



TECNOLOGIE SOSTENIBILI PER LE RISORSE ENERGETICHE

3. SEPARAZIONE PER ASSORBIMENTO CON COLONNE A PIATTI ESERCIZI

PROF. ERNESTO SALZANO
ernesto.salzano@unibo.it

Si vuole assorbire con acqua il 90% di acetone in un flusso di aria inquinate dall'1.0 %_v di acetone.

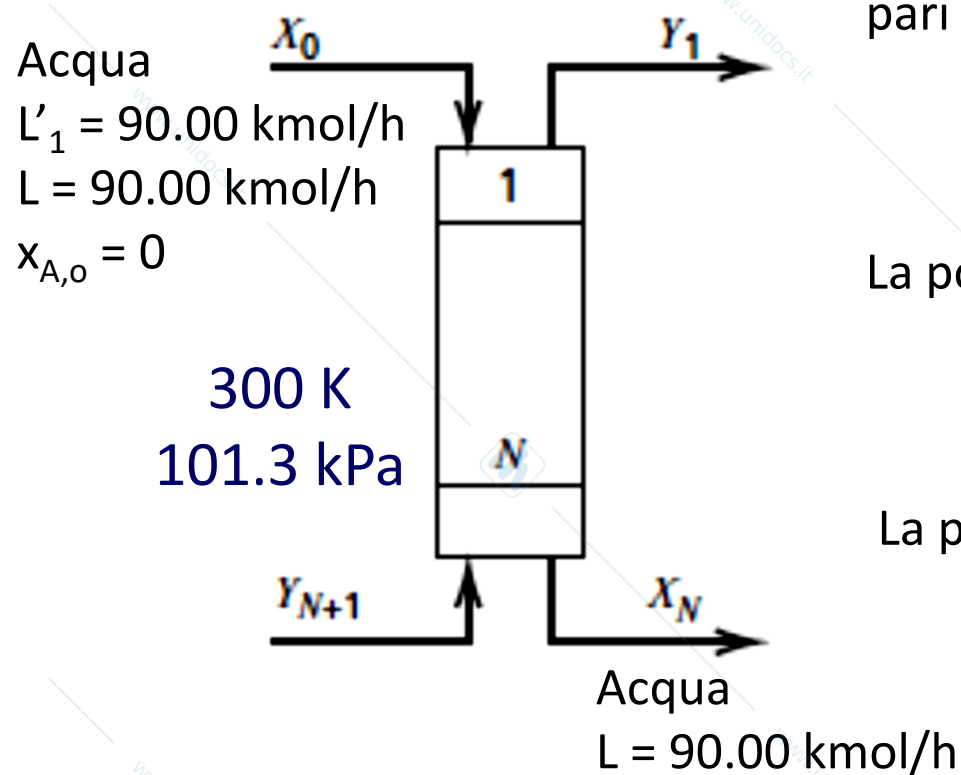
La portata di aria inquinata è pari a 30.00 kmol/h .

La portata di acqua pura in ingresso utilizzata è pari a a 90.00 kmol/h.

Il processo opera isotermicamente a 300 K e alla pressione di 101.3 kPa.

La relazione di equilibrio per l' acetone (A) è: $Y_A = 2.53 \cdot X_A$

Determinare il numero totale teorico di piatti per questa separazione mediante il metodo grafico e mediante il metodo di Kremser



La concentrazione di acetone nell'acqua in ingresso è pari a zero. Quindi:

$$x_{A,0} = x_0 = 0$$

La portata totale di liquido in ingresso è pari a:

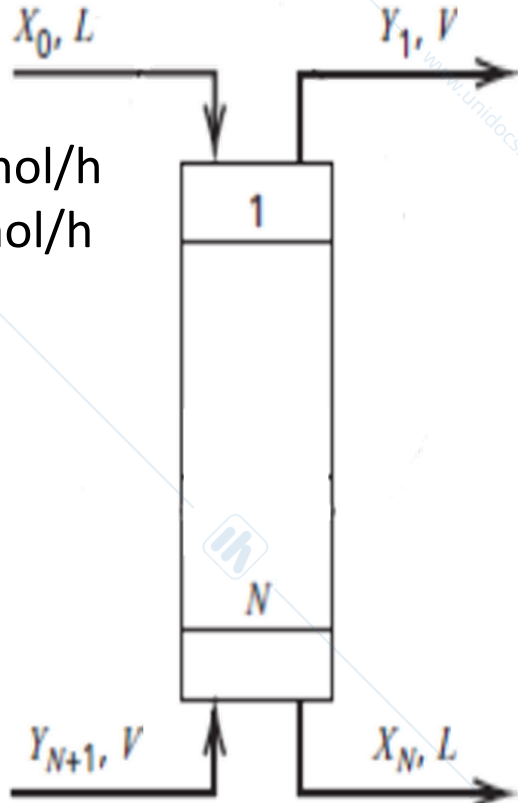
$$L'_1 = 90 \text{ kmol/h}$$

La portata di acqua **pura** in ingresso è quindi pari a:

$$L = L'_1 \cdot (1 - x_{A,0}) = L_N = 90 \text{ kmol/h}$$

In assenza di evaporazione, la portata L è costante lungo la colonna

$$V = 29.70 \text{ kmol/h}$$



Acqua

$$L' = 90.00 \text{ kmol/h}$$

$$L = 90.00 \text{ kmol/h}$$

$$x_{A,0} = 0$$

Aria

$$V'_{N+1} = 30.00 \text{ kmol/h}$$

$$V = 29.70 \text{ kmol/h}$$

$$y_{A,N+1} = 0.01$$

La portata di aria inquinata in ingresso è:

$$V'_{N+1} = 30 \text{ kmol/h}$$

La concentrazione di acetone nell'aria in ingresso è pari all'1% in moli:

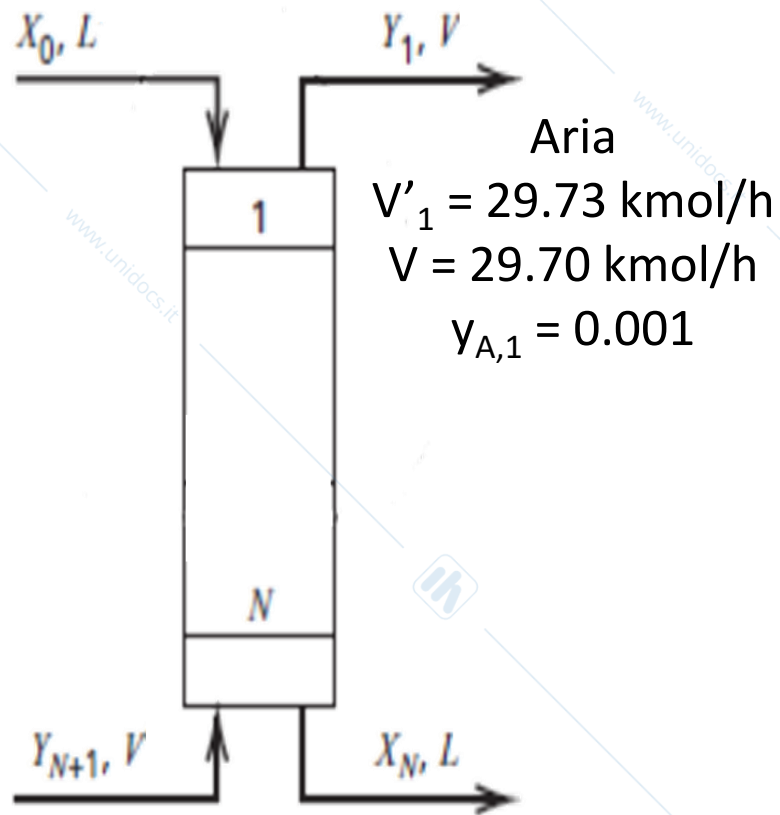
$$y_{A,N+1} = 0.01$$

La portata di aria pura in ingresso è quindi pari a:

$$V_{N+1} = V'_{N+1} \cdot (1 - y_{A,N+1})$$

In assenza di assorbimento di aria nel solvente, la portata V è costante lungo la colonna

$$V = V_{N+1} = V_1 = 30 \cdot (1 - 0.01) = 29.70 \text{ kmol/h}$$



La concentrazione di acetone in uscita è ridotta del 90%, quindi:

$$y_{A,1} = (1 - 0.90) \cdot 0.01 = 0.001$$

La portata totale di aria purificata in uscita può essere calcolata come:

$$V = V'_1 \cdot (1 - y_{A,1})$$

$$V'_1 = \frac{29.70}{1 - 0.001} = 29.73$$

La portata di acetone in ingresso e in uscita sarà infine:

$$V_{A,N+1} = 30.00 \cdot 0.01 = 0.300 \text{ kmol/h}$$

$$V_{A,1} = 29.73 \cdot 0.001 = 0.0297 = 0.03 \text{ kmol/h}$$

Aria

$$V'_{N+1} = 30.00 \text{ kmol/h}$$

$$V = 29.70 \text{ kmol/h}$$

$$y_{A,N+1} = 0.01$$

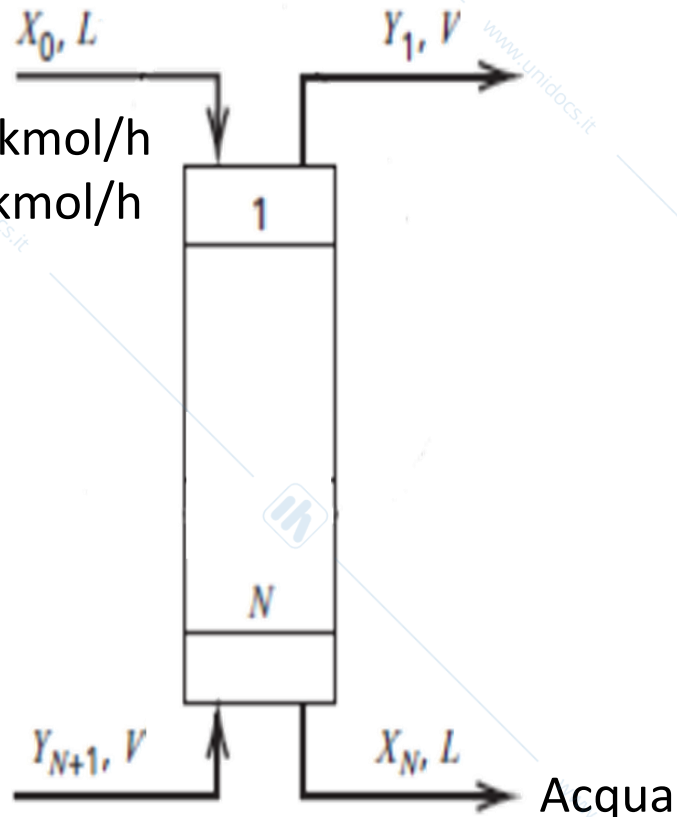
Esercizio 1

Acqua

$$L' = 90.00 \text{ kmol/h}$$

$$L = 90.00 \text{ kmol/h}$$

$$x_{A,0} = 0$$



Acqua

$$L = 90.00 \text{ kmol/h}$$

$$L_{A,N} = 0.27 \text{ kmol/h}$$

$$x_{A,N} = 0.003$$

La portata di acetone in uscita nell'acqua è pari alla differenza delle portate di acetone in fase gas (aria):

$$L_{A,N} = V_{A,N+1} - V_{A,1} = 0.3 - 0.03 = 0.27 \text{ kmol/h}$$

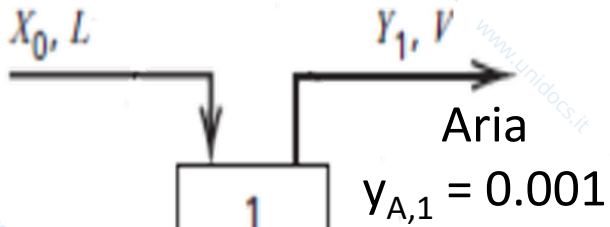
Quindi, la portata totale sarà:

$$L'_N = L + L_{A,N} = 90.00 + 0.27 = 90.27 \text{ kmol/h}$$

La concentrazione di acetone nell'acqua in uscita sarà quindi pari a:

$$x_{A,N} = \frac{L_{A,N}}{L'_N} = \frac{0.27}{90.72} = 0.00299 \approx 0.003$$

Acqua
 $x_{A,0} = 0$



Aria
 $y_{A,N+1} = 0.01$

Acqua
 $x_{A,N} = 0.003$

Per le soluzioni diluite, vale:

$$Y = \frac{y}{1 - y}$$

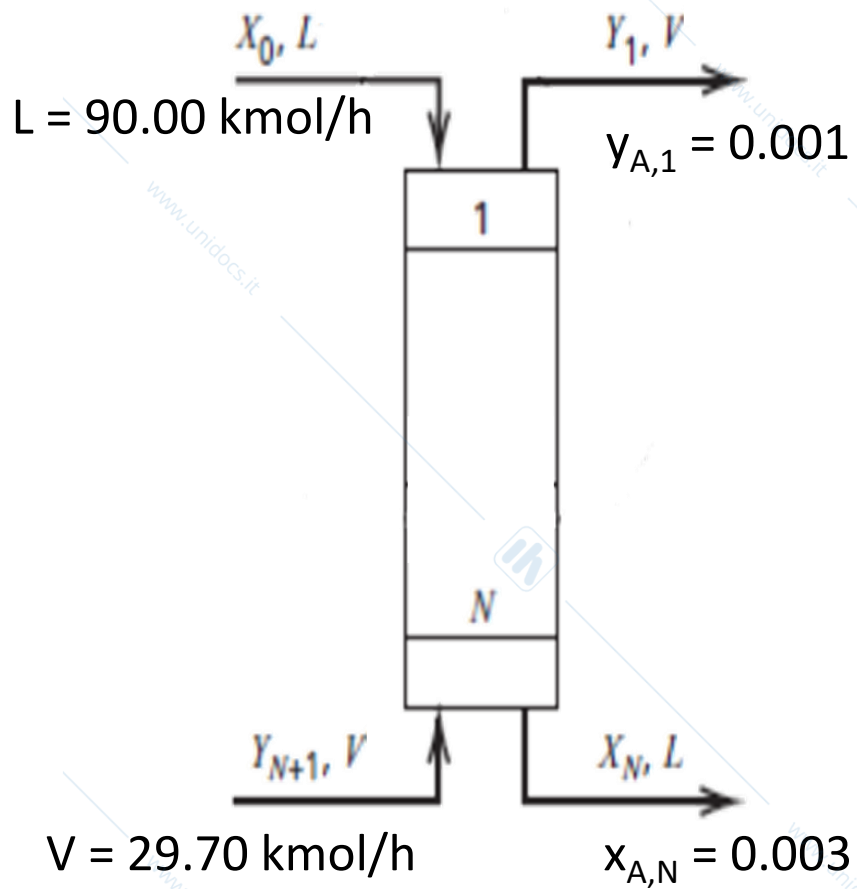
$$Y_{A,N+1} = \frac{0.01}{1 - 0.01} = 0.0101 \approx y_{A,N+1} = 0.01$$

$$X = \frac{x}{1 - x}$$

$$X_{A,N} = \frac{0.003}{1 - 0.003} = 0.003 \approx x_{A,N} = 0.003$$

D'altra parte, l'espressione data nella consegna presuppone soluzioni diluite:

$$Y = \frac{KX}{1 + X(1 - K)} \approx KX$$



La retta di lavoro ha una pendenza pari a:

$$\frac{L}{V} = \frac{90.00}{29.70} = 3.03$$

$$Y_{N+1} = \left(Y_1 - \frac{L}{V} \cdot X_0 \right) + \frac{L}{V} \cdot X_N$$

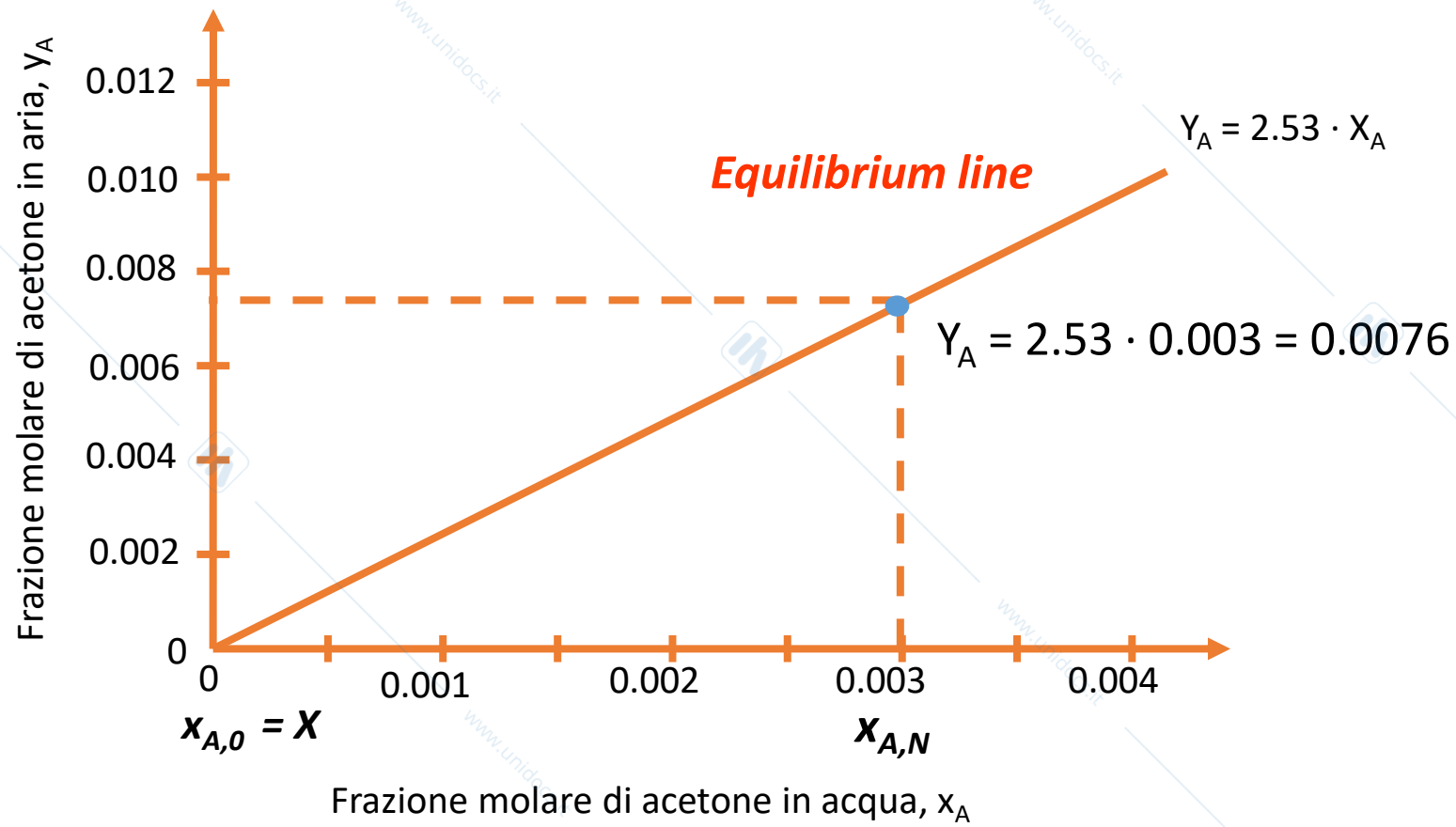
$$Y_{A,N+1} = (0.001 - 3.03 \cdot 0) + 3.03 \cdot X_{A,N}$$

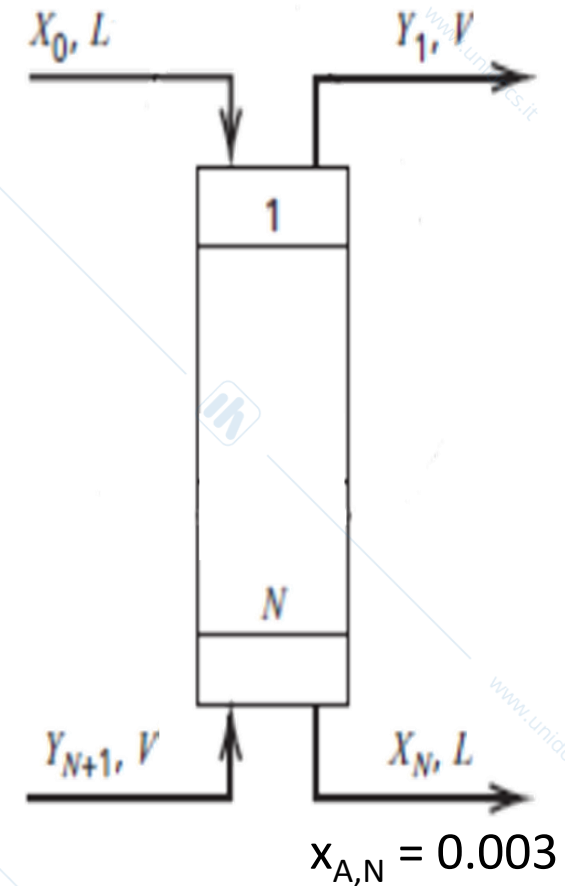
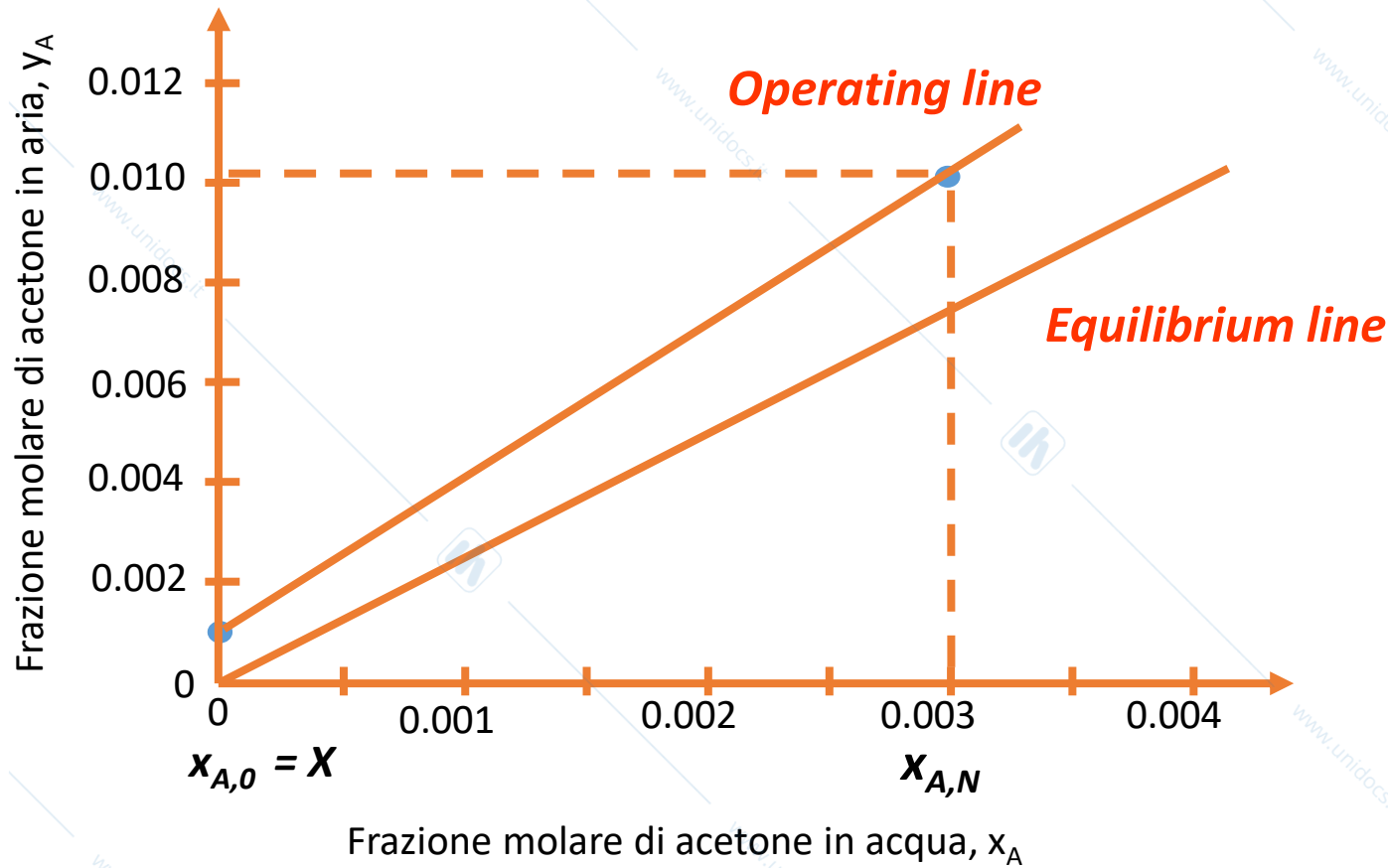
$$Y_{A,N+1} = 0.001 + 3.03 \cdot X_{A,N}$$

Per la retta di equilibrio vale invece:

$$Y_A = 2.53 \cdot X_A$$

$$Y_{A,N} = 2.53 \cdot X_{A,N} = 2.53 \cdot 0.003 = 0.0076$$



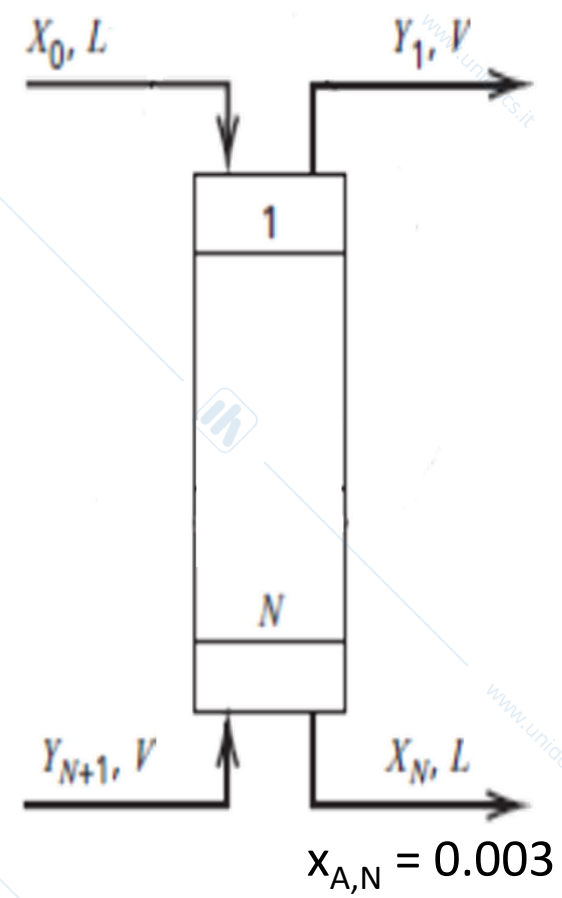
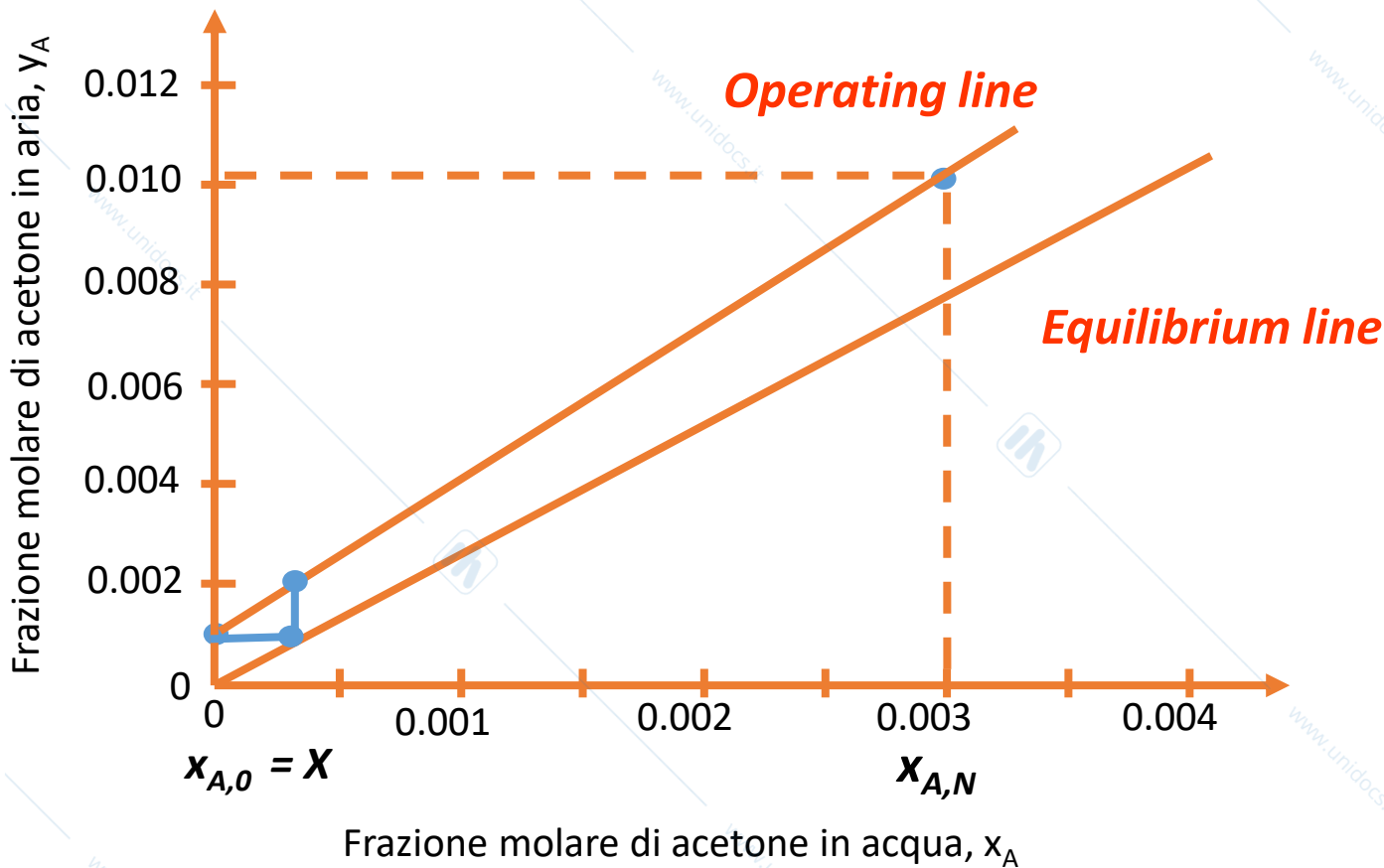


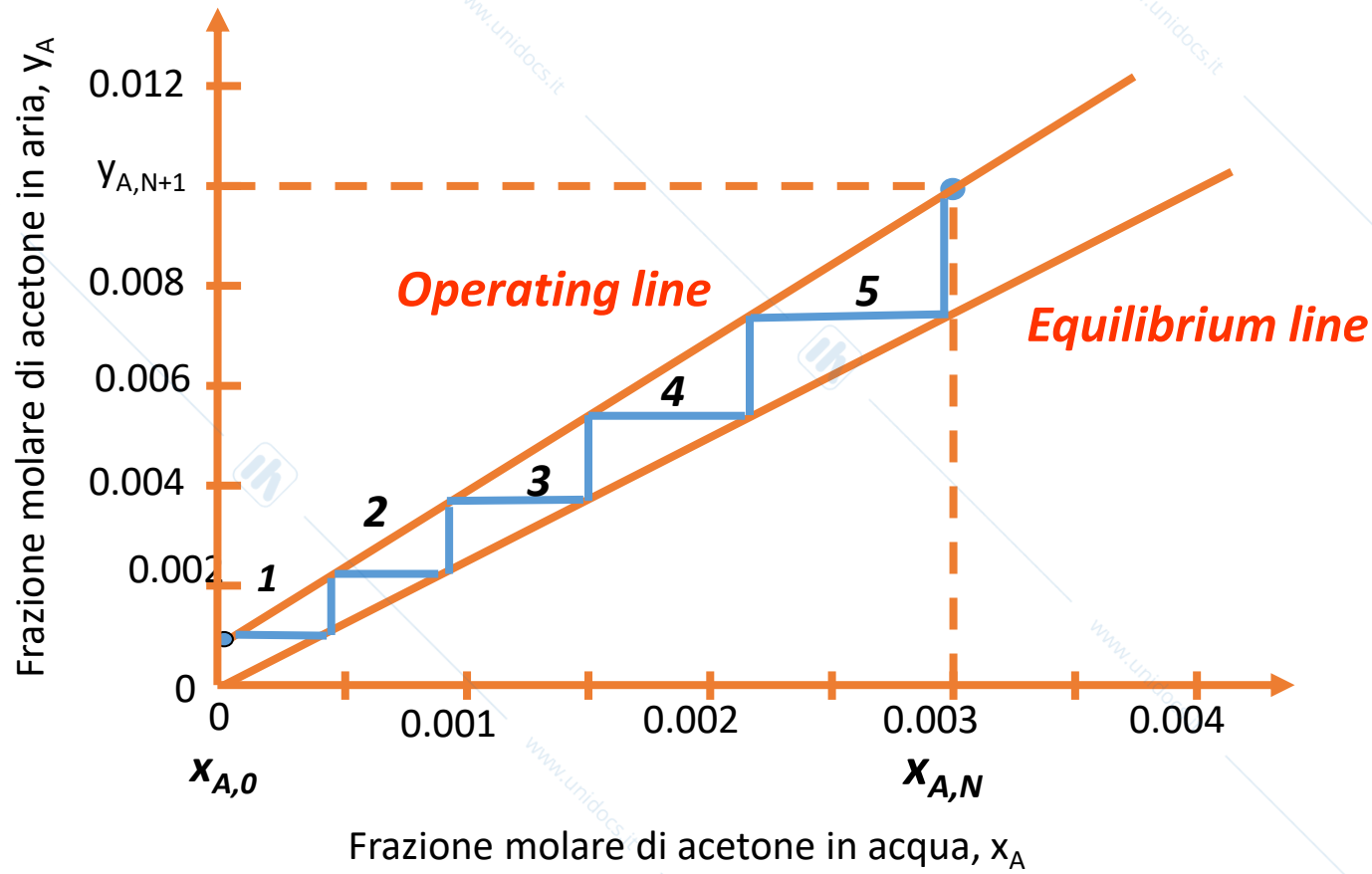
$$Y_{A,N+1} = 0.001 + 3.03 \cdot X_{A,N}$$

$$X_{A,0} = 0 \rightarrow Y_{A,1} = 0.001$$

$$X_{A,N} = 0.003 \rightarrow Y_{A,N+1} = 0.001 + 3.03 \cdot 0.003 = 0.0101$$

Esercizio 1





Il numero di piatti è di poco superiore a 5

$$A = \frac{L}{KV} = \frac{90.00}{2.53 \cdot 29.70} \approx 1.20$$

Equazione di Kremser

$$N = \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{1}{A}\right) \left(\frac{y_{A,N+1} - y_{A,1}^*}{y_{A,1} - y_{A,1}^*}\right) + \frac{1}{A} \right]}{\ln(A)}$$

$$x_{A,0} = 0.0 \rightarrow y_{A,1}^* = 0.0$$

$$N = \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{1}{1.20}\right) \left(\frac{0.01}{0.001}\right) + \frac{1}{1.20} \right]}{\ln(1.20)} = 5.02$$

