

# **Guía de Cálculos Experimentales de Absorción con Reacción Guion 4**

## **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 = g mol / 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	2.25	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

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

Flujos de entrada

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

$$\frac{L_{mezcla}}{h}$$

Altura empacada

$$h := 110 \text{ cm}$$

Área transversal de flujo

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

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

$$\tau = \begin{pmatrix} 16.053 \\ 10.033 \\ 8.026 \end{pmatrix} \text{ min}$$

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

Por lo tanto: El 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 16.053 min

$$LE := 5 \quad \frac{L \cdot mezcla}{h}$$

## DATOS EXPERIMENTALES

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

$$\%wCO_{2e} := 14.55$$

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

$$T^{\circ}C_{aireE} := 18 \quad ^{\circ}C$$

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

$$\%wCO_{2s} := 7.86$$

Temperatura de MEA en  
la solución alimentada

$$T^{\circ}C_{mea} := 18 \quad ^{\circ}C$$

Flujo de aire alimentado  
en %

$$\text{RotametroAIRE} := 20$$

Flujo de CO<sub>2</sub>  
alimentado  
en mm

$$\text{RotametroCO}_2 := 50$$

Concentración en % en  
masa del aire a la entrada

$$\%wAIRE_e := 100 - \%wCO_{2e}$$

$$\%wAIRE_e = 85.45$$

Concentración en % en  
masa del aire a la salida

$$\%wAIRE_s := 100 - \%wCO_{2s}$$

$$\%wAIRE_s = 92.14$$

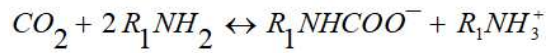
Fracción de huecos

$$\varepsilon_{ww} := 0.6$$

ion carbámico

ion amina

LAREACCIÓN



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

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

$$B_{\text{salida}} := 1.285 \quad \frac{\text{gmolMEA}}{\text{LSol}}$$

Concentración en % masa de MEA a la entrada

Concentración en % masa de MEA a la salida

$$\%wMEA_e := 14.64$$

$$\%wMEAs := 7.80$$

## Datos constantes

Condiciones estándar

Presión de operación

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

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

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

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

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

altura de la torre

$$H_{ww} := 110 \quad \text{cm}$$

$$P_{\text{Mmea}} := 61.08 \quad \text{g / gmol}$$

$$P_{\text{Magua}} := 18 \quad \text{g / gmol}$$

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

$$T^{\circ}\text{Kaire} = 291.15 \quad ^{\circ}\text{K}$$

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

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

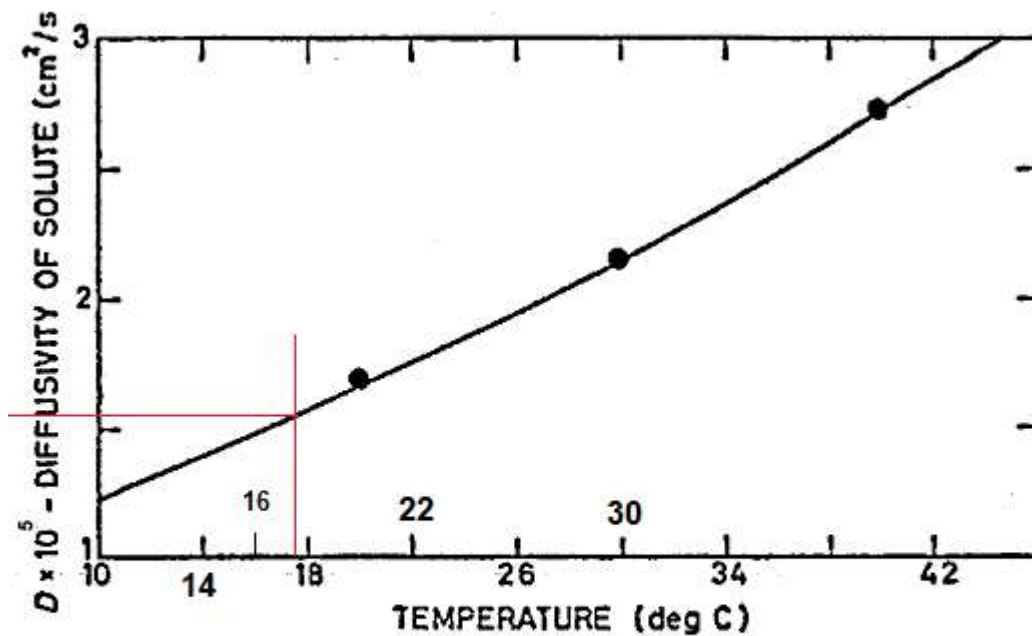
**Cálculos de los coeficientes de difusión, los Números de Schmidt, la reacción, la constante de rapidez de reacción**

**1.- Los coeficientes de difusión**

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

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

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.

$$D_{\text{CO}_2\text{H}_2\text{O}} := 1.2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$D_A = D_{\text{amina-agua}} = 0.3889 \times D_{\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}} \text{ (cm/s)}$$

$$D_A := 0.3889 \cdot D_{\text{CO}_2\text{H}_2\text{O}} \quad D_A = 4.667 \times 10^{-6} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$D_B = D_{CO_2-agua} = 0.0642 \times D_{CO_2-H_2O} \text{ (cm/s)}$$

$$D_B := 0.0642 \cdot D_{CO_2H_2O}$$

$$D_B = 7.704 \times 10^{-7}$$

$$\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

## Los Números de Schmidt

CONSULTAR ESTAS ECUACIONES EN EL GUION (4) de AMyD

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

Temperatura del CO2 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

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

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

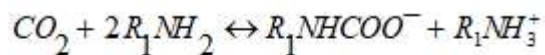
Para corregir la correlación de kg.a

Para corregir la correlación de kg.a

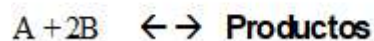
$$N_{\text{sc1}} := 0.6485$$

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

## La reacción y la constante de rapidez de reacción



La relación estequiométrica de la reacción



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

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

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

Constante de rapidez de reacción hacia la  
derecha

$$k_2 = 3968.451$$

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

**FIN**

### Cálculos 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

Fracción molar del  $\text{CO}_2$  en el fondo de la torre

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

$$y_{\text{CO}_2}^{\text{f}} := \frac{\frac{w_{\text{CO}_2\text{e}}}{P_{\text{MCO}_2}}}{\frac{w_{\text{CO}_2\text{e}}}{P_{\text{MCO}_2}} + \frac{(1 - w_{\text{CO}_2\text{e}})}{P_{\text{Maire}}}}$$

$$y_{\text{CO}_2}^{\text{f}} = 0.101 \quad \frac{\text{gmolCO}_2}{\text{gmolmezcla}} \quad \text{para los fondos, entrada de la torre}$$

Fracción molar del  $\text{CO}_2$  en el domo de la torre

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

$$y_{\text{CO}_2}^{\text{d}} := \frac{\frac{w_{\text{CO}_2\text{s}}}{P_{\text{MCO}_2}}}{\frac{w_{\text{CO}_2\text{s}}}{P_{\text{MCO}_2}} + \frac{(1 - w_{\text{CO}_2\text{s}})}{P_{\text{Maire}}}}$$

$$y_{\text{CO}_2}^{\text{d}} = 0.0532 \quad \frac{\text{gmolCO}_2}{\text{gmolmezcla}} \quad \text{para domo de la torre}$$

#### 2.- Criterio para inicio de iteraciones

ORIGIN := 1

(a) Se necesita conocer el peso molecular promedio de la mezcla en la columna con un flujo de 8 L / h

Peso molecular promedio de la mezcla CO<sub>2</sub> - Aire

$$PM_{\text{Aire}} := 29 \quad \text{kgAire} / \text{kmolAire}$$

$$y_{\text{Aire}} := 1 - y_{\text{CO}_2} = 0.899$$

$$PM_{\text{CO}_2} := 44 \quad \text{kgCO}_2 / \text{kgmolCO}_2$$

$$y_{\text{CO}_2} = 0.101$$

$$\frac{\text{kgmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{kgmol} \cdot \text{mezcla}}$$

$$PM_{\text{mezcla}} := PM_{\text{CO}_2} \cdot y_{\text{CO}_2} + PM_{\text{Aire}} \cdot y_{\text{Aire}}$$

$$\frac{\text{kg} \cdot \text{mezcla}}{\text{kgmol} \cdot \text{mezcla}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{CO}_2}{\text{kgmol} \cdot \text{CO}_2} \cdot \frac{\text{kgmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{kgmol} \cdot \text{mezcla}} + \frac{\text{kg} \cdot \text{Aire}}{\text{kgmol} \cdot \text{Aire}} \cdot \frac{\text{kgmol} \cdot \text{Aire}}{\text{kgmol} \cdot \text{mezcla}}$$

