



---

---

**FENÓMENOS DE TRANSPORTE: DEFINICIÓN E IMPORTANCIA**

INTEGRANTES DEL EQUIPO (POR APELLIDO, EN ORDEN ALFABÉTICO, MÁXIMO TRES)	NÚMERO DE CONTROL

***Intención didáctica***

Concientizar al estudiante de la importancia de los fenómenos de transporte y su ubicación dentro del plan de estudios de la carrera, así como generar una definición integral de esta área de estudio.

***Indicaciones***

1. Efectuar una investigación para obtener tantas definiciones como sea posible de “fenómenos de transporte”. En esta búsqueda, se considerará válida cualquier fuente impresa o electrónica.
2. En la retícula del plan de estudios de la carrera, identificar las materias que correspondan a los siguientes tres grupos: (A) fundamentos de ingeniería, (B) operaciones y procesos unitarios, y (C) ingeniería aplicada.
3. Con la ayuda de otros compañeros y profesores de la carrera, generar una lista de operaciones unitarias, e identificar para cada una si involucran transferencia de momentum, calor o masa.
4. Con base en la información recabada, llegar a una conclusión acerca de la importancia de los fenómenos de transporte. Sintetizar su propia definición de “fenómenos de transporte”.

***Sugerencias para el éxito de la actividad***

- ★ Esta investigación pretende generar una lluvia de ideas respecto al concepto de “fenómenos de transporte”, en la que no se censuren de primera mano algunos aspectos que puedan contribuir a un concepto integral. Por esta razón, para esta actividad se considerará válida cualquier referencia, incluso fuentes en internet que en otras circunstancias se considerarían no confiables.
- ★ Es importante que consulten también libros relevantes para el curso (chechar la bibliografía proporcionada el primer día de clase). Incluso si un libro del área no define propiamente “fenómenos de transporte”, es buena idea incluirlo en la investigación y reportar que carece de dicha definición.
- ★ También pueden preguntar en foros y grupos de discusión en línea. En este caso, anexar una captura de pantalla de la conversación.

***Evidencias Entregables***

El reporte de esta actividad lleva esta hoja de instrucciones como portada. Enumerar a continuación todas las definiciones encontradas de “fenómenos de transporte”, dando para cada una su referencia bibliográfica. Después, incluir la retícula de la carrera, con los tres grupos de materias identificados. Luego, poner una tabla con las operaciones unitarias y en tres columnas señalar si involucran transferencia de momentum, calor o masa. Finalmente, enunciar sus conclusiones de la actividad y presentar su propia definición de “fenómenos de transporte”.

Sólo se entrega un ejemplar del reporte por equipo. Una vez revisado, cada integrante del equipo deberá tener una copia para su portafolio final.



**DEMOSTRACIÓN DE LOS MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR**

LUGAR DE REALIZACIÓN: LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA

INTEGRANTES DEL EQUIPO (POR APELLIDO, EN ORDEN ALFABÉTICO, MÁXIMO CINCO)	NÚMERO DE CONTROL

**Intención didáctica**

Desarrollar una serie de experiencias de laboratorio que ejemplifiquen los tres mecanismos de transferencia de calor.

**Antecedentes**

El calor es la energía transferida por virtud de una diferencia de temperaturas. Existen tres mecanismos por los cuales se puede presentar esta transferencia:

- ★ **CONDUCCIÓN:** Se debe a choques o interacciones entre los átomos o moléculas del material. Una región de mayor temperatura implica que las moléculas vibran o se mueven con mayor velocidad. Durante los choques, estas moléculas ceden parte de su energía cinética a las moléculas vecinas que están a menor temperatura, y así se presenta el flujo de energía en forma de calor. Este mecanismo es el más importante en sólidos; también se presenta en líquidos y gases, aunque en éstos generalmente es más importante la convección.
- ★ **CONVECCIÓN:** Se presenta debido al movimiento de un fluido, generalmente alrededor de una superficie sólida, y es el resultado combinado de la conducción y la advección. El calor pasa por conducción del sólido a la capa de fluido adyacente a la superficie (que no se mueve debido a la condición de no deslizamiento), y de ahí pasa también por conducción a capas subsecuentes del fluido. Suficientemente lejos de la superficie sólida, el movimiento del fluido (advección) se lleva el fluido caliente y lo reemplaza por fluido frío. La convección puede ser forzada o libre (natural), dependiendo de si el movimiento del fluido se debe a un agente externo o a la transferencia de calor únicamente.
- ★ **RADIACIÓN:** Todos los cuerpos emiten ondas electromagnéticas, pero la cantidad de energía radiada y la longitud de onda dependen de la temperatura del objeto. Este mecanismo no requiere de un medio material para la transmisión del calor, por ejemplo la Tierra recibiendo energía del Sol.

