



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

Modelado computacional de la acción de máquinas de viento para mitigar heladas agrometeorológicas

Damián López Hermida

Programa de Posgrado en Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Montevideo – Uruguay
Octubre de 2025



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

Modelado computacional de la acción de máquinas de viento para mitigar heladas agrometeorológicas

Damián López Hermida

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado en Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Magíster en Ingeniería Mecánica.

Director:

Dr. Ing. Paolo Sassi

Codirector:

Dr. Ing. Gabriel Usera

Director académico:

Dr. Ing. Gabriel Usera

Montevideo – Uruguay

Octubre de 2025

López Hermida, Damián

Modelado computacional de la acción de máquinas de viento para mitigar heladas agrometeorológicas / Damián López Hermida. - Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, 2025.

XV, 96 p.: il.; 29, 7cm.

Director:

Paolo Sassi

Codirector:

Gabriel Usera

Director académico:

Gabriel Usera

Tesis de Maestría – Universidad de la República, Programa en Ingeniería Mecánica, 2025.

Referencias bibliográficas: p. 84 – 87.

1. Protección contra heladas, 2. Máquinas de viento, 3. Dinámica de fluidos computacional, 4. Inversión térmica, 5. Mezcla de aire. I. Sassi, Paolo, *et al.* II. Universidad de la República, Programa de Posgrado en Ingeniería Mecánica. III. Título.

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Dr. Prof. Martin Draper

Dr. Prof. Daniel Freire

Dr. Prof. Alejandro Gutierrez

Montevideo – Uruguay
Octubre de 2025

Agradecimientos

Quiero expresar un especial y profundo agradecimiento a Gabriel Usera, quien, desde las etapas más tempranas de mi carrera universitaria, ha sido un referente excepcional. Su optimismo, compromiso y orientación han sido fundamentales en cada etapa de mi formación, convirtiéndose en un pilar esencial para el desarrollo de este proyecto.

También agradezco la oportunidad de formar parte del extraordinario equipo de *TheClimateBox*. Ha sido un privilegio compartir con personas cuya visión y sabiduría han sido inspiradoras. Valoro igualmente el apoyo económico recibido, que me permitió dedicarme plenamente al desarrollo de este trabajo.

A Paolo, mi más sincero agradecimiento por su disposición y apoyo siempre que lo necesité, incluso a la distancia.

Realizar este posgrado mientras residía en mi ciudad de origen ha sido una experiencia única y enriquecedora. Después de tantos años lejos, volver a estar rodeado del afecto de mi familia y amigos fue un regalo invaluable. A todos ellos, mi más cálido agradecimiento por su compañía y respaldo incondicional.

Finalmente, agradezco a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por el apoyo económico brindado a través del programa de Becas de Posgrado en Uruguay. Su respaldo fue fundamental para la realización de esta etapa tan importante de mi vida.

RESUMEN

El fenómeno de las heladas es de gran relevancia en la agricultura, ya que cuando la temperatura del aire desciende por debajo de los 0 °C, los cultivos pueden sufrir daños severos, impactando significativamente la producción. Por este motivo, los métodos activos de mitigación de heladas siguen siendo cruciales para prevenir dichos daños. No obstante, la información disponible es limitada, y la mayoría de las recomendaciones se basan en la experiencia empírica de proveedores y productores. Esto resalta la necesidad de profundizar en estas técnicas, particularmente en la comprensión de su funcionamiento, para ofrecer un mejor asesoramiento a los agricultores, optimizando tanto los diseños de protección como los costos asociados.

Este trabajo se centra en el desarrollo de un modelo numérico computacional que simula el comportamiento de los flujos de aire y las variaciones en el campo de temperaturas dentro de un área agrícola debido a la operación de una máquina de viento (*Wind Machine* (WM)) en una noche con condiciones de estratificación atmosférica. Para ello, se ha integrado la formulación de disco actuador como estrategia para representar a la WM. El modelo fue implementado inicialmente utilizando el código *caffa3d*, desarrollado por el [Grupo de Mecánica de Fluidos Computacional](#) de la Facultad de Ingeniería, diseñado para ser ejecutado en múltiples núcleos de *Central Processing Unit* (CPU).

Además, se empleó el código *chaman*, una versión optimizada de *caffa3d* que permite ejecutar simulaciones en múltiples *Graphics Processing Units* (GPUs). A su vez, la empresa *The Climate Box* (TCB) cuenta con un modelo implementado en este código para realizar análisis de riesgos de heladas. En colaboración con ellos, se intentó integrar el modelo de WM en su sistema para permitir análisis en condiciones más realistas que consideran la topografía del terreno, rugosidad y modelos de radiación atmosférica; sin embargo, debido a errores en la ejecución, los resultados presentados en este documento se limitan únicamente a simulaciones en CPU.

En conclusión, los resultados obtenidos representan un punto de partida valioso para continuar explorando esta temática, desarrollando capacidades para emular el fenómeno de manera más precisa y, en última instancia, incluir

esta herramienta como complemento en el diseño de sistemas de protección contra heladas.

Palabras claves:

Protección contra heladas, Máquinas de viento, Dinámica de fluidos computacional, Inversión térmica, Mezcla de aire.

ABSTRACT

Frost events are highly significant in agriculture, as when air temperature drops below 0,°C, crops can suffer severe damage, significantly affecting production. For this reason, active frost mitigation methods remain essential to prevent crop damage. However, the available information is limited, and most recommendations rely on the empirical experience of suppliers and producers. This highlights the need to deepen the understanding of these techniques, particularly regarding their operational mechanisms, to provide better advice to farmers, optimizing both protection designs and associated costs.

This work focuses on developing a computational numerical model that simulates the behavior of airflow and temperature field changes within a crop field due to the operation of a wind machine (WM) during a night with atmospheric stratification conditions. To achieve this, the actuator disk formulation was integrated as a strategy to represent the WM. The model was initially implemented using the *caffa3d* code, developed by the [Computational Fluid Mechanics Group](#) at the Faculty of Engineering, which is designed to run on multiple CPUs.

Additionally, the *chaman* code was used, an optimized version of *caffa3d* that allows simulations to be executed on multiple GPUs. Furthermore, the company TCB has an implemented model in this code to conduct frost risk analyses. In collaboration with them, the WM model was attempted to be integrated into their system to enable analyses under more realistic conditions, considering terrain topography, roughness, and atmospheric radiation models; however, due to execution errors, the results presented in this document are limited to CPU-based simulations.

In conclusion, the results generated serve as a starting point to further explore this subject, developing capabilities to more accurately simulate the phenomenon, and ultimately including this tool as a complementary asset in

designing frost protection systems.

Keywords:

Frost protection, Wind machines, Computational fluids dynamics, Thermal inversion, Air mixing.

Lista de figuras

1.1	Esquema de funcionamiento de la <i>Wind Machine</i> . Adaptado de (Dai et al. 2024)	3
2.1	Cambio esperado en el perfil vertical de temperaturas en presencia de la WM. Adaptado de (Snyder y Melo-Abreu, 2010).	11
3.1	Esquema comparativo de modelos de turbulencia <i>Large Eddy Simulations</i> (LES) y <i>Direct Numerical Simulation</i> (DNS). Tomado de (Ferziger y Peric, 2002).	18
3.2	Esquema de iteraciones del código <i>caffa3d</i> . Adaptado de (Usera et al. 2008)	20
3.3	Cadena de comandos para la resolución en procesadores CPU - GPU. Adaptado de (Fernandez et al. 2020).	22
3.4	Esquema de trabajo del solver GPU. Adaptado de (Fernandez et al. 2020).	24
3.5	Esquema de la estela. Tomado de (Glauert, 1935).	25
3.6	Esquema del modelo de disco actuador, indicando la velocidad del flujo libre aguas arriba V_0 , la velocidad axial en el plano del rotor u y la velocidad en la estela aguas abajo u_1	27
3.7	Esquema del volumen de control empleado en el análisis del disco actuador. El volumen de control encierra el rotor y la estela, definiendo las secciones de entrada y salida caracterizadas por las velocidades V_0 y u_1 , respectivamente, así como el área efectiva del disco S	28
3.8	Volumen de control simplificado del modelo de disco actuador, utilizado para la aplicación del balance de cantidad de movimiento.	30
3.9	Volumen de control descrito para Rotor Óptimo de Glauert.	32

4.1	Características geométricas del <i>Actuator Disk</i> (AD).	49
4.2	Esquema del dominio de <i>caffa3d</i> dividido en 9 regiones.	49
5.1	Visualización del AD en el dominio.	54
5.2	Evolución temporal del coeficiente de área.	55
5.3	Comparación de área proyectada antes y después de la corrección.	57
5.4	Evolución temporal del coeficiente de volumen.	58
5.5	Evolución temporal del caudal para cada caso.	60
5.6	Mapa vertical de velocidad para cada caso.	61
5.7	Costo computacional expresado en unidades de tiempo.	62
5.8	Evolución temporal del caudal.	63
5.9	Correlación entre outliers del caudal y variación del área.	64
5.10	Distribución estadística del caudal simulado.	65
5.11	Vista isométrica de las líneas de flujo a través del AD.	67
5.12	Evolución de la velocidad a una altura de 10.5 m en función de la distancia.	68
5.13	Perfil de velocidad en el plano del AD.	69
5.14	Evolución de la velocidad a una altura de 3 m en función de la distancia.	70
5.15	Distribución espacial de la temperatura a una altura de 1.5 m (izquierda). A la derecha se presenta la evolución temporal del perfil vertical de temperatura en el punto de muestreo señalado en el mapa de colores.	76

Lista de tablas

3.1	Modelos de disco actuador según nivel de complejidad.	35
4.1	Especificaciones técnicas de la WM.	38
5.1	Coefficientes de la serie de Fourier ajustada a $A_{\text{ref}}/A(t)$	56
5.2	Coefficientes de la serie de Fourier ajustada a la evolución de <code>volume_factor</code> (todos los valores en notación científica con tres cifras significativas).	58
5.3	Valores de caudal medio obtenidos para cada caso.	60
5.4	Valores de velocidades obtenidos.	72
5.5	Resultados de empuje y momento.	74
5.6	Resultados de potencia útil y total entregada por el disco actuador.	75
5.7	Valores extremos impuestos en el término fuente del modelo de disco actuador.	75
5.8	Incrementos de temperatura luego de la simulación.	78

Lista de siglas

AD	<i>Actuator Disk</i>
BEM	<i>Blade Element Momentum</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CLA	Capa Límite Atmosférica
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CUDA	<i>Compute Unified Device Architecture</i>
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
ILU	<i>Incomplete Lower-Upper factorization</i>
LES	<i>Large Eddy Simulations</i>
LU	<i>Lower-Upper</i>
MPI	<i>Message Passing Interface</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
SIP	<i>Strongly Implicit Procedure</i>
SIS	Sumidero Invertido Selectivo
TCB	<i>The Climate Box</i>
WM	<i>Wind Machine</i>

Tabla de contenidos

Lista de figuras	X
Lista de tablas	XII
Lista de símbolos	XII
Notaciones	XII
Lista de siglas	XIII
1 Introducción	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Motivación	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Estructura de la tesis	4
2 Estado del arte	6
2.1 Heladas agrometeorológicas	6
2.2 Estrategias de protección y mitigación	8
2.3 Las <i>Wind Machines</i> como medida activa de mitigación	10
2.4 Antecedentes de simulaciones numéricas aplicadas a la protección contra heladas	12
3 Conceptos preliminares	14
3.1 Simulaciones numéricas: modelo <i>caffa3d</i>	14
3.1.1 Modelo matemático	14
3.1.2 Discretización de las ecuaciones	16
3.1.3 Modelos de turbulencia	17
3.1.4 Condiciones de borde inmersas	18

3.1.5	Resolución numérica en procesadores CPU	19
3.1.6	Resolución numérica en procesadores CPU y GPU	21
3.2	Teoría aerodinámica de ventiladores axiales	24
3.2.1	Cantidad de Movimiento unidimensional	27
3.2.2	Cantidad de Movimiento General	31
3.2.3	Modelos de disco actuador	33
4	Metodología	37
4.1	Aspectos del modelado físico	37
4.1.1	Especificaciones técnicas de la WM	37
4.1.2	Distribución de empuje y momento sobre el disco actuador	39
4.1.3	Condiciones iniciales de velocidad y temperatura	40
4.2	Aspectos del modelado computacional	41
4.2.1	Información de entrada	41
4.2.2	Cálculo del término fuente	42
4.2.3	Implementación del giro azimutal	42
4.2.4	Subrutinas generales	43
4.2.5	Implementación en <i>caffa3d</i>	48
5	Resultados y Validación	52
5.1	Simulación del disco actuador en <i>caffa3d</i>	52
5.1.1	Definición del dominio	53
5.1.2	Análisis de convergencia de las simulaciones	59
5.1.3	Resultados de la simulación y análisis	62
5.2	Limitaciones	79
6	Conclusiones y trabajos futuros	80
6.1	Conclusiones	80
6.2	Trabajos a futuro	81
	Referencias bibliográficas	84
	Glosario	87
	Anexos	88
Anexo 1	Resumen de rutinas implementadas en Fortran 90	89
1.1	Subrutina <i>ComputeWindMachineTotalFlow</i>	89
1.2	Subrutina <i>ComputeWindMachineForces</i>	92

Capítulo 1

Introducción

1.1. Generalidades

Cuando la temperatura del aire desciende por debajo de los 0°C , los cultivos sensibles pueden sufrir daños severos, lo que afecta significativamente la producción y tiene un alto impacto sobre los agricultores y la economía local. Para dimensionar este impacto, algunos datos recopilados por (Snyder y Melo-Abreu, 2010) indican que, por ejemplo, en Estados Unidos, las heladas generan mayores pérdidas económicas que cualquier otro riesgo meteorológico. En el estado de Florida, la industria de los cítricos ha sido devastada en múltiples ocasiones por los daños causados por heladas, con pérdidas que ascienden a miles de millones de dólares en frutos y árboles. En California, la helada de diciembre de 1990 causó aproximadamente 500 millones de dólares en pérdidas de cosechas, afectando aproximadamente 450.000 *ha* de árboles. Otra helada, en diciembre de 1998, generó daños por alrededor de 700 millones de dólares. Asimismo, en Europa, las heladas ocasionaron pérdidas de 3.3 mil millones de euros en 2017 (Lamichhane, 2021). Pérdidas similares han sido observadas en todo el mundo, afectando diversos tipos de cultivos.

Aunque las pérdidas para los agricultores pueden ser enormes, los efectos secundarios también impactan gravemente a las comunidades locales y regionales. Por ejemplo, si no hay fruta para cosechar, los recolectores se quedarán sin empleo, los procesadores tendrán poca o ninguna materia prima para trabajar, lo que también derivará en desempleo. A su vez, la reducción en los ingresos afectará la economía local, debido a la menor circulación de dinero.

Para mitigar estos daños, existen diversos métodos de protección, como las

máquinas de viento (WM), calefactores, riego por aspersión, entre otros. El objetivo común de estos métodos es elevar la temperatura del aire circundante en los cultivos, evitando así que los tejidos vegetales sufran daños irreparables. A pesar de su importancia, la comprensión física del proceso de calentamiento de los tejidos vegetales inducido por estos métodos sigue siendo limitada, lo que dificulta optimizar su uso en diferentes condiciones atmosféricas. Esta falta de comprensión detallada resalta la necesidad de realizar investigaciones que mejoren los modelos de predicción y mitigación.

De entre los diversos métodos de protección, este trabajo se centra en las WM, que se han consolidado como una herramienta crucial en la mitigación de heladas en plantaciones agrícolas. A continuación, se justifica su estudio en más detalle.

1.2. Motivación

Entre los métodos de protección contra las heladas se encuentran las WM, que desde los años 50 han incrementado su popularidad (Frith, 1951). Estas máquinas consisten en un gran rotor de aproximadamente 5 m de diámetro, montado sobre una torre de 10 m de altura, con la capacidad de rotar sobre su eje. Teóricamente, están diseñadas para romper la inversión térmica cerca de la superficie durante las noches de heladas por radiación (Perry, 1998). La WM impulsa grandes cantidades de aire cálido hacia abajo, con un ligero ángulo respecto a la horizontal. A medida que el rotor gira, la mezcla turbulenta erosiona la inversión térmica alrededor de la máquina, mezclando el aire cálido superior con el aire frío en superficie. Como resultado, la temperatura del aire en la zona afectada, a la altura de la plantación, aumenta significativamente. Además, la vegetación se calienta debido a un mayor intercambio de calor turbulento. Este proceso se representa esquemáticamente en la Figura 1.1.

En la práctica, aún no se ha establecido una directriz general para la operación de las WM bajo diversas condiciones atmosféricas. Este desafío se debe a dos factores principales. Primero, la magnitud y el área de calentamiento generadas por la operación de las WM están influenciadas por múltiples variables. El efecto del calentamiento no solo depende del tipo de WM (por ejemplo, potencia, tamaño y altura del rotor), sino también de sus configuraciones operativas (como el período de rotación o el ángulo de inclinación) y de las condiciones atmosféricas (como la intensidad de la inversión térmica local

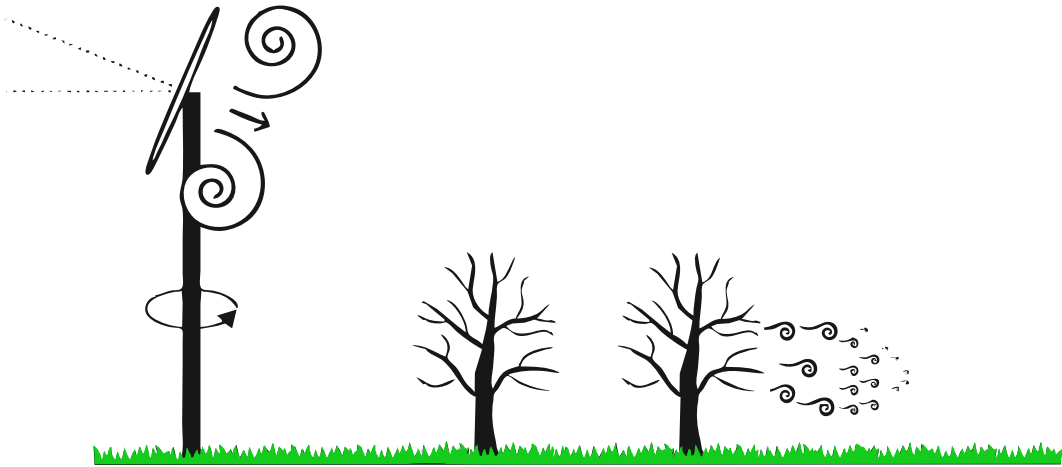


Figura 1.1: Esquema de funcionamiento de la *Wind Machine*. Adaptado de (Dai et al. 2024)

o la magnitud de la deriva del viento).

En segundo lugar, el calentamiento generado por la mezcla de aire bajo distintas configuraciones de WM y condiciones atmosféricas presenta una alta variabilidad espacio-temporal. Por ejemplo, la magnitud del calentamiento disminuye a medida que se incrementa la distancia desde la máquina (Davis, 1977), y el área afectada no es simétrica debido a la influencia del viento de fondo. Incluso en presencia de vientos muy suaves, esta asimetría puede ser significativa, como lo demostraron (Goodall et al. 1957) y (Heusinkveld, 2019).

Dada la importancia de proteger los cultivos contra los daños por heladas, este estudio se motiva en contribuir de manera original al área mediante el desarrollo de un modelo numérico que permita analizar las dos complejidades mencionadas anteriormente. El modelo propuesto buscará evaluar la eficacia de las WM, proporcionando una mejor comprensión de la física del fenómeno y, eventualmente, aplicarse en estudios de factibilidad previos a la inversión en la compra e instalación de estas máquinas. Además, este modelo podría ayudar a optimizar los diseños, permitiendo optimizar la ubicación de las WM para lograr la mayor cobertura de protección posible.

1.3. Objetivos

Para el presente trabajo se plantearon los siguientes objetivos:

1. Realizar un estudio bibliográfico sobre el fenómeno de las heladas, con

un enfoque particular en el estado del arte de los métodos de protección activa.

2. Implementar y validar un modelo computacional basado en el concepto de disco actuador, para representar una WM.
3. Integrar la WM en un modelo numérico propietario de la empresa TCB, con el fin de analizar su impacto en la reducción del riesgo de ocurrencia de heladas.
4. Validar la implementación del modelo mediante una comparación cualitativa con estudios previos realizados por el Departamento de Geociencia de la Universidad Tecnológica de Delft (Países Bajos).

1.4. Estructura de la tesis

Este documento consta de seis capítulos: Introducción, Estado del arte, Conceptos preliminares, Metodología, Resultados y validación, y Conclusiones y trabajos futuros. En el Capítulo 2, se introducen las definiciones clave relacionadas con las heladas agrometeorológicas y las estrategias de protección. Además, se presenta una breve reseña histórica sobre la evolución de los métodos de protección y el uso de simulaciones numéricas para evaluar el riesgo de heladas.

A continuación, en el Capítulo 3, se presentan los conceptos fundamentales sobre simulaciones numéricas, así como las estrategias de procesamiento mediante el uso de CPUs y GPUs, con el objetivo de familiarizar al lector con el modelo computacional utilizado. También se desarrollan las bases teóricas aerodinámicas necesarias para la implementación del modelo numérico de la WM.

En el Capítulo 4, se describe en detalle la metodología empleada para el desarrollo del modelo, incluyendo las consideraciones físicas clave, como la estimación de fuerzas aerodinámicas, y la definición de condiciones de borde e iniciales, entre otras. Asimismo, se detalla el desarrollo de las rutinas computacionales implementadas en *caffa3d* y *chaman*, las cuales permiten simular el comportamiento de la WM.

El Capítulo 5 presenta los resultados de la aplicación numérica destinada a validar el modelo de disco actuador. Los resultados obtenidos se comparan con los reportados en la bibliografía, en particular con el trabajo de maestría

de (Heusinkveld, [2019](#)), permitiendo evaluar el correcto funcionamiento del modelo. Cabe destacar que, aunque se intentó integrar el modelo de WM en el código propietario de la empresa TCB para realizar análisis más realistas, los resultados presentados se limitan únicamente a simulaciones en CPU.

Finalmente, en el Capítulo [6](#), se sintetizan los principales resultados de la investigación, y se proponen líneas de trabajo futuras que permitan profundizar en la temática, así como explorar posibles aplicaciones en el mercado de protección contra heladas.

Capítulo 2

Estado del arte

Este capítulo incluye una revisión bibliográfica de los conceptos y aspectos más relevantes relacionados con el funcionamiento de las WM. En primer lugar, en la Sección 2.1, se presentan las definiciones y clasificaciones de las heladas. A continuación, en la Sección 2.2, se abordan los métodos de protección más utilizados, junto con una breve reseña histórica cronológica. En la Sección 2.3, se describen los aspectos físicos y el funcionamiento de las WM, así como algunos lineamientos sobre los resultados esperados. Por último, en la Sección 2.4, se presentan los antecedentes de simulaciones numéricas aplicadas al modelado de esta problemática.

2.1. Heladas agrometeorológicas

Técnicamente, se considera helada meteorológica cuando la temperatura del aire a 1,5 m del suelo desciende a un valor igual o inferior al punto de congelamiento del agua, es decir, a 0 °C, independientemente de su duración o intensidad. Sin embargo, es necesario señalar que para fines más específicos del agro, puede indicarse la existencia de heladas agronómicas o agrometeorológicas, la cual se define como aquella en la que el descenso de la temperatura del aire a niveles críticos para los cultivos ocurre sin llegar necesariamente a 0 °C (Bravo et al. 2020); no obstante, la palabra es ampliamente utilizada por el público para describir un evento meteorológico cuando los cultivos y otras plantas experimentan daño por congelación.

En la literatura existen varias alternativas para clasificar las heladas (Bravo et al. 2020; Snyder y Melo-Abreu, 2010). De acuerdo con su origen sinóptico se

define helada en dos ámbitos: “advectiva” y “radiativa”. Las heladas advectivas están asociadas con incursiones a gran escala de aire frío con una atmósfera con viento y bien mezclada y una temperatura que a menudo está por debajo de cero, incluso durante el día. Las heladas de radiación están asociadas con el enfriamiento debido a la pérdida de energía por el intercambio radiante durante las noches despejadas y en calma, y con inversiones de temperatura.

Esta clasificación comprende la mayoría de los fenómenos que provocan daño por congelamiento en los cultivos, en particular los efectos de la helada de radiación, los cuales se buscan mitigar con la implementación de medidas activas. A continuación, se realiza una descripción más detallada de cada una para lograr un mayor entendimiento.

Las heladas de advección

Se producen debido al movimiento de una masa de aire frío sobre una región específica. Ocurren principalmente en épocas de otoño, invierno y primavera y el origen se da cuando el aire frío fluye en un área para reemplazar el aire más caliente que estaba presente antes del cambio meteorológico. Suelen afectar amplias zonas del territorio tanto en superficie como en altura y están asociadas con condiciones de nubosidad, vientos de moderados a fuertes, sin inversión de temperatura y baja humedad. A menudo las temperaturas caerán por debajo de 0°C.

Muchos de los métodos de protección activos trabajan mejor con la presencia de inversión térmica por lo cual las heladas de advección son difíciles de combatir.

Las heladas de radiación

Las heladas de radiación son acontecimientos usuales. Se caracterizan por un cielo despejado, en calma o con poco viento, inversión de temperatura, temperaturas del punto de rocío bajas y temperaturas del aire que normalmente caen por debajo de 0°C durante la noche pero que están por encima de 0°C durante el día.

En noches despejadas y sin viento, la superficie del suelo comienza a enfriarse debido a la pérdida de energía por emisión de radiación de onda larga. Como hay una pérdida neta de energía por la radiación desde la superficie, el contenido de calor sensible de la superficie del suelo y del aire cercano a la

superficie disminuye. Hay un flujo de calor sensible hacia abajo desde el aire y hacia arriba desde el suelo hacia la superficie para reemplazar la pérdida de calor sensible. Esto provoca que la temperatura disminuya también en el aire, pero no tan rápidamente como en la superficie. La caída de la temperatura del aire próximo a la superficie da lugar a la formación de una inversión de temperatura, es decir la temperatura crece en función de la altura. La altura de la parte superior de la inversión de temperatura es variable dependiendo de la topografía local y de las condiciones meteorológicas, pero generalmente varía de los 9 a los 60 *m* (Perry y Bradley, 1994).

