

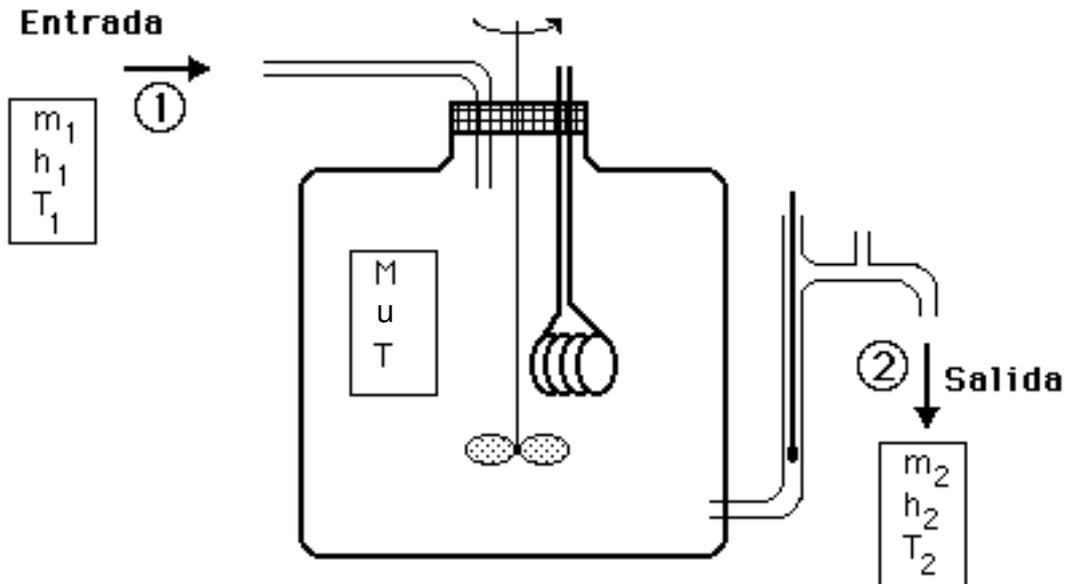
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

Laboratorio de Ingeniería Química

**BALANCE DE ENERGÍA
EN ESTADO NO ESTACIONARIO**

1. INTRODUCCIÓN

El sistema al que se va a plantear el balance de energía calorífica consiste en un tanque adiabático perfectamente agitado con sistema de calefacción mediante resistencias eléctricas y salida por sistema de rebosadero que mantiene un volumen constante, tal y como se aprecia en la figura siguiente:



Al plantear el balance de energía calorífica a este sistema se obtiene:

$$m_2 h_2 - m_1 h_1 + \frac{d(Mu)}{dt} = q + w_s \quad (1)$$

donde: m_i = caudal másico que entra o sale del sistema (kg/s)
 h_i = entalpía por unidad de masa de cada una de las corrientes (J/kg)
 M = cantidad de materia existente en el tanque (kg)
 u = energía interna por unidad de masa del contenido del tanque (J/kg)
 q = calor neto por unidad de tiempo que entra al sistema no asociado a la masa (J/s \equiv W)
 w_s = trabajo neto por unidad de tiempo que entra al sistema no asociado a la masa (J/s \equiv W)

Si se toma como estado de referencia estado líquido a la temperatura T_{ref} y se admite que no hay cambio de fase, la entalpía por unidad de masa de las corrientes de entrada y salida del sistema y la energía interna del contenido del tanque pueden expresarse como:

$$\begin{aligned} h_1 &= c_{p1} (T_1 - T_{ref}) \\ h_2 &= c_{p2} (T_2 - T_{ref}) \\ u &= c_v (T - T_{ref}) \end{aligned}$$

donde c_{pi} es el calor específico (J/kg K) de cada corriente, y c_v el del contenido del tanque. Sustituyendo en la ecuación (1) se obtiene:

$$m_2 c_{p_2} (T_2 - T_{ref}) - m_1 c_{p_1} (T_1 - T_{ref}) + \frac{d[M c_v (T - T_{ref})]}{dt} = q + w_s \quad (2)$$