**Indicaciones**

Cada equipo definirá o identificará una demostración experimental para cada uno de los tres mecanismos de transferencia de calor. Podrán hacer uso de materiales conseguidos por ustedes mismos o disponibles en el laboratorio (chechar disponibilidad con suficiente anticipación). *Por ejemplo, para demostrar convección, puede colocarse agua caliente en un vaso de precipitados o taza, y observar cómo se eleva el vapor (convección natural) y cómo se forma una capa límite con el vapor al soplar suavemente sobre la taza (convección forzada).*

En la evaluación de la práctica se tomará en cuenta también el desarrollo creativo y si sus demostraciones son cuantitativas. *Siguiendo el ejemplo anterior, se puede considerar cuantitativo si miden la temperatura del agua en la taza y demuestran que se enfría más rápidamente cuando existe convección forzada.*

**NOTA:** *El ejemplo presentado aquí no podrá ser usado por ningún equipo.*



### **Material y reactivos**

Deberán ser especificados por el equipo, con base en su propuesta.

### **Riesgos adicionales de seguridad**

Deberán ser especificados por el equipo, con base en su propuesta.

El uso de bata es obligatorio.

### **Manejo de residuos**

Deberán ser especificados por el equipo, con base en su propuesta.

### **Evidencias entregables**

El reporte de la actividad lleva esta hoja de indicaciones como portada. A continuación, opcionalmente, incluir una breve investigación bibliográfica relevante a la práctica (aproximadamente dos páginas). Luego poner la lista de materiales, procedimiento, riesgos de seguridad, manejo de residuos, evidencias fotográficas y observaciones para cada demostración (incluir cálculos si aplica), y una conclusión individual de la práctica por cada integrante del equipo. Una vez aceptado como evidencia, su reporte deberá ser fotocopiado para que cada integrante tenga un ejemplar para su portafolio de evidencias.

### **Opcional**

Efectuar una búsqueda de videos en internet y seleccionar máximo tres que, a criterio del equipo, sean los mejores explicando teóricamente o mostrando experimentalmente los mecanismos de transferencia de calor (no debe faltar ninguno de los tres mecanismos, considerando todos los videos en conjunto). Para cada uno de los videos seleccionados, reportar el título, dirección en internet (URL), duración en minutos, una captura de pantalla del video, y una reseña (máximo 200 palabras) sobre su contenido.



**BALANCE DE ENERGÍA EN UNA ESFERA CON GENERACIÓN UNIFORME**

INTEGRANTES DEL EQUIPO (POR APELLIDO, EN ORDEN ALFABÉTICO, MÁXIMO TRES)	NÚMERO DE CONTROL

**Intención didáctica**

Determinar el perfil de temperatura en una esfera con generación de calor mediante un balance diferencial de energía.

**Indicaciones**

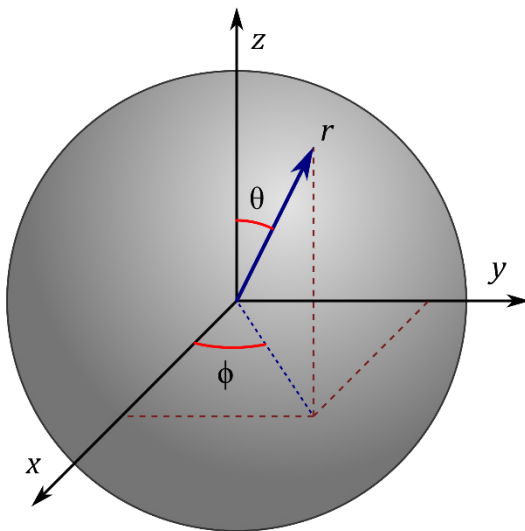
Contestar el cuestionario, conforme a las instrucciones dadas en cada sección. En caso de que el espacio para la respuesta no sea suficiente, continuar en una hoja anexa, indicando claramente la continuación.

**Evidencias entregables**

Entregar este cuestionario contestado, solamente un ejemplar por equipo. Opcionalmente, pueden anexar una breve investigación bibliográfica (aproximadamente dos páginas) respecto a las contribuciones de Fourier en el área de transferencia de calor. Una vez revisado, cada integrante del equipo deberá tener una copia para su portafolio final.

**Planteamiento del caso a analizar**

Se tiene una esfera sólida homogénea (de radio  $R$ ) en la que se presenta una generación de calor uniforme  $G_0$  ( $W/m^3$ ). La superficie de la esfera se mantiene a una temperatura constante  $T_s$ . En la figura se muestra la esfera con el sistema de coordenadas esférico (en relación con las coordenadas rectangulares).



