



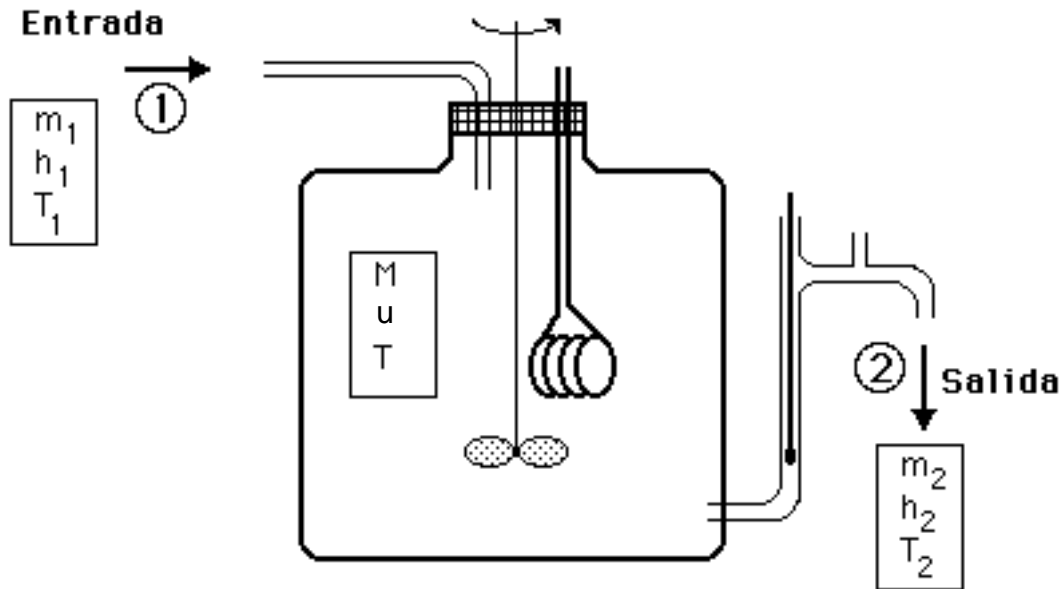
**DEPARTAMENT D'ENGINYERIA QUÍMICA**

**Laboratori Introducció a l'enginyeria bioquímica**

**BALANÇ D'ENERGIA  
EN ESTAT NO ESTACIONARI**

# 1. INTRODUCCIÓ

El sistema a què es plantejarà el balanç d'energia calorífica consisteix en un tanc adiabàtic perfectament agitat amb sistema de calefacció mitjançant resistències elèctriques i eixida per un sistema amb sobreexidor que manté un volum constant, tal com s'observa en la figura següent.



Si es planteja el balanç d'energia calorífica a aquest sistema s'obté:

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

- on:
- $m_i$  = cabal màssic que entra o ix del sistema (kg/s)
  - $h_i$  = entalpia per unitat de massa de cada corrent (J/kg)
  - $M$  = quantitat de matèria que hi ha al tanc (kg)
  - $u$  = energia interna per unitat de massa del contingut del tanc (J/kg)
  - $q$  = calor neta per unitat de temps que entra al sistema no associada a la massa (J/s  $\equiv$  W)
  - $w_s$  = treball net per unitat de temps que entra al sistema no associat a la massa (J/s  $\equiv$  W)

Si es pren com a estat de referència estat líquid a la temperatura  $T_{ref}$  i s'admet que no hi ha canvi de fase, l'entalpia per unitat de massa dels corrents d'entrada i eixida del sistema i l'energia interna del contingut del tanc es poden expressar com a:

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

on  $c_{pi}$  és la calor específica (J/kg K) de cada corrent, i  $c_v$  la del contingut del tanc. Substituint en l'equació (1) s'obté:

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

Ara bé:

a) si considerem negligible la potència "aportada" per l'agitador:

$$w_s = 0$$

b) si es considera que la calor específica dels corrents i la que a cada moment té el líquid al tanc són constants i no depenen de la temperatura ni de la pressió:

$$c_{p2} = c_{p1} = c_v = ct$$

c) si es considera que la densitat dels corrents i la que a cada moment té el líquid al tanc són constants i no depenen de la temperatura:

$$\rho_2 = \rho_1 = \rho = ct$$

d) i si es té en compte que el volum a l'interior del tanc es manté constant (perquè està dotat d'un sistema amb sobreexidor) i que, per tant, el cabal volumètric d'entrada és igual al d'eixida:

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

l'equació (2) es transforma en:

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

on:  $Q_L =$  cabal volumètric ( $m^3/s$ )  
 $\rho =$  densitat ( $kg/m^3$ )  
 $V_o =$  volum del tanc ( $m^3$ )

Com es pot suposar que l'agitació és perfecta, es complirà a cada moment que  $T_2 = T$  i per tant l'equació (3) es pot escriure com a:

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

Si es defineix:

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

l'equació (4) es pot escriure així:

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

El paràmetre  $\tau$  s'anomena *temps de residència* del líquid al tanc i s'expressa en segons. L'altre paràmetre,  $T_G$ , té dimensions de temperatura i es pot interpretar com la màxima diferència possible de temperatura del corrent d'eixida respecte al d'entrada. El valor de tots dos paràmetres, igual que  $T_1$  (la temperatura del corrent d'entrada al tanc), es pot calcular a partir de les dades inicials conegudes del sistema.

