

PRÁCTICAS DE ORDENADOR, ADAPTADAS A LA EVALUACIÓN CONTINUA DE GRANDES GRUPOS, PARA PROBLEMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR MEDIANTE EL SOFTWARE EES

ERKOREKA GONZALEZ, Aitor ⁽¹⁾; MARTIN ESCUDERO, Koldobika ⁽¹⁾

FLORES ABASCAL, Ivan ⁽¹⁾; AZKORRA LARRINAGA, Zaloa ⁽²⁾; CAMPOS CELADOR, Álvaro ⁽³⁾

aitor.erkoreka@ehu.es

⁽¹⁾ E.T.S.I. de Bilbao, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, UPV/EHU

⁽²⁾ E.U. de Ingeniería Técnica de Minas y Obras Públicas, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, UPV/EHU

⁽³⁾ E.U. de Ingeniería Técnica Industrial de Eibar, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, UPV/EHU

RESUMEN

Tanto en la ETSI de Bilbao como en el resto de Escuelas Universitarias Técnicas de la UPV/EHU se imparte la transferencia de calor dentro de asignaturas con diversos nombres. En todas ellas se ha decidido seguir una guía docente similar en la cual la docencia magistral y de prácticas de aula se apoya mediante prácticas de ordenador y prácticas de laboratorio.

Muchos de estos grupos tienen más de 75 alumnos y para poder aplicarles una evaluación continua se ha optado por la realización de siete prácticas de ordenador de 1,5 h cada una utilizando el software Engineering Equation Solver® (EES) además de tres prácticas de laboratorio. La primera práctica de ordenador se utiliza para aprender a utilizar el software. Durante las siguientes seis prácticas se realizan diversos ejercicios relacionados con la teoría explicada durante las clases magistrales. Estas seis prácticas están divididas en dos partes, durante la primera hora el alumno realiza ejercicios guiados por el profesor y con ayuda de apuntes. Durante la última media hora de la práctica el alumno es examinado y evaluado. El método de evaluación es todo o nada, se distribuyen una serie de ejercicios parecidos a los realizados durante esa práctica y el alumno deberá llegar al resultado solicitado, en caso de llegar al número exacto obtiene un 5% de la nota final y en caso de no llegar no obtiene nada.

Tras la primera práctica introductoria, en las próximas tres prácticas se abordan problemas de conducción mediante diferencias finitas que resultarían inabordables mediante métodos analíticos. Luego se realizan dos prácticas con problemas de convección que requieren de un proceso iterativo para el cálculo de los coeficientes de convección. Finalmente se realiza una práctica de radiación en la que se plantea un sistema de ecuaciones complejo que sería costoso solucionarlo manualmente. En todas estas prácticas se abordan también estudios paramétricos que ayudan a la comprensión de los mecanismos de la transferencia de calor.

Se consiguen cuatro objetivos fundamentales. Primero, el alumno es capaz de afrontar problemas de conducción transitorios con condiciones de iniciales y de contorno complejas. Segundo, se facilita al alumno la comprensión de los tres mecanismos de transferencia de calor. Tercero, indirectamente el alumno se familiariza con el uso del EES y con la programación de problemas de ingeniería. Por último, destacar que se han preparado las prácticas para su fácil corrección, esto permite al profesor realizar una evaluación continua sin tener que revisar decenas de ejercicios.

Palabras clave: transmisión de calor, prácticas de ordenador, software EES, evaluación continua.

1. Introducción

El creciente uso de los ordenadores en las carreras universitarias permite utilizar diversos métodos de cálculo que serían impensables por vía manual. En el mundo de la transmisión del calor, la ecuación diferencial del campo de temperaturas para la conducción puede resolverse analíticamente para algunas geometrías y condiciones de contorno sin grandes dificultades. Sin embargo cuando las geometrías, las condiciones de contorno o condiciones iniciales se complican, la solución analítica es demasiado compleja para poder resolverla durante los primeros años de las ingenierías ó simplemente no tienen solución analítica. Por esta razón y a sabiendas de que las diferencias finitas no son complicadas de entender para un alumno que cursa estudios de ingeniería, se han desarrollado tres prácticas por ordenador con el fin de aplicar la teoría de diferencias finitas en unos casos prácticos. A pesar de que el software EES no sea el más idóneo para la programación de problemas que requieren la resolución de problemas mediante bucles, resulta muy didáctico y los códigos utilizados son fácilmente extrapolables a un software más apropiado como podría serlo MATLAB[®] [1].

