

Using CFD as a support tool for the initial study of Hydraulic Turbomachinery
Utilización de la CFD como herramienta de apoyo al estudio inicial de las Turbomáquinas Hidráulicas

José Luís Vicéns Moltó, Blas Zamora Parra
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
agricol@msn.com, blas.zamora@upct.es

Abstract

The Engineering Education requires that students acquire an appropriate knowledge on a mathematical computational language as well as on a numerical simulation procedure. The computational language of mathematics usually is taught in advanced courses, once that the curriculum mathematical education is mainly completed; in addition, the numerical simulation is usually located late or even in doctoral studies. In this paper, we propose that the Computational Fluid Dynamics (CFD) become to be a teaching-learning tool, instead of a strategic resource only. CFD can be regarded as a transversal skill i.e., as a useful educational tool for the Hydraulic Turbomachines learning, which achieves to overcome some epistemological obstacles of students. We develop a teaching-learning method in which the Tutor Facilitator plays an important role.

La Enseñanza de la Ingeniería requiere que el alumno adquiera conocimientos tanto de un lenguaje computacional matemático como de algún procedimiento de simulación numérica. El lenguaje matemático suele enseñarse en cursos avanzados, una vez completada gran parte de la enseñanza matemática curricular, y la simulación numérica no es infrecuente que se ubique tardía o incluso en el posgrado. En este trabajo se propone que la simulación numérica de flujos fluidos (Computational Fluid Dynamic, CFD), deje de constituir un recurso estratégico, para devenir en un elemento táctico, una herramienta docente. Para ello, sin dejar de ser un objetivo competencial terminal, la CFD se articula como una competencia transversal, como una herramienta didáctica en el aprendizaje de las Turbomáquinas Hidráulicas, para superar determinados obstáculos epistemológicos que se presentan al alumno. Se desarrolla una metodología didáctica en la que juega un papel relevante la figura del Tutor Facilitador.

Keywords: Engineering Education, CFD, Epistemological Obstacles, Numerical Simulation, Fluid Mechanics.

Palabras clave: Enseñanza en Ingeniería, CFD, Obstáculos Epistemológicos, Simulación Numérica, Mecánica de Fluidos.

1 Introducción

Los procesos de enseñanza y aprendizaje en Ingeniería presentan distintas particularidades; en cualquier caso, sería deseable que los contenidos se impartieran secuenciales, articulables y complementarios. Sin embargo, este trabajo propone que este requerimiento puede eludirse con una inversión de la secuencia lógica inicial, si con ello se produce una retroalimentación cognitiva. La propuesta se concreta en la inversión de la secuencia habitual del estudio de la simulación numérica de flujos de fluidos (CFD) respecto al aprendizaje inicial de las Turbomáquinas Hidráulicas, como materia clásica presente en varias titulaciones (o grados) de Ingeniería. Un texto de consulta habitualmente recomendado es el de Mataix (2009).

La CFD es una instrumentación matemática computacional adecuada para la resolución de las Ecuaciones de Navier Stokes (Çengel & Cimbala, 2006; Tu, 2008), que suele reservarse a los cursos avanzados del Grado, o ya en el Posgrado, para el estudio de, por ejemplo, los entornos complejos de las Turbomáquinas Hidráulicas. Constituye así habitualmente un puerto terminal del aprendizaje en este área de conocimiento. Lo que se plantea en este trabajo es utilizar la CFD precisamente como punto de partida para el aprendizaje, apoyando la adquisición de los contenidos iniciales con los conocimientos de la CFD, que tradicionalmente se ubican cronológicamente después. Se deja a un lado la dicotomía entre el serialismo y el holismo como estrategias estancas de aprendizaje (Bronckbank & McGill, 2002), dando paso a un planteamiento dialéctico en que se caben ambas actitudes según la conveniencia misma del proceso local de aprendizaje.

En la visión no numérica de la Mecánica de Fluidos, propia de la Física General, la caracterización del flujo se efectúa mediante la modelización algebraica que imbuye en el alumno la noción determinista, es decir, la creencia en la obtención de “exactitud”. El tránsito a la CFD implica la internalización de la realidad numérica, indeterminista, jerarquizando las propiedades extensivas e intensivas del flujo. Esto requiere un aprendizaje previo conceptual consistente más allá del herraje algebraico.