Ahora bien:

a) si se desprecia la potencia "aportada" por el agitador:

$$w_s = 0$$

b) si se considera que el calor específico de las corrientes y la que en cada momento tiene el líquido en el tanque son constantes y no dependen de la temperatura ni de la presión:

$$c_{p2} = c_{p1} = c_v = \text{cte}$$

c) si se considera que la densidad de las corrientes y la que en cada momento tiene el líquido en el tanque son constantes y no dependen de la temperatura

$$\rho_2 = \rho_1 = \rho = \text{cte}$$

d) y si se tiene en cuenta que el volumen en el interior del tanque permanece constante (por estar dotado con un sistema de rebosadero), y que por lo tanto el caudal volumétrico de entrada es igual al de salida:

$$V = \text{cte} = V_o \quad Q_{L1} = Q_{L2} = Q_L$$

la ecuación (2) se transforma en:

$$\rho Q_L c_p (T_2 - T_1) + \rho V_o c_p \frac{dT}{dt} = q \quad (3)$$

donde: $Q_L =$ caudal volumétrico (m^3/s)

$\rho =$ densidad (kg/m^3)

$V_o =$ volumen del tanque (m^3)

Como puede suponerse que la agitación es perfecta, se cumplirá en todo momento que $T_2 = T$ y por tanto la ecuación (3) se puede escribir como:

$$(T - T_1) + \frac{V_o}{Q_L} \frac{dT}{dt} = \frac{q}{\rho Q_L c_p} \quad (4)$$

Si se define:

$$\tau \equiv \frac{V_o}{Q_L} \quad \text{y} \quad T_G \equiv \frac{q}{\rho Q_L c_p}$$

la ecuación (4) se puede escribir así:

$$(T - T_1) + \tau \frac{dT}{dt} = T_G \quad (5)$$

El parámetro τ se denomina *tiempo de residencia* del líquido en el tanque, y se expresa en segundos. El otro parámetro, T_G , tiene dimensiones de temperatura, y se puede interpretar como la máxima diferencia posible de temperatura de la corriente de salida respecto a la de entrada. El valor de ambos parámetros, al igual que T_1 (la temperatura de la corriente de entrada al tanque), puede calcularse a partir de los datos iniciales conocidos del sistema.

La ecuación (5) es una ecuación diferencial que expresa la evolución de la temperatura en el interior del tanque con el tiempo. Para poder conocer esta relación, es necesario integrarla conociendo una condición inicial de partida:

$$\text{para } t = 0, \quad T = T_0$$

Separando variables en (5):

$$\frac{dT}{T_G + T_1 - T} = \frac{1}{\tau} dt$$

e integrando con la condición inicial antes apuntada, se obtiene:

$$\boxed{T = (T_G + T_1) - (T_G + T_1 - T_0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)} \quad (6)$$

que nos da la relación entre la temperatura T en el interior del tanque y el tiempo transcurrido, t .

Cuando se alcanza el estado estacionario, el término $dT/dt = 0$ y por tanto, de la ecuación (5):

$$T_{\text{est}} = T_G + T_1 = \frac{q}{\rho Q_L c_p} + T_1 \quad (7)$$

También se puede llegar a esta misma conclusión partiendo de la ecuación (6) y haciendo $t = \infty$.

2. OBJETO DE LA PRÁCTICA

El objeto de esta práctica consiste en comparar los valores de la evolución de la temperatura con el tiempo obtenidos experimentalmente para un proceso de calentamiento o de enfriamiento, con las ecuaciones teóricas que representan cada uno de estos procesos térmicos. Estas ecuaciones se deducirán planteando los balances de energía al sistema, en los términos adecuados.