En los problemas de convección reales no se suele disponer de la temperatura superficial del sólido en muchas ocasiones. Este tipo de problemas conlleva una resolución iterativa del problema y resulta tedioso el resolverlos a mano. El uso del programa EES resulta muy apropiado para este tipo de problemas en los que es necesario obtener las propiedades de fluidos en diversas condiciones. Se realizan dos prácticas de ordenador resolviendo este tipo de problemas de convección.

Por último se realiza una última práctica de ordenador con EES en el que se plantean y resuelven las ecuaciones de un problema de intercambio de energía radiante entre tres superficies. En los problemas de intercambio de radiación entre superficies la parte más tediosa es la resolución del sistema de ecuaciones que ha de plantearse para obtener las radiosidades.

Excluyendo la primera práctica utilizada para presentar el software, seis de las siete prácticas se evalúan. Permitiendo al profesor seguir durante el curso la evolución de los alumnos.

2. Integración de las prácticas de ordenador en el curso

Estas prácticas de ordenador están pensadas para una asignatura cuatrimestral con 60 horas presenciales distribuidas en 15 semanas según la tabla 1. Las clases magistrales y de prácticas de aula siguen el temario del libro [2] y el temario es el siguiente:

- Tema 1.- Introducción y conceptos básicos
- Tema 2.- Ecuación de la conducción de calor
- Tema 3.- Conducción de calor en estado estacionario
- Tema 4.- Conducción de calor en régimen transitorio
- Tema 5.- Métodos numéricos en la conducción de calor
- Tema 6.- Fundamentos de la convección
- Tema 7.- Convección externa forzada
- Tema 8.- Convección interna forzada
- Tema 9.- Convección natural
- Tema 10.- Ebullición y condensación
- Tema 11.- Intercambiadores de calor
- Tema 12.- Fundamentos de la radiación térmica
- Tema 13.- Transferencia de calor por radiación
- Tema 14.- Transferencia de masa

Tabla 1: programación de las 60 horas de la asignatura en 15 semanas.

PROGRAMACIÓN					
SEMANA	CLASES MAGISTRALES	PRACTICAS DE AULA	PRACTICAS DE ORDENADOR	PRACTICAS DE LABORATORIO	SEMINARIOS
1	TEMA 1 (1,5 horas)	TEMA 1 (1,5 horas)			
2	TEMA 2 (1,5 horas)	TEMA 2 (1,5 horas)			
3	TEMA 3 (1,5 horas)	TEMA 3 (1,5 horas)			
4	TEMA 4 (1,5 horas)	TEMA 4 (1,5 horas)		LAB 1 (1 hora) Práctica tema 3	
5	TEMA 5 (1,5 horas)	TEMA 5 (1,5 horas)	PO 1 (1,5 horas) Problemas tema 3		
6	TEMA 6 (1,5 horas)	TEMA 6 (1,5 horas)	PO 2 (1,5 horas) Problemas tema 5		
7	TEMA 7 (1,5 horas)	TEMA 7 (1,5 horas)	PO 3 (1,5 horas) Problemas tema 5		
8	TEMA 8 (1,5 horas)	TEMA 8 (1,5 horas)	PO 4 (1,5 horas) Problemas tema 5		
9	TEMA 9 (1,5 horas)	TEMA 9 (1,5 horas)	PO 5 (1,5 horas) Problemas temas 6 a 8		
10	TEMA 10 (1,5 horas)	TEMA 10 (1,5 horas)		LAB 2 (1 hora) Práctica tema 9	
11	TEMA 11 (1,5 horas)	TEMA 11 (1,5 horas)			
12	TEMA 12 (1,5 horas)	TEMA 12 (1,5 horas)	PO 6 (1,5 horas) Problemas temas 8 a 11		
13	TEMA 13 (1,5 horas)	TEMA 13 (1,5 horas)			
14	TEMA 14 (1,5 horas)	TEMA 14 (1,5 horas)		LAB 3 (1 hora) Práctica tema 12	SEMINARIO (1,5 horas)
15	Resolución de exámenes anteriores	Resolución de exámenes anteriores	PO 7 (1,5 horas) Problemas temas 12 a 13		

