

LOS MODELOS DE TURBULENCIA COMO HERRAMIENTA PEDAGÓGICA EN CARRERAS DE INGENIERÍA

TURBULENCE MODELS AS A TEACHING TOOL IN ENGINEERING COURSES

César I. Pairetti^a, María Clara Cortizo Carbone^a and Ricardo Pendín^a

^a *Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA - UNR), Berutti 2109, Rosario, Argentina, pairetti@fceia.unr.edu.ar, <https://web.fceia.unr.edu.ar/es/>*

Keywords: Modelos, Turbulencia, Fluido Dinámica Computacional

Abstract. El desarrollo y uso de modelos es una práctica central en las disciplinas científicas. En los trayectos formativos de ingenieros, sin embargo, es usual que no se discuta en profundidad sobre los alcances y limitaciones de los modelos aplicados. Este es un problema particularmente importante para el estudio de fenómenos complejos como, por ejemplo, la turbulencia. En este trabajo proponemos un enfoque pedagógico implementado en la asignatura de Mecánica de Fluidos de la carrera de Ingeniería Mecánica, en el que los estudiantes primero desarrollan simulaciones de flujo interno mediante Simulación Numérica Directa (DNS) sobre mallas estructuradas y posteriormente abordan un problema de aerodinámica de perfil alar empleando ecuaciones de Navier-Stokes Promediadas por Reynolds (RANS) con mallas no estructuradas. A lo largo de estas experiencias, se promueve la reflexión crítica acerca de las hipótesis físicas que sustentan el modelo, las aproximaciones matemáticas utilizadas para el cierre de las ecuaciones y las decisiones de mallado que afectan la resolución numérica. Los resultados muestran que los alumnos pasan de concebir a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) como una caja negra a considerarlo una herramienta formativa, adquiriendo a su vez una comprensión más profunda de la interrelación entre fenómeno, modelo y método de resolución para problemas cerrados.

Keywords: Models, Turbulence, Computational Fluid Dynamics

Abstract. The development and use of models is a central practice in scientific disciplines. However, in engineering training, the scope and limitations of the models applied are often not discussed in depth. This is a particularly important problem for the study of complex phenomena such as turbulence. In this work, we propose a pedagogical approach implemented in the Fluid Mechanics course of the Mechanical Engineering program. In this approach, students first develop internal flow simulations using Direct Numerical Simulation (DNS) on structured meshes and then address a wing profile aerodynamics problem using Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations with unstructured meshes. Throughout these experiences, critical reflection is encouraged on the physical hypotheses that support the model, the mathematical approximations used to close the equations, and the meshing decisions that affect the numerical solution. The results show that students move from viewing Computational Fluid Dynamics (CFD) as a black box to considering it as a learning tool, while acquiring a deeper understanding of the interrelationship between the phenomenon, the model, and the solution method for closed problems.

1 INTRODUCCIÓN

El concepto de *modelo* ocupa un lugar central en las disciplinas científicas y, en particular, en la ingeniería. Los modelos —matemáticos, computacionales o físicos— permiten abstraer y representar fenómenos complejos con el objetivo de analizar, predecir y diseñar soluciones a problemas concretos. Sin embargo, la comprensión profunda de que un sistema de ecuaciones no describe la realidad, sino que la representa de forma aproximada y sujeta a hipótesis y limitaciones, es un desafío persistente en la formación de ingenieros.

El proceso de desarrollar modelos es tanto una competencia profesional clave como un *hábito de pensamiento* que debe ser promovido explícitamente en contextos educativos de Ciencias, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas, usualmente mencionadas como disciplinas STEM por su acrónimo en inglés. Por ejemplo, [Hallström et al. \(2023\)](#) muestran que la modelización es indispensable para lograr una educación en ingeniería relevante para el mundo real y que actúa como puente interdisciplinario entre las ciencias y la tecnología. [Lammi and Denson \(2017\)](#) argumentan que enseñar a modelar implica fomentar en los estudiantes habilidades de razonamiento que les permitan abordar y comprender sistemas complejos.