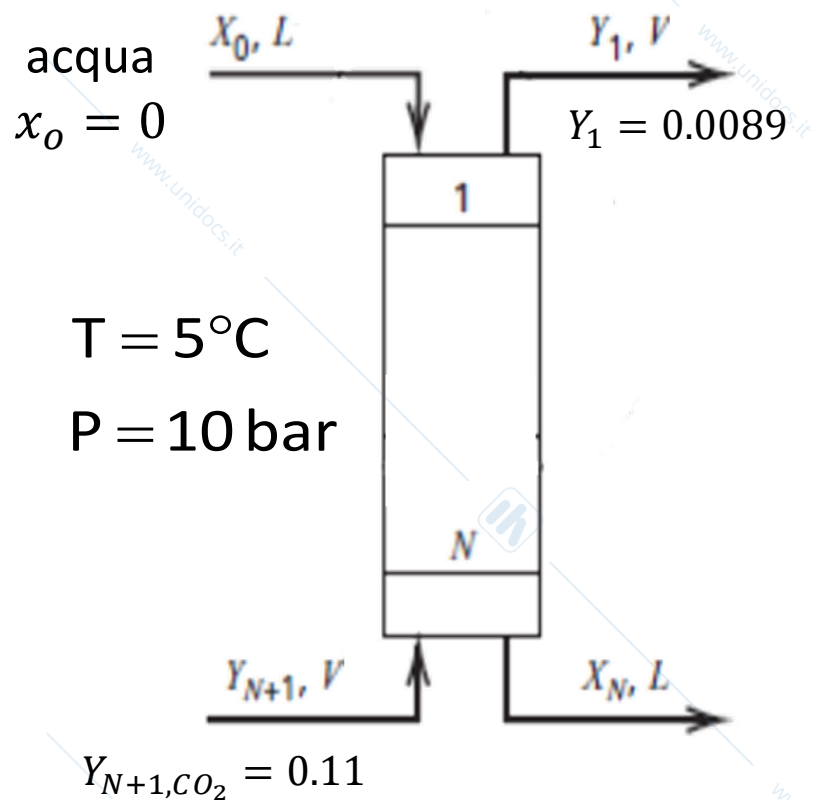
Una corrente gassosa contenente il 90 mol% di azoto (N_2) e il 10% di anidride carbonica (CO_2) è purificata attraverso un assorbitore in contro-corrente a piatti con acqua pura a $5^\circ C$ e a 10 bar.

L'operazione è considerata isoterma e isobara.

Il rapporto tra le portate liquido/gas puro (L/V) è pari a 1.5 volte il rapporto minimo teorico

Determinare il numero di stadi di equilibrio richiesti per assorbire il 92% di anidride carbonica

Dati: la costante di Henry in acqua a $5^\circ C$ è pari a 876 bar/mole fraction



$$V'_{N+1} = 1\text{ kmol/h}$$

$$V_{N+1, N_2} = 0.9 \cdot V'_{N+1} = 0.9\text{ kmol/h}$$

$$V_{N+1, CO_2} = 0.1 \cdot V'_{N+1} = 0.1\text{ kmol/h}$$

$$y_{N+1, CO_2} = \frac{V_{N+1, CO_2}}{V'_{N+1}} = \frac{0.1}{1} = 0.1$$

$$Y_{N+1, CO_2} = \frac{y}{1-y} = \frac{0.1}{1-0.1} = 0.11$$

Se il 92 % in moli dell'anidride carbonica è assorbita dal solvente allora l'8% rimane nella corrente gassosa

$$y_{1, CO_2} = V_{N+1, CO_2} \cdot 0.08 = 0.1 \cdot 0.08 = 0.008$$

$$Y_1 = \frac{y}{1-y} = \frac{0.008}{0.9} = 0.008$$

La costante di Henry in acqua a 5°C è pari a 876 bar/mole fraction. Si lavora a $P = 10$ bar. Vale quindi

$$K = \frac{H}{P} = \frac{y}{x}$$

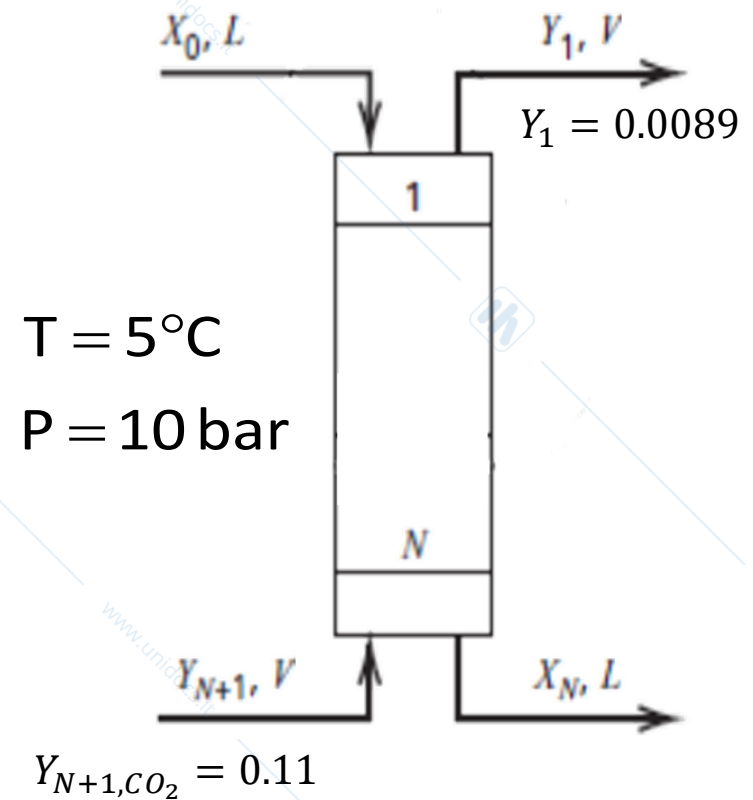
$$K = \frac{876}{10} = 87.6$$

Ipotesi di soluzione diluita:

$$K = \frac{H}{P} = \frac{y}{x} = \frac{Y}{X}$$

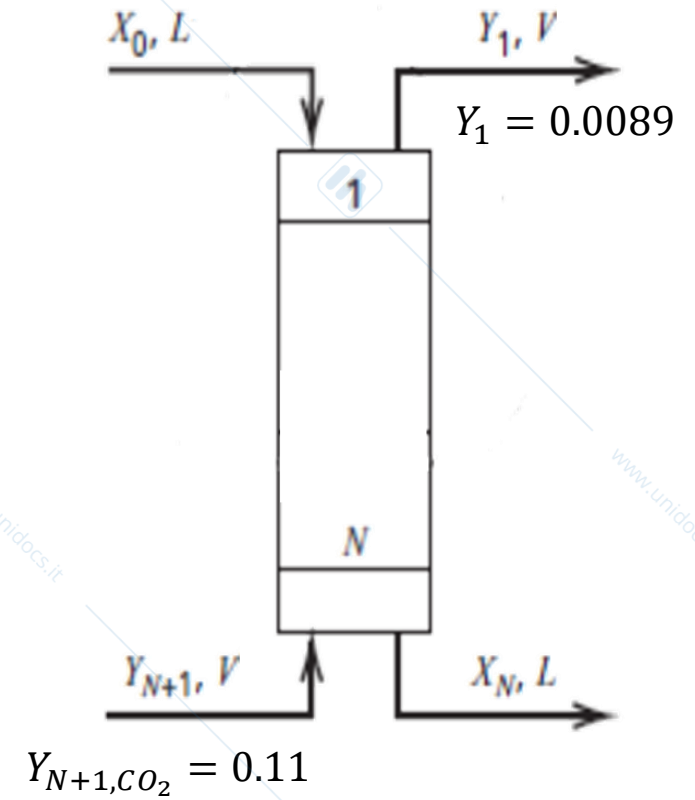
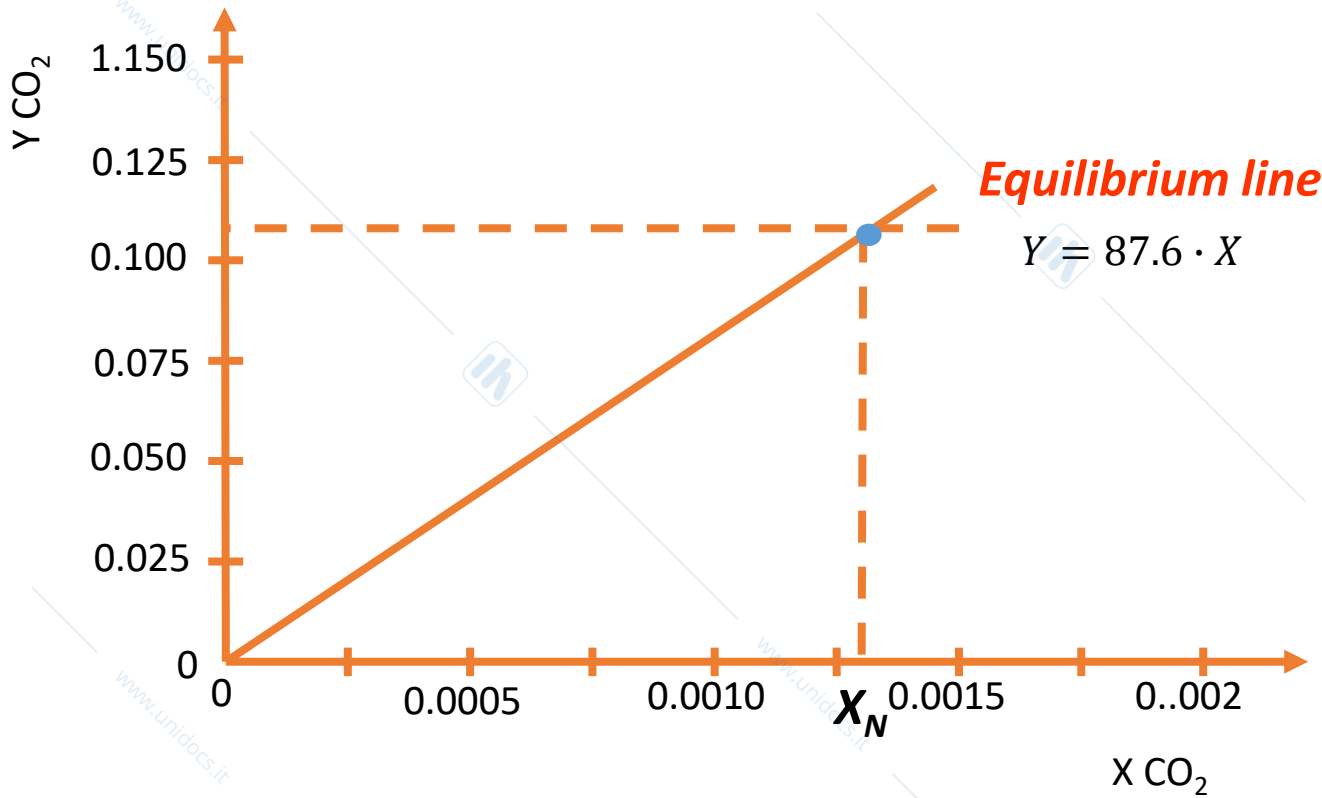
$$y_{N+1,CO_2} = K \cdot x_{N,CO_2} = 87.6 \cdot x_{N,CO_2}$$

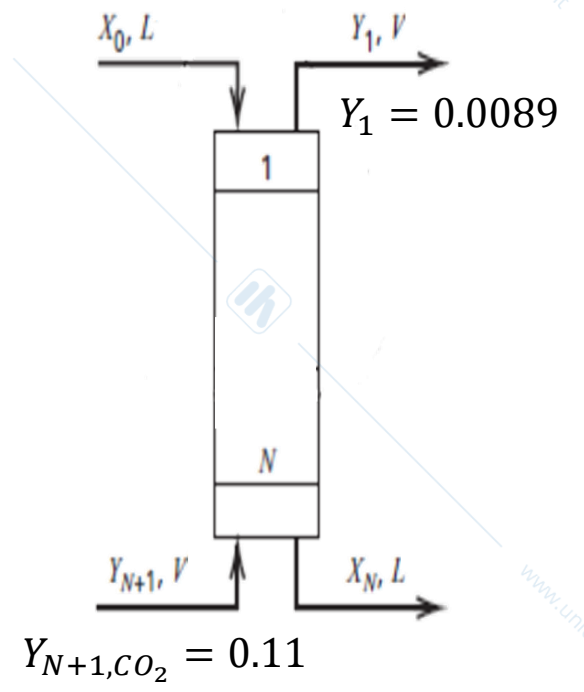
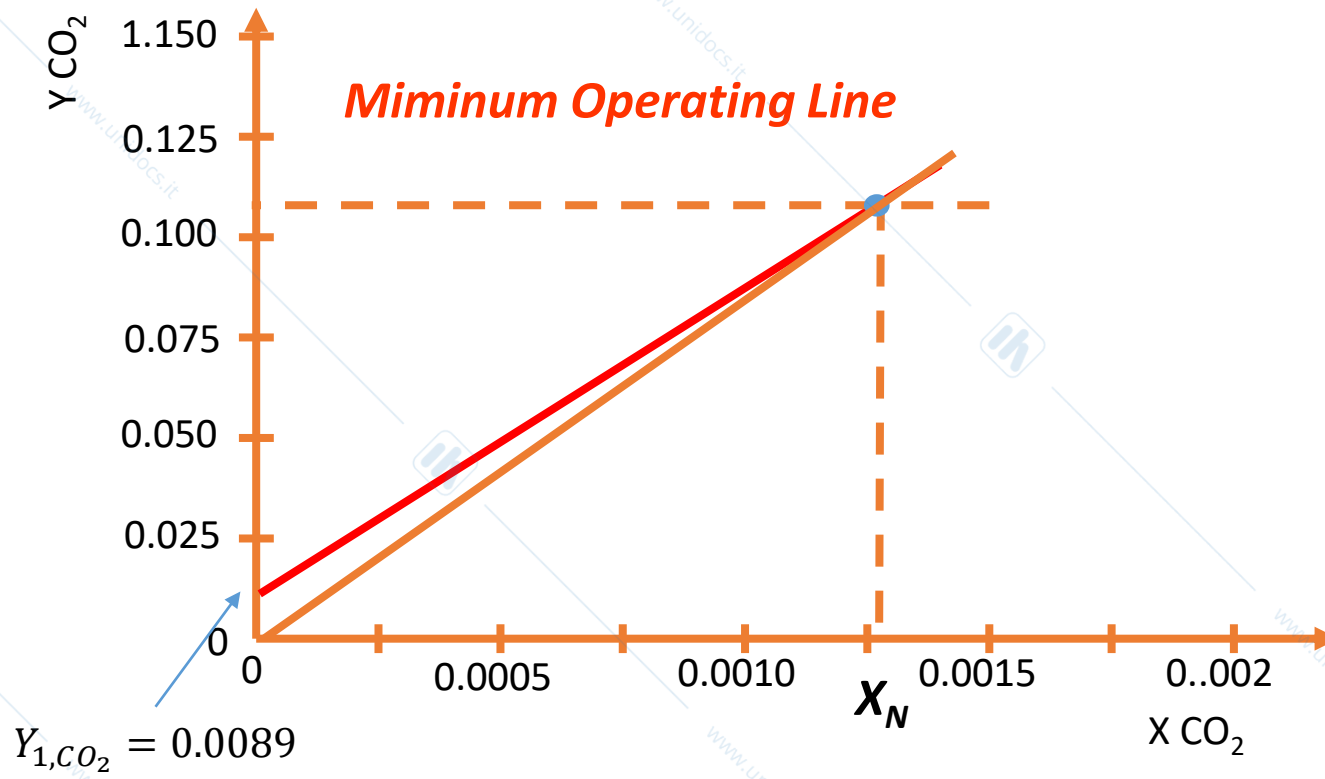
$$Y_{N+1,CO_2} = K \cdot X_{N,CO_2} = 87.6 \cdot X_{N,CO_2}$$



