



### ¿QUÉ ES “FENÓMENOS DE TRANSPORTE”?

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

#### **Intención didáctica**

Concientizar al estudiante de la importancia de los fenómenos de transporte y su relación con las operaciones unitarias, 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. Realizar una entrevista a un(a) docente de la carrera, para obtener su opinión acerca de, por lo menos, los siguientes puntos:
  - a. Definición de “fenómenos de transporte”.
  - b. Definición de “operaciones unitarias”.
  - c. ¿Cuáles operaciones unitarias puede mencionar?
  - d. Importancia de los fenómenos de transporte para entender las operaciones unitarias.
3. Con base en toda esta información, sintetizar como equipo 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 no se considerarían 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.

#### **Evidencias entregables**

La evidencia de esta actividad lleva esta hoja de instrucciones cumpliendo las funciones de portada. Enumerar a continuación todas las definiciones encontradas de “fenómenos de transporte”, dando para cada una su referencia bibliográfica (2 puntos). Luego, la entrevista al docente, incluyendo una fotografía de los integrantes del equipo con el docente entrevistado (1 punto). Finalmente, presentar su propia definición sintética, como equipo, de qué es “fenómenos de transporte” (1 punto) y enunciar sus conclusiones individuales sobre la actividad (2 puntos).



**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE CÁLCULO PARA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALIMENTOS**

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

**Intención didáctica**

Aplicar alguna tecnología informática para automatizar el cálculo de conductividad térmica de productos alimenticios.

**Indicaciones**

1. Revisar el método para estimación de conductividad térmica de alimentos que está en el material proporcionado del curso. Es importante que tengan un panorama claro de cómo se llevan a cabo los cálculos para la conductividad, a fin de que puedan decidir el mejor plan de acción.
2. Como equipo, plantear alternativas para desarrollar una herramienta de cálculo que implemente el método de estimación: por ejemplo, una hoja de cálculo de Excel o un programa en algún lenguaje de programación. Discutir sus respectivas ventajas y desventajas, tomando en cuenta las habilidades individuales de los integrantes del equipo, y decidir cuál herramienta utilizarán.
3. Desarrollar su herramienta de cálculo, que use como datos la fracción (o porcentaje) masa de los componentes, la temperatura de congelamiento inicial y la temperatura del alimento (en °C) y reporte la fracción (o porcentaje) peso de hielo y la conductividad térmica con el modelo paralelo y el modelo perpendicular.
4. Utilizar su herramienta para calcular la conductividad térmica en los siguientes casos. Dos de los renglones vienen respondidos como referencia, para que puedan validar su herramienta.

alimento	agua	prot	grasa	carboh	fibra	ceniza	$T_{f0}$	$T$	hielo	$k_{paralelo}$	$k_{perpendic}$
	%	%	%	%	%	%	°C	°C	%	W/m·K	W/m·K
lomo de cerdo	72.4	19.5	7.1	0	0	1	-2.2	4	0	0.484	0.382
jugo de manzana	87.9	0.1	0.1	11.6	0.1	0.2	0	-10	74.8	1.913	1.025
limón	88.3	0.7	0.2	7.7	2.8	0.3	-1.6	15			
repollo	92.2	1.4	0.3	3.1	2.3	0.7	-0.9	-5			
almendras	4.4	20	52.2	9.5	10.9	3	0	50			
camarón	75.9	20.3	1.7	0.9	0	1.2	-2.2	-20			
queso cheddar	36.8	24.9	33.1	1.3	0	3.9	-12.9	-5			

**Evidencias entregables**

La evidencia de esta actividad lleva esta hoja de instrucciones como portada. Poner un breve resumen de cuáles herramientas consideraron y por qué eligieron la que usaron. Si utilizaron una hoja de cálculo, incluir una captura de pantalla con uno de los casos de la tabla y enviar su archivo (vía Classroom o correo electrónico). Si utilizaron un lenguaje de programación, poner el código de su programa y una corrida de prueba con uno de los casos de la tabla. Poner a continuación una tabla con sus resultados para cada caso (porcentaje de hielo, conductividad del modelo paralelo y conductividad del modelo perpendicular) o alternativamente pueden llenar la tabla de esta página. Finalmente enunciar sus conclusiones individuales de la actividad.