L'equació (5) és una equació diferencial que expressa l'evolució de la temperatura a l'interior del tanc amb el temps. Per a poder conèixer aquesta relació, cal integrar-la coneixent una condició inicial de partida:

$$\text{per a } t = 0, T = T_o$$

Separant variables en (5):

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

i integrant amb la condició inicial abans indicada, s'obté:

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

que ens dóna la relació entre la temperatura  $T$  a l'interior del tanc i el temps transcorregut,  $t$ .

Quan s'assoleix l'estat estacionari, el terme  $dT/dt = 0$  i per tant, de l'equació (5):

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

També es pot arribar a aquesta mateixa conclusió partint de l'equació (6) i fent  $t = \infty$ .

## **2. OBJECTE DE LA PRÀCTICA**

L'objecte d'aquesta pràctica consisteix a comparar els valors de l'evolució de la temperatura amb el temps obtinguts experimentalment per a un procés de calfament o de refredament, amb les equacions teòriques que representen cada un d'aquests processos tèrmics. Aquestes equacions es deduiran plantejant els balanços d'energia al sistema, en els termes adequats.

## **3. APARELL**

El sistema (l'esquema del qual és el que s'ha vist anteriorment) consisteix en un tanc adiabàtic, perfectament agitat, amb un volum útil conegut, proveït d'un sistema amb sobreeixidor i un termòmetre. La calefacció s'efectua mitjançant resistències elèctriques. Al tanc entra contínuament un corrent d'aigua pura, el cabal del qual es regula mitjançant una bomba peristàltica, i la seua temperatura es pot determinar mitjançant un termòmetre.

## **4. PROCEDIMENT EXPERIMENTAL**

a) En primer lloc, es connecta l'agitador i es fixa el cabal d'aigua que entra i ix del sistema a un valor pròxim al que recomane el professor o la professora de pràctiques. Una vegada assolit aquest cabal, es realitzen fins a cinc mesures no discrepants amb proveta i cronòmetre per determinar-ne el valor mitjà. Al llarg de tota la sessió de pràctiques s'ha d'anar comprovant periòdicament que el cabal es manté en el valor inicialment establert.

b) A continuació, es calcula la temperatura de l'estat estacionari que s'obtindrà durant l'etapa de calfament, utilitzant l'equació (7), i fent ús de les condicions experimentals que s'utilitzaran:

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

c) S'efectua el procés de calfament. Amb aquesta finalitat, es connecta la resistència calefactora i, simultàniament, es posa en marxa el cronòmetre i es comença a seguir l'evolució de la temperatura amb el temps. Al principi, la variació de temperatura és molt ràpida; es recomana que s'anote el temps cada vegada que la temperatura pugui 0,5 °C. Quan el temps transcorregut entre dues mesures es fa major que 1 minut, s'anota la temperatura cada minut. El seguiment del procés de calfament es realitza durant una hora, temps en què la temperatura s'haurà aproximat suficientment a la de l'estat estacionari.

d) Finalitzat el procés de calfament, s'efectua el procés de refredament. Amb aquesta finalitat, sense haver modificat el cabal inicialment establert, es desconnecta la resistència calefactora i, simultàniament, es posa a zero una altra vegada el cronòmetre i es

comença a seguir l'evolució de la temperatura del tanc amb el temps, de forma semblant a la descrita en l'apartat anterior. La durada d'aquest procés serà també d'una hora.

## 5. PRESENTACIÓ DELS RESULTATS

a) Tant per a l'etapa de calfament com per a l'etapa de refredament, amb les mesures efectuades construiu una taula com la que segueix:

### TAULA

Volum del depòsit = (m<sup>3</sup>)  
 Cabal volumètric = (m<sup>3</sup>/s)  
 Potència de la resistència = (W)  
 T<sub>1</sub> = (°C)                      T<sub>0</sub> = (°C)

<i>t</i> (s)	<i>T</i> (°C)
0	T <sub>0</sub>
-----	-----
-----	-----
-----	-----
-----	-----

b) Representeu les dades de les dues taules anteriors en dos fulls diferents de paper mil·limetrat en la forma  $T = f(t)$ , per a cada un dels dos processos.

c) Obteniu, mitjançant l'aplicació del balanç d'energia calorífica al tanc, les equacions que relacionen la temperatura de l'aigua al seu interior amb el temps d'operació, per a cada un dels dos processos. Cal tenir en compte que el calfament i el refredament són processos diferents i independents i el valor de les variables  $q$  i  $T_0$  és diferent per a cada procés.

d) Representeu aquestes funcions mitjançant una línia contínua en les mateixes gràfiques en què es van representar les dades experimentals.

## **6. DISCUSSIÓ DELS RESULTATS**

a) Efectueu un estudi qualitatiu de la variació de la temperatura d'estat estacionari que s'assoleix en el procés de calfament, en funció de les variables del sistema:  $Q_L$ ,  $q$  i  $T_1$ .

b) Construïu una gràfica que permeti conèixer la temperatura de l'estat estacionari en funció del cabal volumètric, per al muntatge experimental utilitzat.

c) Analitzeu de forma quantitativa la variació de la corba  $T = f(t)$  en modificar el cabal volumètric de circulació del fluid en un 50% (augmentant-lo i disminuint-lo), tant en el procés de calfament com en el procés de refredament.

d) Comenteu els resultats obtinguts.

## **7. BIBLIOGRAFIA**

- N'hi ha prou amb els apunts de classe del mòdul "Introducció a l'enginyeria bioquímica".