$$Y_{N+1,CO_2} = 0.11 = 87.6 \cdot X_{N,CO_2}$$

$$X_{N,CO_2} = 0.00126$$

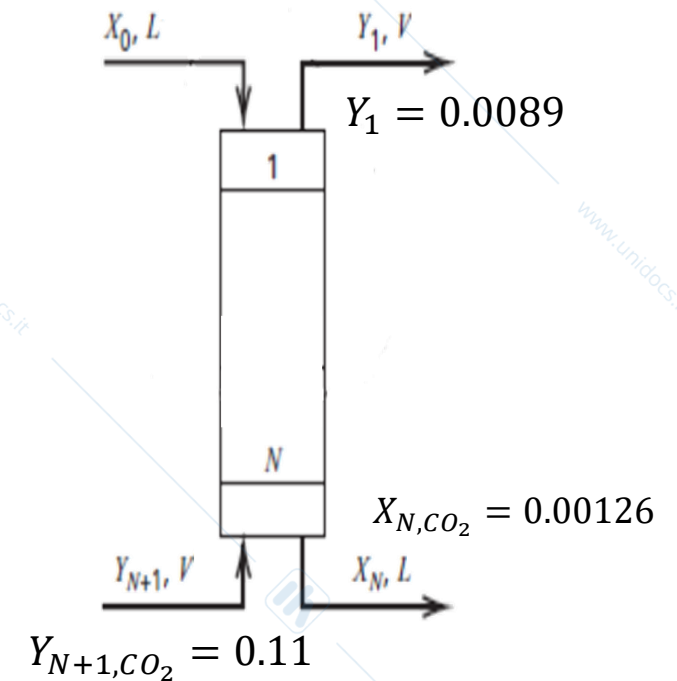
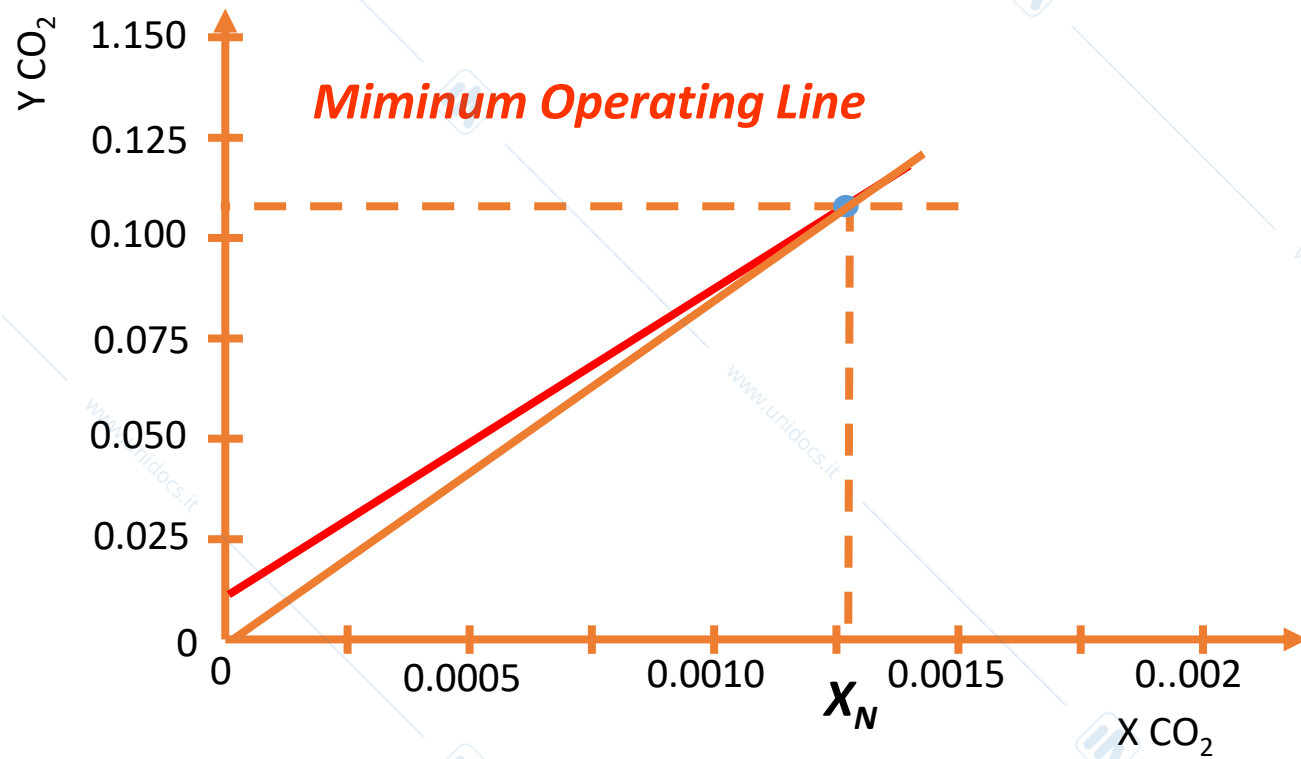




$$Y_{N+1} = \left(Y_1 - \frac{L}{V} \cdot X_o \right) + \frac{L}{V} \cdot X_N = Y_1 + \left(\frac{L}{V} \right)_{min} X_N = Y_1 + \left(\frac{L}{V} \right)_{min} X_{N,eq}$$

$$Y_{N+1} = 0.11 = 0.0089 + 0.00126 \left(\frac{L}{V} \right)_{min}$$

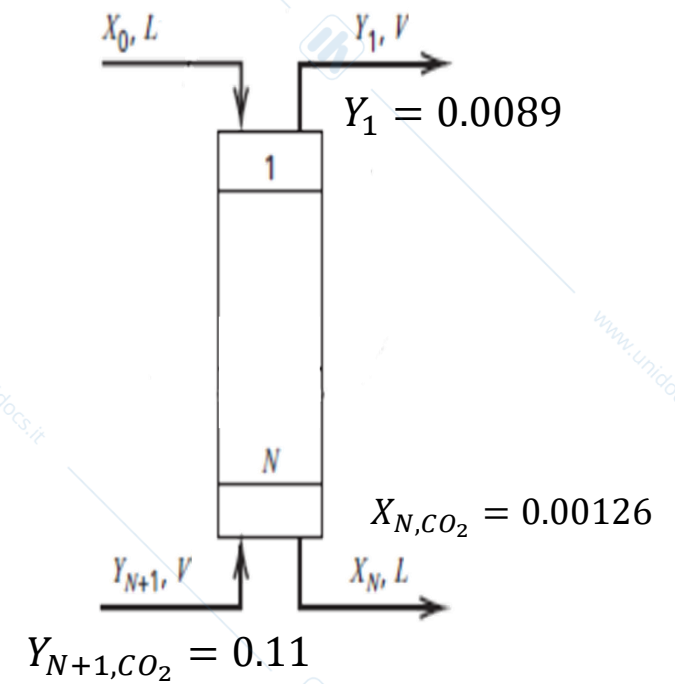
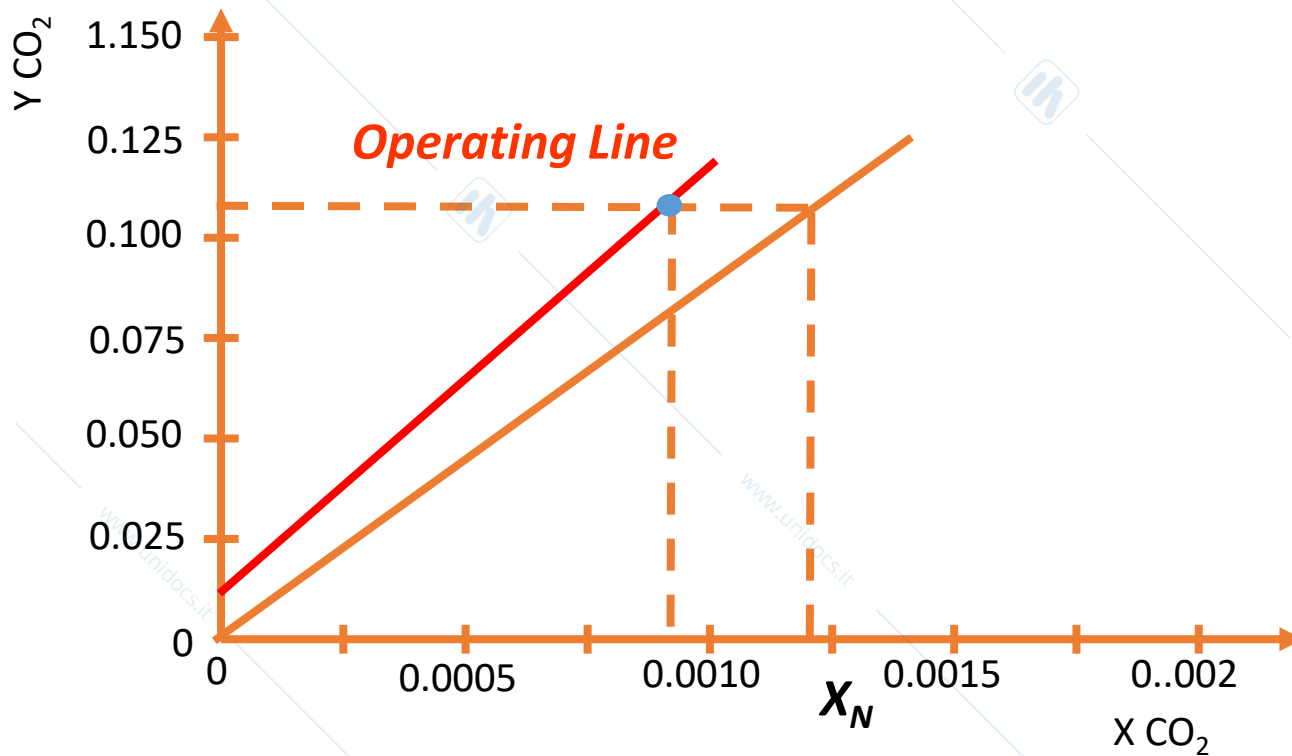
$$\left(\frac{L}{V} \right)_{min} = \frac{0.11 - 0.0089}{0.00126} = 80.51$$

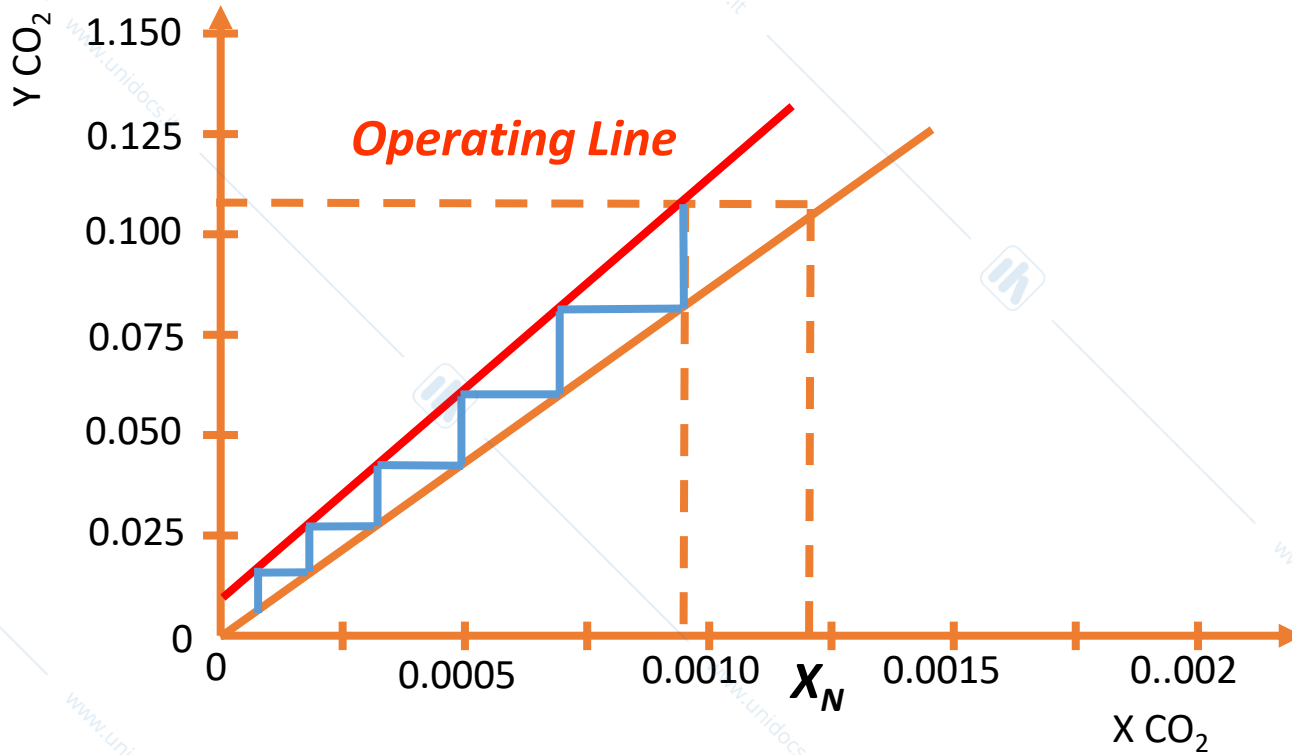


$$\left(\frac{L}{V}\right) = 1.5 \left(\frac{L}{V}\right)_{min} = 120.77$$

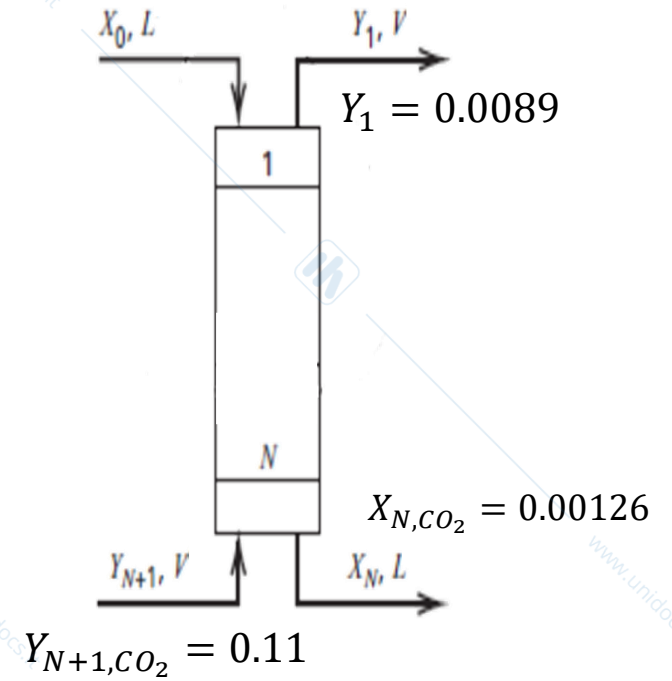
$$Y_{N+1} = \left(Y_1 - \frac{L}{V} \cdot X_o\right) + \frac{L}{V} \cdot X_N \rightarrow 0.11 = 0.0089 + 120.77 \cdot X_N$$