El nivel en el que el perfil de temperatura cambia de una inversión térmica a una condición normal del gradiente térmico se conoce como “techo”. Una inversión térmica débil, que se asocia con un techo alto, ocurre cuando las temperaturas en las capas superiores son solo ligeramente más altas que cerca de la superficie. En contraste, una inversión térmica fuerte, o techo bajo, se caracteriza por un aumento rápido de la temperatura con la altitud. Las medidas de protección activas son más efectivas en condiciones de inversión fuerte, que son típicas de las heladas de radiación.

2.2. Estrategias de protección y mitigación

La protección de cultivos contra heladas ha sido un desafío constante para los agricultores desde los inicios de la agricultura. A pesar de una gestión óptima de todos los aspectos de la producción, una sola noche de temperaturas bajo cero puede provocar la pérdida total de las cosechas. Este problema es global, afectando a casi todas las latitudes, excepto en las zonas tropicales, donde las temperaturas raramente descienden por debajo del punto de congelación. La ciencia de la protección contra heladas ha evolucionado principalmente en respuesta a estos eventos dañinos, que ocurren de forma esporádica en climas generalmente favorables. En aquellos lugares donde el daño por heladas es recurrente, la estrategia más efectiva ha sido, históricamente, la reubicación del cultivo hacia áreas menos propensas.

Las técnicas de protección contra heladas se dividen generalmente en métodos pasivos y activos. Los métodos pasivos actúan en términos de prevención a largo plazo y resultan particularmente beneficiosos cuando ocurren condiciones de helada. Estas estrategias se relacionan con técnicas biológicas y ecológicas, e incluyen prácticas que se llevan a cabo antes de las noches de helada para

reducir el potencial de daño.

Por otro lado, los métodos activos requieren energía o trabajo y están diseñados para modificar directamente el microclima nocturno, ya sea liberando calor, aumentando la humedad o generando turbulencia, con el objetivo de alterar el equilibrio térmico y compensar las pérdidas de energía natural (Bagdonas et al. 1978). Esto se logra mediante el uso de diversas máquinas y dispositivos, como estufas, aspersores y máquinas de viento. Dentro de la categoría de máquinas de viento, existen dos tipos: las de eje horizontal, llamadas ventiladores o WM, y las de eje vertical, como el Sumidero Invertido Selectivo (SIS).

Hace dos décadas, las tecnologías de protección de cultivos se podían clasificar en dos grupos principales. Las más tradicionales se basaban en la generación de calor para contrarrestar las pérdidas térmicas causadas por las heladas. Las tecnologías modernas, surgidas a mediados del siglo XX, incorporaron un conocimiento más profundo de la estructura atmosférica durante las heladas, aprovechando este entendimiento para mitigar el daño (Guarga, 2010).

El uso de estufas para combatir las heladas tiene una historia de más de 2,000 años. Originalmente, consistían en fogatas a cielo abierto, pero con el tiempo evolucionaron a contenedores de metal, que permitían una mayor retención del calor por radiación y convección. Esta práctica, especialmente común en plantaciones frutales, fue utilizada ampliamente hasta que el humo generado por las estufas se convirtió en un problema de salud pública y medioambiental. En Estados Unidos, a mediados del siglo XX, el uso de estufas de leña fue prohibido debido a su impacto contaminante. En respuesta, los agricultores adoptaron estufas con chimenea de retorno, un diseño que recirculaba el humo y los vapores para reducir la contaminación. Aunque estas estufas y las de propano de combustión limpia siguen siendo legales en algunas regiones, los crecientes costos del combustible y la preocupación ambiental llevaron a su progresiva desaparición a partir de los años cincuenta (Snyder y Melo-Abreu, 2010).

En la década de 1950, las WM comenzaron a reemplazar a las estufas como el método preferido de protección contra heladas. A diferencia de las tecnologías anteriores, que buscaban compensar directamente la pérdida de calor, las máquinas de viento aprovechan la estratificación natural de la atmósfera, característica de las heladas de radiación. Aunque inicialmente eran más costosas, su bajo costo de operación y mantenimiento las hizo populares, es-

pecialmente en regiones como California, donde el uso de estufas ya era casi inexistente para los años setenta. Si bien en algunas partes del mundo todavía se utilizan estufas de combustible sólido, es probable que estas desaparezcan por completo, salvo las versiones más limpias.

Recientemente han aparecido diseños que combinan el uso de calefactores con las WM, precalentando el aire de succión para lograr un calentamiento más efectivo. Esto demuestra que las WM se consideran una herramienta esencial para la protección activa contra heladas y que continúan evolucionando con mejoras en diseño y eficiencia. Así, su estudio y optimización resultan fundamentales para enfrentar los efectos de las heladas de manera cada vez más eficaz y sostenible.

2.3. Las *Wind Machines* como medida activa de mitigación

Las WM se introdujeron como un método de protección contra heladas en California durante los años 20, aunque no fueron ampliamente aceptadas hasta los años 40 y 50. Actualmente, se emplean en diversas partes del mundo y en una amplia variedad de cultivos, incluyendo viñedos, árboles de hoja caduca y cítricos (Snyder y Melo-Abreu, 2010). Las WM consisten, en general, en una torre de acero con un gran rotor en la parte superior, el cual cuenta con dos o más palas, con un diámetro que varía entre 3 y 6 *m*. La altura típica es de unos 10 a 11 *m* sobre el nivel del suelo, principalmente para evitar que las palas dañen los árboles, sin una razón aerodinámica específica para esta selección de altura. La velocidad de rotación del rotor se encuentra en torno a 590-600 *rpm*, y tiene la capacidad de girar alrededor de la torre, completando una revolución cada cuatro o cinco minutos. Además, el rotor suele estar inclinado unos 7° hacia abajo, lo que permite dirigir el chorro de aire hacia la zona próxima al suelo. Esta configuración mejora la eficiencia operativa del sistema al favorecer la mezcla del aire más cálido de capas superiores con el aire frío acumulado cerca de la superficie.

A diferencia de otros métodos, las WM no generan calor, sino que redistribuyen el calor sensible presente en el aire, mezclando el aire cálido de las capas superiores con el aire más frío cercano a la superficie y eliminando así el aire más frío en contacto con las hojas. La energía necesaria para hacer funcionar

la WM proviene de un motor instalado en la base de la torre; sin embargo, algunas máquinas más antiguas tienen el motor en la parte superior de la torre junto al rotor.

Durante las noches de heladas de radiación, las WM generan fuertes corrientes de aire que erosionan la inversión térmica cercana a la superficie a través de la mezcla de aire. Este proceso de mezcla mejora tanto el intercambio de calor vertical (aire-aire) como el intercambio local de calor (planta-aire), lo que resulta en un aumento de la temperatura en los tejidos de las plantas (Dai et al. 2024). Este proceso se muestra esquemáticamente en la Figura 2.1.

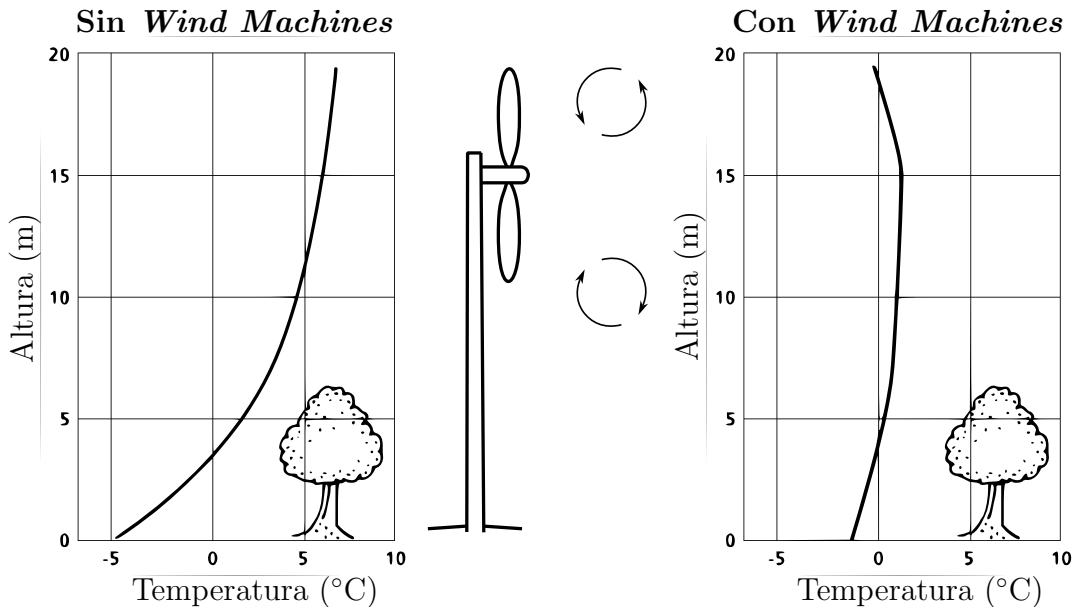


Figura 2.1: Cambio esperado en el perfil vertical de temperaturas en presencia de la WM. Adaptado de (Snyder y Melo-Abreu, 2010).

En el área de influencia de una WM, se espera que la temperatura media del aire a 1,5 m de altura aumente aproximadamente un tercio de la fuerza de la inversión térmica, calculada como la diferencia entre las temperaturas a 10 m y 1,5 m en una plantación no protegida (Snyder y Melo-Abreu, 2010). El beneficio real depende de las características de la inversión térmica, las cuales no se pueden generalizar. Sin embargo, las mejores protecciones se obtienen con inversiones térmicas más fuertes. La protección térmica es más efectiva en las cercanías de la torre y disminuye con la distancia debido a la disipación del flujo inducido. Asimismo, el área de protección resultante suele presentar una forma ovalada en lugar de circular, ya que el chorro generado es arrastrado por el viento ambiental, extendiendo la zona de influencia principalmente en

la dirección predominante del flujo.

Comprender la dinámica de la mezcla de aire y su impacto en la temperatura de los tejidos de las plantas es esencial para optimizar las operaciones de las WM. Además, antes de invertir en este tipo de maquinaria, es importante investigar el clima local, ya que si la inversión térmica es pequeña o inexistente, este método podría no ser efectivo. En comparación con otros métodos, las WM tienen menores requerimientos de mano de obra y costos de funcionamiento, y son ambientalmente sostenibles, salvo por el ruido, que representa un desafío para agricultores con cultivos cercanos a zonas pobladas.

2.4. Antecedentes de simulaciones numéricas aplicadas a la protección contra heladas

Como se mencionó en las secciones anteriores, históricamente se han utilizado métodos mecánicos, térmicos y químicos para mitigar los efectos de las heladas. Entre estos, se destacan las WM, los aspersores de agua y el uso de calefactores las cuales han demostrado ser estrategias eficaces. Sin embargo, la complejidad de los procesos atmosféricos y el alto costo de las medidas de protección han motivado la búsqueda de soluciones más optimizadas. En este contexto, las simulaciones numéricas han emergido como herramientas clave para estudiar y predecir el comportamiento de las heladas y el impacto de las técnicas de mitigación. El desarrollo de modelos numéricos permite la evaluación detallada de la interacción entre los cultivos, el suelo, la atmósfera y los sistemas de protección, ofreciendo la posibilidad de probar diferentes escenarios y estrategias sin incurrir en los costos y riesgos de los experimentos de campo.

Los primeros estudios de simulación numérica aplicados a la protección contra heladas se han centrado en modelar el intercambio de calor entre el suelo, el aire y los cultivos. Con el avance de la computación, se han introducido modelos más complejos que incorpora técnicas de *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para simular el flujo de aire en campos agrícolas y considerando la influencia de la topografía. Esto permite generar mapas de temperaturas en los cuales se observan las zonas que pueden ser propensas a sufrir más daño en noches de eventos de heladas. La compañía TCB es una de las pioneras en este desarrollo, la cual cuenta con un modelo CFD, que será utilizado en el

marco de este trabajo, el cual que incorpora modelos de radiación sofisticados que permiten resolver con gran aceptación la problemática.

Por otra parte, el Departamento de Geociencia de la Universidad Tecnológica de Delft (Países Bajos) a publicado varios trabajos en relación al fenómeno de heladas y las medidas de protección. Dentro de estos trabajos se han desarrollado simulaciones LES para modelar el calentamiento de los tejidos vegetales en presencia de WM (Dai et al. 2024). Por su parte en el trabajo de (Heusinkveld, 2019) se implementa un modelo de disco actuador para representar una WM el cual fue validado con datos experimentales en el marco de ese trabajo y también usado y validado en el trabajo de (Dai et al. 2023).

Si bien el uso de modelos de CFD en la protección contra heladas ha tenido un impacto significativo, no existe hasta el momento una implementación que permita simular el efecto de las WM y otros dispositivos mecánicos en el flujo de aire y la distribución de calor en un campo agrícola. Estas simulaciones son particularmente útiles para optimizar la ubicación y operación de las WM, maximizando su eficiencia y minimizando el consumo de energía.

A pesar de los avances en las simulaciones numéricas aplicadas a la protección contra heladas, aún existen desafíos por superar. Entre ellos, la representación precisa de las condiciones atmosféricas locales, la escalabilidad de los modelos para grandes áreas de cultivo, y la necesidad de reducir el tiempo computacional para generar predicciones en tiempo real. La incorporación de modelos meteorológicos más detallados y el uso de técnicas de aprendizaje automático prometen mejorar las capacidades predictivas y operativas de estos sistemas en el futuro.

Capítulo 3

Conceptos preliminares

Este capítulo presenta las herramientas clave necesarias para desarrollar un modelo computacional que analizará el comportamiento de las WM. La primera sección aborda los conceptos fundamentales en los que se basa el modelo computacional, haciendo uso del software *caffa3d*. Esto incluye una descripción del modelo matemático, la discretización de las ecuaciones, y las estrategias de resolución tanto para CPU como para GPU. Además, se desarrolla la teoría aerodinámica de ventiladores axiales, presentando los lineamientos principales para modelar un ventilador. Esto incluye la Teoría de la Cantidad de Movimiento, tanto en su versión unidimensional como general, así como el método *Blade Element Momentum* (BEM).

3.1. Simulaciones numéricas: modelo *caffa3d*

El modelo *caffa3d*.MBRi está basado en uno de los códigos descritos en (Ferziger y Peric, 2002), que implementa el método de volúmenes finitos para resolver flujos incompresibles en 3 dimensiones.

En el presente capítulo se describen las principales técnicas numéricas que componen el código y que permitirán abordar las simulaciones propuestas de manera precisa y eficiente.

3.1.1. Modelo matemático

El modelo matemático comprende las ecuaciones de balance de masa y balance de momento para un fluido viscoso incompresible (laminar o turbulento)

con una ecuación de transporte escalar genérica no reactiva para el campo escalar ϕ con coeficiente de difusión Γ .

Si se considera una región fija en el espacio o volumen de control Ω definido dentro del dominio ocupado por el fluido y con frontera definida S , la primera ecuación correspondiente al balance de masa (3.1) expresa que

$$\int_S (\vec{v} \cdot \hat{n}_S) dS = 0 \quad (3.1)$$

donde \vec{v} se corresponde con el vector velocidad y \hat{n}_S con la normal de la superficie en el diferencial dS .

Por su parte, la ecuación de balance de momento se puede escribir de la siguiente manera

$$\int_{\Omega} \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} d\Omega + \int_S \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \hat{n}_S) dS = \int_{\Omega} \rho \beta (T - T_{ref}) \vec{g} d\Omega + \int_S -p \hat{n}_S dS + \int_S (2\mu \mathbf{D} \cdot \hat{n}_S) dS \quad (3.2)$$

donde $v = (u, v, w)$ es la velocidad del fluido, ρ es la densidad, β es el coeficiente de expansión térmica, T es la temperatura del fluido y T_{ref} es la temperatura de referencia, g es la gravedad, p es la presión, μ es la viscosidad dinámica del fluido y D es el tensor de velocidad de deformación, dado por la siguiente expresión

$$D = \frac{1}{2} [\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T] \quad (3.3)$$

Por último, la ecuación que describe la conservación de las magnitudes escalares se expresa de la siguiente manera

$$\int_{\Omega} \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} d\Omega + \int_S \rho \phi (\vec{v} \cdot \hat{n}_S) dS = \int_S \Gamma (\nabla \phi \cdot \hat{n}_S) dS + \int_{\Omega} q_{\phi} d\Omega \quad (3.4)$$

Donde ϕ corresponde a la magnitud escalar, Γ a la difusividad de ϕ y q_{ϕ} a una fuente o sumidero del mismo, en los casos que corresponda.

Se destaca que las ecuaciones (3.1) y (3.4) son escalares, mientras que la ecuación (3.2) es vectorial, que deberá ser proyectada en la base de vectores definida en la discretización de la misma. De esta manera, el sistema conformado por las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.4) definen un sistema de 5 ecuaciones escalares y 5 variables incógnitas correspondientes a la presión p , las tres com-

ponentes de la velocidad $v = (u, v, w)$ y a la magnitud escalar ϕ .

3.1.2. Discretización de las ecuaciones

Las técnicas de discretización tienen como objetivo reemplazar el sistema de ecuaciones diferenciales definido en el modelo matemático por un sistema de ecuaciones algebraicas aproximado para poder ser resuelto mediante el uso de computadoras. De esta manera, los campos continuos de velocidades y presión pasan a ser calculados en un conjunto finito de puntos en el tiempo y espacio. Estos métodos deberán cumplir con ciertos requisitos de estabilidad y consistencia (Ferziger y Peric, 2002) que aseguren la convergencia de las soluciones del sistema lineal aproximado a la solución teórica determinada por el modelo matemático en la medida que se aumenta la densidad de los puntos de cálculo.

Los métodos empleados para resolver numéricamente el sistema de ecuaciones definido por (3.1), (3.2) y (3.4) para fluidos newtonianos incompresibles se pueden diferenciar de acuerdo a tres grandes aspectos que deben ser abordados

- Discretización utilizada para aproximar las ecuaciones del modelo matemático por un sistema de ecuaciones algebraicas.
- Integración temporal.
- Acoplamiento de la presión y la velocidad.

El código *caffa3d* emplea el método de Volúmenes Finitos, en el cual se discretizan las ecuaciones de Navier-Stokes en su forma integral. El modelo propone la división del dominio ocupado por el fluido mediante una malla estructurada dividida en bloques (no necesariamente estructurados), que define celdas discretas no superpuestas.

El dominio debe representarse mediante una malla estructurada, pudiendo ser la misma cartesiana ortogonal o incluso curvilínea adaptable al sólido. Por tratarse de un mallado tridimensional estructurado, todas las celdas definidas quedan conformadas por hexaedros, que limitan con 6 celdas adyacentes, sin superponerse ni dejar espacios libre en el dominio.

Cada ecuación de balance se discretiza y linealiza, en caso de corresponder, de forma de obtener una ecuación lineal que involucre al centro del volumen de control correspondiente a la ecuación de balance, denominado P y sus seis vecinos (*North, South, West, East, Top, Bottom*). La estructura resultante se muestra en la siguiente ecuación

$$\begin{aligned}
A_P^\phi \cdot \phi_P + A_W^\phi \cdot \phi_W + A_E^\phi \cdot \phi_E + A_S^\phi \cdot \phi_S \\
A_N^\phi \cdot \phi_N + A_B^\phi \cdot \phi_B + A_T^\phi \cdot \phi_T = Q_P^\phi
\end{aligned} \tag{3.5}$$

De esta forma se obtiene para cada ecuación de balance un sistema lineal de ecuaciones. Por lo tanto, se requiere resolver cinco sistemas lineales acoplados.

El acople entre velocidad y presión en la resolución de estos sistemas se realiza mediante el *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations* (SIMPLE). Este método propone una expresión que corrige progresivamente el campo discreto de presiones (*pressure-correction*) empleando un algoritmo iterativo hasta obtener un campo de velocidades que cumple las ecuaciones de Balance de masa y Balance de momento. De esta manera dado un campo de velocidades \vec{v}^* obtenido en primera instancia a partir de la ecuación discretizada (3.5) utilizando valores arbitrarios de presiones p^* , el método tiene como objetivo deducir una corrección de la presión p' que permita obtener un campo de velocidades \vec{v}' tal que sumado a \vec{v}^* dé como resultado el campo de velocidades correcto, ver (3.6)

$$\vec{v} = \vec{v}^* + \vec{v}' \quad p = p^* + p' \tag{3.6}$$

3.1.3. Modelos de turbulencia

Normalmente, los flujos que se presentan en aplicaciones de ingeniería son de carácter turbulento, como es el caso de la capa límite atmosférica. Sin embargo, debido a la complejidad que presentan estos flujos, ningún modelo computacional es capaz de resolver por completo y en forma eficiente todas las escalas que se presentan. Por este motivo, se utilizan distintos modelos que buscan reproducir el efecto de los mismos, al menos parcialmente, mediante el uso de simulaciones numéricas.

La aproximación más precisa se obtiene mediante simulación numérica directa (DNS), es decir, mediante la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes discretizadas, resolviendo todas las escalas espaciales y temporales del flujo turbulento, empleando únicamente aproximaciones relacionadas con la discretización de las ecuaciones. Para lograr esto, se deben utilizar tamaños de malla que logren capturar todas las escalas de turbulencia participantes en el modelo, lo que aumenta el costo computacional asociado, por lo que su aplicación se limita a flujos con bajo número de Reynolds en geometrías

simples.

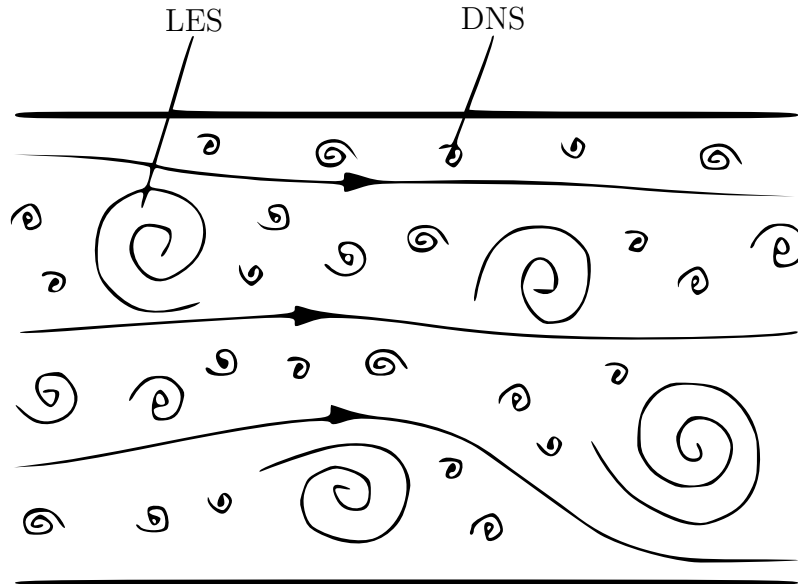


Figura 3.1: Esquema comparativo de modelos de turbulencia LES y DNS. Tomado de (Ferziger y Peric, 2002).

Existen como opción alternativa los métodos basados en el modelo matemático de las ecuaciones de balance de masa y momento promediadas en el tiempo (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS)), pudiendo aplicarse a flujos estadísticamente estacionarios. Se destaca que al promediar la ecuación de balance de momento, debido a la no linealidad existente en el término convectivo, surgen términos asociados a las componentes turbulentas (no estacionarias), que no son resueltas numéricamente por el modelo.

Como solución de compromiso entre los modelos RANS y DNS, nace el método LES, cuyo esquema básico consiste en resolver explícitamente las grandes escalas de turbulencia y modelar las más pequeñas.

3.1.4. Condiciones de borde inmersas

El modelado de fronteras con geometrías complejas es una tarea que requiere gran atención, debiéndose generar mallas que logren representar correctamente la influencia de las mismas en el campo de velocidades, evitando irregularidades en la discretización espacial de las ecuaciones.

El método de las condiciones de borde inmersas, presentado originalmente por (Peskin, 1972), simplifica en gran medida este desafío, permitiendo realizar

las simulaciones en mallas tan simples como las cartesianas, que no necesariamente se ajusten a las superficies de los cuerpos a representar. En cambio, la geometría es representada a través de un campo de fuerzas de masa externo al fluido, que actúa sobre este de la misma manera que lo haría la frontera reproducida.

El código *caffa3d* tiene incorporado el modelo propuesto por (Liao et al. 2010), el cual consiste en calcular la fuerza aplicada sobre el fluido mediante un término fuente adicional en el miembro derecho de la ecuación (3.5). Dicho término se obtiene a partir de una combinación de interpolación del campo de velocidades en las celdas de fluido adyacentes a la superficie del cuerpo y del forzamiento de la velocidad del sólido en aquellas celdas que se encuentran dentro de su frontera, de modo de modificar el campo de velocidades en las regiones del dominio afectadas por su presencia.

3.1.5. Resolución numérica en procesadores CPU

Como se ha visto anteriormente el acoplamiento del sistema de ecuaciones con respecto a los campos de velocidad y presión requiere de un tratamiento numérico iterativo para ser resuelto.

Esto determina que para cada paso temporal, la resolución numérica del sistema de ecuaciones debe ser realizada a través de bucles iterativos en dos niveles distintos de aplicación. De acuerdo con el esquema que proponen Peric 2004 y (Ferziger y Peric, 2002), las iteraciones realizadas para alcanzar las convergencias de los campos de velocidad y presión (utilizando el método SIMPLE), y escalares se denominan iteraciones externas (en inglés *outer iterations*). Mientras que las iteraciones realizadas para resolver cada uno de los sistemas de ecuaciones algebraicas se denominan iteraciones internas (*inner iterations*). En la figura 3.2 se muestra el esquema de iteraciones implementado por el *caffa3d* en acuerdo a esta jerarquización de las iteraciones.

Los pasos de iteración externa se repiten hasta que se logra satisfacer todas las ecuaciones con un margen de tolerancia ó, como es el caso del *caffa3d*, hasta que se alcanza un límite preestablecido de iteraciones externas, teniendo en cuenta que el margen de tolerancia puede resultar demasiado exigente en algunas aplicaciones. Una vez que concluyen las iteraciones externas se procede a resolver el sistema de ecuaciones correspondientes al siguiente paso temporal.