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

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

**Intención didáctica**

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

**Indicaciones**

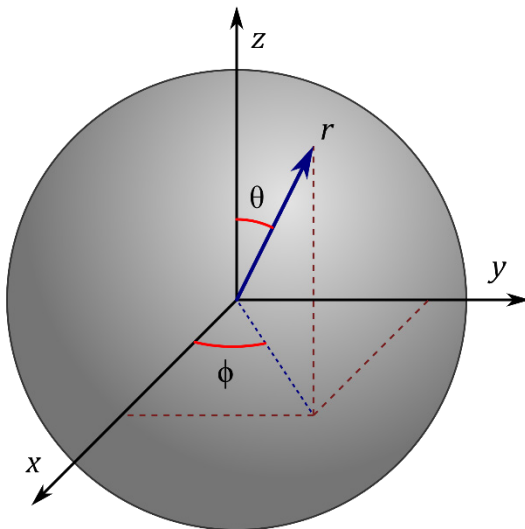
Contestar el cuestionario, conforme a las instrucciones dadas en cada sección. En caso de que el espacio para la respuesta no sea suficiente, continuar en una hoja anexa, indicando claramente la continuación.

**Evidencias entregables**

El reporte de esta actividad se elabora directamente en este documento, respondiendo las preguntas del cuestionario. Anexar sus conclusiones individuales sobre la actividad.

**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).



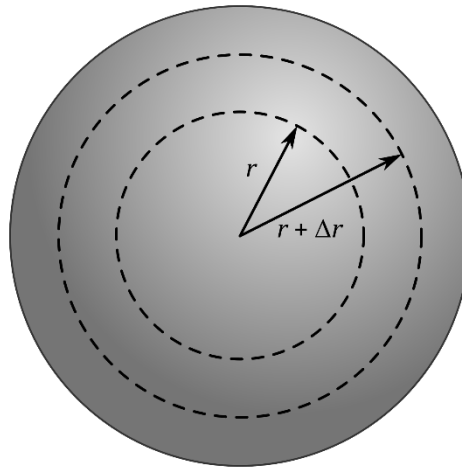
**Sección 1 – Lista de suposiciones**

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 encierra 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, recordando que  $\Delta r$  es una cantidad pequeña):

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			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		

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

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

Al dividir entre  $4\pi r^2 \Delta r \Delta t$  (es decir,  $\Delta V$  por  $\Delta t$ ), se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{q_r|_r \cdot r^2 - q_r|_{r+\Delta r} \cdot (r + \Delta r)^2}{r^2 \Delta r} + G_0 = 0$$

Obsérvese que los dos términos de conducción se están manejando juntos y que no se canceló  $r^2$  porque no aparece en ambos términos. Una de las maneras de proceder en este punto, es un pequeño truco matemático. Recordar que la notación  $q_r|_r$  indica “el valor de  $q_r$  evaluado en la posición  $r$ ”. De la misma manera,  $q_r|_{r+\Delta r}$  significa “el valor de  $q_r$  evaluado en la posición  $r + \Delta r$ ”. Además, en el sistema de coordenadas que se está usando,  $r$  es la distancia medida desde el eje hasta el punto de interés. Así que se plantea la siguiente equivalencia:

$$r \rightarrow r|_r \quad r + \Delta r \rightarrow r|_{r+\Delta r}$$



En particular la segunda,  $q_r|_{r+\Delta r}$  quiere decir “el valor de  $q_r$  [la distancia desde el eje] evaluada en la posición  $r + \Delta r$ ”, es decir,  $q_r$  en  $r + \Delta r$ . Con este cambio de notación, la ecuación se vuelve:

$$\frac{q_r|_r \cdot r^2|_r - q_r|_{r+\Delta r} \cdot r^2|_{r+\Delta r}}{r^2 \Delta r} + G_0 = 0$$

y las dos cantidades multiplicadas ( $q_r$  y  $r^2$ ) que son evaluadas en la misma posición se pueden agrupar:

$$\frac{(r^2 q_r)|_r - (r^2 q_r)|_{r+\Delta r}}{r^2 \Delta r} + G_0 = 0$$

Aquí se escribió el producto  $r^2 q_r$  con el factor  $r^2$  primero simplemente por costumbre. Se puede decir que  $r^2$  y  $(r + \Delta r)^2$  “se metieron” dentro de la evaluación en las posiciones  $r$  y  $r + \Delta r$ . De la misma manera que al “meter” una cantidad dentro de una raíz cuadrada entra elevado al cuadrado, al introducir  $(r + \Delta r)^2$  dentro de la evaluación en la posición  $r + \Delta r$  entra simplemente como  $r^2$ .

NOTA: No es la única manera de manejar estos términos, pero tiene la ventaja de llevar directamente a una forma fácil de resolver de la ecuación diferencial. Algo similar ocurre en algunos casos de coordenadas cilíndricas, donde  $r$  aparece a la primera potencia.

Acomodar de acuerdo a la definición de la derivada y tomar el límite  $\Delta r \rightarrow 0$  para obtener la ecuación diferencial:

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

#### Sección 4 – Aplicación de la ley de Fourier de la conducción

Se requiere ahora 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  $r$ . Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$-\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left[ r^2 \left( -k \frac{dT}{dr} \right) \right] + G_0 = 0$$

Los signos negativos se cancelan entre sí, y la conductividad térmica constante se puede sacar de la derivada ( $r^2$  no se puede sacar porque no es constante):

$$\frac{k}{r^2} \frac{d}{dr} \left[ r^2 \frac{dT}{dr} \right] + G_0 = 0$$



**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**

Aplicar las condiciones de frontera de la sección anterior para obtener el perfil de temperatura.

NOTA: La condición de frontera 1 no se puede sustituir en la solución general, porque es para la derivada de la temperatura ( $dT/dr$ ).

RESPUESTA:  $T = T_s + \frac{G_0}{6k}(R^2 - r^2)$

**Sección 8 – Temperatura máxima**

La temperatura máxima puede obtenerse aplicando el criterio de máximos y mínimos, aunque en ocasiones puede encontrarse por “simple inspección”.

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



### Sección 9 – Temperatura promedio

La temperatura promedio en la esfera se obtiene integrando el perfil de temperatura con respecto al volumen y dividiendo entre el volumen total de la esfera:

$$\bar{T} = \frac{1}{V} \int_{\text{esfera}} T dV$$

El diferencial de volumen en coordenadas esféricas es  $dV = r^2 \sin\theta dr d\theta d\phi$ , y el volumen de la esfera es  $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ , así que la temperatura promedio se vuelve:

$$\bar{T} = \frac{3}{4\pi R^3} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{r=0}^R T \cdot r^2 \sin\theta dr d\theta d\phi$$

El integrando no depende de  $\phi$ , por lo que esa integración puede realizarse primero de forma independiente y la única función de  $\theta$  a integrar es el seno, por lo que esa integral también se puede realizar por separado:

$$\int_0^{2\pi} d\phi = \phi \Big|_0^{2\pi} = 2\pi \qquad \int_0^{\pi} \sin\theta d\theta = -\cos\theta \Big|_0^{\pi} = 2$$