Esta capacidad de detectar y asimilarla los comportamientos fundamentales de un sistema es clave para estudiar fenómenos con complejidad intrínseca, como la *turbulencia*. Tradicionalmente, los principios conceptuales necesarios para modelar la turbulencia suelen confundirse por la sofisticación matemática de las ecuaciones involucradas y por la diversidad de enfoques existentes para su representación. La historia del modelado de la turbulencia en Dinámica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD), como describen [Duraissamy et al. \(2019\)](#), es una herramienta interesante para comprender este desafío: desde los modelos clásicos de cierre propuestos en la segunda mitad del siglo XX, pasando por la emergencia de técnicas híbridas y multiescala, hasta los recientes desarrollos en modelado de turbulencia asistido por datos y aprendizaje automático, como mencionan [Schiestel and Chaouat \(2022\)](#).

En este contexto, el estudio de la turbulencia se convierte en una oportunidad para trabajar el concepto de modelización de manera transversal. Comparar distintas estrategias —desde la DNS, pasando por modelos RANS, hasta los experimentos de laboratorio— permite discutir los alcances y limitaciones de cada enfoque y comprender cómo las ecuaciones matemáticas simplifican la complejidad del fenómeno.

En este trabajo se describe una experiencia de la asignatura Mecánica de Fluidos, en el tercer año de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Rosario, diseñada en base a los principios del aprendizaje activo ([Alomá Bello et al., 2022](#)). En una primera etapa, los estudiantes realizan simulaciones de flujo interno mediante Simulación Numérica Directa en mallas estructuradas, lo que les permite observar aspectos caóticos de las ecuaciones de Navier–Stokes sin recurrir a modelos de turbulencia. Luego, abordan la aerodinámica externa de un perfil alar con modelos RANS en mallas no estructuradas y comparan esos resultados con datos experimentales, discutiendo de forma crítica qué aspectos de la realidad el modelo logra capturar y cuáles quedan fuera de su alcance.

A lo largo de este trayecto, se promueve la discusión crítica sobre:

- las hipótesis físicas que sustentan cada modelo,
- las aproximaciones matemáticas necesarias para el cierre de las ecuaciones,
- las decisiones numéricas —como la discretización y el mallado— que condicionan la solución obtenida.

El diseño de esta práctica está orientado a que los estudiantes dejen de percibir la simulación computacional como una “caja negra” y comiencen a considerarla una herramienta formativa, integrando la comprensión de la dinámica de los fenómenos, los modelos empleados y los métodos numéricos en la resolución de problemas de ingeniería.

2 MARCO TEÓRICO: MODELOS DE TURBULENCIA

2.1 Ecuaciones de Navier-Stokes

El punto de partida para la modelización de flujos de fluidos es el sistema de ecuaciones de Navier-Stokes, que describe la conservación de masa y momento lineal en un fluido. Para un fluido incompresible y newtoniano, las ecuaciones pueden escribirse como:

$$\text{Conservación de masa (continuidad):} \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\text{Conservación de momento lineal:} \quad \rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{f}, \quad (2)$$

donde \mathbf{u} es el campo de velocidades, p la presión, ρ la densidad, ν la viscosidad cinemática, y \mathbf{f} representa fuerzas externas por unidad de masa.

2.1.1 Turbulencia: un fenómeno caótico y no lineal

El término no lineal $(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}$ en las ecuaciones de Navier-Stokes es, matemáticamente, el impulsor de los regímenes de flujo turbulentos, siendo la *fente* del comportamiento caótico, que se manifiesta en las fluctuaciones rápidas e impredecible de las estructuras de flujo. Este efecto surge típicamente para valores elevados del número de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{\rho U D}{\mu}, \quad (3)$$

donde ρ y μ son la densidad y viscosidad del fluido, respectivamente. La velocidad U y la longitud D son magnitudes características del problema de flujo analizado.

Matemáticamente, la turbulencia es consecuencia directa de la no linealidad: pequeñas perturbaciones en las condiciones iniciales pueden amplificarse rápidamente, generando comportamientos caóticos. La bibliografía sobre el modelado de turbulencia es amplia y muy rica, con diversos enfoques en función del campo de aplicación y la relevancia que el fenómeno tiene sobre el sistema que se pretende modelar. Para una discusión más completa sobre fundamentos físicos y métodos numéricos, recomendamos consultar [Moin and Chan \(2024\)](#), que desarrollan los principios, las limitaciones y los avances recientes en modelado de turbulencia.