Las iteraciones internas para resolver las ecuaciones algebraicas se realizan

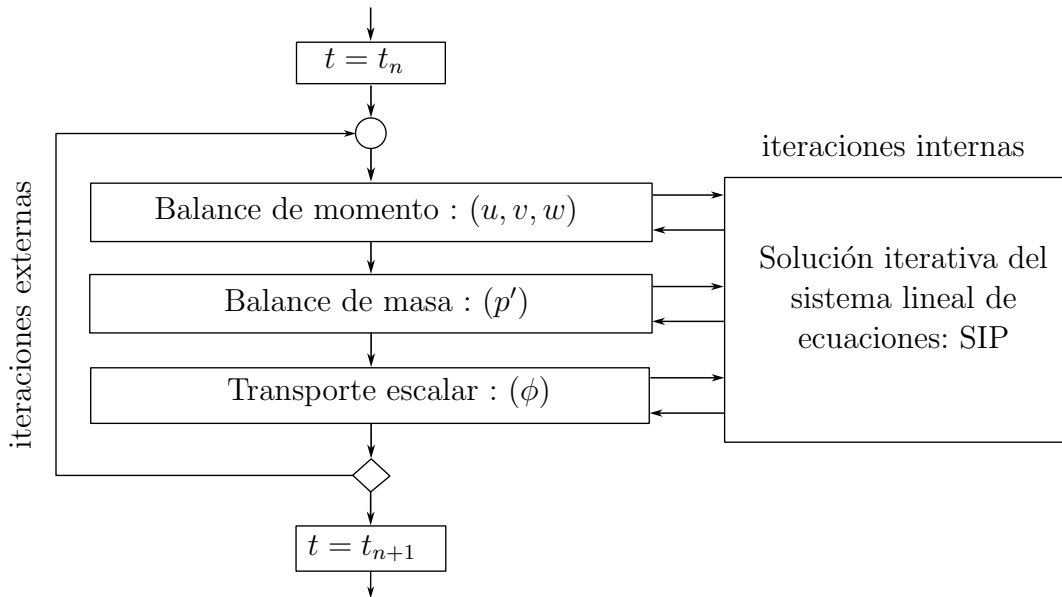


Figura 3.2: Esquema de iteraciones del código *caffa3d*. Adaptado de (Usera et al. 2008)

mediante una adaptación del algoritmo *Strongly Implicit Procedure* (SIP) para mallas estructuradas en bloques (Usera et al. 2008). Este algoritmo eficiente utiliza el método iterativo de descomposición *Lower-Upper* (LU) incompleta (*Incomplete Lower-Upper factorization* (ILU)), desarrollado por (Stone, 1968) y extendido para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales linealizadas en tres dimensiones por (Leishman, 1988a).

El enfoque de malla estructurada por bloques combinado con el método de condiciones de borde inmersas logran flexibilidad geométrica. Esto permite modelar geometrías complejas con un esfuerzo mínimo en el mallado, preservando la eficiencia numérica inherente a las mallas estructuradas (Fernandez et al. 2020).

Este marco de mallas estructuradas por bloques también facilita la paralelización a través de la descomposición del dominio, empleando un modelo de memoria distribuida mediante la biblioteca *Message Passing Interface* (MPI). Un conjunto compacto de llamadas a rutinas encapsuladas en MPI gestiona las tareas de comunicación de alto nivel entre procesos o regiones del dominio, cada una de las cuales está formada por uno o más bloques de malla.

El código ha sido aplicado y validado en diversos campos, incluyendo simulaciones de energía eólica y turbinas (Draper et al. 2018), flujo sanguíneo en arterias (Steinman et al. 2013), y transporte de contaminantes atmosféricos

(Mendina et al. 2014) y (Fernández, 2018). Para una descripción completa de las capacidades del código, consulte (Mendina et al. 2014). El software está compuesto principalmente por un conjunto de módulos en Fortran 90, los cuales contienen una amplia gama de funcionalidades que se activan según sea necesario.

El enfoque de cálculo paralelo en CPU se basa en la descomposición del dominio y la comunicación mediante MPI. Dentro de cada subregión de dominio, el código se ejecuta de manera serial en un solo núcleo de CPU, es decir, cada núcleo resuelve el flujo en su propia subregión de manera secuencial. En cada subregión, la mayoría de las rutinas del código manejan los cálculos a nivel de celda, organizadas en bucles que abarcan todo el subdominio. Existe una baja dependencia simultánea entre celdas vecinas, salvo en los casos de resolución de sistemas lineales necesarios debido a la naturaleza semi-implícita del método numérico utilizado.

3.1.6. Resolución numérica en procesadores CPU y GPU

Este segundo código integra el uso de GPU y emplea el mismo modelo matemático. Esta versión conserva aproximadamente el 40 % del código original escrito en Fortran 90.

El código implementa una integración eficiente entre un solver original en Fortran 90, orientado a CPU, y nuevos kernels de *Compute Unified Device Architecture* (CUDA) que ejecutan en GPU. Para lograr esta interacción, se hace uso del módulo y las especificaciones ISO-C-Binding de Fortran 90, lo que permite invocar rutinas escritas en C99 desde el código en Fortran y acceder a datos globales definidos en los módulos de Fortran. Las interfaces en Fortran 90 son creadas específicamente para cada rutina en C99, facilitando el lanzamiento de los kernels de GPU y la transferencia de datos entre la CPU y la GPU. La Figura 3.3 proporciona un esquema visual del flujo de comandos y su interacción entre CPU y GPU.

Para minimizar las ineficiencias causadas por las transferencias de memoria entre la CPU y la GPU, los arreglos de campo que contienen la velocidad, presión, y otras magnitudes físicas, así como las propiedades geométricas de la malla, se almacenan permanentemente en la memoria global de la GPU. Esta estrategia implica un uso intensivo de la *Random Access Memory* (RAM) de

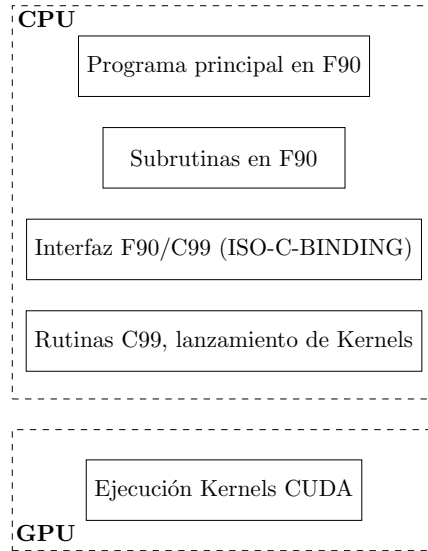


Figura 3.3: Cadena de comandos para la resolución en procesadores CPU - GPU. Adaptado de (Fernandez et al. 2020).

la GPU.

Las transferencias de los arreglos completos entre la CPU y la GPU solo ocurren al inicio de la simulación y antes de escribir la salida intermedia o final en el disco. Durante la simulación, se mantiene una copia de estos campos en la memoria de la CPU, lo que permite superponer la latencia del disco con los cálculos en curso. De manera similar, las comunicaciones MPI entre nodos se superponen con los cálculos mediante el uso de arreglos de búfer en la GPU y funciones de transferencia de búfer entre la CPU y la GPU, preservando la implementación original de las comunicaciones MPI en Fortran 90 (Mendina et al. 2014).

Para mejorar el acceso a la memoria y reducir la necesidad de funciones atómicas en varias rutinas del solver, se implementa un esquema de almacenamiento rojo-negro en la memoria global de la GPU para los arreglos de campo en mallas estructuradas. Este esquema es compatible con la mayoría de las rutinas del solver y con solucionadores lineales simples, como el solucionador rojo-negro opcional en *caffa3d.MBRi*. Los datos se organizan en tiras del tamaño de un *warp*, alternando celdas de color rojo y negro. Este proceso se invierte antes de transferir los datos de nuevo a la CPU para la salida. Los arreglos multidimensionales, como los de velocidad y posición, se dividen en dimensiones relevantes, con cada tira del tamaño de un *warp* conteniendo celdas del mismo color y dimensión.

El solver lineal más eficiente en *caffa3d.MBRi* para las matrices heptadiagonales, que surgen del esquema de malla estructurada, es el solver SIP (Igounet et al. 2012). Para este solver, el esquema rojo-negro no resulta adecuado debido a las fases de sustitución directa e inversa. En su lugar, se adopta una estrategia de memoria basada en hiperplanos, en la cual el dominio se reordena en conjuntos de celdas con igual combinación de índices espaciales. Esta estrategia permite procesar en paralelo las celdas pertenecientes a un mismo hiperplano, respetando al mismo tiempo el orden secuencial necesario entre hiperplanos consecutivos, garantizando así la estabilidad del solver y una gestión eficiente de la memoria.

La estructura final del solver que utiliza la GPU se ilustra en la Figura 3.4, donde se muestra el orden de ejecución y los comandos de transferencia de datos entre la CPU y la GPU. Los cálculos necesarios para resolver las ecuaciones se encuentran dentro del bloque del solver, mientras que los comandos de control, como el bucle de iteración externa, se gestionan desde la CPU.

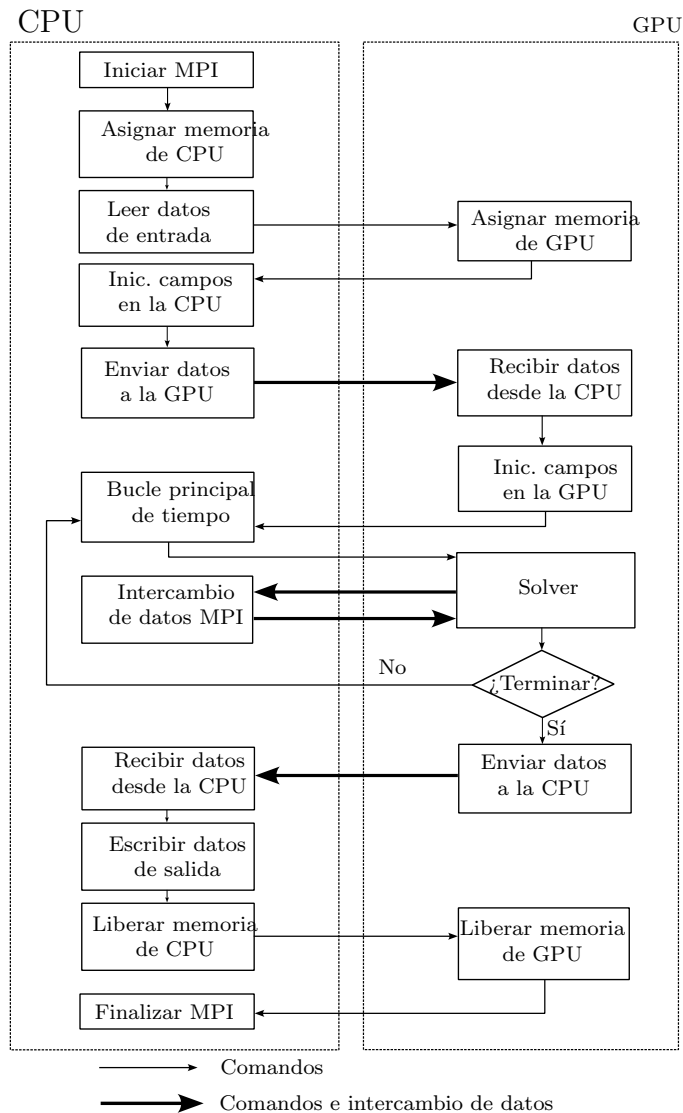


Figura 3.4: Esquema de trabajo del solver GPU. Adaptado de (Fernandez et al. 2020).

3.2. Teoría aerodinámica de ventiladores axiales

Antes de comenzar, es importante destacar que los conceptos presentados a continuación han sido desarrollados principalmente para propulsores o turbinas eólicas. Sin embargo, como mencionó (Glauert, 1926), la teoría del comportamiento de un rotor sigue las mismas líneas, independientemente del propósito para el que esté destinado.

Un ventilador axial consiste en varias palas radiales idénticas, espaciadas

de manera uniforme, que giran alrededor del eje del rotor impulsadas por el torque del motor. La sección de cada pala a cualquier distancia radial tiene la forma de un perfil aerodinámico, y cada elemento de la pala, en su movimiento a través del aire, experimenta fuerzas de sustentación y arrastre según las propiedades del perfil.

Estas fuerzas de sustentación y arrastre se combinan para formar el empuje y el torque, que son, respectivamente, la fuerza axial resultante y el momento experimentado por el rotor. La reacción de estas fuerzas sobre el aire produce una corriente de estela que abarca todo el aire que ha pasado a través del diámetro barrido por las palas del rotor y cuyo movimiento ha sido modificado por la reacción del empuje y del momento.

El empuje aumenta la presión del aire aguas abajo del rotor y la reduce aguas arriba. Esto provoca que el aire sea succionado hacia la parte delantera del rotor y expulsado por la parte trasera. La rotación de las palas mantiene este sistema de presión. La velocidad axial máxima se alcanza solo a cierta distancia aguas abajo del rotor. Por otra parte, debido al aumento gradual de la velocidad axial, la corriente de la estela se contrae a medida que avanza aguas abajo del rotor. Este tipo de flujo puede representarse de manera esquemática como se muestra en la Figura 3.5.

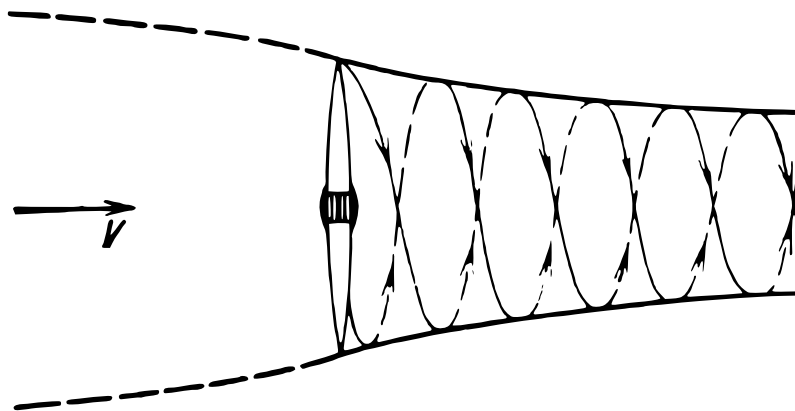


Figura 3.5: Esquema de la estela. Tomado de (Glauert, 1935).

En la Teoría de Cantidad de Movimiento, la atención se dirige principalmente al movimiento del fluido, y las fuerzas que actúan sobre el rotor se determinan como aquellas necesarias para impartir este movimiento al fluido. La Teoría de Cantidad de Movimiento fue iniciada por W. J. M. Rankine en 1865 y desarrollada posteriormente por R. E. Froude. Sigue siendo una base sólida para estimar la eficiencia ideal de un rotor, que es el límite superior

extremo que puede obtenerse con el mejor rotor bajo las condiciones dadas de operación.

En el marco de la Teoría de Cantidad de Movimiento, la velocidad axial media del fluido a través del disco del rotor es mayor que la velocidad del flujo libre, pero menor que la velocidad axial en la estela aguas abajo. En particular, la velocidad en el plano del rotor se obtiene como el promedio aritmético entre la velocidad del flujo libre, definida como la velocidad no perturbada medida aguas arriba del ventilador, y la velocidad axial en la estela generada aguas abajo del rotor. Una forma extendida de la Teoría de Cantidad de Movimiento, que incluye los efectos del movimiento rotacional de la corriente de estela, fue desarrollada por A. Betz.

Sin embargo, la Teoría de Cantidad de Movimiento no proporciona información sobre la forma del rotor, lo cual llevó al desarrollo de una nueva teoría enfocada en la geometría de las palas. El principio de la Teoría del Elemento de Pala es considerar las fuerzas experimentadas por las palas del rotor en su movimiento a través del fluido, y por lo tanto esta teoría está íntimamente relacionada con la forma geométrica del rotor. La teoría fue iniciada por W. Froude en 1878, pero su desarrollo se debió principalmente al trabajo de S. Drzewiecki, quien la presentó en su libro *Théorie générale de l'hélice* (Drzewiecki, 1920). La base del análisis es que la pala del rotor se divide en un gran número de elementos a lo largo del radio y que cada uno de estos elementos se considera como un perfil aerodinámico que se mueve con una velocidad determinada por la velocidad axial constante V del rotor y la velocidad de rotación Ωr , la cual varía de un elemento a otro a lo largo de la pala.

Durante los últimos 100 años, diversos autores han desarrollado el método BEM clásico. Este método permite abordar la aerodinámica de propulsores y aerogeneradores de eje horizontal bajo un conjunto de hipótesis. La principal contribución a la teoría fue realizada por (Glauert, 1935), quien desarrolló el primer enfoque clásico para el análisis aerodinámico de rotores de girocóptero que luego fue adaptado a aerogeneradores. Glauert desarrolló su formulación combinando la Teoría de Cantidad de Movimiento y la Teoría del Elemento de Pala. Este enfoque luego fue adoptado y expandido por diferentes autores, entre ellos (Leishman, 1988b), (Spera, 1994), y (Hansen, 2011b), quienes, basados en el método clásico, han implementado correcciones sobre la dinámica del viento y el sistema que han permitido modelar el comportamiento no estacionario de aerogeneradores en particular pero que también pueden ser extendidos a

ventiladores axiales.

3.2.1. Cantidad de Movimiento unidimensional

La teoría de Cantidad de Movimiento, también conocida como la *Teoría de Rankine-Froude*, consiste en modelar el rotor como un disco uniforme que genera una discontinuidad de presión en el flujo de aire a lo largo de un determinado volumen de control. Este enfoque permite obtener una primera aproximación de la energía intercambiada entre el rotor y el aire. Para su implementación se consideran las hipótesis de rotor ideal, las cuales comprenden los siguientes puntos:

- Flujo homogéneo, incompresible, en estado estacionario y sin arrastre por fricción.
- Rotor con número infinito de palas.
- Empuje y flujo de aire uniformes sobre el disco.
- Flujo de estela no rotativo y predominantemente axial.
- Presión estática aguas arriba y aguas abajo del rotor, en la frontera del volumen de control, igual a la presión estática ambiente no perturbada.

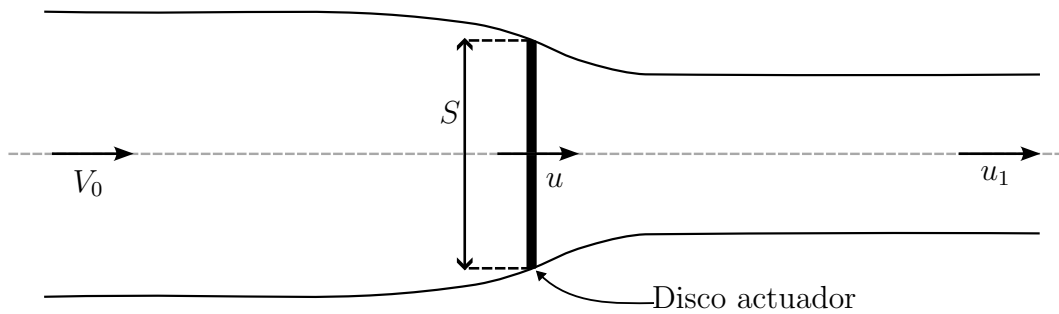


Figura 3.6: Esquema del modelo de disco actuador, indicando la velocidad del flujo libre aguas arriba V_0 , la velocidad axial en el plano del rotor u y la velocidad en la estela aguas abajo u_1 .

Considerando el disco actuador de la Figura 3.6 y asumiendo que actúa como un rotor ideal, se observa una variación de la velocidad del aire desde V_0 aguas arriba hasta u_1 aguas abajo del rotor. En la zona del disco el fluido experimenta una discontinuidad de presión Δp . De este modo, la fuerza de empuje T generada por el rotor queda definida como

$$T = \Delta p S, \quad (3.7)$$

donde S es el área del disco que representa al rotor. Por otro lado, dado que el flujo es incompresible, estacionario y sin fricción, es posible aplicar la ecuación de Bernoulli entre secciones alejadas aguas arriba y aguas abajo del rotor, obteniéndose el empuje en función de la variación de velocidad

$$T = \frac{1}{2} \rho (u_1^2 - V_0^2) S. \quad (3.8)$$

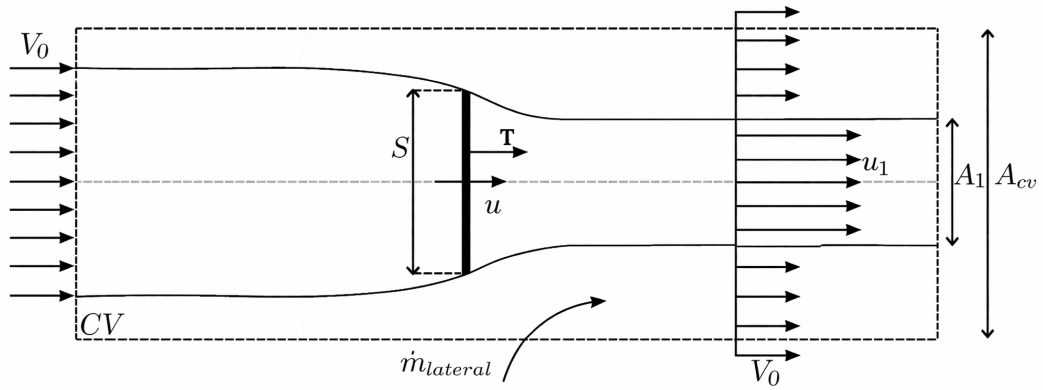


Figura 3.7: Esquema del volumen de control empleado en el análisis del disco actuador. El volumen de control encierra el rotor y la estela, definiendo las secciones de entrada y salida caracterizadas por las velocidades V_0 y u_1 , así como el área efectiva del disco S .

Cabe destacar que el volumen de control considerado corresponde a un volumen geométrico extendido que engloba tanto la estela inducida por el rotor como regiones de flujo no perturbado. En consecuencia, al aplicar los balances integrales sobre dicho volumen de control, aparece un flujo másico neto a través de las superficies laterales del mismo, denotado como $\dot{m}_{lateral}$. Este término no introduce nuevas variables cinemáticas en el modelo, ya que el análisis se mantiene unidimensional y todas las velocidades consideradas son axiales. Su inclusión responde únicamente a la necesidad de cerrar el balance integral sobre el volumen de control adoptado.

Bajo estas consideraciones, es posible aplicar la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento lineal en su forma integral,

$$\frac{d}{dt} \int_D \rho \vec{v} dV = \int_D \rho \vec{f}_v dV + \int_{\delta D} \vec{f}_s dS, \quad (3.9)$$

donde

- D representa el volumen de control considerado.

- δD es la superficie que delimita el volumen de control.
- ρ es la densidad del fluido.
- \vec{v} es el vector velocidad del fluido.
- \vec{f}_v representa las fuerzas de volumen por unidad de masa que actúan sobre el fluido.
- \vec{f}_s representa las fuerzas de superficie (o de contacto) por unidad de área que actúan sobre la frontera del volumen de control.

Aplicando el teorema del transporte al término de derivada total bajo las hipótesis previamente establecidas, se obtiene la expresión

$$\rho u_1^2 A_1 + \rho V_0^2 (A_{cv} - A_1) - \dot{m}_{\text{lateral}} V_0 - \rho V_0^2 A_{cv} = T \quad (3.10)$$

donde:

- V_0 es la velocidad axial del flujo no perturbado aguas arriba,
- u es la velocidad axial media en el plano del rotor,
- u_1 es la velocidad axial media en la estela aguas abajo,
- S es el área del disco actuador,
- A_1 es el área de la sección de la estela aguas abajo,
- A_{cv} es el área de la sección transversal del volumen de control,
- \dot{m}_{lateral} es el flujo másico neto a través de las superficies laterales del volumen de control,
- T es el empuje ejercido por el rotor sobre el fluido.

El flujo másico que atraviesa las superficies laterales del volumen de control se determina a partir de la conservación de la masa aplicada al volumen completo,

$$\rho A_1 u_1 + \rho (A_{cv} - A_1) V_0 = \dot{m}_{\text{lateral}} + \rho A_{cv} V_0, \quad (3.11)$$

de donde se obtiene

$$\dot{m}_{\text{lateral}} = \rho A_1 (u_1 - V_0). \quad (3.12)$$

Por otro lado, la conservación de la masa aplicada al flujo que atraviesa el rotor y su estela asociada permite establecer la relación

$$\dot{m} = \rho S u = \rho A_1 u_1. \quad (3.13)$$

Combinando las ecuaciones (3.10), (3.12) y (3.13), se obtiene finalmente la expresión del empuje en términos de la variación de velocidad axial,

$$T = \dot{m}(u_1 - V_0) = \rho S u (u_1 - V_0). \quad (3.14)$$

A partir de las ecuaciones (3.8) y (3.14) se obtiene una primera aproximación para la velocidad del viento en el plano del rotor,

$$u = \frac{1}{2}(u_1 + V_0). \quad (3.15)$$

De este modo, en el marco del modelo de rotor ideal, la velocidad del viento en el plano del rotor resulta ser el promedio entre las velocidades aguas arriba y aguas abajo del mismo.

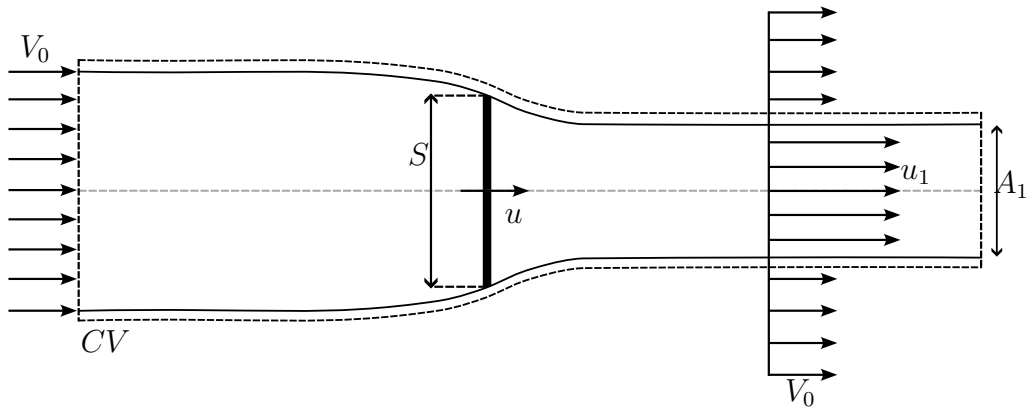


Figura 3.8: Volumen de control simplificado del modelo de disco actuador, utilizado para la aplicación del balance de cantidad de movimiento.

