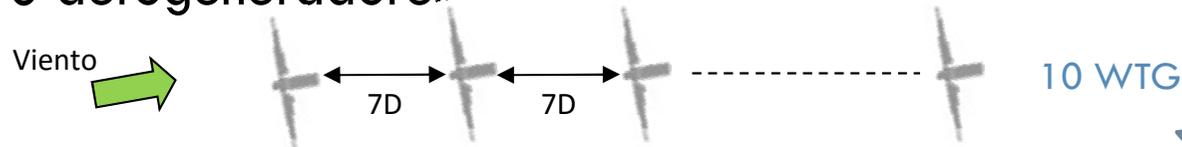
Simulador de la Operación de Parques Eólicos (SOcPE)



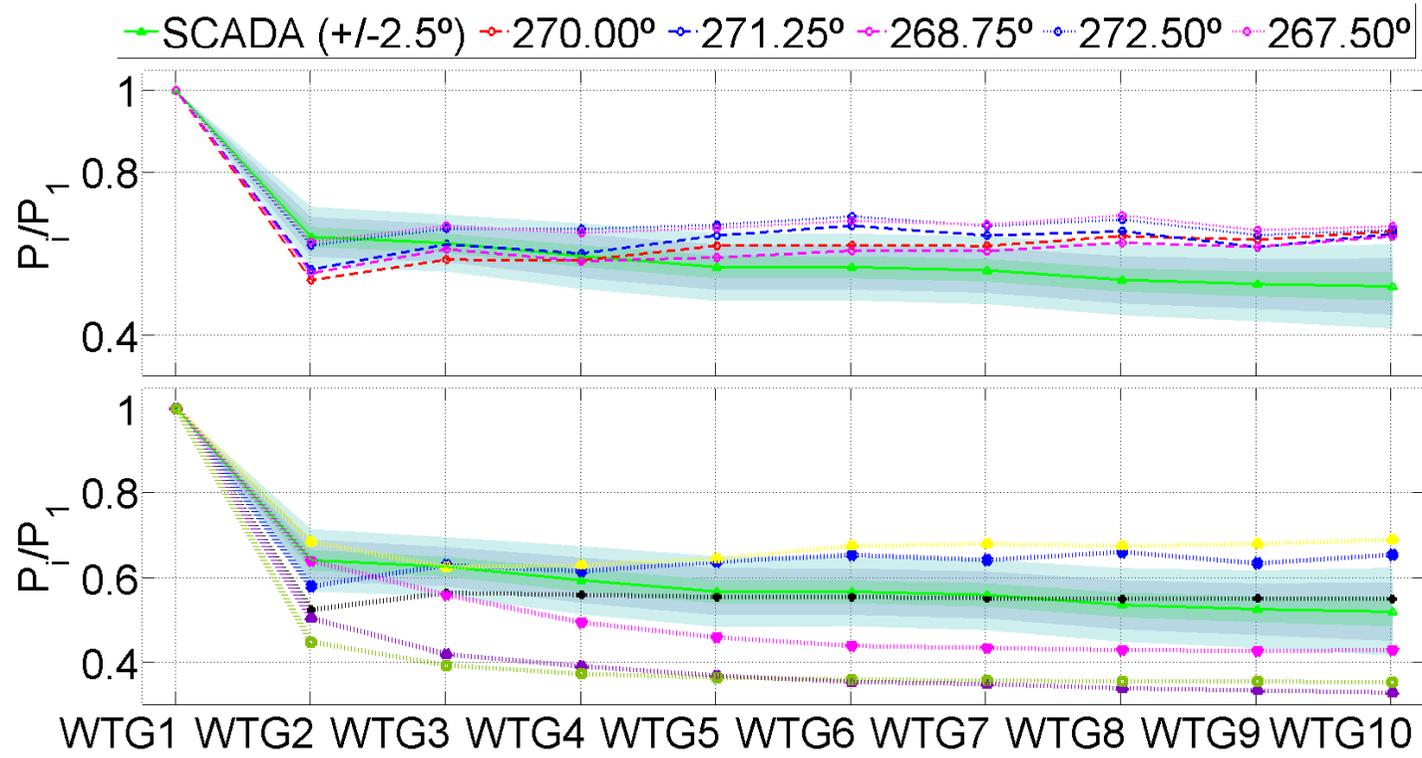
23

Casos de validación: caso B/parque eólico offshore Horns Rev

- Simulación de parques eólicos / Algoritmos de control individual
 - ▣ Parque eólico offshore de 80 aerogeneradores Vestas V80. Simulación de una línea de 10 aerogeneradores:

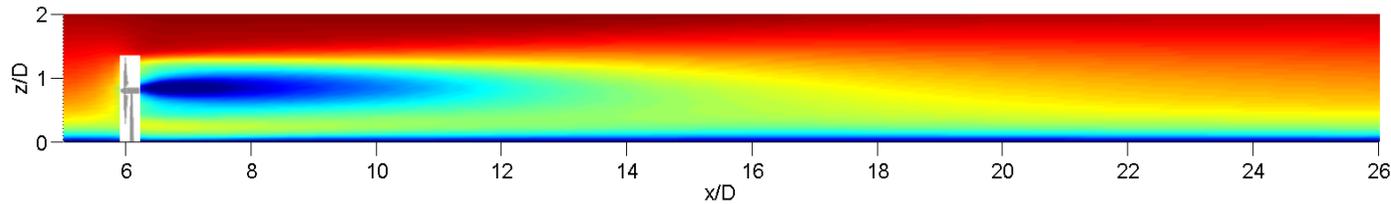


Resolución
 $R/\Delta x \sim 1.6$
 $R/\Delta y \sim 3.4$
 17 celdas en D según z



- SCADA (+/-2.5°)
- caff3d.MBRi
- Wu 2015 (+/-1.0°)
- Eriksson 2012 (+/-2.5°)
- Réthoré 2013/RANS (+/-2.5°)
- Réthoré 2013/FUGA (+/-2.5°)
- Jensen 1983 (+/-2.5°)

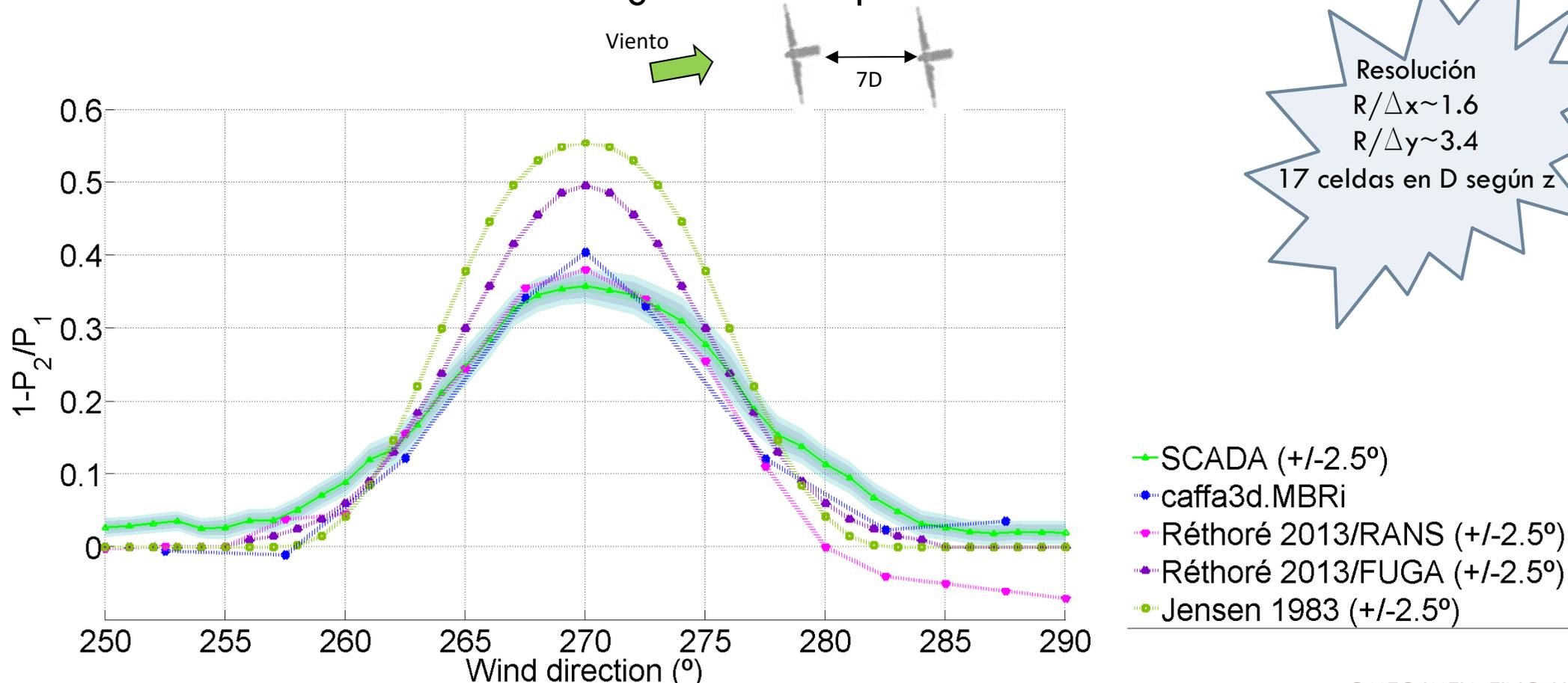
Simulador de la Operación de Parques Eólicos (SOcPE)