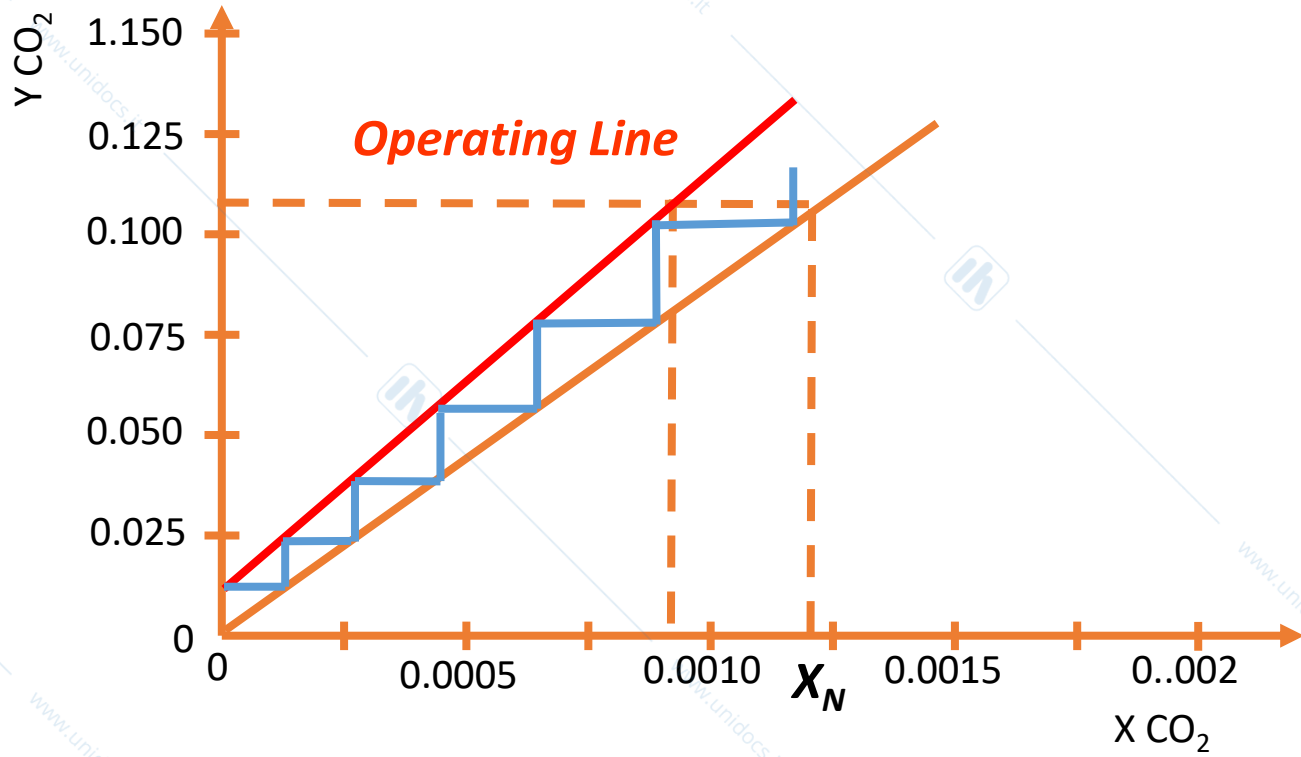
$$X_N = \frac{0.11 - 0.0089}{120.77} = 0.00084$$



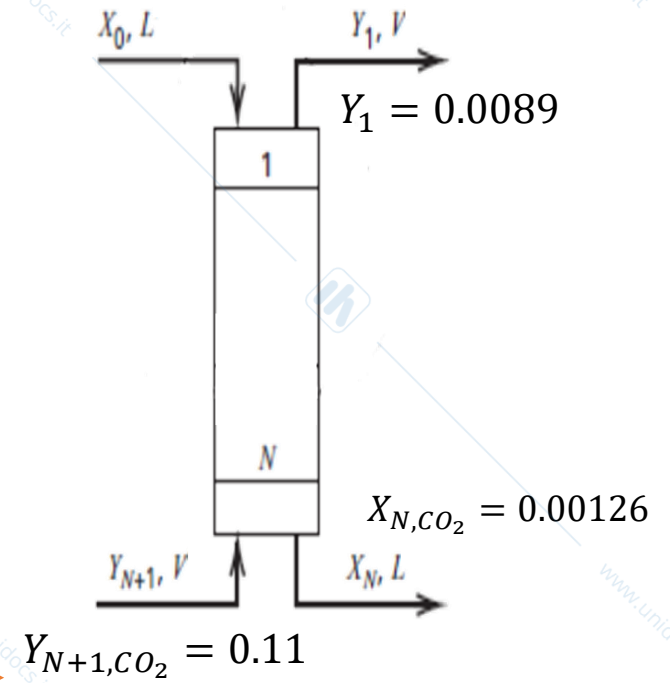


6 piatti





6 piatti



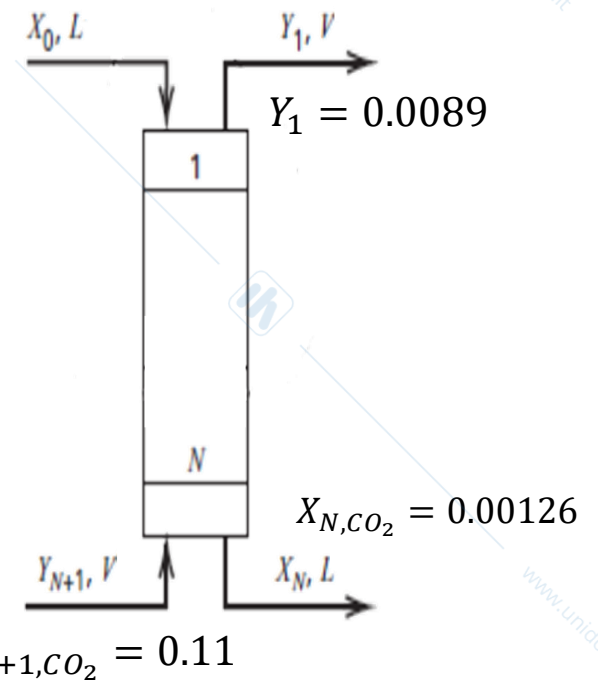
$$A = \frac{L}{KV} = \frac{120.77}{87.6} = 1.38$$

Equazione di Kremser

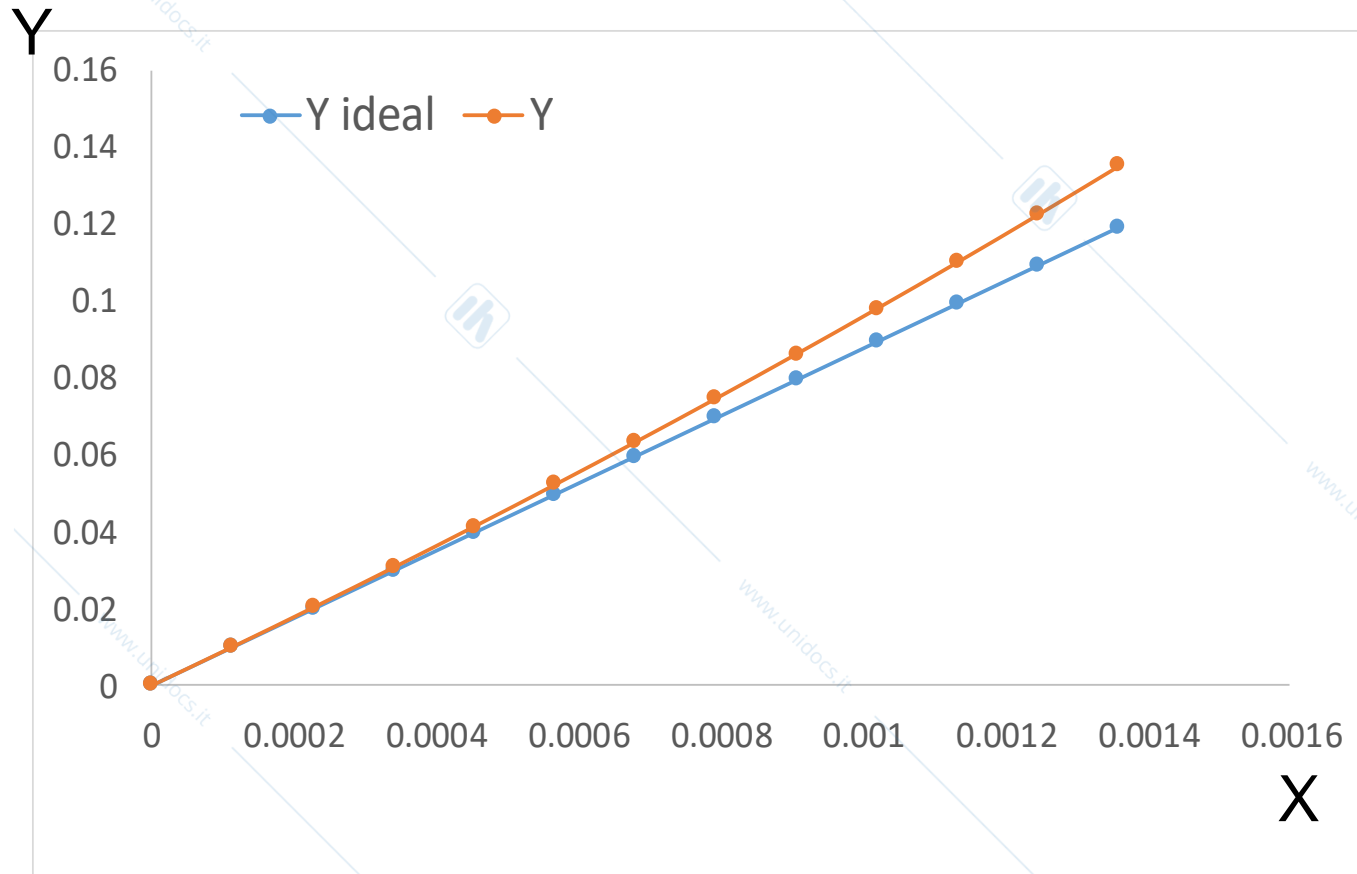
$$N = \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{1}{A}\right) \left(\frac{y_{N+1} - y_1^*}{y_1 - y_1^*}\right) + \frac{1}{A} \right]}{\ln(A)}$$

$$x_N = 0.0 \rightarrow y_1^* = 0.0$$

$$N = \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{1}{1.36}\right) \left(\frac{0.11}{0.0089}\right) + \frac{1}{1.38} \right]}{\ln(1.38)} = 4.7 \approx 5$$



$$Y = \frac{KX}{1 + X(1 - K)}$$



X	Y ideal	Y
0	0	0
0.000113	0.009921	0.010019
0.000227	0.019842	0.020239
0.00034	0.029763	0.030666
0.000453	0.039685	0.041305
0.000566	0.049606	0.052164
0.00068	0.059527	0.063249
0.000793	0.069448	0.074567
0.000906	0.079369	0.086127
0.001019	0.08929	0.097935
0.001133	0.099211	0.11
0.001246	0.109132	0.12233
0.001359	0.119054	0.134935

$$Y = \frac{KX}{1 + X(1 - K)}$$

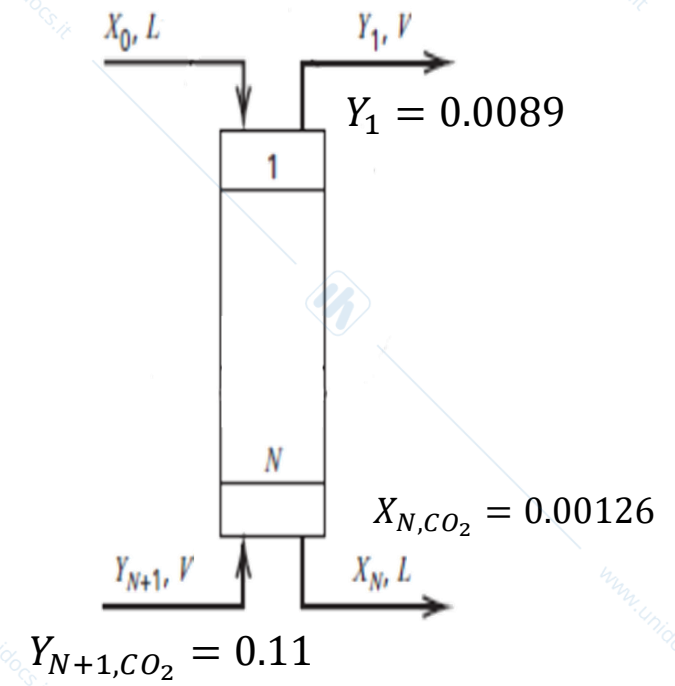
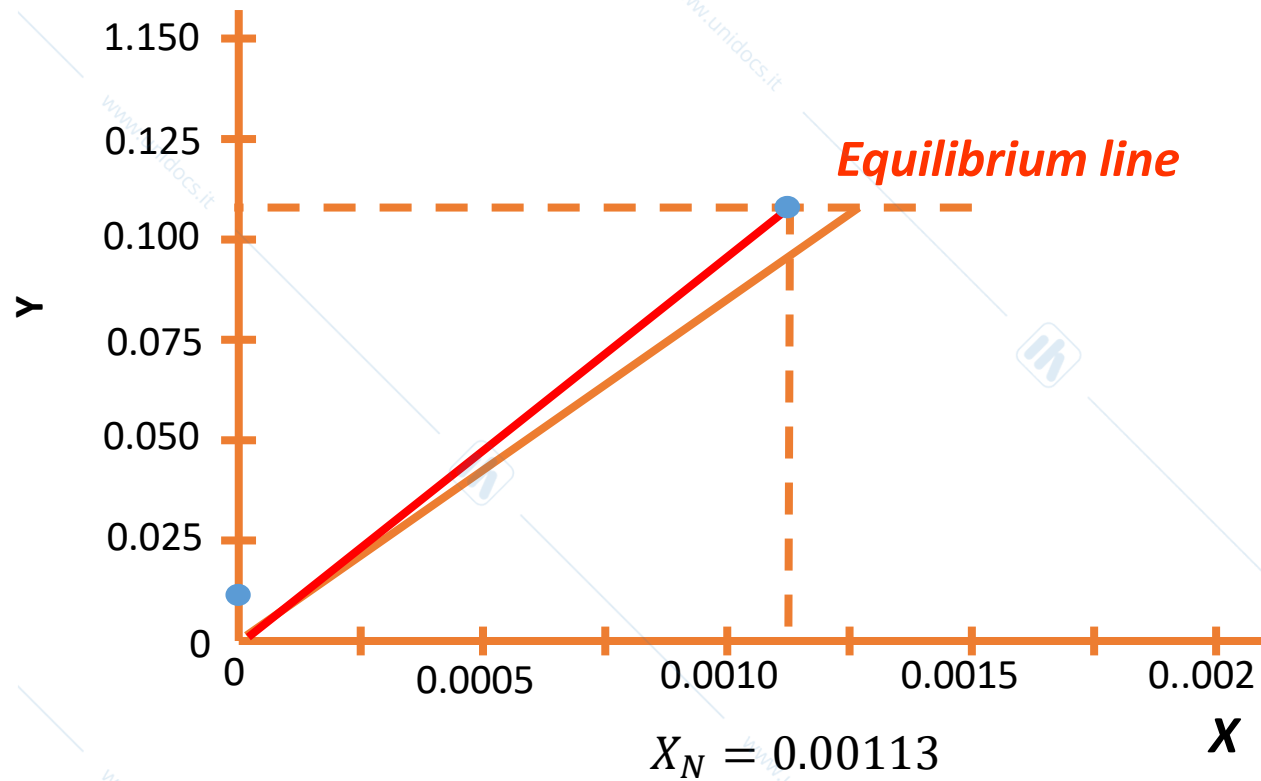
$$KX = Y + YX - YKX$$

$$X \cdot (K - Y + KY) = Y$$

$$X \cdot [K + Y(K + Y \cdot (K - 1))] = Y$$

$$X_{N,eq} = \frac{Y_{N+1}}{K + Y_{N+1} \cdot (K - 1)}$$

$$X_{N,eq} = \frac{0.11}{87.6 + Y_{N+1} \cdot (87.6 - 1)} = 0.00113 < 0.00126$$



$$Y_{N+1} = Y_1 + \left(\frac{L}{V}\right)_{min} \cdot X_{N,eq}$$

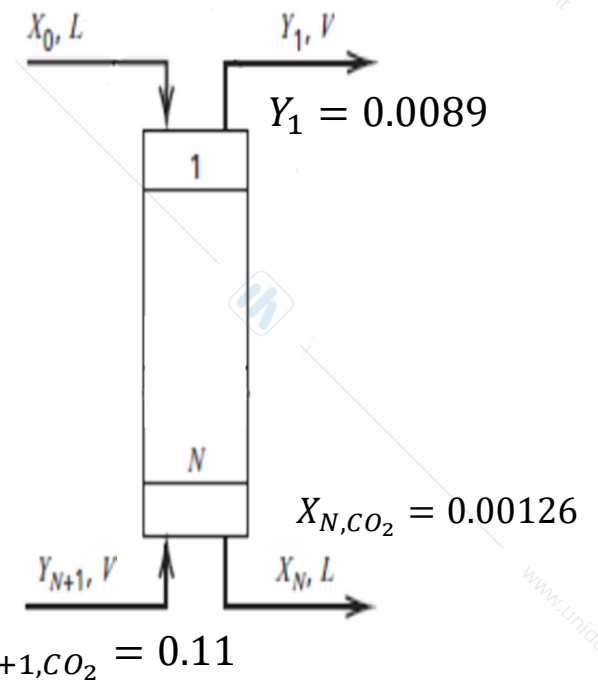
$$\left(\frac{L}{V}\right)_{min} = \frac{Y_{N+1} - Y_1}{X_{N,eq}} = 89.23$$

