



Laboratorio virtual: solución de las ecuaciones de conservación mediante volúmenes finitos



Cintia Casado Merino

Profesora del Departamento de Tecnología Química y Energética de la Universidad Rey Juan Carlos

cintia.casado@urjc.es



Emanuele Schiavi

Profesor del Departamento de Matemática Aplicada de la Universidad Rey Juan Carlos

emanuele.schiavi@urjc.es



José Antonio Calles Martín

Profesor del Departamento de Tecnología Química y Energética de la Universidad Rey Juan Carlos

joseantonio.calles@urjc.es

| Fecha presentación: 24/07/2014 | Aceptación: 14/11/2014 | Publicación: 23/12/2014

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de un Laboratorio virtual de enseñanza-aprendizaje para la resolución de un problema modelo de Transferencia del Calor en la materia de Ingeniería Térmica del II curso del Grado de Ingeniero de Tecnologías Industriales de la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid. En el ámbito de la Dinámica de Fluidos Computacional y mediante el uso del software de simulación de Ansys Fluent se introduce el alumno al diseño, modelado del sistema, resolución, análisis y validación del modelo. El resultado de esta experiencia de aprendizaje es no solo la mera resolución del problema, inabordable con métodos didácticos tradicionales, sino el desarrollo de la combinación de destrezas, habilidades y conocimientos necesarios para la adquisición de algunas de las competencias generales y específicas de la Ingeniería Térmica.

Palabras clave: Transferencia de calor, Docencia, Dinámica de Fluidos Computacional, Ansys, Laboratorio virtual

Resum

En este treball es presenta el disseny d'un Laboratori virtual d'ensenyament-aprenentatge per a la resolució d'un problema model de Transferència de la Calor en la matèria d'Enginyeria Tèrmica del II curs del Grau d'Enginyer de Tecnologies Industrials de la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid. En l'àmbit de la Dinàmica de Fluids Computacional i per mitjà de l'ús del programari de simulació d'Ansys Fluent s'introdueix l'alumne al disseny, modelatge del sistema, resolució, anàlisi i validació del model. El resultat d'esta experiència d'aprenentatge és no sols la mera resolució del problema, inabordable amb mètodes didàctics tradicionals, sinó el desenvolupament de la combinació de destreses, habilitats i coneixements necessaris per a l'adquisició d'algunes de les competències generals i específiques de l'Enginyeria Tèrmica.

Paraules clau: Transferència de calor, Docència, Dinàmica de Fluids Computacional, Ansys, Laboratori virtual

Abstract

In the present work is showed the design of a teaching-learning Virtual Laboratory for the resolution of a Heat Transfer typical problem that appears in the matter "Thermal Engineering" during the II course of the Engineering in Industrial Technologies Degree taught at Rey Juan Carlos University of Madrid. In the field of Computational Fluid Dynamics and using the simulation software Ansys Fluent, the students are initiated in the design, system modeling, resolution, analysis and validation of the model. The result of this learning experience is not only the mere resolution of the problem, unapproachable with didactic traditional methods, but the development of the combination of skills, abilities and knowledge necessary for the acquisition of some of the general and specific competences of Thermal Engineering.

Key words: Heat Transfer, Teaching, Computational Fluid Dynamics, Ansys, Virtual Laboratory



1. Fundamento teórico

La reciente modificación de las titulaciones realizada en las Universidades del Estado para adaptarse al Espacio Europeo de Educación Superior ha provocado cambios importantes en los planes de estudio de las mismas. Los cambios se han centrado tanto en la carga lectiva, como en los contenidos y sobre todo en la implantación de metodologías de aprendizaje-enseñanza basadas en la adquisición de competencias más que en la adquisición de contenidos. Estas metodologías pretenden conseguir un mayor protagonismo e implicación del alumno en el proceso de aprendizaje, y además, posibilitar que desarrollen actitudes, destrezas y habilidades relacionadas con el desempeño de su futura actividad profesional (USDE 2001). En el caso de las titulaciones del ámbito de la ingeniería, y sobre todo cuando estas conducen a una profesión regulada, este hecho viene también reflejado en el propio ordenamiento jurídico (Real Decreto 1393/2007, de 29 de octubre), como es el caso que se presenta en este trabajo que afecta a la profesión de Ingeniero Industrial para el que existe una Orden Ministerial específica que indica las competencias a adquirir (Orden CIN/311/2009, de 9 de febrero).

Entre las diferentes metodologías que permiten el desarrollo de competencias y fomentan la participación activa del alumno destacan las que hacen uso de herramientas informáticas. En concreto en las titulaciones técnicas, la informática se ha convertido a día de hoy en un recurso imprescindible para que los egresados puedan desarrollar posteriormente su actividad profesional (Rahman *et al.* 2013). Tareas tales como el cálculo y simulación de procesos, la puesta en marcha de instalaciones, diseño y optimización de sistemas, análisis de datos y hasta la mera elaboración de informes y presentaciones requieren el uso de aplicaciones informáticas. Desarrollar las competencias y destrezas necesarias para que el alumno esté preparado para poder utilizar de forma adecuada el elevado elenco de herramientas disponibles es hoy en día una necesidad. Por ello, la formación de los alumnos en estas técnicas es fundamental (Regalado-Méndez *et al.* 2011). Sin embargo es todavía escaso el número de aplicaciones informáticas asociadas a la actividad profesional, que se enseñan en las escuelas de ingeniería. Destacan principalmente i) programas de ofimática, para que los alumnos escriban informes y realicen presentaciones de sus trabajos, ii) lenguajes de programación para diseñar programas más o menos complejos para desarrollar algún modelo avanzado y crear aplicaciones técnicas y iii) algunas herramientas de cálculo numérico y simbólico de matemáticas para realizar cálculos diarios y rutinarios. Sin embargo, todavía hay áreas que tienen un potencial crecimiento elevado como por ejemplo el campo de la Expresión Gráfica Aplicada a la Ingeniería (herramientas de CAD/CAM) y la modelización y simulación de sistemas.

En el caso de la simulación y modelización, existe la posibilidad tanto de simular procesos industriales de unidades de producción más o menos complejas a nivel macroscópico como también procesos físico-químicos concretos a nivel microscópico (Jong *et al.* 1998; Vargas *et al.* 2005). En este último caso, estos procesos se describen mediante ecuaciones en derivadas parciales que requieren en muchos casos algoritmos de resolución complejos. No obstante, existen en la actualidad aplicaciones informáticas comerciales que permiten realizar una descripción detallada del sistema y realizar análisis muy completos de sistemas complejos de interés industrial. Estas aplicaciones permiten comprender los as-

pectos físico-químicos que más afectan en el sistema estudiado y utilizarlas tanto en las etapas de diseño de las unidades industriales como en las etapas de análisis de problemas de una instalación ya construida y en operación.

