

DISEÑO DE UN TALLER CFD PARA LA ENSEÑANZA DE FUNDAMENTOS DEL MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS

A DESIGN OF A CFD WORKSHOP TO TEACH THE FINITE VOLUME METHOD FUNDAMENTALS.

César I. Pairetti^{a,b}, Nicolás Trivisonno^{a,c}, Dario Godino^{a,c} y César M. Venier^{a,c}

^a*Escuela de Ingeniería Mecánica, FCEIA - UNR. Beruti 2109, Rosario, Argentina*

^b*Instituto Jean LeRond D'Alembert, Sorbonne Université, 4 Place Jussieu, Paris, Francia*

^c*CIMEC Centro de Investigación de Métodos Computacionales, UNL, CONICET, FICH, Col. Ruta 168
s/n, Predio Conicet "Dr Alberto Cassano", 3000 Santa Fe, Argentina, <http://www.cimec.org.ar>*

Palabras Clave: Fluidodinámica Computacional (CFD), Diseño Curricular, Software Libre.

Resumen. Este artículo se centra en el diseño pedagógico de actividades para una asignatura electiva centrada en la Fluidodinámica Computacional (CFD), destinada a estudiantes de quinto año de Ingeniería Mecánica. El curso inicia con un módulo de repaso donde se refuerzan conceptos Mecánica del Continuo y fundamentos de métodos numéricos. Las clases subsiguientes se desarrollan en una modalidad tipo taller cuyo objetivo es comprender los fundamentos del Método de Volúmenes Finitos; trabajando sobre tres áreas disciplinares: aerodinámica, transferencia de calor y flujos multifásicos. La evaluación de cada temática consiste en la resolución de casos *benchmark* usando la plataforma OpenFOAM, cuyos resultados se presentan en un informe y exponen frente a sus pares. El presente trabajo concluye con la exposición sobre la experiencia de la primera cohorte, y plasma sugerencias en términos de cronograma y materiales pedagógicos para garantizar una carga de trabajo más equilibrada en las futuras iteraciones del curso.

Keywords: Computational Fluid Dynamics (CFD), Curriculum design, Free software.

Abstract. This article focuses on the pedagogical design of activities for an elective subject focused on Computational Fluid Dynamics (CFD), aimed at fifth-year students of Mechanical Engineering. The course begins with a review module to reinforce concepts related to Continuum Mechanics and fundamentals of numerical methods. Subsequent classes take a workshop-type dynamic to understand the fundamentals of the Finite Volume Method applied on three disciplinary areas: aerodynamics, heat transfer, and multi-phase flows. The evaluation of each topic includes the resolution of benchmark cases using the OpenFOAM platform. The results of those simulations are presented in a report and exposed in front of their peers. The present work concludes with an overall review on the highlights of the first experience, offering suggestions in terms of a schedule and pedagogical materials to guarantee a more balanced workload in future iterations of the course.

1. INTRODUCCIÓN

La Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) se ha consolidado como una herramienta esencial en la resolución de problemas complejos de ingeniería y la investigación industrial, bajo el paraguas de la Ingeniería Asistida por Computadora (CAE). Su aplicación en campos de la ingeniería como la aeronáutica, automoción, energía y biomedicina ha incrementado la demanda de profesionales capacitados en software CFD en la última década [Bhatti et al. \(2020\)](#), [Cengel y Cimbala \(2013\)](#). Además, su naturaleza multidisciplinaria requiere un profundo conocimiento en Mecánica de Fluidos, Cálculo, Métodos Numéricos e Informática, lo que representa un desafío en la formación.

A menudo, los cursos de CFD se limitan a instruir en el uso de un software específico [Guerrero y Bargiacchi \(2014\)](#), dejando de lado la comprensión profunda de sus fundamentos teóricos y criterios de aplicación. Sin este conocimiento, el uso efectivo del CFD en la práctica profesional se ve comprometido.

La bibliografía introductoria sobre métodos numéricos para CFD suele ser extensa y de alto nivel matemático [Versteeg y Malalasekera \(2007\)](#), [Moukalled et al. \(2016\)](#), [Hirsch \(2007\)](#), lo que puede abrumar a los estudiantes de grado. En respuesta, este trabajo propone un diseño curricular para un curso de CFD dirigido a estudiantes de último año de Ingeniería Mecánica, buscando una introducción equilibrada a los aspectos teóricos y prácticos del campo.