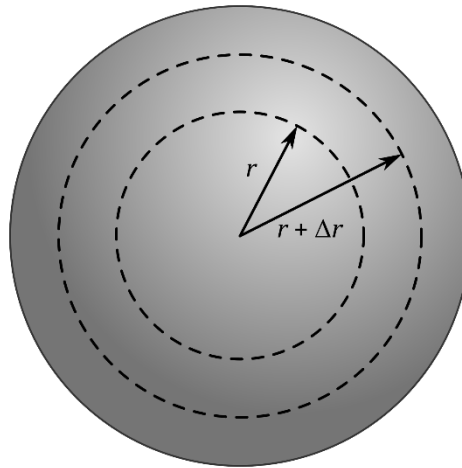
**Sección 1 – Lista de suposiciones**

Establecer las suposiciones que sean apropiadas para este caso.



**Sección 2 – Volumen de control**

El volumen de control para el balance de energía es una capa de espesor  $\Delta r$ , entre las posiciones  $r$  y  $r + \Delta r$ . Obsérvese que el volumen de control es un cascarón hueco, dentro de la esfera, y no incluye ni la superficie ni el centro de la esfera. Este volumen de control es una “envoltura” porque envuelve parte del sistema analizado. Por esta razón, a este tipo de balance diferencial también se le conoce como “balance envolvente”.



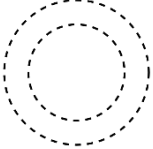
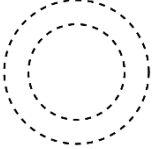
Determinar el volumen  $\Delta V$  del volumen de control, a partir de la diferencia de volumen de la esfera externa menos el volumen de la esfera interna (con la necesaria manipulación algebraica):

RESPUESTA:  $\Delta V = 4\pi r^2 \Delta r$



**Sección 3 – Balance diferencial de energía**

Para cada contribución listada en la tabla siguiente, sombrear en la figura cuál área del volumen de control es a través de la cual se efectúa la contribución, y obtener el término correspondiente. Recordar que las unidades de todos los términos deben ser joules.

	CONTRIBUCIÓN	ÁREA	TÉRMINO DEL BALANCE
1	entrada de calor por conducción en $r$		
2	salida de calor por conducción en $r + \Delta r$		
3	generación de calor dentro del volumen de control (final – inicial)		

No existe acumulación de energía en el volumen de control. Explicar por qué:

Escribir el balance completo:  $E - S + G = A$ :

Dividir entre  $4\pi r^2 \Delta r \Delta t$  (es decir,  $\Delta V$  por  $\Delta t$ ):



Tomar el límite cuando  $\Delta r \rightarrow 0$  para obtener la ecuación diferencial del sistema:

RESPUESTA:  $-\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 q_r) + G_0 = 0$

**Sección 4 – Ley de Fourier de la conducción**

Como en la ecuación diferencial aparece la densidad de flujo de calor  $q$ , se requiere la ley de Fourier, en coordenadas esféricas, componente  $r$ :

$$q_r = -k \frac{dT}{dr}$$

Nótese que se emplean derivadas ordinarias (no parciales) porque la temperatura sólo varía en la dirección  $r$ . Sustituir esta ecuación en el resultado de la sección anterior, para obtener la ecuación diferencial en función de la temperatura:

RESPUESTA:  $\frac{k}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dT}{dr} \right) + G_0 = 0$



**Sección 5 – Solución de la ecuación diferencial**

Resolver la ecuación diferencial para llegar a la solución general:

RESPUESTA:  $T = -\frac{G_0}{6k}r^2 - \frac{C_1}{r} + C_2$

**Sección 6 – Condiciones de frontera**

A continuación se muestran las condiciones de frontera para el caso analizado. Explicar el por qué de cada una.

CONDICIÓN DE FRONTERA	EXPLICACIÓN
1. $\frac{dT}{dr} = 0$ en $r = 0$	
2. $T = T_s$ en $r = R$	



**Sección 7 – Perfil de temperatura**

La condición de frontera 1 no se puede sustituir directamente en la solución general, porque es para la derivada de la temperatura ( $dT/dr$ ). Por esta razón, sería necesario primero derivar esta solución general. Afortunadamente, en este caso la derivada ya se había encontrado como parte del procedimiento de solución (sección 5):

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{G_0}{3k}r - \frac{C_1}{r^2}$$

La condición de frontera 1 se debe utilizar con esta derivada para encontrar el valor de  $C_1$ . Nótese que en este caso, al sustituir directamente la condición de frontera, se tendría división entre cero, por lo que es conveniente primero despejar  $C_1$  y luego sustituir los valores:

RESPUESTA:  $C_1 = 0$

NOTA: En muchos libros de transferencia de calor, en vez de despejar y sustituir, simplemente argumentan que el único valor posible para  $C_1$  es cero, de tal forma que se evite la división entre cero. Este argumento también se puede aplicar directamente en la solución general para  $T$ , donde aparece el término  $C_1/r$  que se volvería infinito cuando  $r = 0$ , y la única manera de evitarlo es que  $C_1$  sea cero.

