

# Guía de Cálculos Experimentales de Absorción con Reacción Guión 4

Utilizando el equilibrio de temperatura alta

## Absorción de CO<sub>2</sub> en columna empacada Transferencia de masa y reacción química simultánea

Tabla (1). Datos Experimentales de flujos, temperaturas de los fluidos y concentraciones

Temperatura de la solución = 18 °C		Temperatura del aire = 18 °C				
Fracción de huecos $\varepsilon = 0.6$		Temperatura del CO <sub>2</sub> = 17 °C				
Área transversal de flujo entre empaques = 12.161 cm <sup>2</sup>						
Flujo de alimentación (L / h)	Concentración MEA N = gmol / Lsol		Concentración MEA (% en masa) % masa = 6.037(N) + 0.205 (g MEA / g Solución)		G <sub>aire</sub> (%)	G <sub>CO2</sub> (mm)
	Entrada	Salida	Entrada	Salida		
5	2.39	0.956	14.64	5.98	20	50
8		1.285		7.80		
10		1.466		9.06		

...

CO <sub>2</sub> (%) masa		Aire (%) masa	
Entrada	Salida	Entrada	Salida
14.55	7.86	85.45	92.14
	5.75		94.25
	4.95		95.05

### DATOS EXPERIMENTALES

Concentración en % en masa  
CO<sub>2</sub> a la entrada

%wCO<sub>2</sub>e := 14.55

Concentración en % en masa  
de CO<sub>2</sub> a la salida

%wCO<sub>2</sub>s := 7.86

Flujo de aire alimentado  
en %

RotametroAIRE := 20

Temperatura del aire de entrada en la mezcla, en la base de la torre

$$T^{\circ}\text{CaireE} := 18 \quad ^{\circ}\text{C}$$

Temperatura de MEA en la solución alimentada

$$T^{\circ}\text{Cmea} := 18 \quad ^{\circ}\text{C}$$

Flujo de CO2 alimentado en mm

$$\text{RotametroCO2} := 50$$

Concentración en % en masa de aire a la entrada

$$\%w\text{AIREe} := 100 - \%w\text{CO2e}$$

$$\%w\text{AIREe} = 85.45$$

Concentración en % en masa de aire a la salida

$$\%w\text{AIREs} := 100 - \%w\text{CO2s}$$

$$\%w\text{AIREs} = 92.14$$

Flujo de alimentación de la solución de MEA- AGUA

$$\text{LE} := \begin{pmatrix} 5 \\ 8 \\ 10 \end{pmatrix} \quad \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

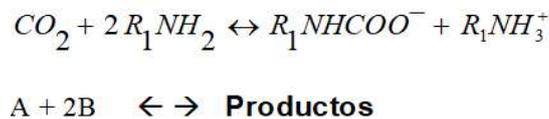
Fracción de huecos

$$\epsilon_{\text{ww}} := 0.6$$

área transversal de flujo

$$\text{ATF} := 12.161 \quad \text{cm}^2$$

Concentración molar de la amina a la entrada de la torre, en el domo de la columna



Concentración molar de la amina a la salida de la torre

$$B_{\text{alimentada}} := 2.25 \quad \frac{\text{gmolMEA}}{\text{LSol}}$$

Concentración en % masa de MEA a la entrada

$$\%w\text{MEAe} := 14.64$$

$$B_{\text{salida}} := 0.956 \quad \frac{\text{gmolMEA}}{\text{LSol}}$$

Concentración en % masa de MEA a la salida

$$\%w\text{MEAs} := 5.98$$

### Datos constantes

Condiciones estándar

$$P_{\text{Maire}} := 29 \quad \text{g/gmol}$$

$$T^{\circ}\text{CStandar} := 25 \quad ^{\circ}\text{C}$$

Presión de operación

$$P_{\text{MCO2}} := 44 \quad \text{g/gmol}$$

$$P_{\text{Standar}} := 1 \quad \text{atm}$$

$$P_{\text{op}} := 0.771$$

altura de la torre

$$h := 106 \text{ cm}$$

$$PM_{\text{mea}} := 61.08 \text{ g/gmol}$$

$$PM_{\text{agua}} := 18 \text{ atm g/gmol}$$

$$T^{\circ}\text{Kaire} := T^{\circ}\text{CaireE} + 273.15 \quad T^{\circ}\text{Kaire} = 291.15 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$P := 586 \text{ mmHg}$$

$$R := 82.06 \frac{\text{cm}^3 \text{ mezcla} \cdot \text{atm}}{\text{gmol} \cdot \text{mezcla} \cdot ^{\circ}\text{K}}$$

**Los coeficientes de difusión, los Números de Schmidt, la reacción y la constante de rapidez de reacción**

Cálculo de  $D_A$  = difusividad de la monoetanolamina en agua

Se calcula a la temperatura de entrada a la torre con la Figura 16

$$D_A = D_{\text{amina-agua}} = 7.0 \times 10^{-6} \times \frac{1.3 \times 10^{-5}}{2.0 \times 10^{-5}} = 0.455 \times 10^{-5} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

Valor constante                      El denominador es constante

Temperatura del CO2 de entrada en la mezcla, en la base de la torre

$$T^{\circ}\text{CO2E} := 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Temperatura del agua de entrada en la solución MEA - AGUA en el domo de la torre

$$T^{\circ}\text{CaguaE} := 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{promedio}} := \frac{T^{\circ}\text{CO2E} + T^{\circ}\text{CaguaE}}{2} = 17.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{De la Figura 16 se lee}$$

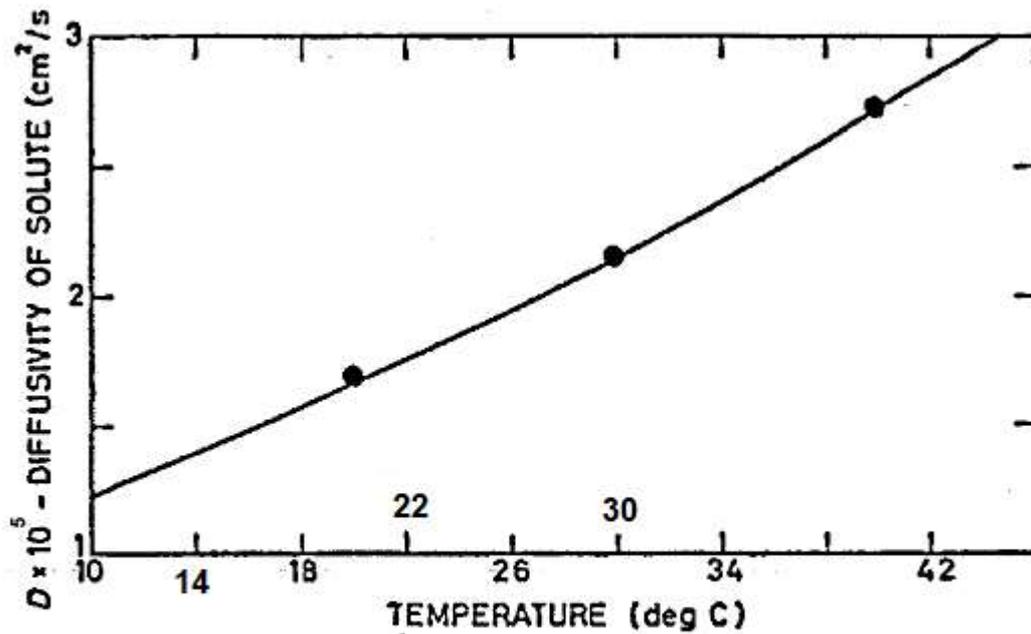


Fig. 16.—The diffusivity of carbon dioxide in water at various temperatures. (Thomas and Adams<sup>69</sup>)

The Chemical Engineer, october, 1966. P. V. Danckwerst.  
M.M. Sharma.

$$D_{\text{CO}_2\text{H}_2\text{O}} := 1.5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$D_A := \frac{7 \cdot 10^{-6}}{2.0 \cdot 10^{-5}} \cdot D_{\text{CO}_2\text{H}_2\text{O}}$$

$$D_A = 5.25 \times 10^{-6} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

Cálculo de  $D_B$  = difusividad del  $\text{CO}_2$  en agua

$$D_B = D_{CO_2-agua} = \frac{D_{amina-agua}^{25^\circ C}}{D_{amina-agua}^o} \times D_{CO_2-agua}$$

Este factor permanece constante

Se calcula a la temperatura de entrada a la torre con la Figura 16

*Factor de corrección*

Factor de corrección

$$\frac{D_{amina-agua}^{25^\circ C}}{D_{amina-agua}^o} = \frac{7.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s} \text{ (a } 25^\circ\text{C Fig.15)}}{11.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s} \text{ (a } 25^\circ\text{C Fig.15)}}$$

Coefficiente de difusión a dilución infinita  
o coeficiente de difusividad mutua

$$D_{CO_2H_2O} = 1.5 \times 10^{-5} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$D_B := \frac{7.0 \cdot 10^{-6}}{11.0 \cdot 10^{-6}} \cdot D_{CO_2H_2O}$$

$$D_B = 9.545 \times 10^{-6} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

### Los Números de Schmidt

CONSULTAR ESTAS ECUACIONES EN EL GUIÓN (4) de AMyD

Temperatura del aire de entrada en la mezcla, en la base de la torre

---

Temperatura del CO<sub>2</sub> de entrada en la mezcla, en la base de la torre

---

$$T^{\circ}\text{CaireE} := 18 \quad ^{\circ}\text{C}$$

$$T^{\circ}\text{CO2E} := 17 \quad ^{\circ}\text{C}$$

$$T^{\circ}\text{C}_{\text{prom}} := \frac{T^{\circ}\text{CaireE} + T^{\circ}\text{CO2E}}{2} = 17.5 \quad ^{\circ}\text{C}$$

Nsc1 = No. de Schmidt NH3-Aire

Nsc2 = No de Schmidt CO2-aire

$$N_{\text{sc1}} := 0.0016 \cdot T^{\circ}\text{C}_{\text{prom}} + 0.6098$$

$$N_{\text{sc2}} := -0.0008 \cdot T^{\circ}\text{C}_{\text{prom}} + 0.961$$

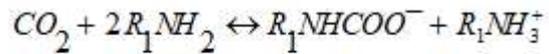
Para corregir la correlación de kg.a

Para corregir la correlación de kg.a

$$N_{\text{sc1}} := 0.6485$$

$$N_{\text{sc2}} := 0.942$$

### La reacción y la constante de rapidez de reacción



La relación estequiométrica de la reacción



$$z := \frac{2}{1} \frac{\text{gmol} \cdot \text{MEA}}{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}$$

$$T^{\circ}\text{K} := T^{\circ}\text{C}_{\text{mea}} + 273.15$$

$$k_2 := 10^{\left[ (10.99) - \frac{2152}{T^{\circ}\text{K}} \right]} \frac{\text{L}}{\text{gmol} \cdot \text{s}}$$

Constante de rapidez de reacción hacia la derecha

$$k_2 = 3968.451$$

$$\frac{\text{L}}{\text{gmol} \cdot \text{s}}$$

FIN

m =====000=====m

Cálculos previos para encontrar el tiempo de residencia máximo en el reactor-absorbedor para los flujos de MEA/H<sub>2</sub>O de (5, 8 y 10) L/h de mezcla

Datos

Flujo de entrada

$$LE = \begin{pmatrix} 5 \\ 8 \\ 10 \end{pmatrix}$$

Lmezcla  
h

Altura empacada

$$h := 106 \text{ cm}$$

Área transversal de flujo

$$ATF = 12.161 \text{ cm}^2$$

$$\tau := \left( \frac{ATF \cdot h}{LE \cdot 1000} \cdot 60 \right)$$

$$\tau = \begin{pmatrix} 15.469 \\ 9.668 \\ 7.734 \end{pmatrix} \text{ min}$$

$$\text{min} = \frac{\text{cm}^2 \cdot \text{cm}}{\frac{L}{h} \cdot \frac{1000 \text{cm}^3}{1L}} \cdot \frac{60 \text{min}}{1h}$$