El artículo se estructura de la siguiente manera: La Sección 2 aborda los fundamentos del CFD, destacando su utilidad y desafíos. La Sección 3 detalla los aspectos pedagógicos del curso, presentando las actividades y objetivos de aprendizaje propuestos. Finalmente, la Sección 4 reflexiona sobre la implementación del curso en 2022, evaluando aspectos a mejorar y proponiendo cambios que potencien los aprendizajes que los estudiantes reportaron al finalizar la asignatura.

2. FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Tres disciplinas se consideran en el diseño del curso propuesto: la Mecánica de Fluidos, los Métodos Numéricos y la Informática. Algunos contenidos de las dos primeras áreas son obligatorios para las carreras de Ingeniería Mecánica en nuestro país, de acuerdo a las especificaciones del [CONFEDI \(2018\)](#). Sin embargo, uno de los principales objetivos del curso es que los estudiantes alcancen un conocimiento más detallado de ciertos métodos numéricos específicos, en particular el Método de Volúmenes Finitos (FVM), por lo que se enfatizan los contenidos relacionados a este módulo. Por otra parte, si bien la Informática es también una asignatura obligatoria del grado, algunos aspectos relacionados a costo computacional y estructura de software suelen ser demasiado específicas y, por lo tanto, no están presentes en otras asignaturas. En esta sección se presentan los principales conceptos mencionados en el curso para cada una de estas disciplinas.

2.1. Ecuaciones de la Mecánica de Fluidos

La Mecánica del Continuo describe el comportamiento de sistemas materiales a gran escala, y utiliza Ecuaciones en Derivadas Parciales (EDP) basadas en leyes de conservación. En particular, la Mecánica de Fluidos estudia los comportamientos de líquidos y gases a partir de la conservación de masa, momento y energía. Las ecuaciones de Navier-Stokes son especialmente relevantes, dado que describen flujos incompresibles y newtonianos.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = -\vec{\nabla} p + \mu \Delta \vec{u} + \rho \vec{g} \quad (2)$$

donde \vec{u} es el campo velocidad del flujo, ρ y μ son la densidad y viscosidad del fluido respectivamente. La presión p y la aceleración de la gravedad \vec{g} actúan como fuentes externas de momento lineal en el flujo.

Las Ec.(1) y Ec.(2) pueden analizarse como casos particulares de una Ecuación General de Transporte, que puede expresarse como se indica en la Eq.(3). Esta perspectiva permite generalizar el análisis de los modelos, describiendo la evolución temporal de un campo ϕ , que puede ser afectada por procesos de advección, difusión (con difusividad ν_ϕ) y reacción (agrupados en S_ϕ).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi) + \vec{\nabla} \cdot (\phi \vec{u}) - \vec{\nabla} \cdot (\nu_\phi \vec{\nabla} \phi) = S_\phi \quad (3)$$

Todos los términos de esta ecuación se encuentran en la Ec.(2), donde se plantea la conservación de cantidad de movimiento $\rho \vec{u}$, afectada por las fuerzas externas. Dado que usualmente también se considera la hipótesis de flujo isotérmico, las ecuaciones de Navier-Stokes suelen ignorar la conservación de la energía.

2.2. Métodos numéricos para la resolución de EDP

Las EDP raramente pueden resolverse de manera analítica. Por lo tanto, es necesario aplicar métodos de resolución numérica para obtener soluciones aproximadas. Los Métodos Numéricos permiten transformar las EDP, cuyas soluciones son campos, en sistemas de ecuaciones algebraicas, cuyas soluciones son valores aproximados de cada variable en diferentes puntos del dominio, gracias a la aproximación local de derivadas.