Además, desde el punto de vista docente, los programas de modelización y simulación pueden aplicarse para facilitar la comprensión de ideas y conceptos fundamentales en las materias básicas de la ingeniería, como por ejemplo los Fenómenos de Transporte. El uso de estas herramientas por parte del alumno, asistidos por un docente, permite desarrollar la capacidad de análisis, observando y estudiando los resultados obtenidos al aplicar un modelo que describa las leyes físicas y químicas de un sistema que el mismo establezca. De esta forma, el alumno puede interaccionar con la aplicación y realizar simulaciones que representen diferentes escenarios de un mismo sistema con objeto de analizar el efecto de las variables y/o optimizar el funcionamiento del mismo. El uso de sistemas informáticos presenta dos ventajas adicionales. Por un lado, permite abordar el estudio de sistemas más complejos que sería inviable poder analizar mediante la resolución manual de dichas ecuaciones por parte de los alumnos. Y en segundo lugar, ponen a disposición de los alumnos unas herramientas de visualización y tratamiento de los resultados enormes, lo cual facilita la comprensión y asimilación de las conclusiones obtenidas, así como consigue atraer la atención y fomentar la participación activa de los alumnos (Szabo y Hastings, 2000; Jiomoyiannis y Komis 2001).

2. Contexto y objetivos de la experiencia

La asignatura en la cual se ha desarrollado la experiencia se denomina “Transmisión de Calor” y pertenece al grado de Ingeniería de Tecnologías Industriales. Es una asignatura obligatoria de 4,5 ECTS, que se imparte en el segundo cuatrimestre del segundo curso del grado y que forma parte de la materia obligatoria: “Ingeniería Térmica” (Orden CIN/351/2009, de 9 de febrero). El objetivo global que se pretende alcanzar con esta asignatura es: “conocer los mecanismos y ecuaciones básicos de transmisión de calor para diseñar los equipos y analizar los equipos industriales donde se intercambian flujos de energía así como establecer las ecuaciones y procedimiento de diseño y análisis de los sistemas de intercambio de calor”. De los 4,5 ECTS, 3 se desarrollan en aula convencional y 1,5 en el laboratorio.

El formato de la experiencia docente desarrollada ha sido el de una práctica de laboratorio, puesto que permite una mayor interacción del docente con el alumno y se trabaja en grupos más reducidos que la alternativa de hacerlo en un aula de informática convencional con todo el grupo de alumnos. Se ha preparado un guion detallado al que el alumno tiene acceso con suficiente antelación antes de la realización de la práctica. La experiencia se ha puesto en práctica durante los cursos académicos 2012-13 y 2013-14 con resultados satisfactorios.

En concreto, el sistema abordado consiste en un sólido alrededor del cual circula un fluido a diferente temperatura y entre los cuales se produce transmisión de calor (sistema conocido como aleta o superficie extendida). En problemas reales, muy a menudo, el flujo de calor tiene lugar a través de geometrías (dominios) complejas mediante los mecanismos de conducción y convección, en régimen transitorio o estacionario, laminar o turbulento. El sistema planteado requiere la resolución de la ecuación de conservación de energía, tanto para el sólido (dominio Ω_S) como para el fluido

(dominio Ω_F), y de las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento y de materia en el fluido, cuyos fundamentos se pueden consultar con más detalle en la bibliografía especializada (Gengel 2003; Incropera et al. 1999; Miranda et al. 2001; Elman et al. 2005).

Suponiendo régimen estacionario, las ecuaciones de conservación para el fluido vienen dadas por la ecuación de conservación de la masa, la conservación del momento y la conservación de la energía. Considerando el fluido con propiedades físicas constantes (densidad, viscosidad), la ecuación de continuidad (conservación de la masa), viene dada por la condición de incompresibilidad de divergencia nula:

$$\nabla \cdot \bar{V} = 0 \quad \bar{x} \in \Omega_F \quad [1]$$

Siendo el campo de velocidades que verifica la ecuación de conservación del momento:

$$\nabla \cdot (\rho |\bar{V}|^2) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} \quad \bar{x} \in \Omega_F \quad [2]$$

Representando ρ a la densidad del fluido, p al campo de presiones y en la que no aparecen los efectos inerciales debido al régimen estacionario. Utilizando la ecuación [1], el tensor de stress viene dado por la parte simétrica del gradiente de velocidades en la forma:

$$\bar{\tau} = \mu [(\nabla \bar{V})^T + \nabla \bar{V}] \quad \bar{x} \in \Omega_F \quad [3]$$

Donde μ es la viscosidad del fluido.

El acoplamiento con la parte térmica tiene lugar a través de la ecuación de conservación de la energía. En forma de balance difusivo-convectivo:

$$\rho c_P \nabla \cdot (\bar{V} T) = \nabla \cdot (k_F \nabla T) \quad \bar{x} \in \Omega_F \quad [4]$$

siendo k_F la conductividad del fluido. En esta ecuación se han despreciado los efectos de disipación viscosa debido al fuerte gradiente de temperatura entre la parte fluida y la sólida. En todos los casos se ha considerado régimen laminar para un fluido newtoniano.

En la parte sólida del dominio, representada por la aleta, la ecuación conservación de la energía toma la forma de un proceso difusivo estacionario.

$$\nabla \cdot (k_S \Delta T) = 0 \quad \bar{x} \in \Omega_S \quad [5]$$

En el régimen transitorio la ecuación de conservación del momento [2] se escribe en la forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{V}) + \nabla \cdot (\rho |\bar{V}|^2) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} \quad (\bar{x}, t) \in \Omega_F \times (0, T^*) \quad [6]$$

Siendo T^* el horizonte temporal de la simulación, $\bar{\tau}$ el tensor de tensiones. Y en el caso de la ecuación de conservación la energía, en régimen no estacionario se tiene:

$$\rho c_P \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{V} T) \right) = \nabla \cdot (k_F \nabla T) \quad (\bar{x}, t) \in \Omega_F \times (0, T^*) \quad [7]$$

para la zona fluida, donde hay un proceso difusivo-convectivo.

para la zona sólida, donde hay proceso puramente difusivo.

Las condiciones de contorno que se han establecido en las paredes frontera de los dominios fluido y sólido son:

- Para el fluido, se ha establecido una sección de entrada y salida de flujo. En la pared de entrada del fluido, se imponen condiciones de velocidad de entrada y temperatura constantes y conocidas. En la pared de salida del dominio fluido, imponemos una condición de salida del flujo plenamente desarrollado, donde el flujo difusivo para todas las variables de flujo en la dirección de salida es cero. En el resto de paredes del fluido se ha establecido la condición de simetría, es decir, el flujo normal de todas las variables es cero, representado por la siguiente ecuación:

$$J \cdot N = -k_F \nabla T \cdot N = 0 \quad [9]$$

- Para el sólido, se ha establecido la condición de entrada de temperatura constante, en uno de los extremos, y en el opuesto (contacto con el fluido) se considera aislado. La pared lateral (está en contacto con el fluido con el que intercambia calor por convección), es una pared acoplada térmicamente con el fluido:

$$-k_S \nabla T_S \cdot N = k_F \nabla T_F \cdot N \quad [10]$$

Una condición de no deslizamiento para el campo de velocidades del fluido a lo largo de la pared cierra el sistema de ecuaciones estacionario junto con las necesarias condiciones iniciales para las ecuaciones transitorias.