2.2 Modelado estadístico de la turbulencia: enfoque RANS

Dada la imposibilidad práctica de resolver todas las escalas de la turbulencia en la mayoría de los problemas de ingeniería, se recurre usualmente a aproximaciones que permitan modelar el efecto promedio de las fluctuaciones turbulentas sobre el flujo medio. Uno de los enfoques más empleados es el uso de ecuaciones *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*.

En este contexto, el campo de velocidades se descompone como suma de un valor medio y una fluctuación:

$$\mathbf{u}(t) = \bar{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{u}'(t) \quad \bar{\mathbf{u}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \mathbf{u}(\tau) d\tau \quad (4)$$

Al aplicar el operador de promedio temporal a las ecuaciones de Navier-Stokes, se obtiene un nuevo sistema para el campo medio $\bar{\mathbf{u}}$:

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{u}} = -\frac{1}{\rho} \nabla \bar{p} + \nu \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{f} - \nabla \cdot \overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'} \quad (5)$$

El último término, $-\nabla \cdot \overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}$, representa el efecto promedio de las fluctuaciones turbulentas sobre la variación del flujo medio $\bar{\mathbf{u}}$. Este término, que corresponde al valor medio del producto diádico de las perturbaciones en velocidad, usualmente se llama *tensor de Reynolds* y se modela con fórmulas conocidas que constituyen el *cierre de turbulencia* en las ecuaciones RANS. La forma de definir este término es emplear una serie de modelos adicionales, como $k-\varepsilon$ y $k-\omega$, que plantean ecuaciones de conservación para variables integradas a fin de estimar el tensor de Reynolds en función de características del flujo medio.

3 ACTIVIDADES DE TALLER EN LA ENSEÑANZA DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS

En el marco de la asignatura Mecánica de Fluidos de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Rosario, se implementó una modalidad de taller, con instancias de encuentro sincrónicas en el aula y asincrónicas a través de la plataforma virtual del curso, que integra el uso de software CFD como herramienta pedagógica central para la exploración y análisis de fenómenos complejos. Esta propuesta didáctica, elaborada por [Pairetti and Rodríguez \(2023\)](#), tiene como objetivo que los estudiantes, a través de la resolución de casos prácticos, adquieran tanto habilidades técnicas en simulación como una comprensión más profunda de los modelos subyacentes y sus limitaciones.

La estructura del taller comprende la resolución de casos prácticos que abarcan desde el análisis de flujo interno en geometrías simples hasta el modelado de problemas de aerodinámica externa. El taller incluye la resolución de cuatro problemas de flujo -una cavidad, una válvula de Tesla, un perfil NACA y una tobera-convergente divergente- para los cuales se plantea una primera clase tutorial presencial en la que se muestra la configuración del caso CFD y el análisis de resultados que los estudiantes deben reportar en el informe de trabajo práctico. Entre todas estas actividades, se destacan particularmente los estudios del flujo en una cavidad cuadrada y el análisis aerodinámico de un perfil NACA, que se describen en las secciones siguientes. El caso de la cavidad permite observar la creciente complejidad de un flujo dado al aumentar su número de Reynolds, mientras que el flujo turbulento alrededor de un perfil NACA es un típico caso de aplicación de los modelos RANS. En este último caso, es clave la comparación con una maqueta experimental que permite analizar el nivel de simplificación que el modelo de turbulencia implica sobre los resultados numéricos.

3.1 Flujo en una cavidad cuadrada

Esta actividad consiste en simular el flujo de un fluido incompresible y newtoniano dentro de una cavidad cuadrada bidimensional, impulsado por el movimiento de la pared superior. Se trata de un caso clásico de la literatura de CFD que, pese a su simplicidad geométrica, exhibe una dinámica compleja y es utilizado habitualmente para validar códigos numéricos y explorar el surgimiento de patrones de flujo transitorio y turbulento según el número de Reynolds.