Comparando la tabla 1 y el temario se puede ver que las prácticas de ordenador están distribuidas estratégicamente para afianzar los conocimientos adquiridos durante las clases prácticas y magistrales. Al ser las prácticas evaluables, los estudiantes deben llevar los temas estudiados al día para poder realizar los exámenes de cada una de las prácticas de ordenador satisfactoriamente.

También se puede observar en la tabla 1 que las prácticas de laboratorio están colocadas estratégicamente para apoyar las clases magistrales y de prácticas de aula con experimentos relacionados con temario impartido previo a cada práctica.

3. Descripción de las prácticas de ordenador

A continuación se describe brevemente cada una de las prácticas y los objetivos perseguidos en cada una de ellas.

3.1. Práctica 1: Introducción al EES y problemas de conducción de calor en estado estacionario

La práctica 1 se utiliza para aprender a usar los comandos y la lógica de programación del EES mientras se resuelven dos problemas de conducción de calor en estado estacionario.

A pesar de que el software EES no es complejo, en la primera práctica de ordenador no se puede evaluar a los alumnos sobre un software que nunca han utilizado previamente. NOTA: el software se reparte a todos los alumnos vía la plataforma web Moodle y disponen de licencia académica para el uso durante un curso académico completo, de manera que pueden practicar por su cuenta.

3.2. Práctica 2: Métodos numéricos en la conducción de calor – estado estacionario

Durante las clases magistrales del tema 5 se explica cómo se transforma la ecuación diferencial del campo de temperaturas para la conducción, ecuación (1) del [2], mediante el método de diferencias finitas.

$$\frac{k}{\rho \cdot C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{e}_{gen}}{\rho \cdot C_p} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Donde k es la conductividad térmica, ρ la densidad, C_p el calor específico y \dot{e}_{gen} la generación de calor volumétrica en $[\text{W}/\text{m}^3]$.

La práctica 2 se utiliza para resolver dos problemas de transmisión de calor en estado estacionario mediante métodos numéricos aplicando la ecuación (2):

$$\frac{T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}}{\Delta x^2} + \frac{\dot{e}_i}{k} = 0 \quad (2)$$

Esta ecuación se obtiene al convertir la ecuación (1) a diferencias finitas para estado estacionario [2]. Donde i representa la numeración del nodo donde se calcula cada temperatura o generación de calor.

El objetivo de la práctica 2 es que los alumnos aprendan a obtener las distribuciones de temperatura numéricamente. En la figura 1 se representa la distribución de temperaturas en el interior de una placa plana de 0,1 m de espesor con generación de calor no uniforme y condiciones de contorno: $T(x=0) = 35 \text{ [}^\circ\text{C]}$ y $q(x=0,1) = h \cdot (T(x=0,1) - T_{\text{aire}}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot ((T(x=0,1) + 273)^4 - T_{\text{entorno}}^4) \text{ [W}/\text{m}^2]$.