Por lo tanto: El mayor tiempo de residencia es para un flujo de alimentación de entrada a la columna es de 5 L/h con un tiempo de residencia de 15.469 min

## INICIO

**Cálculos previos para encontrar el coeficiente de transferencia de masa  $k_L$  en la fase líquida mediante iteraciones sucesivas**

1.- Fracción molar del gas en los fondos y el domo de la torre

$$w_{CO_2e} := \frac{\%w_{CO_2e}}{100} \quad \text{Es la fracción masa de CO}_2 \text{ a la entrada}$$

$$y_{fCO_2} := \frac{\frac{w_{CO_2e}}{PM_{CO_2}}}{\frac{w_{CO_2e}}{PM_{CO_2}} + \frac{(1 - w_{CO_2e})}{PM_{aire}}}$$

$$y_{fCO_2} = 0.101 \quad \frac{\text{gmolCO}_2}{\text{gmolmezcla}} \quad \text{para fondos de la torre}$$

$$w_{CO_2s} := \frac{\%w_{CO_2s}}{100} \quad \text{Es la fracción masa de CO}_2 \text{ a la salida}$$

$$y_{dCO_2} := \frac{\frac{w_{CO_2s}}{PM_{CO_2}}}{\frac{w_{CO_2s}}{PM_{CO_2}} + \frac{(1 - w_{CO_2s})}{PM_{aire}}}$$

$$y_{dCO_2} = 0.0532$$

$$\frac{\text{gmol}_{CO_2}}{\text{gmol}_{\text{mezcla}}}$$

para domo de la torre

## 2.- Criterio para inicio de iteraciones

fracción molar en el fondo de la columna

fracción molar en el domo de la columna

$$y_{fCO_2} = 0.1009$$

$$y_{dCO_2} = 0.0532$$

$$\frac{\text{gmol} \cdot CO_2}{\text{gmol} \cdot \text{mezcla}}$$

Dividir entre 5 espacios las composiciones anteriores o cualquier otro valor seleccionado

$$y := \begin{pmatrix} y_{dCO_2} \\ y_{fCO_2} \end{pmatrix}$$

$$y = \begin{pmatrix} 0.0532 \\ 0.1009 \end{pmatrix}$$

ORIGIN := 1

$$r := \frac{(y^{(1)})_2 - (y^{(1)})_1}{5}$$

$$r = 9.534 \times 10^{-3}$$

es la columna de la matriz

es el número del renglón

$$r := \frac{(y^{(1)})_2 - (y^{(1)})_1}{5}$$

Expresión que da las fracciones molares con comportamiento LINEAL a lo largo de la torre

$$y_{CO_2} := (y^{(1)})_1, [(y^{(1)})_1 + r] .. (y^{(1)})_2$$

$$\frac{\text{gmol} \cdot CO_2}{\text{gmol} \cdot \text{mezcla}}$$

$y_{CO_2} =$

0.0532
0.0628
0.0723
0.0818
0.0914
0.1009

=====> copiar

0.0591	Domo - 2
0.0675	
0.0758	
0.0842	
0.0926	
0.101	Fondo - 1

Comportamiento lineal de las presiones parciales en la torre, las cuales serán cercanas al equilibrio (se debe comprobar)

$$p_{CO_2} := y_{CO_2} \cdot P_{op} \text{ atm}$$

0.0456	Domo - 2
0.052	
0.0584	
0.0649	atm
0.0714	
0.0779	Fondo - 1

$$p_{2CO_2} := [(p_{CO_2})^{(1)}]_1 = 0.0456$$

$$p_{1CO_2} := [(p_{CO_2})^{(1)}]_6 = 0.0779$$

Utilizar las presiones parciales en los extremos de la torre para calcular las alturas intermedias de estas presiones.

$$\frac{\partial^2 \bar{p}_{CO_2}}{\partial z^2} = 0$$

Condiciones a la frontera

$$\left. \begin{array}{l} \bar{p}_{CO_2} = \bar{p}_{1CO_2} \text{ a } z = 0 \\ \bar{p}_{CO_2} = \bar{p}_{2CO_2} \text{ a } z = h \end{array} \right\} \rightarrow \bar{p}_{CO_2} = \left( \frac{\bar{p}_{2CO_2} - \bar{p}_{1CO_2}}{h} \right) z + \bar{p}_{1CO_2}$$

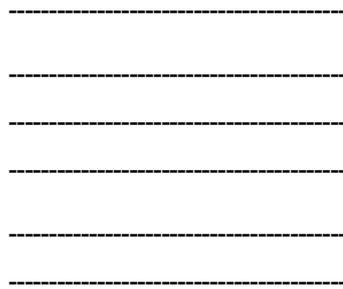
Despejando a Z se obtiene la posición para cada presión parcial entre el fondo y el domo de la columna

$$Z := \overrightarrow{\left( \left( \frac{p_{CO_2} - p_{1CO_2}}{p_{2CO_2} - p_{1CO_2}} \right) \right)}$$

Acada altura le corresponde una presión

$$Z = \begin{pmatrix} 106 \\ 85 \\ 64 \\ 43 \\ 21 \\ 0 \end{pmatrix}$$

cm



$$p_{CO_2} = \begin{pmatrix} 0.0456 \\ 0.052 \\ 0.0584 \\ 0.0649 \\ 0.0714 \\ 0.0779 \end{pmatrix}$$

atm

Domo – 2

Fondo – 1

3.- Cálculos para los balances de materia en los puntos intermedios dentro la columna

3.1 Relación mol de CO<sub>2</sub> en los puntos intermedios

$$Y_{CO_2} := \overrightarrow{\frac{y_{CO_2}}{1 - y_{CO_2}}}$$

$$Y_{CO_2} = \begin{pmatrix} 0.06281 \\ 0.07239 \\ 0.08202 \\ 0.09194 \\ 0.10205 \\ 0.11235 \end{pmatrix}$$

Domo – 2

$\frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{gmolAIRE}}$

Fondo – 1

Relación de CO<sub>2</sub> en el domo

$$Y_{dCO_2} := \left[ (Y_{CO_2})^{(1)} \right]_1 = 0.06281$$

$$\frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{gmol} \cdot \text{AIRE}}$$

3.2 Flujo molar de aire de entrada por unidad de área

$$\mathbf{G} \left( \frac{\text{gmolAIRE}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2} \right)$$

Densidad del Aire de entrada E

$$\rho_{\text{AIREE}} := \left( -3.142 \cdot 10^{-3} T^{\circ}\text{CaireE} + 1.262 \right) \cdot \frac{1000}{1} \cdot \left( \frac{1}{100} \right)^3$$

$$\frac{\text{g} \cdot \text{aire}}{\text{cm}^3 \cdot \text{aire}} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left[ \frac{1000\text{g}}{1\text{kg}} \cdot \left( \frac{1\text{m}}{100\text{cm}} \right)^3 \right]$$

$$\rho_{\text{AIREE}} = 1.205 \times 10^{-3} \quad \frac{\text{g} \cdot \text{aire}}{\text{cm}^3 \cdot \text{aire}}$$

Corrección del flujo de ENTRADA de aire a condiciones del laboratorio

$$Q_{1\text{AIREE}} := \frac{\text{RotámetroAIRE} \cdot 7.2}{100} \cdot \left( \frac{100}{1} \right)^3$$

$$\text{a } 100\% \text{ ----- } 7.2 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{RotámetroAIRE ----- } x$$

$$\frac{\text{cm}^3}{\text{h}} = \frac{\text{m}^3 \text{Aire}}{\text{h}} \cdot \left( \frac{100\text{cm}}{1\text{m}} \right)^3$$

$$Q_{1\text{AIREE}} = 1.44 \times 10^6 \quad \frac{\text{cm}^3}{\text{h}}$$

$$T1^{\circ}\text{KStandar} := 25 + 273.15$$

$$T2^{\circ}\text{Kaire} := T^{\circ}\text{CaireE} + 273.15$$

Presión en México  
en el Laboratorio

$$\frac{P1 \cdot Q1}{T1} = \frac{P2 \cdot Q2}{T2}$$

$$P2 := 0.771 \quad \text{atm}$$

$$P1\text{Standar} := 1 \quad \text{atm}$$

$$Q_{2AireE} := \frac{P1Standar \cdot Q1AIREE \cdot T2^{\circ}Kaire}{P2 \cdot T1^{\circ}KStandar} \quad \frac{cm^3 Aire}{h}$$

$$G := Q_{2AireE} \cdot \rho_{AIREE} \cdot \frac{1}{P_{Maire}} \cdot \frac{1}{ATF}$$

$$\frac{gmolAIRE}{h \cdot cm^2} = \frac{cm^3 \cdot AIRE}{h} \cdot \frac{gAIRE}{cm^3 AIRE} \cdot \frac{gmolAIRE}{gAIRE} \cdot \frac{1}{cm^2}$$

$$G = 6.234 \quad \frac{gmolAIRE}{h \cdot cm^2}$$

**3.3** Cantidad de CO<sub>2</sub> absorbido por el líquido en tránsito. La fase gaseosa sube y la fase líquida baja

$$G_{abs} := \overrightarrow{[G \cdot (Y_{CO_2} - Y_{dCO_2})]}$$

$$\frac{gmolCO_2}{h \cdot cm^2} = \frac{gmolAIRE}{h \cdot cm^2} \cdot \left( \frac{gmol \cdot CO_2}{gmol \cdot AIRE} \right)$$

$$Y_{CO_2} = \begin{pmatrix} 0.06281 \\ 0.07239 \\ 0.08202 \\ 0.09194 \\ 0.10205 \\ 0.11235 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{domo} - 2 \\ \\ \\ \\ \\ \text{fondo} - 1 \end{matrix}$$

$$Y_{dCO_2} = 0.06281$$

$$G_{abs} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.06 \\ 0.12 \\ 0.182 \\ 0.245 \\ 0.309 \end{pmatrix}$$

domo – 2

$$\frac{\text{gmolCO}_2}{\text{h} \cdot \text{cm}^2}$$

fondo – 1

Es el CO<sub>2</sub> gaseoso que pasó a líquido a través de las miles de interfases y llegó a la película del líquido y reacciona con la MEA en las diferentes alturas de la columna