Continuando con el análisis, se toma un nuevo volumen de control, Figura 3.8, sobre el cual se aplica el principio de conservación de energía de un flujo para determinar la potencia que el rotor entrega al flujo

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \int_D \rho \vec{f} \cdot \vec{v} dV + \int_{\delta D} -p \vec{n} \cdot \vec{v} dS \quad (3.16)$$

Bajo las hipótesis de flujo estacionario, sin fricción, se puede asumir por lo tanto que no se experimentan pérdidas de energía entre la entrada y la salida, por lo tanto la potencia queda definida por la siguiente expresión

$$P = \frac{1}{2} \rho u S (u_1^2 - V_0^2) \quad (3.17)$$

Se define el factor de inducción axial a , el cual determina la fracción de

aumento de la velocidad del viento

$$a = \frac{u - V_0}{V_0} \quad (3.18)$$

Por lo que, a partir de la ecuación (3.18) las velocidades u y u_1 se definen de la siguiente manera

$$\begin{aligned} u &= (1 + a) V_0 \\ u_1 &= (1 + 2a) V_0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Por ultimo la potencia P y el empuje T quedan definidos de acuerdo con las siguientes expresiones

$$\begin{aligned} P &= 2\rho V_0^3 a (1 + a)^2 S \\ T &= 2\rho V_0^2 a (1 + a) S \end{aligned} \quad (3.20)$$

3.2.2. Cantidad de Movimiento General

El desarrollo anterior se realizó bajo la suposición de que no había movimiento de rotación en la estela y que el rotor podría ser reemplazado por un disco actuador que producía un aumento repentino de presión en el fluido sin ningún cambio en la velocidad. Más generalmente, la estela tendrá un movimiento de rotación impartido por la reacción del par del rotor, y este movimiento de rotación implica una pérdida adicional de energía. Para extender la teoría e incluir los efectos de este movimiento de rotación, es necesario modificar las propiedades del disco actuador asumiendo que también puede impartir una componente de rotación a la velocidad del fluido, mientras que los componentes axial y radial permanecen inalterados.

Se considera un anillo del disco ubicado a una distancia r del centro, Figura 3.9, siendo u y v las componentes axial y radial de la velocidad, respectivamente. Sea p_0 la presión estática del flujo no perturbado, medida en una sección alejada aguas arriba del rotor. La presión inmediatamente en frente al rotor se denota como p , y sea p' el incremento de presión asociado a la generación de una velocidad angular ω en el fluido. Al final de la estela se tiene una presión p_1 , correspondiente a la presión estática en la estela, así como una velocidad axial u_1 y una velocidad angular ω_1 , para una distancia radial r_1 respecto al centro de la estela.

La condición de continuidad del flujo en la sección anular indica que

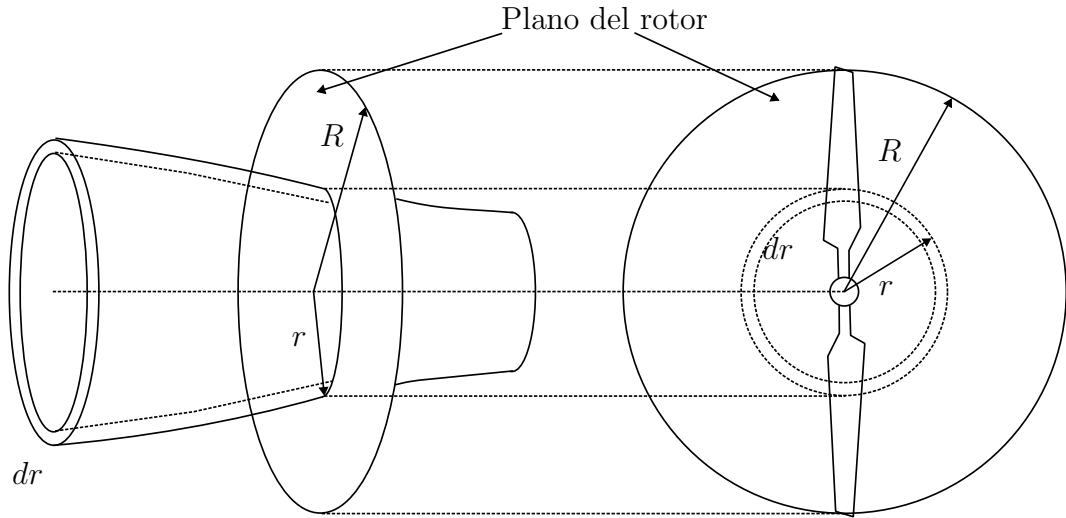


Figura 3.9: Volumen de control descrito para Rotor Óptimo de Glauert.

$$u_1 r_1 dr_1 = ur dr \quad (3.21)$$

y para el caso de conservación de momento angular

$$\omega_1 r_1^2 = \omega r^2 \quad (3.22)$$

Aplicando la ecuación de Bernoulli se puede determinar la diferencia de presión total, se obtiene que

$$p_0 - p_1 = \frac{1}{2}\rho (u_1^2 - V_0^2) + \frac{1}{2}\rho (\omega_1^2 r_1^2 - \omega^2 r^2) - p' \quad (3.23)$$

En general la presión p_1 en la estela es menor que la presión externa p_0 debido a la rotación de la estela. Pero aplicando la ecuación de Bernoulli al flujo relativo al rotor, la cual esta girando a una velocidad Ω , la velocidad angular relativa decrece desde Ω a $(\Omega - \omega)$ entonces el aumento de presión es

$$p' = \rho \left(\Omega - \frac{1}{2}\omega \right) \omega r^2 \quad (3.24)$$

Entonces, a partir del incremento de presión se puede determinar determinar el empuje

$$\begin{aligned} dT &= p' dS \\ &= \rho \left(\Omega - \frac{1}{2}\omega \right) \omega r^2 dS \end{aligned} \quad (3.25)$$

En general la velocidad angular ω impartida en la estela es mucho más pequeña que la velocidad angular del rotor Ω y es posible simplificar la ecuación (3.23) despreciando términos que involucran ω^2 . En este caso la presión en la estela p_1 es igual a la presión inicial p_0 . De este modo la relación entre el empuje y la velocidad axial es la misma que la planteada en el desarrollo anterior y de forma diferencial queda expresada como

$$dT = 4\pi\rho V_0^2(1+a)ar dr \quad (3.26)$$

Y alternativamente a partir de la ecuación (3.25)

$$dT = 2\pi\rho \left(\Omega - \frac{1}{2}\omega \right) \omega r^3 dr \quad (3.27)$$

Definiendo

$$\omega = 2a'\Omega \quad (3.28)$$

La expresión alternativa resulta

$$dT = 4\pi\rho\Omega^2(1-a')a'r^3 dr \quad (3.29)$$

Comparando las expresiones (3.27) y (3.29) se ve que los factor a y a' están conectados

$$V_0^2(1+a)a = \Omega^2 r^2(1-a')a' \quad (3.30)$$

Finalmente el elemento de torque obtenido es

$$dQ = 2\pi\rho V_0\Omega(1+a)a'r^3 dr \quad (3.31)$$

Es en estas formas que se acostumbra aceptar las ecuaciones para el empuje y el momento de un rotor ideal sin fricción.

3.2.3. Modelos de disco actuador

Esta sección presentan los diferentes tipos de disco actuador (en inglés, AD) que pueden implementarse en función de la complejidad e información disponible.

En general, para la mayoría de las WM comerciales, se dispone de la poten-

cia de operación P y el flujo de aire \dot{V} , como lo indica el catálogo presentado por un proveedor (Tecnipak, 2023). A partir de esta información, se puede determinar el empuje f_n y crear el modelo de AD más simplificado (denominado aquí como AD-unif), distribuyendo el empuje uniformemente sobre la superficie del disco, es decir, con un empuje constante en toda la superficie sin depender de la posición radial r . Cabe destacar que esta aproximación puede ser limitada si no se dispone de información sobre la eficiencia aerodinámica, ya que la potencia suele referirse a la potencia de operación del motor.

Si también se conoce la velocidad de rotación ω , se puede añadir la fuerza tangencial f_θ sobre la superficie del AD, representando una fuerza distribuida uniformemente a lo largo de la envergadura de la pala (AD-unif+rot). Esta fuerza tangencial simula el efecto de la rotación de la máquina y genera un torque distribuido uniformemente.

Si se desea una distribución no uniforme más realista de fuerzas axiales y tangenciales, se puede aplicar el método BEM en función de la velocidad local sobre el disco y los coeficientes de sustentación y arrastre (C_l , C_d) para cada sección de la pala (AD-airfoil). Estos coeficientes dependen del ángulo de ataque α , por lo que es necesario conocer el comportamiento aerodinámico de cada perfil en diferentes condiciones, ya sea mediante datos experimentales o simulaciones. Este método requiere información del campo de velocidades en cada paso temporal para calcular los coeficientes, lo cual demanda un esfuerzo computacional significativo, ya que generalmente el método se resuelve dentro del propio código CFD. Para algunas aplicaciones, esto puede ser una limitación, y en el trabajo de (Diaz et al. 2019) se desarrolla una alternativa que permite aplicar el método BEM fuera del código CFD, como se describe a continuación.

Se puede crear un AD con un nivel intermedio de complejidad que no implica acoplar el método BEM dentro del código CFD. Este modelo se basa en una tabla pre-calculada en la que se almacena la distribución de fuerzas para diferentes condiciones operativas; este modelo se denomina AD-precalc. La tabla pre-calculada puede generarse de diversas maneras, utilizando, en particular, resultados del código BEM, lo que permite representar el comportamiento de la WM con la precisión del AD-airfoil, incluso cuando la distribución de fuerzas varía. Este enfoque reduce considerablemente el costo computacional y su éxito depende de la precisión y representatividad de las condiciones pre-calculadas respecto a las condiciones reales de simulación. La Tabla 3.1 resume los cuatro

modelos AD mencionados y sus requisitos.

Modelo de AD	Fuerzas aplicadas	Información necesaria
AD-unif	f_n (uniforme)	P, \dot{V}
AD-unif+rot	$f_n + f_\theta$ (uniforme)	P, \dot{V}, ω
AD-precalc	$f_n + f_\theta$ (pre-calculado)	ω, U_{ref} <i>Air foil, pitch</i> , cuerda vs. r C_l, C_d vs. α
AD-airfoil	$f_n + f_\theta$ (perfil aerodinámico)	ω, U_∞ <i>Air foil, pitch</i> , cuerda vs. r C_l, C_d vs. α

Tabla 3.1: Modelos de disco actuador según nivel de complejidad.

En el modelo AD-airfoil, la velocidad U_∞ es la utilizada en el código BEM, obtenida del propio modelo CFD. Para el AD-precalc, se emplea U_{ref} como la velocidad de referencia para elaborar las tablas y es interpretada como la velocidad de corriente libre en el método BEM.

Los campos de velocidad suelen ser no uniformes debido a la presencia de la Capa Límite Atmosférica (CLA), la influencia de la topografía y la posible presencia de otras WM. Esto impone la necesidad de asumir una velocidad de viento desconocida aguas arriba U_{ref} para el modelo AD-precalc. Se pueden generar tablas para un amplio rango de velocidades de referencia y, según la U_∞ obtenida del modelo CFD, se selecciona la tabla adecuada para obtener los valores de empuje y momento, T y Q .

La contribución de la fuerza local de cada celda se calcula en términos de los coeficientes de empuje y momento, C_T y C_Q , respectivamente, en función del radio r .

Existen diversas formas de definir estos coeficientes, dependiendo de los autores y la aplicación. En particular, para ventiladores, (Wallis, 1983) define estos coeficientes en función de la velocidad axial sobre el disco V_a de la siguiente manera:

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V_a^2 A_{AD}} \quad (3.32)$$

$$C_q = \frac{Q}{\frac{1}{2}\rho V_a^2 A_{AD} R} \quad (3.33)$$

Donde ρ es la densidad del aire, A_{AD} el área del disco y R su radio. Luego el empuje y el momento sobre cada celda pueden ser determinados en función

de la velocidad de cada celda U_i que forman al disco

$$T_i = \frac{1}{2}\rho C_T U_i^2 A_i \quad (3.34)$$

$$Q_i = \frac{1}{2}\rho C_Q U_i^2 A_i \quad (3.35)$$

Donde A_i es el área de la cara de la celda que se encuentra perpendicular a la dirección del flujo.

Resumiendo brevemente, el proceso de cálculo comienza con el U_∞ dado por el código CFD. Luego, se busca el U_{ref} correspondiente y a partir de la tabla se seleccionan C_T y C_P para cada radio.

En el caso del AD-precalc, cada combinación (U_∞, U_{ref}) determina las fuerzas axiales y tangenciales distribuidas en la posición de cada celda sobre el disco obtenidas a partir de la pre-computación del código BEM. Este enfoque permite adaptar las fuerzas para situaciones en las que las condiciones locales cambian constantemente, lo que lo hace adecuado para flujos no uniformes o altamente variables.

Capítulo 4

Metodología

En este capítulo se describen los métodos principales desarrollados durante esta tesis. En la sección 4.1 se presentan las especificaciones técnicas de la máquina utilizada como referencia y las consideraciones físicas empleadas para modelar el problema, tomando como referencia el caso presentado por (Heusinkveld, 2019).

La sección 4.2 aborda la formulación y la implementación del modelo computacional. El desarrollo se estructuró en dos etapas: primero, se implementó el modelo de AD en *caffa3d*, y posteriormente se integró en *chaman* con el objetivo de evaluar el desempeño de la WM bajo condiciones más realistas.

4.1. Aspectos del modelado físico

En esta sección se describen los aspectos físicos considerados para el desarrollo del modelo. Se presentan las especificaciones técnicas de la WM, el caso de estudio representado mediante el AD, y las simplificaciones adoptadas en la distribución de fuerzas. Finalmente, se detallan las condiciones iniciales para los campos de velocidad y temperatura.

4.1.1. Especificaciones técnicas de la WM

En este estudio se toma como referencia el modelo 2700 de la WM, fabricada por [Orchard Rite](#). Este modelo cuenta con un rotor de dos palas de 6.15 m de diámetro, una altura de buje de 10.50 m y un ángulo de inclinación de 7°. La máquina es impulsada por un motor diésel con una potencia nominal de

187 HP, de la cual se reporta una potencia en punta de eje de 125 kW (véase Tabla 4.1).

A continuación, se resumen las principales características técnicas extraídas del catálogo presentado por (Tecnipak, 2023):

Modelo	Orchard Rite 2700
Cantidad de palas	2
Diámetro del rotor	6.15 m
Altura de buje	10.50 m
Motor	CAT 7.1
Potencia operativa	125 kW
Empuje generado	8.18 kN
Flujo de aire	308 m ³ /s
Cobertura nominal	7.43 Ha

Tabla 4.1: Especificaciones técnicas de la WM.

Cabe destacar que ni el fabricante ni el proveedor especifican la velocidad de rotación del rotor ni la velocidad de giro azimutal. Sin embargo, basándonos en las consideraciones de (Heusinkveld, 2019) para una máquina de características similares, se asume una velocidad de rotación de 540 RPM y una rotación completa azimutal cada 5 min.

A partir de esta información técnica, se pueden estimar magnitudes relevantes para la implementación del modelo y para posteriormente realizar el análisis de resultados y validación, como la velocidad axial promedio en el plano del rotor (V_{ax}), la potencia útil entregada al aire ($P_{\text{útil}}$), el empuje y el momento aplicado por el rotor.

Primero, se calcula la potencia entregada al aire, para lo cual se parte del dato de potencia del motor el cual representa la potencia en punta de eje del mismo. Esta potencia antes de llegar al rotor experimenta pérdidas de índole mecánicas debido al sistema de transmisión. Dado que no se cuentan con detalles del sistema se decidió asumir una eficiencia general del 95 % basándonos en lo expuesto por (Budynas y Nisbett, 2014) y finalmente se obtiene se obtiene:

$$P_{\text{entregada}} = 125.00 \text{ kW} \times 0.95 = 118.75 \text{ kW}$$

Luego, utilizando la relación entre caudal volumétrico y área de barrido:

$$\dot{V} = V_{ax} A_{WM},$$

donde

$$A_{WM} = \pi \left(\frac{6.15\text{m}}{2} \right)^2 \approx 29.70 \text{ m}^2,$$

se obtiene:

$$V_{ax} = \frac{308.00 \text{ m}^3/\text{s}}{29.70 \text{ m}^2} \approx 10.37 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Conociendo el empuje $T = 8.18 \text{ kN}$, se determina la potencia útil:

$$P_{\text{útil}} = T \cdot V_{ax} = 8.18\text{kN} \cdot 10.37 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 84.76 \text{ kW}.$$

Finalmente, el momento entregado por el rotor se calcula a partir de la velocidad angular $\omega = 2\pi \cdot \frac{540}{60} = 56.55 \text{ rad/s}$ y la potencia entregada al fluido, resultando:

$$Q = \frac{P_{\text{entregada}}}{\omega} = \frac{118.75 \text{ kW}}{56.55 \text{ rad/s}} \approx 2.09 \text{ kNm}.$$

Es importante destacar que, dependiendo de las idealizaciones adoptadas en el modelo, los valores utilizados pueden diferir de los valores teóricos aquí calculados. Esta discrepancia es abordada en mayor detalle en secciones posteriores.

4.1.2. Distribución de empuje y momento sobre el disco actuador

En base a lo presentado en la sección anterior, y considerando la clasificación de modelos de AD (ver Tabla 3.1) junto con la información proporcionada por el fabricante, se optó por representar el AD como un modelo de tipo 2. En este caso, se aplican fuerzas normales y tangenciales en cada celda del AD.

Estas fuerzas se expresan a través de los coeficientes adimensionales de empuje (C_t) y momento (C_q). Utilizando los valores conocidos de empuje, momento, velocidad axial, y geometría del rotor, se obtienen los valores nominales:

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V_a^2 A_{AD}} = 4.15 \quad \text{y} \quad C_q = \frac{Q}{\frac{1}{2}\rho V_a^2 A_{AD} R} = 0.35$$

A partir de las expresiones 3.34 y 3.35, se observa que las fuerzas a aplicar en cada celda dependen del área y la velocidad del flujo local. Para simplificar

la implementación, se adoptaron las siguientes aproximaciones:

- En lugar de calcular el área individual de cada celda, se consideró el área nominal del disco A_{nom} , distribuyendo la fuerza total de manera uniforme entre todas las celdas.

- En vez de aplicar una dependencia cuadrática con la velocidad local U_i^2 , se utilizó una forma lineal: $U_{\text{ref}} \cdot U_i$, donde U_{ref} representa la velocidad axial media estimada a partir de los datos del fabricante.

Las expresiones finales para la fuerza normal y tangencial en cada celda resultaron:

$$T_i = \frac{1}{2} \rho C_t A_{\text{nom}} U_{\text{ref}} U_i \cdot \frac{1}{V_{\text{tot}}} \quad (4.1)$$

$$Q_i = \frac{1}{2} \rho C_q A_{\text{nom}} U_{\text{ref}} U_i \cdot \frac{1}{V_{\text{tot}}} \quad (4.2)$$

Donde V_{tot} es el volumen total ocupado por las celdas del AD.

Estas simplificaciones fueron introducidas con el objetivo de evitar inestabilidades numéricas observadas al emplear las formulaciones cuadráticas originales, que generaban distorsiones significativas en los resultados. Además, la adopción de un área promedio simplifica el tratamiento geométrico sin comprometer la validez general del modelo.

Por último cabe destacar, que estas son las expresiones generales en las que nos basamos para implementar el modelo pero como se verá en las siguientes secciones, se tuvieron que usar algunas estrategias computacionales para evitar problemas numéricos y debido a esto se usaron también otras variables auxiliares que no están reflejadas en estas expresiones.

A continuación, se presentan las condiciones iniciales impuestas para los campos de velocidad y temperatura, las cuales representan un aspecto clave para la evolución del flujo y la distribución térmica observada en la simulación.

4.1.3. Condiciones iniciales de velocidad y temperatura

Para la implementación en el modelo *caffa3d* resulta necesario definir condiciones iniciales de velocidad y temperatura que se asemejen a las condiciones de una noche con inversión térmica. Como se mencionó en la sección 2.1 en estas noches el perfil de temperatura es creciente con la altura en los primeros metros. Para este caso se consideró una distribución logarítmica en función de

la altura, este perfil se ajusta con las observaciones realizadas por (Heusinkveld, 2019) y (Dai et al. 2023).

$$\Theta(h) = \max \left(\ln \left(\frac{h}{0.20} \right), 0.00 \right) \quad (4.3)$$

Cabe destacar que la inversión térmica presentada por este perfil es elevada ya que se tiene un cambio de temperatura considerable en los primeros metros.

En lo que refiere al campo de velocidades se asumió constante e igual a cero en todo el dominio como condición inicial.

Por otra parte, el modelo *chaman* tiene definidas condiciones iniciales que luego de varias horas de simulación se obtiene el estado de atmósfera estratificada y es en este momento en el cual se activa el modulo de la WM.

4.2. Aspectos del modelado computacional

En esta sección se describen las principales características de las implementaciones realizadas, presentando el procedimiento seguido y la información necesaria para poder realizar una simulación con estos modelos.

En el caso de *caffa3d*, las rutinas fueron implementadas íntegramente en Fortran 90. Mientras que para *chaman*, sin embargo, la implementación se dividió entre Fortran 90 y C/C++, con el objetivo de aprovechar las funciones especiales de CUDA, conocidas como kernels, para ejecutar tareas en paralelo en la GPU.

4.2.1. Información de entrada

La información referida a las WM está definida a través del módulo *Wind-MachineDataManager*. Dentro de este módulo se definieron las siguientes variables principales

- WmCt : Coeficiente de empuje nominal
- WmCq : Coeficiente de momento nominal
- WmXn : Vector normal al AD
- WmXr : Vector radial al AD
- WmXt : Vector tangencial al AD
- WmXSp : Posición del centro del AD
- WmTotalArea : Área transversal del AD

- WmTotalVol : Volumen del AD
- WmNormSum : Suma de pesos gaussianos ponderados por volumen
- WmTotalFlow : Flujo a través del AD
- WmDMSpr : Radio del AD
- WmDMSpn : Espesor del AD
- WmTiltAng : Ángulo de inclinación
- WmAngVel : Velocidad angular
- WmAzimutVel : Velocidad de giro azimutal

Este módulo es llamado por el *WindMachineModelManager* que es el encargado de ejecutar los cálculos y cuya implementación se describe en la sección [4.2.4](#).

4.2.2. Cálculo del término fuente

Este término se obtiene a partir de la suma de las proyecciones de las fuerzas de empuje y momento mencionadas en la sección [4.1.2](#), que afectan a cada celda. El cálculo de estas fuerzas fue implementado en la subrutina *ComputeWindMachineForces*, dentro del módulo *WindMachineModelManager* y se describe en la sección [4.2.4.2](#). En cada paso temporal esta subrutina es llamada desde el módulo *UserInnerRoutines* y se actualizan las fuerzas correspondientes a cada celda y por ende el término fuente.

4.2.3. Implementación del giro azimutal

Dentro del módulo *UserOuterRoutines* se implementó el giro azimutal del AD, el cual consiste en determinar la dirección del vector normal para cada instante de tiempo. Para cada componente de la normal se tiene que

$$WmXn(1) = A \cos(WmAzimutVel * t) \quad (4.4)$$

$$WmXn(2) = A \sin(WmAzimutVel * t) \quad (4.5)$$

$$WmXn(3) = -\sin(WmTiltAng) \quad (4.6)$$

Para determinar el valor de A se considera que la normal tiene norma unitaria y se llega a lo siguiente

$$A = \sqrt{(1 - WmXn(3)^2)} \quad (4.7)$$

De este modo la normal queda definida para cada instante de tiempo.

4.2.4. Subrutinas generales

En primer lugar se creó el módulo *WindMachineModelManager* donde se definen dos subrutinas que son utilizadas por las rutinas principales para determinar las fuerzas a ser aplicadas sobre cada celda que conforma el AD. Estas dos subrutinas son *ComputeWindMachineTotalFlow* y *ComputeWindMachineForces*, la primera de las dos determina el área, volumen y el flujo que atraviesa el AD, para poder utilizarlo en la determinación y distribución de fuerzas que se realiza en la segunda subrutina. A continuación se desarrolla en más detalle lo implementado en cada una.

4.2.4.1. Subrutina *ComputeWindMachineTotalFlow*

Esta rutina se encarga de determinar el área, el volumen y el flujo total a través del AD, mediante sumatorias en las celdas que lo conforman. Para ello, en primer lugar, es necesario identificar qué celdas se encuentran comprendidas dentro del radio y el espesor del AD. Esta identificación se realiza imponiendo condiciones de distancia, es decir, considerando únicamente aquellas celdas cuya distancia al centro del AD es menor al radio o al espesor definidos.

Utilizando la nomenclatura establecida en la Sección 4.2.1, las condiciones se expresan como:

$$WmDSpn < WmDSMpn \quad (4.8)$$

$$WmDSpr < WmDSMpr \quad (4.9)$$

Las distancias normal y radial se calculan de la siguiente manera:

$$WmDSpn = (\vec{X}_C - W\vec{m}XSP) \cdot W\vec{m}X_n \quad (4.10)$$

$$WmDSpr = \sqrt{\|\vec{X}_C - W\vec{m}XSP\|^2 - WmDSpn^2} \quad (4.11)$$

donde \vec{X}_C representa la posición del centro de cada celda de la grilla.