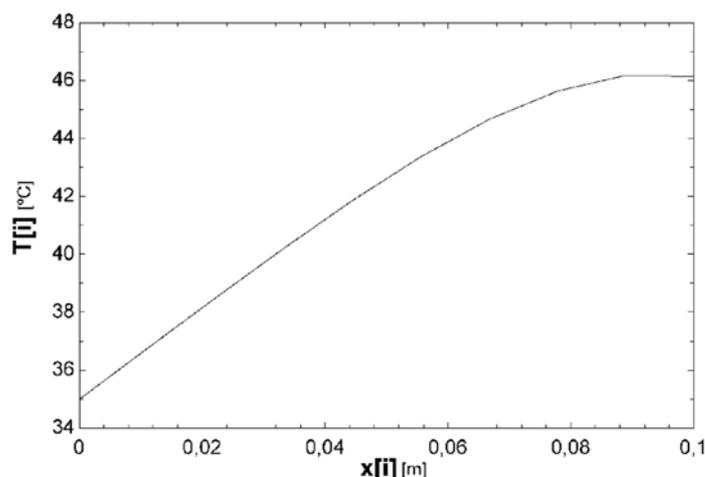


Figura 1: distribución de temperaturas de la placa obtenida mediante el método de diferencias finitas durante la práctica de ordenador 2.

3.3. Práctica 3: Métodos numéricos en la conducción de calor – estado estacionario

Durante la práctica 3 se resuelven problemas similares a los de la práctica 2 pero con condiciones de contorno y generaciones de calor diferentes. Al cálculo de las distribuciones de temperatura se le incluye ahora el cálculo de flujos de calor en diferentes posiciones de la placa utilizando la ecuación de Fourier para casos unidimensionales [2]. Para ello los alumnos aprenden a utilizar los tres tipos de derivadas del campo de temperaturas que pueden utilizarse en la ecuación de Fourier:

$$\text{DERIVADA PORGRESIVA: } \frac{dT_j}{dx} = \frac{T_{j+1} - T_j}{\Delta x}$$

$$\text{DERIVADA REGRESIVA: } \frac{dT_j}{dx} = \frac{T_j - T_{j-1}}{\Delta x}$$

$$\text{DERIVADA CENTRAL: } \frac{dT_j}{dx} = \frac{T_{j+1} - T_{j-1}}{2 \cdot \Delta x}$$

3.4. Práctica 4: Métodos numéricos en la conducción de calor – método implícito

La práctica 4 se utiliza para resolver un problema de transmisión de calor en régimen transitorio mediante el método implícito de diferencias finitas ([2] y [3]), que se obtiene transformando la ecuación (1) en la ecuación (3):

$$\frac{k}{\rho \cdot C_p} \left(\frac{T_{i-1,n+1} - 2 \cdot T_{i,n+1} + T_{i+1,n+1}}{\Delta x^2} \right) + \frac{\dot{e}_i}{\rho \cdot C_p} = \frac{T_{i,n+1} - T_{i,n}}{\Delta t} \quad (3)$$

Donde n representa el instante en el que se calcula cada temperatura. El método implícito no tiene problemas de convergencia y por tanto es estable para cualquier combinación de los valores Δx y Δt seleccionados.

En la figura 2 se muestran algunos perfiles de temperatura calculados para el problema resuelto durante la práctica 4 donde se calienta una placa de 3 cm de espesor.

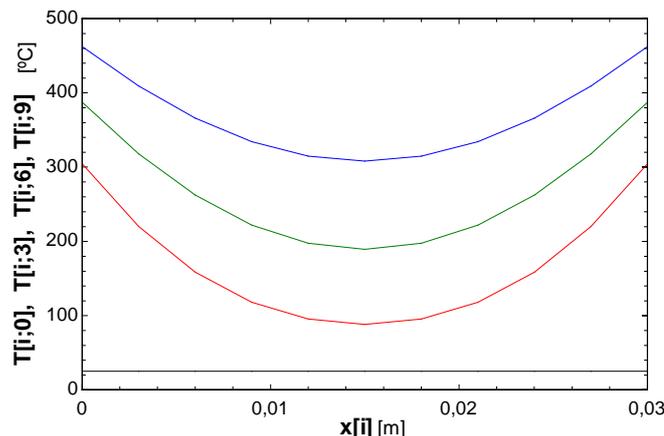


Figura 2: distribuciones de temperaturas obtenidas durante el calentamiento de una placa que inicialmente se encuentra a 20°C y se pone en contacto con aire a 700°C. Se ha utilizado el método implícito de diferencias finitas.