Dentro del abanico de métodos numéricos existentes, los Métodos Variacionales son una familia muy empleada para la resolución de las EDP. En particular, los Métodos de Diferencias Finitas (FDM), Elementos Finitos (FEM) y Volúmenes Finitos (FVM) son enfoques comunes que comparten una filosofía similar: estiman valores medios o puntuales en celdas o nodos mediante la aproximación local de derivadas. El FVM es ampliamente utilizado en Mecánica de Fluidos por su formulación inherentemente conservativa. Es decir, los balances integrales de las variables no se ven afectados por errores de aproximación. En el FVM, se aplican estimaciones específicas para cada derivada, utilizando diferentes esquemas de interpolación e integración, para formular una ecuación algebraica que determina el cambio en el tiempo de una variable en función de su valor actual y los valores en celdas vecinas. Así, la Ec.(3) puede emplearse como base para calcular el cambio de la variable en una celda P:

$$\frac{V_P}{\Delta t} (\phi_P^{n+1} - \phi_P^n) + \sum_f \left[\vec{u}_f \phi_f^{n+*} - \nu_\phi \vec{\nabla} \phi_f^{n+*} \right] = S_{(t, \vec{x}, \phi_P^n, \phi_P^{n+*})} \quad (4)$$

donde n corresponde al tiempo presente, donde los valores de ϕ son conocidos y $n + 1$ es el tiempo siguiente a calcular y $n + *$ representa una aproximación intermedia. La celda P , de volumen V_P se encuentra limitada por sus caras f donde los flujos advectivos y difusivos producen el transporte de la cantidad ϕ con las celdas vecinas N . Para cada instantes de tiempo, en función de la posición \vec{x} y los valores que adoptan las variables, pueden calcularse los términos fuentes y sumideros S . Aplicando fórmulas específicas para aproximar cada término, estas

expresiones pueden expresarse finalmente como ecuaciones lineales:

$$a_P \phi_P^n + 1 + \sum_N a_N \phi_N^{n+1} = b_P(t, \vec{x}, \phi_P^n) \quad (5)$$

Al ensamblar todas las ecuaciones para cada celda en el dominio, se obtiene un sistema lineal de ecuaciones que puede expresarse de forma matricial:

$$[A] \vec{\phi} = \vec{b} \quad (6)$$

La solución de este sistema proporciona una estimación del valor de cada campo en cada una de las celdas para el tiempo objetivo, representada en el vector ϕ . Luego, en función de la complejidad física del problema, puede ser necesario aplicar diversos algoritmos que acoplen la evolución de variables físicas, como la velocidad y la presión, [Versteeg y Malalasekera \(2007\)](#), [Moukalled et al. \(2016\)](#) y [Greenshields y Weller \(2022\)](#).

Comprender estos fundamentos teóricos permite entender el cálculo ejecutado durante una simulación e interpretar los resultados obtenidos. A su vez, conocer los detalles de estos métodos es necesario para analizar las potenciales fuentes de error numérico en una simulación CFD.

2.3. Herramientas computacionales para la aplicación de CFD

Las plataformas de simulación CFD tienen características informáticas parecidas a otras herramientas CAE. Estos programas ejecutan el proceso de resolver las EDP usando métodos numéricos. Hay diversas opciones, desde crear tu propio código hasta usar software, ya sea libre, comercial o basado en la nube. Generalmente, un Ingeniero usa estas herramientas sin adentrarse en la programación. A continuación, destacaremos lo que debe tener un *software* para la industria y las ventajas y desventajas que influyeron en nuestra elección para el curso.

2.3.1. Prototipado de código en lenguaje interpretado

Para pruebas pequeñas y resolución de casos académicos, es usual emplear lenguajes de programación interpretados - como Octave (octave.org) o Python (python.org) para implementar los sistemas de ecuaciones, Ec.(5). Es una práctica común de la bibliografía actual de métodos numéricos proponer ejercicios de programación donde se resuelva un problema de transporte unidimensional con esta metodología, para luego comparar con resultados de referencia y verificar que la formulación matemática del código es correcta, verificando el proceso de aprendizaje del estudiante.

Esta dinámica no requiere más que la instalación de una interfaz de programación para el lenguaje en cuestión. Sin embargo, la dificultad de crear el código propio hace que esta práctica esté reservada sólo a fines pedagógicos. El uso profesional de CFD se apoya en otro tipo de herramientas.