### 3.4 Flujo de la mezcla líquida $L_v$ al 14.64 % de MEA de entrada por unidad de área

Flujo de entrada para el máximo tiempo de residencia

$$L_e := 5 \quad \frac{L_{sol}}{h}$$

$$L_v := \left( L_e \cdot \frac{1}{ATF} \right)$$

$$\frac{L_{Sol}}{h \cdot \text{cm}^2} = \frac{L_{sol}}{h} \cdot \frac{1}{\text{cm}^2}$$

$$L_v = 0.411 \quad \frac{L_{Sol}}{h \cdot \text{cm}^2}$$

Cálculo de la velocidad superficial de la mezcla líquida  $L$ . Con este dato ir a la gráfica y buscar  $a$ , el área específica por unidad de volumen de torre empada en la curva D

$$L_{\text{ww}} := L_v \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{1000}{1}$$

$$\frac{\text{cm}}{\text{s}} = \frac{L_{Sol}}{h \cdot \text{cm}^2} \cdot \frac{1 \cdot \text{h}}{3600\text{s}} \cdot \frac{1000\text{cm}^3}{1\text{L}}$$

$$L = 0.114$$

$$\frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

De la curva D se puede leer

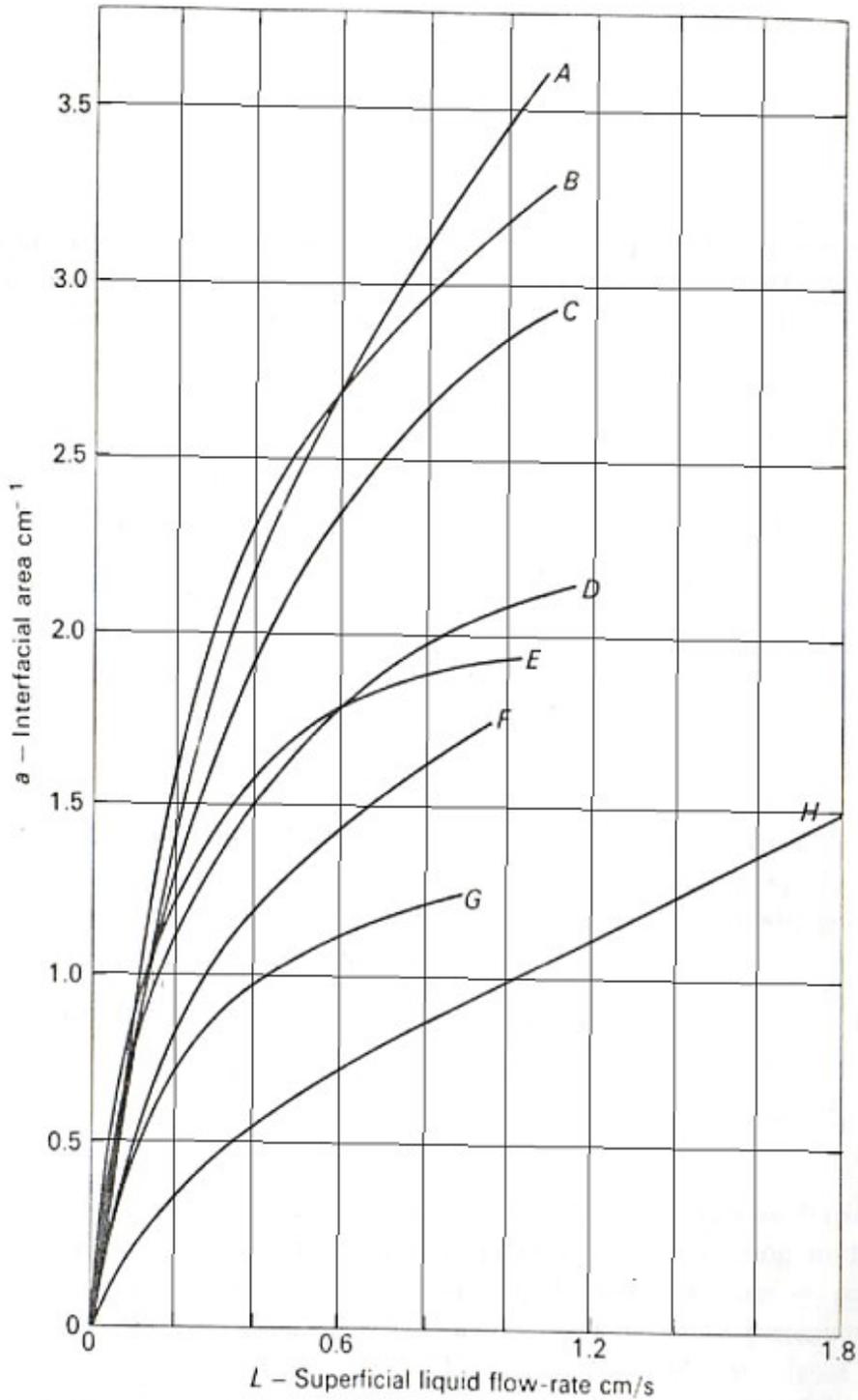


Fig. 9-1 Effective interfacial area for packings (after Danckwerts and Sharma, 1966)

Curve	Type and size of packing	Temperature (°C)	Tower diameter (ft)	Packing density (lb/ft <sup>3</sup> )	Dry packing area (ft <sup>2</sup> /ft <sup>3</sup> )
-------	--------------------------	---------------------	---------------------------	---	--

	(in.)	(m.)	(pieces/ cm <sup>3</sup> )	(cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )
A 1/2 in. ceramic Intalox saddles	25	4	0.630	4.7
B 1/2 in. ceramic Pall rings	25	4	0.360	4.2
C 5/8 in. steel Pall rings	25	6	0.220	3.5
D 1/2 in. ceramic Raschig rings	25	4	0.370	3.8
E 1 in. ceramic Pall rings	25	9	0.049	2.2
F 1 in. ceramic Intalox saddles	25	9	0.084	2.5
G 1 in. ceramic Raschig rings	25	9	0.048	1.8
H 1 1/2 in. ceramic Raschig rings	20	18	0.014	1.3

$$a_{\text{esp}} := 0.85 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3} \quad \text{área específica por unidad de volumen de torre}$$

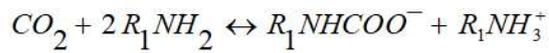
### 3.5 Cantidad absorbida por unidad de volumen de líquido alimentado, (cuidado con el grado de abstracción) -1

$$\text{GabsPorVolumen} := \frac{\text{Gabs}}{L_v}$$

$$\frac{\text{gmolCO}_2}{\text{L Sol}} = \frac{\frac{\text{gmolCO}_2}{\text{h} \cdot \text{cm}^2}}{\frac{\text{L Sol}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2}}$$

GabsPorVolumen =	)	0	Domo – 2
		0.14516	
		0.29119	$\frac{\text{gmolCO}_2}{\text{L Sol}}$
		0.44167	
		0.59494	
		0.75107	Fondo – 1

### 3.6 Concentración de la amina libre $C_B^\circ$ (sin reaccionar en el seno de la fase líquida) en las diferentes posiciones del eje z de las alturas en la torre en (gmol MEA / L de solución)



A + 2B  $\leftrightarrow$  Productos

Datos:

La relación estequiométrica de la reacción

$$z := \frac{2}{1} \frac{\text{gmol} \cdot \text{MEA}}{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}$$

$$\text{GabsPorVolumen} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.14516 \\ 0.29119 \\ 0.44167 \\ 0.59494 \\ 0.75107 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{Domo - 2} \\ \\ \\ \\ \\ \text{Fondo - 1} \end{matrix} \frac{\text{gmolCO}_2}{\text{L Sol}}$$

$$C^{\circ}_B := B_{\text{alimentada}} - z(\text{GabsPorVolumen})$$

$$\frac{\text{gmolMEA}}{\text{LSol}} = \frac{\text{gmolMEA}}{\text{LSol}} - \frac{\text{gmol} \cdot \text{MEA}}{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2} \cdot \frac{\text{gmolCO}_2}{\text{LSol}}$$

en el domo-2

$$C^{\circ}_B = \begin{pmatrix} 2.25 \\ 1.95967 \\ 1.66762 \\ 1.36666 \\ 1.06012 \\ 0.74786 \end{pmatrix} \begin{matrix} \leftarrow B_{\text{alimentada}} = 2.25 \\ \\ \\ \\ \\ \leftarrow B_{\text{salida}} = 0.956 \end{matrix} \frac{\text{gmolMEA}}{\text{LSol}}$$

en el fondo - 1

$$C_B^{\circ} := \begin{pmatrix} 2.25 \\ 1.95958 \\ 1.66743 \\ 1.36637 \\ 1.05973 \\ B_{\text{salida}} \end{pmatrix}$$

Domo - 2

$\frac{\text{gmol} \cdot \text{MEA}}{\text{L} \cdot \text{solución}}$

Fondo - 1

Si no concuerda con el valor de la amina titulada se debe corregir con el valor experimental

### 3.7 Determinación de los límites de integración de la torre

$$h = + \frac{L \varepsilon}{a} \int_{C_B^{\circ} \text{ Fondo}}^{C_B^{\circ} \text{ Domo}} \frac{dC_B^{\circ}}{R_A}$$

$$B_{\text{alimentada}} = 2.25$$

$$\frac{\text{gmolMEA}}{\text{L Sol}}$$

$$B_{\text{salida}} = 0.956$$

$$\frac{\text{gmolMEA}}{\text{L Sol}}$$

$$C_B^{\circ} \text{ Domo} := B_{\text{alimentada}}$$

$$C_B^{\circ} \text{ Fondo} := B_{\text{salida}}$$

$$C_B^{\circ} \text{ Domo} = 2.25$$

$$\frac{\text{gmolMEA}}{\text{L Sol}}$$

$$C_B^{\circ} \text{ Fondo} = 0.956$$

$$\frac{\text{gmolMEA}}{\text{L Sol}}$$

**3.8** Masa velocidad del gas **Gmv** (**G = gas**, **mv= masa velocidad**) de la mezcla gaseosa (aire + CO<sub>2</sub>) en los extremos y en en

los puntos intermedios de la torre

Para el aire

$$G_s := G \cdot P_{\text{Maire}}$$

$$\frac{g_{\text{Aire}}}{h \cdot \text{cm}^2} = \frac{\text{gmol} \cdot \text{aire}}{h \cdot \text{cm}^2} \cdot \frac{g \cdot \text{Aire}}{\text{gmol} \cdot \text{aire}}$$

Para el CO2

$$G_{\text{CO}_2} := Y_{\text{CO}_2} \cdot G \cdot P_{\text{MCO}_2}$$

$$\frac{g \cdot \text{CO}_2}{h \cdot \text{cm}^2} = \frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{gmolAire}} \cdot \frac{\text{gmolAIRE}}{h \cdot \text{cm}^2} \cdot \frac{g_{\text{CO}_2}}{\text{gmolCO}_2}$$

$$G_{\text{mv}} := G_s + G_{\text{CO}_2}$$

$G_{\text{mv}} =$	{	198.017	Domo – 2
		200.643	
		203.284	
		206.007	
		208.779	
		211.604	
$\frac{g \cdot \text{mezcla} \cdot \text{gaseosa}}{h \cdot \text{cm}^2}$			

**3.9** Masa velocidad de la mezcla gaseosa (aire + CO2) **GMV** (en el sistema inglés) en los extremos y en en los puntos intermedios de la torre para calcular **kga**, ya que la correlación esta en el sistema inglés

$$G_{\text{MV}} := G_{\text{mv}} \cdot \frac{1}{453.6} \cdot \left( \frac{30.48}{1} \right)^2$$

$$\frac{\text{lb}}{\text{h}\cdot\text{ft}^2} = \frac{\text{g}}{\text{h}\cdot\text{cm}^2} \cdot \frac{1\text{lb}}{453.6\text{g}} \cdot \left(\frac{30.48\text{cm}}{1\text{ft}}\right)^2$$

$$G_{MV} = \begin{pmatrix} 405.563 \\ 410.942 \\ 416.352 \\ 421.928 \\ 427.607 \\ 433.392 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Domo - 2} \\ \\ \\ \\ \\ \text{Fondo - 1} \end{array} \frac{\text{lb}\cdot\text{mezcla gaseosa}}{\text{h}\cdot\text{ft}^2}$$

