

Aplicación de la ley de Fourier en la fabricación de una mufla

Application of Fourier's law in the manufacture of a muffle

Flores Camo, Rafael¹  ; Galván Chávez, Jorge Moises¹  ; García Enríquez, Irma Josefina¹  ;
Flores Cuautle, Jose de Jesus Agustin²  ; Lara Hernández, Gemima^{1*} 

Historial del artículo

Recibido: 15-dic-2025

Aceptado: 20-feb-2026

Publicado: 30-mar-2026

Palabras clave

ES: conducción térmica, ley de Fourier, materiales refractarios, eficiencia energética

EN: thermal conduction, Fourier law, refractory materials, energy efficiency

RESUMEN

Los hornos de alta temperatura son una herramienta esencial en física y en particular en el área de materiales. El diseño de este tipo de hornos requiere de un adecuado balance entre la temperatura interior, la temperatura exterior, la seguridad y la eficiencia energética. Este trabajo reporta el diseño de un horno compacto, capaz de alcanzar 1100 °C usando energía eléctrica. En los cálculos para el diseño de este horno se empleó la ley de conducción de calor de Fourier, la cual describe la transferencia de calor a través de las paredes del horno. Para el diseño se consideraron ladrillos refractarios, así como resistencias de Kanthal. El diseño obtenido es un horno de tamaño reducido que es capaz de alcanzar altas temperaturas y que resulta ideal como caso de estudio para ilustrar la aplicación de la transferencia de calor en el ambiente académico.

ABSTRACT

High-temperature furnaces are essential tools in physics, particularly in materials science. The design of these furnaces requires a careful balance among internal and external temperatures, safety, and energy efficiency. This paper reports the design of a compact furnace capable of reaching 1100 °C using electricity. The design calculations employed Fourier's law of heat conduction, which describes heat transfer through the furnace walls. Refractory bricks and Kanthal heating elements were considered in the design. The resulting design is a compact furnace capable of reaching high temperatures, making it an ideal case study for illustrating heat transfer in academia.

1. Introducción

En el ámbito de la investigación existen diversos escenarios en los cuales es necesario manejar altas temperaturas (mayores 600 °C), para ello se emplean hornos especialmente diseñados. Los hornos de laboratorio, comúnmente llamados muflas pueden alcanzar temperaturas entre 900 y 1700 °C y son utilizados en tratamiento térmico de materiales, determinación de cenizas, fabricación de cerámicos, entre otras muchas aplicaciones [1].

Una mufla consiste en un espacio destinado para calentar las muestras, dicho espacio está delimitado por material que aísla térmicamente, de esta forma el espacio de calentamiento permanece a una temperatura estable minimizando pérdidas de calor. Las muflas pueden generar calor mediante resistencias eléctricas o mediante combustión, siendo las de combustión las más populares debido a la mayor facilidad para controlar la temperatura de calentamiento.

Las principales partes de las que se componen una mufla incluyen la cámara de calentamiento, puerta de seguridad, resistencias de calentamiento, y control de temperatura. Cada uno de los componentes se elige de acuerdo con la aplicación deseada, así como la temperatura máxima de operación. Una mufla para aplicaciones científicas puede tener costos que van de los 500 hasta los 15,000 USD [2, 3]. En el presente trabajo se describe el diseño y la fabricación de una mufla, con énfasis en los parámetros

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación. [Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz](#)

² SECIHTI, Investigadores e investigadoras por México. [Instituto Tecnológico de Orizaba](#)

* Autor de correspondencia: larag_139@hotmail.com



térmicos considerados para el diseño.

1.1. Ley de Fourier

El calor puede ser definido como la energía transferida entre dos objetos entre los cuales exista una diferencia de temperatura. Es importante resaltar que el flujo de energía térmica se da desde el objeto con mayor temperatura hacia el de menor temperatura, este flujo de energía térmica se da en forma continua hasta que ambos cuerpos alcanzan la misma temperatura.

La manera en la que se da el intercambio de calor puede darse mediante tres mecanismos diferentes: conducción, convección, radiación. La conducción se da entre dos cuerpos en contacto directo, la convección requiere que exista un medio que transmita el calor, en tanto que transferencia de calor se da mediante radiación térmica sin que exista un medio físico para el transporte de energía térmica. La transferencia de calor por conducción (Q_{cond}) puede expresarse mediante la Ec. (1) [4].