No se pretende que el alumno adquiera competencias en CFD, sino cubrir tres objetivos. El primero, que el alumno asuma la validez de la CFD como método de representación para acercarse al conocimiento del funcionamiento interior de un sistema turbohidráulico generador. Para ello debe conocer el proceso con que se lleva a cabo este tipo de simulación. El segundo objetivo es que tenga la capacidad de interpretar las imágenes gráficas de sus resultados, relacionándolas con lo que podría estar ocurriendo en el interior de un sistema real. Y el tercer objetivo es que esta interpretación por parte del alumno le sirva para iluminar aspectos oscuros, consolidar conceptos y fomentar la visualización mental tridimensional que exigen estos sistemas mecánicos.

2 Materiales empleados

Los materiales se agrupan en dos apartados correspondientes a dos fases diferenciadas. Para la primera fase, pre-competencial, se utiliza un material compuesto por una serie de mapas conceptuales pretendidamente exhaustivos, y por un conjunto bibliográfico, asequible y en castellano, suficiente para corregir las deficiencias que previsiblemente puedan ser detectadas. Este material abarca por un lado la Mecánica de Fluidos propia de la Física General y la Mecánica de Fluidos curricular previa con arreglo al plan de estudios, y por otro lado los contenidos curriculares de cálculo multivariable y cálculo diferencial vectorial, hasta alcanzar

la formulación de las Ecuaciones de Navier Stokes. En la Figura 1 puede observarse un mapa conceptual básico para la ecuación de continuidad de Mecánica de Fluidos.

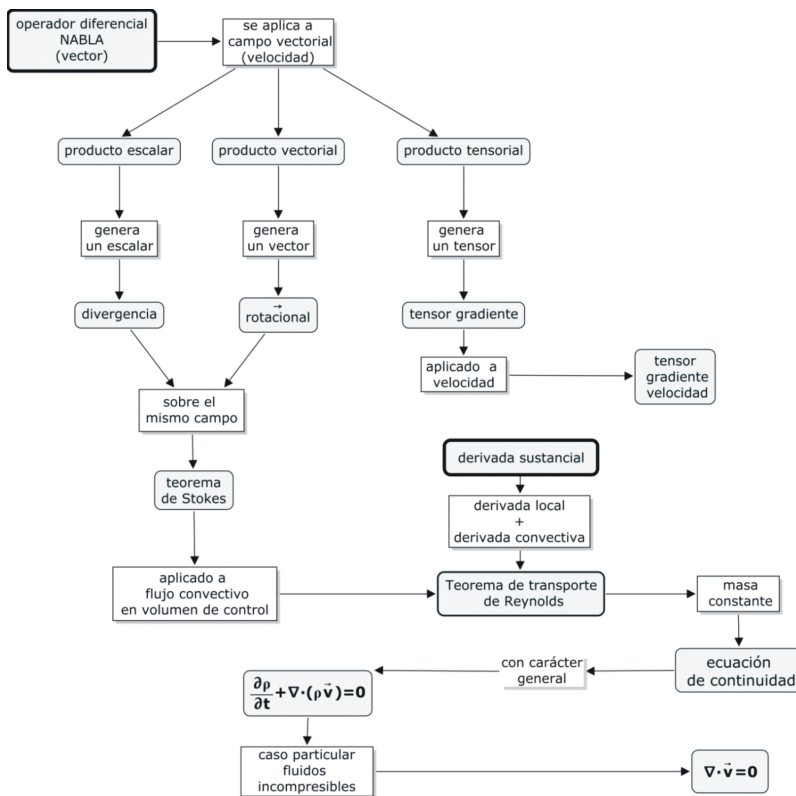


Figura 1: Mapa conceptual típico. Ecuación de continuidad en Mecánica de Fluidos.

