

PRÁCTICAS DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN

FLORES ABASCAL, Ivan⁽¹⁾; ERKOREKA GONZALEZ, Aitor⁽¹⁾; PEREZ IRIBARREN, Estibaliz⁽¹⁾;

MARTIN ESCUDERO, Koldobika⁽¹⁾; AZKORRA LARRINAGA, Zalao⁽²⁾;

ivan.flores@ehu.eus

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

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

RESUMEN

Con el objetivo de mostrar una aplicación práctica de la transferencia de calor por convección sobre superficies se ha diseñado un equipo para la determinación experimental del coeficiente de convección sobre una placa plana.

Constructivamente hablando el equipo está formado por una lámina calefactora colocada sobre la cara superior de una placa de madera. Al conectar la lámina calefactora a la red, se consigue una temperatura superficial superior a la de la cara inferior de la placa de madera, a la del ambiente y a la de las superficies que le rodean. De esta manera se logra que exista un intercambio de calor por conducción a través de la placa, por convección con el aire y por radiación con las superficies circundantes.

Los objetivos de la práctica son varios. Por un lado, se busca que el alumnado aplique el balance de energía e identifique los diferentes mecanismos de transmisión de calor que intervienen. Por otro lado, a partir de la medida de diversas temperaturas durante la práctica, el alumnado debe calcular el coeficiente de convección que tiene lugar en esas condiciones. Además, el alumnado debe resolver el intercambio de calor por convección como si fuese un problema de clase, usando las correlaciones de convección existentes en la bibliografía relativa a transferencia de calor.

Por último se le pide que calcule la diferencia entre ambos coeficientes de convección de manera porcentual.

Una ventaja añadida del equipo es que puede ser igualmente utilizado para la realización de prácticas relativas al mecanismo de radiación.

Palabras clave: Convección, Prácticas de laboratorio, EEES.

1. Introducción

El conocimiento de los fenómenos de transferencia de calor resulta fundamental para ciertas profesiones, sobre todo en aquellas relacionadas con los procesos productivos a nivel industrial. Desde un punto de vista académico, el aprendizaje de todo lo relativo a la transmisión de calor por parte del alumno presenta la ventaja de que no son fenómenos exclusivos de la industria, estando presentes en multitud de situaciones de la vida cotidiana: cuando soplamos para enfriar el café o la sopa, la calefacción de nuestras casas, la sudoración del cuerpo humano, etc.

A pesar de esa cercanía y cotidaneidad, existen algunos aspectos de la transferencia de calor que resultan difíciles para los alumnos. Una manera de solventar esa dificultad es la realización de prácticas de laboratorio en las que el alumno de manera sencilla experimente y/o, verifique numéricamente lo explicado en las clases magistrales.

Bajo este contexto, en el presente trabajo se explica el montaje experimental, el fundamento teórico, las mediciones a realizar y los criterios de corrección utilizados en una práctica de laboratorio pensada para que el alumno profundice en el mecanismo de convección. Dicha práctica forma parte de las prácticas de laboratorio de la asignatura “Termotecnia”, impartida en tercer curso de los diferentes grados en ingeniería (tecnología industrial, ambiental y organización) que se imparten en la ETSI de Bilbao.

2. Objetivos

La realización de esta práctica persigue varios objetivos principales:

- El alumno deberá ser capaz de identificar los diferentes mecanismos de transmisión de calor que tienen lugar en un caso sencillo.
- Asimismo, deberá obtener de manera experimental el coeficiente de convección. Para ello deberá realizar una serie de medidas de temperaturas, plantear el balance de energía y calcular los diferentes flujos de calor y los correspondientes números adimensionales.
- Reflejar el carácter experimental de las correlaciones que aparecen en la bibliografía para la resolución de los problemas de convección [1, 2]. Para ello el alumno comparará el valor obtenido experimentalmente con el obtenido con la correlación correspondiente para esa situación (convección natural y placa plana).