Sustituyendo estos resultados, se llega a la fórmula con la que se puede obtener la temperatura promedio en este caso:

$$\bar{T} = \frac{3}{R^3} \int_0^R T \cdot r^2 dr$$

En esta última ecuación, sustituir el perfil de temperatura obtenido en la sección anterior, integrar y simplificar para encontrar la temperatura media de la esfera:

RESPUESTA:  $\bar{T} = T_s + \frac{G_0 R^2}{15k}$



**Sección 10 – Densidad de flujo de calor y calor total emitido**

La densidad de flujo de calor  $q_r$  se obtiene a partir de la ley de Fourier de la conducción:  $q_r = -k(dT / dr)$ . El procedimiento formal es tomar el perfil de temperatura (que se obtuvo en la sección 6), derivar con respecto a  $r$  y sustituir esta derivada en la ley de Fourier.

SUGERENCIA: En ocasiones, ya se cuenta con la derivada  $dT / dr$ , obtenida durante la solución de la ecuación diferencial (sección 5).

RESPUESTA:  $q_r = \frac{1}{3}G_0r$

Esta densidad de flujo de calor, que depende de  $r$ , indica cuánta energía está pasando a través de una capa de la esfera a cualquier distancia  $r$  del centro. Para saber cuánto calor emite la esfera, primero es necesario evaluar  $q_r$  en la superficie de la esfera, es decir en  $r = R$ :

$$q_r = \frac{1}{3}G_0r \quad \rightarrow \quad q_r|_{r=R} = \frac{1}{3}G_0R$$

Al multiplicar  $q_r|_{r=R}$  por el área total de la esfera se obtiene la rapidez total con la que la esfera está emitiendo calor:

RESPUESTA:  $Q = \frac{4}{3}\pi R^3G_0$



**PERFIL DE TEMPERATURA EN UNA ALETA DE ENFRIAMIENTO**

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

**Intención didáctica**

Entender el efecto del número de Biot en el perfil de temperatura de una aleta recta de sección transversal constante.

**Antecedentes**

La ecuación diferencial para la temperatura en una aleta recta de longitud  $L$  y sección transversal constante es:

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{hP}{kA}(T - T_\infty) = 0 \quad \text{con condiciones de frontera} \quad \begin{cases} T = T_w & \text{en } x = 0 \\ \frac{dT}{dx} = 0 & \text{en } x = L \end{cases} \quad (1)$$

Al adimensionalizar la ecuación diferencial, aparece de forma natural el número de Biot:

$$Bi = \frac{hPL^2}{kA} \quad (2)$$

Al resolver de la ecuación diferencial (1), se llega al perfil de temperatura:

$$T = T_\infty + (T_w - T_\infty) \cosh\left(\frac{x}{L}\sqrt{Bi}\right) \left[ 1 - \tanh(\sqrt{Bi}) \tanh\left(\frac{x}{L}\sqrt{Bi}\right) \right] \quad (3)$$

**Indicaciones**

1. Comentar en clase qué efecto puede tener el número de Biot en el perfil de temperatura, cuando Bi es un valor muy pequeño o un valor muy grande, con base en la interpretación del número de Biot como la relación:

$$Bi = \frac{\text{rapidez de transferencia de calor por convección}}{\text{rapidez de transferencia de calor por conducción dentro de la aleta}}$$

2. Empleando una hoja de cálculo o un lenguaje de programación, trazar en una misma gráfica el perfil de temperatura para una aleta de 15 cm de longitud, con  $T_w = 100 \text{ °C}$  y  $T_\infty = 25 \text{ °C}$ , para los siguientes valores del número de Biot: 0.1, 1, 10 y 100. Comentar si el comportamiento del perfil de temperatura concuerda con las expectativas del paso anterior.

**Evidencias entregables**

El reporte de esta actividad lleva esta hoja de instrucciones cumpliendo las funciones de portada. Incluir a continuación una explicación resumida de lo que se comentó en el paso 1, la gráfica del paso 2, y sus conclusiones individuales de la actividad.





