



# INTRODUCCIÓN DE UN CURSO DE APRENDIZAJE BASADO EN INVESTIGACIÓN DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL EN EL CURRÍCULO DE INGENIERÍA

**Andrea Matiz Chicacausa, Luis Ramírez, Ómar López, Nicolás Ríos**

**Universidad de Los Andes  
Bogotá, Colombia**

## **Resumen**

Este trabajo muestra el diseño e implementación de un nuevo curso electivo en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para el plan de estudios de ingeniería de la Universidad de Los Andes, Colombia. El objetivo del curso es brindar a los estudiantes de pregrado la oportunidad de desarrollar investigaciones, mejorar la comunicación eficiente y las habilidades de trabajo en equipo mediante el empleo de la Metodología de Aprendizaje Basado en Proyectos (PBL). Estas habilidades se fomentan al resolver problemas relacionados con la industria que involucran mecánica de fluidos, transferencia de calor y masa y el uso de simulación CFD. El curso se dividió en dos partes: Primero, los estudiantes asistieron a conferencias regulares para obtener una base teórica sobre los conceptos básicos de CFD e introdujeron el software CFD STAR-CCM+. La segunda parte del curso consistió en desarrollar un proyecto en grupos de estudiantes acompañados de profesores, asistentes y representantes de las industrias participantes. Los grupos de estudiantes se conformaron atendiendo a tres características: paridad de género (al menos una mujer en cada grupo), igualdad en el alumno de los diferentes programas de ingeniería inscritos en el curso, y un rol específico (en base a un test de personalidad) asignado a cada alumno a jugar dentro del grupo. En este estudio se evaluaron dos aspectos: primero, el éxito de los grupos para lograr los resultados esperados para cada proyecto, y la eficiencia del curso para enseñar a los estudiantes el empleo de una herramienta técnica dejando la autonomía de aprendizaje a los estudiantes. Ambos aspectos obtuvieron resultados satisfactorios ya que la mayoría de los grupos alcanzaron los objetivos propuestos en cuanto a la simulación CFD implementada, presentación de resultados y relevamiento final del curso.

**Palabras clave:** CFD; curriculum ingeniería; PBL

### **Abstract**

*The present paper shows the design and implementation of a new elective course in Computational Fluid Dynamics (CFD) for the engineering curriculum at Universidad de Los Andes, Colombia. The course's goal is to provide undergraduate students with the opportunity to develop research, improve efficient communication and teamwork skills by employing the Project-Based Learning (PBL) Methodology. These abilities are fostered by solving industry-related problems involving fluid mechanics, heat and mass transfer, and the use of CFD simulation. The course was divided into two parts: First, the students attended regular lectures for a theoretical foundation on CFD basics and introduced the CFD software STAR-CCM+. The second part of the course consisted of developing a project in groups of students accompanied by professors, assistants, and representatives of the participant industries. The groups of students were formed according to three characteristics: parity of gender (at least one woman in each group), equality in student from the different engineering programs registered in the course, and a specific role (based on a personality test) assigned to each student to play within the group. Two aspects were assessed in this study: first, the groups' success to achieve the expected results for each project, and the course's efficiency to teach students the employment of a technical tool while leaving the autonomy on learning to the students. Both aspects obtained satisfactory results as most of the groups achieved the proposed goals in terms of the implemented CFD simulation, presentation of results, and the course's final survey.*

**Keywords:** CFD; engineering curriculum; PBL

## **1. Introducción**

En 2017 la Comisión de Asuntos Académicos de la Universidad de Los Andes aprobó la creación de cursos especiales con enfoque investigativo. Los denominados cursos Pi ( $\pi$ ) buscan fomentar el desarrollo de competencias de investigación y desarrollo en estudiantes de pregrado. El objetivo principal es "aprender haciendo" abriendo un espacio académico para que los estudiantes de pregrado adquieran herramientas esenciales para sus carreras profesionales e intercambien experiencias con estudiantes de posgrado.

Alineado con esa disposición, la vicerrectoría de investigaciones y la vicerrectoría académica abrieron una convocatoria para la financiación de proyectos interdisciplinarios cuyo resultado fuera la creación de un curso Pi. Promoviendo los objetivos de creación de sinergia entre la docencia y la investigación involucrando estudiantes de pregrado, maestría y doctorado. Y favoreciendo el trabajo interdisciplinario necesario dentro de la renovación y flexibilización curricular.

En el marco de esta convocatoria se presentó el proyecto de Implementación de un curso interdepartamental para el estudio y aprovechamiento de la simulación a través de la Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) en ingeniería. Con el objetivo principal de desarrollar un curso que



incentive la formación investigativa en el área de la Mecánica Computacional de Fluidos tanto para los estudiantes de Ingeniería Química como de Ingeniería Mecánica.

En ingeniería, los últimos desarrollos computacionales hacen imperante que la investigación tenga un fuerte componente en habilidades computacionales, tanto para la simulación de procesos y productos como para la optimización de estos. Dentro de las metodologías de investigación se encuentra la Mecánica Computacional de Fluidos (CFD por sus siglas en inglés), que se encarga de modelar el comportamiento de fluidos en sistemas donde ocurre el transporte de algún fenómeno.