3. Principios teóricos y dimensionamiento de la instalación.

La práctica consiste en el estudio del intercambio de calor por convección natural entre una placa plana de aluminio colocada horizontalmente y el aire del laboratorio. Para la realización de la misma se ha decidido emplear parte del equipamiento empleado para la realización de la práctica de determinación de la emisividad mediante cámara termográfica [3]. Las principales razones para ello han sido:

- Desde el punto de vista de gestión, disponer de un equipo polivalente permite cubrir las necesidades de equipamiento para las prácticas de la asignatura con un coste menor. De esta manera, se ha podido emplear el presupuesto disponible en aumentar el número de puestos, lo que permite manejar grupos de laboratorio relativamente grandes y que cada subgrupo de alumnos pueda hacer las mediciones de manera independiente.
- Desde el punto de vista del alumno, el que se utilice el mismo equipo para dos prácticas diferentes facilita la comprensión de la práctica.
- Además, usar el mismo equipo en las prácticas de dos mecanismos diferentes permite que el alumno comprenda que los fenómenos de transferencia de calor en la realidad se suelen producir de manera simultánea.

El gradiente de temperaturas necesario para que se produzca la transferencia de calor entre la placa de aluminio, de superficie $A_S = 20 \times 30 \text{ cm}^2$, se consigue adhiriendo por su parte inferior una lámina

calefactora de idénticas dimensiones y de 60 W nominales de potencia. En la siguiente figura (Figura 1) se muestran la lámina calefactora y la placa de aluminio

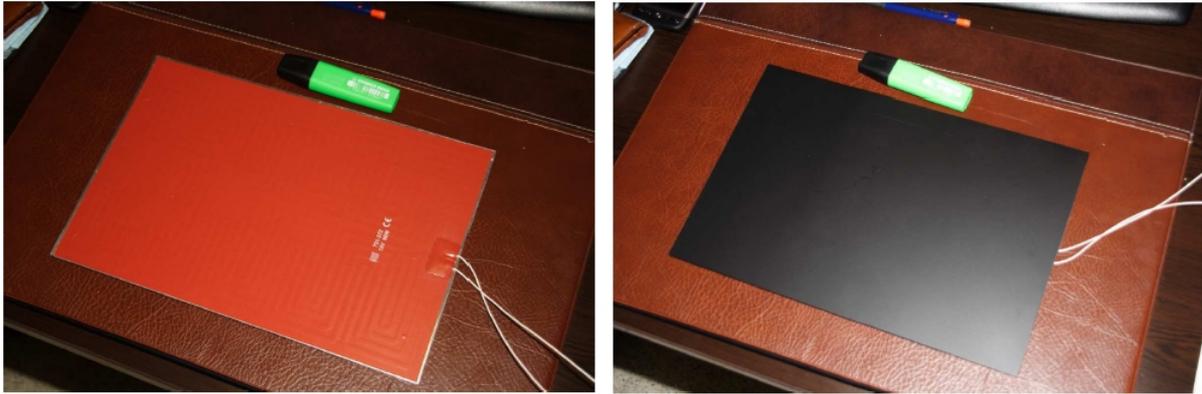


Figura 1: Izquierda: circuitos de la lámina calefactora. Derecha: lámina calefactora pegada a la placa de aluminio pintada de negro mate.

El conjunto placa-lámina calefactora se coloca sobre un soporte de madera de 40 x 55 cm. Aunque la práctica se realiza con la placa en posición horizontal, el equipo permite variar el ángulo de inclinación de 0 a 90 °. En la siguiente figura se muestra el esquema del montaje.

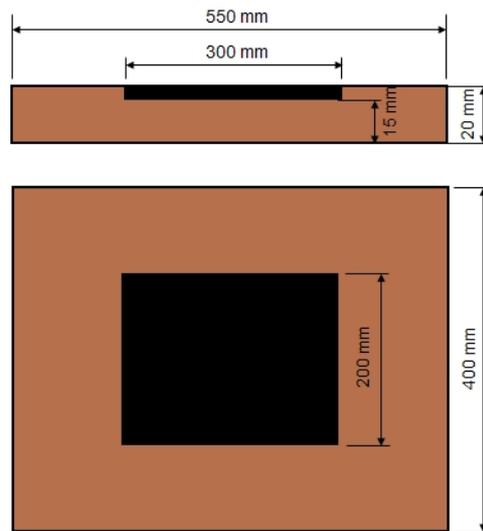


Figura 2: Dimensiones principales del equipo.