Para la segunda fase, competencial, se dispone de una introducción tutelada a la simulación numérica de flujos de fluidos, y de un conjunto de simulaciones de una turbina axial tipo Kaplan. Se ha escogido este tipo de turbina porque su condición axial hace más asequible que el alumno controle la tridimensionalidad espacial (por ejemplo, el flujo en una turbina Francis resulta ser conceptualmente más complejo). Este catálogo de casos incluye la simulación del flujo a través de la turbina completa, así como diversas simulaciones del comportamiento de sus componentes aislados o en grupos parciales. Las simulaciones se acompañan de tutoriales pormenorizados de todas las etapas de cada proceso simulado. La iconografía utilizada se extrae de los resultados obtenidos en estas simulaciones.

3 Método de enseñanza-aprendizaje

La tarea se desglosa en dos partes. En la primera, considerada pre-competencial porque no atañe a los contenidos curriculares de las Turbomáquinas Hidráulicas, el alumno adquiere, y actualiza o subsana los conocimientos previos precisos. En la segunda parte se expone al alumno la metodología de la simulación numérica, y su implementación a la Mecánica de Fluidos (es decir, CFD). Finalmente el alumno dispone de los resultados de la CFD aplicada a una Turbomáquina Hidráulica, para utilizarlos como material didáctico. En relación a este material, es cierto que una película de animación puede ofrecer una buena iconografía y mejorar el proceso de aprendizaje, pero frente a este tipo de TIC's el alumno es un mero espectador. Lo que se pretende es que el alumno adquiera, ejercite, haga suyo un modo de presentar los

resultados de la solución aproximada (cálculo numérico) de unas ecuaciones que se acercan a una caracterización del flujo. Para ello debe asistir a la génesis de alguna imagen simulada, creando su propia construcción cognitiva de lo que representa en realidad. Ello conduce a que, reconociendo los signos de este lenguaje gráfico descriptivo, las imágenes de la CFD tengan credibilidad para el alumno. En las dos partes que se acaba de describir, desempeña un papel relevante la figura del Tutor Facilitador desarrollada por los autores en anteriores contribuciones (Vicéns & Zamora, 2011; Vicéns, 2012).

4 Desarrollo de la actuación pre-competencial

Este procedimiento requiere una solidez en la trama de contenidos precisos para el aprendizaje constructivista del alumno. Para ello, se inicia el proceso con determinadas actuaciones de tipo pre-competencial para procurar o garantizar las competencias previas y transversales necesarias.

El desarrollo de esta actuación tiene lugar en dos etapas. La primera se centra en las competencias previas o transversales que el alumno debe poseer, sin que se tenga una confianza plena en las certificaciones administrativas anteriores. La segunda, se focaliza en competencias no curriculares, pero necesarias. La distinción entre curricular y no curricular es relevante en el contexto del proceso de Bolonia, por estar el tiempo crediticio rígidamente acotado para cada asignatura.

Las actuaciones relacionadas con las competencias previas curriculares no deben computarse como consumo de tiempo crediticio asignado a las competencias específicas de la materia. Básicamente se trata de tres actuaciones del alumno, con la asistencia del Tutor Facilitador:

- Revisión de las competencias previas necesarias.
- Autoevaluación de estas competencias por parte del alumno.
- Subsanción de las deficiencias advertidas en la autoevaluación.

5 Desarrollo de la actividad competencial

5.1 Elementos previos

Las actuaciones focalizadas en competencias que pueden no ser previas, o incluso en competencias extracurriculares sí corren el riesgo de ser contabilizadas como tiempo crediticio, tanto en la vertiente presencial como en la no presencial. Ello lleva a procurar al alumno un soporte documental expresamente elaborado, muy diferente de la extendida transparencia. Con el objetivo de obtener la máxima eficacia, este soporte debe ser autosuficiente, facilitando la información tan prolijamente como sea necesario, para hacer razonablemente innecesaria la consulta personal salvo en casos extremos. Se opta por dejar a un lado el aprendizaje autónomo, hasta que las condiciones motivacionales del alumnado, su nivel competencial previo y la consistencia de los diseños curriculares permitan su desarrollo.