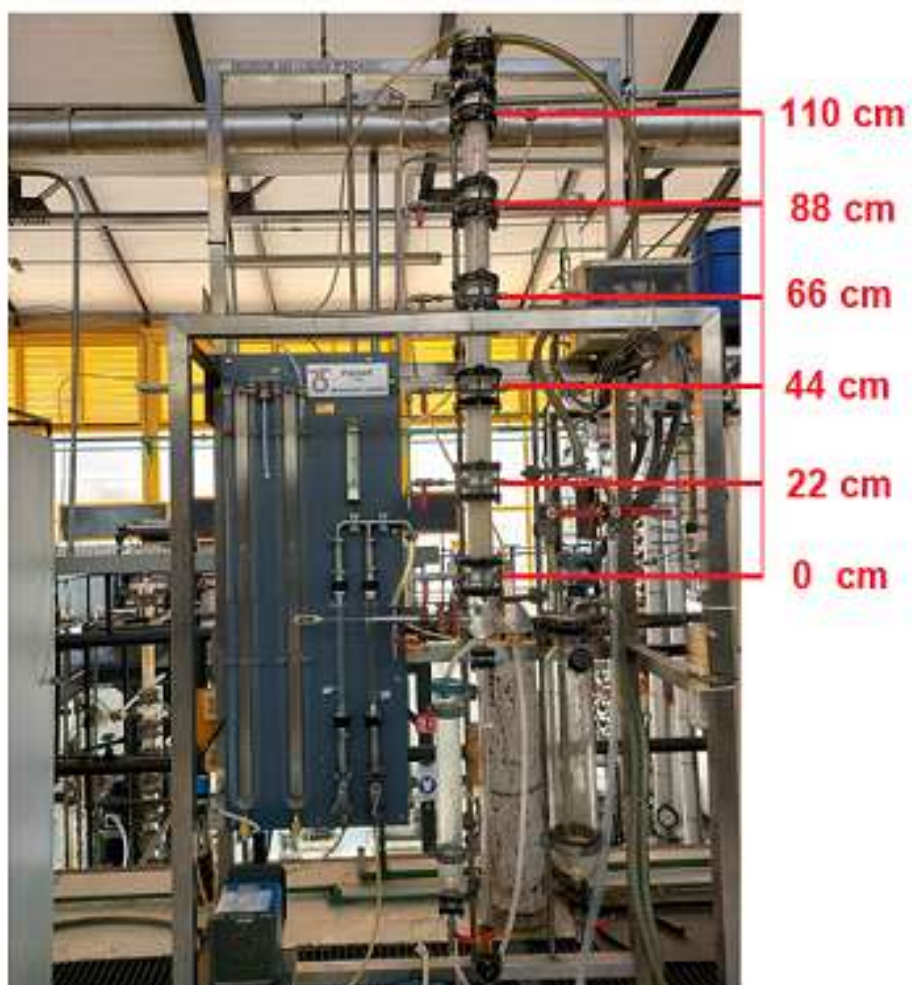
$$PM_{\text{mezcla}} = 30.514$$

$$\frac{\text{kg} \cdot \text{mezcla}}{\text{kgmol} \cdot \text{mezcla}}$$

(b) Aplicar el modelo para predecir la presión parcial del CO<sub>2</sub> que asciende en la columna para un flujo de 5 L / h

$$p_z = \left[ \frac{1}{\epsilon} \cdot p_{f\text{CO}_2} \cdot e^{\frac{-g \cdot Z}{R \cdot \frac{1}{PM_{\text{mezcla}}} \cdot (T_{\text{exp}} + 273.15)}} \right] \quad \text{atm}$$

$p(z)$  = Es la presión parcial del CO<sub>2</sub> ascendente en la columna



**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



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

cm

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

°C

$$Z := Z_{\text{exp}} \cdot \frac{1}{100}$$

$$m = \text{cm} \cdot \frac{1\text{m}}{100 \cdot \text{cm}}$$

$$Z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.22 \\ 0.44 \\ 0.66 \\ 0.88 \\ 1.1 \end{pmatrix}$$

m

La constante universal de los gases

$$RR := 8.314 \frac{\text{m}^3 \cdot \text{Pa}}{\text{kgmol} \cdot ^\circ\text{K}} \quad \epsilon = 0.6$$

$$RR = 8.314 \frac{\frac{\text{m}^3 \cdot \text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}}{\text{kgmol} \cdot \text{PM} \cdot \left( \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}} \right) \cdot ^\circ\text{K}} = \frac{\frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}}{\text{s}^2}}{\text{PM} \cdot (\text{kg}) \cdot ^\circ\text{K}} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{PM}_{\text{mezcla}} \cdot ^\circ\text{K}}$$

La presión parcial del bióxido de carbono a lo largo de la columna

fracción molar en el  
fondo de la columna

$$y_{\text{fCO}_2} = 0.101$$

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

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

====ooo=====

fracción molar en el domo  
de la columna

$$y_{\text{dCO}_2} = 0.0532$$

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

$$p_{fCO_2} := PT \cdot y_{fCO_2}$$

$$p_{dCO_2} := PT \cdot y_{dCO_2}$$

$$p_{fCO_2} = 0.0778 \quad \text{atm}$$

$$p_{dCO_2} = 0.041 \quad \text{atm}$$

$$g = 9.807 \frac{m}{s^2}$$

$$\varepsilon := 0.6$$

$$PM := PM_{mezcla} = 30.514$$

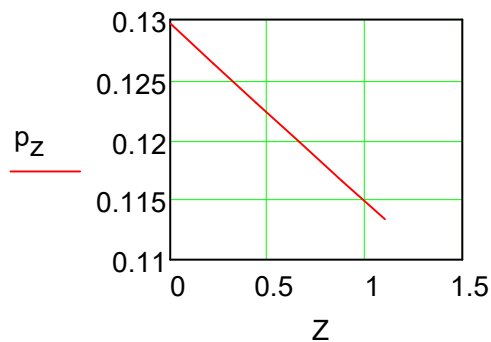
$$p_z := \left[ \frac{1}{\varepsilon} \cdot p_{fCO_2} \cdot e^{\frac{-9.807 \cdot Z}{8.314 \cdot \frac{1}{PM} \cdot (T_{exp} + 273.15)}} \right]$$

$$p_z = \text{atm} \cdot e^{\left( \frac{\frac{m}{s^2} \cdot m}{\left( \frac{m^2}{s^2 \cdot PM \cdot ^\circ K} \right) \times ^\circ K} \right)}$$

$p_z$  = Es la presión hidrostática del CO<sub>2</sub> ascendente a lo largo de la columna en atm

$$p_z = \begin{pmatrix} 0.1297 \\ 0.1263 \\ 0.123 \\ 0.1198 \\ 0.1165 \\ 0.1134 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \text{fondo} \\ \\ \text{atm} \\ \\ \text{domo} \end{matrix}$$

$$Z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.22 \\ 0.44 \\ 0.66 \\ 0.88 \\ 1.1 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \text{fondo} \\ \\ \text{m} \\ \\ \text{domo} \end{matrix}$$



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

### 3.1 Relación mol de CO2 en los puntos intermedios, utilizando el modelo

$$y_{\text{CO2}} := \frac{p_z}{P_T}$$

$$Y_{\text{CO2}} := \frac{y_{\text{CO2}}}{1 - y_{\text{CO2}}}$$

$$Y_{\text{CO2}} = \begin{pmatrix} 0.20217 \\ 0.19592 \\ 0.18988 \\ 0.18398 \\ 0.17807 \\ 0.17237 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{fondo} \\ \\ \\ \\ \text{domo} \end{matrix} \quad \frac{\text{gmol} \cdot \text{CO2}}{\text{gmolAIRE}}$$

### 3.2 Flujo molar de aire de entrada por unidad de área o masa velocidad del aire **G** en $\left( \frac{\text{gmolAIRE}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2} \right)$