En los diferentes ensayos realizados (pruebas iniciales y prácticas de los alumnos) se ha observado que para una temperatura del aire en el laboratorio en torno a 20-22 °C, la superficie de la placa alcanza el equilibrio a temperaturas en torno a los 65 °C, estando la temperatura en la superficie interior de la placa de madera en torno a 45 °C. Esas temperaturas hacen que las contribuciones de los 3 mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación) sean relevantes en la práctica.

El fundamento teórico de la práctica se basa en el principio de conservación de la energía en régimen estacionario. De esta manera, la potencia eléctrica consumida por la lámina calefactora será igual a la que se transmite por conducción a través del soporte, por convección con el aire del laboratorio y por radiación con el entorno (Ver figura 3).

$$P_{elect} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad [W] \quad (eq.1)$$

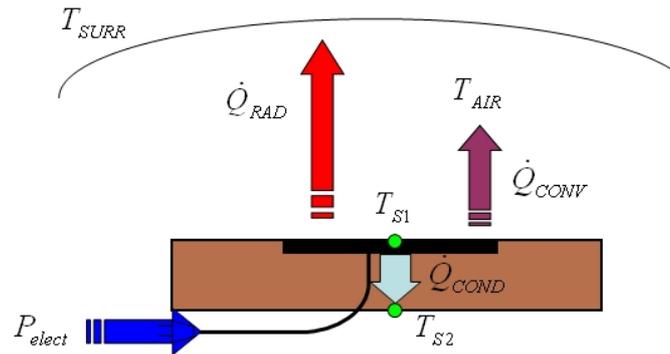


Figura 3: Flujos de energía.

La potencia eléctrica puede ser dato (valor nominal o valor medido previamente), o puede ser medido por el alumno durante la realización de la práctica con una pinza amperimétrica.

Para el cálculo del calor disipado por conducción se utiliza la ley de Fourier:

$$\dot{Q}_{cond} = k_{madera} \cdot A_S \cdot \frac{T_{S1} - T_{S2}}{d_{madera}} \quad [\text{W}] \quad (\text{eq.2})$$

La aplicación de la fórmula se basa en las siguientes dos hipótesis:

- 1) La transmisión de calor es unidimensional.
- 2) Las temperaturas superficiales superior e inferior del conjunto placa + lámina calefactora son idénticas. De esta manera, el calor por conducción se calcula únicamente a través de la madera, por lo que será necesario que el alumno conozca el valor de conductividad térmica de la misma. Como ejercicio adicional para reforzar el tema de conducción, se puede pedir al alumno que no se considere esta hipótesis y calcule la temperatura en la superficie de contacto lámina calefactora-madera como si fuese un problema de conducción multicapa.

Como en el momento de realización de la práctica el alumno todavía no ha visto el mecanismo de radiación en profundidad, el calor disipado por radiación lo debe calcular de manera simplificada mediante la ley de Stefan-Boltzmann.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot A_S \cdot \sigma \cdot [(T_{S1} + 273)^4 - (T_{surr} + 273)^4] \quad [\text{W}] \quad (\text{eq.3})$$

El valor de la emisividad de la placa (ε) deberá ser un dato. Dicho valor lo calcularán posteriormente, cuando realicen la tercera práctica. Como ya se ha comentado, el alumno todavía no ha visto el tema de radiación por lo que para no complicar mucho el cálculo, se puede tomar el valor de la temperatura del entorno (T_{surr}) como la temperatura superficial del techo del laboratorio. Se le puede adelantar al alumno, que debido a la configuración espacial de la muestra (placa horizontal), la superficie que “más ve” es el techo. El profesor durante la preparación de la práctica deberá chequear (por ejemplo con una cámara termográfica) si esta hipótesis genera un error aceptable o no.