El sistema de ecuaciones resultante, junto con las correspondientes condiciones de contorno, no puede resolverse por métodos analíticos y es necesario emplear software especializado para la resolución del problema, discretización del dominio y de las ecuaciones, visualización de resultados y validación del modelo. Estas ecuaciones se introducen previamente en la parte teórica de la asignatura obteniéndose la solución analítica para casos muy sencillos. Los alumnos han tenido la oportunidad de estudiar los métodos numéricos en una asignatura anterior de Matemáticas y en esta práctica obtienen la solución del sistema de ecuaciones mediante la utilización de métodos numéricos para formulaciones integrales como elementos o volúmenes finitos (Elman et al. 2005). En el desarrollo de la solución, se evalúa el perfil de temperatura y el caudal de calor transmitido a través de la aleta en régimen estacionario y no estacionario y además se analiza la influencia tanto de parámetros de la superficie extendida como del fluido que lo rodea. Los alumnos estudian de manera sencilla el

efecto de la transmisión de calor calculando la solución numérica para superficies extendidas con diferentes geometrías y en diferentes

condiciones de operación. Todos los detalles descriptivos del caso estudiado, modelo matemático y simulaciones y casos que tienen que hacer los alumnos se describen con detalle en

el guion de prácticas. En el mismo, también se especifica como tienen que presentar los resultados obtenidos (mediante tablas y gráficas específicas) y que resultados tienen que discutir y conclusiones a extraer.

Competencias Generales		Competencias específicas	
cg1	Capacidad de análisis y síntesis	ce7	Conocimientos de termodinámica aplicada y transmisión de calor. Principios básicos y su aplicación a la resolución de problemas de ingeniería
cg2	Capacidad de organización y planificación		
cg3	Comunicación oral y escrita		
cg5	Capacidad de gestión de la información		
cg6	Resolución de problemas		
cg7	Toma de decisiones		
cg8	Trabajo en equipo		
cg11	Razonamiento crítico		
cg17	Habilidad para trabajar de forma autónoma		
cg20	Capacidad de aplicar los conocimientos teóricos en la práctica		
cg21	Uso de internet como medio de comunicación y como fuente de información		

Tabla 1. Competencias generales y específicas a desarrollar en la asignatura donde se desarrolla la experiencia docente.

La herramienta comercial utilizada se denomina: ANSYS Fluent, aplicación que es un referente en simulación computacional para el estudio de diferentes fenómenos físico-químicos, y que se usa mucho en las empresas de ingeniería (<http://www.ansys.com>). Además, esta herramienta será posteriormente utilizada por los alumnos en otras materias de su grado, con lo cual les sirve como introducción a la misma.

Los objetivos concretos de la experiencia de innovación docente desarrollada son:

- Trabajar competencias propias de la materia y del grado de forma transversal con una herramienta que permite abordar problemas complejos y profundizar en las variables que afectan a la transmisión de calor en fluidos y sólidos.
- Iniciación al conocimiento de una herramienta muy útil y con una aplicabilidad bastante extendida en el campo de la ingeniería. Esa misma herramienta se utilizará en otras materias del grado.
- Aplicar una metodología docente motivadora y que permite una mayor implicación del alumno en el proceso de aprendizaje.

En la Tabla 1 se indican las competencias generales y específicas que se deben desarrollar en la asignatura según la guía docente de la asignatura (Calles y Rodríguez). En con-

creto, las competencias que se desarrollan con el material docente desarrollado se corresponden con las competencias generales cg1, cg3, cg6, cg8, cg11 y cg20, además de la competencia específica ce7.

3. Metodología

Como se ha comentado previamente, el uso de programas como ANSYS Fluent ofrece una manera muy eficiente de explorar problemas complejos de diversos tipos sin necesidad de su construcción física. El desarrollo de técnicas matemáticas avanzadas para el modelado del movimiento de los fluidos y de los procesos de transferencia del calor ha derivado en el diseño de algoritmos numéricos de resolución que integran, a través de software específico las distintas fases de resolución del problema en un único marco de trabajo, denominado workbench. A través de esta útil herramienta es posible resolver y modificar adecuadamente el proyecto inicial permitiendo un análisis paramétrico del modelo y su optimización.

De forma general, para resolver un problema de dinámica de fluidos computacional hay que seguir una serie de pasos:

- 1) Definir los dominios sólidos o fluidos necesarios, es decir, las geometrías presentes sobre las que se resolverán las ecuaciones.
- 2) Generar el mallado. En esta etapa se dividen los dominios en un número finito de volúmenes diferenciales, o celdas, en las que se resolverán las ecuaciones.
- 3) Seleccionar los modelos físicos que se desean aplicar sobre cada dominio.
- 4) Establecer las condiciones de contorno en las superficies en las que sean necesarias.
- 5) Seleccionar las propiedades de los materiales.

A continuación se describen los pasos que los alumnos tienen que realizar durante el seminario. Para la realización de este laboratorio virtual se ha elaborado un guion de prácticas donde los alumnos tienen explicados de forma mucho más detallada los pasos que han de seguir para realizar las simulaciones, y para elaborar un informe entregable que deben completar como medio de evaluación.

3.1 Geometría

Para la preparación del material de la práctica se han desarrollado tres aletas de diferente geometría (barra circular, barra rectangular y placa plana), en dos tamaños diferentes utilizando el programa *DesignModeler* integrado en Ansys. A cada grupo de prácticas se le asignará una geometría diferente, con dos tamaños, con el objetivo de que, tras realizar las simulaciones, comparen los resultados obtenidos con los de los otros grupos con geometrías diferentes. Los alumnos abrirán el programa de dibujo para anotar las dimensiones de las superficies extendidas y familiarizarse con el programa, pero no es objeto de la práctica realizar el diseño de la geometría.