$$Q_{cond} = -\kappa \cdot \nabla T \quad (1)$$

en donde κ es la conductividad térmica, T la temperatura y ∇ significa la variación espacial de la temperatura. En el caso de un horno se deben de considerar los tres mecanismos de conducción de calor antes descritos. La conducción se da como consecuencia del flujo de calor desde la cámara de calentamiento hacia el recubrimiento exterior. El intercambio de calor por radiación, así como la convección se dan como consecuencia de la interacción de la cubierta exterior con el medio ambiente. La expresión que modela la transferencia de calor por convección (Q_{conv}) es:

$$Q_{conv} = A_{sup} \cdot h(T_{sup} - T_{amb}) \quad (2)$$

en donde A_{sup} el área de la sección transversal del exterior del horno, T_{sup} la temperatura en la superficie del horno, T_{amb} la temperatura ambiente, h el coeficiente de transferencia de calor. En tanto que la Ec. (3) representa la transferencia de calor mediante radiación (Q_{rad})

$$Q_{rad} = A_{sup} \cdot \epsilon \sigma (T_{sup}^4 - T_{amb}^4) \quad (3)$$

en donde ϵ es la emisividad, y σ la constante de Stefan Boltzmann.

2. Metodología

Para poder calcular el espesor de las paredes del horno, debemos de hacer los cálculos a dicha temperatura. Cuando el horno alcanza su máxima temperatura es necesario que se alcance un equilibrio térmico. Dicho equilibrio se da entre el calor que fluye a través de los ladrillos por conducción (Q_{cond}) y el calor que escapa por la cubierta exterior mediante radiación y convección ($Q_{conv} + Q_{rad}$). Finalmente, el calor de radiación y convección debe ser disipado por el aire circundante al horno. Debido a la simetría del horno propuesto, podemos hacer un análisis bidimensional con lo cual la Ec. (1) puede aproximarse a la forma:

$$Q_{cond} = -\kappa \cdot \nabla T \approx k \cdot A_{eff} \frac{T_{in} - T_{sup}}{L} \quad (4)$$

En donde A_{eff} es el área de la sección transversal de la cámara interior y T_{in} la temperatura interior del horno (cámara de calentamiento). En la Figura 1 se puede apreciar el área efectiva (A_{eff}), área superficial (A_{sup}), así como el grosor del aislamiento térmico (L) que se desea calcular. La Tabla 1 muestra los valores de las constantes, así como de los materiales empleados.

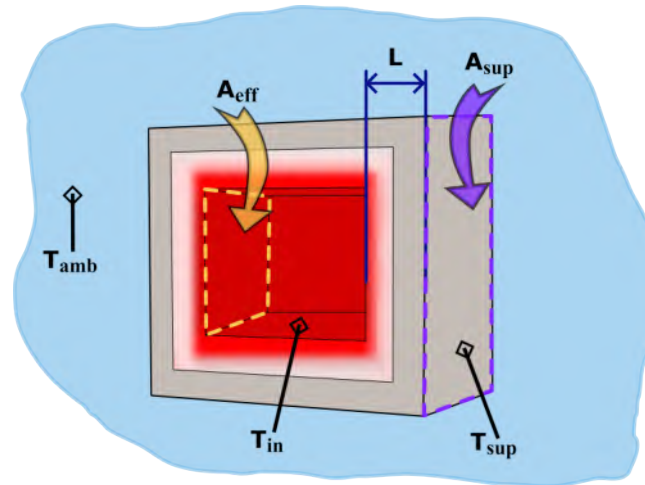


Figura 1: Diagrama esquemático de las áreas y longitud del aislamiento que intervienen en el cálculo de la transferencia de calor.

Tabla 1: Constantes termodinámicas empleadas

Constante	Material empleado	Valor	Unidades
κ conductividad térmica	Ladrillo refractario	0.20 @ 1100 °C	$\frac{W}{m \cdot K}$
ϵ emisividad	Acero inoxidable	0.4	adimensional
σ constante de Stefan Boltzmann	-	5.67×10^{-8}	$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

Debido a que en las ecuaciones de transferencia de calor aparece la temperatura en la superficie del horno, así como la temperatura ambiente, es necesario establecer dichas temperaturas como parámetros en el diseño del horno. La temperatura en la superficie del horno (T_{sup}) se estableció en 50 °C, en tanto que la temperatura ambiente (T_{amb}) se fijó en 25 °C.

Con la finalidad de poder programar un control, es necesario conocer la respuesta del horno, por lo cual se obtuvo la respuesta de la temperatura a una función escalón ($u(t)$) [5]. La temperatura del horno al aplicar la función escalón puede observarse en la Figura 2.

3. Implementación

Para controlar la temperatura del horno, se programó un control PID. Las constantes del control se obtuvieron a partir de la respuesta al escalón del horno $u(t)$. El control se implementó en un Arduino y se empleó una salida PWM para controlar un relevador de estado sólido. El relevador controla la resistencia calefactora [6]. El Listado 1 muestra las constantes del control PID.