$$\frac{L}{V} = 1.5 \cdot \left(\frac{L}{V}\right)_{min} = 133.84$$

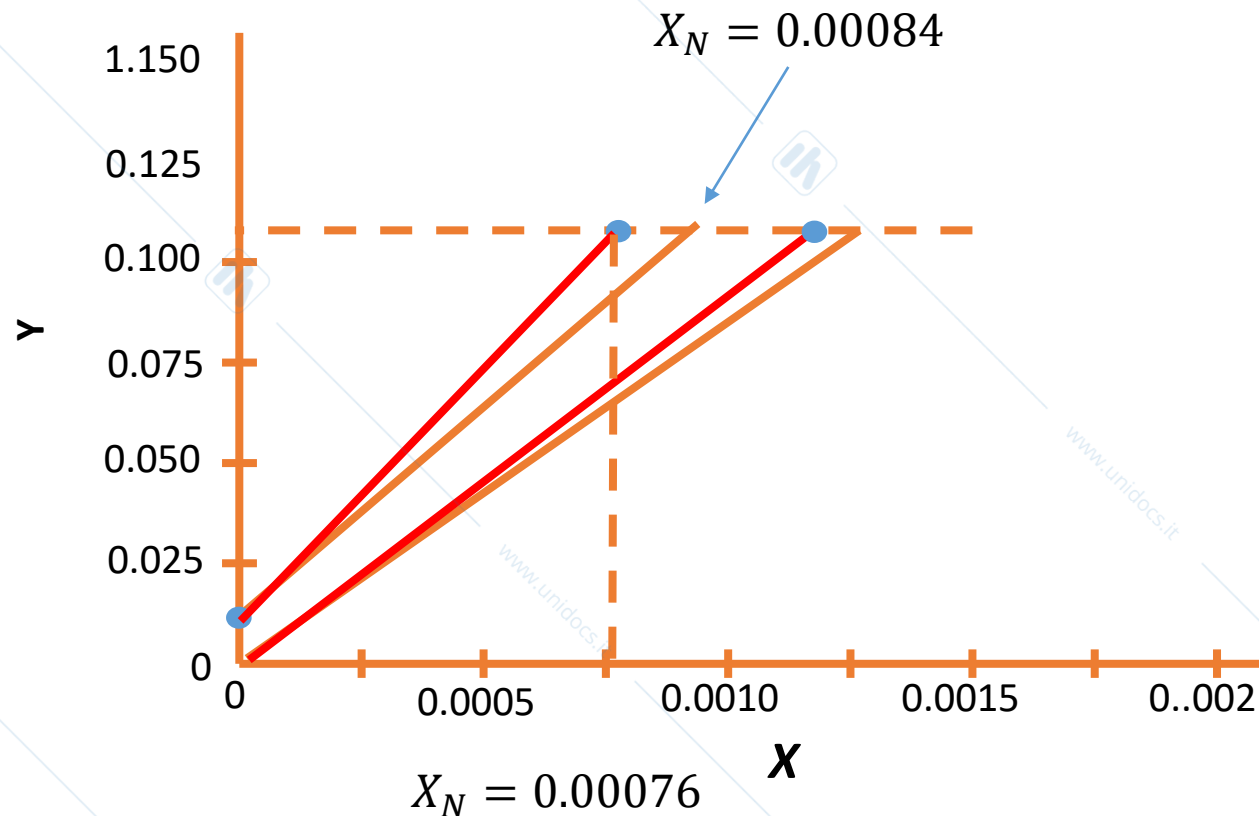
$$Y_{N+1} = Y_1 + \frac{L}{V} \cdot X_N = Y_1 + 133.84 \cdot X_N$$

Per $Y_{N+1} = 0.11$, si ha quindi:

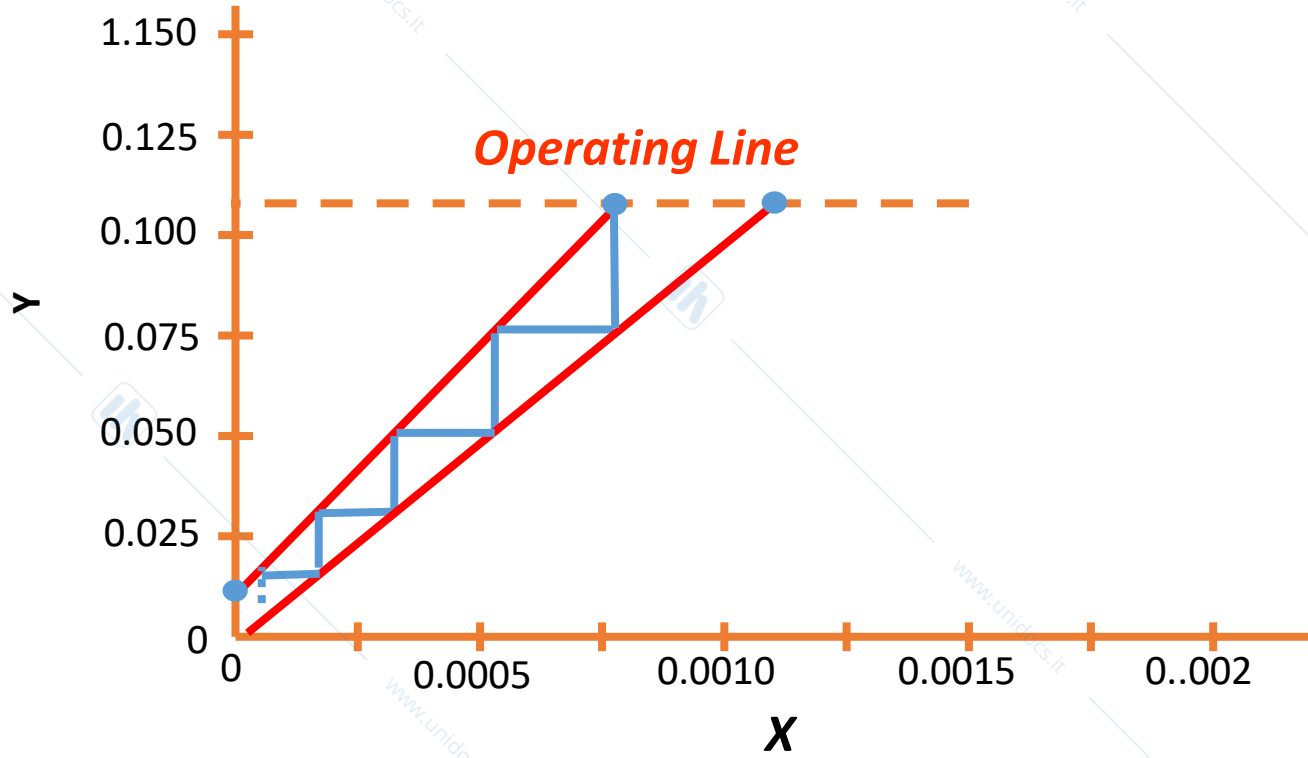
$$X_N = \frac{0.11 - 0.0089}{133.84} = 0.00076$$



In genere i coefficienti di assorbimento per L/V minimo includono gli effetti di non idealità. E' possibile quindi lavorare con le ipotesi di idealità per la retta operativa e per le curve di equilibrio



5 piatti



$$A = \frac{L}{KV} = \frac{133.76}{87.6} = 1.53$$

Equazione di Kremser

$$N = \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{1}{A}\right) \left(\frac{y_{N+1} - y_1^*}{y_1 - y_1^*}\right) + \frac{1}{A} \right]}{\ln(A)}$$

$$x_0 = 0.0 \rightarrow y_1^* = 0.0$$

$$N = \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{1}{1.52}\right) \left(\frac{0.11}{0.008}\right) + \frac{1}{1.53} \right]}{\ln(1.53)} = 3.98 \approx 4$$

L'alcol etilico (o etanolo C_2H_5OH , $M = 46 \text{ g/mol}$; $\rho_L = 890 \text{ kg/m}^3$) contenuto al 12.5% in moli in una corrente gassosa di anidride carbonica (CO_2 , $M = 44 \text{ g/mol}$) può essere recuperato tramite assorbimento con acqua pura in una colonna a piatti forati operante a pressione e temperatura ambiente ($P = 1 \text{ bar}$; $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$), spaziatura 24 inch.

Determinare il numero di stadi di equilibrio (piatti ideali) e dimensionare la colonna di assorbimento trascurando il trasporto da una fase all'altra di tutti i composti tranne l'etanolo.

Dati di progetto

- Portata di gas entrante: 100 kmol/h
- Portata in acqua pari a 4 volte la portata minima
- Rapporto di assorbimento RA: 96%
- Costante di assorbimento etanolo in acqua: $K = 0.5$
- $\sigma = 70 \text{ dyne/cm}$ (tensione superficiale dell'acqua)
- $F_{HA} = 1.0$; $F_H = 1.0$

$$y_{N+1,EtOH} = 0.125$$

$$Y_{N+1,EtOH} = \frac{y}{1-y} = 0.143$$

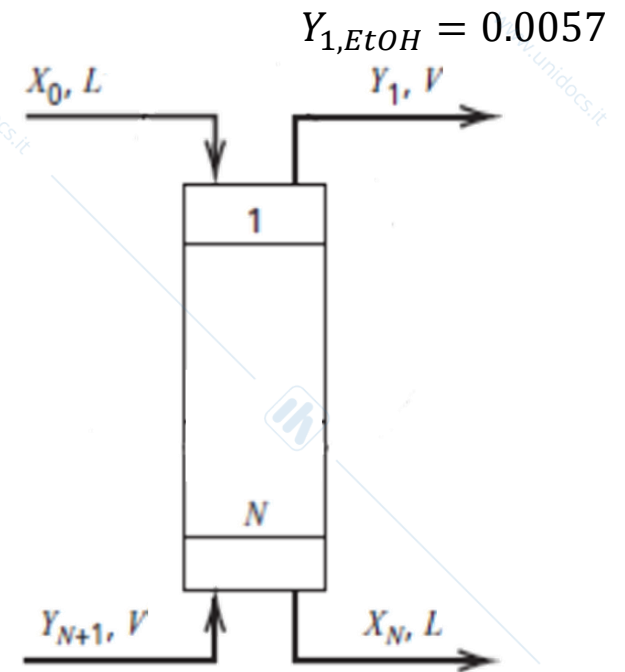
Rapporto di Assorbimento $RA = \frac{\text{moli sol assorbite}}{\text{moli sol entanti}}$

$$RA = \frac{n_{sol,in} - n_{sol,out}}{n_{sol,in}} = \frac{VY_{N+1} - VY_1}{VY_{N+1}} = \frac{Y_{N+1} - Y_1}{Y_{N+1}} = 0.96$$

$$Y_{1,EtOH} = 0.143 \cdot (1 - 0.96) = 0.0057$$

$$y = \frac{Y}{1+Y}$$

$$y_{1,EtOH} = \frac{Y_{1,EtOH}}{1+Y_{1,EtOH}} = 0.0057$$



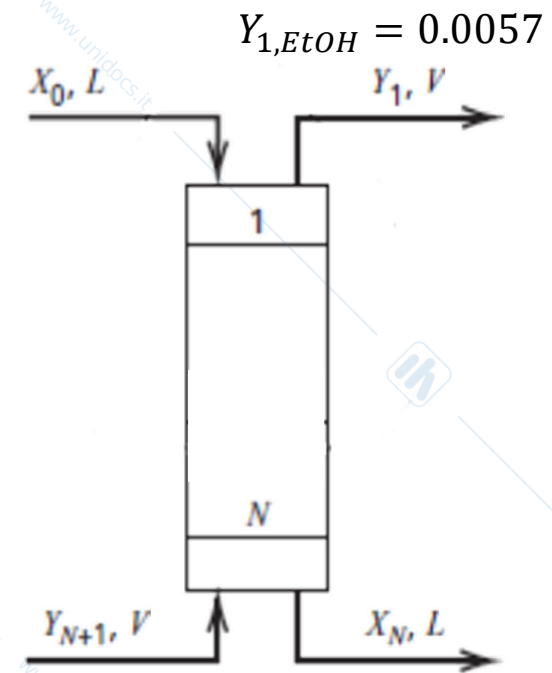
$$y_{N+1,EtOH} = 0.125$$

$$Y_{N+1,EtOH} = 0.143$$

$$Y = \frac{KX}{1 + X(1 - K)}$$

$$X_{N,eq} = \frac{Y_{N+1}}{K + Y_{N+1} \cdot (K - 1)}$$

$$X_{N,eq} = \frac{0.143}{0.5 + 0.143 \cdot (0.5 - 1)} = 0.333$$



$$V = 87.50 \text{ kmol/h}$$

$$y_{N+1, EtOH} = 0.125$$

$$Y_{N+1, EtOH} = 0.143$$

$$L = 67.35$$

$$X_N = 0.1785$$

$$X_{N,eq} = 0.333$$

$$Y_{N+1} = Y_1 + \left(\frac{L}{V}\right)_{min} \cdot X_{N,eq}$$

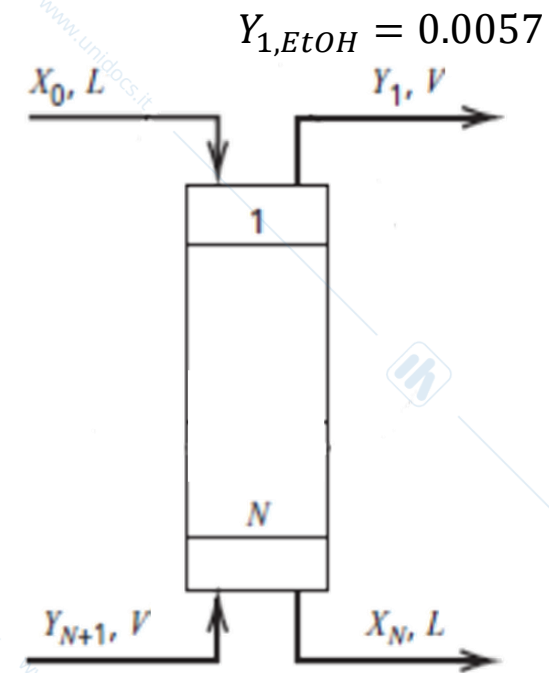
$$\left(\frac{L}{V}\right)_{min} = \frac{Y_{N+1} - Y_1}{X_{N,eq}} = \frac{0.143 - 0.0057}{0.333} = 0.411$$

$$V = V'_{N+1,EtOH} \cdot (1 - y_{N+1,EtOH})$$

$$V = 100 \cdot (1 - 0.125) = 87.50 \frac{kmol}{h}$$

$$L = 4 \cdot \left(\frac{L}{V}\right)_{min} \cdot V = 143.97 \text{ kmol/h}$$

$$\frac{L}{V} = \frac{143.97}{87.50} = 1.645$$



$$V = 87.50 \text{ kmol/h}$$

$$y_{N+1,EtOH} = 0.125$$

$$Y_{N+1,EtOH} = 0.143$$

$$L = 67.35$$

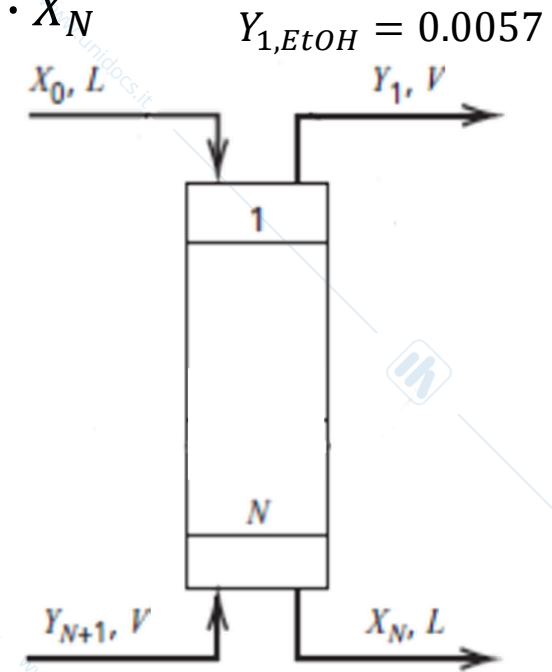
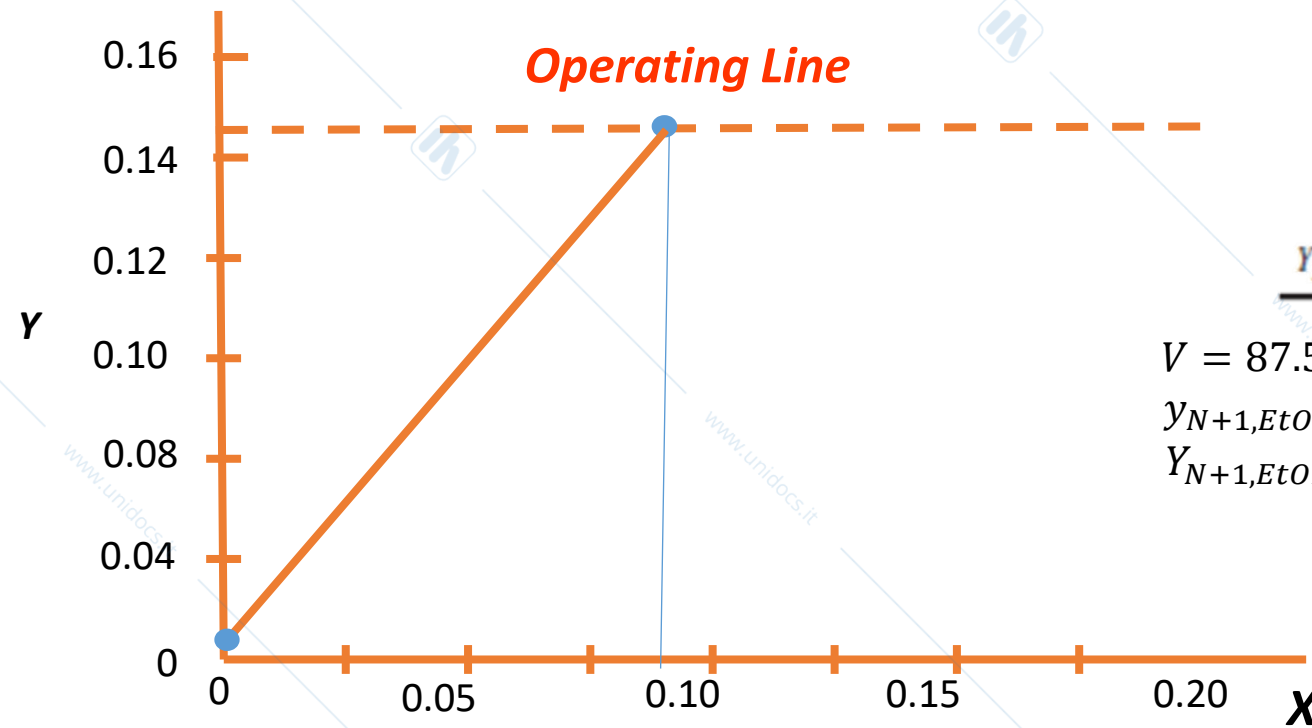
$$X_N = 0.1785$$