En el departamento de Ingeniería Mecánica se dicta únicamente un curso sobre este tema a nivel de maestría, lo cual restringe su acceso a estudiantes de pregrado. Contrario a esto, en el departamento de Ingeniería Química se cuenta con un curso obligatorio de pregrado que imparte estos conocimientos. Para cambiar esta situación se plantea desarrollar un curso interdepartamental que se encargue de enseñar en pregrado la simulación con CFD, involucrando tanto temas de Ingeniería Química como de Ingeniería Mecánica, e incentivando el uso de esta herramienta para la investigación.

Para el 2024 se estima que la industria dedicada a la simulación de fluidos moverá US\$3.1 mil millones de dólares, esto se debe tanto a su uso en el área aeroespacial como en la industria alimenticia y petro-química, en las que este método está en auge y requiere de ingenieros dispuestos a desarrollar soluciones a los problemas venideros. En un ámbito local, desde el departamento de Ingeniería Química se ha dictado de forma obligatoria en el pregrado el análisis de sistemas a través de este método, desde modelos aplicables para bombas centrífugas hasta algo común como lo sería la simulación de una licuadora casera; este curso ha tenido éxito incentivando a los estudiantes de pregrado el uso de la computación para el diseño de productos o procesos.

Por lo anterior, se busca realizar un paralelo entre el éxito de este curso y uno desarrollado completamente en conjunto con el departamento de Ingeniería Mecánica, analizando no únicamente sistemas Químicos o de industrias afines, sino ahondando un poco en temas naturales de la Industria Mecánica y comunes entre las ingenierías.

## **2. Metodología**

Este proyecto se centró en el diseño de un curso capaz de probar los conocimientos de estudiantes de pregrado de ingeniería química y mecánica para resolver problemas reales de diferentes industrias, utilizando CFD como herramienta principal. Para lograrlo, se desarrolló un curso basado en la metodología de Aprendizaje Basado en Proyectos (PBL), se formaron grupos de estudiantes de manera aleatoria y se les mostraron diferentes proyectos propuestos por empresas de la industria de petróleo y gas, energía y equipos de procesamiento. Cada grupo formado por un máximo de cinco alumnos seleccionó los más interesantes y propuso la metodología para resolver los problemas propuestos. El proceso de desarrollo del proyecto se basó en mantener una comunicación constante entre compañeros, profesores, asistentes y personas de la industria.



El curso se dividió en dos etapas. Primero, una etapa enfocada en la explicación de manera teórico-práctica el software CFD (STAR - CCM +). Esta etapa partió de los fundamentos teóricos, como las ecuaciones de conservación, ejemplos en 1 dimensión, para finalmente llegar a resolver ejercicios como el comportamiento de un fluido en una bomba centrífuga o el flujo de Pouseuille. La Figura 1 muestra los temas, tutoriales y actividades de esta etapa en orden cronológico:

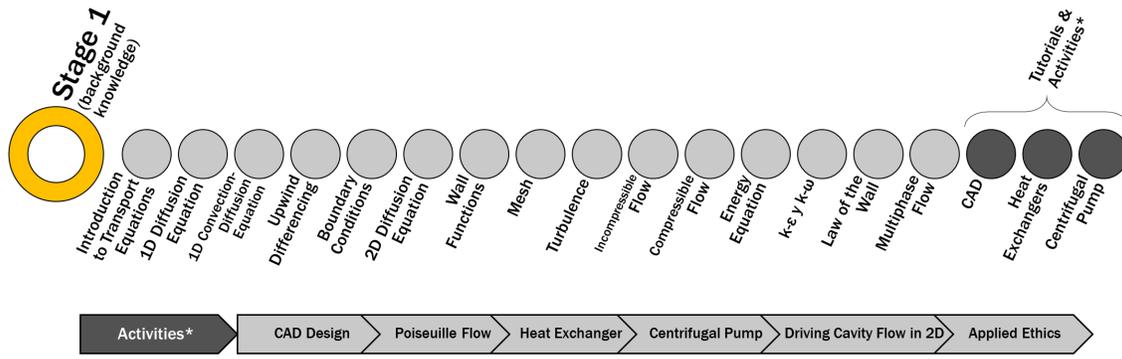


Figura 1. Etapa 1 del curso desarrollado, con cada uno de los temas y actividades desarrollados

Esta parte se desarrolló siguiendo tres estrategias sobre el objetivo de la clase: clases sincrónicas para temas fundamentales, videos asincrónicos con un cuestionario de seguimiento para temas complementarios y tutorías guiadas con trabajo independiente para desarrollar las actividades propuestas más reuniones de seguimiento para la resolución de preguntas sobre el trabajo práctico en el software.

La segunda etapa del curso fue diseñada para que los estudiantes apliquen los conocimientos de la sección anterior para resolver un problema real de la industria colombiana. Por lo tanto, se planificó un proyecto para probar la capacidad de los estudiantes para resolver desafíos reales de ingeniería, desde el diseño CAD de la geometría hasta la concepción de un modelo computacional capaz de proporcionar resultados realistas. Los pasos principales de la segunda etapa se muestran en la Figura 2, que comienza con el conocimiento previo general de los estudiantes, luego la formación de los equipos, seguido de la selección del proyecto, el desarrollo y la resolución del problema y la presentación de los resultados. En cada etapa, los participantes deben realizar actividades, como co-evaluaciones grupales, reuniones con asesores, etc.