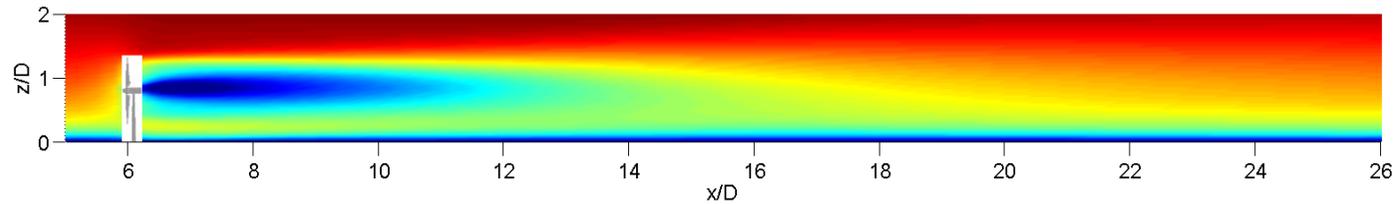


24

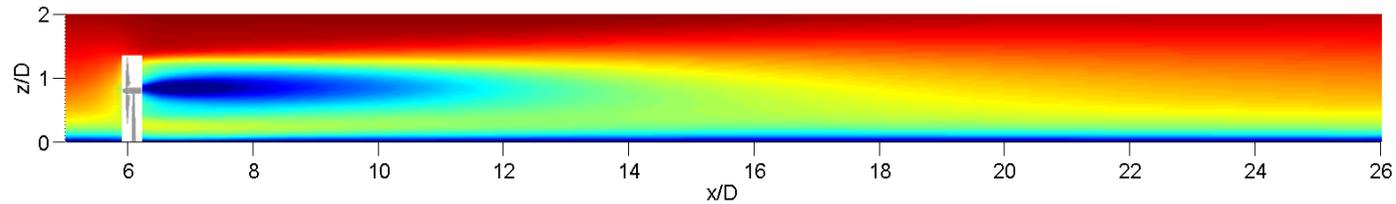
Casos de validación: caso B/parque eólico offshore Horns Rev

- Simulación de parques eólicos / Algoritmos de control individual
 - ▣ Parque eólico offshore de 80 aerogeneradores Vestas V80, se simula la interacción entre 2 aerogeneradores para diferentes direcciones.