Sustituyendo  $C_1 = 0$  en la solución general, se llega a una nueva solución general:

$$T = -\frac{G_0}{6k}r^2 + C_2$$

Ahora se sustituye la segunda condición de frontera en la nueva solución general, y se despeja  $C_2$ :

RESPUESTA:  $C_2 = T_s + \frac{G_0}{6k}R^2$



Esta constante  $C_2$  se sustituye en la solución general, para llegar al perfil de temperatura que se busca:

$$\text{RESPUESTA: } T = T_s + \frac{G_0 R^2}{6k} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

### Sección 8 – Caso especial con convección en la superficie (OPCIONAL)

En ocasiones, en vez de mantenerse una temperatura constante en la superficie, se tiene la esfera inmersa en un fluido y el calor se transfiere de la superficie al fluido por convección. En este caso, la condición de frontera 2 se obtiene igualando las densidades de flujo de calor por conducción (que llega desde el interior hasta la superficie) y por convección (desde la superficie hacia el fluido):

$$q_{\text{cond}} = q_{\text{conv}}$$

La conducción está dada por la ley de Fourier, y la convección está dada por la ley de Newton del enfriamiento:

$$-k \frac{dT}{dr} = h(T - T_\infty)$$

donde  $T_\infty$  es la temperatura del fluido lejos de la esfera. Reacomodando la ecuación anterior, se establece la condición de frontera en la superficie de la esfera cuando hay convección:

$$\frac{dT}{dr} + \frac{h}{k}(T - T_\infty) = 0 \quad \text{en } r = R$$

La solución general en este caso es la misma que la obtenida previamente. Empleando esta condición de frontera, junto con la condición de simetría en el centro, determinar el perfil de temperatura en la esfera.

$$\text{RESPUESTA: } T = T_\infty + \frac{G_0 R^2}{6k} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 + \frac{2k}{hR} \right]$$





### **Material y reactivos**

- ★ 2 vasos de precipitado de 600 mL.
- ★ Soporte universal con anillo y tela de asbesto.
- ★ Mechero Bunsen.
- ★ Vidrio de reloj.
- ★ Sacabocados para perforar tapones (de al menos 1 cm diámetro).
- ★ Pinzas para crisol.
- ★ Cuchillo o espátula.
- ★ Vernier.
- ★ Papas (a temperatura ambiente).
- ★ Solución indicadora de yodo (Lugol).

### **Indicaciones**

1. Usando el sacabocados, obtener por lo menos 8 cilindros de papa, cortados a igual longitud.
2. Poner uno de los vasos de precipitado con agua fría o a temperatura ambiente.
3. Poner el otro vaso de precipitado con aproximadamente 400 mL de agua y calentar hasta ebullición.
4. Con el agua hirviendo fuertemente, agregar un cilindro de papa, esperar 30 segundos, sacar del agua hirviendo, cortar transversalmente a la mitad y pasar al agua fría para detener la cocción.
5. Después de 15 segundos aproximadamente en el agua fría, sacar las mitades del cilindro y colocar el extremo cortado en contacto con la solución indicadora de yodo en el vidrio de reloj.
6. Medir el diámetro externo del cilindro ( $D$ ) y el diámetro de la zona central que no reaccionó con el yodo ( $d$ ).
7. Repetir desde el paso 4, usando tiempos de 60, 90 y 120 segundos.
8. Apagar el medio de calentamiento para que el agua deje de hervir.
9. Repetir desde el paso 4, trabajando ahora con el agua caliente sin ebullición.

### **Riesgos adicionales de seguridad**

Se manejará agua hirviendo y sólidos calientes.

### **Manejo de residuos**

No se generan residuos peligrosos. La solución de yodo usada puede eliminarse por el drenaje. Las papas pueden descartarse en la basura.

### **Cálculos**

Elaborar una tabla con las condiciones de cada caso, tiempo, y los valores medidos de  $D$  y  $d$  para cada cilindro. Elaborar una gráfica de  $d/D$  en función del tiempo con los datos de los cilindros que se cocieron con convección forzada y los de convección natural.

### **Evidencias entregables**

El reporte de la práctica puede ser elaborado en computadora, y lleva esta hoja de indicaciones como portada. A continuación, incluir una breve investigación bibliográfica relevante a la práctica (aproximadamente dos páginas), la tabla con sus datos experimentales, la gráfica de  $d/D$  para ambas condiciones, evidencias fotográficas, y una conclusión individual de la práctica por cada integrante del equipo. Sólo se entrega un ejemplar del reporte por equipo. Una vez aceptado, cada integrante del equipo deberá tener una copia para su portafolio final.