El volumen total del AD se obtiene sumando los volúmenes de las celdas que cumplen las condiciones anteriores:

$$WmTotalVol = \sum Vol_{\text{celda}} \quad (4.12)$$

Para el cálculo del área, se considera el área proyectada en la dirección de la normal del AD, es decir, el área vista por el flujo:

$$WmTotalArea = \sum \left[\left| W\vec{m}X_n \cdot \vec{X}_{er} \right| + \left| W\vec{m}X_n \cdot \vec{X}_{nr} \right| + \left| W\vec{m}X_n \cdot \vec{X}_{tr} \right| \right] \quad (4.13)$$

donde \vec{X}_{er} , \vec{X}_{nr} y \vec{X}_{tr} son los vectores normales a las caras de cada celda, cuya norma corresponde al área de cada cara.

Por último, considerando la componente de velocidad normal al AD, se calcula el flujo volumétrico a través de cada celda:

$$W\vec{m}U_n = \left(\vec{U} \cdot W\vec{m}X_n \right) \cdot W\vec{m}X_n \quad (4.14)$$

$$WmTotalFlow = \sum \left[\left| W\vec{m}U_n \cdot \vec{X}_{er} \right| + \left| W\vec{m}U_n \cdot \vec{X}_{nr} \right| + \left| W\vec{m}U_n \cdot \vec{X}_{tr} \right| \right] \quad (4.15)$$

4.2.4.2. Subrutina *ComputeWindMachineForces*

En esta subrutina se implementaron las contribuciones de empuje y momento en cada celda las cuales se determinaron utilizando las ecuaciones 4.1 y 4.2, obteniendo la siguiente expresión para el término fuente volumétrico:

$$\vec{S}_u(i, j, p) = \vec{S}_u(i, j, p) + \beta_{WM} \cdot w_{\text{gauss}} \cdot \left(T \cdot U_i \cdot W\vec{m}X_n + Q \cdot U_{\text{ref}} \cdot W\vec{m}X_t \right) \quad (4.16)$$

$$T = \frac{1}{2} \rho A_{\text{nom}} C_t \frac{1}{WmNormSum} \cdot U_{\text{ref}} \quad (4.17)$$

$$Q = \frac{1}{2} \rho A_{\text{nom}} C_q \frac{1}{\text{WmNormSum}} \cdot U_{\text{ref}} \quad (4.18)$$

Con el objetivo de evitar concentraciones puntuales de fuerza que puedan provocar inestabilidades numéricas, se implementó un mecanismo de distribución espacial conocido como *Gaussian smearing* o suavizado gaussiano. Este procedimiento permite distribuir las fuerzas de empuje y momento sobre las celdas del dominio de forma suave y continua, a partir de una función gaussiana centrada en el eje del disco actuador.

La fuerza aplicada en cada celda se pondera mediante un peso local w_{gauss} , calculado como:

$$w_{\text{gauss}} = \exp\left(-\frac{\text{WmDspn}^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \quad (4.19)$$

donde

- WmDspn es la distancia perpendicular desde el centro de la celda al plano del disco actuador.
- σ es el parámetro de suavizado (desvío estándar), que controla la extensión espacial de la distribución. Un valor mayor de σ produce una dispersión más amplia de la fuerza, mientras que un valor menor la concentra en una región más estrecha.

Para garantizar la conservación de la fuerza total aplicada, los pesos gaussianos se normalizan por la suma total acumulada en todas las celdas del disco, definida como:

$$\text{WmNormSum} = \sum_{i,j,p} \exp\left(-\frac{\text{WmDspn}^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \cdot \text{Vol}_{\text{celda}} \quad (4.20)$$

Así, el factor final de distribución que se utiliza en la implementación es:

$$w_{\text{norm}} = \frac{w_{\text{gauss}}}{\text{WmNormSum}} \quad (4.21)$$

Este esquema garantiza una transición suave en la aplicación de fuerzas y mejora la estabilidad numérica del modelo, asegurando al mismo tiempo que la fuerza total aplicada coincida con los valores macroscópicos definidos por el empuje y momento del rotor.

Adicionalmente, se introduce el coeficiente temporal β_{WM} , que actúa como una función rampa en los primeros instantes de la simulación. Su objetivo es

incrementar progresivamente la magnitud de las fuerzas aplicadas, evitando saltos abruptos que puedan generar oscilaciones artificiales en el flujo. Este coeficiente se define como:

$$\beta_{WM}(t) = \begin{cases} \frac{t}{t_{\text{rampa}}} & \text{si } t < t_{\text{rampa}} \\ 1 & \text{si } t \geq t_{\text{rampa}} \end{cases} \quad (4.22)$$

donde t representa el tiempo actual de simulación y t_{rampa} el tiempo total de duración de la rampa.

De este modo, la fuerza total aplicada en cada celda queda modulada espacialmente por w_{norm} y temporalmente por β_{WM} , garantizando una introducción progresiva y estable del efecto del disco actuador sobre el flujo.

Sistema de control adaptativo del disco actuador

Con el fin de garantizar que el AD represente correctamente la potencia nominal de la máquina a lo largo de la simulación, se implementó un sistema de control adaptativo que ajusta los coeficientes de empuje y momento (C_t y C_q) en función del flujo y el área efectivamente atravesados por el fluido. Este ajuste busca corregir desviaciones que puedan surgir debido a la resolución de malla o variaciones locales del campo de velocidades.

El procedimiento se activa únicamente si el caudal instantáneo supera un umbral mínimo de seguridad ($Q_{\text{mín}}$), para evitar inestabilidades cuando el flujo es casi nulo. A partir de ese punto, el control se desarrolla en los siguientes pasos:

1. **Cálculo del ratio geométrico:** se evalúa la razón entre el área total del disco y el caudal instantáneo:

$$r = \frac{WmTotalArea}{WmTotalFlow}$$

Este valor se compara contra umbrales superiores e inferiores (ratioUL, ratioLL) para determinar si el disco está operando fuera de los márgenes esperados.

2. **Cálculo del factor de corrección progresivo:** si el ratio r se encuentra fuera del rango permitido, se calcula un parámetro de transición

$\alpha \in [0, 1]$ que determina qué tan alejados estamos del rango válido:

$$\alpha = \begin{cases} \frac{r - \text{ratioUL}}{\text{max_ratio} - \text{ratioUL}}, & r > \text{ratioUL} \\ \frac{\text{ratioLL} - r}{\text{ratioLL} - \text{min_ratio}}, & r < \text{ratioLL} \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

El valor de α se recorta a un máximo de 1.00 para limitar la magnitud de la corrección.

3. **Ajuste del área y del caudal:** se definen valores corregidos de área y caudal como combinación ponderada entre los valores simulados y los valores nominales:

$$WmTotalAreaAdj = (1 - \alpha) \cdot WmTotalArea + \alpha \cdot WmTotalAreaNom$$

$$WmTotalFlowAdj = (1 - \alpha) \cdot WmTotalFlow + \alpha \cdot WmTotalFlowNom$$

4. **Cálculo del factor de corrección de potencia:** si el disco se encuentra dentro del rango válido, se ajusta la potencia en función del caudal corregido. Si está fuera del rango, se aplica la corrección con el valor no ajustado:

$$f_{\text{corr}} = \begin{cases} \left(\frac{WmTotalFlowNom}{WmTotalFlowAdj} \right)^2, & \text{si } r \in [\text{ratioLL}, \text{ratioUL}] \\ \left(\frac{WmTotalFlowNom}{WmTotalFlow} \right)^2, & \text{fuera de rango} \end{cases}$$

5. **Actualización de coeficientes:** se calculan nuevos coeficientes de empuje y momento corregidos, limitando su crecimiento a un máximo del 20% respecto al valor nominal:

$$C_t^{\text{new}} = \text{mín} (WmC_t \cdot f_{\text{corr}}, 1.20 \cdot WmC_t)$$

$$C_q^{\text{new}} = \text{mín} (WmC_q \cdot f_{\text{corr}}, 1.20 \cdot WmC_q)$$

Si el disco se encuentra dentro del rango válido, se aplica además un suavizado temporal de tipo lineal con factor de relajación γ_{WM} (por ejemplo, 0.80), que evita oscilaciones bruscas en el tiempo:

$$C_t^{\text{corr}} = (1 - \gamma_{WM}) \cdot C_t^{\text{old}} + \gamma_{WM} \cdot C_t^{\text{new}}$$

$$C_q^{\text{corr}} = (1 - \gamma_{WM}) \cdot C_q^{\text{old}} + \gamma_{WM} \cdot C_q^{\text{new}}$$

Fuera del rango, se actualizan directamente sin suavizado.

En caso de que el caudal instantáneo sea inferior al umbral mínimo $Q_{\text{mín}}$, el sistema desactiva las correcciones y se aplica directamente la potencia nominal definida por el fabricante.

Este esquema de control permite conservar de forma robusta el rendimiento energético del modelo, aún en presencia de errores numéricos o fluctuaciones locales del flujo alrededor del AD.

Estas estrategias se implementaron tanto en *caffa3d* como en *chaman*. Los scripts utilizados se listan a continuación:

caffa3d:

- WindMachineDataManager.H.24.0101.F90
- WindMachineModelManager.H.24.0101.F90

chaman:

- WindMachineDataManager.H.24.0102.F90
- WindMachineDataManager.H.24.0102.h
- WindMachineModelF90IB.H.24.0102.F90
- WindMachineModelGPU.H.24.0102.cu
- WindMachineModelGPU.H.24.0102.H
- WindMachineModelGPU_Kernels.H.24.0102.cu
- WindMachineModelGPU_Kernels.H.24.0102.h
- WindMachineModelManager.H.24.0102.F90
- WindMachineModelManager.H.24.0102.h

Para el caso de *chaman*, se debieron generar los scripts de extensión .cu y .h. Los .cu ejecutan el código en la GPU (CUDA) mientras que los .h actúan como “puentes” para conectar y organizar las funciones del programa, facilitando la interacción entre CPU y GPU.

Los fragmentos más relevantes se encuentran en el Anexo 1.

4.2.5. Implementación en *caffa3d*

El propósito de esta sección es describir los aspectos técnicos y metodológicos considerados para la implementación del modelo en *caffa3d*.

En la Figura 4.1 se presenta de forma esquemática una vista lateral del AD, junto con las variables que lo caracterizan. Estas variables incluyen el radio del AD, su espesor y el ángulo de inclinación.

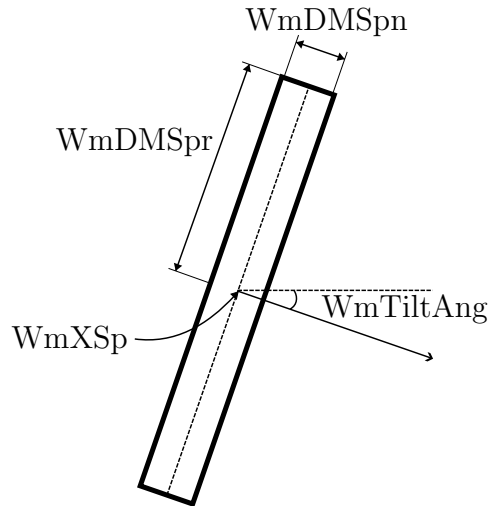


Figura 4.1: Características geométricas del AD.

Una vez definidas las propiedades geométricas y operativas del AD, hay que definir el dominio donde se realiza la simulación. Las dimensiones se fijaron en $800\text{ m} \times 800\text{ m}$ en las direcciones horizontales y 96 m en la vertical, dividido en 9 regiones idénticas (Figura 4.2). Esta estrategia permite aprovechar la paralelización ofrecida por *caffa3d* mediante MPI, mejorando la eficiencia computacional.

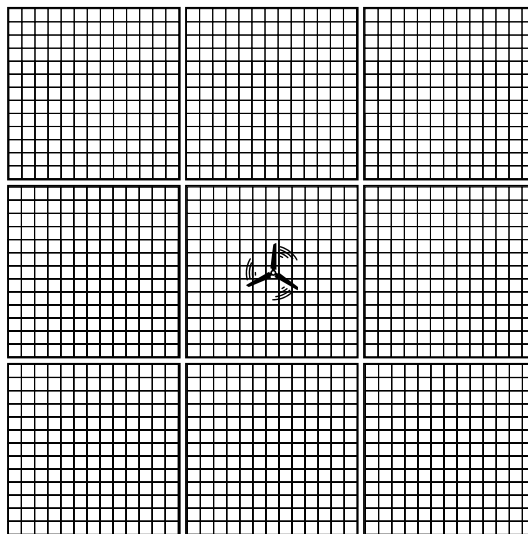


Figura 4.2: Esquema del dominio de *caffa3d* dividido en 9 regiones.

Tanto las dimensiones como la resolución del dominio vienen dadas por la configuración actual de *chaman* que se utiliza en TCB. Se decidió considerar estas mismas condiciones en *caffa3d* para poder comparar ambas simulaciones.

Para lograr la misma resolución se consideraron 250 celdas en cada una de las dimensiones horizontales, con una distribución uniforme, logrando de este modo una resolución horizontal de 1,06 m. Para la dirección vertical, se consideraron 80 celdas con una distribución no uniforme, dada por un factor de expansión de 1,04 comenzando con un tamaño de celda de 0,20 m.

Las paredes laterales del dominio fueron modeladas con una condición de borde de simetría, la cual implica que el gradiente normal a la frontera de cualquier cantidad conservada es cero (por ejemplo, la velocidad en la dirección normal al plano de simetría es cero y no hay flujo cruzando la frontera de simetría).

Matemáticamente, en un plano de simetría, las derivadas normales de las variables (como velocidad o presión) son cero:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, \quad \forall t \quad (4.23)$$

donde u es una variable (como velocidad o temperatura) y n es la dirección normal al plano de simetría. Esto podría implicar efectos de rebote; es decir, el flujo llega a las paredes y, al no poder atravesarlas ni acumularse, retorna en dirección contraria, lo que puede producir efectos significativos en los resultados si la zona de interés es alcanzada por este flujo de retorno. Dado que se espera que el radio de acción de la WM sea de unos 100 m, consideramos que las dimensiones son adecuadas para evitar el impacto de este efecto en los resultados.

Por otro lado, las caras superior e inferior fueron modeladas con una condición de borde isotérmica, lo cual implica que la temperatura permanece invariante durante todo el período de simulación:

$$T = T_0, \quad \forall t \quad (4.24)$$

donde T es la temperatura y T_0 es la temperatura en la cara correspondiente. Para este caso, se fijó una temperatura de 0 °C para la cara inferior, mientras que para la cara superior la temperatura se definió en función del perfil logarítmico de temperaturas utilizado (ver ecuación 4.3).

El propósito de estas simulaciones fue analizar cómo las fuerzas de empuje

y momento generadas por el AD afectan la mezcla del aire y la distribución de temperatura en el dominio. En este trabajo, la mezcla de aire no se cuantifica mediante una métrica escalar específica, sino que se evalúa de manera indirecta a partir de la evolución del campo de temperaturas y velocidades. En particular, se analizan la atenuación de los gradientes térmicos y la redistribución espacial de la temperatura como indicadores del grado de mezcla inducido por la WM. Las métricas obtenidas incluyen:

- Distribuciones espaciales del campo de velocidades.
- Evolución de los gradientes de temperatura antes y después de la operación de la WM.
- Evaluación del alcance y la estructura del flujo inducido por la WM.

Capítulo 5

Resultados y Validación

En este capítulo se presentan los resultados numéricos obtenidos durante el desarrollo de este trabajo. Inicialmente, se valida la implementación de la WM utilizando el modelo de AD. Los resultados se comparan con la bibliografía para evaluar el correcto funcionamiento del modelo.

Las simulaciones correspondientes al AD, implementado en *caffa3d*, se llevaron a cabo en el Centro Nacional de Supercomputación, ClusterUY, que dispone actualmente de 2240 núcleos de CPU y 100.352 núcleos de GPU, respaldados por procesadores modernos de INTEL, AMD y NVIDIA. El sistema cuenta además con 6 TB de memoria RAM y más de 200 TB de almacenamiento en disco. Para más información, se puede consultar el sitio web: <https://www.cluster.uy/>.

Durante el desarrollo del trabajo, se generaron códigos para la integración del modelo en *chaman*. Sin embargo, debido a limitaciones en la ejecución, los resultados presentados en este capítulo se restringen únicamente a las simulaciones realizadas en CPU mediante *caffa3d*.

5.1. Simulación del disco actuador en *caffa3d*

En esta sección se presentan los resultados preliminares obtenidos a partir de la implementación del AD descrita en la Sección 4.2.5. El objetivo de esta primera instancia fue validar el modelo de AD y analizar su interacción con la atmósfera estratificada. Para ello, se evaluó la evolución dinámica del caudal durante la simulación y se caracterizó el campo de velocidades.

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis del campo de temperatura con

el fin de determinar la posible presencia de un incremento de temperatura inducido por la operación del AD.

Antes de presentar los resultados finales, fue necesario examinar aspectos relacionados con la definición del dominio y la convergencia numérica. Estos aspectos también se incluyen en esta sección, ya que constituyen un eje central para la correcta interpretación de los fenómenos observados posteriormente.

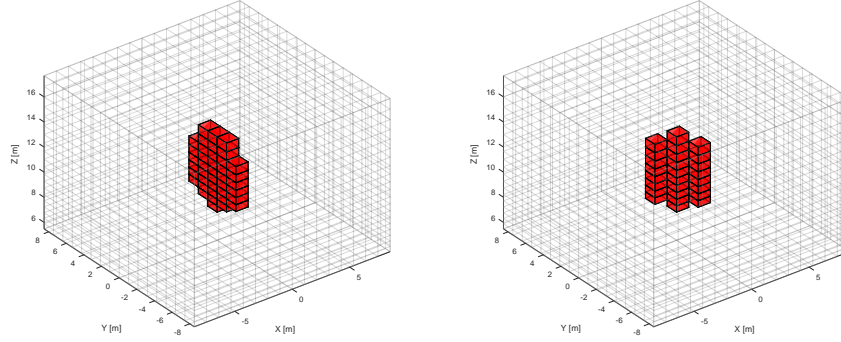
5.1.1. Definición del dominio

El dominio computacional empleado abarca un área total de 63.00 *Ha*. Para el primer caso se trabajó sobre 9 regiones mientras que para el segundo se utilizaron 4 regiones, pero se mantuvieron las mismas resoluciones espaciales en las 3 direcciones. Esta elección fue basada principalmente en las condiciones que utiliza la empresa TCB para resolver este tipo de fenómenos. En el caso de simulaciones de los flujos de aire frío, esta configuración garantiza una captura precisa de los fenómenos asociados, minimizando significativamente los efectos de las condiciones de frontera alejadas y reduciendo posibles interferencias en la zona de interés.

Recordando de la Sección 4.2.5, la resolución horizontal utilizada fue de 1,06 m y para la dirección vertical se consideró una distribución no uniforme, dada por un factor de expansión de 1,04 comenzando con un tamaño de celda de 0,20 m.

Finalmente, el AD fue implementado siguiendo las condiciones geométricas y aerodinámicas descritas en las Secciones 4.8 y 4.9. En la Figura 5.1 se observa la representación discreta del disco. Cada celda que cumple con las condiciones establecidas de distancia contribuye al término fuente, generando distribuciones de empuje y momento acordes con las ecuaciones descritas en la Sección 3.2. Esta metodología permitió reproducir consistentemente la interacción entre el fluido y la estructura del AD.

Cabe destacar que a efectos de la visualización se representó solo un plano de celdas, pero como fue descrito en la Sección 4.2.4.2, la aplicación del smearing gaussiano considera 6 planos de celdas. Esta configuración fue necesaria para evitar efectos numéricos no deseados, facilitando una aplicación gradual y más realista del empuje. Al utilizar un solo plano de celdas, se observaron discontinuidades significativas en el campo de velocidades, generando discrepancias importantes con la física real del problema.



(a) Posición ortogonal.

(b) Posición no ortogonal.

Figura 5.1: Visualización del AD en el dominio.

Otro aspecto importante a señalar es que la discretización actual no representa explícitamente la inclinación del disco (ángulo de *tilt*). Cuando se consideró la inclinación, se observó que el disco quedaba definido por dos planos, pero desfasados en el eje horizontal central del disco. Esto generó ciertas asimetrías en los resultados; particularmente, al visualizar el campo de velocidades se observó un comportamiento como si se estuvieran modelando dos discos, lo cual generaba inconsistencia en la forma adoptada por el *jet*. Finalmente, luego de varias pruebas, se decidió definir una normal geométrica para establecer los límites del AD y trabajar con un disco plano, considerando una normal para el flujo que sí indica la dirección según el ángulo de *tilt*. Como se verá más adelante, a pesar de esta simplificación, el flujo inducido refleja adecuadamente la dirección esperada, preservando la física esencial del problema.

A los efectos de determinar el flujo inducido por el AD, y por ende la fuente a aplicar en cada celda, fue necesario considerar el área proyectada según la dirección del flujo. Debido a la discretización utilizada, este parámetro varía notablemente en función de la dirección impuesta por el giro azimutal, lo cual provocó en las primeras simulaciones una gran variación del caudal a lo largo del tiempo, principalmente cuando nos apartamos de las direcciones

ortogonales del dominio. Esto puede observarse en la Figura 5.1.

Con el objetivo de reducir estos efectos geométricos sobre la física del problema, se decidió analizar el comportamiento del área proyectada en función del tiempo, tomando como referencia el área del disco en las direcciones ortogonales. Para cuantificar esta variación se definió un factor de área como

$$f_{area} = \frac{A_{ref}}{A_{proyectada}}$$

Donde A_{ref} es el valor de área proyectada en las direcciones ortogonales y $A_{proyectada}$ es el valor de área proyectada para cada instante de tiempo. En la Figura 5.2 se muestra en color azul la variación de este parámetro.

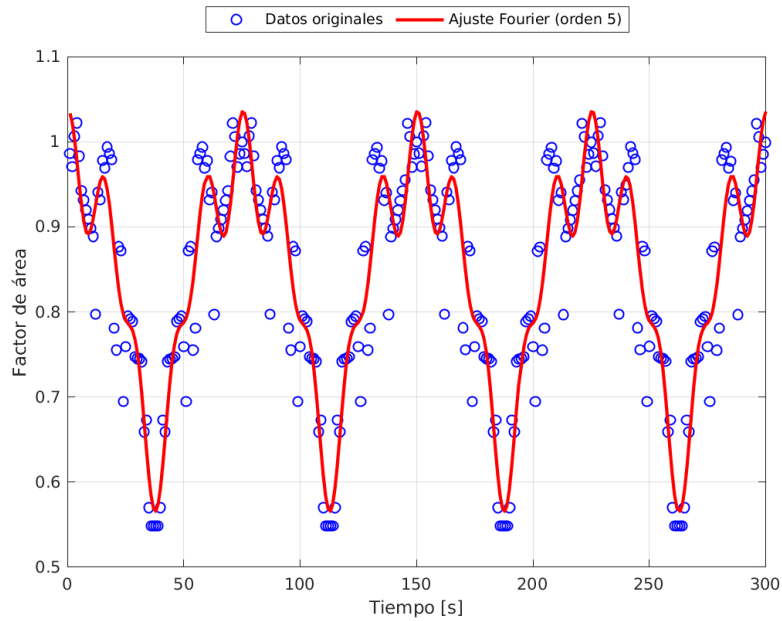


Figura 5.2: Evolución temporal del coeficiente de área.

Por otra parte, la curva roja que se observa es la representación de la serie de Fourier que aproxima el comportamiento de la variación. Esta serie de Fourier fue determinada mediante un ajuste no lineal utilizando la función `fit` de MATLAB, con un modelo de la forma `fourier5`, que permite capturar hasta cinco armónicos, con el objetivo de definir un factor de corrección a ser aplicado sobre el radio geométrico que define las celdas que conforman el AD. La función objetivo tiene la forma clásica de una serie de Fourier

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^N [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (5.1)$$

donde ω se corresponde con *WmAzimutVel* y los coeficientes se presentan en la Tabla 5.1:

n	a_n	b_n
0	8.42×10^{-1}	–
1	1.60×10^{-1}	4.14×10^{-3}
2	-5.01×10^{-2}	-2.01×10^{-3}
3	2.82×10^{-2}	2.77×10^{-3}
4	8.09×10^{-3}	1.57×10^{-3}
5	4.68×10^{-2}	6.22×10^{-3}

Tabla 5.1: Coeficientes de la serie de Fourier ajustada a $A_{\text{ref}}/A(t)$.

Por último, el factor de corrección quedó definido de la siguiente forma

$$\text{scale_factor}(t) = \sqrt{f(t)} = \sqrt{a_0 + \sum_{n=1}^N [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)]} \quad (5.2)$$

Se consideró la raíz cuadrada ya que el factor de corrección fue aplicado directamente sobre la variable de entrada *WmDMSpr*. Por su parte, la función de corrección fue implementada en la subrutina *UserOuterRoutines*.

A continuación, en el siguiente gráfico, Figura 5.3, se muestra la evolución del área proyectada del AD antes y después de aplicar la corrección.

Se analizaron estadísticamente las oscilaciones en el área efectiva del AD antes y después de aplicar la corrección basada en la serie de Fourier. La media del área sin corrección fue de $26,43 \text{ m}^2$, con una desviación estándar de $4,21 \text{ m}^2$, lo que evidencia una importante dispersión respecto al valor nominal esperado. Tras la aplicación del factor de corrección dinámico, la media del área se estabilizó en $31,93 \text{ m}^2$, muy próxima al valor de referencia $A_{\text{ref}} = 31,37 \text{ m}^2$, y la desviación estándar se redujo a $2,26 \text{ m}^2$. Estos resultados confirman que la corrección no solo logra centrar la evolución del área en torno al valor deseado, sino que también disminuye significativamente su variabilidad, mejorando la consistencia del modelo.