2.3.2. Software especializado para CAD, CFD y post-proceso

Existe una amplia oferta de software para realizar análisis de Mecánica Computacional en general y CFD en particular. Las plataformas ANSYS Fluent (ansys.com) o Star-CCM+ de Siemens PLM (plm.siemens.com) son algunas de las alternativas comerciales que integran todas las etapas necesarias para realizar una simulación: representar la geometría (mediante herramientas CAD), configurar el modelo y ejecutar los métodos numéricos (es decir, realizar la simulación

por CFD) y analizar los resultados, ya sea visualmente o calculando alguna valor derivado de los campos aproximados (post-procesar la información obtenida por la simulación).

Otra alternativa es emplear software libre, que es gratuito, transparente y flexible. En experiencias anteriores [Pairetti et al. \(2021\)](#); [Catalano et al. \(2020\)](#); [Carbone Cortizo et al. \(2020\)](#),, hemos observado que el uso de herramientas Free Open Source Software (FOSS) llevan al estudiante a tener una práctica más activa, con mayor atención en los fundamentos matemáticos y los detalles de modelado. Como desventaja, cabe destacar la falta de integración entre etapas. Para generar el CAD debe emplearse una herramienta específica, como FreeCAD [Falck et al. \(2012\)](#) (freecad.org) que crea una geometría en un formato específico relativamente universal, como *stereolithography* (STL). Ese dominio luego puede emplearse en una plataforma de cálculo, como OpenFOAM [Greenshields y Weller \(2022\)](#), [OpenFOAM \(2014\)](#), [Jasak et al. \(2007\)](#)(openfoam.org), para generar una malla y ejecutar el modelo numérico con el cual se obtiene el campo solución aproximado por valores discretos en el espacio. Esta información es la que luego se analiza en una plataforma de post-proceso, como Paraview (paraview.org) [Squillacote et al. \(2007\)](#). Si bien cada uno de estos software se ha vuelto más potente y fácil de utilizar con el tiempo, el hecho de tener que emplear diferentes entornos para cada etapa del análisis CFD dispersa la atención de los estudiantes. Es por esto que en experiencias más recientes [Cardona et al. \(2022\)](#), [Hazzi et al. \(2022\)](#), [Seguenzia et al. \(2022\)](#) y [Catalano et al. \(2022\)](#) hemos optado por emplear alguna interfaz de integración, como sim-flow (simflow.com) o como (simscale.com), que, si bien son software comercial con versiones gratis de prueba, articulan la interacción entre diversas herramientas FOSS, lo que permite una experiencia de usuario más amena sin perder las ventajas de emplear *software* libre.

En este contexto, la sección siguiente describe las estrategias pedagógicas consideradas para aplicar las herramientas computacionales ya descritas a la resolución de problemas académicos que permitan comprender cómo realizar CFD en un marco de aplicación industrial.

3. DISEÑO CURRICULAR DE LA ASIGNATURA ELECTIVA

En primera instancia, debemos dejar claro que el objetivo pedagógico principal del curso es que los estudiantes adquieran capacidades prácticas para resolver problemas de ingeniería mediante herramientas computacionales. El desarrollo de los criterios necesarios para convertirse en un buen usuario de *software* CFD requiere un conocimiento básico de los fundamentos de métodos numéricos y la comprensión de cómo estos conceptos afectan las diferentes etapas del proceso de simulación. Por lo tanto, el curso se enfoca en destacar los principios teóricos más relevantes y relacionarlos, en el contexto de actividades prácticas específicas, con buenos hábitos de uso del CFD.

En este sentido, el curso consta de dos etapas principales. La primera consiste en clases teóricas sobre fundamentos de mecánica de fluidos y métodos numéricos, y la segunda consiste en actividades prácticas que involucran programación en lenguaje interpretado (Octave) y el uso de la plataforma OpenFOAM. A lo largo del semestre, los estudiantes trabajaron en dos proyectos predefinidos donde realizan una validación de los modelos numéricos con datos de referencia, ya sean bibliográficos o experimentales. Las clases relacionadas a estas actividades se plantearon con una dinámica de taller [Ander-Egg y Ander-Egg \(2007\)](#), [Fraser et al. \(2007\)](#), trabajando de forma individual en un espacio compartido con el resto del curso, donde se favoreció el intercambio de opiniones y aportes mediado por el docente. La evaluación de estas actividades se realizó mediante la entrega de informes que incluyen los resultados CFD obtenidos y el correspondiente análisis de error. Para el proceso de corrección de estos documentos se dispuso de un protocolo de revisión por pares, muy similar a cualquier proceso de evaluación para un