**DEMOSTRACIÓN DE LA LEY DE NEWTON DEL ENFRIAMIENTO**

INTEGRANTES DEL EQUIPO (POR APELLIDO, EN ORDEN ALFABÉTICO, MÁXIMO TRES)	NÚMERO DE CONTROL

**Intención didáctica**

Comprobar experimentalmente la ley de Newton del enfriamiento, para un caso de convección libre y un caso de convección forzada.

**Antecedentes**

Cuando un objeto se encuentra a una temperatura diferente que el medio circundante, existe una transferencia de calor entre ellos. Newton estudió este fenómeno (aunque las teorías de la época sobre el calor y la temperatura aún no estaban bien establecidas), llegando a la conclusión de que la rapidez con la que disminuye la temperatura de un objeto caliente es proporcional a la diferencia de temperatura entre el objeto y los alrededores. En términos matemáticos:

$$-\frac{dT}{dt} = a(T - T_{\infty})$$

donde  $T$  es la temperatura del objeto en cualquier tiempo  $t$ ,  $T_{\infty}$  es la temperatura del medio ambiente, y  $a$  \* es una constante con unidades de  $(\text{tiempo})^{-1}$ . Si la temperatura inicial del objeto (en  $t = 0$ ) es  $T_0$ , la ecuación diferencial se puede resolver para obtener:

$$T = T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty})e^{-at}$$

Determinando la temperatura del objeto a diversos tiempos permite obtener una estimación de  $a$ . Adicionalmente, si el objeto sólo pierde calor por convección, y su masa y propiedades físicas son constantes, se puede demostrar que la constante  $a$  de la ley de Newton está relacionada con el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$  mediante la siguiente relación:

$$a = \frac{hA}{mc_p}$$

donde  $A$  es el área de transferencia de calor,  $m$  es la masa del objeto, y  $c_p$  es la capacidad calorífica del objeto.

En esta actividad, el objeto será un vaso con agua caliente. Se pondrán dos vasos, uno que se dejará enfriar por convección libre, y el otro que se enfriará por convección forzada. Dado que los vasos son térmicos, se asumirá que la transferencia de calor ocurre únicamente a través de la superficie libre del agua. De hecho, parte de la transferencia de calor se debe a la evaporación del agua (enfriamiento por evaporación).

\* Es común que la constante sea  $k$ , pero en esta actividad se usa  $a$  para evitar confusión con la conductividad térmica.



### **Materiales**

- ★ 2 vasos térmicos.
- ★ Termómetro.
- ★ Cronómetro.
- ★ Agua caliente.

### **Indicaciones**

1. Rotular dos vasos, uno para convección libre y el otro para convección forzada.
2. Llenar ambos con agua caliente (no hasta el borde).
3. Tomar la temperatura inicial del agua y comenzar a tomar el tiempo con el cronómetro.
4. Uno de los vasos, el de convección forzada, debe colocarse en un lugar donde no haya corrientes de aire. El otro vaso se tendrá en otro lugar, apartado del primero, y se le estará soplando o agitando el aire con algún objeto para crear convección forzada.
5. Cada dos minutos, registrar la temperatura del agua y el tiempo que ha transcurrido. Se les recomienda tomar la temperatura de los vasos alternadamente (uno en los minutos pares y el otro en los minutos impares).
6. Repetir el paso anterior hasta que varias temperaturas sean iguales o se termine el tiempo de la clase.
7. Construir una gráfica con ambas series de temperatura, empleando el tiempo en minutos en el eje horizontal, para comparar la variación de temperatura cuando se aplicó convección forzada y cuando sólo hubo convección libre.
8. Con los datos de temperatura, obtener por regresión lineal el valor de la constante  $\alpha$  de la ley de Newton del enfriamiento para cada caso (nota: es necesario transformar la ecuación de  $T$  a una ecuación lineal).
9. OPCIONAL: Calcular el valor del coeficiente de transferencia de calor, en  $W/m^2 \cdot K$ , para ambos casos. Para ello necesitan saber la masa del agua (que pueden determinar por diferencia de peso) y el área de transferencia (recordar que se está asumiendo que el calor sólo se está transfiriendo por la superficie libre del agua).

### **Indicaciones de seguridad**

Tomar las debidas precauciones para el manejo del agua caliente.

### **Disposición de residuos**

No se generan residuos peligrosos.