$$X_{N,eq} = 0.333$$

$$Y_{N+1} = 0.143 = Y_1 + \frac{L}{V} \cdot X_N = 0.0057 + 1.645 \cdot X_N$$

$$Y_{N+1} = 0.0057 + 1.645 \cdot X_N$$

$$X_N = \frac{0.143 - 0.0057}{1.645} = 0.083$$



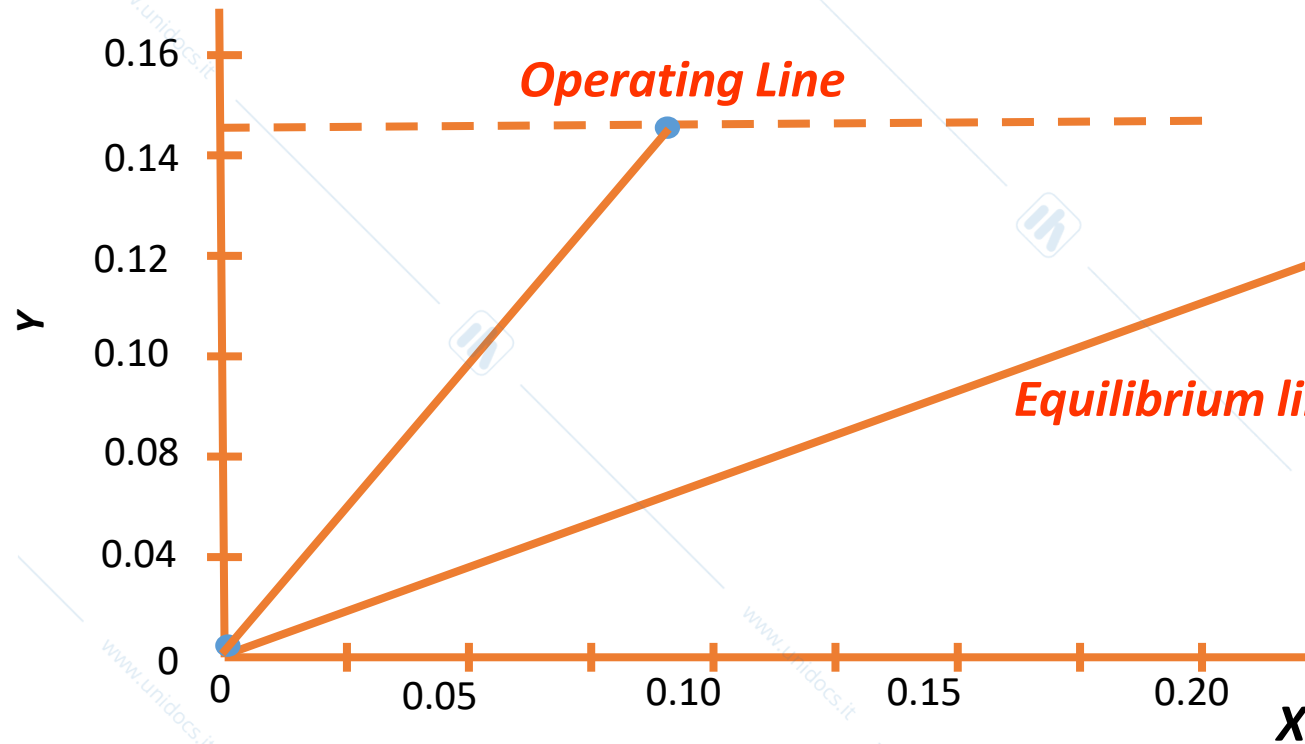
$V = 87.50 \text{ kmol/h}$
 $y_{N+1,EtOH} = 0.125$
 $Y_{N+1,EtOH} = 0.143$

$L = 67.35$
 $X_N = 0.1785$
 $X_{N,eq} = 0.333$

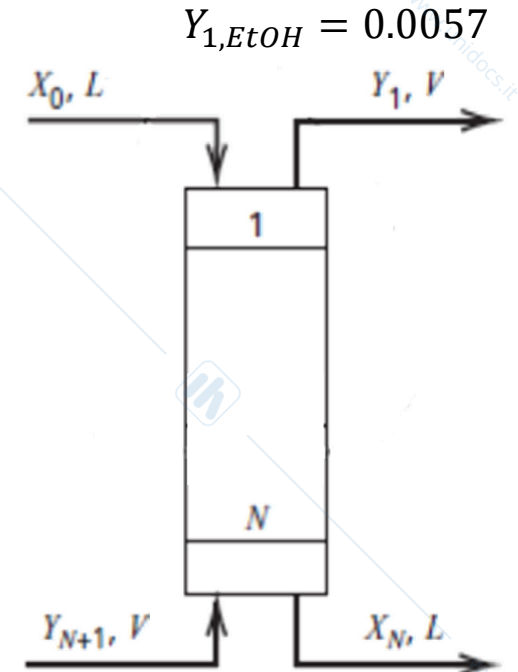
Esercizio 3

$$Y_{N+1,EtOH} = 0.143$$

$$X_{N,eq} = 0.33$$



Difficile



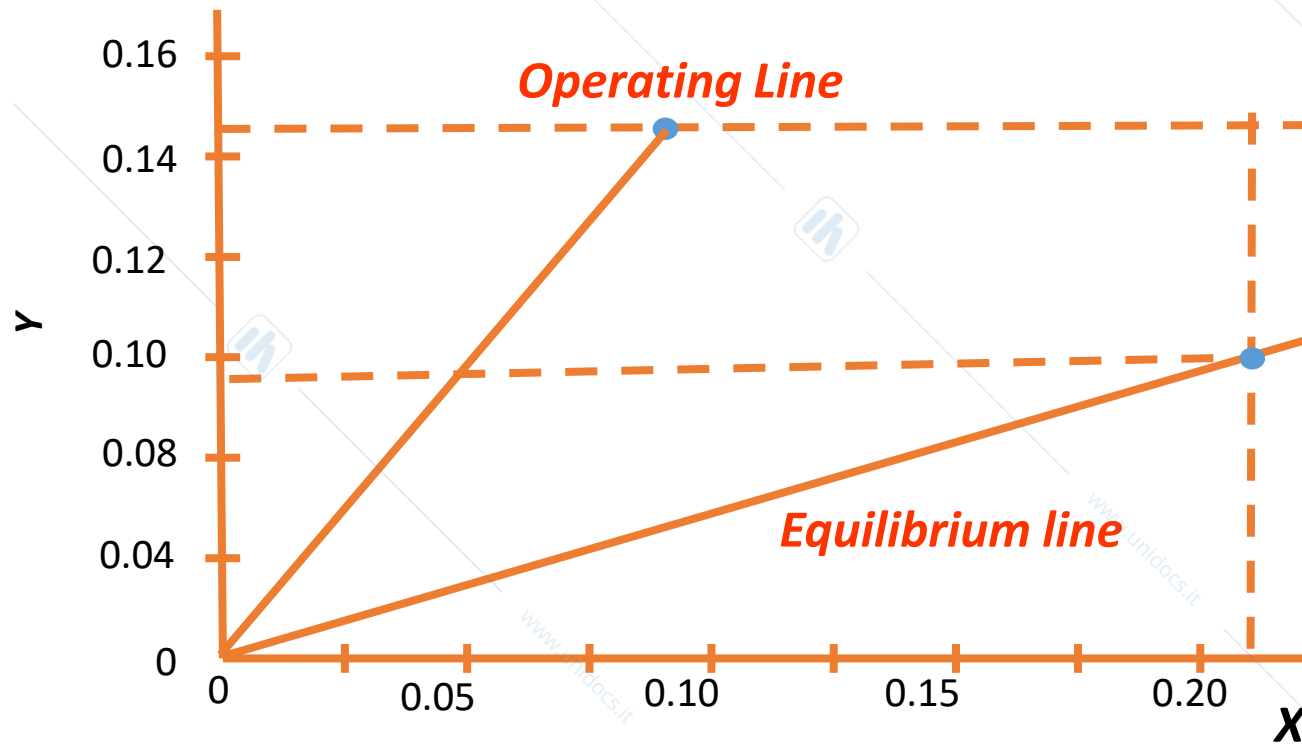
$$V = 87.50 \text{ kmol/h} \quad L = 67.35$$

$$y_{N+1,EtOH} = 0.125 \quad X_N = 0.1785$$

$$Y_{N+1,EtOH} = 0.143 \quad X_{N,eq} = 0.333$$

Ipotesi lineare

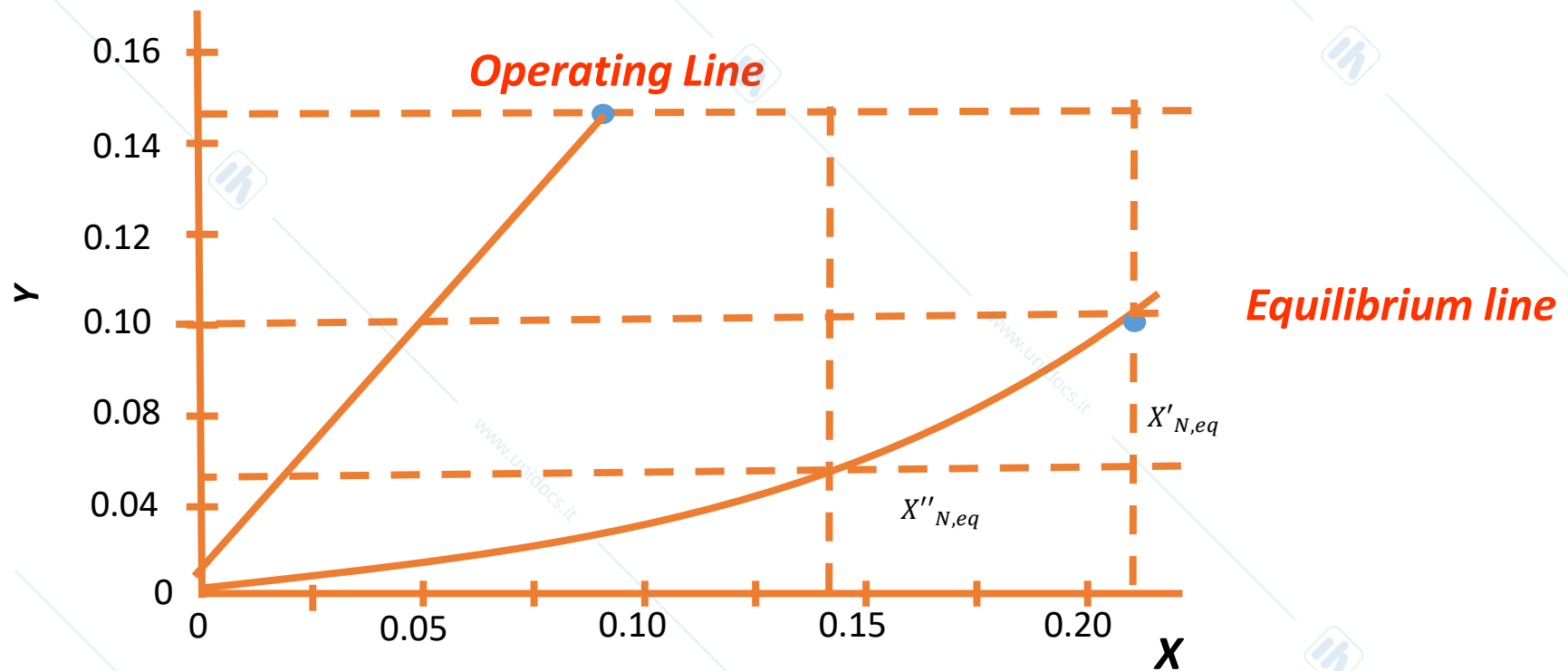
$$X_{N,eq} = \frac{Y_{N+1}}{K + Y_{N+1} \cdot (K - 1)} = \frac{0.1}{0.5 + 0.1 \cdot (0.5 - 1)} = 0.22$$