En esta etapa, en primer lugar se explicita al alumno los conceptos básicos de la simulación numérica, exponiendo un tutorial conceptual que explica la discretización, tanto del espacio y el tiempo, como de las Ecuaciones de Navier Stokes. Esta discretización se realiza para caracterizar el flujo en el interior de un conducto de geometría simple. En esta simulación tipo

se identifican las fases de pre-proceso, proceso y post-proceso. Seguidamente, se muestra la implementación mediante el desarrollo de un tutorial.

El alumno debe ver en la CFD una imagen funcional, operativa y manejable del fenómeno simulado. Se pretende que no adquiera una visión utilitarista de la CFD como mera caja negra, sino que la asuma como una herramienta constructivista con la que referenciar los conceptos teóricos a medida que adquiere los contenidos. El alumno reconstruye el camino desde los datos a la representación numérico/espacial de la simulación; asume que la representación geométrica es un correlato correspondiente con la supuesta realidad; y esta la imagen le sirve de guía, de confirmación de hipótesis y de enseñanza real de supuestos teóricos.

5.2 Apoyo a los contenidos competenciales curriculares

Se considera la Turbomáquina Hidráulica como un conducto con segmentos de diversa complejidad: cámara espiral, distribuidor, canal del rotor y tubo de aspiración. Como elementos móviles, el rotor con sus álabes, y los álabes del distribuidor (Zamora et al., 2010; Vicéns & Zamora, 2012). Sobre este esquema se identifican y señalan los obstáculos epistemológicos que pueden presentarse en el aprendizaje por parte del alumno del comportamiento de cada uno de estos componentes.

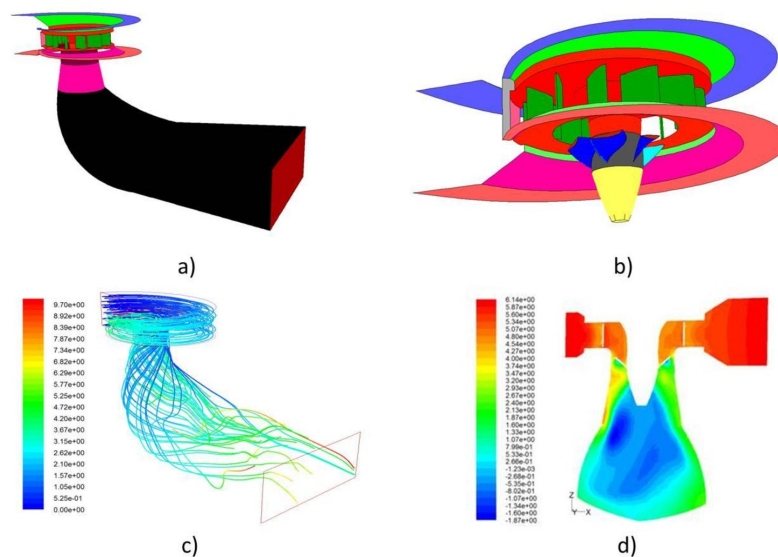


Figura 2: a) Turbina completa (se ha omitido parte de la cámara espiral para visualizar el distribuidor. b) Detalle del distribuidor y el rotor. c) Líneas de corriente, de color cambiante con el paso del tiempo, para apreciar el tiempo de residencia. d) Sección meridiana, con los valores de la presión total.

Con las imágenes de la simulación de la turbina completa se pretende en primer lugar, que el alumno advierta las posibilidades de la CFD, y que esto pueda obrar como motivación (González, 2005) para un ulterior interés personal en ella (Figura 2-a). En la Figura 2-b se detalla la zona del rodete y el distribuidor como indicación de que es posible analizar detalles concretos, con la limitación de la capacidad (y tiempo) de computación de que se disponga. En la Figura 2-c se hace frente a un obstáculo pertinaz, la bilinealidad excluyente, que suele dejar a un lado el tiempo como variable si existen otras variables conjuntamente. En esta figura, el color indica el tiempo de residencia de una partícula fluida; se advierte que existen trayectorias de partículas de casi diez segundos de evolución.