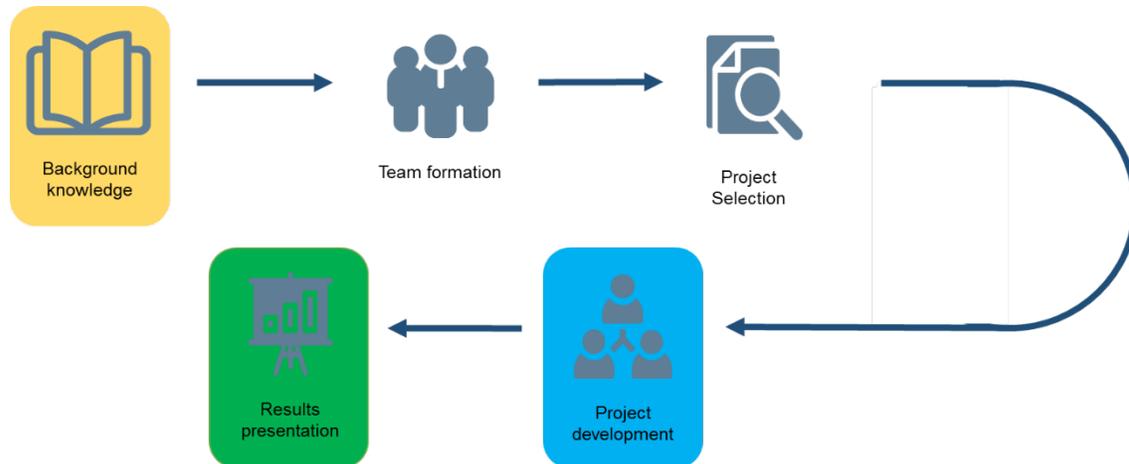


Figura 2. División de la Etapa 2, dedicada a la realización del proyecto del curso.

La formación de equipos se realizó a través de una encuesta de autoconocimiento conocida como Método Birkman, donde los estudiantes responden preguntas de verdadero / falso sobre sus intereses, necesidades y comportamientos para conocer su personalidad profesional. Hay cuatro personalidades en las que se puede identificar a los estudiantes: hacedores, los que se dedican al trabajo manual y físico; conversadores, que están a cargo de la relación del grupo; contadores, los que siempre funcionan según una estructura o reglas; y pensadores, que trabajan conceptualmente con ideas.

Con esta información, se formaron los grupos de manera que se equilibrara el número de personalidades. La encuesta en cuestión se realizó utilizando la plataforma Tandem desarrollada por Uniandes, la cual, como se mencionó, fue de vital importancia para el análisis de las relaciones y roles dentro de los grupos de trabajo. Una vez que se establecieron los equipos, la siguiente tarea para ellos fue decidir qué proyecto seleccionar. A tal fin se dedicó una clase completa, en la que diferentes integrantes de la industria presentaron un proyecto para analizar mediante simulación CFD. La figura 3 muestra los proyectos elegidos por los grupos y las empresas asociadas a cada uno de ellos.

El alcance de cada proyecto era muy complejo; por lo tanto, se tomó la decisión de limitar el rango de las asignaciones para permitir que los estudiantes entreguen los resultados a tiempo y de manera adecuada. Además, el proyecto sobre aerodinámica de aerogeneradores no estaba relacionado con la industria, era una investigación de doctorado, que se consideró por su complejidad y el objetivo de introducir a los estudiantes de pregrado en investigaciones de estudiantes de posgrado. Cada proyecto exploró diferentes temas, con modelos como la transferencia de calor, la transferencia de impulso y el flujo de múltiples componentes, por lo que los estudiantes pudieron probar sus conocimientos sobre el manejo del software CFD con respecto al mallado, el establecimiento de condiciones de contorno, la configuración computacional y las tareas de posprocesamiento.



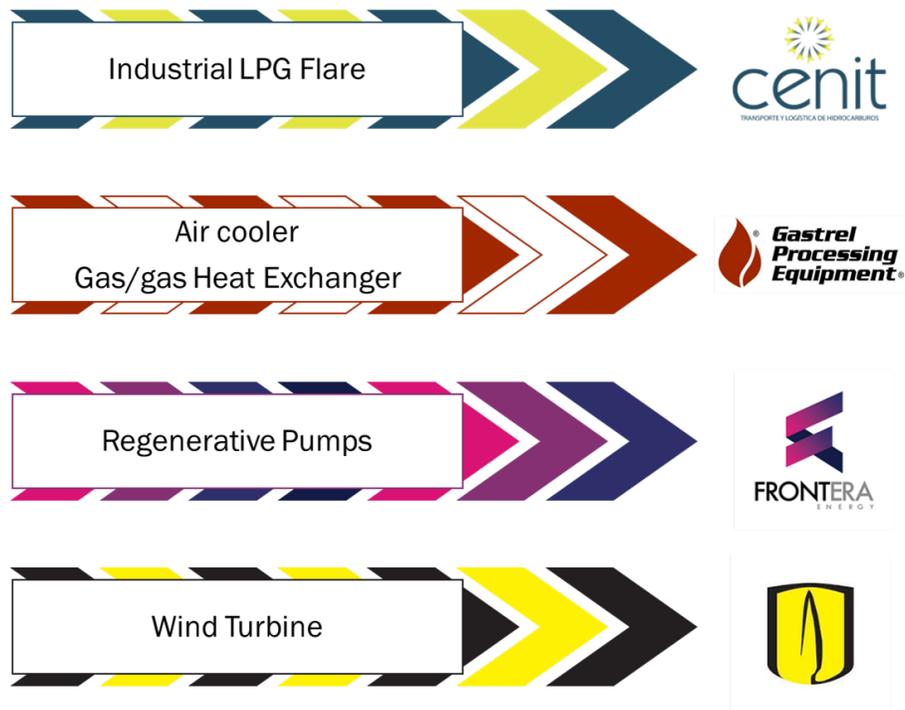


Figura 3. Proyectos seleccionados por los estudiantes con sus respectivas compañías

El desarrollo del proyecto se dividió en siete tareas como se muestra en la Figura 4; las primeras cinco tareas tuvieron un lapso de 2 semanas entre ellas para completarse, mientras que el documento final y la presentación se completaron casi al mismo tiempo.