### **Evidencias entregables**

El reporte de esta actividad puede ser elaborado en computadora, y lleva esta hoja de indicaciones como portada. A continuación, incluir una breve investigación bibliográfica sobre convección, la tabla con sus datos experimentales, su gráfica de temperaturas en función del tiempo, y su estimación de  $\alpha$  (y  $h$ , si deciden calcularla) para ambos casos, y su conclusión grupal de la actividad.



**COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN LIBRE**

LUGAR DE REALIZACIÓN: LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA

INTEGRANTES DEL EQUIPO (POR APELLIDO, EN ORDEN ALFABÉTICO, MÁXIMO CINCO)	NÚMERO DE CONTROL

**Intención didáctica**

Medir experimentalmente el coeficiente de transferencia de calor por convección natural para el caso de una superficie plana horizontal (por debajo de una superficie fría).

**Antecedentes**

La convección libre (o convección natural) se presenta cuando un fluido se pone en contacto con una superficie (sólida o fluida) que se encuentra a una diferente temperatura, y la transferencia de calor crea diferencias de densidad que son las causantes del movimiento del fluido. La diferencia de densidad (debida a la diferencia de temperatura) es la fuerza impulsora de esta transferencia de calor, y es representada a través del número de Grashof  $Gr$ . También es muy común emplear el número de Rayleigh  $Ra$  que es simplemente el producto del número de Grashof y el número de Prandtl.

$$Gr_L = \frac{g\beta|T_w - T_\infty|L^3}{\nu^2} \quad Ra_L = Gr_L Pr$$

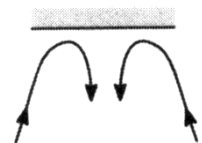
$L$  es una longitud característica que depende de la geometría del sistema. Para el caso de una superficie plana horizontal, la longitud característica  $L$  generalmente se toma como la relación entre el área de la superficie dividida entre su perímetro:

$$L = \frac{\text{área}}{\text{perímetro}} \quad (\text{para superficies planas horizontales})$$

En muchos casos simples, el coeficiente de transferencia de calor se expresa en forma de una correlación para el número de Nusselt  $\overline{Nu}_L$ :

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}L}{k}$$

En el caso de esta actividad, **la superficie sólida será un disco de hielo**, que se colocará cuidadosamente en un recipiente con agua en reposo. El calor se transfiere del agua al hielo. Al disminuir la temperatura del agua cerca del hielo, aumenta su densidad, tiende a descender y ser remplazada por agua a mayor temperatura, causando así el movimiento del agua. Además, el calor transferido hace que el hielo se derrita. La cantidad de calor transferido se puede determinar a partir de la diferencia de pesos del disco antes y después de colocarse en el agua. Este procedimiento se repite para diferentes temperaturas del agua.





### **Material y reactivos**

- ★ Cuba hidroneumática (o algún otro recipiente grande).
- ★ Soporte universal con anillo y tela de asbesto.
- ★ Mechero Fischer o Bunsen.
- ★ Vaso de precipitado de 1000 mL para calentar agua.
- ★ Balanza granataria.
- ★ Termómetro.
- ★ Cronómetro.
- ★ Discos de hielo (se recomienda al menos diez).
- ★ Agua.

### **Indicaciones**

1. Poner a calentar agua en un vaso de precipitado (la cantidad de agua que se necesitará depende del desarrollo del experimento).
2. Empleando el agua caliente del paso anterior, y agua fría de ser necesario, poner en la cuba hidroneumática agua a aproximadamente 60 °C.
3. Dejar reposar el agua alrededor de un minuto para que deje de moverse y luego medir cuidadosamente su temperatura, evitando agitarla.
4. Tomar uno de los discos de hielo, medir su diámetro inicial y pesarlo para conocer su masa inicial.
5. Rápida pero cuidadosamente, colocar el disco en el agua, procurando perturbar el agua lo menos posible. Iniciar el cronómetro.
6. Dejar el disco en el agua durante cierto tiempo. **No hay un tiempo predefinido, ya que la rapidez de transferencia de calor dependerá de la temperatura del agua. En cualquier caso, el disco no deberá derretirse más del 25% de su diámetro inicial.** Leer las recomendaciones en la sección correspondiente.
7. Sacar el disco del agua y al mismo tiempo detener el cronómetro.
8. Rápidamente pesar de nuevo el disco y medir su diámetro final.
9. Repetir desde el paso 2, con el agua de la cuba hidroneumática a aproximadamente 50, 40, 30, 20 y 10 °C. Tomar en cuenta que entre mayor sea la temperatura del agua, menor deberá ser el tiempo de permanencia del disco en el agua.

### **Indicaciones de seguridad**

El uso de la bata es obligatorio. Tomar las debidas precauciones para el manejo del agua caliente.

### **Disposición de residuos**

No se generan residuos peligrosos.