5.3 Cámara espiral

El obstáculo epistemológico didáctico radica aquí en la sustitución de la geometría por el álgebra, en detrimento de la intuición espacial (Armendáriz et al., 1993). El alumno no suele percibir la relevancia del diseño de la cámara espiral para que la velocidad del agua al acometer el distribuidor sea lo más uniforme posible en su contorno para facilitar el equilibrio. Esto deriva en parte de que no existe un modelo matemático razonable que describa el comportamiento del flujo en su interior. Por ello, la visualización del comportamiento puede facilitar la comprensión de su función.

El alumno puede comprobar (Figura 3-a) que la distribución de velocidades es concéntrica en el plano ecuatorial. El flujo acomete el distribuidor con un campo de velocidad axilsimétrico. En la Figura 3-b, se observa que el flujo que desciende hacia el canal del rotor es igualmente axilsimétrico, de modo que acomete el rodete sin desequilibrios. Esto es importante para no generar flujos secundarios que afecten a la eficiencia en el rodete.

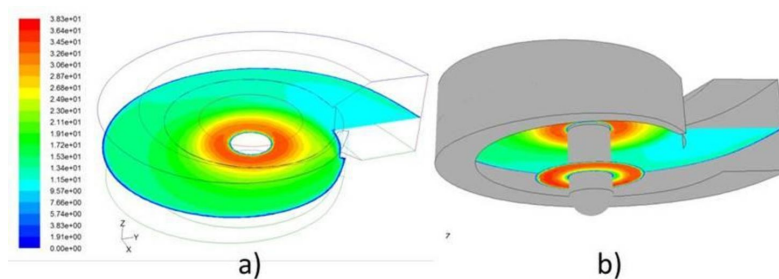


Figura 3: a) Curvas de nivel de la velocidad en el plano ecuatorial de la caja espiral. b) Imagen en la que se añaden las curvas de nivel de la velocidad en el canal de rotor.

5.4 Distribuidor

El distribuidor plantea al alumno un obstáculo epistemológico de preponderancia de las reglas (Schneider, 2008) en un conflicto entre la concepción matemática y la concepción física. A la salida del distribuidor, la velocidad axial sólo depende del caudal por conservación de la masa, en tanto que la velocidad azimutal la determina la posición de los alabes del distribuidor (Figura 4). El intercambio de momento cinético que se produce por el cambio en el campo azimutal de velocidad se cede al rodete para comunicarle la energía mecánica necesaria, como expresa el Teorema de Euler. La misión del distribuidor es la de conseguir en cualquier situación de caudal (velocidad radial) la mayor componente azimutal modificando la orientación de sus álabes, siempre que el flujo que llegue al rodete sea eficiente. Es importante aquí que el alumno perciba que la simulación puede simular orientaciones que en la realidad no son factibles por los choques y los desprendimientos de flujo en el rodete.

5.5 Comportamiento del álabe

En una turbina hidráulica, existe una clara variación del ángulo de ataque del flujo sobre el álabe con la distancia al eje del rotor. Los problemas para el alumno parten de cómo imaginar el flujo turbulento tridimensional que genera un perfil al recibir un flujo, y qué efectos tiene en su comportamiento. Los obstáculos que se presentan son el determinismo conductista, y el rechazo a la tridimensionalidad geométrica y, por consecuencia, matemática.

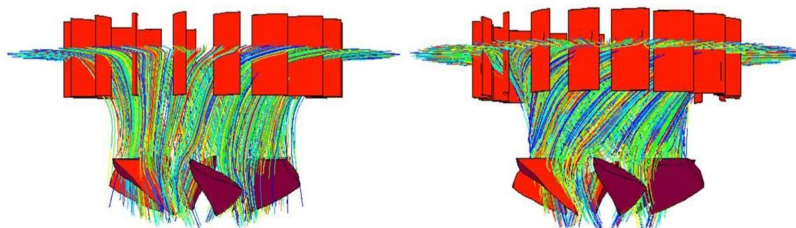


Figura 4: A igualdad de caudal, la orientación de los álabes del distribuidor determina la velocidad azimutal y, por tanto, el triángulo de velocidades.