Los objetivos de esta experiencia incluyen para los estudiantes son:

- comprender el efecto del paso de malla y del paso temporal sobre la precisión y estabilidad de la simulación,

- analizar la transición desde un régimen laminar a uno caótico al aumentar el número de Reynolds,
- desarrollar habilidades en la validación y comparación de resultados numéricos con datos de referencia.

La actividad se estructura en etapas: los estudiantes configuran y ejecutan la simulación con parámetros base, exploran cómo la dinámica evoluciona con diferentes resoluciones de malla y valores de Reynolds, y reportan imágenes de campos de velocidad, líneas de corriente y la evolución temporal del flujo. Se promueve especialmente la reflexión sobre el significado físico de los resultados y la relación entre las decisiones numéricas y los fenómenos observados.

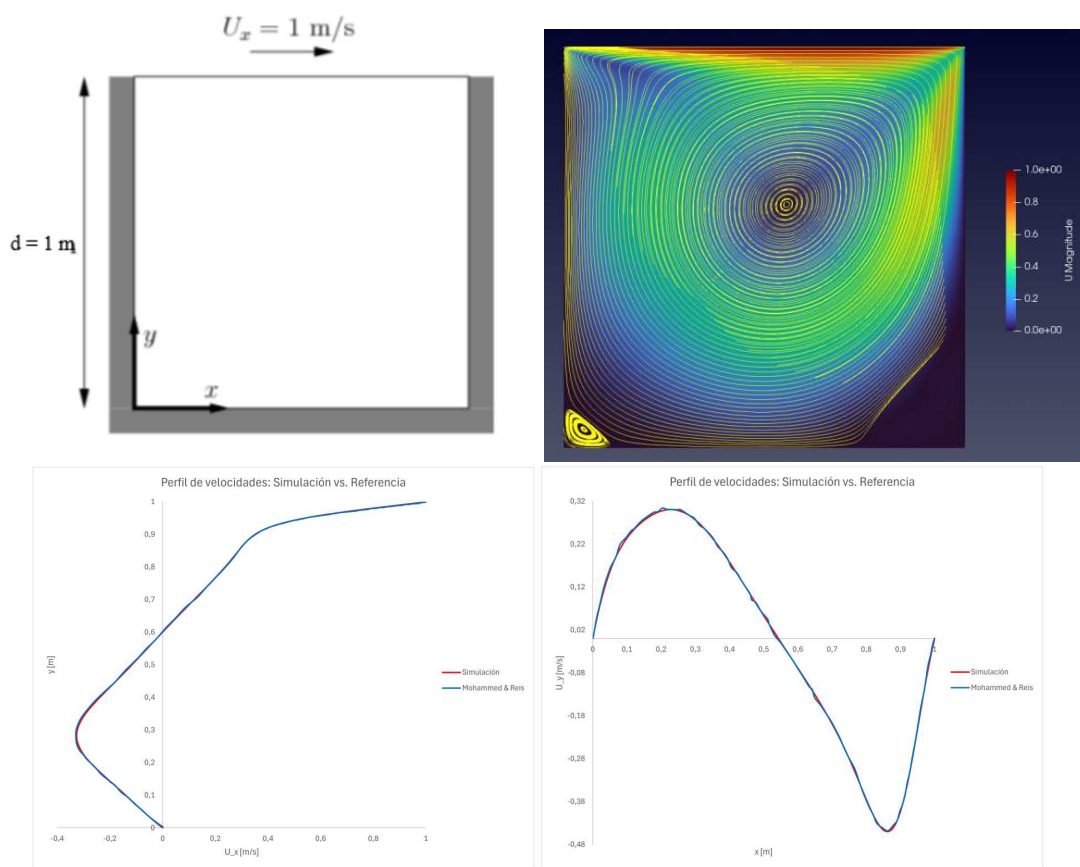


Figure 1: Ejemplos de figuras reportadas por los estudiantes en los informes correspondientes al TP 1 (cavidad cuadrada). Definición del dominio a simular, *cavity*, líneas de corriente para el caso $Re = 400$ y perfiles de velocidad en cortes horizontal y vertical.