Dado que el factor toma valores menores a uno en la mayoría de los casos, la cantidad de celdas que cumplen la condición geométrica se reduce lo que

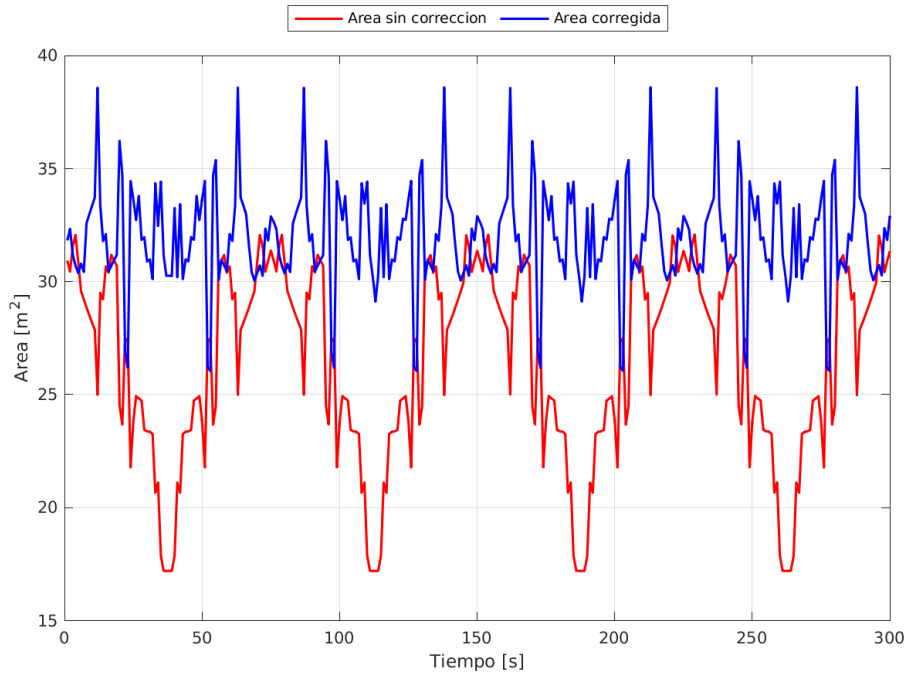


Figura 5.3: Comparación de área proyectada antes y después de la corrección.

genera un impacto en el volumen del disco. Esto afecta directamente a la fuente que se aplica en cada celda, ya que es una magnitud volumétrica. Es decir, si el volumen disminuye, la fuerza aplicada por unidad de volumen es mayor, generando nuevamente fuertes variaciones en el caudal. Debido a esto, también se realizó un análisis similar con el objetivo de corregir también el volumen, a modo de mantener la fuerza volumétrica dentro de valores aceptables. La metodología fue la misma: se definió un factor de volumen

$$f_{vol} = \frac{V_{ref}}{V_{real}}$$

y los resultados se muestran en la Figura 5.4.

La función de corrección tiene la misma forma que la presentada en la expresión 5.1 y los parámetros obtenidos se listan a continuación en la Tabla 5.2

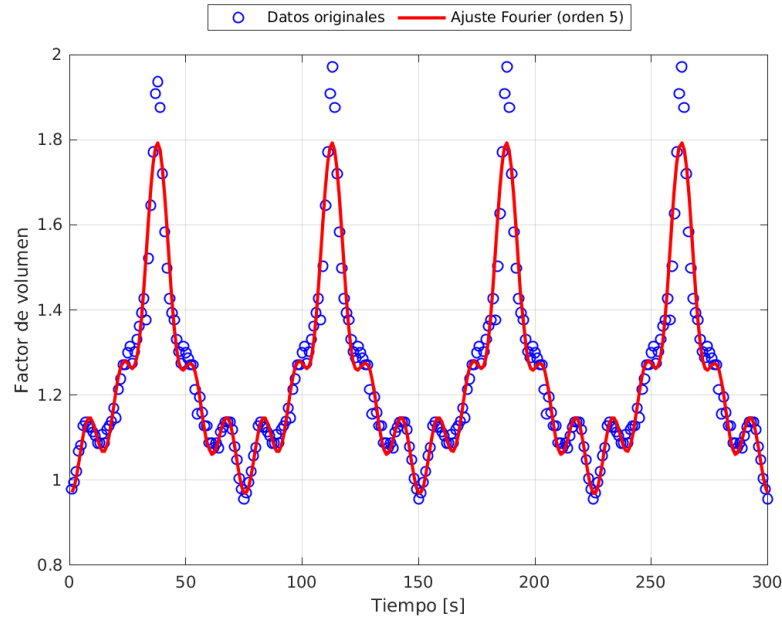


Figura 5.4: Evolución temporal del coeficiente de volumen.

n	a_n	b_n
0	1.24×10^0	—
1	-2.55×10^{-1}	-5.79×10^{-3}
2	1.02×10^{-1}	5.86×10^{-3}
3	-7.34×10^{-2}	-7.73×10^{-3}
4	3.63×10^{-2}	3.65×10^{-3}
5	-8.29×10^{-2}	-1.38×10^{-2}

Tabla 5.2: Coeficientes de la serie de Fourier ajustada a la evolución de `volume_factor` (todos los valores en notación científica con tres cifras significativas).

En este caso, como estamos corrigiendo volumen, el factor de corrección es la propia función, y fue aplicada sobre `WmNormSum`, que es la suma ponderada de los volúmenes de celdas, y por lo tanto depende directamente del volumen total.

Cabe destacar que este problema experimentado viene dado por la resolución de grilla considerada, ya que con una resolución más fina el disco podría reducir significativamente el fenómeno observado.

Por último, debe considerarse que esta primera discretización puede ser un poco gruesa, dado que la resolución de las celdas en la dirección axial es de aproximadamente 1.06 m . Según referencias relacionadas con este método aplicado a aerogeneradores, típicamente se consideran espesores del orden de

0.10D (Storey et al. 2013), por lo que la configuración actual podría presentar ciertas desviaciones respecto a prácticas comunes en la literatura. Además de que la teoría se desarrolla considerando un disco de espesor infinitesimal y cuanto mayor sea nuestro espesor, más nos apartamos de esa hipótesis.

5.1.2. Análisis de convergencia de las simulaciones

En la configuración actual de *caffa3d* utilizada, según lo descrito en la sección anterior, la resolución espacial fue fijada. Sin embargo, para asegurar la estabilidad numérica y obtener resultados de calidad, se consideró oportuno realizar un análisis de refinamiento temporal.

El análisis de convergencia es fundamental, ya que, como se mostrará más adelante, nuestras simulaciones alcanzan estabilidad para todos los casos evaluados. No obstante, la convergencia numérica no garantiza que los resultados sean físicamente representativos. Una resolución temporal demasiado gruesa puede generar errores al no capturar adecuadamente los fenómenos dominantes, mientras que una resolución excesivamente fina implica un costo computacional elevado.

Con el objetivo de lograr un compromiso entre precisión y eficiencia computacional, se llevaron a cabo simulaciones con diferentes valores de Δt . Se analizaron tres aspectos principales:

1. La evolución temporal del caudal, con el fin de evaluar la estabilidad de cada simulación.
2. La dependencia del caudal promedio con respecto a Δt , para evaluar la convergencia numérica.
3. El costo computacional estimado en función de la resolución temporal.

Recordando que el término fuente depende directamente de la variable `WmTotalFlow`, calculada a partir del campo de velocidades en el disco, se siguió la evolución temporal de dicha variable como medida de estabilidad. Se consideró el caso sin giro azimutal, es decir, orientado en una dirección ortogonal del dominio. El análisis con rotación será abordado en la próxima sección. La duración de cada simulación fue de 300s.

Las resoluciones temporales analizadas fueron:

$$\Delta t = 5.00s, 2.00s, 1.00s, 0.50s$$

y los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.5.

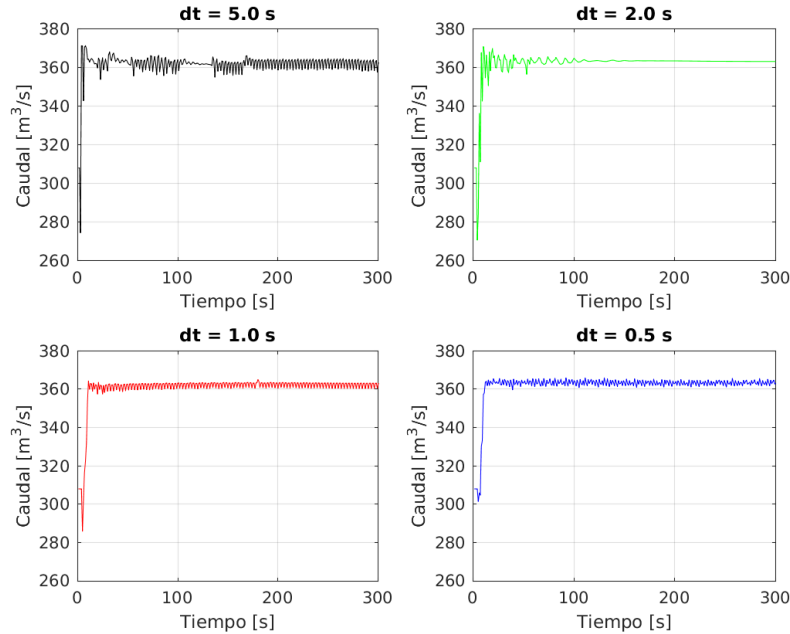


Figura 5.5: Evolución temporal del caudal para cada caso.

A continuación, se calculó el caudal medio para cada simulación, resumiéndose en la Tabla 5.3.

Δt (s)	\bar{V} [m^3/s]
5.00	361.60
2.00	361.99
1.00	360.73
0.50	361.98

Tabla 5.3: Valores de caudal medio obtenidos para cada caso.

Del análisis de la Figura 5.5 se observa que para $\Delta t = 5.00s$ y $2.00s$, aparecen mayores oscilaciones y algunos comportamientos atípicos, mientras que para $\Delta t = 1.00s$ y $0.50s$, la evolución es más estable. Sin embargo, el caudal medio es similar en todos los casos. Este valor difiere del caudal nominal esperado, $308.00 m^3/s$, en aproximadamente un 17%. Parte de esta diferencia se explica por la discrepancia entre el área efectiva del disco usada en la simulación ($31.37 m^2$) y la reportada por el fabricante ($29.70 m^2$), es decir, un 6% superior. Además, la velocidad media obtenida en el disco también fue mayor. Un análisis detallado sobre esta velocidad se presenta en la siguiente sección.

Para una evaluación más completa, se analizó el campo de velocidades para cada caso. Se tomó como referencia el mapa vertical de velocidades en un plano central del dominio, 15 segundos después del inicio de la simulación. Los resultados se muestran en la Figura 5.6.

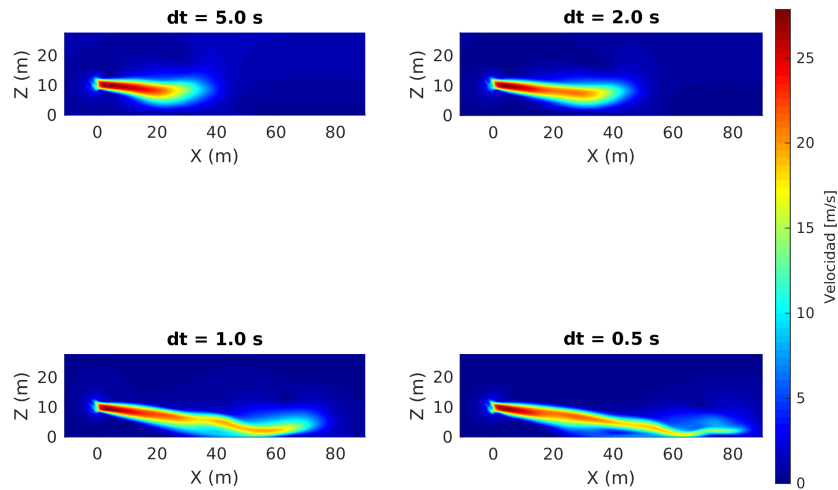


Figura 5.6: Mapa vertical de velocidad para cada caso.

A partir de estos resultados, se aprecia claramente que al disminuir Δt , el desarrollo del chorro es más completo. En los casos con mayor Δt , el chorro aparece truncado en las inmediaciones del disco. Por el contrario, con resoluciones temporales menores, se observa un mejor alcance y definición. Así, se descartan los valores de $\Delta t = 5.00 \text{ s}$ y 2.00 s .

Dado que los resultados obtenidos para $\Delta t = 1.00 \text{ s}$ y 0.50 s son comparables, se utilizó el tiempo de cómputo como criterio adicional. La Figura 5.7 muestra la evolución del costo computacional para cada caso.

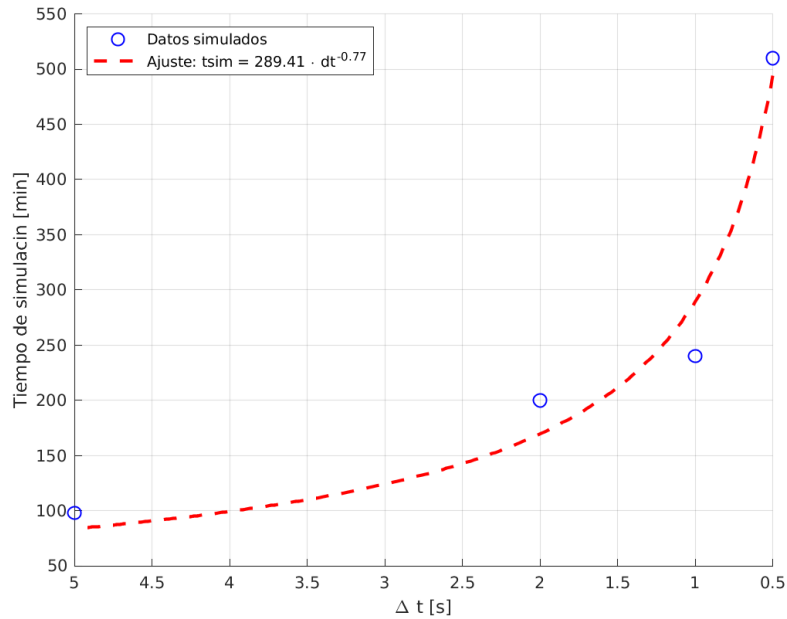


Figura 5.7: Costo computacional expresado en unidades de tiempo.

Se observa un comportamiento exponencial típico, donde al disminuir Δt a la mitad, el tiempo computacional prácticamente se duplica. En este caso particular, una simulación de 20 minutos físicos con $\Delta t = 0.50s$ requiere el doble de tiempo que con $\Delta t = 1.00s$. Por tanto, se consideró que $\Delta t = 1.00s$ representa un buen compromiso entre precisión y eficiencia computacional para esta configuración.

5.1.3. Resultados de la simulación y análisis

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de la simulación numérica del AD. En primer lugar, se estudia la evolución dinámica del caudal, profundizando en ciertos aspectos discutidos previamente en las secciones anteriores. A continuación, se realiza una caracterización del campo de velocidades, comparando los resultados numéricos tanto con las predicciones teóricas como con los datos proporcionados por el fabricante. Finalmente, se analiza el campo de temperaturas, evaluando las variables de interés vinculadas al objetivo principal de esta tecnología antiheladas: generar un incremento térmico en las zonas cercanas a los cultivos.

5.1.3.1. Evolución dinámica del caudal

Luego de las correcciones tanto de área como de volumen mencionadas en la Sección 5.1.1, así como también una vez definida la resolución temporal, se procedió a realizar la simulación contemplando todos los parámetros que gobiernan el funcionamiento del modelo. Como se ha mencionado anteriormente, una de las variables más representativas del modelo es el caudal. Por esta razón, se decidió comenzar esta sección analizando el comportamiento de dicha variable a lo largo del tiempo de simulación, que vale la pena recordar fue de 20 minutos, lo cual se corresponde con 4 periodos de giro azimutal.

En primer lugar, se presenta la evolución temporal del caudal obtenida, Figura 5.8.

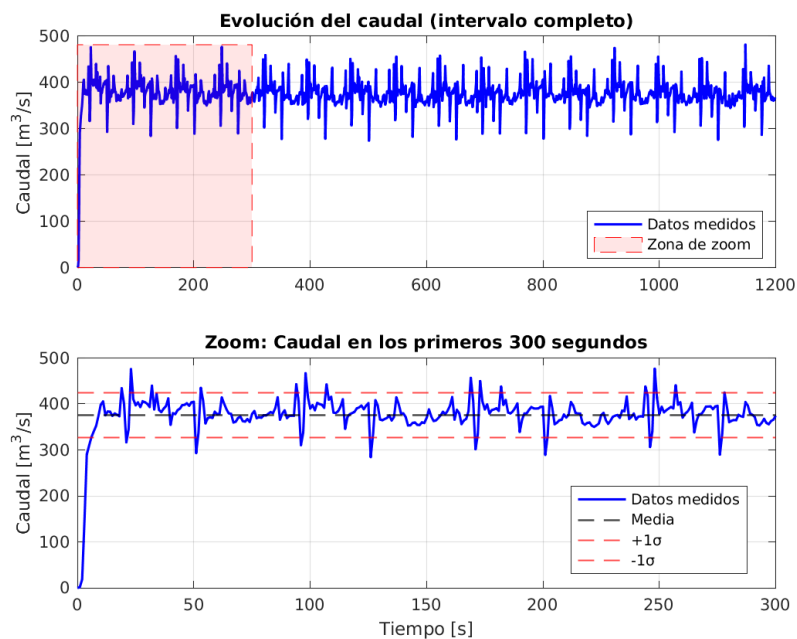


Figura 5.8: Evolución temporal del caudal.

La gráfica superior de la figura muestra la evolución temporal del caudal para todo el periodo de operación, mientras que la gráfica inferior representa una ventana de los primeros 300 segundos, donde además se indican la desviación estándar y la media.

Lo primero que se observa es que el caudal presenta fluctuaciones respecto del valor medio, lo cual, de acuerdo con lo expuesto en la Sección 5.1.2, era de esperarse. Sin embargo, en este caso se observan algunos picos más alejados,

aquellos que en el segundo gráfico caen por fuera de las bandas de desviación estándar.

Por otra parte, estos picos ocurren en instantes de tiempo de corta duración y presentan cierta periodicidad. Como ya se mencionó, si bien el área proyectada en función del tiempo fue corregida, la misma continuó presentando variaciones.

Para identificar si estas anomalías en el caudal se corresponden con cambios bruscos de área, se decidió representar la variación de área en función del tiempo junto con los instantes en los que se obtuvieron valores anómalos de caudal. El resultado se presenta en la Figura 5.9.

Cabe destacar que, dado que la periodicidad observada se mantiene a lo largo de toda la serie, se decidió analizar solo el primer periodo de simulación. No obstante, los resultados son representativos del comportamiento general.

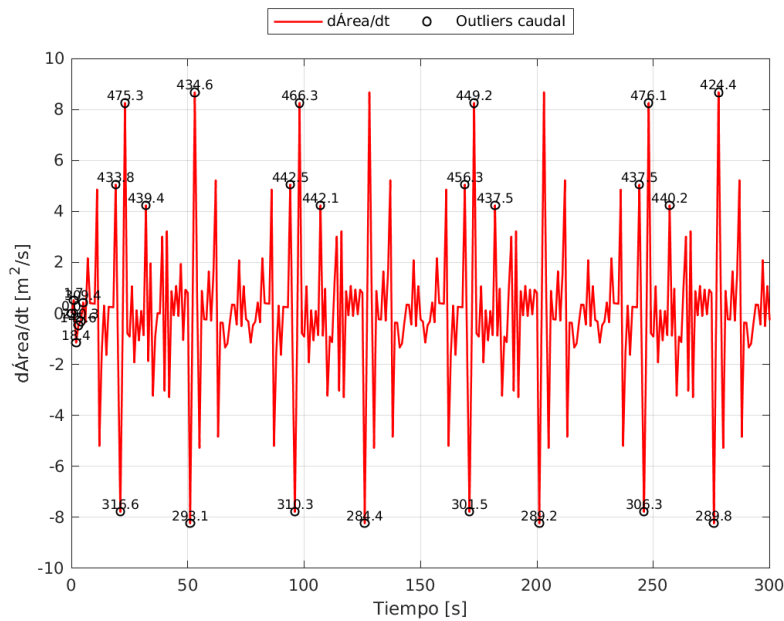


Figura 5.9: Correlación entre outliers del caudal y variación del área.

Este resultado permite afirmar que los instantes de tiempo en los cuales se observan valores de caudal elevados coinciden con momentos en que la variación de área presenta cambios significativos. Por lo tanto, además de la propia naturaleza dinámica del problema que provoca ciertas oscilaciones, estas variaciones geométricas contribuyen a acentuar las fluctuaciones en momentos determinados.

Aunque en las gráficas anteriores los valores anómalos parecen escasos, se generó un histograma con el fin de cuantificar con mayor precisión qué porcentaje de los datos se encuentra dentro del rango esperado, y así afirmar que nuestros resultados son aceptables. El histograma generado se presenta en la Figura 5.10.

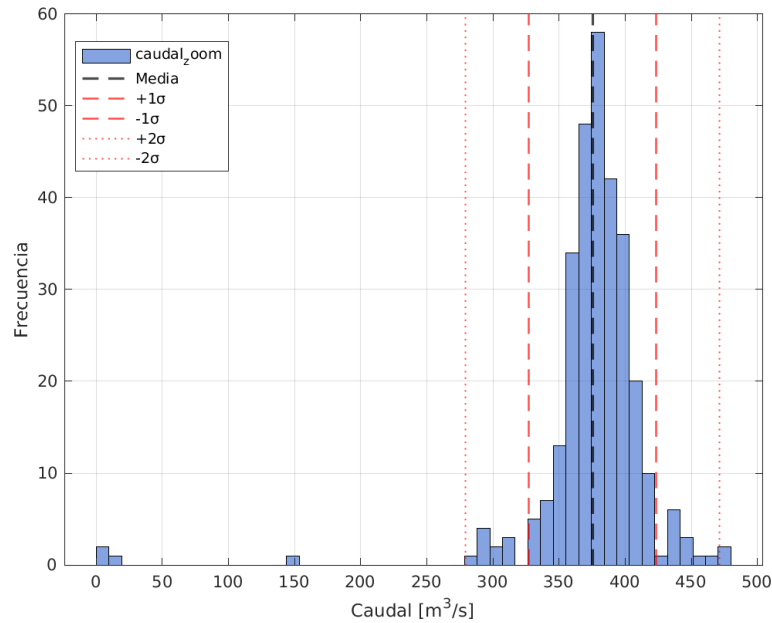


Figura 5.10: Distribución estadística del caudal simulado.

El histograma muestra el valor medio del caudal y las bandas correspondientes a la desviación estándar. Se observa que la gran mayoría de los valores se encuentra dentro del primer intervalo de desviación. Más precisamente, el 91 % de los datos están dentro de la zona de 1σ , mientras que el 98 % se ubican dentro de la zona de 2σ . El 2 % restante corresponde a los instantes iniciales de la simulación. Este comportamiento es indicativo de una buena estabilidad numérica del modelo, ya que las oscilaciones se mantienen mayoritariamente dentro de rangos estadísticos esperables. Las pocas desviaciones observadas no comprometen la consistencia general del resultado, especialmente al tratarse de un modelo con dinámica rotacional y geometría variable, donde ciertas fluctuaciones son inherentes al fenómeno físico simulado.

Otro aspecto relevante fue comparar el valor medio de caudal obtenido con el valor esperado según el fabricante. En nuestro caso se obtuvo:

$$\dot{V} = 374.66 \text{ m}^3/\text{s}$$

Este valor se aparta considerablemente del valor nominal indicado por el fabricante, $308.00 \text{ m}^3/\text{s}$, más precisamente un 21 %. Por un lado, el área media del disco en nuestra simulación fue de 31.99 m^2 , un 8 % superior a la reportada por el fabricante (29.70 m^2). Por otro lado, la velocidad promedio en las celdas que conforman el disco fue también superior a la esperada.

La justificación de esta discrepancia en la velocidad contempla tanto los efectos de resolución mencionados anteriormente como aspectos físicos que el modelo no contempla. Estos aspectos serán discutidos con mayor detalle en la siguiente sección.

5.1.3.2. Análisis del comportamiento aerodinámico

Esta sección tiene por objetivo desarrollar, tanto cuantitativa como cualitativamente, los aspectos aerodinámicos del modelo. En primer lugar, se presentan resultados referidos al campo de velocidades en las zonas próximas al AD. Estos incluyen la visualización de líneas de flujo (Figura 5.11), lo cual permite identificar visualmente la forma adoptada por el flujo y analizar las contribuciones tanto normales como tangenciales.

A continuación, se analiza la evolución de la velocidad en función de la distancia, a la altura del centro del AD, lo cual permite observar aspectos directamente relacionados con la teoría del disco actuador presentada en la Sección 3.2.

Seguidamente, se presenta la evolución espacial de la velocidad a una altura de 3.00 m (Figura 5.14), resultado que fue incluido por su relevancia comparativa con el trabajo de (Heusinkveld, 2019), permitiendo una confrontación directa con sus simulaciones y los datos experimentales que reportan.

Finalmente, se analizan aspectos relacionados con la potencia entregada al aire, así como los valores de empuje y momento adoptados por el modelo, con el fin de compararlos con los valores brindados por el fabricante.

En la Figura 5.11 se muestra el comportamiento adoptado por las líneas de flujo, observándose claramente el chorro inducido generado por el AD. Las líneas evidencian una clara aceleración del flujo a través del disco, seguida por una expansión en la región posterior. Se distinguen también trayectorias levemente inclinadas, resultado del componente tangencial del empuje introducido.

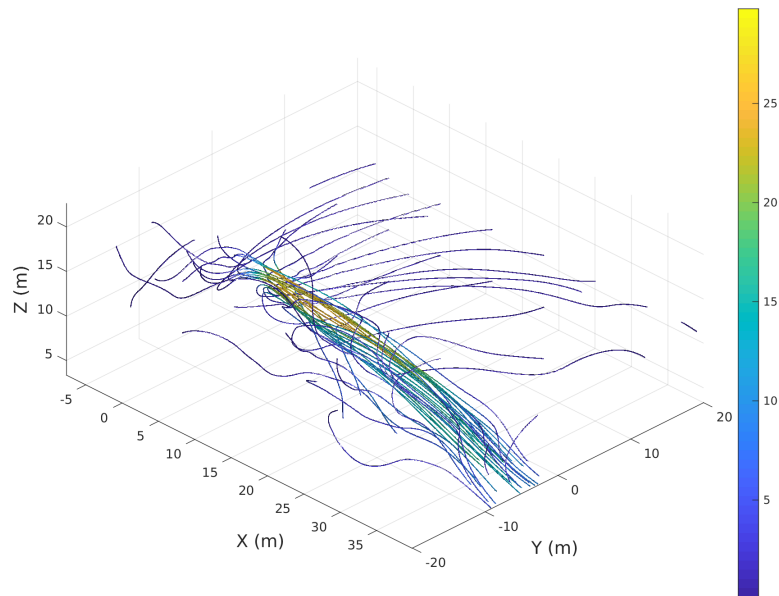


Figura 5.11: Vista isométrica de las líneas de flujo a través del AD.