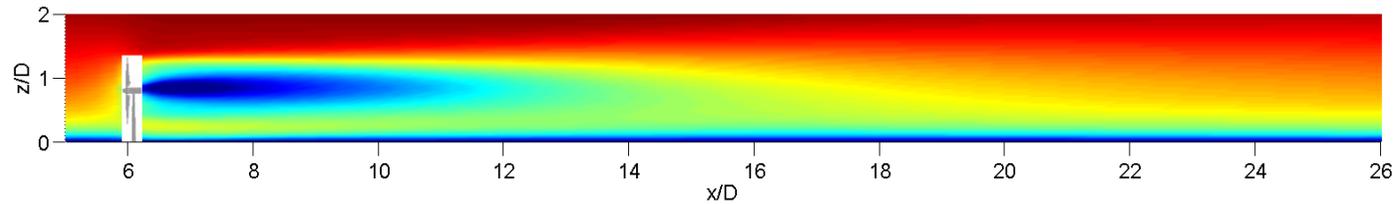




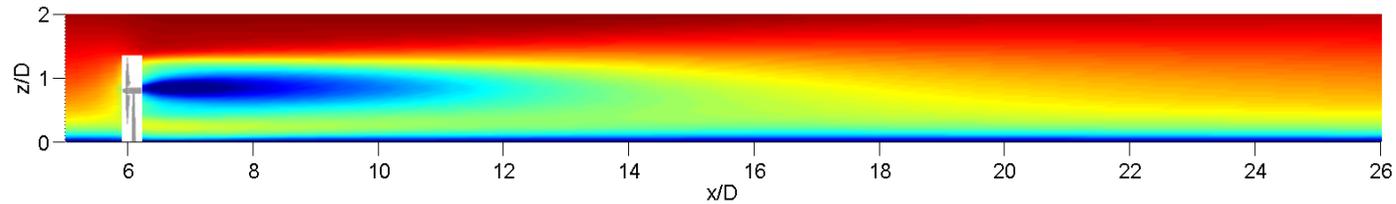
1. Objetivo
2. Descripción del código `caffa3d.MBRi`
3. Aerogeneradores
 1. Alternativas para representar el rotor/Modelos tipo disco actuador
 2. Modelos implementados: ADM-R y ALM
4. Casos de validación
 1. Caso A: modelo de aerogenerador en túnel de viento
 2. Caso B: parque eólico offshore Horns Rev
5. **Futuras líneas de investigación**



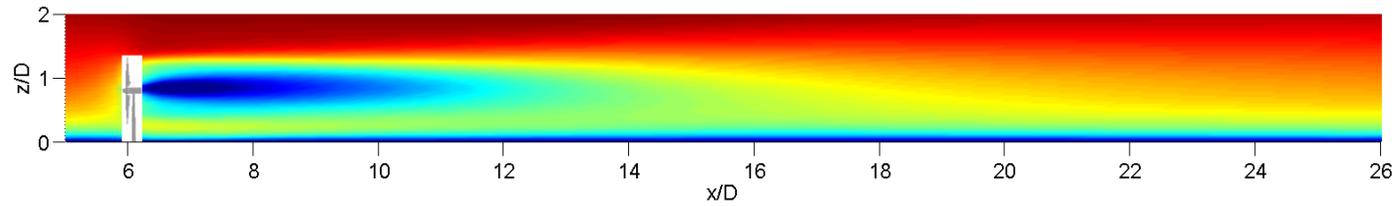
- Campo de vientos
 - Modelo de cierre de LES: esquemas explícitos, híbridos RANS/LES, anidamiento...
 - Modelo de pared: modelos que contemplen situaciones fuera del “equilibrio”, desde iWMLES a esquemas híbridos RANS/LES, anidamiento...
 - Estabilidad atmosférica: incluir modelo que permita representar diferentes condiciones de estabilidad atmosférica, ¿ciclo diario?
 - Más general, forzar modelo con algún input de modelo de mesoescala para representación de condiciones específicas...¿Virtual met mast?



- **Aerogeneradores**
 - **Algoritmos de control individual**: implementar estrategias de control que representen la operación de un aerogenerador actual (velocidad de giro, pitch, yaw...), considerando diferentes objetivos (maximizar producción, reducir cargas).
 - **Estudio de cargas**: valorar capacidad de herramienta para estimar cargas sobre componentes claves del aerogenerador, realizar las mejoras correspondientes con este foco.
 - **Algoritmos de control global**: elaborar algoritmos de control de la operación de forma de maximizar la producción global de un conjunto de aerogeneradores mediante modulación de estelas.



- Aerogeneradores
 - Modelos analíticos de estelas: desarrollar y evaluar modelos de menor costo computacional para estimar características de estelas, tomando como información de base resultados de simulaciones.
 - Influencia de variables atmosféricas/locales en curva de potencia.
 - Evaluación de performance de aerogeneradores.



Muchas gracias por su atención!!!