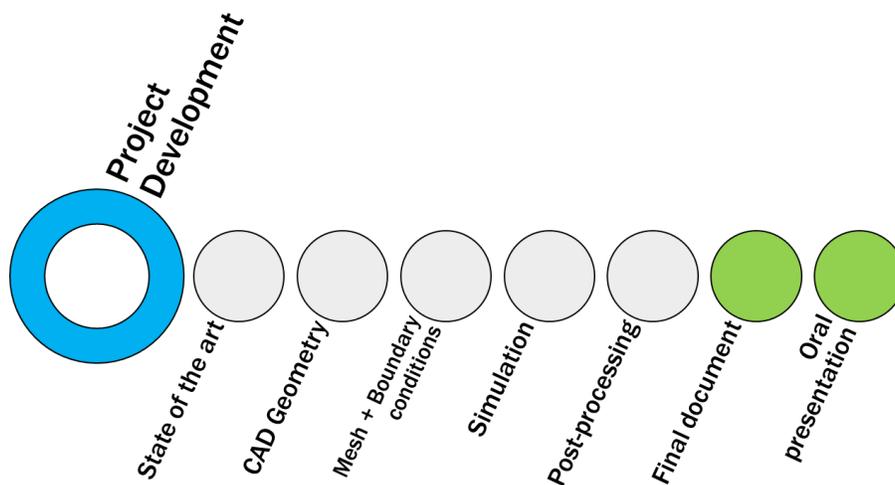


Figura 4. Actividades y entregables del proyecto en la segunda etapa del curso.

La división del trabajo se realizó siguiendo las etapas para desarrollar un proyecto en CFD: Análisis de estado del arte, donde se buscan todas las investigaciones, información y datos previos que puedan ayudar a la comprensión y posterior solución del proyecto,



- Creación de la geometría CAD, para esta sección los alumnos tuvieron clases sobre el uso adecuado de Autodesk Inventor,
- Configuración de condiciones de límite y generación de malla, donde los estudiantes tenían que buscar las mejores opciones de discretización manteniendo el costo computacional bajo.
- Ejecutar simulación, configuración computacional y observación de posibles errores
- Pos-procesamiento, donde los estudiantes definen cómo mostrar sus resultados y el comportamiento del flujo de análisis.

Cada una de estas etapas tenía una presentación asociada que se califica y los comentarios de los profesores y asistentes se envían a los estudiantes para garantizar el mejor resumen posible del proyecto al momento de la presentación del documento final. A lo largo del desarrollo del proyecto, los estudiantes tuvieron tiempo en clases sincrónicas para reunirse con otros miembros del grupo, profesores, asistentes y asesores de las empresas relacionadas con los proyectos; Además, los estudiantes trabajan en máquinas virtuales equipadas con el software STAR-CCM + y Autodesk Inventor.

Para analizar la dinámica del equipo de trabajo se utilizó la plataforma Tandem, la cual cuenta con encuestas de autoevaluación y coevaluación y una encuesta extra para analizar la salud del equipo. Como su nombre lo dice, la autoevaluación y la coevaluación son momentos de reflexión personal en los que cada miembro de los equipos analiza el trabajo realizado por sus compañeros y ellos mismos, obteniendo así una nota de agradecimiento que cuantifica su aporte al envío recién cumplimentado. Cada uno de estos se llevó a cabo para las primeras tareas del proyecto; por la mañana, entregan el documento y, por la tarde, completan la encuesta. Cada encuesta entregó una nota de equipo, que es la media de cada coevaluación y autoevaluación; con estos datos se pudo realizar un análisis de la segunda etapa del curso. La encuesta de salud del equipo ayudó a comprender las deficiencias de los grupos en general, analizando principalmente cinco disfunciones extraídas del trabajo de Patrick Lencioni "Superando las cinco disfunciones de un equipo" (2005): la ausencia de confianza, el miedo al conflicto, la falta de compromiso, evitación de la rendición de cuentas y falta de atención a los resultados.

Como el propósito principal del curso es ayudar a los estudiantes a desarrollar habilidades en el área de modelado computacional usando CFD, se desarrollaron dos encuestas a lo largo del semestre; el primero se realizó durante la primera semana de clases, analizó conocimientos previos del curso, como mecánica de fluidos, fenómenos de transporte y resolución de ecuaciones diferenciales parciales, así como preguntas sobre sus conocimientos en software CAD y CFD; La segunda y última encuesta se desarrolló al finalizar el curso, en esta actividad los estudiantes respondieron preguntas sobre el desarrollo, metodología y participantes del curso, así como sobre los fundamentos de CFD y sus conocimientos finales..