3.2 Mallado

El método de volúmenes finitos resuelve las ecuaciones discretizadas en cada volumen de control que compone la geometría (dominio computacional). Se ha enseñado a los alumnos a realizar dos mallados diferentes, y a ver la importancia de un mallado adecuado en la obtención de un resultado preciso. Se ha utilizado tanto el mallado automático

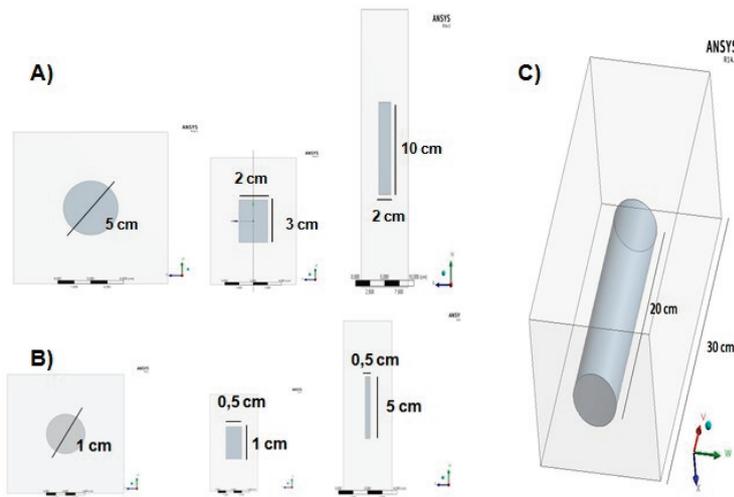


Figura 1: Dimensiones de las superficies extendidas estudiadas. A) Tamaños iniciales. B) Efecto de la disminución del tamaño. C) Longitud del dominio de aire y de la superficie extendida que se mantienen constantes en todos los casos.

tetraédrico del programa ANSYS Fluent, con un elevado número de celdas, como otro proceso de mallado local para el cambio a un mallado hexahédrico, con menor número de celdas. Además se han utilizado diferentes opciones de mallado que permiten aumentar el número de celdas en la capa límite térmica y fluidodinámica del fluido, así como cambiar el tamaño global de las celdas, aumentando la resolución. El mallado se ha realizado con el software *Ansys Meshing* y en todos los casos ha sido un mallado no estructurado (la forma de las celdas se adaptan a la geometría) y conforme (en la frontera entre el dominio de sólido y fluido las celdas son iguales). Con todos estos estudios se pretende que el alumno compruebe la independencia de la solución numérica con la resolución del mallado.

3.3 Condiciones de contorno

El siguiente paso consiste en la identificación de las fronteras o superficies del dominio. Para ello, los alumnos tienen que orientar la geometría e identificar las superficies de interés (Figura 3). Las condiciones de contorno utilizadas en el programa ANSYS Fluent han sido, para la entrada de aire, la condición de velocidad de entrada de aire, que se ha fijado en dos valores, 0,01 m/s o 5 m/s, y temperatura de entrada del aire de 298 K. Para la sección de salida de aire se ha utilizado la condición de salida *outflow* (la velocidad del flujo no viene prefijada sino que se calcula como parte de la solución a partir del campo de presiones). El resto de fronteras del aire se han establecido como simétricas.

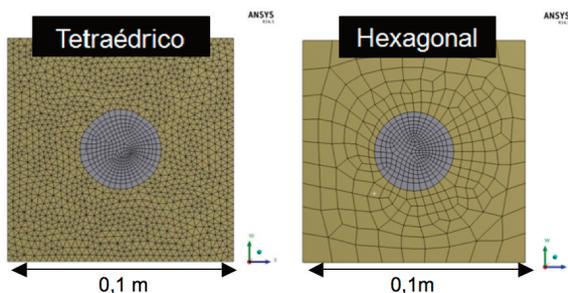


Figura 2: Ejemplo de diferentes mallados realizados en la geometría cilíndrica (superficie extendida y dominio de aire).

Para la superficie extendida se ha fijado la temperatura de la pared de la aleta que está en contacto con la pared de sujeción de la misma en un valor de 500 K, como entrada de energía a la aleta. El extremo opuesto de la aleta se fijó como pared adiabática y fue la variable de salida para calcular las temperaturas alcanzadas en los diferentes casos sobre esa pared. Se identificó la superficie lateral de la aleta en contacto con el fluido para obtener posteriormente el valor del flujo de calor intercambiado en esa superficie. Las paredes frontera entre el fluido y el sólido se definen como superficie y están acopladas térmicamente.

En este apartado, durante la realización de la práctica se discute con los alumnos las posibles condiciones de contorno que se pueden dar en casos reales aplicados y se les enseña cómo deben implementarse en la herramienta informática.

3.4 Configuración

Se ha seleccionado aire como material del fluido que rodea la superficie expandida y se han realizado las simulaciones de transferencia de calor en la aleta utilizando dos materiales para el sólido: el acero y el aluminio.

Se ha seleccionado el régimen fluidodinámico en el que circula el aire como laminar, aunque esta podría ser otra variable a estudiar en posteriores laboratorios, lo que permitiría entender la diferencia con el régimen turbulento así como la necesidad de resolver sistemas de ecuaciones más complejos para la determinación de la energía cinética y la disipación turbulenta.

Se han resuelto los casos tanto en régimen estacionario como en transitorio. Para estudiar el efecto de diferentes variables geométricas (tamaño y resolución del mallado) y fi-

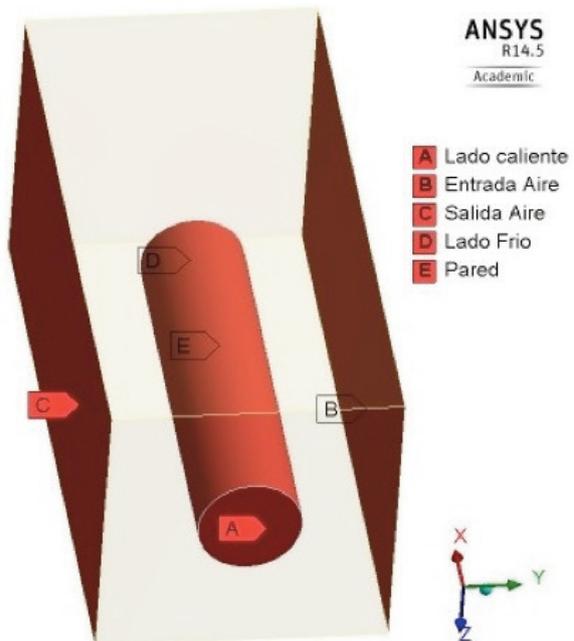


Figura 3: Identificación de las superficies de interés.

Nº Simulación	Tamaño	Calidad Mallado	Material aleta	Velocidad entrada aire (m/s)
1	Pequeño	Fina	Aluminio	0,01
2	Pequeño	Gruesa	Aluminio	0,01
3	Pequeño	Gruesa	Aluminio	5
4	Grande	Gruesa	Aluminio	0,01
5	Pequeño	Gruesa	Acero	0,01

Tabla 2: Resumen de casos para la simulación en régimen estacionario

sicas (material de la aleta y velocidad de entrada del flujo de aire) del problema se han resuelto 5 casos en régimen estacionario (ver Tabla 2).