congreso o una revista científica. Esta metodología de evaluación también favoreció el diálogo con los estudiantes, siendo uno de los aspectos que más valoraron los alumnos y alumnas al finalizar el curso.

Además de las actividades de taller con consignas cerradas, se planteó durante el semestre la ejecución de un proyecto, a realizar en grupos de 2 o 3 estudiantes, motivado por algún tema de interés personal. Como última instancia de evaluación, se realizó una jornada de exposiciones donde estos grupos presentaron los resultados de cada proyecto semestral.

A fin de ilustrar la complejidad de los problemas abordados durante el curso, se presentan brevemente las consignas planteadas para el espacio de taller. Cabe aclarar que en los tres casos mencionados, la descripción de la actividad en cuestión se presenta en un documento de varias páginas, con un marco teórico detallado y referencias relevantes que no pueden transcribirse aquí por cuestiones de espacio. Cada actividad de taller se nombra por su eje temático.

3.1. Aerodinámica

El primer problema abordado corresponde al flujo incompresible alrededor de cuerpos sólidos, que puede describirse mediante las ecuaciones de Navier-Stokes, Ec.(1) y Ec.(2), para obtener los campos de presión (p) y velocidad (\vec{u}). A partir de estos valores, se calcula la fuerza aerodinámica sobre el cuerpo:

$$\vec{F} = \int_S [p - (\mu \partial_n u_n)] d\vec{A}_n \quad (7)$$

Cuyas componentes suelen llamarse arrastre (*drag*) y sustentación (*lift*), en los sentido de la velocidad de flujo y perpendicular vertical, respectivamente. Así, conocidos los campos de presión y velocidad sobre la superficie del sólido (S), como se muestra en la Fig.(1).

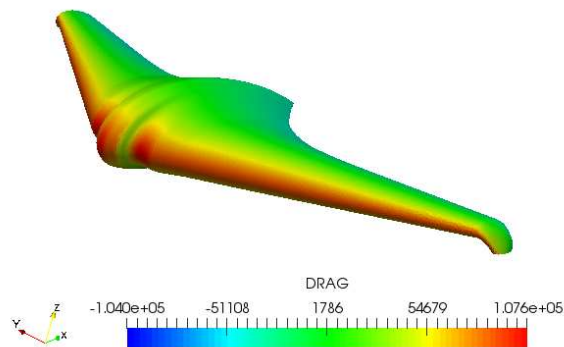


Figura 1: Campo de drag diferencial $[p - (\mu \partial_n u_n)] d\vec{A}_n$ sobre la superficie de la aeronave

Habiendo analizado este primer caso de post-proceso, se plantea la consigna de analizar el flujo alrededor de un cilindro, siendo este un problema académico ampliamente estudiado, Cengel y Cimbala (2013), Seguenzia et al. (2022). El desarrollo de calles de von Kármán para un número de Reynolds moderado ($Re = 667$) se ilustra en la Fig.(2) donde se observa también la evolución temporal de los coeficientes aerodinámicos $\left(C_D = \frac{F_D}{0,5\rho A_f U^2}\right)$ La actividad consiste en analizar el flujo que se desarrolla para diferentes valores de Re , empleando modelos de turbulencia RANS Versteeg y Malalasekera (2007), Moukalled et al. (2016), Greenshields y Weller (2022) y Hirsch (2007) para los casos turbulentos, realizando validaciones a partir de datos experimentales y análisis de convergencia en malla.