Cabe notar que, como se ilustra en la Fig. 1, los estudiantes no sólo deben adquirir conocimientos relacionados a la mecánica de fluidos y al CFD, sino que también están en una etapa formativa donde deben adquirir habilidades de comunicación oral y escrita. El hecho de que las gráficas se presenten con tipografía legible, por ejemplo, es una cuestión que también debe trabajarse a lo largo del curso. Es decir, las actividades relacionadas a CFD constituyen también una instancia de formación en habilidades profesionales que van más allá del uso de una herramienta técnica. En este contexto, lograr la construcción de modelos mentales sólidos respecto a fundamentos de dinámica de fluidos y aplicación de métodos numéricos se torna más desafiante, por las restricciones de tiempo propias del cronograma universitario.

3.2 Análisis aerodinámico de un perfil NACA

En esta práctica, los estudiantes abordan la simulación del flujo alrededor de un perfil aerodinámico normalizado (NACA 0012) en distintas condiciones de ángulo de ataque. Este caso permite introducir la modelización de turbulencia mediante modelos RANS y profundizar en conceptos fundamentales de aerodinámica, tales como las fuerzas de arrastre (*drag*, F_D) y sustentación (*lift*, F_L), el desprendimiento de la capa límite y su influencia sobre la distribución de presiones y fuerzas.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U^2 A_x C_D \quad F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 A_y C_L, \quad (6)$$

donde las componentes de fuerza se definen en función de las características de flujo, coeficientes adimensionales para el *drag* (C_D) y el *lift* (C_L), y proyecciones de las áreas del sólido en sentido paralelo al flujo (A_x) y vertical (A_y) respectivamente.

Las tareas principales de la experiencia son:

- utilizar modelos de turbulencia apropiados (típicamente $k-\varepsilon$) para simular flujos a altos números de Reynolds,
- analizar la dependencia de los coeficientes C_D y C_L , definidos en la Ec. 6, respecto del ángulo de ataque, y comparar los resultados numéricos con datos experimentales de referencia (por ejemplo, NASA),
- explorar, a través del post-procesamiento, la distribución de presión y las líneas de corriente para identificar el punto de separación de la capa límite y comprender su impacto físico.

Esta actividad integra el uso de mallas no estructuradas y promueve el análisis crítico sobre los alcances y limitaciones de los modelos RANS, especialmente en la predicción de fenómenos como la pérdida de sustentación (*stall*).

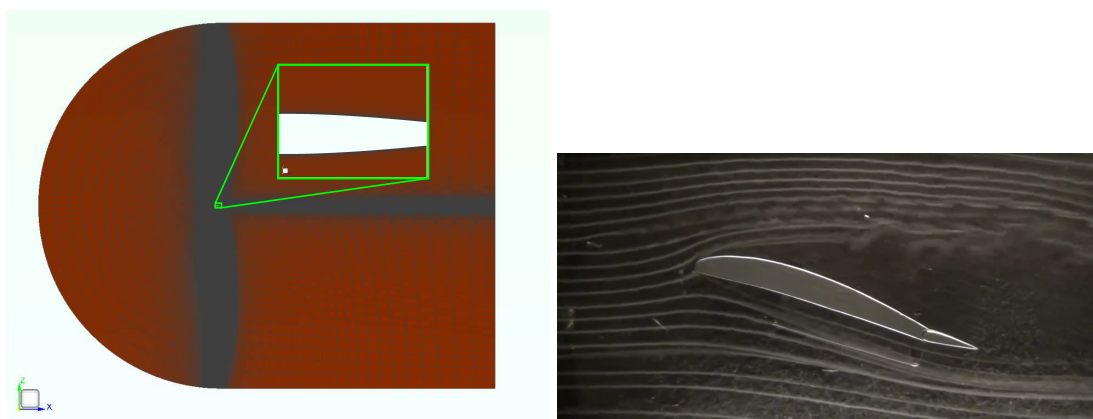


Figure 2: Vista lateral de la malla (izquierda) y el experimento (derecha)

En la Fig. 2 se contrastan la malla generada para el TP 2 de CFD (perfil NACA) y una fotografía de la experiencia de laboratorio comparada con la simulación. El contraste de ambas experiencias refuerza la importancia de comprender el vínculo entre el fenómeno físico, el modelo matemático y las estrategias numéricas empleadas. Este diseño curricular apunta a modificar la percepción de los estudiantes respecto a la simulación CFD. Las actividades se

orientan para que los estudiantes apliquen CFD con visión crítica, como debe hacerse para cualquier herramienta de ingeniería, en lugar de utilizarla como un protocolo de cálculo tipo “caja negra”.