3. APARATO

El sistema (cuyo esquema es el que se ha visto anteriormente) consiste en un tanque adiabático, perfectamente agitado, con un volumen útil conocido, provisto de un sistema de rebosadero y un termómetro. La calefacción se efectúa mediante resistencias eléctricas. Al tanque está entrando continuamente una corriente de agua pura, cuyo caudal se regula mediante una válvula, y se puede controlar con un orificio medidor, y su temperatura se puede determinar mediante un termómetro.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

a) En primer lugar, se conecta el agitador y se procede a fijar el caudal de agua que entra y sale del sistema a un valor próximo al recomendado por el profesor/a de prácticas. Una vez conseguido este caudal, se realizarán hasta cinco medidas no discrepantes con probeta y cronómetro para determinar su valor medio, y se observará la diferencia de alturas de las ramas del manómetro conectado al orificio medidor. A lo largo de toda la sesión de prácticas se debe ir comprobando periódicamente que el caudal se mantiene en el valor inicialmente establecido.

b) A continuación, se calcula la temperatura del estado estacionario que se obtendrá durante la etapa de calentamiento, utilizando la ecuación (7), y haciendo uso de las condiciones experimentales que se vayan a utilizar:

$$Q_L = \quad (\text{m}^3/\text{s}); \quad q = \quad (\text{W}); \quad T_1 = \quad (^\circ\text{C})$$

c) Se procede a efectuar el proceso de calentamiento. Para ello, se conecta la resistencia calefactora y, simultáneamente, se pone en marcha el cronómetro, y se empieza a seguir la evolución de la temperatura con el tiempo. Al principio la variación de temperatura es muy rápida, y se recomienda que se anote el tiempo cada vez que suba 0.5°C la temperatura. Cuando el tiempo transcurrido entre dos medidas se hace mayor que 1 minuto, se anota la temperatura cada minuto. El seguimiento del proceso de calentamiento se realiza durante una hora, tiempo en el cual la temperatura se habrá aproximado suficientemente a la del estado estacionario.

d) Finalizado el proceso de calentamiento, se procede a efectuar el proceso de enfriamiento. Para ello, sin haber modificado para nada el caudal inicialmente establecido, se desconecta la resistencia calefactora y, simultáneamente, se pone a cero otra vez el cronómetro y se empieza a seguir la evolución de la temperatura del tanque con el tiempo de forma semejante a la descrita en el apartado anterior. La duración de este proceso será también de una hora.

5. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

a) Tanto para la etapa de calentamiento como para la etapa de enfriamiento, con las medidas efectuadas se construye una tabla como la siguiente:

TABLA

Volumen del depósito = (m³)
 Caudal volumétrico = (m³/s)
 Potencia de la resistencia = (W)
 $T_1 =$ (°C) $T_o =$ (°C)

t (s)	T (°C)
0	T_o
-----	-----
-----	-----
-----	-----
-----	-----

b) Representar los datos de las dos tablas anteriores en dos hojas distintas de papel milimetrado en la forma $T = f(t)$, para cada uno de los dos procesos.

c) Obtener mediante la aplicación del balance de energía calorífica en el tanque, las ecuaciones que relacionan la temperatura del agua en su interior con el tiempo de operación, para cada uno de los dos procesos. Hay que tener en cuenta que el calentamiento y el enfriamiento son procesos diferentes e independientes y el valor de las variables q y T_o es distinto para cada uno de los procesos.

d) Representar estas funciones mediante una línea continua en las mismas gráficas en las que se representaron los datos experimentales.

6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

a) Efectuar un estudio cualitativo de la variación de la temperatura de estado estacionario que se alcanza en el proceso de calentamiento, en función de las variables del sistema: Q_L , q y T_1 .

b) Construir una gráfica que permita conocer la temperatura del estado estacionario en función del caudal volumétrico, para el montaje experimental utilizado.

c) Analizar de forma cuantitativa la variación de la curva $T = f(t)$ al modificar el caudal volumétrico de circulación del fluido en un 50% (aumentándolo y disminuyéndolo), tanto en el proceso de calentamiento como en el de enfriamiento

d) Comentar los resultados obtenidos.