**3.10** Se necesita también la masa velocidad del líquido en sistema inglés para calcular **kga**

**L<sub>MV</sub>** (Líquido, MV masa velocidad)

$$\rho_{15\% \text{ masa}} := (0.0007 \cdot T^{\circ}\text{C}_{\text{mea}}^2 - 0.5498 \cdot T^{\circ}\text{C}_{\text{mea}} + 1016.3) \cdot \left(\frac{1}{100}\right)^3 \cdot \frac{1000}{1}$$

$$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(\frac{1\text{m}}{100\text{cm}}\right)^3 \cdot \left(\frac{1000\text{g}}{1\text{kg}}\right)$$

$$\rho_L := \rho_{15\% \text{ masa}}$$

$$\rho_L = 1.007 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$L_v = 0.411 \frac{\text{L Sol}}{\text{h}\cdot\text{cm}^2}$$

$$L_{mv} := L_v \cdot 1000 \cdot (\rho_L)$$

$$\frac{\text{g}\cdot\text{Sol}}{\text{cm}^2\cdot\text{h}} = \frac{\text{L Sol}}{\text{h}\cdot\text{cm}^2} \cdot \frac{1000\text{cm}^3}{1\text{L}} \cdot \frac{\text{g}\cdot\text{Sol}}{\text{cm}^3\cdot\text{Sol}}$$

$$L_{mv} = 413.8765 \frac{\text{g}\cdot\text{Solución}}{\text{cm}^2\cdot\text{h}}$$

$$L_{MV} := L_{mv} \cdot \frac{1}{453.6} \cdot (30.48)^2$$

$$\frac{\text{lb} \cdot \text{Solución}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2} = \frac{\text{g} \cdot \text{Solución}}{\text{cm}^2 \cdot \text{h}} \cdot \frac{1 \text{ lb}}{453.6 \text{ g}} \cdot \left( \frac{30.48 \text{ cm}}{1 \text{ ft}} \right)^2$$

$$L_{MV} = 847.672 \quad \frac{\text{lb} \cdot \text{solución}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2}$$

**3.11** Cálculo de  $k_{ga}$  en los puntos extremos y en los puntos intermedios en:

$$\frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{h} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{atm}}$$

Primero en el sistema inglés

$$k_{ga} := 0.0142 \cdot (G_{MV})^{0.72} \cdot (L_{MV})^{0.38} \cdot \left( \frac{N_{sc1}}{N_{sc2}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{P_{op}} \quad \frac{\text{lbmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{h} \cdot \text{ft}^3 \cdot \text{atm}}$$

$$k_{ga} = \begin{pmatrix} 14.05 \\ 14.184 \\ 14.318 \\ 14.456 \\ 14.595 \\ 14.737 \end{pmatrix} \quad \frac{\text{lbmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{h} \cdot \text{ft}^3 \cdot \text{atm}}$$

Ahora en el sistema Mks

$$k_{ga} := k_{ga} \cdot \frac{453.6}{1} \cdot \left( \frac{1}{30.48} \right)^3 \cdot \frac{1000}{1} \quad \frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{h} \cdot \text{L} \cdot \text{atm}}$$

$$\frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{h} \cdot \text{L} \cdot \text{atm}} = \frac{\text{lbmol}}{\text{h} \cdot \text{ft}^3 \cdot \text{atm}} \cdot \frac{453.6 \cdot \text{gmol}}{1 \cdot \text{lbmol}} \cdot \left( \frac{1 \cdot \text{ft}}{30.48 \cdot \text{cm}} \right)^3 \cdot \frac{1000 \cdot \text{cm}^3}{1 \text{L}}$$

$$\text{kga} = \begin{pmatrix} 225.059 \\ 227.204 \\ 229.354 \\ 231.561 \\ 233.801 \\ 236.074 \end{pmatrix}$$

Domo – 2

$$\frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{h} \cdot \text{L} \cdot \text{atm}}$$

Fondo – 1

El coeficiente del lado de la fase gaseosa es prácticamente constante a todo lo largo de la torre

### 3.12 Cálculo de la relación de equilibrio **m**

#### Datos

Se utilizaron las presiones parciales internas en la columna para seleccionar los valores al equilibrio, ya que se ha supuesto que las presiones parciales de CO<sub>2</sub> están dentro de la misma magnitud de los valores al equilibrio.

Comportamiento lineal de las presiones parciales en la torre, las cuales serán cercanas al equilibrio (se debe comprobar)

$$p_{\text{CO}_2} := y_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{op}} \quad \text{atm}$$

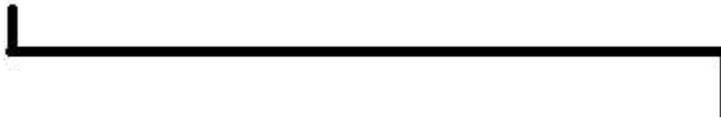
$$p_{\text{CO}_2} = \begin{pmatrix} 0.0456 \\ 0.052 \\ 0.0584 \\ 0.0649 \\ 0.0714 \\ 0.0779 \end{pmatrix}$$

Domo – 2

atm

Fondo – 1

Se puede comprobar que estos valores de las presiones parciales están contenidos en las del equilibrio entre fases, en la segunda columna de las presiones en el equilibrio  
P\* = atm



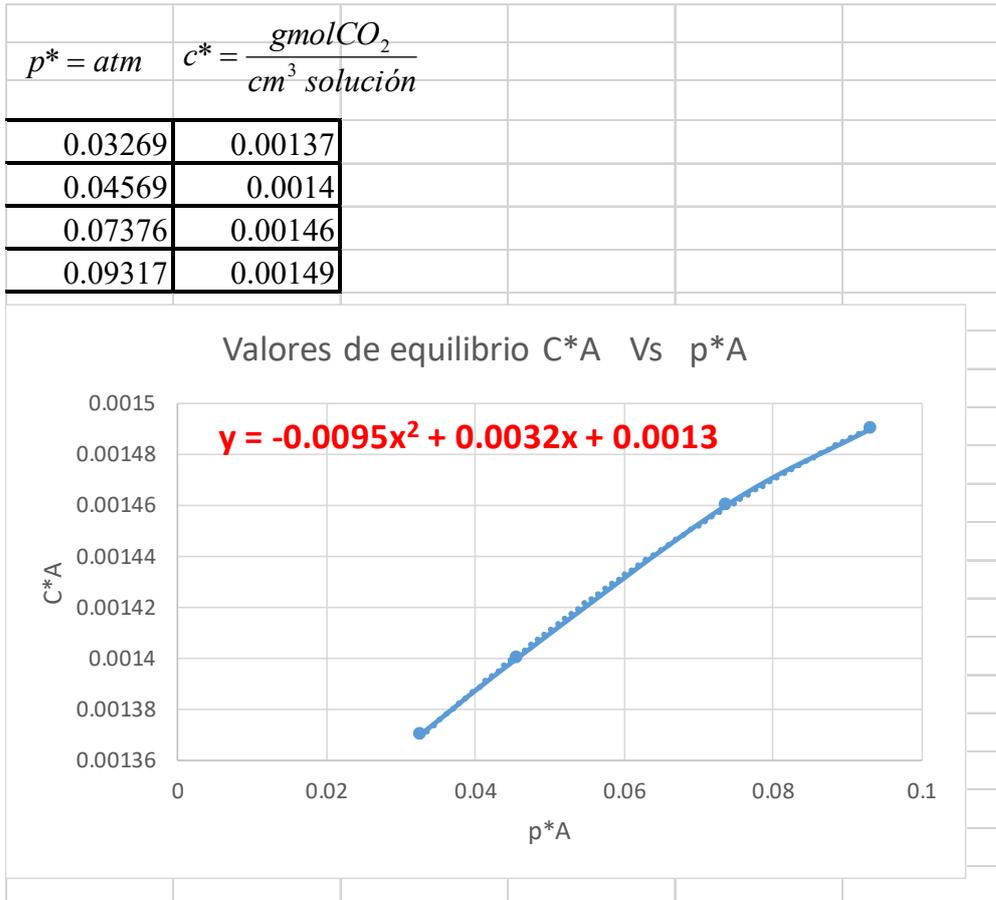
En la tabla siguiente se muestran los cambios de unidades para las ordenadas y las abscisas

T = 37.77 °C = 100 °F		T = 37.77 °C = 100 °F	
$X^* = \frac{gmol\ CO_2}{gmol\ MEA}$	$p^* = mm\ Hg$	$c^* = \frac{gmol\ CO_2}{cm^3\ solución}$	$p^* = atm$
0.525	24.847	0.00137	0.03269
0.53994	34.728	0.0014	0.04569
0.56128	56.058	0.00146	0.07376
0.57409	70.811	0.00149	0.09317

En el Apéndice 7.1 del guion experimental se tomaron estos datos del equilibrio termodinámico a temperatura de 37.77 °C

Se ha obtenido la siguiente ecuación de regresión

$$T = 37.77\ ^\circ C \quad \text{-----} \rightarrow 100^\circ F$$



$$p^{\circ} A := p_{CO_2}$$

Estas presiones parciales se toman como presiones en el equilibrio

$$p^{\circ} A = \begin{pmatrix} 0.0456 \\ 0.052 \\ 0.0584 \\ 0.0649 \\ 0.0714 \\ 0.0779 \end{pmatrix} \text{ atm}$$

$$C^{\circ} A := \left( -0.0095 \cdot p^{\circ} A^2 + 0.0032 \cdot p^{\circ} A + 0.0013 \right) \cdot \frac{1000}{1}$$

$$C^{\circ} A = \frac{gmolCO_2}{cm^3 \text{ de solución}} \cdot \frac{1000 \cdot cm^3}{1 \cdot L}$$

Concentración interfacial

en equilibrio a lo largo de la torre

$$C^{\circ}_A = \begin{pmatrix} 1.4261 \\ 1.4408 \\ 1.4546 \\ 1.4677 \\ 1.48 \\ 1.4916 \end{pmatrix}$$

Domo – 2

$\frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{L} \cdot \text{solución}}$

Fondo – 1

Por lo tanto

$$m := \frac{p^{\circ}_A}{C^{\circ}_A} \rightarrow \frac{\text{atm}}{\frac{\text{gmolCO}_2}{\text{L Sol}}}$$

esta es la relación de equilibrio **m**

$$m = \begin{pmatrix} 0.032 \\ 0.0361 \\ 0.0402 \\ 0.0442 \\ 0.0482 \\ 0.0522 \end{pmatrix}$$

Domo – 2

$\frac{\text{atm}}{\frac{\text{gmolCO}_2}{\text{L Sol}}}$

Fondo – 1

#### 4.- Inicio de las iteraciones para calcular $k_L$ en presencia de reacción química (no existen correlaciones)

Calcular el No. de Hatta, el factor de mejora E, la rapidez de transferencia de masa  $R_A$  en presencia de reacción, el régimen de reacción y el lugar donde se produce la reacción

Suponer  $k_L := 1.59 \frac{\text{cm}}{\text{h}}$  (al subir  $k_L$  baja H)  
 Por prueba y error (al bajar  $k_L$  sube H)

#### 4.1 Cálculo del No. de Hatta

$$\sqrt{M} = \frac{\sqrt{D_A k_2 C_B^0}}{k_L} \quad (26) \quad \sqrt{M} = \text{RaizM}$$

$$\text{RaizM} := \frac{\sqrt{D_A \cdot k_2 \cdot C_B^0}}{k_L \cdot \frac{1}{3600}}$$

$C_B^0$  = Concentración de la amina libre B (sin reaccionar) en las diferentes posiciones del eje z de las alturas en la torre (gmol MEA / L de solución)

$$1 = \frac{\sqrt{\frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot \frac{\text{L}}{\text{gmol} \cdot \text{s}} \cdot \frac{\text{gmol} \cdot \text{MEA}}{\text{L} \cdot \text{solución}}}}{\frac{\text{cm}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \cdot \text{h}}{3600 \cdot \text{s}}}$$

El valor del No. de Hatta está variando cuando aumentamos o disminuimos los valores de las iteraciones

No. de HATTA

$$\text{RaizM} = \begin{pmatrix} 490.215 \\ 457.485 \\ 422.007 \\ 382.014 \\ 336.429 \\ 319.539 \end{pmatrix}$$