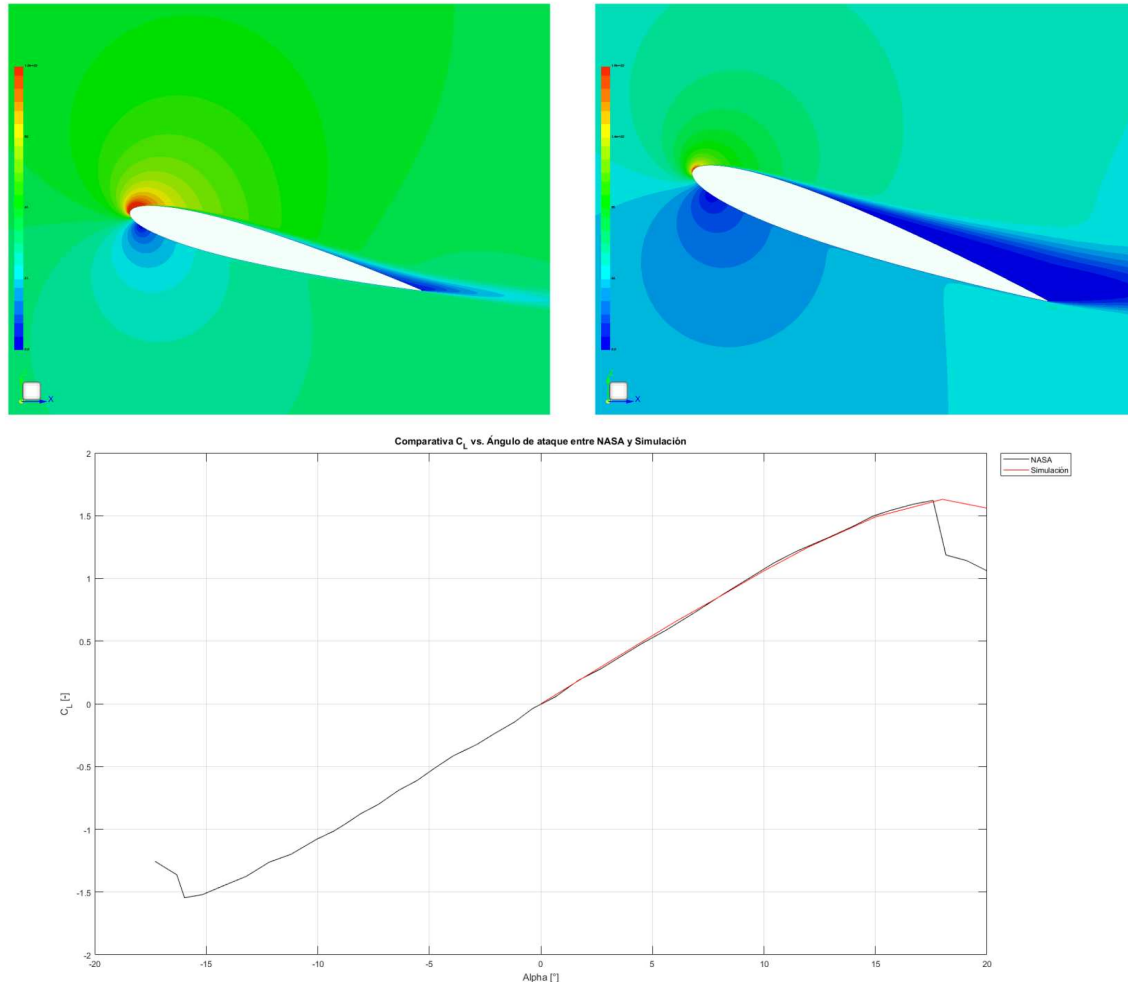


Figure 3: Visualización de resultados extraída del informe de un estudiante. Arriba: Campos de velocidades para ángulos $\alpha = 15^\circ$ (izquierda) y $\alpha = 20^\circ$ (derecha). Abajo: validación de las simulaciones mediante los coeficientes de *drag* y *lift*.