**Sugerencias para el éxito de la práctica**

- ★ Ya que se desea representar una placa plana, el disco de hielo debería ser lo más ancho posible comparado con su altura, de tal forma que la transferencia de calor en el área lateral del disco sea despreciable comparada con la transferencia en la parte plana inferior del disco. Los discos de hielo se pueden fabricar con relativa facilidad empleando cajas Petri desechables de plástico.
- ★ Aún cuando se piden 6 datos experimentales como mínimo, es conveniente que se fabriquen más de 6 discos de hielo, tomando en cuenta la necesidad de pruebas preliminares y la posibilidad de accidentes y errores. También es normal que este tipo de experimentos se realice con varias réplicas, es decir, se lleva a cabo el experimento varias veces bajo las mismas condiciones experimentales.
- ★ Entre mayor sea el recipiente en el que se contenga el agua para realizar el experimento, será más fácil garantizar que la temperatura del agua se mantenga constante, pero es más tardado calentar la cantidad suficiente de agua.
- ★ Es importante esperar a que el agua esté en reposo antes de colocar el disco de hielo. Si no es así, el movimiento que ya tenga el agua crea convección forzada que va a causar un valor del coeficiente de transferencia de calor más alto de lo debido.
- ★ El tiempo que cada disco permanece en el agua no está definido de antemano. Entre más tiempo permanezca el disco, menor será el efecto de una posible convección forzada al inicio, mayor será la diferencia de pesos del disco, y por lo tanto el valor medido de  $h$  será más exacto. Sin embargo, al irse derritiendo el disco, cambia su diámetro y por lo tanto cambia el valor de la longitud característica  $L$ , lo que indicaría que es mejor que el disco permanezca menos tiempo. El tiempo “adecuado” representa un compromiso entre estos dos efectos. En cualquier caso, se les recomienda que el diámetro final no sea menor a  $\frac{3}{4}$  del diámetro inicial.
- ★ Ya que el diámetro del disco cambia conforme se derrite, es más conveniente estimar la longitud característica  $L$  usando un promedio entre el diámetro inicial y el diámetro final del disco (siempre y cuando no haya cambiado demasiado).

**Datos experimentales**

Concentrar los datos experimentales en la tabla siguiente:

	EXPERIMENTO					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura inicial del agua $T_{\infty}$						
Diámetro inicial del disco						
Diámetro final del disco						
Masa inicial del disco						
Masa final del disco						
Tiempo del disco en el agua						



### Procedimiento de cálculo

A partir de la diferencia de peso del disco, del tiempo que permaneció en el agua y del calor de fusión del hielo, se calcula la rapidez de transferencia de calor  $Q$  (en watts). Luego, a partir de la ley de enfriamiento de Newton, se puede determinar el valor del coeficiente de transferencia de calor  $\bar{h}$  (la barra indica que es  $h$  promedio para toda la superficie).

$$Q = \bar{h}A(T_{\infty} - T_w)$$

donde  $T_{\infty}$  y  $T_w$  representan las temperaturas del agua y de la superficie del hielo, respectivamente (nótese que la diferencia de temperatura se expresó como  $T_{\infty} - T_w$  para que sea una cantidad positiva). Luego, con el valor calculado de  $\bar{h}$  se puede determinar el correspondiente número de Nusselt  $\overline{Nu}_L$ .

Por otro lado, el número de Rayleigh se calcula con la diferencia de temperatura y las propiedades del fluido, que se determinan a la temperatura promedio de película  $T_f = (T_w + T_{\infty}) / 2$ .

Los cálculos detallados sólo se reportan para uno de los discos (como ejemplo), y luego se reporta una tabla con los resultados de los cálculos de todas las pruebas:  $Q$ ,  $h$ , y el valor de los números de Nusselt y Rayleigh para cada experimento.

Finalmente, generar una gráfica de los datos experimentales de  $\overline{Nu}_L$  contra  $Ra_L$  (usar símbolos sin línea porque son datos experimentales).

### Opcional

Si se asume que el número de Nusselt se relaciona con el número de Rayleigh mediante una ecuación del tipo  $\overline{Nu}_L = cRa_L^b$ , esta ecuación se puede linealizar aplicando logaritmos:

$$\ln(\overline{Nu}_L) = \ln(c) + b \ln(Ra_L) \quad \text{equivalente a} \quad y = a + bx$$

Obtener por regresión lineal  $\textcircled{E}$  los valores de las constantes  $c$  y  $b$  que mejor ajusten los datos experimentales y presentar su correlación en la forma  $\overline{Nu}_L = cRa_L^b$ .