Deducción de la densidad del AIRE de entrada a la columna, consultar Welty para tomar los datos de sus tablas al final del texto

$$T^{\circ}\text{CAire} := \begin{pmatrix} 6.85 \\ 26.85 \\ 46.85 \end{pmatrix} \quad \rho_{\text{Aire}} := \begin{pmatrix} 1.2614 \\ 1.1769 \\ 1.1032 \end{pmatrix} \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$N := \text{augment}(T^{\circ}\text{CAire})$$

$$D := \rho_{\text{Aire}}$$

$$n := 1$$

$$R := \text{regress}(N, D, n)$$

de destilación

$$TC = 0.00748 \cdot NE^3 - 0.13579 \cdot NE^2 + 0.80617 \cdot NE + 74.06819$$

$$R = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 1 \\ 1.287 \\ -3.955 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

$$\rho_{\text{aire}} := \left( -3.955 \times 10^{-3} \cdot T_{\text{exp}} + 1.287 \right) \cdot \left[ \frac{1000}{1} \cdot \left( \frac{1}{100} \right)^3 \right]$$

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

$$\rho_{\text{aire}} = \begin{pmatrix} 0.00117 \\ 0.00117 \\ 0.00117 \\ 0.00118 \\ 0.00119 \\ 0.0012 \end{pmatrix} \quad \frac{\text{g} \cdot \text{aire}}{\text{cm}^3 \cdot \text{aire}}$$

El flujo del aire de ENTRADA a condiciones del laboratorio

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

$$\begin{array}{l} \text{a 100 \%} \text{ ----- } 7.2 \text{ m}^3/\text{h} \\ \text{RotámetroAIRE} \text{ ----- } x \end{array}$$

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

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

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

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

Presión en México  
en el Laboratorio

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

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

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

$$Q2\text{AireE} := \frac{P1\text{Standar} \cdot Q1\text{aireE} \cdot T2^{\circ}\text{Kaire}}{P2 \cdot T1^{\circ}\text{KStandar}} \frac{\text{cm}^3 \text{Aire}}{\text{h}}$$

$$G := Q2\text{AireE} \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot \frac{1}{P_{\text{Maire}}} \cdot \frac{1}{\text{ATF}}$$

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

$$G = \begin{pmatrix} 6.0381 \\ 6.0545 \\ 6.0647 \\ 6.0954 \\ 6.169 \\ 6.2161 \end{pmatrix} \frac{\text{gmolAIRE}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2}$$

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

Se conoce que:

$$Y_{CO_2} = \begin{pmatrix} 0.20217 \\ 0.19592 \\ 0.18988 \\ 0.18398 \\ 0.17807 \\ 0.17237 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{fondo} \\ \\ \\ \\ \text{domo} \end{matrix}$$

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

$$Y_{dCO_2} := \left[ (Y_{CO_2})^{(1)} \right]_6 = 0.17237 \quad \frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{gmol} \cdot \text{AIRE}}$$

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

$$\frac{\text{gmolCO}_2}{h \cdot \text{cm}^2} = \frac{\text{gmolAIRE}}{h \cdot \text{cm}^2} \cdot \left( \frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{gmol} \cdot \text{AIRE}} \right)$$

$$G_{abs} = \begin{pmatrix} 0.18 \\ 0.143 \\ 0.106 \\ 0.071 \\ 0.035 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{domo} \\ \\ \\ \\ \text{fondo} \end{matrix}$$

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

Es el CO<sub>2</sub> gaseoso que pasó al 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 Cálculo de la masa velocidad de la mezcla líquida de entrada $L_v$ al 14.64 % de MEA

Flujo de entrada

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

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

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

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

Cálculo de la velocidad superficial (entre empaques) de la mezcla líquida **L**.  
Con este dato ir a la gráfica y buscar **a**, es decir, el área específica por unidad de volumen de torre empada en la curva D

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

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

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

En la curva D se puede leer

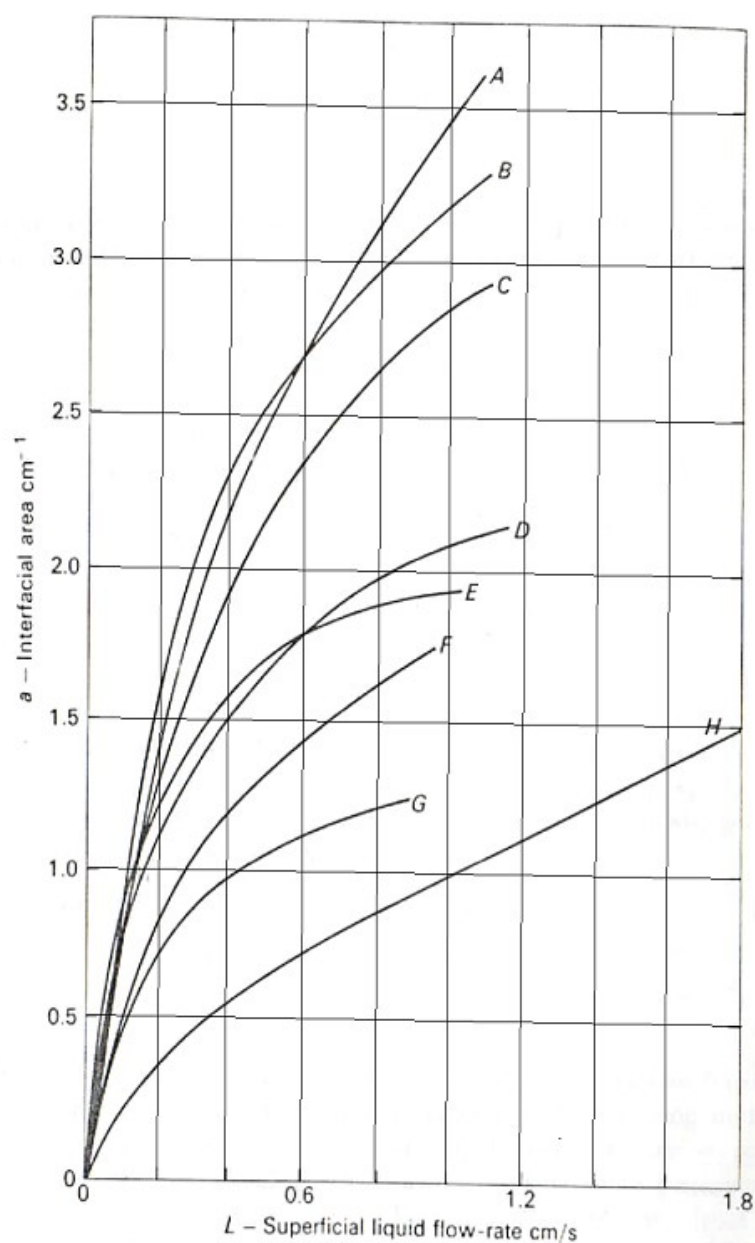


Fig. 9-1 Effective interfacial area for packings (after Danckwerts and Sharma, 1966)

Curve	Type and size of packing	Temperature (°C)	Tower diameter (in.)	Packing density (pieces/ cm³)	Dry packing area (cm²/cm³)
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



$$a_{\text{esp}} := 0.8 \quad \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3} \quad \text{área específica por unidad de volumen de torre}$$

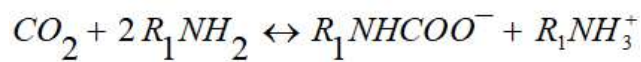
### 3.5 Cantidad absorbida por unidad de volumen de líquido alimentado,

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

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

$$\text{GabsPorVolumen} = \begin{pmatrix} 0.43766 \\ 0.34687 \\ 0.25833 \\ 0.17212 \\ 0.0856 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \text{fondo} \\ \\ \\ \\ \\ \text{domo} \end{matrix} \quad \frac{\text{gmolCO}_2}{\text{L Sol}}$$