Una vez realizadas las simulaciones, los alumnos pueden observar como en función del tipo de mallado los resultados cambian, lo que se debe a la mayor o menor resolución del método numérico y su relación con la mayor o menor aproximación del concepto de derivada al de incremento. Además, con el diferente tamaño del sistema, los alumnos pueden visualizar si se cumple o no la simplificación que se hace con muchos de estos sistema de considerar que la transmisión de calor en el interior de la aleta se puede considerar en una única dimensión o en dos (cuando el tamaño es mayor). Finalmente, al variar el material de la aleta, los alumnos pueden ver como en función de esta variable, la eficacia de una misma aleta (tamaño y geometría) se ve muy afectada, siendo el parámetro más importante de estos sistemas térmicos.

Para el caso transitorio se ha estudiado el efecto del tamaño del paso de discretización temporal en la convergencia de los distintos escenarios empleados. Los alumnos tuvieron que simular la respuesta del sistema a los 3 minutos disminuyendo el paso temporal hasta encontrar un paso suficientemente pequeño que ofrece una solución estable y convergente. Además, se ha estudiado el tiempo de resolución necesario para alcanzar el equilibrio y alcanzar un nuevo régimen estacionario.

3.5 Criterios de convergencia

Se ha matizado la importancia de fijar los criterios de convergencia en la obtención de la solución numérica. Para ello se han fijado los valores de los residuos, es decir, la norma de la diferencia entre dos iteraciones consecutivas.

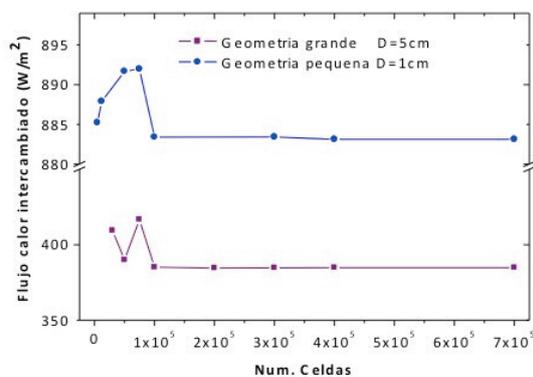


Figura 4: Efecto del número de celdas en la precisión del resultado para la barra circular.

La tolerancia especificada para ecuaciones de conservación discretas en todas las celdas, se ha establecido en valores de 10^{-3} para las velocidades y 10^{-4} para la energía. Los residuos se han de representar frente al número de iteraciones para comprobar su disminución hasta cumplimiento del criterio fijado.

Además, como segundo criterio de convergencia se ha representado también el valor promedio de la temperatura y el flujo intercambiado sobre las superficies de interés para comprobar que la solución no fluctúa durante al menos 100 iteraciones.

3.6 Post-procesado

Se ha enseñado a los alumnos a dibujar gráficas de temperatura y velocidad sobre las superficies de interés así como a trazar planos en los ejes de simetría y en cortes transversales donde visualizar los resultados. Además, se han trazado líneas y bandas radiales auxiliares para obtener gráficas de los perfiles radiales de temperatura. Se han obtenido los valores numéricos de temperatura alcanzada en el extremo de la aleta, así como de flujo de calor intercambiado con el aire. En el caso transitorio, los alumnos han aprendido a realizar videos y visualizar la transferencia de calor frente al tiempo.

4. Resultados

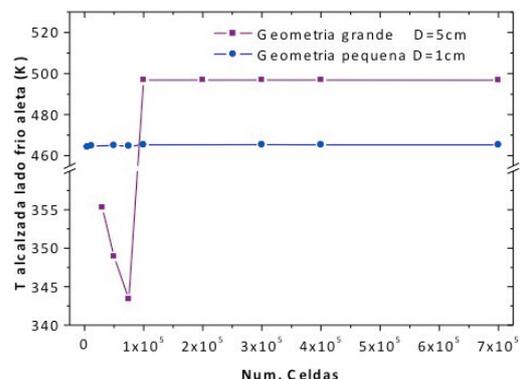
Para la evaluación de la práctica, los alumnos deben presentar un informe recogiendo los valores de las simulaciones obtenidas y realizando estudios comparativos del efecto de diferentes variables en la transferencia de calor. A modo de ejemplo se muestran diferentes resultados que los alumnos pueden obtener en esta práctica.

4.1 Influencia del mallado en barra circular

Los alumnos han podido comprobar (Figura 4) que por encima de 300.000 celdas el resultado es estable en la geometría circular para las dos dimensiones utilizadas, y ver la importancia que tendría en la precisión del resultado el trabajar con un número de celdas insuficientes (mallados demasiado gruesos).

4.2 Efecto de la velocidad del aire

Se han obtenido los perfiles de velocidad que se forman sobre la superficie extendida en función de la velocidad del aire y se ha estudiado cómo afecta la distribución de velocidades en la transferencia de calor. Para una mejor visualización de los resultados, han aprendido a visualizar los



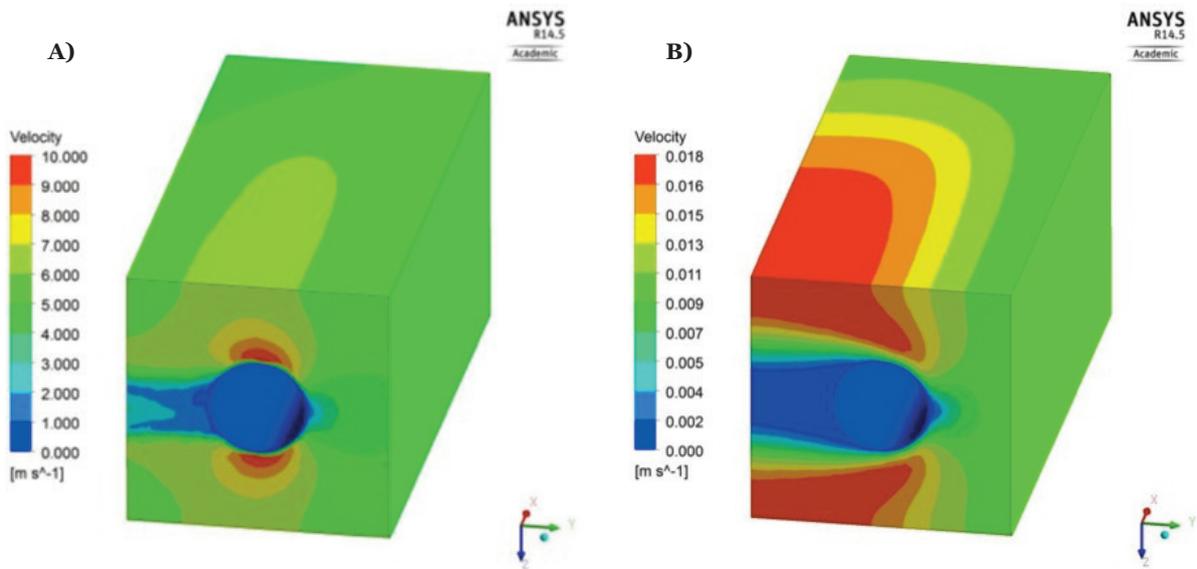


Figura 5: Contornos de velocidad sobre barra circular para A) Velocidad aire 5 m/s, B) 0,01 m/s