En la Figura 5 se advierte la diferente distribución de presiones alrededor del álabe según su ángulo de ataque, caracterizando la cara de succión y la de presión. Las imágenes están obtenidas mediante secciones virtuales del álabe a distancia creciente del eje del rotor. Por la morfología y la disposición de los álabes sobre el cuerpo central del rodete, el alumno aprecia que necesariamente se ha de producir una rotación, y con qué sentido. Es evidente la conveniencia de una simetría en el campo de velocidades para evitar tensiones mecánicas al actuar desequilibradamente sobre el eje del rotor.

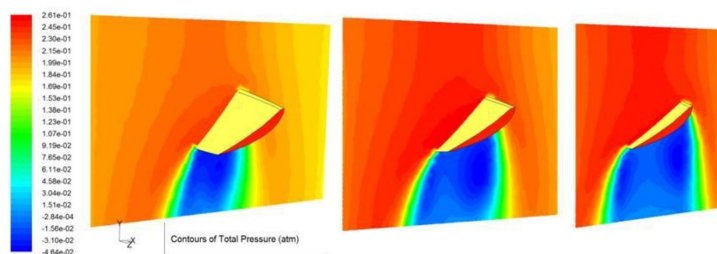


Figura 5: Distribución de la presión en diversas secciones del álabe. Se intuye la dirección del giro en por el gradiente de presiones. De igual modo, la fuerza que actúa sobre cada sección es diferente, en función del radio.

En la Figura 6 se muestra la extrema turbulencia tridimensional generada por una sección del álabe. Dado que la turbulencia no es coplanaria, el resultado a lo largo del álabe genera tales interferencias intrínsecas, que el flujo aquí carece de modelo algebraico. Precisamente por este comportamiento, incluso las Ecuaciones de Navier-Stokes resultan insuficientes, de modo que se precisa algo aún más indeterminista, como son las Ecuaciones de Reynolds del flujo turbulento (esto es, las Ecuaciones de Navier-Stokes modificadas para tener en cuenta los efectos de la turbulencia). Con éstas, no sólo tenemos ecuaciones sin solución analítica o exacta, sino unas ecuaciones abiertas sobre valores fluctuantes promediados que caracterizan la turbulencia (Fernández Oro, 2012). Con esta percepción, se refuerza en el alumno la noción indeterminista y simuladora frente al determinismo modelizador algebraico.

5.6 Canal del rotor

Un obstáculo frecuente para el alumno es la preponderancia de la parte sobre el conjunto, con una jerarquización indebida e infravaloración de elementos. Es el caso del canal de rotor, cuya importancia podría parecer escasa. Lo cierto es que si el canal del rotor está correctamente diseñado debe garantizar que en ausencia de los elementos móviles, no se generen turbulencias añadidas (desprendimientos de la corriente, flujos secundarios). En la Figura 7-a se observa la distribución del módulo de la velocidad. En la Figura 7-b se representan las líneas de corriente.

5.7 Rodete

En el rodete tiene lugar la transferencia de energía del flujo de agua a un elemento mecánico, el eje, que transmite la potencia al generador (Figura 8). Esta transferencia presenta como obstáculo epistemológico que el alumno presuma la validez generalizada de la Ecuación de Bernoulli y se encuentre con la aparente contradicción entre la equivalencia algebraica de la presión y de la velocidad, y el hecho de que la continuidad determine rígidamente la velocidad axial. Lo que ocurre es que en este caso, al tratarse de un elemento móvil, la Ecuación de Bernoulli es aplicable en ejes relativos, teniendo en cuenta además el potencial correspondiente a la fuerza centrífuga (además, solo sería estrictamente válida suponiendo flujo sin pérdidas); la distribución de presión dada por la Ecuación de Bernoulli debe ajustarse entonces al campo de velocidad absoluta. La variación de momento cinético derivado del campo absoluto de velocidades es lo que precisamente interviene en la Ecuación de Euler y da lugar a la altura intercambiada. La simulación numérica puede contribuir al conocimiento del comportamiento del flujo, coadyuvando a superar los obstáculos del aprendizaje mediante la visualización de los campos de presión y velocidad.