### 3. Resultados

Con el fin de comprender la relación interna entre los estudiantes de los equipos de proyecto, se realizaron 4 encuestas, distribuidas entre las primeras presentaciones del proyecto. Se recopilaron los datos y se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 5 y 6 ambas mostrando los promedios por grupo para cada uno de los momentos, así como la media de cada período, mostrando así la progresión de la dinámica de grupo.

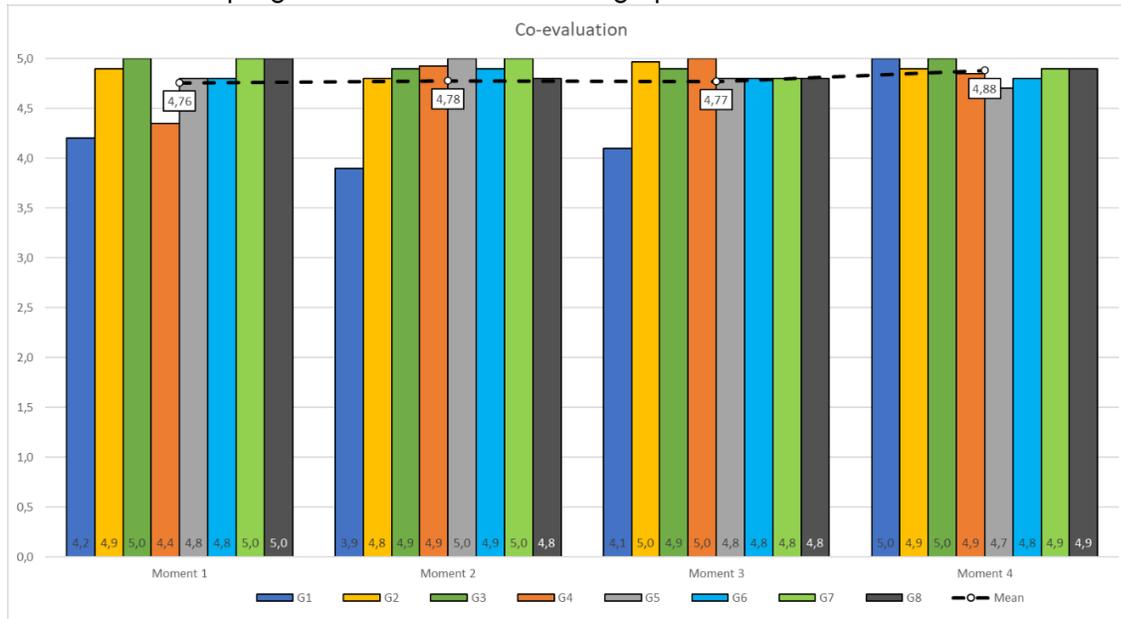


Figura 5. Resultados de la coevaluación de los 8 grupos en cada uno de los 4 momentos establecidos con sus respectivas medias estadísticas.

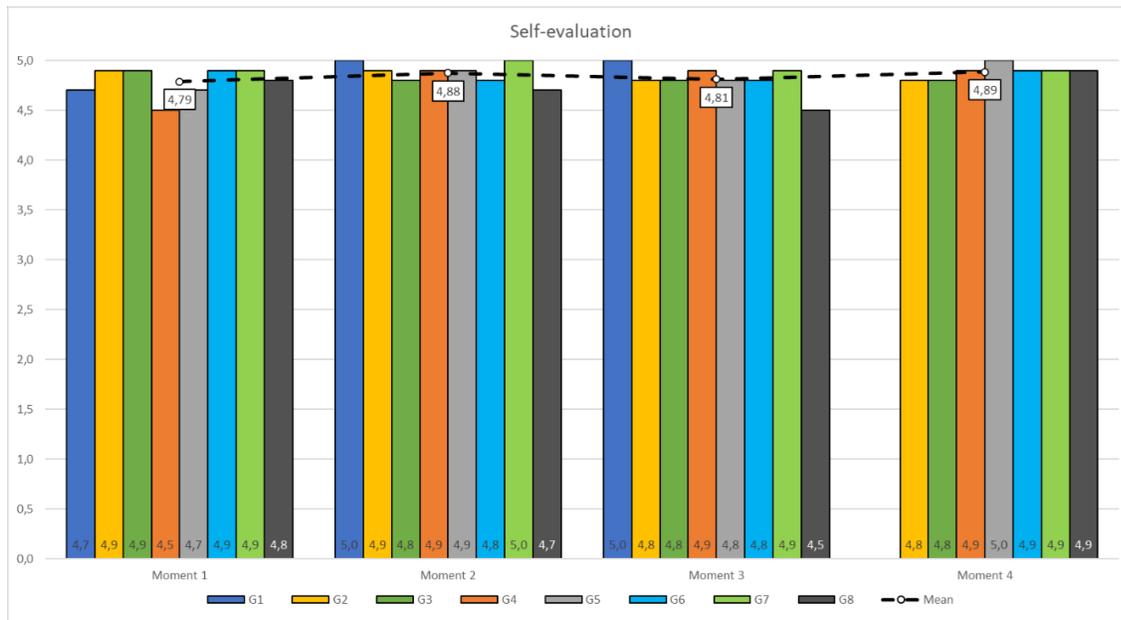


Figura 6. Resultados de la autoevaluación de los 8 grupos en cada uno de los 4 momentos establecidos con sus respectivas medias estadísticas.