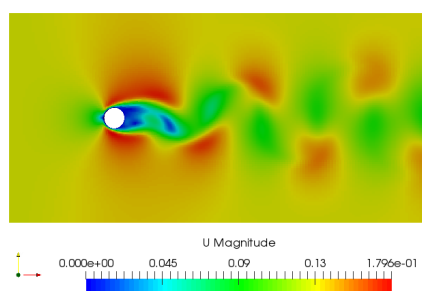


Figura 2: Campo de velocidad alrededor del cilindro, calles de Von-Karman

3.2. Transferencia de calor

A partir del análisis del flujo alrededor del cilindro, se plantea un problema de convección forzada. Para esto, además de las ecuaciones de Navier-Stokes es necesario tener en cuenta la conservación de la energía, que puede expresarse como transporte de temperatura T :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_V T) + \vec{\nabla} \cdot (\rho c_V T \vec{v}) = -\vec{\nabla} \cdot \vec{q} + \rho r_h \tag{8}$$

donde c_p es el calor específico del fluido, k su conductividad, r_h representa los términos fuente de calor (radiación, disipación viscosa). Este tipo de problemas ha sido ampliamente estudiado, contando con resultados experimentales y fórmulas de ajuste para diversos parámetros, como por ejemplo el número de Nusselt, ilustrado en la Fig.(3). La Fig.(4) muestra resultados de diferentes simulaciones que luego se comparan con estas correlaciones o datos experimentales Žukauskas (1972).

$$Nu_{cil} = \frac{hD}{k} = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282\,000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \tag{7-35}$$

TABLA 7-1

Correlaciones empíricas para el número de Nusselt promedio, para convección forzada sobre cilindros circulares y no circulares en flujo cruzado (tomada de Zukauskas, 1972, y Jakob, 1949)

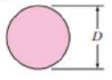
| Sección transversal del cilindro | Fluido | Rango de Re | Número de Nusselt |
|---|---------------|----------------|----------------------------------|
|  | Gas o líquido | 0.4-4 | $Nu = 0.989 Re^{0.330} Pr^{1/3}$ |
| | | 4-40 | $Nu = 0.911 Re^{0.385} Pr^{1/3}$ |
| | | 40-4 000 | $Nu = 0.683 Re^{0.466} Pr^{1/3}$ |
| | | 4 000-40 000 | $Nu = 0.193 Re^{0.618} Pr^{1/3}$ |
| | | 40 000-400 000 | $Nu = 0.027 Re^{0.803} Pr^{1/3}$ |

Figura 3: Correlaciones del número de Nusselt para el flujo alrededor de un cilindro, Cengel y Cimbala (2013)

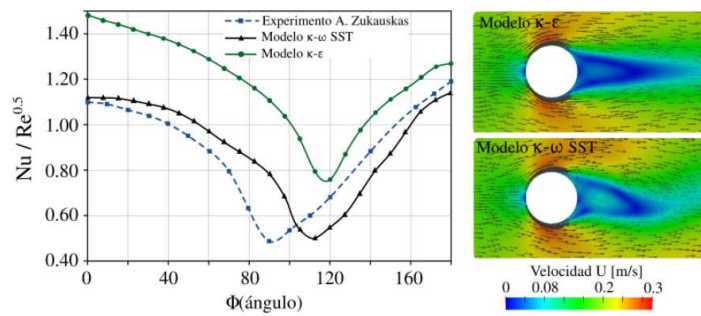


Figura 4: Representación $Nu(\theta)$ y campos de velocidades para diferentes modelos de turbulencia.

3.3. Flujos multifásicos

La última actividad se basó en un dispositivo experimental de construcción propia, [Godino et al. \(2020\)](#), [Piña et al. \(2022\)](#) que se simuló empleando un modelo tipo *Volume of Fluid* (VoF) [Damián y Nigro \(2014\)](#) para representar la interfase líquido-gas durante el vaciado por burbujeo de una columna de agua. Como se ilustra en la Fig.(5).