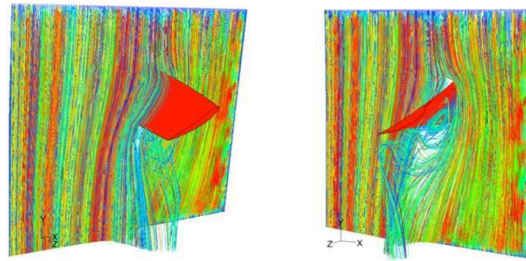


Figura 6: Turbulencias extremas (desprendimientos de la capa límite, flujos secundarios superpuestos) generadas por una sección del álabe. Son de una complejidad tal que las hace indeterminables algebraicamente.

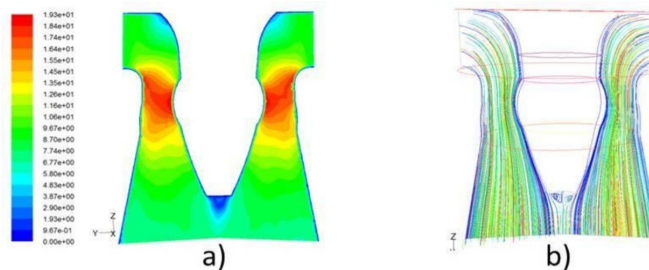


Figura 7: Canal del rotor debidamente dimensionado. a) Distribución de la velocidad. b) Líneas de corriente sin turbulencias ni flujos secundarios.

5.8 Tubo de aspiración

Respecto al tubo difusor, o tubo de aspiración (Figura 9), el alumno tropieza con dos obstáculos epistemológicos: la presunta linealidad causada por la aparente unidireccionalidad del flujo, y el respeto a las normas o reglas previamente establecidas. Por el primero, el alumno acepta que el rotor influye aguas abajo sobre el tubo, pero no advierte que la influencia del tubo determina la eficiencia del mismo rotor por la conversión de energía cinética en energía de presión. Por el segundo, el alumno no tiene previsto que el principio de continuidad es global (condición aritmética), por lo que no impide que coexistan flujos invertidos en cualquier sección

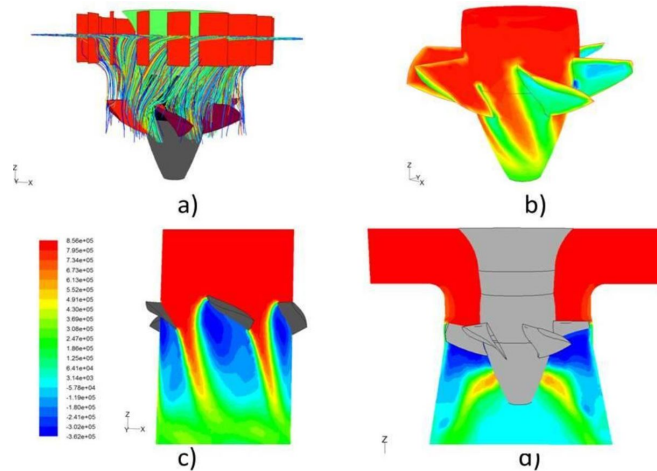


Figura 8: a) Líneas de corriente de la velocidad absoluta en la zona distribuidor-rodete. b) Presión total sobre la superficie del rodete. c) Distribución de presión total en una superficie de corriente cilíndrica proyectada. d) Salto de presión total a través del rodete.

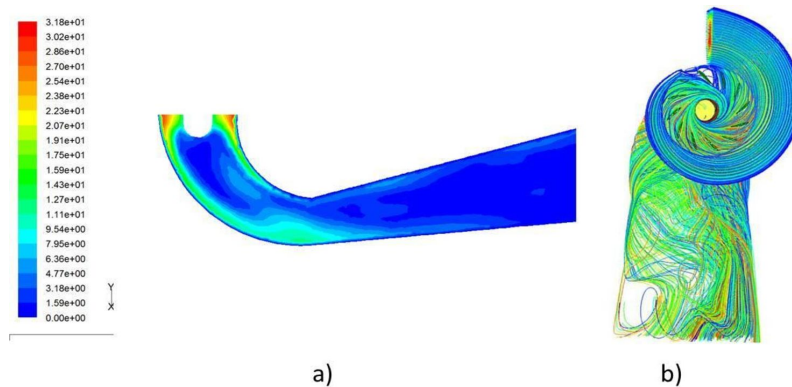


Figura 9: a) Curvas de nivel del módulo de la velocidad en el plano meridiano del difusor. b) Visión cenital de la masa líquida definida por las líneas de corriente. Se aprecia la progresiva complejidad del flujo del fluido. La zona sin líneas se corresponde con áreas de recirculación.

del tubo, incluida la sección de salida del mismo (con tal de que el caudal resultante respete la conservación de la masa).