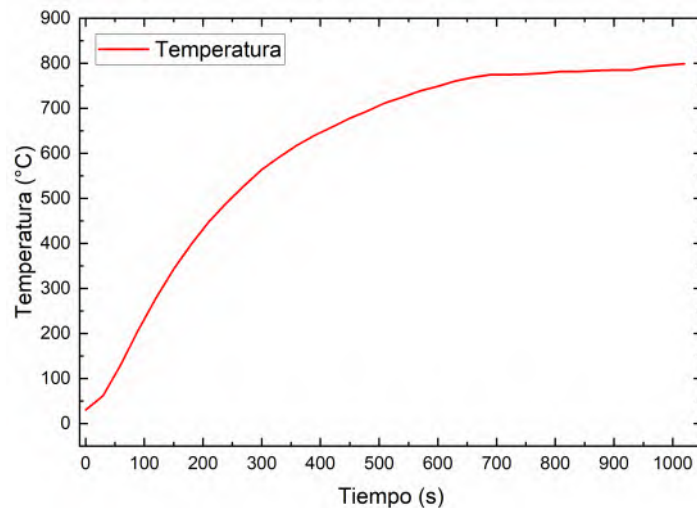


Figura 2: Respuesta de la temperatura del horno al aplicarse una función escalón $u(t)$.

Listado 1: Entradas del control PID

```

1 // PID entradas y constantes
2 double Kp = 55; // ganancia proporcional
3 double Ki = 0.012; // ganancia integral
4 double Kd = 60; // ganancia derivativa

```

4. Resultados

La propuesta del diseño del horno puede verse en la Figura 3A, una vez que se ha calculado el espesor del aislamiento se trabajó con las medidas específicas y el diseño fue llevado a un software de diseño CAD (Solid Works) antes de su construcción. También es posible apreciar una imagen real del horno ya fabricado en la Figura 3B donde es posible apreciar la resistencia calefactora en rojo, así como los ladrillos refractarios que constituyen el aislamiento térmico. El espesor de los ladrillos refractarios se obtuvo a partir de las Ecs. (2), (3) y (4). El horno desarrollado tiene 33 cm de altura, 32 cm de fondo y 20 cm de ancho; estas dimensiones permiten que sea fácilmente adaptable a cualquier laboratorio o inclusive que pueda ser empleado en el aula para llevar a cabo demostraciones.

Para comprobar el funcionamiento del horno, se programaron rampas de calentamiento de 10 °C y 20 °C por minuto, hasta alcanzar una temperatura de 800 °C. La Figura 4 muestra la temperatura al interior del horno al programar dichas rampas.

5. Discusión

Entre las características a destacar en el horno desarrollado se puede mencionar que una vez alcanzada la máxima temperatura, el horno necesita aproximadamente 95 W de potencia para mantener dicha temperatura. Adicionalmente, a la máxima temperatura, la temperatura en la superficie del horno es de 50 °C, lo cual no representa mayor peligro siempre y cuando se tengan las medidas de precaución

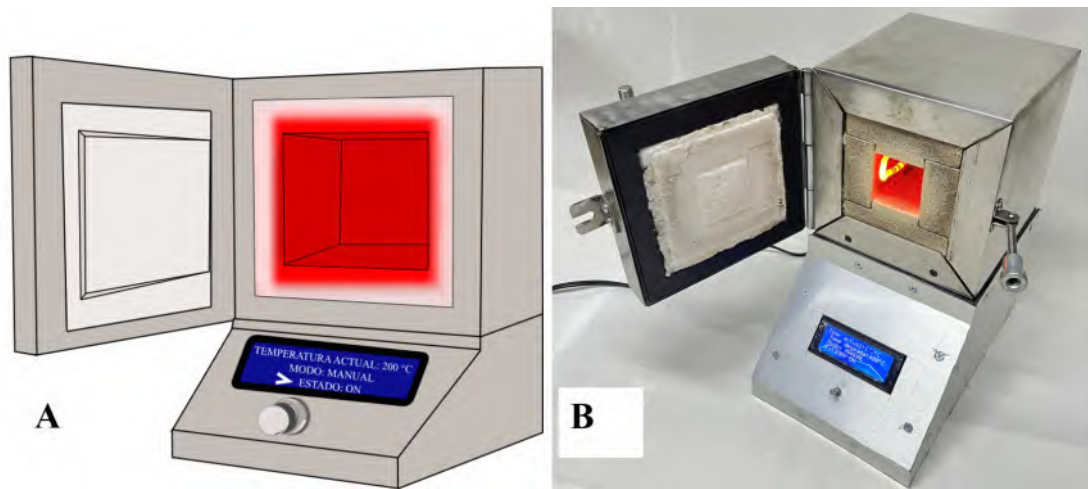


Figura 3: Temperatura del horno al programarse una tasa de calentamiento de 10 °C/ min. A) diseño concebido, B) imagen del horno en funcionamiento.