### 3.6 Concentración de la amina libre $C^\circ_B$ (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)



La relación estequiométrica de la reacción

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

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

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

Concentraciones experimentales en el seno de la fase líquida

$$C^{\circ}B = \begin{pmatrix} 1.375 \\ 1.556 \\ 1.733 \\ 1.906 \\ 2.079 \\ 2.25 \end{pmatrix}$$

fondo  
←-----

$B_{\text{salida}} = 1.285$        $\frac{\text{gmolMEA}}{\text{LSol}}$

←-----  
domo

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

Error porcentual de la concentración de la amina a la salida de la torre

$$C^{\circ}B_{\text{Modelo}} := [(C^{\circ}B)^{(1)}]_1 = 1.375 \quad \frac{\text{gmol} \cdot \text{MEA}}{\text{L} \cdot \text{solución}}$$

$$C^{\circ}B_{\text{Experimental}} := B_{\text{salida}} = 1.285 \quad \frac{\text{gmolMEA}}{\text{LSol}}$$

$$\text{Error} := \frac{C^{\circ}B_{\text{Modelo}} - C^{\circ}B_{\text{Experimental}}}{C^{\circ}B_{\text{Experimental}}} \cdot 100$$

$$\text{Error} = 6.979$$

Valor aceptable

$$C^{\circ}B = \begin{pmatrix} B_{\text{salida}} \\ 1.875 \\ 1.97056 \\ 2.06434 \\ 2.15857 \\ 2.25 \end{pmatrix}$$

fondo

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

domo, aquí se alimenta la amina con concentración Normal

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

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

$$C^{\circ}B_d := [(C^{\circ}B)^{\langle 1 \rangle}]_6 = 2.25$$

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

DOMO

$$C^{\circ}B_f := [(C^{\circ}B)^{\langle 1 \rangle}]_1 = 1.375$$

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

FONDO

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

### 3.8 Masa velocidad del gas **Gmv (G = gas, mv= masa**

**velocidad)** de la mezcla gaseosa (aire + CO2) en los extremos y en los puntos intermedios de la torre

Para el aire

Calculado anteriormente

$$G = \begin{pmatrix} 6.0381 \\ 6.0545 \\ 6.0647 \\ 6.0954 \\ 6.169 \\ 6.2161 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{fondo} \\ \leftarrow \\ \frac{\text{gmol} \cdot \text{aire}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2} \\ \leftarrow \\ \text{domo} \end{array}$$

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

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

Para el CO2

$$G_{CO2} := Y_{CO2} \cdot G \cdot PM_{CO2}$$

$$\frac{g \cdot CO2}{h \cdot cm^2} = \frac{gmol \cdot CO2}{gmolAire} \cdot \frac{gmolAIRE}{h \cdot cm^2} \cdot \frac{gCO2}{gmolCO2}$$

$$G_{mv} := G_{aire} + G_{CO2}$$

$G_{mv} = \begin{pmatrix} 476.504 \\ 476.978 \\ 477.275 \\ 478.165 \\ 480.3 \\ 481.664 \end{pmatrix}$	$\leftarrow$	<div style="text-align: center;">fondo</div> <hr style="width: 100px; margin: 0 auto;"/> <div style="text-align: center;">domo</div>
		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <math display="block">\frac{g \cdot mezcla \cdot gaseosa}{h \cdot cm^2}</math> </div>

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

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

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

$$G_{MV} = \begin{pmatrix} 975.94 \\ 976.912 \\ 977.519 \\ 979.342 \\ 983.715 \\ 986.509 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{c} \text{fondo} \\ \leftarrow \\ \frac{\text{lb} \cdot \text{mezcla gaseosa}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2} \\ \leftarrow \\ \text{domo} \end{array}$$

**3.10** Se necesita también la masa velocidad del líquido  $L_{MV}$  (L= Líquido, MV= masa velocidad) en sistema inglés para calcular  $k_g a$

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

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

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

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

ya calculada

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

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

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

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

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

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

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

### 3.11 Cálculo de k<sub>ga</sub> en los puntos extremos y en los puntos intermedios de

la columna en: gmol de CO<sub>2</sub> / h cm<sup>3</sup> atm

Primero en el sistema inglés

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

$$k_{ga} = \begin{pmatrix} 26.439 \\ 26.458 \\ 26.47 \\ 26.506 \\ 26.591 \\ 26.645 \end{pmatrix} \quad \frac{\text{lbmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{h} \cdot \text{ft}^3 \cdot \text{atm}}$$

fondo  
-----  
domo

Ahora en el sistema Mks

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

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

$k_{ga} =$	423.525	fondo	$\frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{h \cdot L \cdot \text{atm}}$	<p>El coeficiente del lado de la fase gaseosa es prácticamente constante a todo lo largo de la torre</p>
	423.829	←-----		
	424.019			
	424.588			
	425.952			
	426.823	←-----		


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

#### Datos

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

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

$p_z =$	0.1297	fondo	$\text{atm}$	<p>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 <math>P^* = \text{atm}</math></p>
	0.1263			
	0.123			
	0.1198			
	0.1165			
	0.1134	domo		



Esta tabla fue tomada de apéndice 7.1 de este guion experimental

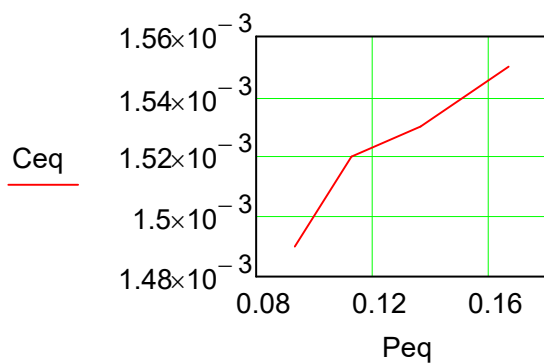
T = 37.77 °C = 100 °F		T = 37.77 °C = 100 °F	
$X^* = \frac{\text{gmol } CO_2}{\text{gmol } MEA}$	$p^* = \text{mm Hg}$	$c^* = \frac{\text{gmol } CO_2}{\text{cm}^3 \text{ solución}}$	$p^* = \text{atm}$
0.57409	70.811	0.00149	0.09317
0.58262	85.535	0.00152	0.11255
0.58902	103.50	0.00153	0.13618
0.59756	126.37	0.00155	0.16628

$$C^* = C_{eq}$$

$$p^* = P_{eq}$$

Cambios de variables:  $p^* = P_{eq}$ ;  $C^* = C_{eq}$

$$C_{eq} := \begin{pmatrix} 0.00149 \\ 0.00152 \\ 0.00153 \\ 0.00155 \end{pmatrix} \quad \frac{\text{gmol } CO_2}{\text{cm}^3 \text{ solución}} \quad P_{eq} := \begin{pmatrix} 0.09317 \\ 0.11255 \\ 0.13618 \\ 0.16628 \end{pmatrix} \quad \text{atm}$$



Se tiene la siguiente ecuación de regresión

$$N := \text{augment}(P_{eq})$$

$$D := C_{eq}$$

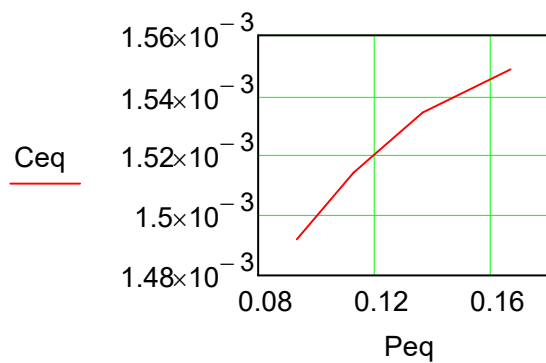
$$n := 2$$

$$R := \text{regress}(N, D, n)$$



$$R = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 2 \\ 1.313 \times 10^{-3} \\ 2.565 \times 10^{-3} \\ -6.901 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \quad P_{eq} = \begin{pmatrix} 0.0932 \\ 0.1125 \\ 0.1362 \\ 0.1663 \end{pmatrix} \quad \text{atm}$$

$$C_{eq} := \left[ -6.901 \cdot 10^{-3} \cdot (P_{eq})^2 + 2.565 \times 10^{-3} \cdot P_{eq} + 1.313 \times 10^{-3} \right]$$