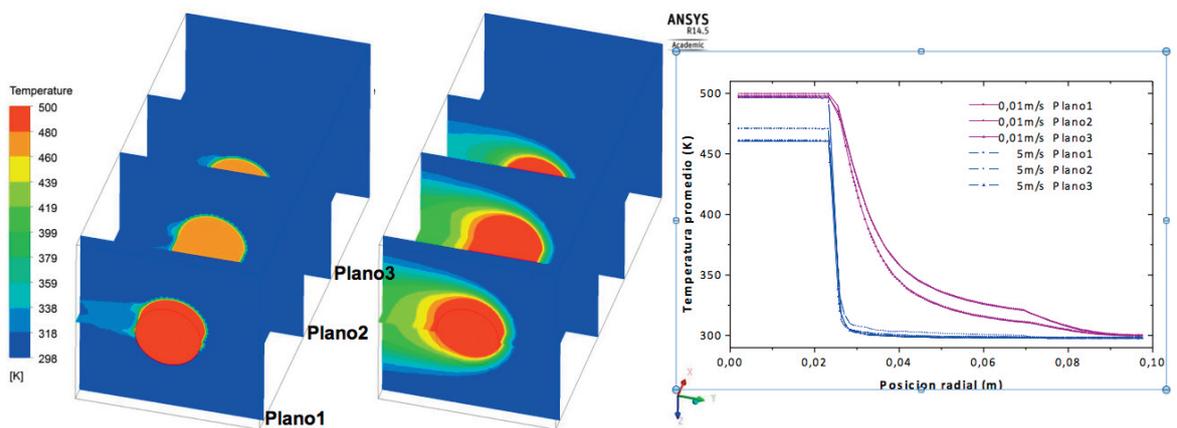


Figura 6: Contornos de temperatura sobre barra circular en diferentes planos. Plano1: 1 cm lado caliente, Plano 2: 10 cm, Plano 3: 19 cm, para A) Velocidad aire 5 m/s, B) 0,01 m/s. C) Medias circunferenciales de temperatura en sólido y aire calculadas en los planos previamente indicados.

valores en diferentes planos, y a obtener gráficas con el resultado de los valores de interés promediados en circunferencias concéntricas. Se presentan los resultados obtenidos de forma estacionaria para la superficie extendida cilíndrica cuando es seleccionado aluminio como material (Ver Figura 5 y Figura 6).

4.3 Efecto de la geometría

Los alumnos han podido comparar la eficacia en la disipación de calor de superficies extendidas con diferentes geometrías. Se muestra en la Figura 7 la comparación de la transferencia de calor a lo largo del eje longitudinal de las tres geometrías estudiadas cuando el material es aluminio.

Se ha obtenido (Figura 8) el valor del flujo de calor intercambiado en la superficie de contacto entre sólido y aire. Además, se ha representado la temperatura media a lo largo del sólido para las diferentes geometrías y con diferentes velocidades del aire.

4.4 Efecto del tamaño y material de la aleta

También se ha estudiado en este laboratorio el efecto de la reducción del área de intercambio de calor y material de

construcción de la aleta. Se presentan en la Figura 9 y la Figura 10 los resultados que los alumnos han podido obtener de la comparación entre casos realizados por diferentes grupos.

4.5 Resultado en régimen transitorio

Finalmente, los alumnos han aprendido a seleccionar el paso temporal adecuado para realizar las simulaciones en régimen no estacionario, y han podido realizar videos de la evolución de la temperatura en la aleta en función del tiempo. Como ejemplo (Figura 11) se muestran algunos perfiles de temperatura con diferente tiempo final, para un paso temporal de 1s (se ha encontrado que este paso es suficientemente pequeño) y aluminio como material.

5. Conclusiones

En este trabajo se presenta el desarrollo de un Laboratorio Virtual para la resolución de un problema modelo en procesos de transferencia del calor mediante utilización del software ANSYS Fluent. Este tipo de aplicaciones informáticas hace mucho más interesante y comprensivo el estudio de la transmisión de calor a los alumnos, permitiendo estudiar sistemas

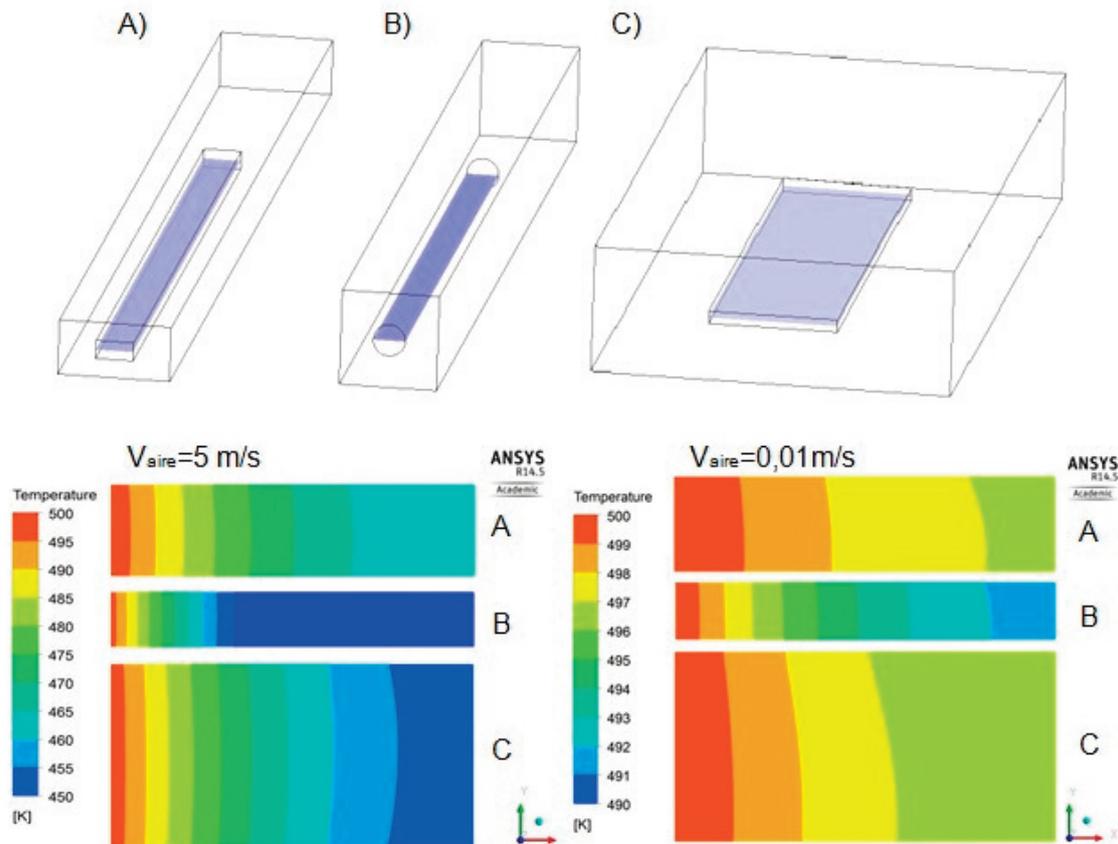


Figura 7: Contornos de temperatura a lo largo del eje longitudinal para la barra rectangular, barra circular y placa plana.