Este comportamiento concuerda con lo esperado según la teoría del disco actuador. La inclinación del chorro indica una correcta implementación del ángulo de *tilt*, y la forma general del flujo permite afirmar que el empuje está siendo aplicado de manera adecuada en la región correspondiente.

A continuación, se analiza la evolución axial de la velocidad a lo largo del eje del AD, con el objetivo de comparar cuantitativamente los resultados con valores teóricos y datos del fabricante disponibles.

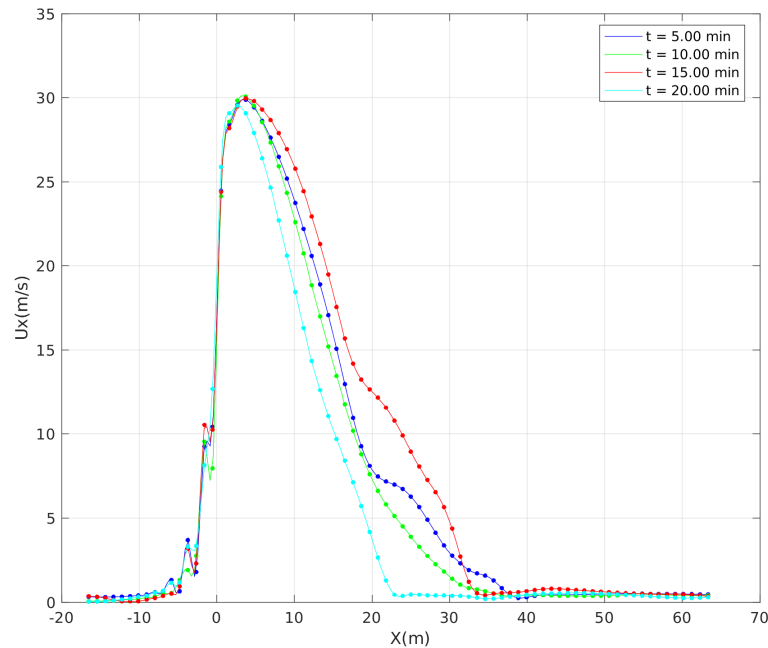


Figura 5.12: Evolución de la velocidad a una altura de 10.5 m en función de la distancia.

Se observa un incremento claro de la velocidad en las celdas próximas al centro del AD, comenzando desde valores prácticamente nulos aguas arriba, hasta alcanzar un máximo de aproximadamente 30.00 m/s. El efecto de *smea-ring* se manifiesta como un aumento progresivo en las primeras celdas, seguido por un incremento más pronunciado en la zona central del disco.

También se detectan leves oscilaciones en algunos instantes de tiempo, las cuales podrían estar asociadas a las condiciones del flujo en la entrada o a la aplicación discreta de la fuerza. Sin embargo, dado que no se repiten sistemáticamente, se consideran aceptables en esta etapa del análisis.

Tras alcanzar la velocidad máxima, esta comienza a decrecer en función de la distancia, como era de esperar, debido a la pérdida de energía del flujo inducido al interactuar con aire en reposo.

Aunque el comportamiento general es similar para los diferentes instantes en las celdas más cercanas al disco, se observan algunas diferencias aguas abajo. Esto es coherente con la naturaleza no estacionaria del problema y no representa una deficiencia del modelo.

Cabe destacar que el valor máximo observado se registra en el eje axial del AD, por lo que no representa la velocidad promedio sobre toda el área

del disco. Para visualizar la distribución espacial de velocidades en una sección transversal, se presenta en la Figura 5.13 un corte vertical del campo de velocidades en el plano del AD.

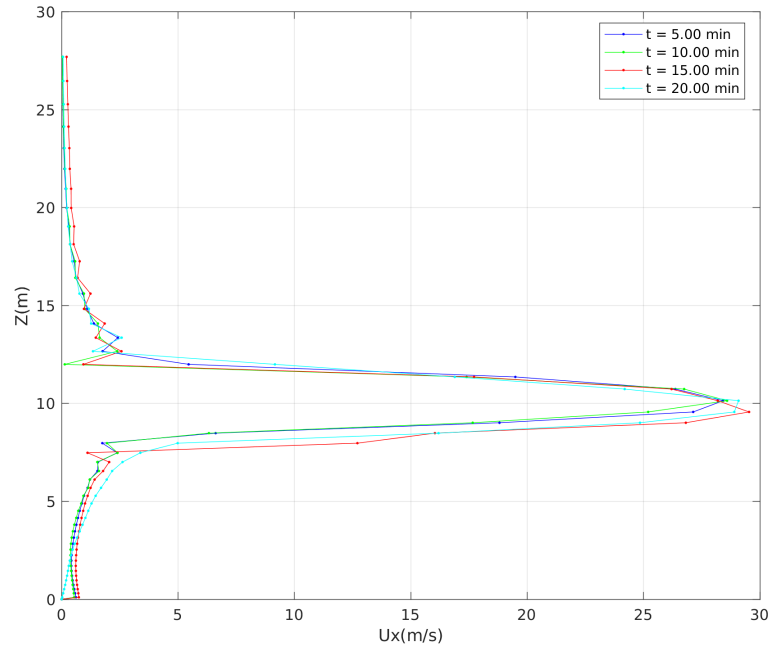


Figura 5.13: Perfil de velocidad en el plano del AD.

En esta figura se evidencia cómo las celdas cercanas a la periferia del disco presentan velocidades inferiores, mientras que aquellas en la zona central alcanzan valores máximos. Este patrón es coherente con lo esperado al considerar efectos viscosos: las regiones periféricas interactúan con zonas de velocidad nula adyacentes, lo que limita su capacidad de inducir velocidad en comparación con el centro del disco.

Finalmente, se destaca la ausencia de oscilaciones abruptas o discontinuidades en los perfiles de velocidad, lo cual confirma la estabilidad del modelo bajo las condiciones numéricas y físicas establecidas en las secciones anteriores.

A continuación se presenta la evolución de la velocidad a una altura de 3.00 m, Figura 5.14. Esta variable presenta un comportamiento variable dependiendo del instante de tiempo considerado.

Dada la dificultad de realizar una validación cuantitativa precisa con los resultados presentados por Heusinkveld (2019), se optó por llevar a cabo un análisis cualitativo. En particular, una comparación directa se ve limitada por

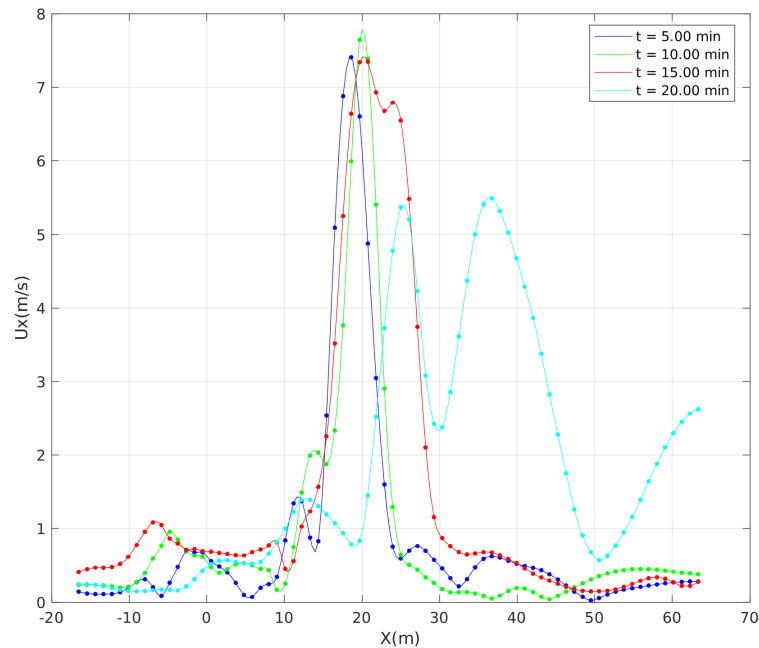


Figura 5.14: Evolución de la velocidad a una altura de 3 m en función de la distancia.

las diferencias en las condiciones de contorno empleadas, la falta de coincidencia en los parámetros del modelo y la ausencia de información detallada sobre el enfoque numérico utilizado, tales como la implementación del modelo, la resolución espacial y temporal y los criterios de simulación adoptados.

No obstante, es posible identificar visualmente ciertas coincidencias relevantes. Por un lado, se observan picos de velocidad de aproximadamente 7.00 m/s a una distancia cercana a 20.00 m, y por otro, un segundo pico de 5.00 m/s alrededor de 40.00 m. Ambos comportamientos fueron también reportados en su estudio, tanto en la simulación numérica como en los datos experimentales, lo cual otorga validez cualitativa al modelo desarrollado en este trabajo.

Aunque estas figuras ofrecen una apreciación visual del comportamiento del modelo, no permiten extraer conclusiones cuantitativas. Por ello, para caracterizar el flujo a través del AD y poder comparar con los resultados teóricos, se definieron las siguientes variables:

- V_{in} : Velocidad del flujo previo al ingreso,
- V_{ax} : Velocidad del flujo que atraviesa el AD,
- V_{out} : Velocidad del flujo luego de atravesar el AD.

En la Sección 3.2.1 estas variables se denominaban originalmente como V_0 , u y u_1 , respectivamente; se optó por renombrarlas para diferenciarlas de las magnitudes extraídas de los resultados.

Para determinar estas magnitudes se utilizó el promedio ponderado usando el flujo másico,

$$V_{\text{mean}} \approx \frac{\sum_{i=1}^N [(v_i \cdot n) \Delta A_i]}{A_d}, \quad (5.3)$$

donde:

- $i = 1, 2, \dots, N$ indexa cada celda que cubre el área del disco,
- v_i es el vector de velocidad en la celda i ,
- n es el vector normal (se asume constante en el disco),
- ΔA_i es el área de la celda i , y
- A_d es el área total del disco.

Otro aspecto importante es la determinación de la distancia a la cual se toman los valores de V_{in} y V_{out} . Este detalle es crucial, ya que las tres velocidades están teóricamente interrelacionadas; ubicarse en posiciones inadecuadas puede inducir conclusiones erróneas. A continuación se detallan las consideraciones tomadas:

- Para V_{in} , se consideró una zona previa al ingreso al AD que no esté afectada por la inducción de flujo. Esta condición se verifica a una distancia de un diámetro (D) aguas arriba.
- Para V_{ax} , dado que las fuerzas aplicadas se distribuyeron sobre 6 planos, se decidió considerar el último plano en sentido del flujo, ya que este contempla el efecto total aplicado.
- Para V_{out} , se consideró la velocidad máxima alcanzada en la contracción previa a la expansión del flujo. Se observó que esta se alcanza dos planos aguas abajo del plano anterior, es decir, a 2,12 m aguas abajo.

Dado que no se observó una contracción clara en el chorro, resultó difícil determinar sobre qué área calcular la V_{out} . Como primera aproximación, se

realizó una consideración básica pero robusta: conservar el flujo másico entre la salida del disco y la zona de contracción, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\rho A_{\text{disco}} V_{\text{ax}} = \rho A_{\text{con}} V_{\text{con}}$$

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 5.4.

Time (min)	V_{ax} (m/s)	V_{out} (m/s)	V_{in} (m/s)
5.00	10.68	17.58	0.81
10.00	10.45	17.37	0.62
15.00	10.52	17.39	0.52
20.00	10.78	17.51	0.61

Tabla 5.4: Valores de velocidades obtenidos.

Se observa que, para los cuatro instantes analizados, los resultados son muy similares y consistentes entre sí.

Aunque V_{out} es mayor que V_{ax} , no se cumple la primera aproximación teórica (Ecuación 3.15), que indica que V_{ax} se aproxima como el promedio entre V_{in} y V_{out} . Esto se puede explicar por dos motivos:

1. La teoría ideal asume un disco de volumen infinitesimal, mientras que en nuestro modelo las celdas que lo conforman poseen un volumen considerable.
2. Se supone que el salto de velocidad ocurre de forma instantánea al atravesar el disco; en nuestro caso, el salto se genera de forma gradual debido a la distribución de fuerzas aplicada.

Adicionalmente, es relevante comentar que los efectos viscosos presentes en la simulación generan una distribución no uniforme del campo de velocidades. Tal comportamiento, observado también en estudios experimentales para ventiladores axiales de dos palas (McKee y Naeseth, 1958; Roque et al. 2024), muestra que la velocidad máxima del chorro se desplaza de la ubicación teórica ideal, generalmente a 1 radio, lo cual se aproxima a lo obtenido en nuestro caso. Esto enfatiza la importancia de modelar correctamente la viscosidad y, de ser posible, realizar un estudio de sensibilidad respecto a la resolución de la malla, ya que una grilla demasiado gruesa podría no captar con precisión estos fenómenos.

De acuerdo con lo expuesto en la Sección 4.1.1, la velocidad promedio a partir de los datos del fabricante resultó ser:

$$V_{\text{ax,fab}} = 10.37 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Comparando los valores de velocidad mostrados en la Tabla 5.4 con el dato del fabricante, se observa una fuerte correspondencia para todos los instantes, siendo prácticamente iguales. Cabe destacar que, en este caso, la velocidad es coincidente; sin embargo, como se mencionó en secciones anteriores, el promedio en toda la simulación es superior debido a las variaciones de área y volumen presentes.

El empuje aplicado al flujo se puede estimar mediante el balance de cantidad de movimiento en la dirección normal al disco:

$$T = \int_A \rho v_n (v_n^{\text{out}} - v_n^{\text{in}}) dA \quad (5.4)$$

donde ρ es la densidad del aire, v_n es la componente de la velocidad normal al disco, y los superíndices *in* y *out* indican los valores antes y después del disco, respectivamente.

Para una malla discreta, se puede aproximar mediante una suma:

$$T \approx \sum_i \rho v_{n,i} (v_{n,i}^{\text{out}} - v_{n,i}^{\text{in}}) \Delta A_i \quad (5.5)$$

Por otra parte, el momento aplicado al flujo por la rotación inducida se calcula como:

$$Q = \int_A \rho r v_n v_\theta dA \quad (5.6)$$

y su versión discreta:

$$Q \approx \sum_i \rho r_i v_{n,i} v_{\theta,i} \Delta A_i \quad (5.7)$$

donde r es la distancia al eje de rotación y v_θ la componente tangencial de la velocidad.

A continuación se presentan los valores obtenidos:

Tiempo (min)	T (kN)	Q (kNm)
5.00	8.34	1.19
10.00	8.04	1.16
15.00	8.24	1.09
20.00	8.28	2.31

Tabla 5.5: Resultados de empuje y momento.

El empuje obtenido es coherente con lo reportado por el fabricante (8.18 kN). En cuanto al momento, en algunos instantes resulta más bajo de lo esperado, mientras que en el último instante se observa un valor levemente superior. Dado que el fenómeno es predominantemente axial, esta componente tangencial no resulta determinante; según las magnitudes observadas y de acuerdo con el comportamiento mostrado por las líneas de flujo, su efecto sobre el flujo es limitado. Al final de la sección se realiza una comparación contra los valores impuestos a través del termino fuente.

A continuación se evalúa la potencia entregada por el AD. En lugar de utilizar expresiones basadas en la diferencia de energía cinética entre secciones de entrada y salida, las cuales dependen fuertemente de elecciones arbitrarias de planos, se adopta un enfoque más directo, basado en las fuerzas y velocidades locales obtenidas del modelo numérico.

La potencia útil entregada al flujo se estima como el producto del empuje total T y la velocidad axial media en el plano del disco \bar{v} :

$$P_{\text{útil}} = T \cdot V_{ax} \quad (5.8)$$

La potencia total asociada a la rotación se calcula como:

$$P_{\text{total}} = Q \cdot \omega \quad (5.9)$$

donde Q es el par y ω la velocidad angular. Esta separación permite distinguir entre las contribuciones axial y rotacional a la transferencia de energía.

Con el fin de validar la coherencia entre los resultados obtenidos del modelo CFD y las condiciones impuestas mediante el término fuente, se presentan en la Tabla 5.7 los valores máximos y mínimos definidos para el empuje T , par Q , potencia útil $P_{\text{útil}}$ y potencia total P_{total} :

Como puede observarse, los valores de potencia útil obtenidos a partir del

Tiempo (min)	$P_{\text{útil}}$ (kW)	P_{total} (kW)
5.00	89.10	67.23
10.00	84.06	65.64
15.00	86.73	61.63
20.00	89.27	130.77

Tabla 5.6: Resultados de potencia útil y total entregada por el disco actuador.

	T [kN]	Q [kNm]	$P_{\text{útil}}$ [kW]	P_{total} [kW]
Máximo	9.26	2.40	121.33	135.76
Mínimo	6.66	1.73	67.86	97.62

Tabla 5.7: Valores extremos impuestos en el término fuente del modelo de disco actuador.

postprocesamiento CFD (Tabla 5.6) se encuentran dentro del rango esperado, lo que confirma que el modelo respeta adecuadamente las condiciones impuestas. Esto también refuerza la consistencia entre la implementación numérica del término fuente y la respuesta dinámica del flujo.

En cuanto al momento aplicado y la potencia total, se observa que en tres de los cuatro instantes analizados, el valor del momento resultante a partir de la simulación cae significativamente por debajo del valor definido en el término fuente. Esta subestimación impacta directamente en el cálculo de la potencia total $P_{\text{total}} = Q \cdot \omega$, la cual, en dichos casos, también se encuentra por fuera del rango esperado. Esta discrepancia puede explicarse por la baja magnitud relativa del momento en comparación con el empuje. En situaciones donde el flujo es predominantemente axial y el campo de velocidades tangenciales inducido es reducido, el momento aplicado puede no ser suficiente para generar una rotación apreciable. Como consecuencia, su efecto sobre la solución numérica es limitado y puede verse atenuado o disipado rápidamente por la viscosidad y la turbulencia. Aunque el término fuente de momento se aplica formalmente, su contribución puede ser tan baja que no logra modificar de manera significativa la dinámica del flujo, resultando en una velocidad tangencial media muy baja o nula en el plano del disco.

Conclusión preliminar

En síntesis, el modelo CFD implementado demuestra un buen acople con la teoría del disco actuador y con datos experimentales, validando tanto el campo de velocidades como las magnitudes derivadas (empuje, momento y potencia).

Aunque se observan algunas discrepancias, la aproximación es satisfactoria para una primera validación del fenómeno. Se concluye que el modelo presenta fiabilidad y un gran potencial de aplicabilidad, resaltándose la importancia de futuros estudios de sensibilidad y refinamiento del mallado para capturar con mayor precisión los detalles del flujo.

5.1.3.3. Campo de temperatura

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos para el campo de temperaturas luego de la simulación. El principal objetivo fue identificar la forma adoptada por dicho campo y cuantificar el aumento de temperatura, permitiendo así comparaciones tanto con los estudios previamente mencionados como con los resultados teóricos esperados.

En la Figura 5.15 se presenta el mapa de temperaturas correspondiente al instante final de operación, es decir, luego de completar las 4 revoluciones. También se incluye el perfil de velocidades adoptado en cada instante de tiempo, con una frecuencia de muestreo de 5 minutos.

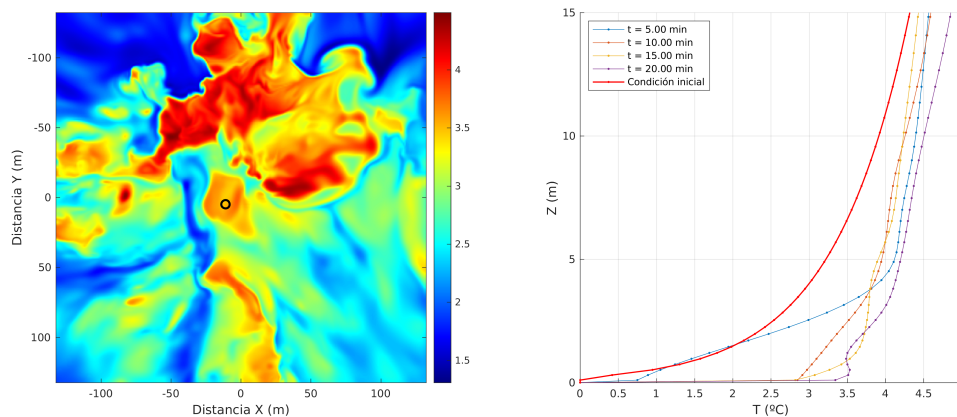


Figura 5.15: Distribución espacial de la temperatura a una altura de 1.5 m (izquierda). A la derecha se presenta la evolución temporal del perfil vertical de temperatura en el punto de muestreo señalado en el mapa de colores.

Lo primero que se observa es que el campo de temperaturas presenta cierta asimetría, con un mayor aumento registrado en la zona superior. En el mapa reportado por Heusinkveld (2019) también se evidenció una asimetría, en su caso alineada con la dirección del viento impuesto. En nuestro estudio, dado que la simulación parte desde el reposo, la dirección resultante fue distinta, pero la diferencia observada podría explicarse por las condiciones iniciales diferentes.

En cuanto a los perfiles de temperatura correspondientes a cada instante analizado, se observa un aumento progresivo con el paso del tiempo, alcanzando el máximo calentamiento en el último instante considerado. La forma de los perfiles coincide con lo descrito en la Sección 2.3, particularmente con lo ilustrado en la Figura 2.1. Se observa un claro aumento de temperatura en los primeros metros sobre el suelo, con un mayor impacto en esta zona. A medida que se incrementa la altura, el cambio de temperatura se atenúa.

Para cuantificar este efecto, y de acuerdo con lo discutido en la Sección 2.3, el aumento de temperatura generado por la WM debería ser aproximadamente equivalente a un tercio de la fuerza de inversión. Este valor se obtiene como la diferencia de temperaturas entre las alturas de 10 m y 1.5 m, según la expresión:

$$\Delta\Theta = \frac{1}{3} (\Theta_{10\text{m}}^0 - \Theta_{1.5\text{m}}^0) = 0.63^\circ\text{C}$$

Cabe señalar que no se dispone de información detallada sobre las hipótesis bajo las cuales esta estimación es válida, ni si se trata de una estimación puntual o de un promedio global sobre el radio de acción de la WM.

En este estudio, el aumento de temperatura depende claramente de la ubicación considerada, debido a la distribución heterogénea del calentamiento producido en la simulación. Para realizar la cuantificación, se seleccionaron dos puntos: el primero corresponde al lugar con mayor cambio de temperatura, y el segundo al centro del dominio, coincidente con la ubicación del AD.

El punto de mayor temperatura a una altura de 1.50 m se localizó en la posición (50.36, 42.94, 1.50), registrando un valor de:

$$\Theta_{\text{máx}}^{1.5} = 4.50^\circ\text{C}$$

Mientras que, para el centro del dominio:

$$\Theta_{\text{centro}}^{1.5} = 3.70^\circ\text{C}$$

A su vez, se estimó un valor global como promedio de temperatura en los puntos que mostraron un aumento respecto de la condición inicial. Este valor fue:

$$\Theta_{\text{global}}^{1.5} = 2.94^\circ\text{C}$$

Considerando que la temperatura inicial a esa altura fue de 2.02°C , en la

Tabla 5.8 se resumen los saltos de temperatura obtenidos para cada caso:

Posición	Θ (°C)	$\Delta\Theta$ (°C)
1	4.50	2.48
2	3.70	1.68
Global	2.94	0.92

Tabla 5.8: Incrementos de temperatura luego de la simulación.

En las zonas con mayores incrementos, se obtuvo un valor máximo de ΔT comparable al reportado por Heusinkveld (2019), cuya simulación arrojó un máximo de 1.96 °C.

En cuanto al valor global, se observa que éste se aproxima al resultado estimado mediante la expresión empírica presentada anteriormente. Bajo la suposición de que dicha expresión representa una eficiencia global, puede afirmarse que el modelo desarrollado predice en buena medida ese comportamiento. La diferencia observada podría atribuirse a las simplificaciones introducidas en el modelado del fenómeno, ya discutidas a lo largo del documento.

Finalmente, a partir de la condición global se determinó el área del dominio donde se observó un aumento de temperatura respecto del estado inicial, obteniéndose:

$$\text{Área}_{\text{afectada}} = 6.07 \text{ Ha}$$

La cobertura nominal reportada por el fabricante es de 7.43 Ha, con una posible dependencia del tipo de cultivo. Dado esto, se considera que nuestro valor se aproxima razonablemente y es aceptable como primera aproximación.

Conclusión preliminar

La discrepancia entre los valores de referencia esperados, obtenidos a partir de correlaciones empíricas y datos reportados por el fabricante, y los resultados numéricos obtenidos podría atribuirse a varios factores, entre ellos:

- Simplificaciones en el modelo numérico, como las condiciones iniciales homogéneas y un perfil de inversión relativamente agresivo. Estas simplificaciones pueden amplificar los incrementos de temperatura en ciertas zonas, reduciendo la precisión del modelo en comparación con condiciones reales.

- Influencia de las condiciones de contorno, como la condición isotérmica que mantiene prácticamente constante la temperatura del aire impulsado por la máquina. Esto podría limitar la capacidad del modelo para representar correctamente los efectos de mezcla térmica y las fluctuaciones esperadas en el campo de temperaturas.

Por otro lado, el comportamiento observado en las figuras mencionadas también sugiere que el modelo reproduce de forma cualitativa los efectos esperados, como el calentamiento localizado y su dependencia con la altura.

5.2. Limitaciones

El desarrollo de este trabajo presenta diversas limitaciones que deben tenerse en cuenta al interpretar los resultados obtenidos y al considerar posibles líneas de mejora para estudios futuros:

- **Falta de datos específicos del fabricante.** La información técnica disponible sobre las WMs es limitada. Datos clave como curvas de rendimiento, coeficientes aerodinámicos y condiciones óptimas de operación no están publicados o son insuficientes, lo que restringe la validación rigurosa del modelo.
- **Simplificaciones físicas del modelo.** El modelo del AD considera condiciones ideales de funcionamiento y no contempla efectos como rugosidad del terreno, obstáculos ni interacciones entre múltiples WMs. Esto puede influir en la representatividad de los resultados frente a situaciones reales.
- **Ausencia de validación cuantitativa.** Aunque se realizaron comparaciones cualitativas con literatura previa, no se dispone de una validación cuantitativa basada en datos experimentales. Esto limita la capacidad para extrapolar los resultados con plena confianza hacia condiciones reales.