Cambiamos variable  $P^{\circ}A_{eq}$   $\xleftarrow{\text{ser\'a}}$   $p_z$

$$P^{\circ}A_{eq} := p_z$$

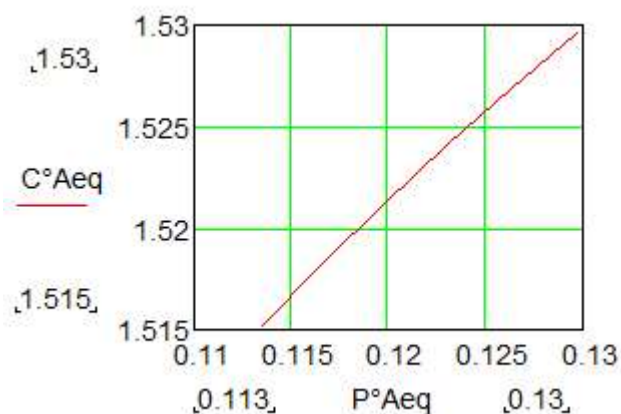
$$P^{\circ}A_{eq} = \begin{pmatrix} 0.1297 \\ 0.1263 \\ 0.123 \\ 0.1198 \\ 0.1165 \\ 0.1134 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{fondo} \\ \xleftarrow{\hspace{1cm}} \\ \\ \text{atm} \\ \\ \xleftarrow{\hspace{1cm}} \\ \text{domo} \end{array}$$

$$C^{\circ}Aeq := \left[ -6.901 \times 10^{-3} \cdot (P^{\circ}Aeq)^2 + 2.565 \times 10^{-3} \cdot P^{\circ}Aeq + 1.313 \times 10^{-3} \right] \cdot \frac{1000}{1}$$

$$\frac{\text{gmolCO}_2}{L_{\text{solución}}} = \frac{\text{gmolCO}_2}{\text{cm}^3 \text{ de solución}} \cdot \frac{1000 \cdot \text{cm}^3}{1 \cdot L}$$

Concentración interfacial  
en equilibrio a lo largo  
de la torre

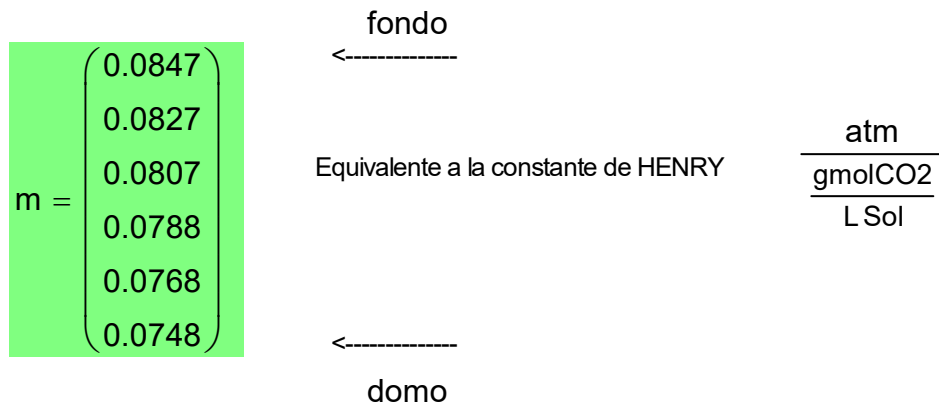
$C^{\circ}Aeq :=$	$\begin{pmatrix} 1.53 \\ 1.527 \\ 1.524 \\ 1.521 \\ 1.518 \\ 1.515 \end{pmatrix}$	fondo ←-----	$\frac{\text{gmolCO}_2}{L_{\text{solución}}}$	$C^{\circ}Aeq_k :=$ ■
		←----- domo		



Por lo tanto

$$m := \frac{P^{\circ}Aeq}{C^{\circ}Aeq} \quad \frac{\text{atm}}{\frac{\text{gmolCO}_2}{L \text{ Sol}}}$$

esta es la relación de equilibrio **m**



#### 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 (al subir  $k_L$  baja h)  
Por prueba y error  $k_L := 1.53 \frac{\text{cm}}{\text{h}}$  (al bajar  $k_L$  sube h)

##### 4.1 Cálculo del No. de Hatta

$$\sqrt{M} = \frac{\sqrt{D_A k_2 C_B^0}}{k_L} \quad (19) \quad \sqrt{M} = \text{RaizM}$$

$$\text{RaizM} := \frac{\sqrt{D_A \cdot k_2 \cdot C^{\circ}B}}{k_L \cdot \frac{1}{3600}}$$

$C^{\circ}B$  = 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

$$\text{RaizM} = \begin{pmatrix} 375.433 \\ 399.459 \\ 421.573 \\ 442.043 \\ 461.677 \\ 480.311 \end{pmatrix}$$

fondo  
←-----

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  $\sqrt{M} < 0.3$

←-----  
domo

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)

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

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

$$E1 = \begin{pmatrix} 375.433 \\ 399.459 \\ 421.573 \\ 442.043 \\ 461.677 \\ 480.311 \end{pmatrix}$$

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

$$Ei = \begin{pmatrix} 1.074 \\ 1.084 \\ 1.094 \\ 1.103 \\ 1.113 \\ 1.123 \end{pmatrix}$$

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

$$E = \begin{pmatrix} 1.074 \\ 1.084 \\ 1.094 \\ 1.103 \\ 1.113 \\ 1.123 \end{pmatrix}$$

fondo  
←-----

←-----  
domo

**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

$$R_A \cdot a = \frac{p_{\text{CO}_2}}{\frac{1}{\text{kg} \cdot \text{a}} + \frac{\text{He}}{E \cdot \text{kL} \cdot \text{a}}}$$

$$a = \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3} \cdot \frac{1000 \cdot \text{cm}^3}{1 \cdot \text{L}} = \frac{\text{cm}^2}{\text{L}}$$

$$p_{\text{CO}_2} := p_z$$

$$R_A := \left[ \left[ \frac{p_{CO_2}}{\left( \frac{1}{k_{ga}} + \frac{m}{E \cdot k_L \cdot a_{esp}} \right)} \right] \cdot \frac{1}{a_{esp} \cdot 1000} \right] \quad a_{esp} = 0.8$$

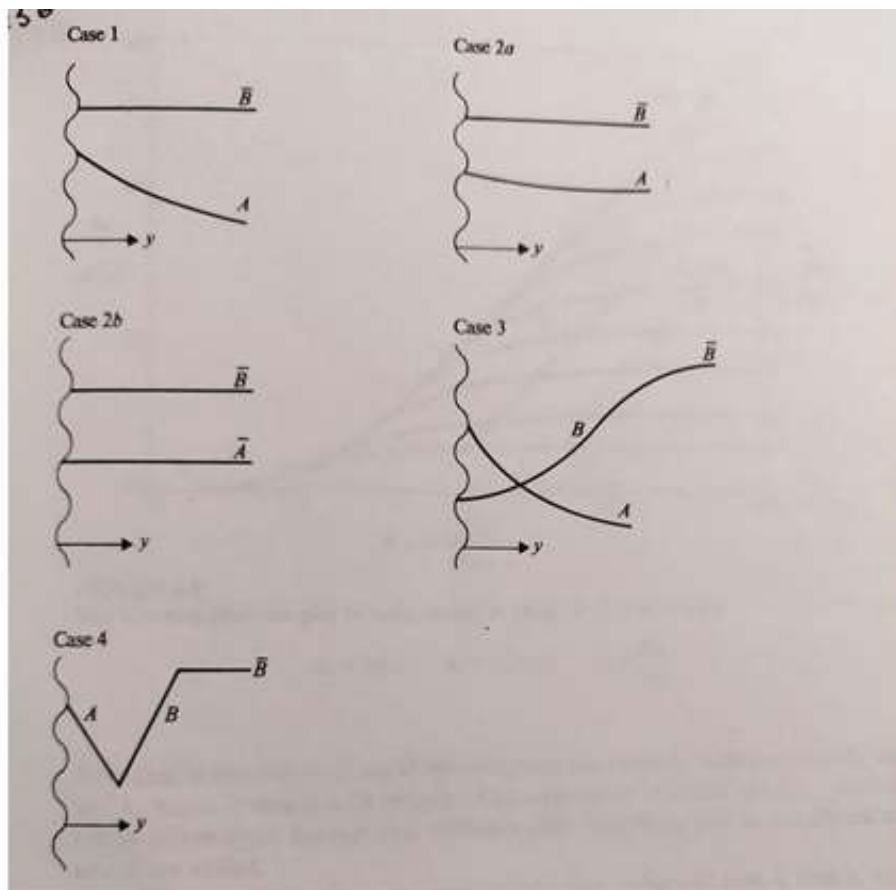
$$R_A = \frac{\text{atm}}{\left( \frac{1}{\frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{h \cdot L \cdot \text{atm}}} + \frac{\frac{L \text{ Sol} \cdot \text{atm}}{\text{gmolCO}_2}}{\frac{\text{cm}}{h} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3}} \right)} \cdot \frac{1}{\frac{\text{cm}^2}{L}}$$

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

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

$$R_A = \begin{pmatrix} 0.0024 \\ 0.0024 \\ 0.0025 \\ 0.0025 \\ 0.0025 \\ 0.0025 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{fondo} \\ \leftarrow \\ \\ \frac{\text{gmol} \cdot \text{absorbido} \cdot \text{de} \cdot \text{CO}_2}{\text{cm}^2 \cdot h} \\ \\ \leftarrow \\ \text{domo} \end{array}$$