A partir de los datos de coevaluación, el promedio tiene un máximo en la última presentación, mostrando una progresión ascendente suave con la excepción del momento 3. El grupo 1 muestra la coevaluación más baja para el momento 2 con una puntuación de 3.9 sobre 5.0. Los otros grupos presentan en general un promedio de coevaluación superior a 4.0 sobre 5.0 en cada uno de los partos, lo que representa un promedio excelente, demostrando que los grupos funcionaron correctamente. La tendencia es similar en el caso de las autoevaluaciones. Los promedios son superiores a los valores de la coevaluación, y fluctúa entre las distintas valoraciones, mostrando un máximo en la última, con un valor de 4,89. En general, se hace evidente que los alumnos sobreestiman sus aportes en las entregas a través de los diferentes momentos, llegando así a la conclusión de que en general los alumnos sienten que sus aportes son superiores a lo que notan sus compañeros.

Los datos recopilados sobre la salud de los equipos fueron relevados dos veces hasta la etapa 2, una al principio y otra al final, estos resultados se encuentran en la Figura 7. Se calculó el promedio de todos los resultados del grupo para obtener una salud general del curso. Estos valores se presentan con intervalos que muestran si las deficiencias en los equipos están presentes (Malo), si es probable que estén presentes (Regular) y si no están presentes (Excelente).

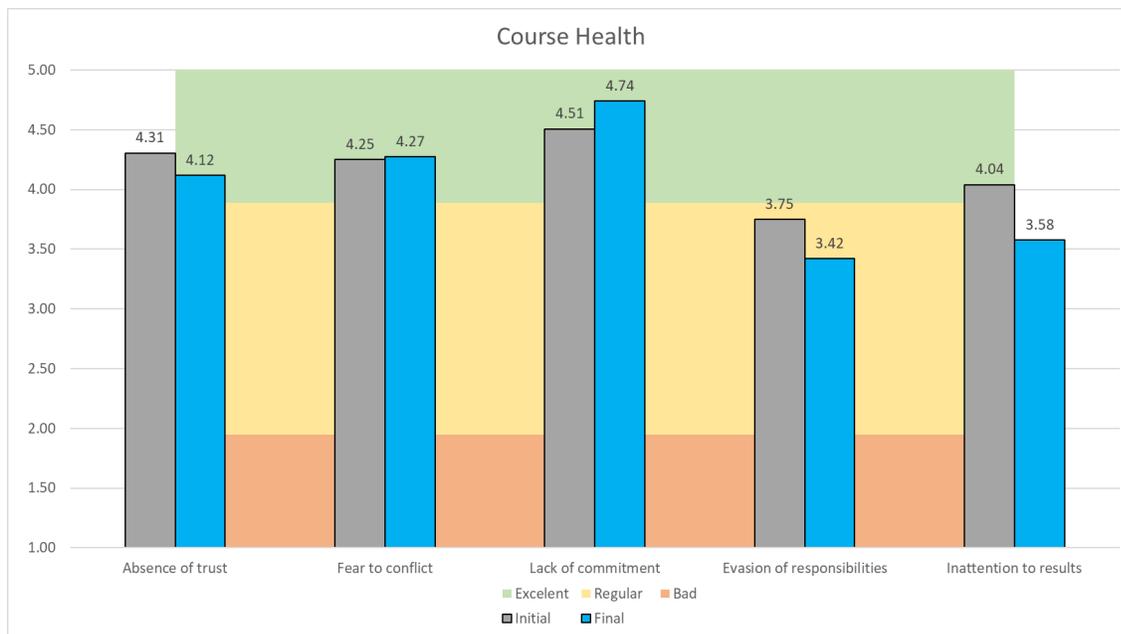


Figura 7. Resultados de las encuestas de salud de equipo realizadas al principio y al final del curso.

En general, se encuentran posibles deficiencias entre los equipos, siendo la más frecuente la evasión de responsabilidades, que comenzó de forma regular con un valor de 3,75 y terminó aún menos con 3,42. En el caso de la falta de atención a los resultados, hubo un descenso al final del curso en la categoría regular, lo que demuestra que los alumnos están más preocupados por la entrega de resultados que por su calidad al final del día. Al contrario, la falta de compromiso presenta un buen comportamiento a lo largo de los dos momentos, terminando con un valor de 4,74, mostrando que la deficiencia no está presente.



La encuesta inicial fue realizada por 27 personas con los siguientes resultados: El 66,67% de los alumnos ya había utilizado programas de CAD, entre ellos AutoCAD, Autodesk Inventor y Fusion 360; el 25,93% de los alumnos ya había utilizado software de CFD antes de la clase, entre ellos ANSYS y STAR-CCM+; el 59,26% de los alumnos se consideró con conocimientos adecuados para recibir un curso de CFD. Cuando se les preguntó sobre qué conocimientos consideraban relevantes mencionaron las ecuaciones diferenciales, las ecuaciones de Navier-Stokes y la mecánica de fluidos en general. Por último, se les preguntó hasta qué punto estaban de acuerdo con la afirmación "Lo que aprenderé en el curso de CFD en Investigación es relevante para mi formación personal", el 88,24% de los estudiantes respondieron de acuerdo y totalmente de acuerdo. Además, en la encuesta final del semestre, que contestaron 30 alumnos, se obtuvo el siguiente gráfico (Figura 8), en el que los alumnos calificaron los objetivos de aprendizaje del curso en una nota sobre 5:

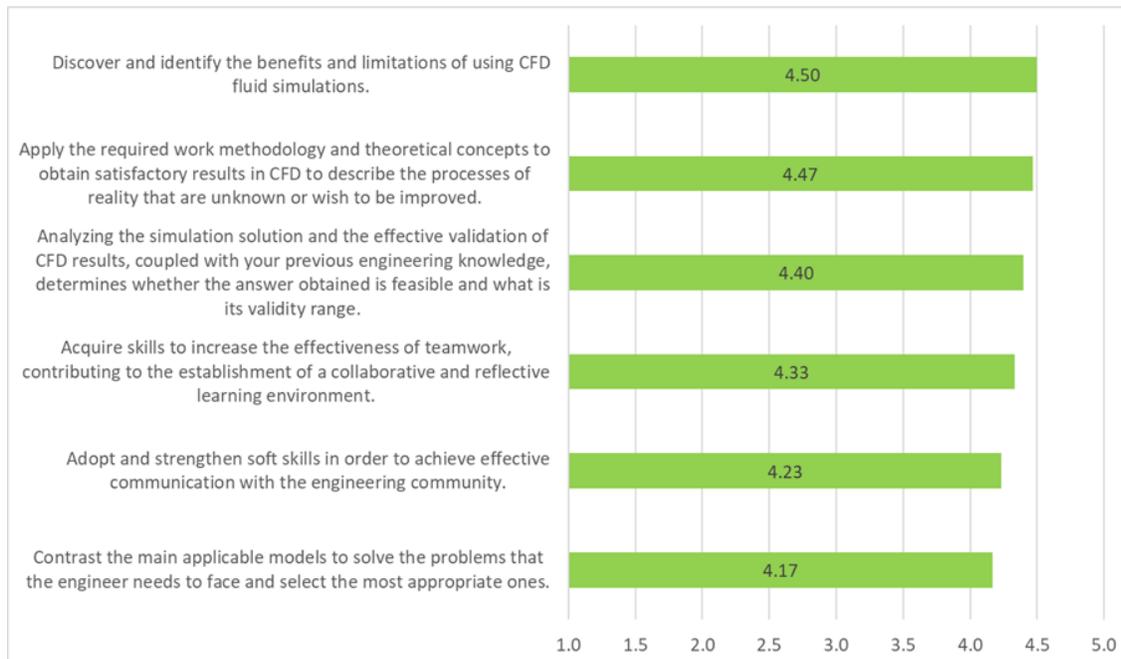


Figura 8. Resultados de la encuesta final realizada a los estudiantes, en donde ellos calificaban los objetivos de aprendizaje del curso.

Las diferentes puntuaciones de los objetivos de aprendizaje demuestran cómo el curso ayudó a los estudiantes en aspectos críticos como entender si el CFD puede resolver problemas de la industria, aplicar los conocimientos de simulación para optimizar procesos reales y aumentar la capacidad de análisis de los estudiantes en ingeniería. El objetivo de aprendizaje con la puntuación más baja fue contrastar los diferentes modelos computacionales existentes para elegir el mejor para cada ocasión; este ítem es el más complicado, incluso para personas que han trabajado durante años en este campo de investigación, ya que muchos han estado buscando el mejor modelo aplicable al caso de estudio; por lo tanto, los estudiantes han encontrado esta tarea más problemática, que es el punto de partida para que el ingeniero utilice el CFD.



## 4. Conclusiones

Este estudio presenta el diseño y la creación de un curso sobre Simulación Numérica para estudiantes de ingeniería. El objetivo principal de este curso era desarrollar las habilidades de investigación mediante el empleo de la metodología PBL aplicada a los problemas de las empresas de la industria, por ejemplo, del petróleo y el gas, la energía y los equipos de procesamiento. Por lo tanto, los estudiantes en las primeras etapas de sus estudios evalúan sus capacidades para resolver problemas relacionados con la industria, al tiempo que desarrollan habilidades en el manejo de software especializado y la comunicación efectiva. Cabe destacar que debido a la emergencia sanitaria derivada del COVID 19, los estudiantes asistieron virtualmente a este curso. Por ello, toda la interacción entre instructores y alumnos fue a través de videollamadas; simultáneamente, las simulaciones y la utilización del software se realizaron a través de máquinas virtuales, por lo que la estabilidad de la conexión a internet fue un factor crítico en el proceso de aprendizaje.

Los resultados de este estudio se clasifican en dos: En primer lugar, el éxito en la resolución de problemas concretos y la consecución de los objetivos previstos de cada proyecto. En segundo lugar, la eficacia del curso para enseñar a los estudiantes a simular problemas relacionados con la ingeniería y a emplear software especializado en actividades de investigación.

El curso se dividió en siete grupos según la evaluación de la personalidad de cada estudiante y a cada uno se le asignó un papel dentro del grupo. Es importante señalar que los grupos se formaron manteniendo la paridad de género y tratando de tener al menos una mujer en cada grupo. Además, los estudiantes inscritos en este curso provenían específicamente de programas de ingeniería química y mecánica. Por lo tanto, cada grupo se formó tratando de tener estudiantes de ambos programas por igual.