Domo – 2

Froment & Bischof (13) .- Una reacción se da en la película del líquido cuando  $\sqrt{M} > 3$ , mientras que, si toma lugar en el seno de la fase líquida  $\sqrt{M} < 0.3$

Fondo – 1

Si la difusión es pequeña en la película del líquido el No. de Hatta es alto y esto querrá decir que la reacción consumirá rápidamente al reactivo que es suministrado por difusión (reacciona en la película); esperaríamos entonces que los perfiles de concentración fueran muy pronunciados [la reacción está controlada por la difusión, ya que la difusión es el paso lento]

$$\sqrt{M} = \frac{\sqrt{k_1 D_A}}{k_L}, \quad \text{si } k_L = \frac{D_A}{\delta_L}$$

$$\sqrt{M} = \frac{\sqrt{\delta^2 k_1}}{D_A} = \frac{\text{rapidez de reacción en la Película}}{\text{rapidez de difusión en la película}}$$



Si la difusión es alta el No de Hatta es pequeño, esto significa que la reacción es lenta comparada con la difusión y, consecuentemente (se da en el seno de la fase líquida) donde los perfiles de concentración tenderán a ser planos inclinados

#### 4.2 El factor de mejora E (Enhancement)

$$E1 := \frac{\text{RaizM}}{\tanh(\text{RaizM})}$$

$$Ei := \left( 1 + \frac{D_B \cdot C^{\circ} B}{z \cdot D_A \cdot C^{\circ} A} \right)$$

$$E1 = \begin{pmatrix} 490.215 \\ 457.485 \\ 422.007 \\ 382.014 \\ 336.429 \\ 319.539 \end{pmatrix}$$

$$1 = 1 + \frac{\frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot \frac{\text{gmol} \cdot \text{MEA}}{\text{L} \cdot \text{solución}}}{\frac{\text{gmol} \cdot \text{MEA}}{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot \frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{L} \cdot \text{solución}}}$$

$$Ei = \begin{pmatrix} 2.434 \\ 2.236 \\ 2.042 \\ 1.846 \\ 1.651 \\ 1.583 \end{pmatrix}$$

$$E := \left[ \frac{1}{\left[ \frac{1}{(Ei - 1)^{1.35}} + \frac{1}{(E1 - 1)^{1.35}} \right]^{\frac{1}{1.35}}} + 1 \right]$$

$$E = \begin{pmatrix} 2.434 \\ 2.236 \\ 2.042 \\ 1.846 \\ 1.651 \\ 1.583 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Domo - 2} \\ \\ \\ \\ \\ \text{Fondo - 1} \end{array}$$

**4.3** La rapidez de transferencia de masa  $R_A$  en presencia de reacción química, es equivalente a  $N_A$  para absorción física

Flux del lado de la fase gaseosa que pasa por la interfase y llega a la película del líquido y reacciona

$$R_A \cdot a = \frac{p_{CO_2}}{\frac{1}{k_{ga}} + \frac{H_e}{E \cdot k_L \cdot a}} \quad a = \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3} \cdot \frac{1000 \cdot \text{cm}^3}{1 \cdot \text{L}} = \frac{\text{cm}^2}{\text{L}}$$

$$R_A := \left[ \left[ \frac{p_{CO_2}}{\left( \frac{1}{k_{ga}} + \frac{H_e}{E \cdot k_L \cdot a_{esp}} \right)} \cdot \frac{1}{a_{esp} \cdot 1000} \right] \right]$$

$$R_A = \frac{\text{atm}}{\left( \frac{1}{\frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{h} \cdot \text{L} \cdot \text{atm}}} + \frac{\frac{\text{L Sol} \cdot \text{atm}}{\text{gmol CO}_2}}{\frac{\text{cm} \cdot \text{cm}^2}{\text{h} \cdot \text{cm}^3}} \right)} \cdot \frac{1}{\frac{\text{cm}^2}{\text{L}}}$$

$$R_A = \frac{\text{atm}}{\left( \frac{\frac{\text{cm}^2}{\text{L}}}{\frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{h} \cdot \text{L} \cdot \text{atm}}} + \frac{\frac{\text{cm}^2}{\text{L}}}{\frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{h} \cdot \text{L sol} \cdot \text{atm}}} \right)}$$

$$R_A = \frac{\text{atm}}{\left( \frac{\text{cm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{atm}}{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2} + \frac{\text{cm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{atm}}{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2} \right)} = \frac{\text{gmol} \cdot \text{absorbido} \cdot \text{de} \cdot \text{CO}_2}{\text{cm}^2 \cdot \text{h}}$$

$R_A =$	0.0038	Domo – 2	$\frac{\text{gmol} \cdot \text{absorbido} \cdot \text{de} \cdot \text{CO}_2}{\text{cm}^2 \cdot \text{h}}$
	0.0037		
	0.0036		
	0.0035		
	0.0032		
	0.0032	Fondo – 1	

#### 4.4 El régimen de reacción y el lugar donde se produce la reacción

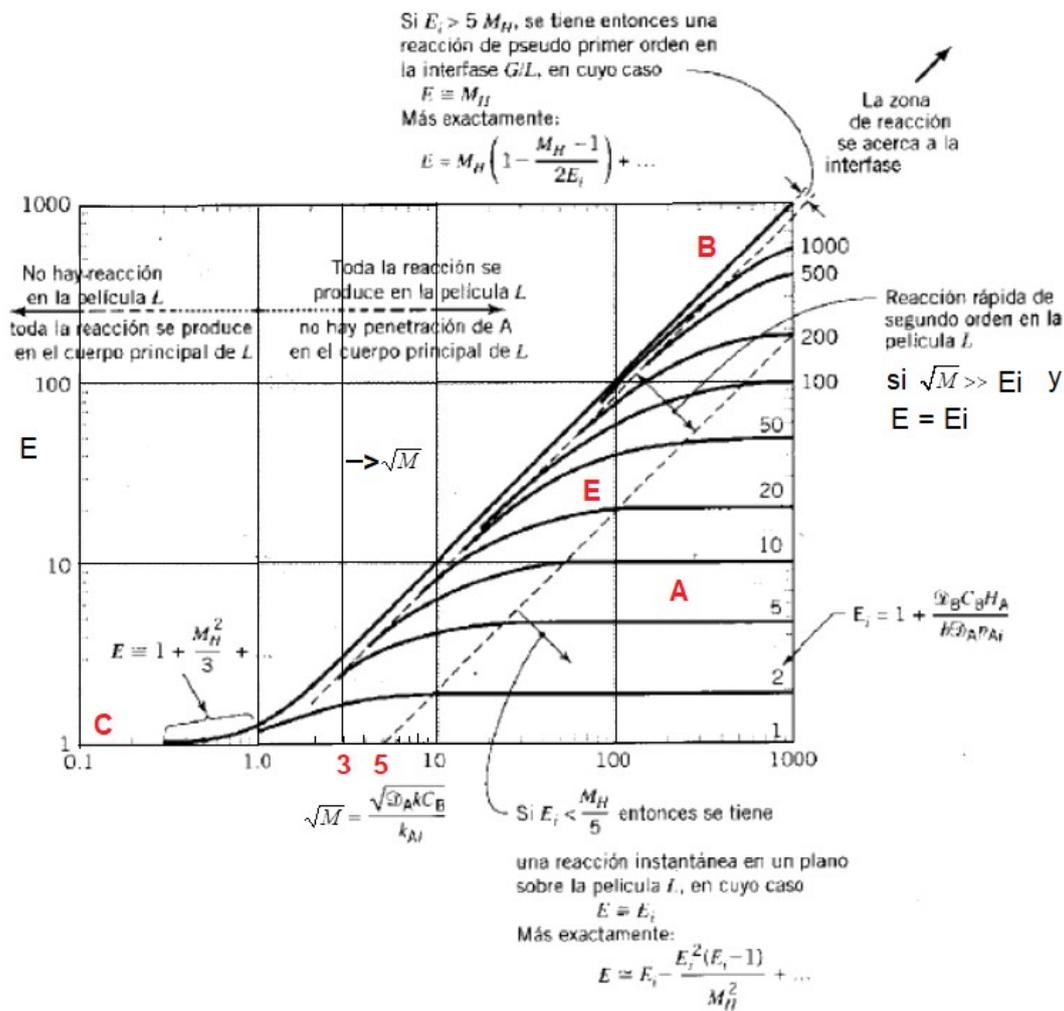


Fig. 8 El factor de mejora E Vs. N° de Hatta  $\sqrt{M}$

**Caso 1, (régimen B) reacciones de primer o pseudo primer orden en la película del líquido. Caso 2a (régimen C) reacciones lentas. Caso 2b (régimen D) reacciones extremadamente lentas con un número de Hatta  $\sqrt{M} < 0.1$ . Caso 3, (régimen E) reacciones rápidas de segundo orden en la película del líquido. Caso 4 (régimen A) reacciones de orden N infinitamente rápidas.**

Prueba del caso 3, (régimen E) reacción rápida de segundo orden en la película del líquido:  $\sqrt{M} \gg E_i$  y  $E = E_i$

$$\text{RaizM} = \begin{pmatrix} 490.215 \\ 457.485 \\ 422.007 \\ 382.014 \\ 336.429 \\ 319.539 \end{pmatrix}$$

$$E_i = \begin{pmatrix} 2.434 \\ 2.236 \\ 2.042 \\ 1.846 \\ 1.651 \\ 1.583 \end{pmatrix}$$

POR LO TANTO LA REACCIÓN ES DE SEGUNDO ORDEN Y SE DA EN LA PELÍCULA DEL LÍQUIDO ENTRE EL CO2 ABSORBIDO Y LA MONOETANOLAMINA

$$E = \begin{pmatrix} 2.434 \\ 2.236 \\ 2.042 \\ 1.846 \\ 1.651 \\ 1.583 \end{pmatrix}$$

$$E_i = \begin{pmatrix} 2.434 \\ 2.236 \\ 2.042 \\ 1.846 \\ 1.651 \\ 1.583 \end{pmatrix}$$

Si la difusión es pequeña en la película del líquido el No. de Hatta es alto y esto querrá decir que la reacción consumirá rápidamente al reactivo que es suministrado por difusión (reacciona en la película);

Si la difusión es alta el No de Hatta es pequeño, esto significa que la reacción es lenta comparada con la difusión