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



**Fig. 8.-** 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.

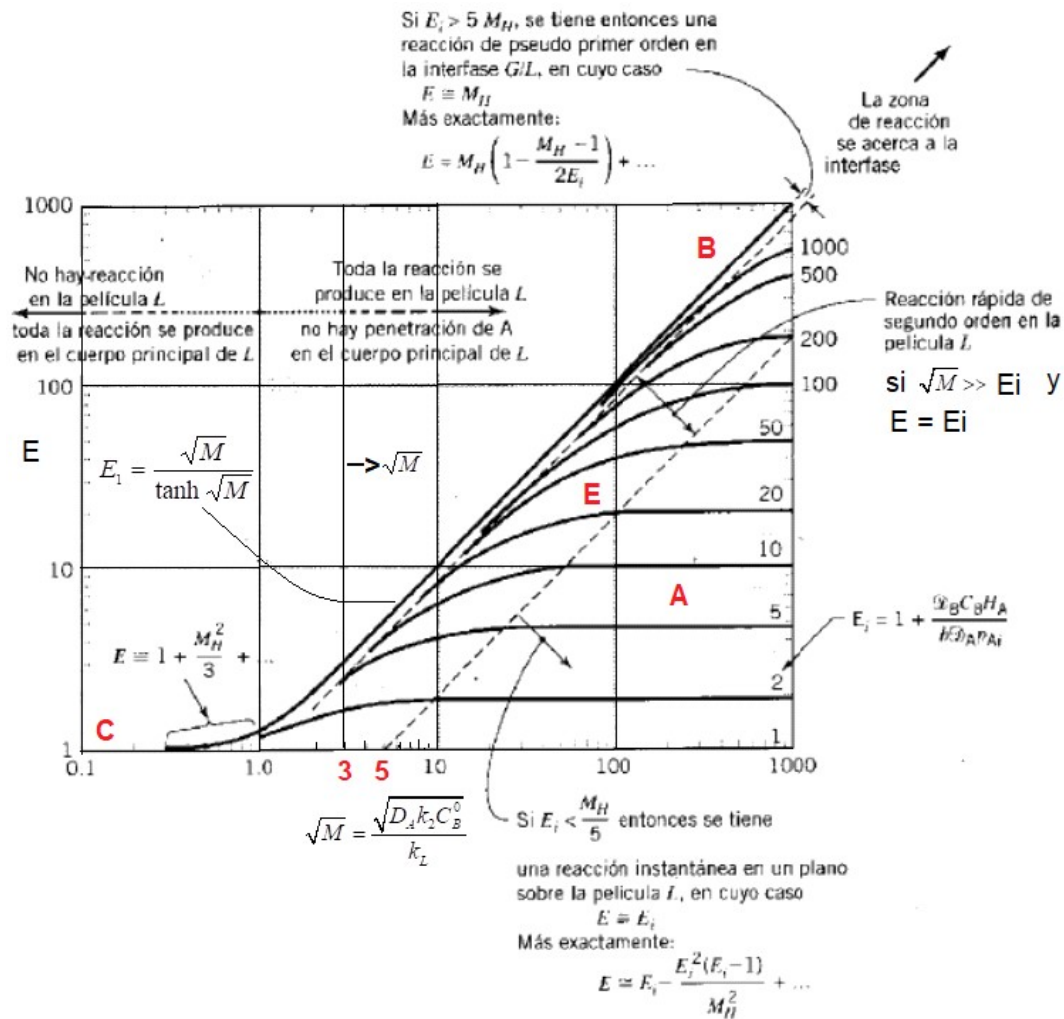


Fig. (9). El factor de mejora  $E$  Vs. N° de Hatta  $\sqrt{M}$

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

$$\text{RaizM} = \begin{pmatrix} 375.433 \\ 399.459 \\ 421.573 \\ 442.043 \\ 461.677 \\ 480.311 \end{pmatrix}$$

$$E_i = \begin{pmatrix} 1.074 \\ 1.084 \\ 1.094 \\ 1.103 \\ 1.113 \\ 1.123 \end{pmatrix}$$

POR LO TANTO LA REACCIÓN ES DE SEGUNDO ORDEN Y SE DA EN LA PELÍCULA DEL LÍQUIDO ENTRE EL CO<sub>2</sub> ABSORBIDO Y LA MONOETANOLAMINA



$$E = \begin{pmatrix} 1.074 \\ 1.084 \\ 1.094 \\ 1.103 \\ 1.113 \\ 1.123 \end{pmatrix}$$

$$E_i = \begin{pmatrix} 1.074 \\ 1.084 \\ 1.094 \\ 1.103 \\ 1.113 \\ 1.123 \end{pmatrix}$$

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);

Esta condición se cumple en este guión experimental

$$\sqrt{M} = \sqrt{\frac{k_2 C_B^o \delta_L^2}{D_A}} = \frac{\text{Conversión máxima posible en la película del líquido}}{\text{El transporte máximo por difusión en la película del líquido}}$$

Esta condición no se cumple en este guión experimental

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 kL

Variables ya conocidas para la evaluación de la ecuación de diseño

$$C^{\circ}B = \begin{pmatrix} 1.37468 \\ 1.55626 \\ 1.73333 \\ 1.90575 \\ 2.0788 \\ 2.25 \end{pmatrix}$$

fondo  
←-----  
  
←-----  
domo

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

$$R_A = \begin{pmatrix} 0.0024 \\ 0.0024 \\ 0.0025 \\ 0.0025 \\ 0.0025 \\ 0.0025 \end{pmatrix}$$

fondo  
←-----  
  
←-----  
domo

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

$$kL = 1.53 \quad \frac{\text{cm}}{\text{h}} \quad \varepsilon = 0.6 \quad a_{\text{esp}} = 0.8 \quad \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3} \quad h = 110 \quad \text{cm}$$

$$C^{\circ}_{\text{B.domo}} := (C^{\circ}_{\text{B}})^{(1)}_1 \quad \frac{\text{gmolMEA}}{\text{cm}^3 \text{Sol}}$$

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

$$C^{\circ}_{\text{B.fondo}} := (C^{\circ}_{\text{B}})^{(1)}_6 \quad \frac{\text{gmolMEA}}{\text{cm}^3 \text{Sol}}$$

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

$$\underline{\underline{L}} := Lv$$

$$h = - \frac{L \varepsilon}{a} \int_{C^{\circ}_{\text{B}} \text{Domo}}^{C^{\circ}_{\text{B}} \text{Fondo}} \frac{dC^{\circ}_{\text{B}}}{R_A} \quad h = + \frac{L \varepsilon}{a} \int_{C^{\circ}_{\text{B}} \text{Fondo}}^{C^{\circ}_{\text{B}} \text{Domo}} \frac{dC^{\circ}_{\text{B}}}{R_A}$$

$$\frac{dC^{\circ}_{\text{B}}}{R_A} = \frac{\frac{\text{gmolMEA}}{\text{cm}^3 \text{Sol}}}{\frac{\text{gmol} \cdot \text{absorbido} \cdot \text{de} \cdot \text{CO}_2}{\text{cm}^2 \cdot \text{h}}} = \frac{(\text{gmolMEA}) \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{h})}{(\text{gmol} \cdot \text{absorbido} \cdot \text{de} \cdot \text{CO}_2) \cdot (\text{cm}^3 \text{Sol})}$$

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

$$h = - \frac{L \varepsilon}{a} \int_{C^{\circ}_{\text{B}} \text{Domo}}^{C^{\circ}_{\text{B}} \text{Fondo}} \frac{dC^{\circ}_{\text{B}}}{R_A} \quad \text{cm} = \frac{\frac{\text{L Sol}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2} \cdot \frac{1000 \cdot \text{cm}^3}{1 \cdot \text{L}}}{\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3}} \cdot \left( \frac{\text{h}}{\text{cm}} \right)$$

Para simplificar la programación seleccionar cualquier letra

$$D := \frac{1}{R_A} \quad \frac{(\text{cm}^2 \cdot \text{h})}{(\text{gmol} \cdot \text{absorbido} \cdot \text{de} \cdot \text{CO}_2)}$$

$$D = \begin{pmatrix} 412.261 \\ 409.757 \\ 407.397 \\ 405.165 \\ 402.953 \\ 400.841 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \xleftarrow{\text{fondo}} \\ \\ \\ \\ \xleftarrow{\text{domo}} \end{array}$$