En cuanto al éxito de los estudiantes para resolver problemas utilizando STAR-CCM+ y logrando los resultados esperados: la mayoría de los grupos logran la solución de sus respectivos problemas. Unos pocos grupos no pudieron obtener los resultados deseados; sin embargo, la comprensión del problema y la experiencia del uso del software les permite proponer alternativas o razones para abordar mejor el proyecto. La etapa que representó más problemas para los estudiantes fue la generación de la discretización del dominio, ya que había geometrías complejas que involucraban tanto el flujo interno como el externo, y algunas de ellas requerían no sólo resolver la ecuación de continuidad y de conservación de momento sino resolver la ecuación de energía adicionalmente; por lo tanto, algunas simulaciones fueron de hecho de un grado de complejidad mayor.

Otro objetivo importante del curso era el desarrollo de las habilidades de comunicación. La mejora en este aspecto fue más evidente ya que se pidió un informe en cada etapa del proyecto, y se entregó retroalimentación antes del siguiente informe para que los estudiantes pudieran tenerlo en cuenta en cada entregable. Algunas observaciones realizadas por los alumnos fueron el número de tutorías para aprender a trabajar con el software. Pidieron más tutoriales en lugar de vídeos teóricos; sin embargo, para emplear con éxito el software, los conocimientos teóricos son un factor crucial que no se puede descuidar.



En cuanto a la eficacia del curso, los resultados del aprendizaje se lograron con éxito, como se muestra en la Figura 8. La mayoría de los estudiantes se dieron cuenta de la importancia de utilizar el software de simulación numérica para resolver un proyecto específico. En general, a los estudiantes les gustó el diseño del curso, con una base teórica en la primera mitad y una parte práctica en la segunda, aunque les hubiera gustado que hubiera más problemas prácticos similares al tema de los proyectos. La sensación de resolver un problema de la industria y presentar su resultado a sus compañeros y a los representantes de la industria animó a los estudiantes a invertir tiempo y a encontrar alternativas que los llevaran a conseguir buenos resultados.

## 5. Referencias

### Artículos de revistas

- Genalo LJ. A project-based approach to DOE in materials. *ASEE Annu Conf Proc.* 1999;321–6.
- Rubino FJ. Project based freshman introduction to engineering technology course. *ASEE Annu Conf Proc.* 1998;
- McCreanor PT. Project based teaching: A case study from a hydraulics class. *ASEE Annu Conf Proc.* 2001;8127–36.
- Hadim HA, Esche SK. Enhancing the engineering curriculum through project-based learning. *Proc - Front Educ Conf.* 2002;2:1–6.
- Magana AJ, Silva Coutinho G. Modeling and Simulation Practices for a Computational Thinking-Enabled Engineering Workforce. *Comput Appl Eng Educ.* 2018;26:824–40.
- Versteeg H, Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics.* Second. Hall P, editor.
- Adair D, Jaeger M. Integration of computational fluid dynamics into a fluid mechanics curriculum. *Comput Appl Eng Educ.* 2011;22(1):131–41.
- Ray B, Bhaskaran R. Integrating simulation into the engineering curriculum: A case study. *Int J Mech Eng Educ.* 2013;41(3):269–80.
- Adair D, Bakenov Z, Jaeger M. Building on a traditional chemical engineering curriculum using computational fluid dynamics. *Educ Chem Eng [Internet].* 2014;9(4):e85–93. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ece.2014.06.001>
- Al-Baghdadi M, Sadiq A. Applications of Computational Fluid Dynamics (CFD) technology in engineering education. *Int J Energy Environ.* 2019;10:1–14.
- Education BI for. Gold Standard PBL: Essential Project Design Elements [Internet]. Available from: <https://www.pblworks.org/what-is-pbl/gold-standard-project-design>
- Birkman R, Elizondo F, Lee LG, Wadlington, Patrick L; Zamzow MW. *The Birkman method manual.* 2008.
- Lencioni P. *Overcoming the Five Dysfunctions of a Team.* Jossey-Bass. 2006. 180 p.

### Fuentes electrónicas

- Mokhtar W, Fleischmann S. Introducing CFD and Wind Tunnel Testing in an Undergraduate Fluid Mechanics Course [Internet]. 2014. Available from: <https://doi.org/10.1115/IMECE2014-36552>
- Ballesteros MA, Daza MA, Valdés JP, Ratkovich N, Reyes LH. Applying PBL methodologies to the chemical engineering courses: Unit operations and modeling and simulation, using a joint course project. *Educ Chem Eng [Internet].* 2019;27:35–42. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ece.2019.01.005>



## Sobre los autores

- **Andrea Matiz Chicacausa:** Ingeniero Mecánico, Máster en Energías Renovables y Master en Ingeniería, Candidato a Doctor en Ingeniería de la Universidad de Los Andes. [a.matiz257@uniandes.edu.co](mailto:a.matiz257@uniandes.edu.co)
- **Luis Ramírez:** Ingeniero Químico, Máster en Ingeniería. [la.ramirez15@uniandes.edu.co](mailto:la.ramirez15@uniandes.edu.co)
- **Ómar López:** Ingeniero Mecánico, Doctor en Ingeniería de la Universidad de Texas, Profesor Asociado Universidad de Los Andes.
- **Nicolás Ríos:** Ingeniero Químico e Ingeniero Mecánico, Doctor en Ingeniería de la Universidad de Gante. Profesor Asociado Universidad de Los Andes

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2021 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