Con las ecuaciones 1, 2 y 3 el alumno determina el calor disipado por convección. A partir de ese valor y aplicando la ley de enfriamiento de Newton se puede obtener el valor del coeficiente de convección experimental (h_{exp}).

$$\dot{Q}_{conv} = h_{exp} \cdot A_S \cdot (T_{S1} - T_{air}) \quad [\text{W}] \quad (\text{eq.4})$$

Por su parte, para la determinación del coeficiente de convección a partir de las correlaciones de la bibliografía, el alumno deberá utilizar la correlación correspondiente a placa plana horizontal, con una temperatura superficial mayor que la del fluido. Para esa situación, una correlación comúnmente aceptada es [1]:

$$\begin{aligned} Nu &= 0,54 \cdot Ra_L^{1/4} & 10^4 < Ra_L < 10^7 \\ Nu &= 0,15 \cdot Ra_L^{1/3} & 10^7 < Ra_L < 10^{11} \end{aligned} \quad (\text{eq. 5})$$

Donde la longitud característica L se obtiene como el cociente entre la superficie A_s y el perímetro p .

$$L = A_s / p \quad [\text{m}] \quad (\text{eq. 6}).$$

Las propiedades del aire se obtienen a la temperatura de película, T_f . El alumno deberá obtener dichas propiedades mediante el programa *EES* [4] utilizado en la asignatura para las prácticas de ordenador.

$$T_f = \frac{T_{s1} + T_{air}}{2} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{eq.7})$$

4. Realización de la práctica

Las prácticas tienen asignada una duración de 1 hora cada una. La práctica comienza con una presentación (durante no más de 30 minutos) donde se les explica a los alumnos los fundamentos de la práctica, el manejo de los equipos, la información que se les pide en el informe y los criterios de corrección.

A continuación, cada subgrupo (formado por 3 personas) pasa a realizar la toma de datos en su puesto correspondiente. Esa toma de datos se reduce a la determinación de 4 temperaturas (T_{s1} , T_{s2} , T_{air} y T_{surr}). El resto de variables que aparecen en las ecuaciones 1 a 4 son conocidas por el alumno. Entre ellas se encuentran:

- Las dimensiones y espesores de los diferentes elementos.
- La conductividad de la madera ($k_{madera} = 0,14 \text{ W/m}\cdot\text{K}$).
- La emisividad de la placa ($\varepsilon = 0,98$).
- Potencia eléctrica de la placa. Como se ha comentado anteriormente, si se desea esa variable la pueden medir los alumnos con una pinza amperimétrica.

Las temperaturas superficiales (T_{s1} y T_{s2}) se registran mediante dos sondas de temperatura (Pt100) colocadas sobre la superficie superior de la placa de aluminio y sobre la superficie inferior de la placa de madera respectivamente. Los valores de dichas sondas se pueden obtener mediante lectura en el adquisidor de datos o en el ordenador. En la Figura 3 se muestra la disposición de los diferentes elementos que forman la práctica.



Figura 3: Disposición de los equipos para la realización de la práctica.

La temperatura del aire (T_{air}) se determina mediante un termohigrometro. Dicho termohigrometro dispone de un sensor de temperatura por infrarrojos que permite obtener la temperatura (T_{surr}) de las diferentes superficies que pueden intercambiar calor por radiación con la placa.

La toma de datos por parte de los alumnos, con una comprobación (y aclaración de alguna duda si fuese necesario) por parte del profesor tiene una dirección aproximada de 5 minutos por subgrupo. Como en el laboratorio existen tres puestos idénticos para la realización de la práctica, hipotéticamente 18 subgrupos podrían realizar la práctica en media hora. Esa cifra es ampliamente superior al número de grupos con los que se trabaja en la asignatura (6 durante el último curso o 12 en cursos precedentes).

5. Consideraciones generales

Además de lo comentado anteriormente, existen una serie de aspectos a comentar:

- A la hora de planificar el calendario de prácticas, esta práctica debe situarse después de haber visto el mecanismo de convección natural.
- Para una correcta realización de la práctica, es necesario que las placas hayan alcanzado la temperatura de equilibrio. Se ha observado que durante el tiempo que dura la explicación de la práctica se alcanza el equilibrio, por lo que no es necesario conectar los equipos con antelación. Además, como existen varios grupos de prácticas cada día, la condición de equilibrio se satisface de manera muy sencilla.
- Con objeto de evitar posibles accidentes por quemaduras con la placa, además de la correspondiente señalización conviene recordar a los alumnos que la superficie está a unos 60 °C.