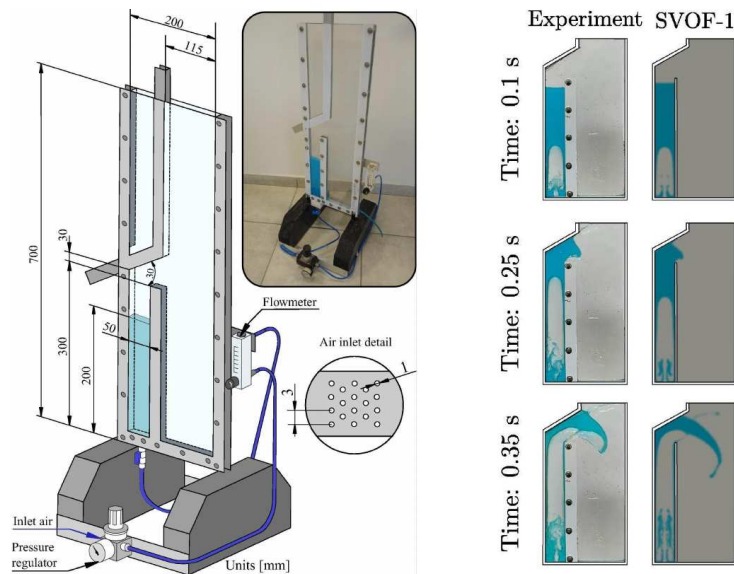


Figura 5: Esquema y foto del dispositivo experimental [Piña et al. \(2022\)](#), y comparación de algunos resultados cualitativos.

El objetivo principal de este último taller fue experimentar la dificultad de lograr mediciones experimentales de calidad (precisas, repetibles, confiables) y configurar un modelo numérico que se comporte con la misma dinámica dentro de un margen de error aceptable. El contraste con los casos anteriores, donde los valores de referencia parecían incuestionables, facilitó que los estudiantes debatieran sobre el uso de CFD como una herramienta de ingeniería más, como las normas, los ábacos, los ensayos de laboratorio u otras herramientas de cálculo más allá del CAE.

4. CONCLUSIONES

Al finalizar el primer dictado del curso durante el segundo semestre de 2022, observamos que el curso ha cumplido con los principales objetivos propuestos. Los informes y exposiciones presentadas demuestran que cada estudiante alcanzó un nivel básico en el uso de software CFD, ampliando sus capacidades para enfrentar desafíos técnicos que puedan requerir el uso de herramientas CAE.

Respecto al módulo inicial de repaso, fueron los mismos estudiantes quienes destacaron la importancia de esta instancia. Observamos que, aún luego de finalizada la etapa de revisión sobre los fundamentos teóricos, varios alumnos reportaron inconvenientes a la hora de asociar estos conceptos con el contexto práctico de aplicación. En este sentido, todos los estudiantes valoraron las actividades de *scripting*, considerando que fue una tarea que los llevó a reflexionar más detenidamente sobre la teoría, facilitando su comprensión. Aún así, los docentes notamos que es necesario replantear ciertas prácticas haciendo énfasis en los conceptos del FVM que afectan la confiabilidad del CFD, por ejemplo, la calidad de la malla y cómo la misma afecta la precisión de los resultados.

Respecto a los tres módulos de taller, si bien los casos de estudio fueron académicos, las actividades permitieron exponer diferentes estrategias de modelado necesarias para la resolución de problemas industriales, como RANS. Esta instancia permitió hacer foco en las capacidades y limitaciones del CFD como herramienta de ingeniería, comparándola con prácticas de cálculo más usuales en la industria argentina. A partir de estas experiencias, los estudiantes mostraron suficiencia en cuanto a los criterios de modelado y planificación de un análisis CFD, a pesar de no haber desarrollado gran familiaridad con el *software* en sí mismo. Este último aspecto es difícil de mejorar, dado que alcanzar un desempeño competitivo en el uso de cualquier herramienta de cálculo es una tarea que requiere trabajo con una frecuencia constante a lo largo de períodos que se extienden más allá de un sólo cuatrimestre.

A partir de la experiencia adquirida en esta primera edición del curso, hemos aplicado algunas modificaciones en el cronograma y el material pedagógico empleado para la edición 2023. Esperamos lograr, con estos cambios, una carga más homogénea en la exigencia. Dada la respuesta positiva de esta primera cohorte, planeamos continuar impartiendo la asignatura una vez por año, atendiendo la creciente demanda de los estudiantes.