En la práctica 4 los alumnos también aprenden a calcular el calor intercambiado en un proceso de calentamiento o enfriamiento utilizando para ello las distribuciones de temperatura obtenidas numéricamente.

3.5. Práctica 5: Convección externa forzada

La práctica 5 se utiliza para realizar una serie de estudios paramétricos sobre el coeficiente de convección variando la velocidad a la que se mueve el fluido y la temperatura del fluido. Se realizan dos problemas durante esta práctica. En el primero se analizan las pérdidas por convección de un colector solar variando la velocidad del viento y la temperatura del aire. Se realiza un estudio paramétrico.

En un segundo problema se estudia la velocidad de enfriamiento de una bola de acero que puede considerarse un sistema de parámetros concentrado. Según se ve en la figura 3 se realiza un estudio paramétrico de cómo varían el coeficiente de convección y el tiempo de enfriamiento con diferentes velocidades del aire sobre la bola de acero a enfriar.

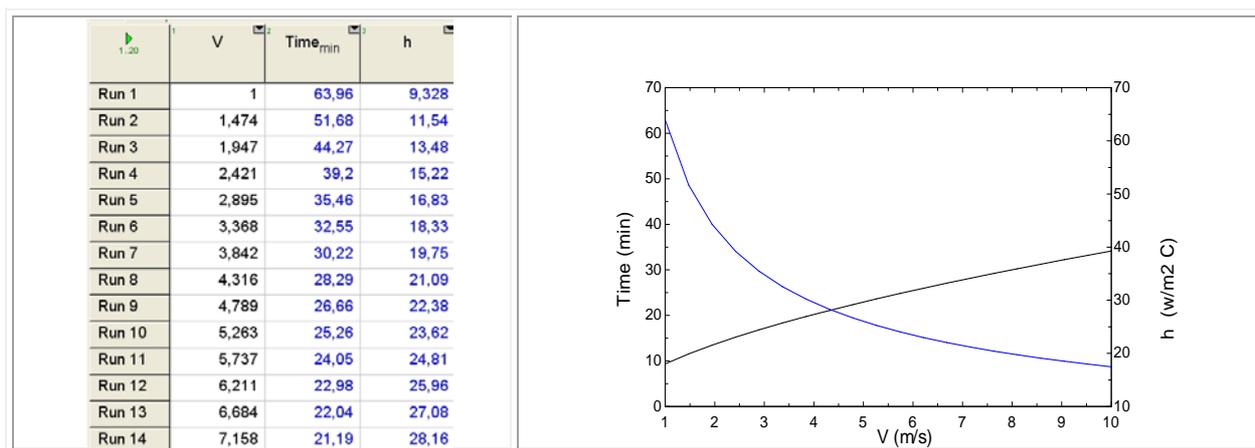


Figura 3: análisis paramétrico del tiempo de enfriamiento y del coeficiente de convección sobre una bola de acero para diferentes velocidades de aire.

3.6. Práctica 6: Convección interna forzada y convección natural

La práctica 6 se utiliza para realizar dos problemas sobre el intercambio de calor dentro de un conducto que mantiene su temperatura superficial constante. También vale para aplicar la teoría de intercambiadores de calor. Se conoce la longitud del conducto pero no la temperatura de salida del fluido. Este hecho convierte el problema en iterativo ya que para calcular la temperatura característica del fluido es necesario asumir una temperatura de salida del fluido para poder así resolver el problema. Si se realizara a mano, este problema se convertiría en iterativo, ya que al finalizar la primera iteración obtendríamos la temperatura de salida del fluido que utilizaríamos en la nueva iteración para obtener la nueva temperatura característica y con ella deberíamos repetir los cálculos para volver a calcular la nueva temperatura de salida. Repetiríamos el proceso hasta obtener la convergencia en la temperatura de salida del fluido.

En EES, es posible escribir las ecuaciones para la resolución de este tipo de problemas una única vez y el propio EES realiza internamente la iteración sin tener que escribir las ecuaciones reiteradamente hasta obtener la convergencia. En este problema, aparecen problemas numéricos de convergencia, que se resuelven mediante la limitación numérica de algunas variables del problema. Se les enseña a los alumnos a lidiar con este tipo de problemas.