Puede observarse en la Fig. 3 que los alumnos incorporan esta noción de analizar sensibilidad de variables a partir del contraste de resultados: comparan los campos de velocidades para diferentes ángulos de ataque a fin de comprender la dinámica del C_D y el C_L . También es interesante notar que, a pesar de las devoluciones docentes al respecto, persisten ciertos errores de comunicación (gráficos con textos ilegibles) en el segundo informe. Esto puede deberse no sólo al escaso tiempo para trabajar estas cuestiones en clase, si no también al acotado tiempo de trabajo que los estudiantes tienen para confeccionar los informes. Este hecho invita nuevamente a la reflexión respecto a cómo proponer calendarios académicos más razonables.

3.3 Importancia de los modelos de turbulencia en las actividades de taller

La simulación numérica del flujo alrededor de un perfil NACA empleando modelos de turbulencia constituye un ejercicio central en la propuesta de los autores para la enseñanza de la

Mecánica de Fluidos aplicada. En este contexto, los modelos de turbulencia resultan indispensables para representar el efecto estadístico de las fluctuaciones no resueltas en flujos a altos números de Reynolds, como los que se presentan en aplicaciones aerodinámicas reales. La aplicación de estos modelos permite obtener predicciones razonablemente precisas de fuerzas globales y distribución de presiones, facilitando el diseño y análisis de dispositivos, aun cuando no se resuelvan explícitamente todas las escalas del fenómeno. El rol de los modelos de turbulencia se ilustra contrastando las simulaciones del perfil NACA y la cavidad cuadrada, resuelta mediante DNS.

Por un lado, en el caso de la cavidad, los estudiantes pueden observar la evolución temporal de la solución y el surgimiento espontáneo de estructuras de vorticidad de diferentes escalas conforme el número de Reynolds aumenta. Esta dinámica evidencia el carácter *multiescala* de la turbulencia: los movimientos de gran escala se fragmentan progresivamente en estructuras más pequeñas a medida que los efectos inerciales (términos no lineales) predominan sobre la disipación viscosa. El número de Reynolds (Re) cuantifica precisamente esta competencia; para valores elevados, la transferencia de energía hacia escalas menores se intensifica y la dinámica del sistema se torna caótica e impredecible en detalle, aunque estadísticamente caracterizable.

Por el contrario, al abordar el flujo sobre el perfil NACA mediante modelos RANS, los estudiantes deben reconocer que la información temporal y la evolución de las pequeñas estructuras turbulentas quedan subsumidas en las ecuaciones de cierre. Si bien esto limita la posibilidad de observar fenómenos transitorios o estructuras coherentes individuales, permite estimar con una precisión aceptable los valores medios de las variables relevantes, como el arrastre y la sustentación, mediante simulaciones considerablemente más económicas.

La comparación entre ambas actividades fomenta una reflexión crítica sobre los alcances y limitaciones de cada aproximación: la DNS es valiosa para el estudio detallado de la dinámica multiescala, pero sólo es factible en dominios simples y a bajos Re ; en cambio, los modelos RANS son imprescindibles para problemas de ingeniería realista, aunque implican una pérdida de información sobre la naturaleza misma de la turbulencia.

Un aspecto fundamental que emerge de este recorrido es el carácter *tridimensional* de la turbulencia. Si bien las simulaciones y experimentos docentes suelen iniciarse en dos dimensiones por cuestiones de simplicidad y recursos, la turbulencia plenamente desarrollada es inherentemente tridimensional. Este hecho se hace especialmente evidente comparando la simulación del perfil NACA con la experiencia de laboratorio realizada en el túnel de viento, donde el flujo alrededor del perfil exhibe fluctuaciones y separación de capa límite que sólo pueden ser comprendidas cabalmente reconociendo la presencia de estructuras vorticosas tridimensionales y la interacción entre escalas.