#### 4.5 Evaluación de la ecuación de diseño y del coeficiente $k_L$

Variables ya conocidas para la evaluación de la ecuación de diseño

-----0000-----

$$C_B^o = \begin{pmatrix} 2.25 \\ 1.95958 \\ 1.66743 \\ 1.36637 \\ 1.05973 \\ 0.956 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{Domo} - 2 \\ \\ \\ \\ \\ \text{Fondo} - 1 \end{matrix}$$

$$R_A = \begin{pmatrix} 0.0038 \\ 0.0037 \\ 0.0036 \\ 0.0035 \\ 0.0032 \\ 0.0032 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{domo} - 2 \\ \\ \\ \\ \\ \text{fondo} - 1 \end{matrix}$$

$$\frac{\text{gmol} \cdot \text{MEA}}{\text{L} \cdot \text{solución}} \qquad \frac{\text{gmol} \cdot \text{absorbido} \cdot \text{de} \cdot \text{CO}_2}{\text{cm}^2 \cdot \text{h}}$$

$$kL = 1.59 \frac{\text{cm}}{\text{h}} \quad \varepsilon = 0.6 \quad a_{\text{esp}} = 0.85 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3} \quad h = 106 \text{ cm}$$

$$C_B^o \text{ Domo} = 2.25 \frac{\text{gmolMEA}}{\text{cm}^3 \text{Sol}}$$

Las unidades de L utilizadas en esta deducción son L Sol / h cm<sup>2</sup>

Pero para este programa es Lv con las mismas unidades y mismo significado

$$C_B^o \text{ fondo} = 0.956 \frac{\text{gmolMEA}}{\text{cm}^3 \text{Sol}}$$

$$L = 0.114 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$Lv = 0.411 \frac{\text{L Sol}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2}$$

$$h = + \frac{L \varepsilon}{a} \int_{C_B^o \text{ Fondo}}^{C_B^o \text{ Domo}} \frac{dC_B^o}{R_A}$$

$$\frac{dC_B^o}{R_A} = \frac{\frac{\text{gmolMEA}}{\text{cm}^3 \text{Sol}}}{\frac{\text{gmol} \cdot \text{absorbido} \cdot \text{de} \cdot \text{CO}_2}{\text{cm}^2 \cdot \text{h}}} = \frac{(\text{gmolMEA}) \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{h})}{(\text{gmol} \cdot \text{absorbido} \cdot \text{de} \cdot \text{CO}_2) \cdot (\text{cm}^3 \text{Sol})}$$

$$\frac{d \cdot C^{\circ}B}{R_A} = \frac{h}{cm}$$

$$h = + \frac{L \varepsilon}{a} \int_{C_B^{\circ} Fondo}^{C_B^{\circ} Domo} \frac{dC_B^{\circ}}{R_A}$$

$$cm = \frac{\frac{L Sol}{h \cdot cm^2} \cdot \frac{1000 \cdot cm^3}{1 \cdot L}}{\frac{cm^2}{cm^3}} \cdot \left( \frac{h}{cm} \right)$$

-----0000----- ■

Para simplificar la programación seleccionar cualquier letra  $D := \frac{1}{R_A}$

$$D = \begin{pmatrix} 264.084 \\ 267.098 \\ 275.171 \\ 288.655 \\ 308.335 \\ 312.673 \end{pmatrix}$$

$$\frac{(\text{cm}^2 \cdot \text{h})}{(\text{gmol} \cdot \text{absorbido} \cdot \text{de} \cdot \text{CO}_2)}$$

$$D_{Media} := \begin{bmatrix} \frac{[(D^{(1)})_1 + (D^{(1)})_2]}{2} \\ \frac{[(D^{(1)})_2 + (D^{(1)})_3]}{2} \\ \frac{[(D^{(1)})_3 + (D^{(1)})_4]}{2} \\ \frac{[(D^{(1)})_4 + (D^{(1)})_5]}{2} \\ \frac{[(D^{(1)})_5 + (D^{(1)})_6]}{2} \end{bmatrix}$$

$$\Delta C^{\circ}_B := \begin{bmatrix} (C^{\circ}_B)^{\langle 1 \rangle}_1 - (C^{\circ}_B)^{\langle 1 \rangle}_2 \\ (C^{\circ}_B)^{\langle 1 \rangle}_2 - (C^{\circ}_B)^{\langle 1 \rangle}_3 \\ (C^{\circ}_B)^{\langle 1 \rangle}_3 - (C^{\circ}_B)^{\langle 1 \rangle}_4 \\ (C^{\circ}_B)^{\langle 1 \rangle}_4 - (C^{\circ}_B)^{\langle 1 \rangle}_5 \\ (C^{\circ}_B)^{\langle 1 \rangle}_5 - |(C^{\circ}_B)^{\langle 1 \rangle}_6| \end{bmatrix} \frac{(\text{cm}^2 \cdot \text{h})}{(\text{gmol} \cdot \text{absorbido} \cdot \text{de} \cdot \text{CO}_2)}$$

$$\frac{\text{gmolMEAl}}{\text{cm}^3 \cdot \text{sol}}$$

$$h = + \frac{L \varepsilon}{a} \int_{C_B^{\circ} \text{Fondo}}^{C_B^{\circ} \text{Domo}} \frac{dC_B^{\circ}}{R_A}$$

$$\text{Integral} := \sum \left( \overrightarrow{\text{DMedia} \cdot \Delta C^{\circ}_B \cdot \frac{1}{1000}} \right)$$

$$\frac{h}{\text{cm}} = \frac{\text{cm}^2 \cdot \text{h}}{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2} \cdot \frac{\text{gmol} \cdot \text{MEAl}}{\text{L} \cdot \text{Sol}} \cdot \frac{1\text{L}}{1000 \cdot \text{cm}^3}$$

$$\text{Integral} = 0.365 \quad \frac{h}{\text{cm}}$$

$$h = + \frac{L \varepsilon}{a} \int_{C_B^{\circ} \text{Fondo}}^{C_B^{\circ} \text{Domo}} \frac{dC_B^{\circ}}{R_A}$$

$$\text{cm} = \frac{\frac{\text{L Sol} \cdot 1000 \cdot \text{cm}^3}{\text{h} \cdot \text{cm}^2} \cdot \frac{1 \cdot \text{L}}{\text{cm}^2}}{\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3}} \cdot \left( \frac{h}{\text{cm}} \right)$$

$$H_{\text{www}} := \frac{L_v \cdot \frac{1000}{1} \cdot \varepsilon}{a_{\text{esp}}} \cdot \text{Integral}$$

Ver arriba la explicación de L y Lv

H del modelo

h es la altura del empaque

$$h = 106$$

cm

#### 4.6 Resultados de la evaluación del coeficiente

### =====RESULTADOS=====

Altura de la torre

Altura del modelo

$$h = 106 \quad \text{cm}$$

$$H = 105.919 \quad \text{cm}$$

$$kL = 1.59 \quad \frac{\text{cm}}{\text{h}}$$

(al subir kL baja H)

$$a_{\text{esp}} = 0.85 \quad \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3}$$

(al bajar kL sube H)

$$kL \cdot a_{\text{esp}} = 1.351 \quad \frac{1}{\text{h}}$$

### =====

#### SOLUCIÓN AL CUESTIONARIO

1.- Encontrar el mayor tiempo de residencia en la columna de la mezcla líquida alimentada de (MEA-H<sub>2</sub>O) de uno de los siguientes flujos 5, 8 ó 10 L/h, ya que para este proceso interesa el mayor espacio de tiempo para la formación de la mayor cantidad de productos, los iones carbámico (  $R_1NHCOO^-$  ) y los iones amina (  $R_1NH_3^+$  ).

**R** El tiempo de residencia máximo para un flujo de alimentación de entrada a la columna es de 5 L/h con un tiempo de residencia de 17.185 min

2.- El coeficiente volumétrico individual y temporal de transferencia de masa con reacción química  $k_L r a = k_L a \times E$ , a diferentes alturas de la columna desde la base al domo de la columna

**R**

Datos

---

$$E = \begin{pmatrix} 2.434 \\ 2.236 \\ 2.042 \\ 1.846 \\ 1.651 \\ 1.583 \end{pmatrix}$$

$$k_L = 1.59 \frac{\text{cm}}{\text{h}}$$

$$a_{\text{esp}} = 0.85 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3}$$

Distintas alturas de la columna

Por lo tanto

$$kLra := k_L \cdot a_{\text{esp}} \cdot E$$

$$\frac{1}{h} = \left( \frac{\text{cm}}{\text{h}} \right) \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3}$$

$$kLra = \begin{pmatrix} 3.289 \\ 3.022 \\ 2.76 \\ 2.495 \\ 2.231 \\ 2.139 \end{pmatrix}$$

$$\frac{1}{h}$$

$$Z = \begin{pmatrix} 106 \\ 85 \\ 64 \\ 43 \\ 21 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{cm}$$

3.- El mecanismo controlante (el más lento) entre la difusión o la reacción en la fase líquida descendente

No. de HATTA

$$\text{RaizM} = \begin{pmatrix} 490.215 \\ 457.485 \\ 422.007 \\ 382.014 \\ 336.429 \\ 319.539 \end{pmatrix}$$

Domo – 2

Froment & Bischof (13) .- Una reacción se da en la película del líquido cuando  $\sqrt{M} > 3$ , mientras que, si toma lugar en el seno de la fase líquida  $\sqrt{M} < 0.3$

Fondo – 1

Si la difusión es pequeña en la película del líquido el No. de Hatta es alto y esto querrá decir que la reacción consumirá rápidamente al reactivo que es suministrado por difusión (reacciona en la película y no en el seno de la fase líquida); esperaríamos entonces que los perfiles de concentración fueran muy pronunciados (la reacción está controlada por la difusión), ya que la

difusión es el paso lento]

$$\sqrt{M} = \frac{\sqrt{k_1 D_A}}{k_L}, \quad \text{si } k_L = \frac{D_A}{\delta_L}$$

$$\sqrt{M} = \frac{\sqrt{\delta^2 k_1}}{D_A} = \frac{\text{rapidez de reacción en la Película}}{\text{rapidez de difusión en la película}}$$



Si la difusión es alta el No de Hatta es pequeño, esto significa que la reacción es lenta comparada con la difusión y, consecuentemente (se da en el seno de la fase líquida) donde los perfiles de concentración tenderán a ser planos inclinados

se presentan dos mecanismos simultáneos, por esto es necesario utilizar el significado del N° de Hatta que es aplicable a la película del lado del líquido

4.- El sitio donde se da la reacción, (en la película del líquido o en el seno de la fase líquida)

**R** Como la difusión es pequeña en la película del líquido porque el No. de Hatta es alto, esto significa que la reacción consumirá rápidamente al reactivo CO<sub>2</sub> que es suministrado por difusión a través de la interfase pasando ya solubilizado a la película del líquido y por lo tanto reacciona rápidamente y no reacciona en el seno de la fase líquida, esta es una reacción rápida

5.- El régimen de reacción

**R**

Cuando  $\sqrt{M} \gg E_i$  y  $E = E_i$  como se muestra en la Figura 8, la reacción es rápida de segundo orden en la película del líquido, aquí en el tiempo de contacto del líquido, la reacción es rápida o la concentración del reactivo (la amina al 15% en masa) es baja y se tienen perfiles como en el Caso 3 de la Figura 9.