REFERENCIAS

- Ander-Egg E. y Ander-Egg E. El taller: una alternativa de renovación pedagógica (no. 316ander-egg). *Magisterio del Río de La Plata*, 2007.
- Bhatti M.M., Marin M., Zeeshan A., y Abdelsalam S.I. Recent trends in computational fluid dynamics. *Frontiers in Physics*, 8:593111, 2020.
- Carbone Cortizo M.C., Ravagnan H., Venier C.M., y Pairetti C.I. Estudio de solidificación con frontera libre mediante cfd. 2020.
- Cardona C., Hazzi F., Pairetti C., y Venier C. Estudio cfd de pérdida de carga en válvula de tesla t45-r. En *ANALES AFA*, volumen 33, páginas 26–30. 2022.
- Catalano J.C., Carbone M.C.C., Venier C.M., y Pairetti C.I. Estudio de solidificación con frontera libre mediante cfd. 2020.
- Catalano J.C., Carbone M.C.C., Venier C.M., y Pairetti C.I. Análisis numérico de intercambiadores de calor. *Mecánica Computacional*, 39(4):107–108, 2022.
- Cengel Y. y Cimbala J. *Ebook: Fluid mechanics fundamentals and applications (si units)*. McGraw Hill, 2013.

- CONFEDI L.R. Propuesta de estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería en la república argentina. *Aprobado por la Asamblea del Consejo Federal de Decanos de Ingeniería de la República Argentina, Rosario*, 1, 2018.
- Damián S.M. y Nigro N.M. An extended mixture model for the simultaneous treatment of small-scale and large-scale interfaces. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 75(8):547–574, 2014.
- Falck B., Falck D., y Collette B. *FreeCAD [How-To]*. Packt Publishing Ltd, 2012.
- Fraser D., Pillay R., Tjatindi L., y Case J. Enhancing the learning of fluid mechanics using computer simulations. *Journal of Engineering Education*, 96(4):381–388, 2007.
- Godino D.M., Corzo S.F., y Ramajo D.E. Two-phase modeling of water-air flow of dispersed and segregated flows. *Annals of Nuclear Energy*, 149:107766, 2020.
- Greenshields C. y Weller H. *Notes on Computational Fluid Dynamics: General Principles*. CFD Direct Ltd, Reading, UK, 2022.
- Guerrero J. y Bargiacchi M. Introductory openfoam course. *Università degli Studi di Genova*, 2014.
- Hazzi F., Cardona C., Pairetti C., y Venier C. Análisis cfd de control de flujo mediante una válvula esférica. En *ANALES AFA*, volumen 33, páginas 21–25. 2022.
- Hirsch C. *Numerical computation of internal and external flows: The fundamentals of computational fluid dynamics*. Elsevier, 2007.
- Jasak H., Jemcov A., Tukovic Z., et al. Openfoam: A c++ library for complex physics simulations. En *International workshop on coupled methods in numerical dynamics*, volumen 1000, páginas 1–20. 2007.
- Moukalled F., Mangani L., Darwish M., et al. *The finite volume method in computational fluid dynamics*, volumen 113. Springer, 2016.
- OpenFOAM O.U.G. The openfoam foundation. 2014.
- Pairetti C.I., Catalano J.C., Carbone M.C.C., y Venier C.M. Desarrollo de un taller de fluidodinámica computacional empleando herramientas de código libre. *CAIM-CAIFE*, 2021.
- Piña J.S., Godino D., Corzo S., y Ramajo D. Air injection in vertical water column: Experimental test and numerical simulation using volume of fluid and two-fluid methods. *Chemical Engineering Science*, 255:117665, 2022.
- Seguenzia N.I., Canciani P., Pairetti C., y Navone H. Efectos del modelado de turbulencia sobre las fuerzas aerodinámicas en un cilindro fijo. *Mecánica Computacional*, 39(4):109–110, 2022.
- Squillacote A.H., Ahrens J., Law C., Geveci B., Moreland K., y King B. *The paraview guide*, volumen 366. Kitware Clifton Park, NY, 2007.
- Versteeg H.K. y Malalasekera W. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education, 2007.
- Žukauskas A. Heat transfer from tubes in crossflow. En *Advances in heat transfer*, volumen 8, páginas 93–160. Elsevier, 1972.