### **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 preferencia al menos 1.5 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 300 mL de agua y calentar hasta ebullición.
4. Con el agua hirviendo fuertemente (convección forzada), 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 10 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 pero sin ebullición (convección libre).

### **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. Graficar los valores de  $d/D$  en función del tiempo, para los cilindros que se cocieron con convección forzada y para los de convección libre.

### **Evidencias entregables**

El reporte de la actividad 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, evidencia fotográfica del desarrollo de la actividad, y sus conclusiones individuales.



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

INTEGRANTES DEL EQUIPO (POR APELLIDO, EN ORDEN ALFABÉTICO, MÁXIMO CINCO)	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 y determinar el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección en ambos casos.

**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 para este caso la constante  $a$  de la ley de Newton está relacionada con el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$  de acuerdo a:

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

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 debe colocarse en un lugar donde no haya corrientes de aire (convección libre). El otro vaso se tendrá en otro lugar y le soplarán o echarán aire con ayuda de 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 la temperatura no varíe 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  $a$  de la ley de Newton del enfriamiento para cada caso (nota: es necesario transformar la ecuación de  $T(t)$  a una ecuación lineal).
9. 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 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. Luego poner una tabla con sus datos experimentales, la gráfica de temperatura en función del tiempo y el cálculo de  $a$  y  $h$  para ambos casos (convección libre y convección forzada), y sus conclusiones individuales sobre la actividad.



**TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN LIBRE**

LUGAR DE REALIZACIÓN: LABORATORIO DE FÍSICOQUÍMICA

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 (convección natural) se presenta cuando un fluido se pone en contacto con una superficie que se encuentra a una diferente temperatura, y la transferencia de calor ocasiona una diferencia de densidad que es la causante del movimiento del fluido.

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

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

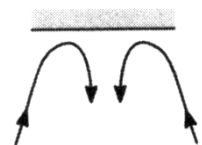
La diferencia de densidad (debida a la diferencia de temperatura) es representada a través del número de Grashof  $Gr$ . También es muy común emplear el número de Rayleigh  $Ra$  que es simplemente el producto del número de Grashof y el número de Prandtl.

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

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

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

En el caso de esta actividad, la superficie sólida será un disco de hielo, que se colocará en un recipiente con agua en reposo. Debido a la diferencia de temperatura, hay una transferencia de calor del agua al hielo. Al enfriarse el agua que está cerca del hielo, aumenta su densidad, tiende a descender y ser remplazada por agua de los alrededores, 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 peso del disco de hielo, antes y después de estar 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 al menos treinta segundos para que deje de moverse y luego medir 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 un tiempo adecuado. **No hay un tiempo predefinido, ya que la rapidez de transferencia de calor dependerá de la temperatura del agua. Se recomienda que el disco no se derrita a menos de tres cuartas partes de su diámetro inicial (ver recomendaciones más adelante en este documento).**
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.

### **Consideraciones de seguridad y manejo de residuos**

- ★ El uso de la bata es obligatorio.
- ★ Tomar precauciones en el manejo del agua caliente.
- ★ 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.
- ★ 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 la convección forzada causada al poner el disco en el agua, mayor será la diferencia de pesos del disco, y por lo tanto el valor medido de  $\bar{h}$  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 significa que sería preferible que el disco no permanezca mucho tiempo en el agua. El tiempo “adecuado” representa un compromiso entre estos dos efectos. En este caso, se les recomienda que el diámetro final no sea ser 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:

	PRUEBA					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura inicial del agua $T_{\infty}$ (°C)						
Diámetro inicial del disco (cm)						
Diámetro final del disco (cm)						
Masa inicial del disco (g)						
Masa final del disco (g)						
Tiempo del disco en el agua (s)						



### **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  $\bar{Nu}$ .

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 (a manera de 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. Gráficar los valores obtenidos de  $\bar{Nu}$  en función de  $Ra$  (usar símbolos sin línea porque son datos experimentales).