6.- La conversión en la película

**R**

$$\text{RaizM} = \begin{pmatrix} 490.215 \\ 457.485 \\ 422.007 \\ 382.014 \\ 336.429 \\ 319.539 \end{pmatrix} \quad C^{\circ}A = \begin{pmatrix} 1.4261 \\ 1.4408 \\ 1.4546 \\ 1.4677 \\ 1.48 \\ 1.4916 \end{pmatrix} \quad \frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{L} \cdot \text{solución}}$$

$$\overline{C}_A = \frac{1}{\delta_L} \int_0^{\delta_L} c_A^* \left[ \frac{\cosh \sqrt{M} (1 - x/\delta_L)}{\cosh \sqrt{M}} \right] dx = c_A^* \frac{\tanh \sqrt{M}}{\sqrt{M}} \quad (4)$$

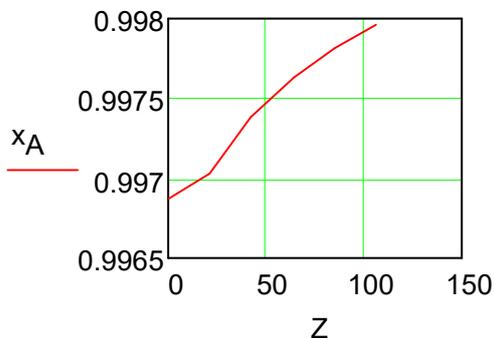
$$x_A = \frac{[A^*] - [\overline{C}_A]}{[A^*]}$$

$$C_{AProm} := \left( C^{\circ}A \cdot \frac{\tanh(\text{RaizM})}{\text{RaizM}} \right)$$

$$x_A := \frac{C^{\circ}A - C_{AProm}}{C^{\circ}A}$$

$$x_A = \begin{pmatrix} 0.998 \\ 0.998 \\ 0.998 \\ 0.997 \\ 0.997 \\ 0.997 \end{pmatrix} \quad z := \begin{pmatrix} 106 \\ 85 \\ 64 \\ 42 \\ 21 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Domo} \\ \\ \\ \\ \text{Fondos} \end{array}$$

cm



FIN

## Guía de Cálculos Experimentales de Absorción con Reacción Guión 5

### Transferencia de masa y reacción química simultánea en una columna de absorción, el perfil de temperaturas

**Tabla (2).** Temperaturas experimentales en la columna de absorción

Posición z en la columna (cm)		Temperaturas (°C)		
		5 L/h	8 L/h	10 L/h
abajo	0	30.2	34.1	32.9
	22	29.4	35.5	31.3
	44	28.9	30.8	27.2
	66	27.4	25.6	23.9
	88	23.8	22.7	21.8
arriba	110	21.5	21.7	21.4

$$Z_{\text{exp}} := \begin{pmatrix} 0 \\ 22 \\ 44 \\ 66 \\ 88 \\ 110 \end{pmatrix} \text{ cm}$$

$$T_{\text{exp}} := \begin{pmatrix} 30.2 \\ 29.4 \\ 28.9 \\ 27.4 \\ 23.8 \\ 21.5 \end{pmatrix} \text{ °C}$$

#### CÁLCULOS PARA RESOVER EL BALANCE DE ENRGÍA

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\Phi_H + Q_V}{v_z \rho_L C_{p_{\text{mezcla}}}}$$

$$\frac{\text{°C}}{\text{cm}} = \frac{\frac{\text{cal}}{\text{s} \cdot \text{cm}^3} + \frac{\text{cal}}{\text{s} \cdot \text{cm}^3}}{\frac{\text{cm} \cdot \text{gmol}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{cal}}{\text{cm}^3 \cdot \text{gmol} \cdot \text{°C}}}$$

1.- Calor generado por la reacción  $\Phi_H$

$\Phi_H = R_A a (-\Delta Hr)$  se utiliza la correlación de Hanne M. Kvmsdal, página 15

$-\Delta Hr = \Delta H$  absorción se utiliza la correlación de Hanne M. Kvmsdal, página 14

T = Temperatura variable del líquido en °C durante la integración de la ecuación diferencial

$\Delta H_{abs} := (84.68 - 0.1135 \cdot T + 0.0027 \cdot T^2) \cdot 1000 \cdot 0.23901$

$\frac{\text{cal}}{\text{gmol}} = \frac{\text{kJ}}{\text{gmol}} \cdot \frac{1000\text{J}}{1\text{kJ}} \cdot \frac{0.23901\text{cal}}{1\text{J}}$

NOTA.- El color rojo en la temperatura T es porque no se conoce, hasta que se integre numéricamente la ecuación diferencial con Mathematica

1.1 La rapidez de transferencia de masa RA en presencia de reacción en función de la posición Z

$R_A := R_A \cdot \frac{1}{3600}$

$\frac{\text{gmolCO}_2}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} = \frac{\text{gmol} \cdot \text{absorbido} \cdot \text{de} \cdot \text{CO}_2}{\text{cm}^2 \cdot \text{h}} \cdot \frac{1\text{h}}{3600\text{S}}$

$R_A = \begin{pmatrix} 1.052 \times 10^{-6} \\ 1.04 \times 10^{-6} \\ 1.009 \times 10^{-6} \\ 9.623 \times 10^{-7} \\ 9.009 \times 10^{-7} \\ 8.884 \times 10^{-7} \end{pmatrix} \frac{\text{gmolCO}_2}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} \quad Z = \begin{pmatrix} 106 \\ 85 \\ 64 \\ 42 \\ 21 \\ 0 \end{pmatrix} \text{cm}$

Cálculo del polinomio de tercer orden

Zi := 1 .. 6

Zi :=

	1
1	106
2	85
3	64
4	42
5	21
6	0

M := augment(Z)

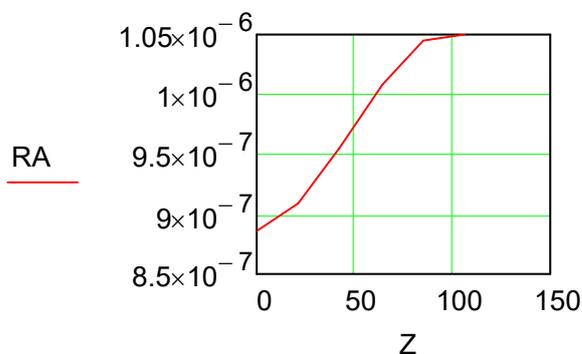
B := RA

n := 3

Resultado := regress(M, B, n)

$$\text{Resultado} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \\ 8.859 \times 10^{-7} \\ 2.701 \times 10^{-10} \\ 4.63 \times 10^{-11} \\ -3.231 \times 10^{-13} \end{pmatrix}$$

$$\text{RA} := -3.231 \times 10^{-13} \cdot Z^3 + 4.63 \times 10^{-11} \cdot Z^2 + 2.701 \times 10^{-10} \cdot Z + 8.859 \times 10^{-7}$$



FIN de este cálculo

2.- La velocidad superficial de la mezcla líquida

$v_z$

$V_Z := L$  El valor de L se calculó en el programa anterior

$$V_Z = 0.114 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \quad \text{FIN}$$

3.- La densidad de la mezcla líquida alimentada  $\rho_L$

Peso molecular de la mezcla líquida MEA / H<sub>2</sub>O

Concentración en % masa de MEA a la entrada

$$\%w_{\text{MEAe}} = 14.64$$

$$w_{\text{MEAe}} := \frac{\%w_{\text{MEAe}}}{100}$$

$$x_{\text{MolarMEAe}} := \frac{\frac{w_{\text{MEAe}}}{\text{PM}_{\text{mea}}}}{\frac{w_{\text{MEAe}}}{\text{PM}_{\text{mea}}} + \frac{(1 - w_{\text{MEAe}})}{\text{PM}_{\text{agua}}}}$$

$$\text{PM}_{\text{MEA.H}_2\text{O}} := \text{PM}_{\text{mea}} \cdot x_{\text{MolarMEAe}} + \text{PM}_{\text{agua}} \cdot (1 - x_{\text{MolarMEAe}})$$

$$\text{PM}_{\text{MEA.H}_2\text{O}} = 20.073 \frac{\text{gmezcla}}{\text{gmol} \cdot \text{mezcla}}$$

$$\rho_L := (\rho_L) \cdot \frac{1}{\text{PM}_{\text{MEA.H}_2\text{O}}}$$

$\rho_L$  Esta densidad fue calculada en el programa anterior en g mwzcla / cm<sup>3</sup> de mezcla

$$\frac{\text{gmol} \cdot \text{mezcla}}{\text{cm}^3} = \frac{\text{g} \cdot \text{mezcla}}{\text{cm}^3} \cdot \frac{\text{gmol} \cdot \text{mezcla}}{\text{g} \cdot \text{mezcla}}$$

---

$$\rho_L = 0.05 \frac{\text{gmol} \cdot \text{mezcla}}{\text{cm}^3} \quad \text{FIN}$$

4.- La capacidad calorífica de la mezcla líquida alimentada a presión

constante  $C_{p_{mezcla}}$

De datos experimentales, la temperatura de la solución alimentada de MEA - AGUA

$$T^{\circ}\text{C}_{\text{mea}} := 19 \quad ^{\circ}\text{C}$$

$$T^{\circ}\text{K} := T^{\circ}\text{C}_{\text{mea}} + 273.15$$

$$C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} := \left( 92.053 - 3.9953 \cdot 10^{-2} \cdot T^{\circ}\text{K} - 2.1103 \cdot 10^{-4} \cdot T^{\circ}\text{K}^2 + 5.3469 \cdot 10^{-7} \cdot T^{\circ}\text{K}^3 \right) \cdot 0.2369$$

$$\frac{\text{cal}}{\text{gmol} \cdot ^{\circ}\text{C}} = \frac{\text{Joule}}{\text{gmol} \cdot ^{\circ}\text{K}} \cdot \frac{0.23901 \cdot \text{cal}}{1 \cdot \text{Joule}}$$

$$C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} := 17.934 \quad \frac{\text{cal}}{\text{gmol} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

$$C_{p_{\text{MEA}}} := \left( 23.11 + 1.2283 \cdot T^{\circ}\text{K} - 3.1218 \cdot 10^{-3} \cdot T^{\circ}\text{K}^2 + 3.0714 \cdot 10^{-6} \cdot T^{\circ}\text{K}^3 \right) \cdot 0.23901$$

$$C_{p_{\text{MEA}}} := 45.919 \quad \frac{\text{cal}}{\text{gmol} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

$$C_{p_{\text{Mezcla}}} := \left[ C_{p_{\text{MEA}}} \cdot x_{\text{MolarMEA}} + C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (1 - x_{\text{MolarMEA}}) \right]$$

$$\frac{\text{cal}}{\text{gmol} \cdot ^{\circ}\text{C}} = \frac{\text{cal}}{\text{gmol} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$


---

$$C_{p\text{Mezcla}} = 19.28$$

$$\frac{\text{cal}}{\text{gmol} \cdot ^\circ\text{C}}$$

FIN

**5** .- Flujo de calor volumétrico por las paredes de la columna  $Q_V$

$$Q_V = -h_{\text{paredes}} a (T - T_{\text{amb}})$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\Phi_H + Q_V}{v_z \rho_L C_{p\text{mezcla}}}$$

T = Temperatura variable del líquido a lo largo de la columna en función de la posición z

$$h_{\text{paredes}} = 1000 \times 4.05 \times 10^{-3} \times \left( \frac{\rho_g V_g}{\text{Diam hidr\u00e1ulico}} \right)^{0.5} (C_{p_g})^{0.33}$$

**5.1** Di\u00e1metro hidr\u00e1ulico de la torre

$$R_{\text{HidraTorre}} := \sqrt{\frac{\text{ATF} \cdot \left(\frac{1}{100}\right)^2}{\pi}}$$

$$m = \sqrt{\text{cm}^2 \cdot \left(\frac{1\text{m}}{100 \cdot \text{cm}}\right)^2}$$

$$D_{\text{hid}} := 2(R_{\text{HidraTorre}})$$

$$D_{\text{hid}} = 0.039$$

m

FIN

**5.2** La densidad de la mezcla AIRE-CO2 dentro de la torre  $\rho_g$

$$T^{\circ}\text{CaireE} = 18 \quad ^\circ\text{C}$$

$$T^{\circ}\text{CO2E} := 20 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{AIRE}} := -4 \cdot 10^{-6} \cdot T^{\circ}\text{CaireE} + 0.0013 \quad \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\rho_{\text{CO2}} := -5 \cdot 10^{-6} \cdot T^{\circ}\text{CO2E} + 0.002 \quad \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\rho_{\text{AIRE}} = 1.228 \times 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = 1.9 \times 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

En el programa anterior se calculó la fracción molar del CO2 en el fondo de la columna

$$y_{\text{CO}_2}^f = 0.101 \frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{gmol} \cdot \text{mezcla}}$$

$$y_{\text{MolarCO}_2e} := y_{\text{CO}_2}^f$$

Densidad de la mezcla aire más CO2

$$\rho_g := \rho_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{MolarCO}_2e} + \rho_{\text{AIRE}} \cdot (1 - y_{\text{MolarCO}_2e})$$

$$\frac{\text{g} \cdot \text{mezcla}}{\text{cm}^3 \text{mezcla}}$$

$$\rho_g = 1.296 \times 10^{-3} \frac{\text{g} \cdot \text{mezcla}}{\text{cm}^3 \text{mezcla}} \quad \text{FIN}$$