### Evidencias entregables

El reporte de la actividad puede ser elaborado en computadora, y lleva esta hoja de indicaciones como portada. Luego, incluir una breve investigación bibliográfica opcional (aproximadamente dos páginas) sobre convección libre. Después incluir la tabla con sus datos experimentales, los cálculos detallados sólo para uno de los discos, una tabla con los valores calculados de los demás experimentos, la gráfica de  $\overline{Nu}_L$  en función de  $Ra_L$ , y una conclusión individual de la actividad por cada integrante del equipo.

Una vez aceptado como evidencia, cada integrante del equipo deberá tener una copia del reporte para su portafolio final de evidencias.



---

---

**INTERCAMBIADORES DE CALOR**

<b>INTEGRANTES DEL EQUIPO (POR APELLIDO, EN ORDEN ALFABÉTICO, MÁXIMO CINCO)</b>	<b>NÚMERO DE CONTROL</b>

***Intención didáctica***

Familiarizar al alumno con los diversos tipos de intercambiadores de calor y sus características.

***Indicaciones***

1. Efectuar una investigación bibliográfica (opcional, aproximadamente cinco páginas) que incluya:
  - a. tipos de intercambiadores de calor, sus características y principales aplicaciones.
  - b. partes que conforman un intercambiador de calor de coraza y tubos.
  - c. características de condensadores y hervidores (calderas).
2. Realizar una visita la **Planta Piloto** e identificar, con ayuda del personal del laboratorio, los intercambiadores de calor que forman parte de los equipos ahí instalados.
3. Opcionalmente, pueden extender su investigación también con equipos del Laboratorio de Ingeniería Química.

***Evidencias entregables***

El reporte de esta actividad lleva esta hoja de indicaciones como portada, seguida de su investigación bibliográfica. Luego, para cada equipo que identifiquen que tiene intercambiadores de calor, poner el nombre del equipo, el tipo de intercambiador de calor que tiene instalado, cuáles fluidos intercambian calor, otros datos de intercambiador (si se conocen, tales como material de fabricación, área de intercambio, etcétera), y una fotografía del equipo y del intercambiador (si es accesible).

Sólo se entrega un ejemplar del reporte por equipo. Una vez revisado, cada integrante del equipo deberá tener una copia para su portafolio final.



**CRISTALIZACIÓN**

LUGAR DE REALIZACIÓN: LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA

INTEGRANTES DEL EQUIPO (POR APELLIDO, EN ORDEN ALFABÉTICO, MÁXIMO CINCO)	NÚMERO DE CONTROL

**Intención didáctica**

Familiarizar al alumno con los aspectos fundamentales de la cristalización.

**Material y reactivos**

- ★ 1 vaso de precipitado de 100 mL
- ★ 1 agitador de vidrio
- ★ 1 cristizador (o vidrio de reloj grande, si no hay cristalizadores)
- ★ 1 tubo de ensaye
- ★ 1 pinzas para tubo de ensaye
- ★ 1 soporte universal con anillo y tela de asbesto
- ★ 1 mechero Bunsen
- ★ sulfato de cobre pentahidratado  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
- ★ agua destilada

**Indicaciones, parte 1 – Agua de cristalización**

1. En un tubo de ensayo limpio y seco agregar una pequeña cantidad de sulfato de cobre (menos de lo que se necesita cubrir el fondo del tubo).
2. Calentar cuidadosamente en la llama del mechero Bunsen. El sulfato de cobre se vuelve un polvo blanco a medida que pierde el agua de cristalización.
3. Dejar enfriar el tubo.
4. Una vez frío, agregar unas gotas de agua al sulfato de cobre, que recupera su coloración azul al rehidratarse.

**Indicaciones, parte 2 – Solución saturada, sobresaturada y cristalización**

5. En un vaso de precipitado de 100 mL agregar aproximadamente 20 mL de agua destilada.
6. Agregar una pequeña cantidad de sulfato de cobre y agitar para que se disuelva. Continuar agregando sulfato y agitando hasta que no se disuelva más. En este punto se tiene una solución saturada en frío.
7. Colocar el vaso de precipitado en el soporte universal y comenzar a calentar con el mechero Bunsen.
8. Agregar más alumbre, agitando para que se disuelva, hasta obtener una solución saturada en caliente.
9. Transferir a un cristizador y dejar enfriar lentamente para que el sulfato comience a cristalizar.



### ***Evidencias entregables***

El reporte de esta actividad lleva esta hoja de indicaciones como portada. A continuación, poner una investigación bibliográfica sobre los tipos de cristales (cúbico, cúbico centrado en el cuerpo, cúbico centrado en la cara, etcétera), qué es la distribución de tamaño de cristales y los tipos de cristalizadores de uso industrial.

Reportar además la evidencia fotográfica del desarrollo de la actividad y sus conclusiones individuales.

Sólo se entrega un ejemplar del reporte por equipo. Una vez revisado, cada integrante del equipo deberá tener una copia para su portafolio final.