6 Conclusiones

De los estudios desarrollados, se infiere que el hecho de trabajar sobre obstáculos epistemológicos, identificándolos y filiendo su naturaleza, puede mejorar tanto la actitud de la enseñanza para detectarlos y para superarlos, como la actitud del alumno para consolidar el aprendizaje.

La percepción por parte del alumno de la relevancia de los obstáculos epistemológicos, además de su repercusión en las competencias específicas, puede generar una actitud metacognitiva de análisis crítico de sus dificultades futuras en otros aprendizajes.

El método de enseñanza-aprendizaje planteado puede facilitar los procesos de aprendizaje en materias clásicas de la Ingeniería como es la correspondiente a Turbomaquinaria Hidráulica, al tiempo que familiariza al alumno en un contexto facilitador amistoso con la simulación numérica

de flujos de fluidos (CFD) y con la simulación numérica en general. Todo ello puede promover en el alumno la motivación intrínseca relevante para el proceso de aprendizaje.

Por último, el procedimiento docente expuesto puede fomentar en el alumno el hábito de la autoevaluación y la autocorrección de competencias previas y transversales, con consecuencias favorables a largo plazo.

Referencias

-  [Armendáriz M. V. G., Azcárate C., Deulofeu J. \(1993\).](#)
Didáctica de las Matemáticas y Psicología.
Infancia y Aprendizaje 62-63, 101-113.
-  [Bronckbank A., MacGill I. \(2002\).](#)
Aprendizaje Reflexivo en la Educación Superior.
Madrid (Spain). Morata.
-  [Çengel Y. A., Cimbala J. M. \(2006\).](#)
Fluid Mechanics (Fundamentals and Applications).
New York (USA). McGraw-Hill.
-  [Fernández Oro, J.M. \(2012\).](#)
Técnicas numéricas en Ingeniería de Fluidos.
Barcelona (Spain). Reverté.
-  [González A. \(2005\).](#)
Motivación Académica. Teoría, Aplicación y Evaluación.
Madrid (Spain). Pirámide.
-  [Mataix C. \(2009\).](#)
Turbomáquinas Hidráulicas.
Madrid (Spain). ICAI-ICAIDE.
-  [Schneider M. \(2008\).](#)
Traité de didactique des mathématiques.
Liège (Belgium). Université de Liège.
-  [Tu J. \(2008\).](#)
Computational Fluid Dynamics, a Practical Approach.
New York (USA). Elsevier.
-  [Vicéns J. L. \(2012\).](#)
Compromiso ético versus régimen disciplinario. Una propuesta para la Enseñanza en la Ingeniería.
Actas del XV Congreso Nacional y V Iberoamericano de Pedagogía,
440-446, Burgos, Spain.
-  [Vicéns J. L., Zamora B. \(2011\).](#)
Propuesta de una etapa pre-proceso en los proyectos didácticos de materias de Ingeniería.
Actas del Congreso Internacional de Innovación Docente, 323-336, Cartagena, Spain.
-  [Vicéns J. L., Zamora B. \(2012\).](#)
A Teaching-Learning Method Based on CFD Assisted with Matlab Programming for Hydraulic Machinery Courses.
Computer Applications of Engineering Education.
-  [Zamora B., Sánchez A., Vicente P. G. \(2010\).](#)
Improvement of Engineering Learning on Applied and Selected Topics of Fluid Mechanics and Heat Transfer Courses Using Computational Fluid Dynamics.
International Journal of Mechanical Engineering Education, 38(2), 147-166.

Modelling in Science Education and Learning
<http://polipapers.upv.es/index.php/MSEL>