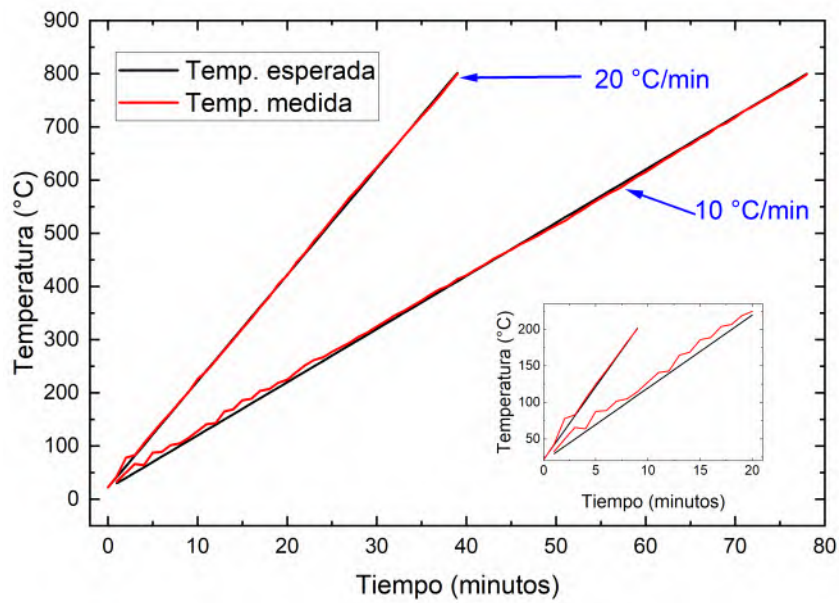


Figura 4: Temperatura del horno al programarse una tasa de calentamiento de 10 y 20 °C/ min. Inset detalle de la temperatura en el horno durante los primeros 200 °C.

adecuadas. A partir de la Figura 4 es posible apreciar que a bajas temperaturas el horno presenta mayores diferencias entre la temperatura esperada y la temperatura medida, esto es consecuencia directa del aislamiento en conjunto con la inercia térmica. A pesar de lo anterior, para aplicaciones por encima de los 200 °C el comportamiento de la temperatura es más estable.

Para poder obtener un horno de dimensiones reducidas, fue necesario limitar el volumen de la cámara de calentamiento lo cual limita las aplicaciones de este horno. A pesar de las reducidas dimensiones en la cámara de calentamiento, este horno cumple con el objetivo de proporcionar altas temperaturas tanto para demostraciones escolares como para experimentos con cantidades de muestra reducidas.

6. Conclusiones

El empleo de las ecuaciones de transferencia de calor permite acercar a los estudiantes a la termodinámica. Adicionalmente, ayuda a que el conocimiento vaya más allá de lo teórico y se implemente en la práctica. La aplicación de las ecuaciones en un objeto físico muestra la utilidad de la teoría, así mismo, permite llevar a la práctica los conocimientos vertidos en el aula.

El horno desarrollado permite llevar a cabo prácticas en otras áreas del conocimiento, en las cuales es necesario someter a materiales a altas temperaturas.

Créditos de los Autores

Flores Cuautle, Jose de Jesus Agustin: Conceptualización, Redacción - revisión y edición, Visualización.

Lara Hernández, Gemima: Análisis formal, Metodología, Redacción - borrador original, Visualización.

Flores Camo, Rafael: Investigación, Metodología, Software.

Galván Chávez, Jorge Moises: Investigación, Software, Supervisión.

García Enríquez, Irma Josefina: Validación, Curación de datos.

Referencias

- [1] Jose Jesus Agustin Flores Cuautle. “Caracterización térmica de cerámicas ferroeléctricas y aplicaciones biomédicas de cerámicas con implantes metálicos”. Tesis doctoral. CINVESTAV, 2012.
- [2] Cis-Lab Team. *Mufla de 1200 C*. Accedido: 25 de marzo de 2026. 2026. URL: <https://www.cislab.com.mx/shop/category/equipos-muflas-mufla-de-1200c-91>.
- [3] Carbolite Team. *Hornos de Laboratorio*. Accedido: 25 de marzo de 2026. 2026. URL: <https://www.carbolite.com/es/productos/hornos-de-camara/hornos-de-laboratorio/>.
- [4] Y.A. Çengel y A.J. Ghajar. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*. McGraw-Hill, 2011. ISBN: 9780073398129.
- [5] K. Ogata. *Modern Control Engineering Plus MATLAB and Simulink Student Version 2010*. Pearson Education, Limited, 2010. ISBN: 9781408264164.
- [6] Massimo Banzi y Michael Shiloh. *Getting started with Arduino: the open source electronics prototyping platform*. Maker Media, Inc., 2022. ISBN: 168045689X.