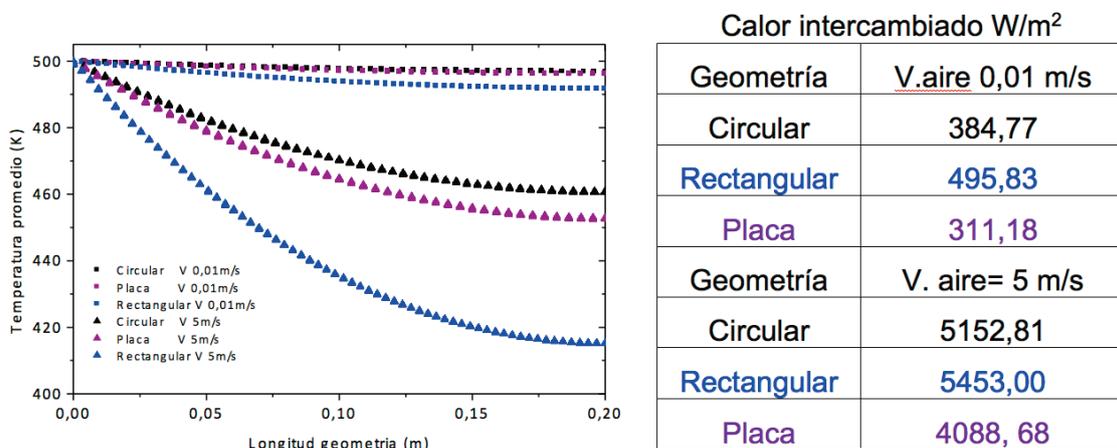


Figura 8: Temperatura promedio en el eje longitudinal de la superficie extendida. Valores de flujo de calor intercambiado entre sólido y aire.

complejos que no pueden resolverse de forma analítica, y realizando estudios paramétricos de manera sencilla y visual.

En concreto, en el laboratorio realizado los alumnos han podido estudiar:

- a) La importancia del tipo de mallado sobre los resultados obtenidos (tipo de malla, tamaño de celda, etc) y la independencia de la solución obtenida cuando se hace correctamente.
- b) Diferentes tipos de condiciones de contorno que se pueden presentar y como deben especificarse en la herramienta informática.

c) Además, con el diferente tamaño del sistema, los alumnos pueden visualizar si se cumple o no la simplificación que se hace con muchos de estos sistema de considerar que la transmisión de calor en el interior de la aleta se puede considerar en una única dimensión o en dos (cuando el tamaño es mayor).

d) Comparar la eficacia del sistema en función de la geometría de la aleta estudiada (barras circular y rectangular y placa plana).

e) Influencia del tipo de material de la aleta (definida por la conductividad térmica del mismo) sobre la eficacia de una misma aleta (tamaño y geometría).

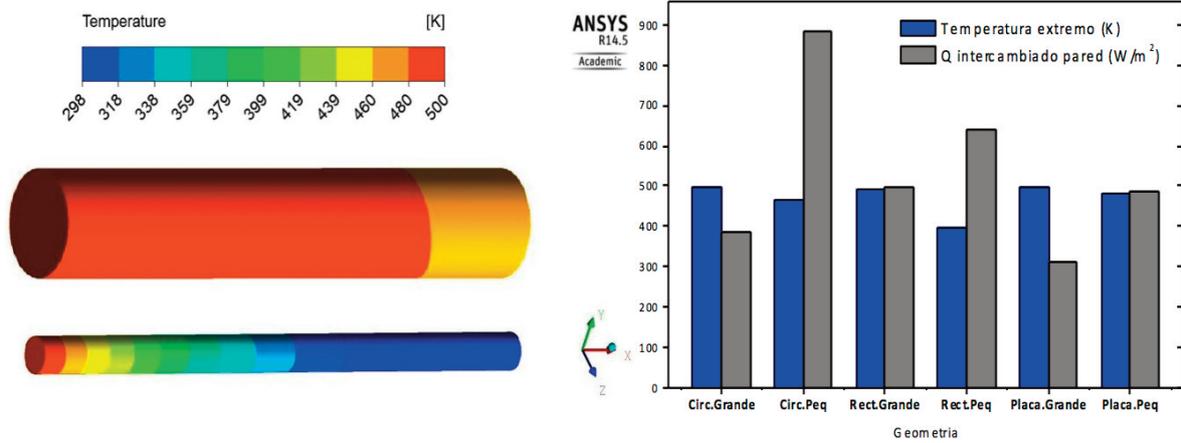


Figura 9: Perfiles de temperatura geometría circular de distintas dimensiones y resultados de temperatura obtenidos en el extremo de la aleta y flujo de calor intercambiado para diferentes geometrías y tamaños. Velocidad del aire=0,01 m/s.

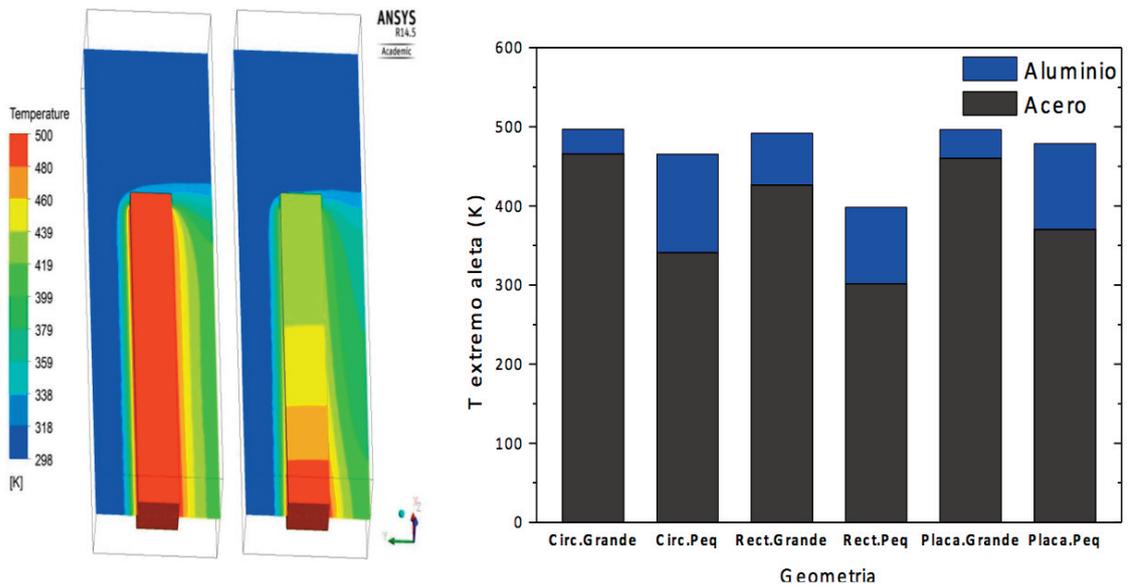


Figura 10: Perfiles de temperatura barra rectangular con diferente conductividad térmica y resultados de temperatura obtenidos en el extremo de la aleta para diferentes geometrías, tamaños y material sólido. Velocidad del aire=0,01 m/s.