### 5.3 Velocidad de la mezcla gaseosa $V_g$

$$G = 6.234 \frac{\text{gmolAIRE}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2} \quad \text{Este valor se calculó en el programa anetrior}$$

$$G_{\text{Air}} := G \cdot P_{\text{Maire}}$$

$$\frac{\text{gAir}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2} = \frac{\text{gmol} \cdot \text{AIRE}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2} \cdot \frac{\text{g} \cdot \text{Air}}{\text{gmol} \cdot \text{Air}}$$

$$G_{\text{CO}_2} := (Y_{\text{dCO}_2}) \cdot G \cdot P_{\text{MCO}_2}$$

$$\frac{\text{g} \cdot \text{CO}_2}{\text{h} \cdot \text{cm}^2} = \frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{gmolAIRE}} \cdot \frac{\text{gmolAIRE}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2} \cdot \frac{\text{gCO}_2}{\text{gmolCO}_2}$$

$$G_{mv} := G_s + G_{\text{CO}_2}$$

$$G_{mv} = 198.017 \frac{\text{g} \cdot \text{mezcla} \cdot \text{gaseosa}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2}$$

$$V_g := G_{mv} \cdot \frac{1}{\rho_g} \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{1}{100}$$

$$\frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{g} \cdot \text{mezcla} \cdot \text{gaseosa}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2} \cdot \frac{\text{cm}^3}{\text{g}} \cdot \frac{1 \cdot \text{h}}{3600 \cdot \text{s}}$$

$$V_g = 0.4245 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{FIN}$$

5.4 Capacidad calorífica a presión constante del gas de entrada a la torre (aire + CO<sub>2</sub>)

$C_{p_g}$

$$T^{\circ}\text{CO}_2\text{E} := 20 \quad ^{\circ}\text{C} \quad T^{\circ}\text{CaireE} = 18 \quad ^{\circ}\text{C}$$

$$T^{\circ}\text{K} := T^{\circ}\text{CO}_2\text{E} + 273.15$$

$$A := 27.437$$

$$B := 4.2315 \cdot 10^{-2}$$

$$C := -1.9555 \cdot 10^{-5}$$

$$D := 3.9968 \cdot 10^{-9}$$

$$E := -2.9872 \cdot 10^{-13}$$

$$C_{p\text{CO}_2} := (A + B \cdot T^{\circ}\text{K} + C \cdot T^{\circ}\text{K}^2 + D \cdot T^{\circ}\text{K}^3 + E \cdot T^{\circ}\text{K}^4)$$

$\frac{\text{joule}}{\text{gmol} \cdot ^{\circ}\text{C}}$

$$C_{p\text{CO}_2} = 38.26 \frac{\text{joule}}{\text{gmol} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

$$T^{\circ}\text{K} := T^{\circ}\text{CaireE} + 273.15$$

$$aa := 1 \cdot 10^{-5}$$

$$bb := -0.0051$$

$$cc := 29.77$$

$$CP_{\text{AIRE}} := aa T^{\circ}\text{K}^2 + bb \cdot T^{\circ}\text{K} + cc$$

$$CP_{\text{AIRE}} = 29.133 \quad \frac{\text{joule}}{\text{gmol} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

El peso molecular de la mezcla AIRE-CO2

$$PM_{\text{Aire.CO2}} := PM_{\text{CO2}} \cdot y_{\text{MolarCO2e}} + PM_{\text{Aire}} \cdot (1 - y_{\text{MolarCO2e}})$$

$$PM_{\text{Aire.CO2}} = 30.514 \quad \frac{\text{gmezcla}}{\text{gmolmezcla}}$$

$$Cp_g := \left[ Cp_{\text{CO2}} \cdot y_{\text{MolarCO2e}} + CP_{\text{AIRE}} \cdot (1 - y_{\text{MolarCO2e}}) \right] \cdot x$$



$$\frac{\text{joule}}{\text{gmolmezcla} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

$$\left[ \frac{1}{PM_{\text{Aire.CO2}}} \cdot \rho_g \cdot \left( \frac{100}{1} \right)^3 \right]$$

$$Cp_g := 1276.28$$

$$\frac{\text{Joules}}{\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{K}}$$

se requieren estas unidades para sustituir su valor en la ecuación de abajo, ver artículo de Hanne M. Kvmsdal, página 15

$$\frac{\text{Joules}}{\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{K}} = \frac{\text{joule}}{\text{gmolmezcla} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot \left[ \frac{\text{gmolmezcla}}{\text{gmezcla}} \cdot \frac{\text{g} \cdot \text{mezcla}}{\text{cm}^3 \text{mezcla}} \cdot \left( \frac{100\text{cm}}{1 \cdot \text{m}} \right)^3 \right]$$

### 5.5 El coeficiente de película en las paredes de la columna $h_{\text{paredes}}$

$$\rho_g = 1.296 \times 10^{-3} \frac{\text{g} \cdot \text{mezcla}}{\text{cm}^3 \text{mezcla}} \quad V_g = 0.4245 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\rho_{g, \text{Kg}} := (\rho_g) \cdot \frac{1}{1000} \cdot \left( \frac{100}{1} \right)^3 \quad C_{p_g} = 1276.28 \quad \frac{\text{Joules}}{\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{K}}$$

$$\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = \frac{\text{g} \cdot \text{mezcla}}{\text{cm}^3 \text{mezcla}} \cdot \frac{1\text{Kg}}{1000\text{g}} \cdot \left( \frac{100\text{cm}}{1\text{m}} \right)^3 \quad D_{hid} = 0.039 \quad \text{m}$$

$$\rho_g = 1.296 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$h_{\text{paredes}} := \left[ 1000 \cdot 4.05 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{\rho_g \cdot V_g}{D_{hid}} \right)^{0.5} \cdot (C_{p_g})^{0.33} \cdot 0.27 \right] \cdot x$$

$$\frac{1}{(1000)} \cdot 239.006 \cdot \frac{1}{100^2}$$

$$\frac{\text{cal}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}} \cdot \frac{1\text{kw}}{1000\text{W}} \cdot \frac{239.006 \cdot \frac{\text{cal}}{\text{s}}}{1\text{kw}} \cdot \left( \frac{1\text{m}}{100\text{cm}} \right)^2$$

$$h_{\text{paredess}} := 0.001 \quad \frac{\text{cal}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

## 6.- Resumen para programar en MATHEMATICA

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\Phi_H + Q_V}{v_z \rho_L C_{p_{mezcla}}}$$

T ==> es la variable dependiente  
Z ==> es la variable independiente

$$\Delta H_{abs} := (84.68 - 0.1135 \cdot T + 0.0027 \cdot T^2) \cdot 1000 \cdot 0.23901$$

$$\frac{\text{cal}}{\text{gmol}} = \frac{\text{kJ}}{\text{gmol}} \cdot \frac{1000\text{J}}{1\text{kJ}} \cdot \frac{0.23901\text{cal}}{1\text{J}}$$

$$RA := -3.231 \times 10^{-13} \cdot Z^3 + 4.63 \times 10^{-11} \cdot Z^2 + 2.701 \times 10^{-10} \cdot Z + 8.859 \times 10^{-7}$$

$$\frac{\text{gmolCO}_2}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

$$a_{esp} := 0.85 \quad \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3}$$

$$h_{paredes} = \quad \frac{\text{cal}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$T_{inicial} := T^{\circ\text{C}}_{mea}$$

La temperatura de la solución MEA- AGUA en el domo de la columna se tomó como la temperatura inicial para resolver la Ecuación Diferencial

$$T_{inicial} = 18 \quad ^\circ\text{C}$$

$$Q_v := -h_{paredes} \cdot a_{esp} \cdot (T(z) - T_{inicial})$$

$$\frac{\text{cal}}{\text{s} \cdot \text{cm}^3} = \frac{\text{cal}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$V_Z = 0.114 \quad \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$\rho_L = 0.05 \quad \frac{\text{gmol} \cdot \text{mezcla}}{\text{cm}^3}$$

$$C_{p\text{Mezcla}} = 19.28 \quad \frac{\text{cal}}{\text{gmol} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\Phi_H = R_A a (-\Delta H_r) \quad -\Delta H_r = \Delta H \text{ absorción}$$

$$\Phi_H = R_A \cdot a_{\text{esp}} \cdot (\Delta H \text{ absorción})$$

$$\frac{\text{cal}}{\text{s} \cdot \text{cm}^3} = \frac{\text{gmolCO}_2}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3} \cdot \frac{\text{cal}}{\text{gmol}}$$

## SOLUCIÓN AL CUESTIONARIO

1.- Respuesta de la ecuación diferencial por MATHEMATICA

$$Z_{\text{teorica}} := \begin{pmatrix} 0 \\ 10 \\ 20 \\ 30 \\ 40 \\ 50 \\ 60 \\ 70 \\ 80 \\ 90 \\ 100 \\ 110 \end{pmatrix}$$

$$T_{\text{teorica}} := \begin{pmatrix} 18. \\ 19.3202 \\ 20.5582 \\ 21.7295 \\ 22.8458 \\ 23.915 \\ 24.9414 \\ 25.9263 \\ 26.8678 \\ 27.7614 \\ 28.5999 \\ 29.3739 \end{pmatrix}$$

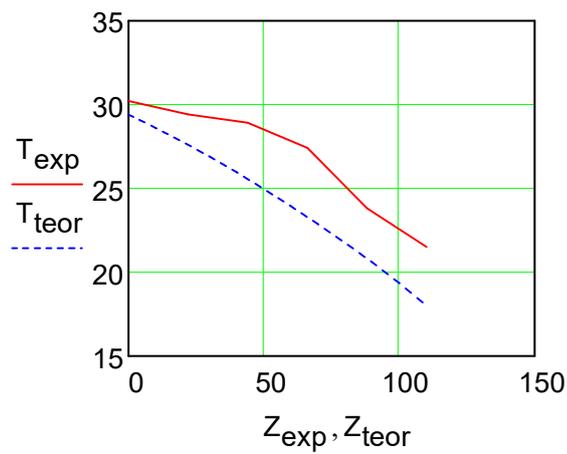
Invertir estos valores para que tengan la misma tendencia que los valores experimentales

$$Z_{\text{teor}} := \begin{pmatrix} 0 \\ 10 \\ 20 \\ 30 \\ 40 \\ 50 \\ 60 \\ 70 \\ 80 \\ 90 \\ 100 \\ 110 \end{pmatrix}$$

$$T_{\text{teor}} := \begin{pmatrix} 29.3739 \\ 28.5999 \\ 27.7614 \\ 26.8678 \\ 25.9263 \\ 24.9414 \\ 23.915 \\ 22.8458 \\ 21.7295 \\ 20.5582 \\ 19.3202 \\ 18 \end{pmatrix}$$

$$Z_{\text{exp}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 22 \\ 44 \\ 66 \\ 88 \\ 110 \end{pmatrix} \text{ cm}$$

$$T_{\text{exp}} = \begin{pmatrix} 30.2 \\ 29.4 \\ 28.9 \\ 27.4 \\ 23.8 \\ 21.5 \end{pmatrix} \text{ }^{\circ}\text{C}$$



2.- Calcular y reportar el tiempo de residencia del flujo donde se favorezca la reacción, ya que para este proceso interesa la formación de la mayor cantidad de productos, los iones carbámico y amina

$$\tau = \begin{pmatrix} 15.469 \\ 9.668 \\ 7.734 \end{pmatrix} \quad \text{min} \quad LE = \begin{pmatrix} 5 \\ 8 \\ 10 \end{pmatrix} \quad \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

R = Tiempo de residencia es de 15.469 para un gasto de 5 L/h