El examen que los alumnos realizan en esta práctica, es sobre un problema iterativo de convección natural. En la figura 4 mostramos íntegramente cómo es uno de los múltiples modelos de este examen que los alumnos deben realizar en la última media hora de esta práctica de ordenador.

3.7. Práctica 7: Transferencia de calor por radiación

La práctica 7 se utiliza para realizar dos problemas sobre el intercambio de calor por radiación. En el primero de ellos se trata un problema de dos cilindros muy largos que intercambian calor por

radiación. En este problema los alumnos aprenden a manejar la librería de factores de visión que dispone EES para multitud de configuraciones diferentes.

En un segundo problema se analiza un horno con tres superficies en el cuál hay que plantear un sistema de tres ecuaciones y calcular así las radiosidades de las tres superficies. Con las radiosidades se calcula la potencia requerida por una de las superficies del horno.

El examen de esta práctica es sobre una cavidad cerrada con tres superficies en el que hay que calcular las radiosidades para poder calcular los intercambios por radiación entre superficies.



Modelo 54	PRACTICA ORDENADOR 6	Tiempo: 30 min
------------------	-----------------------------	-----------------------

Nombre:	Matriculado en grupo:
Apellidos:	Matriculado en
DNI:	Subgrupo:
Titulación:	

Considere una placa delgada vertical de 26 cm de alto y 20 cm de ancho en contacto con aire (a 20°C y 101,3 kPa) en una de sus caras y completamente aislada por la otra cara. La placa está equipada con elementos eléctricos de calentamiento con una capacidad nominal de 10 W. En este instante se encienden los elementos eléctricos y la temperatura de la placa se eleva. La cara no aislada tiene una emisividad de 0,90 y las superficies circundantes se encuentran a 10°C.

a) Determine la temperatura de la placa cuando se alcanzan las condiciones estacionarias de operación.

NOTA: al calcular el coeficiente de convección, utilizar la correlación válida para todo el rango.

Escribir únicamente un número en cada casilla en bolígrafo y en las unidades del sistema internacional:

	Respuesta	Unidades en S.I.
Primer intento:		
Segundo intento:		

NOTA: descargarse de Moodle los documentos en pdf relativos a esta práctica al escritorio del ordenador. Una vez comience el examen no se podrá usar ningún material de apoyo en formato electrónico y estará prohibido conectarse a Internet.

Figura 4: ejemplo de examen que los alumnos deben resolver durante la última media hora de la práctica de ordenador. Este examen es uno de los modelos utilizados durante la práctica 6. Como se puede apreciar en la figura, los alumnos disponen de dos oportunidades para llegar al resultado solicitado.

4. Evaluación

Estas prácticas de ordenador representan el 30% de la nota final de la asignatura. Con lo expuesto hasta el momento se puede apreciar que durante las prácticas de ordenador se tratan todos los temas del curso a excepción del tema 14. A continuación se presenta el sistema de evaluación de la asignatura para comprender mejor como se integra la evaluación continua de las prácticas de ordenador en la evaluación total de la asignatura:

1 - EXAMEN ESCRITO A DESARROLLAR*:

Ejercicio 1 (sobre 10 puntos): transferencia de calor y masa

Ejercicio 2 (sobre 10 puntos): transferencia de calor y masa

Ejercicio 3 (sobre 10 puntos): transferencia de calor y masa

$$\text{Nota del examen escrito a desarrollar} = [(Ejercicio 1) \times (Ejercicio 2) \times (Ejercicio 3)]^{1/3}$$

NOTA: En el examen escrito a desarrollar no entra el tema 5 ya que es evaluado con tres de las prácticas de ordenador.