### **Evidencias entregables**

El reporte de la actividad puede ser elaborado en computadora, y lleva este documento de indicaciones como portada. 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  $\bar{Nu}$  en función de  $Ra$ , evidencia fotográfica del desarrollo de la actividad y las conclusiones individuales de cada integrante del equipo.



**SIMULADOR DE RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO**

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

**Intención didáctica**

Reconocer algunas de las características de la radiación emitida por un cuerpo negro de acuerdo a la ley de Planck.

**Introducción**

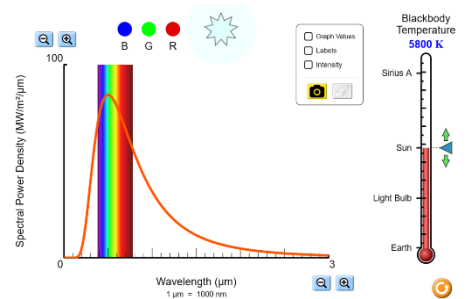
Todos los cuerpos que tienen una temperatura superior al cero absoluto emiten radiación electromagnética. La cantidad de radiación y su distribución en las diferentes longitudes de onda (espectro) dependen de la temperatura del objeto. Un cuerpo negro es un objeto ideal que absorbe toda la radiación que recibe y no refleja ni transmite nada de ella. Los cuerpos negros también emiten radiación con una distribución particular, conocida como Ley de Planck.

**Instrucciones**

Para esta actividad es necesario emplear el simulador “Blackbody Spectrum” de las simulaciones PhET desarrolladas por la Universidad de Colorado en Boulder.



Pueden acceder a la página principal <http://phet.colorado.edu/> y buscar el simulador por nombre, o directamente escaneando el código QR mostrado a la izquierda.



Usando el simulador como fuente de información, responder el cuestionario.

**Evidencias entregables**

El reporte de esta actividad se elabora directamente en este documento, respondiendo las preguntas del cuestionario. Una vez completada su evidencia, sólo integrante del equipo debe efectuar su entrega a través de Google Classroom.

**Cuestionario**

1. Empleando el control a la izquierda del termómetro, aumenta y disminuye la temperatura. Observen la curva que representa la luz emitida. **Describir la forma de esta curva y cómo cambia al variar la temperatura.**

Respuesta:



2. En la parte superior de la pantalla hay una estrella que simula el color de la radiación emitida por el cuerpo negro. Cuando la temperatura es suficientemente baja, la estrella no se ve porque la radiación emitida está en la parte infrarroja del espectro. **Buscar a qué temperatura empieza a emitir en la parte visible del espectro, es decir, la temperatura más baja en la que apenas se alcanza a notar la estrella de la parte superior de la pantalla.**

Respuesta:

3. Ahora aumenten la temperatura gradualmente. La estrella empieza a emitir luz, primero roja, y luego va cambiando de color. **Describir la secuencia de colores de la luz emitida por el cuerpo negro al aumentar la temperatura.**

Respuesta:

4. **Identificar a qué temperatura la luz de la estrella es aproximadamente blanca.**

Respuesta:

5. Activen la opción para mostrar los valores en el gráfico (graph values). En el eje horizontal, la aplicación les muestra la longitud de onda del punto más alto de la curva. **Determinar qué temperatura necesita tener el cuerpo negro para que la máxima radiación emitida (el máximo de la curva) ocurra en la longitud de onda indicada en la tabla siguiente, y qué color aparenta tener la estrella en cada caso.**

Longitud de onda del máximo de emisión ( $\mu\text{m}$ )	2.0	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4
Temperatura (K)						
Color aparente del objeto						

6. Regresen la temperatura a 5500 K. Observa que el color de la estrella no es el mismo que la longitud de onda correspondiente al máximo de la curva: a esta temperatura, el máximo de emisión está en  $0.53 \mu\text{m}$  (530 nm), que corresponde a luz de color verde, pero la estrella se ve prácticamente blanca. **Explicar por qué sucede esto.**

PISTA: ¿Qué es el color blanco?