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

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

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

$$\Delta C^{\circ}_B := \begin{bmatrix} (C^{\circ}B^{(1)})_1 - (C^{\circ}B^{(1)})_2 \\ (C^{\circ}B^{(1)})_2 - (C^{\circ}B^{(1)})_3 \\ (C^{\circ}B^{(1)})_3 - (C^{\circ}B^{(1)})_4 \\ (C^{\circ}B^{(1)})_4 - (C^{\circ}B^{(1)})_5 \\ (C^{\circ}B^{(1)})_5 - |(C^{\circ}B^{(1)})_6| \end{bmatrix}$$

$$C^{\circ}B = \begin{pmatrix} 1.375 \\ 1.556 \\ 1.733 \\ 1.906 \\ 2.079 \\ 2.25 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \xleftarrow{\text{fondo}} \\ \\ \\ \\ \text{domo} \\ \xleftarrow{\quad} \end{array}$$

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

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

$$\text{Integral} := \sum \left( \overrightarrow{D_{\text{Media}} \cdot \Delta C_B \cdot \frac{1}{1000}} \right)$$

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

$$\text{Integral} = -0.356 \quad \frac{h}{\text{cm}}$$

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

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

$$h_{\text{ww}} := - \left( \frac{\frac{\text{L} \cdot \frac{1000}{1} \cdot \varepsilon}{a_{\text{esp}}} \cdot \text{Integral} \right)$$

h del modelo

H es la altura del empaque

$$H = 110 \quad \text{cm}$$

## 4.6 Resultados de la evaluación del coeficiente

=====RESULTADOS=====

Altura del empaque

Altura del modelo

$$H = 110 \quad \text{cm}$$

$$h = 109.702 \quad \text{cm}$$

$$kL = 1.53 \quad \frac{\text{cm}}{h}$$

(al subir kL baja h)

$$a_{\text{esp}} = 0.8 \quad \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3}$$

(al bajar kL sube h)

$$kL \cdot a_{\text{esp}} = 1.224 \quad \frac{1}{h}$$

=====

## 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 16.053 min

2.- Calcular 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

$$E = \begin{pmatrix} 1.074 \\ 1.084 \\ 1.094 \\ 1.103 \\ 1.113 \\ 1.123 \end{pmatrix}$$

$$k_L = 1.53 \quad \frac{\text{cm}}{\text{h}}$$

$$a_{\text{esp}} = 0.8 \quad \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3}$$

Distintas alturas de la columna

Por lo tanto

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

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

$$k_L r_a = \begin{pmatrix} 1.315 \\ 1.327 \\ 1.339 \\ 1.351 \\ 1.362 \\ 1.374 \end{pmatrix}$$

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

$$Z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.22 \\ 0.44 \\ 0.66 \\ 0.88 \\ 1.1 \end{pmatrix}$$

$$\text{cm}$$

<----- fondo

<----- domo

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

No. de HATTA

$$\text{RaizM} = \begin{pmatrix} 375.433 \\ 399.459 \\ 421.573 \\ 442.043 \\ 461.677 \\ 480.311 \end{pmatrix}$$

<----- fondo

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  $\sqrt{M} < 0.3$

<----- domo

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 9, 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 las Figuras 8 y 9.

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

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

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

CÁLCULOS PARA RESOVER EL BALANCE DE ENRGÍA

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

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

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

$$\Phi_H = R_A a (-\Delta H_r) \quad \text{se utiliza la correlación de Hanne M. Kvmsdal, página 15}$$

$$-\Delta H_r = \Delta H \text{ absorción} \quad \text{se utiliza la correlación de Hanne M. Kvmsdal, página 14}$$

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

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

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

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

$$R_A = \begin{pmatrix} 0.0024 \\ 0.0024 \\ 0.0025 \\ 0.0025 \\ 0.0025 \\ 0.0025 \end{pmatrix}$$

fondo  
-----<  
 $\frac{\text{gmol} \cdot \text{absorbido} \cdot \text{de} \cdot \text{CO}_2}{\text{cm}^2 \cdot \text{h}}$   
-----<  
domo

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

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

$$RA = \begin{pmatrix} 6.738 \times 10^{-7} \\ 6.779 \times 10^{-7} \\ 6.818 \times 10^{-7} \\ 6.856 \times 10^{-7} \\ 6.894 \times 10^{-7} \\ 6.93 \times 10^{-7} \end{pmatrix}$$

-----<  
fondo  
 $\frac{\text{gmolCO}_2}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$   
-----<  
domo

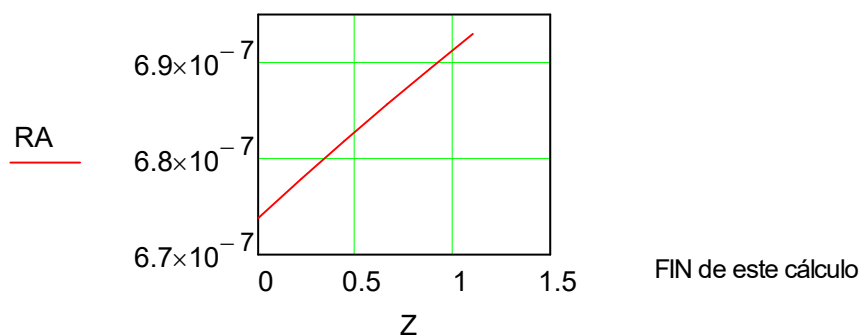
Cálculo del polinomio de tercer orden

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

$$\begin{aligned} M &:= \text{augment}(Z) \\ B &:= RA \\ n &:= 2 \\ \text{Resultado} &:= \text{regress}(M, B, n) \end{aligned}$$

$$\text{Resultado} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 2 \\ 6.738 \times 10^{-7} \\ 1.866 \times 10^{-8} \\ -1.135 \times 10^{-9} \end{pmatrix}$$

$$RA := -1.135 \times 10^{-13} \cdot Z_{\text{exp}}^2 + 1.866 \times 10^{-10} \cdot Z_{\text{exp}} + 6.738 \times 10^{-7}$$



**2.-** La velocidad superficial de la mezcla líquida  $v_z$

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

$$V_Z = 0.411 \quad \frac{\text{cm}}{\text{s}} \quad \text{FIN}$$

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

$$\%w\text{MEAE} = 14.64$$

$$w\text{MEAE} := \frac{\%w\text{MEAE}}{100}$$

$$x\text{MolarMEAE} := \frac{\frac{w\text{MEAE}}{\text{PMmea}}}{\frac{w\text{MEAE}}{\text{PMmea}} + \frac{(1 - w\text{MEAE})}{\text{PMagua}}}$$

$$\text{PM}_{\text{MEA.H}_2\text{O}} := \text{PMmea} \cdot x\text{MolarMEAE} + \text{PMagua} \cdot (1 - x\text{MolarMEAE})$$

$$\text{PM}_{\text{MEA.H}_2\text{O}} = 20.073 \quad \frac{\text{gmezcla}}{\text{gmol} \cdot \text{mezcla}} \quad \rho_L = 1.007 \quad \frac{\text{g} \cdot \text{mezcla}}{\text{cm}^3}$$

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

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

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

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

#### 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

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

$$TLe^{\circ}K := T^{\circ}C_{mea} + 273.15$$

$$C_{p_{H_2O}} := (92.053 - 3.9953 \cdot 10^{-2} \cdot TLe^{\circ}K - 2.1103 \cdot 10^{-4} \cdot TLe^{\circ}K^2 + 5.3469 \cdot 10^{-7} \cdot TLe^{\circ}K^3) \cdot 0.2369$$

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

$$C_{p_{H_2O}} := 17.934 \quad \frac{\text{cal}}{\text{gmol} \cdot ^{\circ}C}$$

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

$$C_{p_{MEA}} := 45.912 \quad \frac{\text{cal}}{\text{gmol} \cdot ^{\circ}C}$$

$$C_{p_{Mezcla}} := [C_{p_{MEA}} \cdot xMolarMEAE + C_{p_{H_2O}} \cdot (1 - xMolarMEAE)]$$