2 - REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS DE ORDENADOR**: Se realizan 7 prácticas de ordenador de 1,5 h cada una utilizando el software EES. La primera práctica se utiliza para aprender a utilizar el software. Durante las siguientes 6 prácticas se realizan diversos ejercicios relacionados con la teoría explicada durante las clases magistrales. Estas 6 prácticas están divididas en dos partes, durante la primera hora el alumno realiza ejercicios guiados por el profesor y con ayuda de apuntes. Durante la última media hora de la práctica el alumno es examinado y evaluado. El método de evaluación es todo o nada, se distribuyen una serie de ejercicios parecidos a los realizados durante esa práctica y el alumno deberá llegar al resultado solicitado, en caso de llegar al número exacto obtendrá un 5% de la nota final y en caso de no llegar no obtendrá nada. En cada examen el alumno tiene dos oportunidades para llegar al resultado solicitado. Si falla en el primer intento el alumno dispone de un segundo intento hasta que termine la media hora disponible para la realización del examen. El alumno sale de cada práctica de ordenador sabiendo la nota que tiene en dicho examen y el profesor se lleva todos los ejercicios corregidos.

3 - TRABAJOS EN GRUPO - INFORMES PRÁCTICAS DE LABORATORIO**: Se realizan tres informes de prácticas de laboratorio. Un informe por cada práctica: práctica de conducción, práctica de convección y práctica de radiación. Cada uno de los informes vale un 5% de la nota final.

NOTA FINAL:

EXAMEN ESCRITO A DESARROLLAR (55%) + REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS (30%) + INFORMES PRÁCTICAS DE LABORATORIO (15%)

* Para aprobar la asignatura, en el examen escrito a desarrollar, habrá que obtener un mínimo del 40%. En actas aparecerá la nota del examen escrito en caso de no llegar al mínimo requerido.

** Si debido a días festivos no se realizase alguna de las prácticas evaluables, esta práctica no se realizará y se prorratearán las prácticas realizadas para que el peso de las prácticas siga teniendo el peso correspondiente de la nota final.

5. Conclusiones y consideraciones finales

Las pruebas realizadas durante los cursos 2012-2013 y 2013-2014 con los alumnos del grado en ingeniería en tecnologías industriales de la ETSI de Bilbao han resultado muy satisfactorias. El curso 2012-2013 con 188 matriculados, únicamente 5 alumnos no realizaron las prácticas de ordenador y de media los alumnos obtuvieron 2,05 puntos de los 3 posibles de las prácticas de ordenador. Entre las dos convocatorias del curso, el 72,5% del total de los alumnos han aprobado la asignatura (10 puntos por encima que en la asignatura similar del plan antiguo ingeniería industrial). En el curso 2013-2014 con 271 matriculados, se han obtenido resultados muy similares con una media de 2,20 puntos sobre los 3 posibles en las prácticas de ordenador y un 73,1% de alumnos han aprobado la asignatura entre las dos convocatorias.

Estas prácticas de ordenador han obligado a los alumnos a realizar un estudio a fondo de todos los temas impartidos durante el curso de una manera organizada y durante todo el cuatrimestre en que se imparte la asignatura. Al no guardarse la nota de las prácticas para los próximos cursos, hay una proporción muy elevada de alumnos que se han presentado y han aprobado el examen final.

Todo ello sin un gran esfuerzo de corrección por parte del profesor, ya que todos los exámenes de prácticas de ordenador se corrigen durante la propia práctica.

Con todo esto, se considera que la implantación de este sistema de prácticas de ordenador ha sido un éxito, tanto en la ETSI como en el resto de escuelas técnicas donde se han implantado.

6. Referencias

- [1] A. ERKOREKA, P. ZUGAZAGA, J. M. BLANCO, F. MENDIA, “Prácticas de ordenador para problemas de transmisión de calor mediante la programación de diferencias finitas en matlab”, *VI jornadas nacionales de ingeniería termodinámica*, Universidad de Córdoba, 2009, ISBN 978-84-692-2264-5.
- [2] ÇENGEL, Y. A., *Heat and Mass Transfer: a practical approach*, McGraw-Hill, 2007.
- [3] CARNAHAN, B., *Applied Numerical Methods*, John Wiley and sons, 1969.