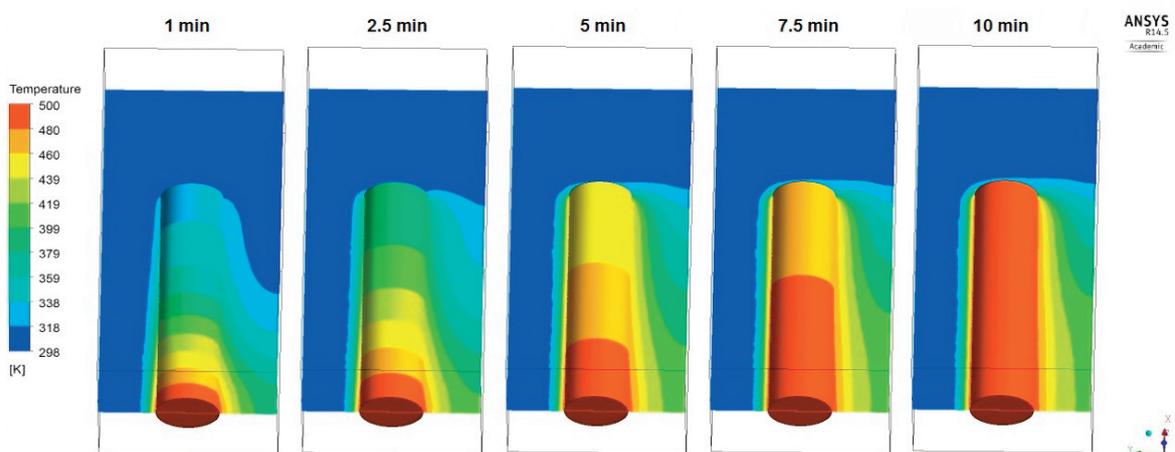


Figura 11: Evolución de la temperatura en la superficie extendida para diferentes instantes temporales. Velocidad del aire=0,01 m/s.

f) Influencia de la velocidad del aire sobre los perfiles de velocidad alrededor de la aleta y el flujo de calor intercambiado entre el sólido y el fluido.

g) Importancia de los criterios de convergencia utilizados para poder considerar que se alcanza la solución correcta, y la influencia que tiene en el tiempo necesario para realizar la simulación.

h) Efecto del tamaño del incremento de tiempo utilizado durante la solución en régimen transitorio sobre la bondad de la solución final obtenida así como la resolución de los perfiles de temperatura con el tiempo y el tiempo necesario para realizar las simulaciones.

Se trata de una experiencia piloto para introducir a los alumnos al manejo de software de simulación, que irá implementándose progresivamente en más asignaturas de la titulación. Con la salvedad de que el uso de los programas de simulación debe ir siempre acompañado de un refuerzo en la parte teórica y conceptual, analizando siempre el sentido físico de los resultados obtenidos, es muy prometedor observar como el interés, la participación y la motivación de los alumnos aumentan cuando reciben este tipo de apoyo didáctico.

6. Referencias bibliográficas

- Bird, T.F., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N. "Transport Phenomena", John Wiley & Sons. 1997.
- Calles, J.A., Rodríguez, R., Guía docente de la asignatura "Transmisión de calor" del grado de Ingeniería de Tecnologías Industriales de la Universidad Rey Juan Carlos.
http://www.urjc.es/estudios/grado/tecnologias_industriales/tecnologia_industrial.html.
- Elman, Howard C.; Silvester, David J.; Wathen, Andrew J. "Finite Elements and Fast Iterative Solvers with Applications in Incompressible Fluid Dynamics". Numerical Mathematics and Scientific Computation. Oxford Science Publications. 19 May 2005.
- Gengel, Y.A. "Transferencia de Calor", McGraw-Hill. 2003.
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P. "Fundamentos de Transferencia de Calor". Prentice Hall. 1999.
- Jimoyiannis A. y Komis, V. "Computer simulations in physics teaching and learning: a case study on students' understanding of trajectory motion". Computers & Education, 36, 2, 2001: 183-204.
- Jong T., van Joolingen, W.R.; "Scientific Discovery learning with Computer Simulations of Conceptual Domains", Review of Educational Research, 68, 2, 1998: 179-201.
- Miranda, A.L., Sainero, A. "Métodos numéricos aplicados a la transmisión de calor". CEAC. 2001.
- Orden CIN/311/2009, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Industrial. BOE nº 42, 18 de febrero de 2009.
- Orden CIN/351/2009, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial. BOE nº 44, 20 de febrero de 2009.
- Rahman, N.A., Hussain, M.A., Jahim, J.M, Kamaruddin, S.K., Abdullah, S. S. R, Kamaruddin, M.Z.F, "Integrating computer applications into undergraduate courses: Process control and utility design", Education for Chemical Engineers, 8, 2, 2013: e45-e57.
- Real Decreto 1393/2007, de 29 de octubre, por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales. BOE nº 260 de 30 de octubre de 2007.
- Regalado-Méndez, Alejandro; Peralta-Reyes, Ever y Báez-González, Juan G. "Aprendizaje Basado en Competencias Aplicado a una Asignatura de Transferencia de Calor", Formación Universitaria 4, 1, 2011: 13-18.
- Szabo A. y Hastings N., "Using IT in the undergraduate classroom". Computers & Education, 35, 2, 2000: 175-187.
- USDE, U.S. Department of Education, National Center for Education Statistics. Defining and Assessing Learning: Exploring Competency-Based Initiatives, Washington, D.C., USA (2001).
- Vargas, W.L., Riaño, C.A., Pineda, L.M.; "Ambientes Virtuales para la enseñanza de la Mecánica de Fluidos: Algunos ejemplos simplificados aplicando ANSYS". Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 15, 2005: 94-115.

| Cita recomendada de este artículo

Casado Merino, Cintia; Schiavi, Emanuele y Calles Martín, José Antonio (2014). Laboratorio virtual: solución de las ecuaciones de conservación mediante volúmenes finitos. @tic. revista d'innovació educativa. (nº 13). URL. Fecha de consulta, dd/mm/aaaa.