La integración de simulaciones numéricas (DNS y RANS) y prácticas experimentales permite, en conjunto, que los estudiantes adquieran una visión profunda y crítica sobre la turbulencia como fenómeno de evolución temporal multiescala y tridimensional, y comprendan el sentido, las fortalezas y los límites de los distintos modelos disponibles en la ingeniería moderna.

4 CONCLUSIONES

En este artículo describimos una serie de actividades donde se analizan las características de los flujos turbulentos con diversos niveles de profundidad. En primera instancia, se presentan las ecuaciones fundamentales de conservación de masa y momento para flujos incompresibles y newtonianos, destacando el impacto del término no lineal para el desarrollo del comportamiento turbulento. Luego se explora la relación entre las estructuras de flujo y el número de Reynolds

con el problema *cavity*, que también permite observar la importancia del paso de malla para capturar las estructuras de flujo, justificando la necesidad de aplicar modelos RANS para problemas turbulentos desarrollados. En esta instancia se introduce el análisis del flujo alrededor de un perfil aerodinámico empleando RANS $k-\epsilon$, comparando cualitativamente los resultados con observaciones de laboratorio.

Al transitar las actividades propuestas en torno al uso de CFD y al laboratorio de túnel de viento, los estudiantes resignifican las hipótesis de modelado, comprendiendo su impacto en los resultados de las simulaciones. Reconocen que, para cada caso de análisis, existe un modelo más adecuado que otro en función del objetivo planteado.

Las actividades fomentan el aprendizaje activo, sin perder de vista la formación en mecánica de fluidos, consolidando a la CFD como una herramienta complementaria para comprender la Dinámica de Fluidos. Esta articulación se evidencia al comparar las simulaciones del perfil NACA con la experiencia del perfil alar en el túnel de viento. En este último, los estudiantes observan la estela vorticiosa detrás del perfil, miden parámetros de interés y constatan la naturaleza turbulenta del flujo. En contraste, las simulaciones numéricas utilizando un modelo de turbulencia, permiten obtener el campo del flujo medio. Estas simulaciones no reproducen las estructuras turbulentas ni las fluctuaciones instantáneas de los campos, sino que describen el comportamiento medio del flujo.

Este contraste invita a reflexionar a los estudiantes sobre la validez y el rango de aplicación de los modelos, y resalta la necesidad de comprender la física del problema para seleccionar el modelo más adecuado. Asimismo, permite reconocer que detrás de los parámetros utilizados o predichos por el modelo subyacen fenómenos físicos reales. De esta manera, la CFD, y en particular los modelos de turbulencia, se consolidan como una herramienta pedagógica valiosa para que los estudiantes comprendan el alcance y las limitaciones de los modelos en ingeniería, y desarrollen un pensamiento crítico sobre su aplicación.

REFERENCES

- Alomá Bello M., Crespo Díaz L.M., González Hernández K., and Estévez Pérez N. Fundamentos cognitivos y pedagógicos del aprendizaje activo. *Mendive. Revista de Educación*, 20(4):1353–1368, 2022.
- Duraisamy K., Iaccarino G., and Xiao H. Turbulence modeling in the age of data. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 51(1):357–377, 2019. <http://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010518-040547>.
- Hallström J., Norström P., and Schönbörn K.J. Authentic stem education through modelling: an international delphi study. *International Journal of STEM Education*, 10(1):62, 2023. <http://doi.org/10.1186/s40594-023-00453-4>.
- Lammi M.D. and Denson C.D. Modeling as an engineering habit of mind and practice. *Advances in Engineering Education*, 6(1):n1, 2017.
- Moin P. and Chan W.H.R. *Fundamentals of Turbulent Flows*. Cambridge University Press, 2024.
- Pairetti C.I. and Rodríguez G.L. La mecánica computacional en los cursos de mecánica de fluidos: empleando cfd para actividades prácticas en modalidad taller. In *Actas del Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica (CAIM 2023)*. 2023.
- Schiestel R. and Chaouat B. Turbulence modeling and simulation advances in cfd during the past 50 years. *Comptes Rendus Mécanique*, 350(51):1–29, 2022. <http://doi.org/10.5802/crmeca.114>.