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

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

#### 5.- Flujo de calor volumétrico por las paredes de la columna

$Q_v$

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

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

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

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

### 5.1 Diámetro hidráulico de la torre

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

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

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

$$D_{hid} = 0.039$$

m

FIN

### 5.2 La densidad de la mezcla AIRE-CO2 dentro de la torre

$\rho_g$

$$T^{\circ}C_{aireE} = 18 \quad ^{\circ}C$$

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

$$\rho_{AIRE} := (-3.955 \cdot 10^{-3} \cdot T^{\circ}C_{aireE} + 1.287) \cdot \left(\frac{1000}{1}\right) \cdot \left(\frac{1}{100}\right)^3$$

$$\rho_{\text{CO}_2} := -5 \cdot 10^{-6} \cdot T^{\circ}\text{CO}_2\text{E} + 0.002 \quad \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\rho_{\text{AIRE}} = 1.216 \times 10^{-3} \quad \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

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

En el programa anterior se calculó la fracción molar del CO<sub>2</sub> en el fondo de la columna

$$y_{\text{fCO}_2} = 0.101 \quad \frac{\text{gmol} \cdot \text{CO}_2}{\text{gmol} \cdot \text{mezcla}}$$

$$y_{\text{MolarCO}_2\text{e}} := y_{\text{fCO}_2}$$

Densidad de la mezcla aire más CO<sub>2</sub>

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

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

$$\rho_g = 1.285 \times 10^{-3} \quad \frac{\text{g} \cdot \text{mezcla}}{\text{cm}^3 \text{mezcla}} \quad \text{FIN}$$

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

$$G = \begin{pmatrix} 6.0381 \\ 6.0545 \\ 6.0647 \\ 6.0954 \\ 6.169 \\ 6.2161 \end{pmatrix} \quad \frac{\text{gmolAIRE}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2} \quad \text{Este valor se calculó en el programa anterior}$$

$$G_s := G \cdot P_{\text{Maire}} \quad \frac{\text{gAir}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2} = \frac{\text{gmol} \cdot \text{AIRE}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2} \cdot \frac{\text{g} \cdot \text{Air}}{\text{gmol} \cdot \text{Air}}$$

$$G_{\text{CO2}} := (Y_{\text{dCO2}}) \cdot G \cdot P_{\text{MCO2}}$$

$$\frac{\text{g} \cdot \text{CO2}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2} = \frac{\text{gmol} \cdot \text{CO2}}{\text{gmolAIRE}} \cdot \frac{\text{gmolAIRE}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2} \cdot \frac{\text{gCO2}}{\text{gmolCO2}}$$

$$G_{\text{mv}} = \begin{pmatrix} 220.9 \\ 221.499 \\ 221.873 \\ 222.995 \\ 225.689 \\ 227.41 \end{pmatrix} \quad \frac{\text{g} \cdot \text{mezcla} \cdot \text{gaseosa}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2}$$

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

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

$$V_g = \begin{pmatrix} 0.4776 \\ 0.4789 \\ 0.4797 \\ 0.4821 \\ 0.4879 \\ 0.4916 \end{pmatrix} \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

FIN

5.4 Capacidad calorífica a presión constante del gas de entrada a la torre (aire + CO2)

$C_{p_g}$

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

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

$$T^{\circ}\text{K} := T^{\circ}\text{CO2E} + 273.15$$

$$A := 27.437$$

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

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

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

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

$$Cp_{\text{CO2}} := (A + B \cdot T^{\circ}\text{K} + C \cdot T^{\circ}\text{K}^2 + D \cdot T^{\circ}\text{K}^3 + E \cdot T^{\circ}\text{K}^4) \quad \frac{\text{joule}}{\text{gmol} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

$$Cp_{\text{CO2}} = 38.26$$

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

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

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

$$bb := -0.0051$$

$$cc := 29.77$$

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

$$CP_{\text{AIRE}} = 29.133$$

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

El peso molecular de la mezcla AIRE-CO2

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

$$PM_{\text{Aire.CO2}} = 30.514$$

$$\frac{\text{gmezcla}}{\text{gmolmezcla}}$$



$$Cp_g := [Cp_{CO2} \cdot yMolarCO2e + Cp_{AIRE} \cdot (1 - yMolarCO2e)]$$



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

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

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

$$Cp_g := 1276.28$$

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

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

## 5.5 El coeficiente de película en las paredes de la columna

$h_{paredes}$

$$\rho_g = 1.285 \times 10^{-3} \frac{\text{g} \cdot \text{mezcla}}{\text{cm}^3 \text{mezcla}}$$

$$\rho_g := (\rho_g) \cdot \frac{1}{1000} \cdot \left( \frac{100}{1} \right)^3$$

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

$$\rho_g = 1.285 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$Vg = \begin{pmatrix} 0.4776 \\ 0.4789 \\ 0.4797 \\ 0.4821 \\ 0.4879 \\ 0.4916 \end{pmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Cp_g = 1276.28$$

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

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

$$h_{\text{paredes}} := \left[ 1000 \cdot 4.05 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{\rho \cdot g \cdot Vg}{D_{hid}} \right)^{0.5} \cdot (Cp \cdot g)^{0.33} \cdot 0.27 \right]$$

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

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

$$h_{\text{paredes}} := \begin{pmatrix} 0.0011 \\ 0.0011 \\ 0.0011 \\ 0.0011 \\ 0.0011 \\ 0.0011 \end{pmatrix}$$

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

## 6.- Resumen para programar en MATHEMATICA

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

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

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

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

$$RA := -1.135 \times 10^{-13} \cdot Z_{\text{exp}}^2 + 1.866 \times 10^{-10} \cdot Z_{\text{exp}} + 6.738 \times 10^{-7}$$

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

$$h_{\text{paredes}} = \begin{pmatrix} 0.0011 \\ 0.0011 \\ 0.0011 \\ 0.0011 \\ 0.0011 \\ 0.0011 \end{pmatrix}$$

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

$$a_{\text{esp}} := 0.85$$

$$\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3}$$

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

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

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

$$Q_v := -h_{\text{paredes}} \cdot a_{\text{esp}} \cdot (T - T_{\text{inicial}}) \quad T \text{ es la variable de la ecuación diferencial}$$

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

$$V_Z = 0.411 \quad \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$\rho_L = 1.007 \quad \frac{\text{gmol} \cdot \text{mezcla}}{\text{cm}^3}$$

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

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

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


---

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

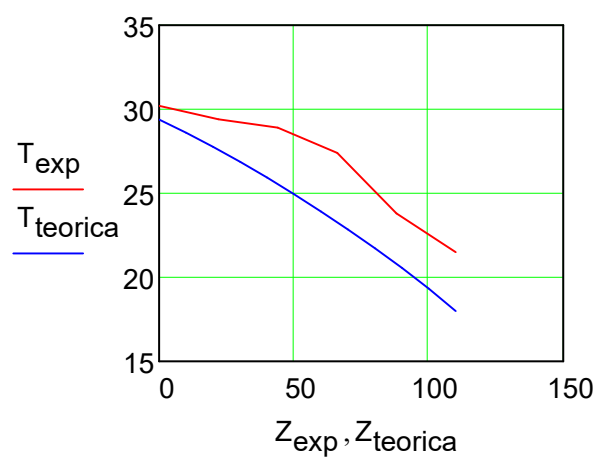
## SOLUCIÓN AL CUESTIONARIO

1.- Reportar en la Gráfica (1) los perfiles teóricos y experimentales de las temperaturas Vs, las posiciones z de la columna, presentar el análisis de estos perfiles

Respuesta de la ecuación diferencial por MATHEMATICA

$$Z_{\text{teorica}} := \begin{pmatrix} 110 \\ 100 \\ 90 \\ 80 \\ 70 \\ 60 \\ 50 \\ 40 \\ 30 \\ 20 \\ 10 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{domo} \\ \\ \\ \\ \\ \text{cm} \\ \\ \\ \\ \text{fondo} \end{matrix} \quad T_{\text{teorica}} := \begin{pmatrix} 18.0 \\ 19.3202 \\ 20.5582 \\ 21.7295 \\ 22.8458 \\ 23.915 \\ 24.9414 \\ 25.9263 \\ 26.8678 \\ 27.7614 \\ 28.5999 \\ 29.3739 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{domo} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \text{fondo} \end{matrix}$$

$$Z_{\text{exp}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 22 \\ 44 \\ 66 \\ 88 \\ 110 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{fondo} \\ \\ \text{cm} \\ \\ \text{domo} \end{matrix} \quad T_{\text{exp}} = \begin{pmatrix} 30.2 \\ 29.4 \\ 28.9 \\ 27.4 \\ 23.8 \\ 21.5 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{fondo} \\ \\ \text{°C} \\ \\ \text{domo} \end{matrix}$$



**FIN**