6. Evaluación

La práctica supone 0,5 puntos (5%) en la nota final de la asignatura, siendo requisito imprescindible haber asistido a la práctica. Esos 0,5 puntos se reparten de manera equitativa entre el cálculo del coeficiente de convección experimental (0,25 puntos) y el cálculo del coeficiente de convección mediante la correlación de la bibliografía (0,25 puntos)

Para establecer los criterios de corrección de la práctica se han tenido en cuenta dos aspectos:

- Por un lado, el elevado número de grupos que realizan las prácticas. Con un conjunto de unos 350 alumnos en los tres grados en los que se imparte la asignatura, da lugar a algo menos de 120 informes a corregir.
- Por otro lado, la conveniencia de que el alumno sepa cuanto antes la nota, de manera que pueda saber si está adquiriendo los conocimientos necesarios para lograr las competencias de la asignatura.

Estas dos circunstancias han llevado a establecer un criterio de corrección basado en los resultados obtenidos para las variables que se recogen en la Tabla 1. El criterio adoptado es que un fallo en alguna de las variables de un bloque supone un 0 sobre 0,25 en dicho bloque. De esa manera, los alumnos pueden obtener 0,5 puntos (todo bien), 0,25 puntos (al menos un fallo en un bloque) ó 0 puntos (al menos un fallo en cada bloque).

Tabla 1: Relación de variables utilizadas para corregir la práctica.

Bloque 1 - Cálculo del coeficiente de convección experimental		
\dot{Q}_{cond}	[W]	Potencia disipada por conducción a través de la placa de madera.
\dot{Q}_{rad}	[W]	Potencia intercambiada por radiación entre la placa y los alrededores.
\dot{Q}_{conv}	[W]	Potencia intercambiada por convección entre la placa y el ambiente.
h_{exp}	[W/m ² ·K]	Coefficiente de convección determinado de manera experimental.

Bloque 2 - Cálculo del coeficiente de convección mediante correlación.		
Gr	[-]	Número adimensional de Grashof.
Ra	[-]	Número adimensional de Rayleigh
Nu	[-]	Número adimensional de Nusselt
h_{correl}	[W/m ² ·K]	Coeficiente de convección determinado a partir de la correlación de la bibliografía.

7. Conclusiones y consideraciones finales

Se ha presentado una práctica de laboratorio para mejorar la comprensión del fenómeno de convección. En ella, el alumno debe obtener de manera experimental y mediante las correlaciones basadas en números adimensionales los valores del coeficiente de convección para una situación dada.

Desde el punto de vista de gestión, se trata de un montaje muy sencillo y relativamente económico que permite disponer de varios puestos simultáneos, permitiendo trabajar incluso con grupos numerosos.

Desde el punto de vista docente, resulta una práctica muy útil porque mediante una serie de lecturas sencillas, el alumno puede comprobar el efecto de las diferentes variables en el reparto del calor por los diferentes mecanismos de transmisión. Igualmente puede comparar la exactitud de las correlaciones propuestas por diferentes autores en la bibliografía.

Una ventaja añadida, es que el mismo montaje junto con una cámara de termografía permite la realización de prácticas relativas al mecanismo de radiación.

8. Referencias

- [4] ÇENGEL, Y. A. *Transferencia de calor y masa*. México: McGrawHill, 2007. 901p.
- [5] INCROPERA, F. P. *Fundamentos de transferencia de calor*. México: Prentice Hall, 1999. 912 p.
- [6] ERKOREKA GONZALEZ, A. MARTIN ESCUDERO, K. ZUGAZAGA RUIZ, P. FLORES ABASCAL, I. AZKORRA LARRINAGA, Z. "Prácticas de laboratorio para medida de emisividad de diferentes superficies mediante cámara térmográfica". En *Actas VII Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica, (Bilbao, 15, 16 y 17 de junio 2011)*. Universidad del País Vasco. 2011.
- [7] *EES: Engineering Equation Solver v9.699*. (junio 2014). F-Chart Software, Madison, WI (EEUU).