Respuesta:



**TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS EVAPORADORES**

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

**Intención didáctica**

Familiarizar al alumno con los diversos tipos de evaporadores. Reforzar el uso de términos técnicos en inglés relacionados con la operación unitaria de evaporación.

**Indicaciones**

- Realizar una lectura de comprensión del siguiente material:
  - ✓ Páginas 482–490 del libro de McCabe y Harriot, “Operaciones Unitarias en Ingeniería Química”, 4ª edición, McGraw-Hill (hasta antes de la sección “Funcionamiento de los evaporadores tubulares”).
  - ✓ Páginas 545–549 del libro de Geankoplis, “Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias”, 3ª edición, CECSA (hasta antes de la sección 8.2B).
- Elaborar una síntesis de los conceptos principales, con base principalmente en estas dos referencias bibliográficas, pero con la opción de complementar con fuentes bibliográficas adicionales. En su síntesis, poner énfasis principal en los tipos de evaporadores y en las características o factores que influyen en la operación de un evaporador. Pueden incluir las figuras que consideren necesarias para su explicación, pero deben hacer referencia a ellas en el texto antes de que aparezcan.
- Leer el artículo:
  - ✓ Hackett, Bryan W. (2018). “The Essentials of Continuous Evaporation”. *Chemical Engineering Progress*, 114(5), pp. 24–28.

Elaborar una lista de todas las palabras que no conozcan (especialmente los términos técnicos) e investigar su equivalente en español. Preparar un breve resumen en español de las ideas principales del artículo.

**Evidencias entregables**

El reporte de la actividad puede ser elaborado en computadora, y lleva este documento de indicaciones como portada, seguida de la síntesis sobre los tipos de evaporadores y sus características, la lista de términos técnicos en inglés que desconocían y su equivalente en español, el resumen del artículo (máximo dos páginas), y una conclusión individual de la actividad por cada integrante del equipo.

Para el portafolio final de evidencias, individualmente anexar también su copia del artículo.

Su comprensión del material indicado en el punto 1 de las indicaciones, es sujeto de evaluación en el cuestionario y/o en el examen de la unidad.



**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 básicos de la cristalización.

**Material y reactivos**

- ★ 1 vaso de precipitado de 100 mL
- ★ 1 agitador de vidrio
- ★ 1 vidrio de reloj grande
- ★ 1 tubo de ensaye
- ★ 1 pinza para tubo de ensaye
- ★ 1 espátula
- ★ 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 (apenas lo necesario 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 sulfato, agitando para que se disuelva, hasta obtener una solución saturada en caliente.
9. Vaciar la solución en el vidrio de reloj y dejar enfriar para que el sulfato comience a cristalizar.



### ***Indicaciones de seguridad y manejo de residuos***

El sulfato de cobre es un compuesto irritante, evitar el contacto con la piel y los ojos, evitar la inhalación de polvos. En caso de contacto con la piel, lavar con abundante agua y jabón. En caso de contacto con los ojos, enjuagar con abundante agua. Por la vía oral, el sulfato de cobre es moderadamente tóxico; no comer o beber cuando se trabaje con este compuesto.

El sulfato de cobre no debe ser descartado por el drenaje, pues es altamente tóxico para la vida acuática. Recolectar las soluciones de sulfato de cobre en el contenedor indicado por el personal del laboratorio.

### ***Evidencias entregables***

El reporte de esta actividad lleva esta hoja de indicaciones como portada. Incluir una breve investigación bibliográfica (máximo dos páginas) sobre aplicaciones de la cristalización a nivel industrial (procesos y/o equipos). Reportar las observaciones de los dos experimentos, con la evidencia fotográfica correspondiente, y sus conclusiones individuales sobre la actividad.