Estas limitaciones motivan propuestas concretas que se abordan en la Sección 6.2, incluyendo estrategias para incorporar datos experimentales, mejorar la fidelidad del modelo e implementar configuraciones más complejas como la interacción entre múltiples máquinas.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

Este capítulo se divide en dos secciones que abordan diferentes aspectos del trabajo realizado. Primero, se presentan las conclusiones finales desde un punto de vista técnico de los resultados obtenidos. Luego de esto, se discuten las limitaciones de la investigación, señalando áreas que podrían mejorarse en futuros estudios.

6.1. Conclusiones

Las conclusiones se han estructurado en el marco de tres aspectos fundamentales del desarrollo. En primer lugar, se presentan conclusiones desde el punto de vista aerodinámico del modelo implementado. Luego, se abordan aspectos relacionados con el campo de temperaturas y, por último, se exponen observaciones vinculadas a los aspectos computacionales de los dos modelos utilizados.

1. Desde el punto de vista aerodinámico, se concluye que el modelo de AD implementado respeta rigurosamente los fundamentos teóricos analizados. Además, los valores de velocidad y flujo obtenidos se aproximan de manera satisfactoria a los datos proporcionados por el fabricante. En cuanto a la comparación con los resultados presentados por (Heusinkveld, 2019), las formas y distribuciones de las magnitudes analizadas resultan similares. No obstante, dado que se desconocen con exactitud las consideraciones realizadas para replicar la misma simulación, no se puede realizar una comparación cuantitativa directa.

2. En lo que respecta a la variación en el campo de temperaturas, este efecto fue identificado con éxito. Para el caso de *caffa3d*, se observó que el calentamiento parece ser levemente superior a lo previsto por la extensión empírica mencionada. Sin embargo, cabe destacar que no se dispone de información precisa sobre las condiciones bajo las cuales se ajustó dicha expresión, por ejemplo, si se aplica a zonas puntuales o a toda la extensión de cobertura. En comparación con lo obtenido en el estudio de (Heusinkveld, 2019), se obtuvieron valores levemente superiores, pero muy próximos, tanto a lo reportado en su simulación como en los datos experimentales. Por último, respecto al área de cobertura, el valor obtenido fue muy próximo al reportado por el fabricante, lo cual también confirma la buena representación lograda por la simulación. Se concluye que las diferencias observadas pueden explicarse por la simplificación de ciertos parámetros físicos en el modelo. Por otro lado, en el caso de *chaman*, dado que no se lograron obtener resultados, no es posible establecer conclusiones. No obstante, es de esperar que, partiendo de una condición inicial diferente, los resultados puedan presentar algunas variaciones respecto al caso de *caffa*, y quizá se acerquen aún más a los esperados.
3. El costo computacional, referido a los tiempos de simulación, parece ser aceptable a priori para su uso en aplicaciones industriales, sin incurrir en grandes tiempos de espera y permitiendo flexibilidad para realizar múltiples simulaciones. Asimismo, es de esperar que, si el modelo funciona correctamente en *chaman*, los tiempos de ejecución resulten aún menores.

6.2. Trabajos a futuro

A lo largo del desarrollo de este trabajo se identificaron diversas oportunidades para mejorar el modelo, así como posibles análisis adicionales que podrían contribuir a una mejor comprensión de los efectos que influyen en su eficacia. Estas propuestas no fueron abordadas, ya que exceden los objetivos definidos para este estudio. Sin embargo, resulta fundamental delinearlas como trabajos a futuro para continuar optimizando las capacidades del modelo. A continuación, se presenta una lista con las principales propuestas y su justificación.

1. Evaluar la pertinencia de continuar mejorando el modelo del AD. Esto incluye determinar si los resultados obtenidos hasta el momento son suficientes para modelar el fenómeno con la precisión requerida o si se justifica implementar refinamientos adicionales en función de nuevos objetivos o aplicaciones específicas.
2. Analizar la integración del método BEM dentro del código CFD. Este análisis debe incluir no solo la evaluación de la precisión de los resultados obtenidos, sino también la eficiencia computacional. Cuantificar las ventajas y desventajas de este enfoque permitirá establecer si su implementación aporta beneficios tangibles en el contexto del modelo.
3. Realizar una validación cuantitativa del modelo, correlacionándolo con resultados experimentales. Aunque se realizó una validación cualitativa en este trabajo, el uso de datos experimentales permitiría afianzar la confiabilidad del modelo y mejorar su capacidad predictiva.
4. Estudiar el impacto de las variaciones en las condiciones de inversión térmica sobre la eficacia de la WM. Este análisis podría incluir la simulación de escenarios con inversión débil y fuerte, evaluando cómo estas condiciones afectan la capacidad de mitigación y los flujos asociados.
5. Analizar el efecto del ángulo de inclinación del flujo generado por la WM. Determinar si existe un ángulo óptimo y cuantificar su influencia en los resultados permitiría identificar configuraciones más eficientes para la mitigación de heladas.
6. Estudiar cómo la velocidad de giro azimutal afecta la eficacia del AD. Este análisis debería explorar si existe una velocidad óptima y si esta puede ajustarse dinámicamente en función de las características de la inversión térmica o las condiciones climáticas presentes.
7. Extender las capacidades del modelo para incluir múltiples WM operando simultáneamente. Este enfoque permitiría simular configuraciones reales donde varias máquinas trabajan en conjunto, considerando las interacciones entre ellas y su impacto en la eficacia global.
8. Evaluar los efectos de la rugosidad del terreno sobre los resultados del modelo. La rugosidad puede influir significativamente en los flujos cercanos al suelo, afectando la eficacia del AD. Incorporar esta variable al modelo podría mejorar su capacidad de reproducir condiciones reales.
9. Estudiar el impacto de las configuraciones de potencia en las WM, eva-

luando cómo diferentes niveles de potencia influyen en la distribución del flujo y la eficacia en la mitigación. Este análisis podría incluir escenarios donde las máquinas operen a diferentes niveles de intensidad para optimizar el uso energético.

10. Diseñar un experimento numérico que combine las mejoras propuestas y evaluar su efecto acumulativo. Esto permitiría identificar qué combinaciones de parámetros producen el mayor impacto positivo en la mitigación de heladas.

Referencias bibliográficas

- Bagdonas, A., Georg, J., y Gerber, J. (1978). *Techniques of frost prediction and methods of frost and cold protection*. World Meteorological Organization.
- Bravo, H. R., Quintana, A. J., y Reyes, M. M. (2020). *Heladas. Factores, tendencias y efectos en frutales y vides*. Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 417. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/6847>.
- Budynas, R. G., y Nisbett, J. K. (2014). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (10.^a ed.) [Includes index]. McGraw-Hill Education.
- Dai, Y., Boekee, J., Schilperoort, B., ten Veldhuis, M.-C., y van de Wiel, B. J. (2023). Wind machines for frost damage mitigation: A quantitative 3D investigation based on observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 338, 109522. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109522>
- Dai, Y., van Hooft, A., Patton, E. G., Boekee, J., van der Linden, S., ten Veldhuis, M.-C., y van de Wiel, B. J. (2024). Integrated large-eddy simulation for modeling plant-tissue warming induced by wind machines in an orchard canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 356, 110175. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110175>
- Davis, R. L. (1977). AN EVALUATION OF FROST PROTECTION PROVIDED BY A WIND MACHINE IN THE OKANAGAN VALLEY OF BRITISH COLUMBIA. *Canadian Journal of Plant Science*, 57(1), 71-74. <https://doi.org/10.4141/cjps77-011>
- Diaz, G. P. N., Saulo, A. C., y Otero, A. D. (2019). Comparative study on the wake description using actuator disc model with increasing level of complexity. *Journal of Physics: Conference Series*, 1256(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1256/1/012017>

- Draper, M., Guggeri, A., Mendina, M., Usera, G., y Campagnolo, F. (2018). A Large Eddy Simulation-Actuator Line Model framework to simulate a scaled wind energy facility and its application. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 182, 146-159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.09.010>
- Drzewiecki, S. (1920). *Théorie générale de l'hélice: hélices aériennes et hélices marines*. Gauthier-Villars et cie. <https://books.google.com.uy/books?id=rm7VAAAAMAAJ>
- Fernandez, G., Mendina, M., y Usera, G. (2020). Heterogeneous Computing (CPU-GPU) for Pollution Dispersion in an Urban Environment. *Computation*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/computation8010003>
- Fernández, G. (2018). Numerical Simulation of atmospheric pollutants dispersion in an urban environment. *Proceedings of the Tenth International Conference on Computational Fluid Dynamics*.
- Ferziger, J. H., y Peric, M. (2002). *Computational Methods for fluid Dynamics*. Springer.
- Frith, H. (1951). Frost protection in orchards using air from the temperature inversion layer. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2, 24-42. <https://doi.org/10.1071/AR9510024>
- Glauert, H. (1926). *The Elements of Aerofoil and Airscrew Theory*. Cambridge University Press.
- Glauert, H. (1935). Airplane Propellers. En W. F. Durand (Ed.), *Aerodynamic Theory, Vol. IV, Division L*. Springer.
- Goodall, G., Angus, D., Leonard, A., y Brooks, F. (1957). Effectiveness of wind machines: Frost protection by ramjet or conventional wind machines in deciduous orchards depends on the strength of the inversion. *California Agriculture*, 11(8), 7-9.
- Guarga, R. (2010). *LA TECNOLOGÍA SIS: BASES CIENTÍFICAS DE Dicha INNOVACIÓN Y SU DESARROLLO ACTUAL EN EL MUNDO*. Congreso Mundial y Exposición Ingeniería.
- Hansen, M. (2011b). Aeroelastic Properties of Backward Swept Blades. En *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. <https://doi.org/10.2514/6.2011-260>
- Heusinkveld, V. W. J. (2019). *Towards a physics-based understanding of fruit frost protection using wind machines* [MSc. dissertation]. Delft University Of Technology.

- Igounet, P., Alfaro, P., Usera, G., y Ezzatti, P. (2012). Towards a finite volume model on a many-core platform [PMID: 50987]. *International Journal of High Performance Systems Architecture*, 4(2), 78-88. <https://doi.org/10.1504/IJHPSA.2012.050987>
- Lamichhane, J. R. (2021). Rising risks of late-spring frosts in a changing climate. *Nature Climate Change*, 11, 554-555. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01090-x>
- Leishman, J. G. (1988a). Two-dimensional model for airfoil unsteady drag below stall. *Journal of Aircraft*, 25(7), 665-666. <https://doi.org/10.2514/3.45639>
- Leishman, J. G. (1988b). Two-dimensional model for airfoil unsteady drag below stall. *Journal of Aircraft*, 25(7), 665-666. <https://doi.org/10.2514/3.45639>
- Liao, C.-C., Chang, Y.-W., Lin, C.-A., y McDonough, J. (2010). Simulating flows with moving rigid boundary using immersed-boundary method. *Computers Fluids - COMPUT FLUIDS*, 39, 152-167. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2009.07.011>
- McKee, J. W., y Naeseth, R. L. (1958, abril). *Experimental Investigation of the Drag of Flat Plates and Cylinders in the Slipstream of a Hovering Rotor* (Technical Note N.º TN 4239) (Accessed April 5, 2025). National Advisory Committee for Aeronautics (NACA). <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930085197/downloads/19930085197.pdf>
- Mendina, M., Draper, M., Kelm Soares, A., et al. (2014). A general purpose parallel block structured open source incompressible flow solver. *Cluster Computing*, 17, 231-241. <https://doi.org/10.1007/s10586-013-0323-2>
- Perry, K. B. (1998). Basics of Frost and Freeze Protection for Horticultural Crops. *HortTechnology horttech*, 8(1), 10-15. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.8.1.10>
- Perry, K. B., y Bradley, L. (1994). Frost/Freeze Protection for Horticultural Crops [Reviewed HIL-705].
- Peskin, C. S. (1972). Flow patterns around heart valves: A numerical method. *Journal of Computational Physics*, 10(2), 252-271. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9991\(72\)90065-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9991(72)90065-4)
- Roque, T. F., Arredondo, J. A. C., Lezama, J. S., Carmona, A. M., Rangel, V. M. S., y Sánchez, A. M. (2024). Análisis del flujo libre generado por un ventilador axial de dos palas [Recibido: 09-06-2023; Aceptado:

- 02-02-2024]. *Científica*, 28(1), 01-10. <https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v28n1a03>
- Snyder, R. L., y Melo-Abreu, J. P. (2010). *Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía*. FAO.
- Spera, D. A. (1994). Wind Turbine Technology. <https://www.osti.gov/biblio/6960578>
- Steinman, D. A., Hoi, Y., Fahy, P., Morris, L., Walsh, M. T., Aristokleous, N., Anayiotos, A. S., Papaharilaou, Y., Arzani, A., Shadden, S. C., Berg, P., Janiga, G., Bols, J., Segers, P., Bressloff, N. W., Cibis, M., Gijssen, F. H., Cito, S., Pallarés, J., ... Loth, F. (2013). Variability of Computational Fluid Dynamics Solutions for Pressure and Flow in a Giant Aneurysm: The ASME 2012 Summer Bioengineering Conference CFD Challenge. *Journal of Biomechanical Engineering*, 135(2), 021016. <https://doi.org/10.1115/1.4023382>
- Stone, H. L. (1968). Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 5(3), 530-558. <https://doi.org/10.1137/0705044>
- Storey, R. C., Norris, S. E., Stol, K. A., y Cater, J. E. (2013). Large eddy simulation of dynamically controlled wind turbines in an offshore environment. *Wind Energy*, 16(6), 845-864. <https://doi.org/10.1002/we.1525>
- Tecnipak. (2023). *Control de heladas: Catálogo 2023* [Recuperado de <https://agricola.tecnipak.com/content/uploads/tecnipak-controldeheladas-catalogo-2023-1.pdf>]. <https://agricola.tecnipak.com/content/uploads/tecnipak-controldeheladas-catalogo-2023-1.pdf>
- Usera, G., Vernet, A., y Ferre, J. (2008). A Parallel Block-Structured Finite Volume Method for Flows in Complex Geometry with Sliding Interfaces. *Flow, Turbulence and Combustion*, 81, 471-495. <https://doi.org/10.1007/s10494-008-9153-3>
- Wallis, R. A. (1983). *Axial Flow Fans and Ducts*. John Wiley & Sons.

ANEXOS

Anexo 1

Resumen de rutinas implementadas en Fortran 90

A continuación, se presentan los aspectos más importantes de las subrutinas implementadas en Fortran 90. Estas subrutinas forman la base del modelo de WM desarrollado y tienen roles específicos en el cálculo y representación de los efectos de las mismas.

En primer lugar, se describe la subrutina `ComputeWindMachineTotalFlow`, cuya función es calcular el área, volumen y flujo total a través del AD.

Posteriormente, se detalla la subrutina `ComputeWindMachineForces`, encargada de determinar la contribución de cada celda del AD al término fuente. Este término es esencial para modelar las fuerzas aerodinámicas en la simulación. Ambas subrutinas fueron implementadas dentro del módulo `WindMachineModelManager.H.24.0101.F90`, lo que asegura su integración eficiente con el resto del código.

Cabe destacar que, tanto para *caffa3d* como para *chaman*, la lógica de las rutinas es idéntica. Sin embargo, en el segundo caso se desarrollaron scripts complementarios para aprovechar las funcionalidades de CUDA y optimizar los cálculos en GPU.

1.1. Subrutina *ComputeWindMachineTotalFlow*

1

```
SUBROUTINE ComputeWindMachineTotalFlow(kMgLevel,  
U)
```

```

2      !
3      ! Description:
4      !   Computes area, volume, and flow in the Wind
      Machine model.
5      !
6
7      ! Modules and declarations
8      USE Caffa3dDimensionParameters          !
      Parameters for array dimensions
9      USE WindMachineDataManager            ! Wind
      Machine data
10     IMPLICIT NONE
11
12     ! Arguments
13     INTEGER(KIND=IntKind), INTENT(IN) :: kMgLevel
      ! Current Multi-Grid level
14     REAL(KIND=IrlKind) :: U(:, :)
      ! Velocity field
15
16     ! Local variables
17     INTEGER(KIND=IntKind) :: Iregion, Iblock, i, j, k
      , ijp
18     REAL(KIND=IrlKind) :: WmDspn, WmDSpr, cont
19
20     ! Initialize Wind Machine data
21     CALL InitializeWindMachineData()
22     Iregion = MpiMyRank + 1                ! Select
      region based on MPI rank
23
24     ! Loop through blocks in the current region
25     DO Iblock = iBlksMGRG(kMgLevel) + 1, iBlksMGRG(
      kMgLevel) + NblksMG
26     CALL SetInnerLoopIndexes(Iregion, Iblock, iST,
      kST, Nim, Njm, Nkm, Nj, Nij)
27
28     DO k = 2, Nkm
29     DO i = 2, Nim
30     DO j = 2, Njm

```

```

31     ijp = Lk(k + kST) + Li(i + iST) + j ! Cell index
32
33     #ifdef Include_Wind_Machine
34     !
35     WmDSpnRaw = DOT_PRODUCT((Xc(:,ijp)-WmXSp(1:3)),
36         WmXnGeom(1:3))
37     WmDSpn = ABS(WmDSpnRaw)
38
39     !WmDSpn = ABS(DOT_PRODUCT((Xc(:,ijp)-WmXSp(1:3)),
40         WmXnGeom(1:3)))
41     WmDSpr = SQRT(SUM((Xc(:,ijp)-WmXSp(1:3))**2)-(
42         WmDSpn**2))
43     !
44     IF ( (WmDSpr < (WmDMSpr*scale_factor)) .AND. (
45         WmDSpn < WmDMSpn)) THEN
46     !
47     WmUnMod = ABS(DOT_PRODUCT(U(:,ijp),WmXnFlow
48         (1:3)))
49     WmUn(1:3,ijp) = WmUnMod * WmXnFlow(1:3)
50     !
51     cont = cont + 1.0
52     !
53     WmTotalVol = WmTotalVol + Vol(1,ijp)
54
55     WmNormSum = WmNormSum + (EXP( - (WmDSpn**2) /
56         (2.0 * sigma**2) )) * Vol(1,ijp)
57     !
58     IF (WmDSpnRaw > 4.1*0.528) THEN
59     WmTotalArea = WmTotalArea + ABS(DOT_PRODUCT(
60         WmXnFlow(1:3),Xer(1:3,ijp))) + &
61     ABS(DOT_PRODUCT(WmXnFlow(1:3),Xnr(1:3,ijp))) + &
62     ABS(DOT_PRODUCT(WmXnFlow(1:3),Xtr(1:3,ijp)))
63
64     WmTotalFlow = WmTotalFlow + WmUnMod * (ABS(
65         DOT_PRODUCT(WmXnFlow(1:3),Xer(1:3,ijp))) + &
66     ABS(DOT_PRODUCT(WmXnFlow(1:3),Xnr(1:3,ijp))) + &
67     ABS(DOT_PRODUCT(WmXnFlow(1:3),Xtr(1:3,ijp))))
68     ENDIF

```

```

61     ENDIF
62     !
63     #endif
64     ENDIF
65     END DO
66     END DO
67     END DO
68     END DO
69
70     RETURN
71     END SUBROUTINE ComputeWindMachineTotalFlow

```

Listing 1.1: Subrutina *ComputeWindMachineTotalFlow* en formato resumido.

1.2. Subrutina *ComputeWindMachineForces*

```

1     SUBROUTINE ComputeWindMachineForces(...)
2     !
3     ! Description:
4     !   Computes problem-dependent volumetric sources
5     !   in the Wind Machine model.
6
7     ! Initialize Wind Machine data
8     CALL ComputeWindMachineTotalFlow(kMgLevel, U)
9     CALL InitializeWindMachineData()
10
11     ! -----
12     ! Correccion de area, caudal y potencia
13     ! -----
14     ! Inicializar (una sola vez al comienzo del
15     ! programa)
16     gammaWM = 0.8    ! Relajacion del 10%
17     Ct_corr_old = WmCt ! Asumimos que empezamos
18     ! desde la potencia nominal
19     Cq_corr_old = WmCq
20     Q_min = 2.0    ! Umbral minimo de caudal seguro
21
22     IF (WmTotalFlow > Q_min) THEN

```

```

20      ! 1. Calcular relacion area/caudal
21      r = WmTotalArea / WmTotalFlow
22
23      ! 2. Calcular alpha de correccion progresiva
24      alpha = 0.0
25
26      IF (r > ratioUL) THEN
27      alpha = (r - ratioUL) / (max_ratio - ratioUL)
28      ELSE IF (r < ratioLL) THEN
29      alpha = (ratioLL - r) / (ratioLL - min_ratio)
30      ENDIF
31
32      IF (alpha > 1.0) THEN
33      alpha = 1.0
34      ENDIF
35
36      ! 3. Aplicar correccion progresiva al area y
          caudal
37      WmTotalAreaAdj = (1.0 - alpha) * WmTotalArea +
          alpha * WmTotalAreaNom
38      WmTotalFlowAdj = (1.0 - alpha) * WmTotalFlow +
          alpha * WmTotalFlowNom
39
40      ! 4. Calcular factor de correccion de potencia
41      IF (r >= ratioLL .AND. r <= ratioUL) THEN
42      ! Dentro del rango permitido
43      f_corr = (WmTotalFlowNom / WmTotalFlowAdj)**2
44      ELSE
45      ! Fuera de rango
46      f_corr = (WmTotalFlowNom / WmTotalFlow)**2
47      ENDIF
48
49      ! 5. Nueva potencia corregida
50      Ct_corr_new = MIN(WmCt * f_corr, 1.2*WmCt)
51      Cq_corr_new = MIN(WmCq * f_corr, 1.2*WmCq)
52
53      IF (r >= ratioLL .AND. r <= ratioUL) THEN
54      ! 6. Aplicar suavizado

```

```

55 Ct_corr = (1.0 - gammaWM) * Ct_corr_old + gammaWM
      * Ct_corr_new
56 Cq_corr = (1.0 - gammaWM) * Cq_corr_old + gammaWM
      * Cq_corr_new
57 ELSE
58 Ct_corr = Ct_corr_new
59 Cq_corr = Cq_corr_new
60 ENDIF
61
62 ! 7. Actualizar P_corr_old para el siguiente paso
63 Ct_corr_old = Ct_corr
64 Cq_corr_old = Cq_corr
65 ELSE
66 ! Si el flujo es muy bajo, usar potencia nominal
      sin correccion
67 WmTotalAreaAdj = WmTotalAreaNom
68 WmTotalFlowAdj = WmTotalFlowNom
69 Ct_corr = WmCt
70 Ct_corr_old = Ct_corr
71 Cq_corr = WmCq
72 Cq_corr_old = Cq_corr
73 ENDIF
74
75 DO k = 2, Nkm
76 DO i = 2, Nim
77 DO j = 2, Njm
78 ijp = Lk(k + kST) + Li(i + iST) + j ! Cell index
79
80 #ifdef Include_Wind_Machine
81 !
82 WmDSpn = ABS(DOT_PRODUCT((Xc(:,ijp)-WmXSp(1:3)),
      WmXnGeom(1:3)))
83 WmDSpr = SQRT(SUM((Xc(:,ijp)-WmXSp(1:3))**2)-(
      WmDSpn**2))
84
85 ! Parametro de suavizado (gaussiano)
86 sigma = 2 * 0.528 !
87 !

```

```

88     IF ( (WmDSpr < (WmDMSpr*scale_factor)) .AND. (
89         WmDSpn < WmDMSpn)) THEN
90
91     WmXc(1:3)      = (Xc(:,ijp)-WmXSp(1:3))
92                                     !/SQRT(SUM
93                                     ((Xc(:,ijp) - WmXSp(1:3))*2))
94     WmXr(1:3)      = WmXc(1:3) - DOT_PRODUCT(WmXc(1:3),
95         WmXnFlow(1:3))*WmXnFlow(1:3)    ! Vector
96         radial para cada celda
97     WmXrMod        = SQRT(DOT_PRODUCT(WmXr(1:3),WmXr
98         (1:3)))                                ! Norma del vector
99         radial
100     WmXrUni(1:3) = WmXr(1:3) / WmXrMod
101                                     ! Vector
102         radial unitario
103     !
104     WmXt(1) = ((WmXrUni(2) * WmXnFlow(3)) - (WmXrUni
105         (3) * WmXnFlow(2)))
106     WmXt(2) = ((WmXrUni(3) * WmXnFlow(1)) - (WmXrUni
107         (1) * WmXnFlow(3)))
108     WmXt(3) = ((WmXrUni(1) * WmXnFlow(2)) - (WmXrUni
109         (2) * WmXnFlow(1)))                ! Vectorial
110         product
111
112     w_gauss = EXP( - (WmDSpn**2) / (2.0 * sigma**2) )
113
114     WmUnMod = ABS(DOT_PRODUCT(U(:,ijp),WmXnFlow(1:3))
115         )
116
117     Used = MAX(MIN(WmUnMod, UnMax), UnMin)
118
119     WmNormSum_corr = WmNormSum * volume_factor
120
121     empuje = 0.5 * 1.225 * WmTotalAreaNom * (Ct_corr
122         ) * (1/WmNormSum_corr) * (10.4)
123     momento = 0.5 * 1.225 * WmTotalAreaNom * (Cq_corr
124         ) * (1/WmNormSum_corr) * (10.4)
125

```

```

110      Su(:,ijp) = Su(:,ijp) + betaWM * w_gauss * (
111          empuje * (Used) * WmXnFlow(1:3) + &
112          momento * (Used) * WmXt(1:3))
113
114      ENDIF
115      !
116      #endif
117      END DO
118      END DO
119
120      RETURN
121      END SUBROUTINE ComputeWindMachineForces

```

Listing 1.2: Subrutina *ComputeWindMachineForces* en formato resumido.