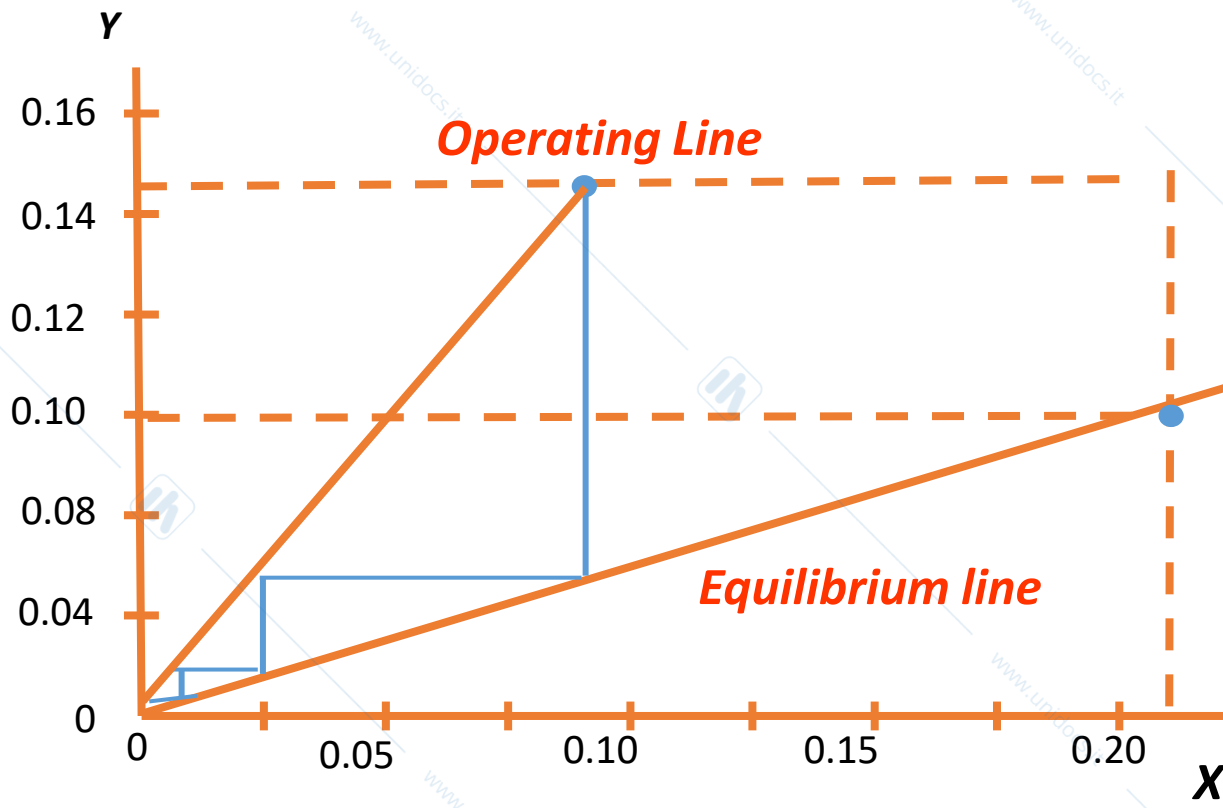


Ipotesi non lineare

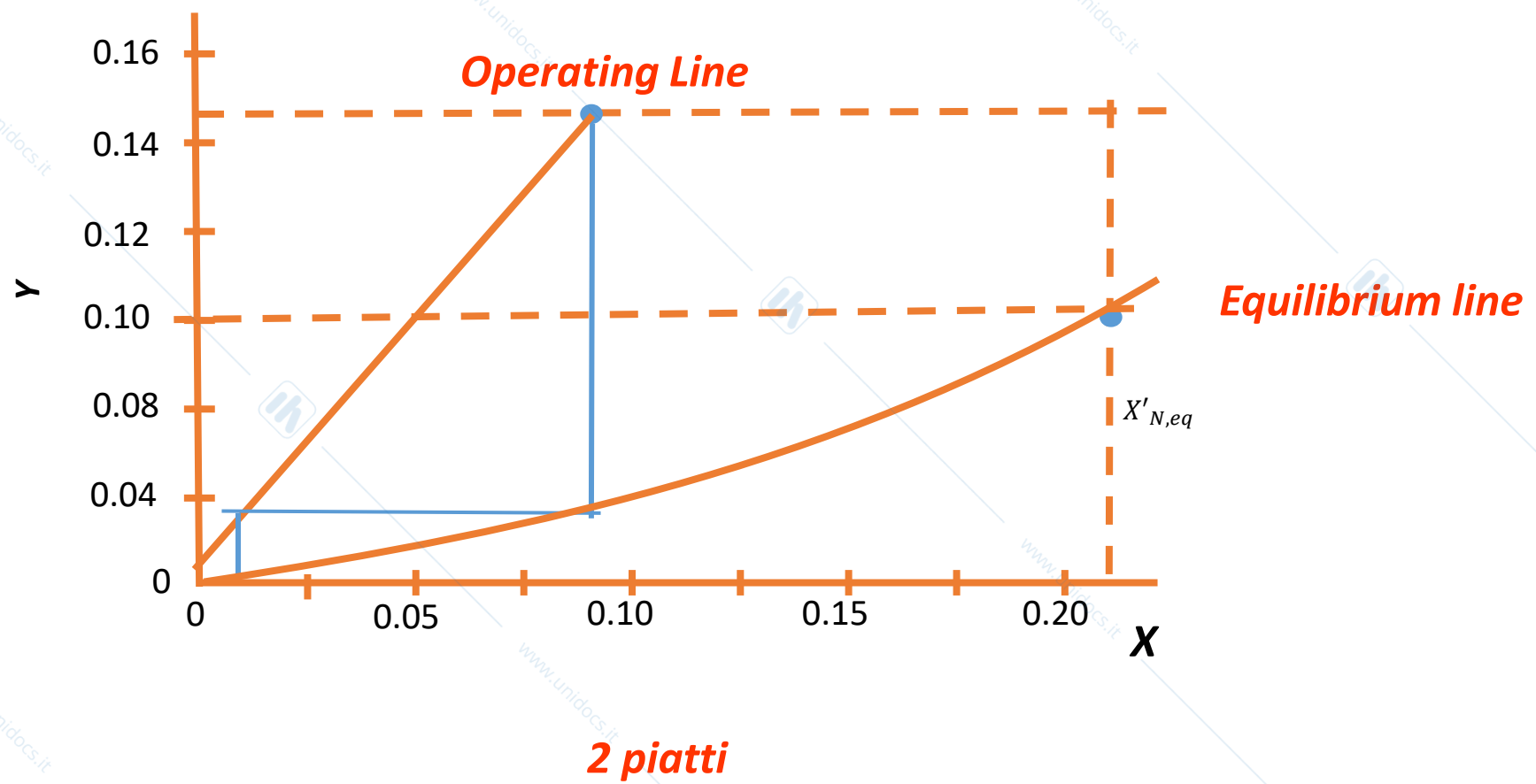
$$X'_{N,eq} = \frac{0.1}{0.5 + 0.1 \cdot (0.5 - 1)} = 0.222$$

$$X''_{N,eq} = \frac{0.05}{0.5 + 0.05 \cdot (0.5 - 1)} = 0.142$$

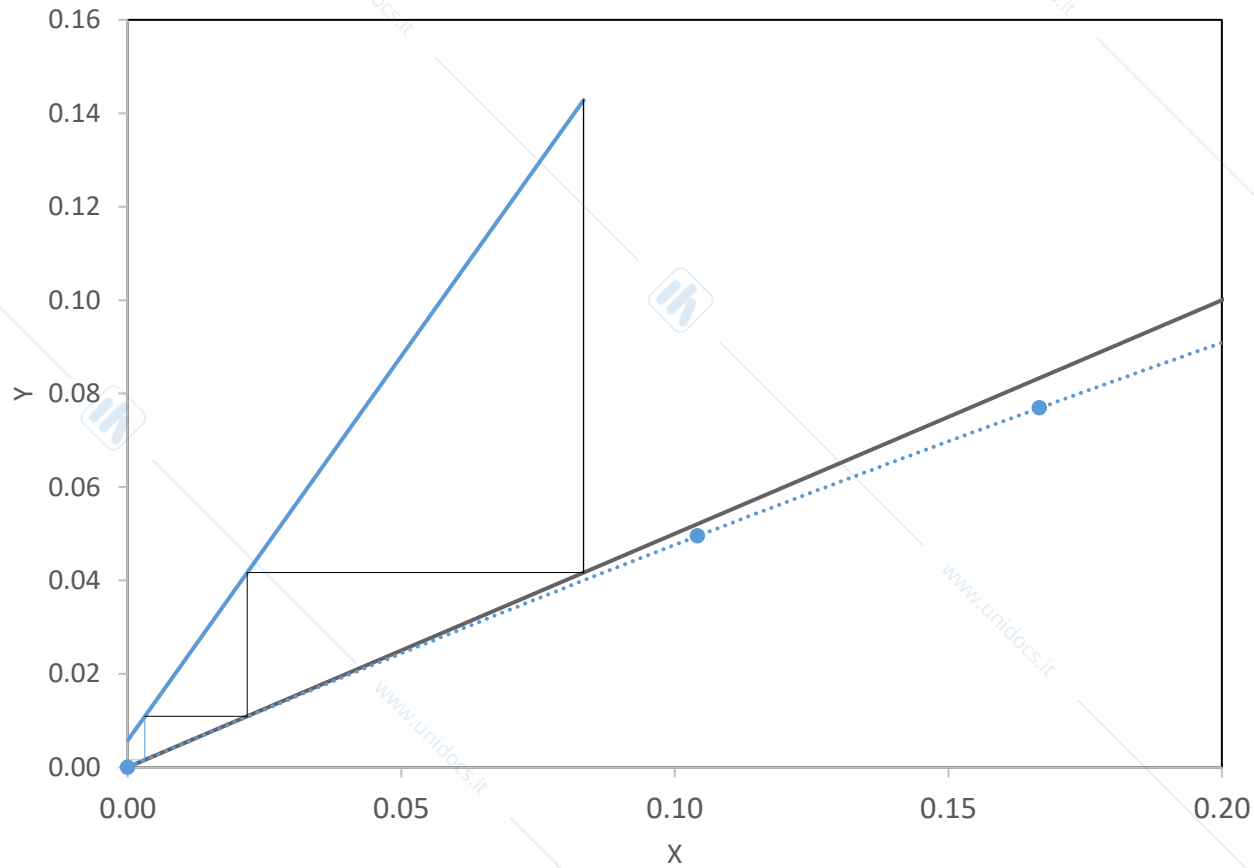




3 piatti



2 piatti



Le differenze tra soluzione ideale e non ideale (funzione non rettilinea) per la curva di equilibrio sono trascurabili

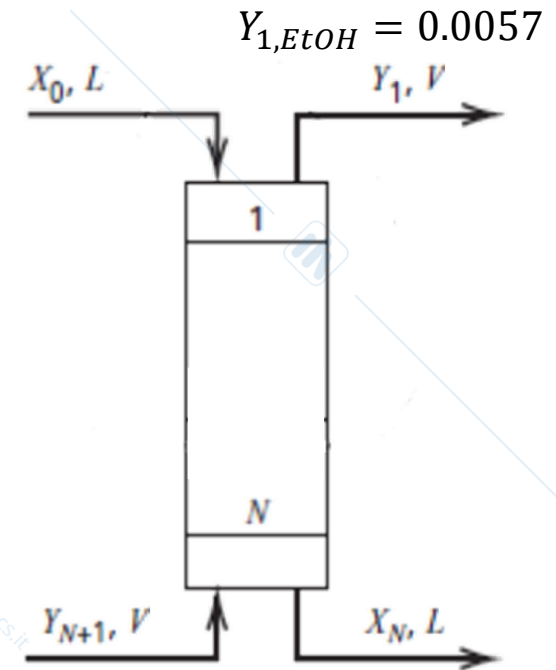
$$A = \frac{L}{KV} = \frac{143.97}{0.5 \cdot 87.50} = 3.291$$

Equazione di Kremser

$$N = \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{1}{A} \right) \left(\frac{y_{N+1} - y_1^*}{y_1 - y_1^*} \right) + \frac{1}{A} \right]}{\ln(A)}$$

$$x_0 = 0.0 \rightarrow y_1^* = 0.0$$

$$N = \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{1}{3.291} \right) \left(\frac{0.125}{0.0057} \right) + \frac{1}{3.291} \right]}{\ln(3.291)} = 2.45 \approx 3$$



$$V = 87.50 \text{ kmol/h}$$

$$y_{N+1,EtOH} = 0.125$$

$$Y_{N+1,EtOH} = 0.143$$

$$L = 67.35$$

$$X_N = 0.1785$$

Dimensionamento colonna

$$U_f = C \left(\frac{\rho_L - \rho_f}{\rho_f} \right)^{0.5}$$

$$C = C_F \cdot F_\sigma \cdot F_{HA} \cdot F_F$$

$$F_F = 1.0$$

il sistema non produce schiuma

$$F_{HA} = 1.0$$

ossia l'area dei fori è pari a 0.1 volte l'area attiva

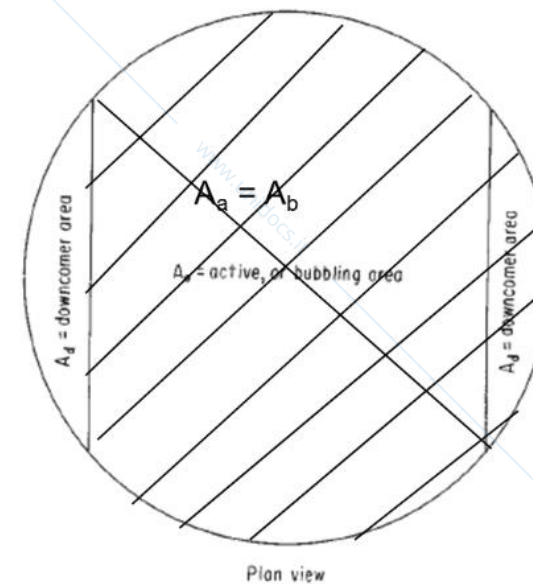
A_h = area dei fori (hole)

A_a = area attiva

$$C = C_F \cdot F_\sigma \cdot F_{HA} \cdot F_F$$

$$\frac{A_h}{A_a} \geq 0.1 \rightarrow F_{HA} = 1.0$$

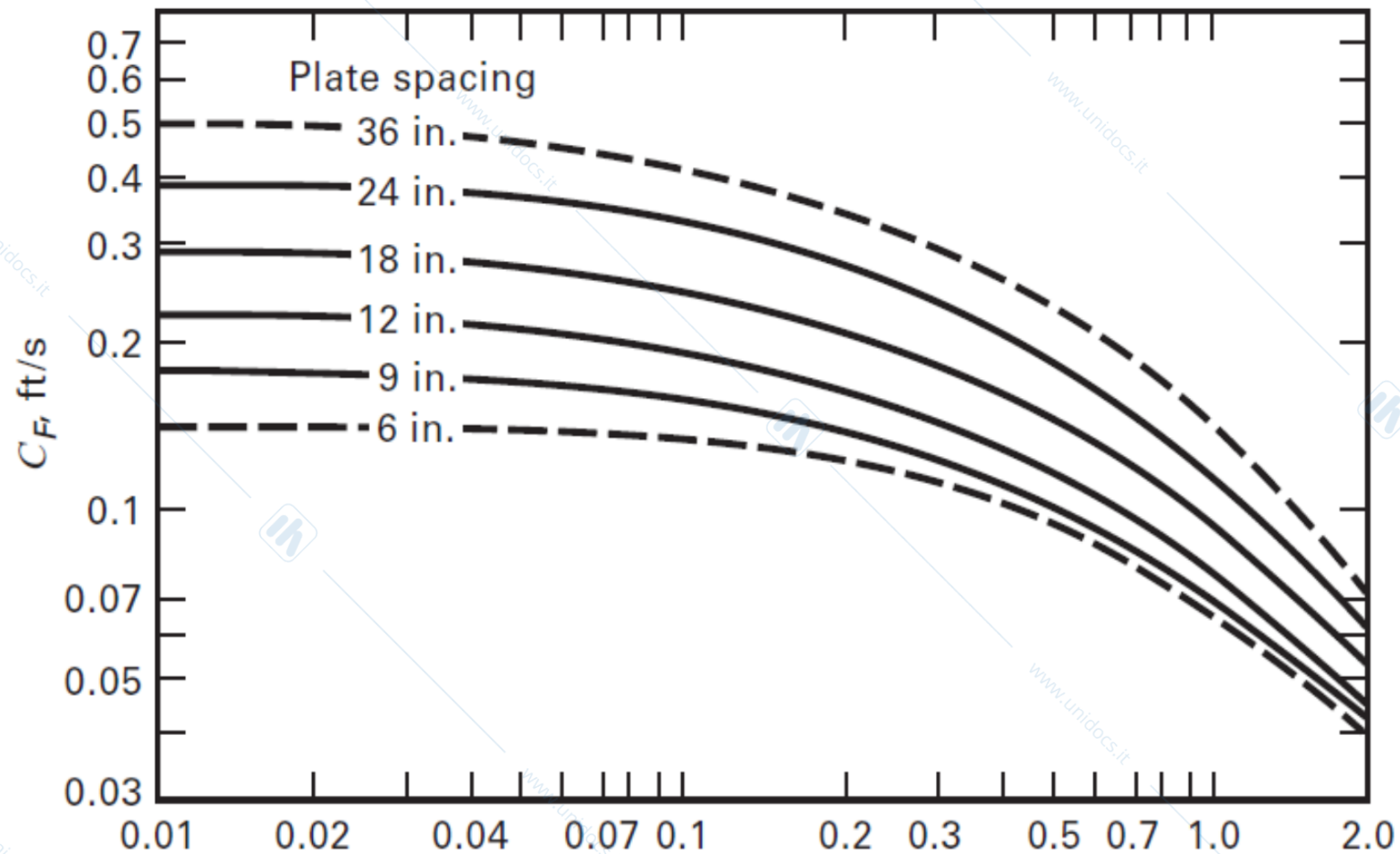
$$\frac{A_h}{A_a} \leq 0.1 \rightarrow F_{HA} = 5 \left(\frac{A_h}{A_a} \right) + 0.5$$



$$C = C_F \cdot F_\sigma \cdot F_{HA} \cdot F_F$$

$$F_\sigma = \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{0.2} = \left(\frac{70}{20}\right)^{0.2} = 1.28$$

$$C = C_F \cdot 1.28$$



$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0,5}$$

Il parametro FLV è tipicamente calcolato al fondo della colonna per semplificare. Attenzione le densità sono in massa.

La densità della miscela di liquido ρ_L composta da elementi i-esimi con frazione in massa pari a ω :

$$\frac{1}{\rho_L} = \sum_i \frac{\omega_{L,i}}{\rho_{L,i}}$$

Conversione da frazioni molari a frazioni in massa

$$\omega_{L,i} = \frac{x_i \cdot PM_i}{\sum_i x_i \cdot PM_i}$$

$$x_N = \frac{X_N}{1 + X_N} = \frac{0.083}{1 + 0.083} = 0.077$$

$$\omega_{N,EtOH} = \frac{x_{N,EtOH} \cdot PM_{EtOH}}{x_{N,EtOH} \cdot PM_{EtOH} + (1 - x_{N,EtOH}) \cdot PM_{acqua}}$$

$$\omega_{N,EtOH} = \frac{0.077 \cdot 46}{0.077 \cdot 46 + (1 - 0.077) \cdot 18} = 0.1756$$

$$\frac{1}{\rho_L} = \sum_i \frac{\omega_{L,i}}{\rho_{L,i}} = \frac{0.176}{890} + \frac{(1 - 0.176)}{1000} = 0.001044$$

$$\rho_L = 957.95 \text{ kg/m}^3$$

$$PM_V = \sum_i y_{N+1,i} \cdot PM_i$$

$$PM_v = 0.125 \cdot 46 + (1 - 0.125) \cdot 44 = 44.25$$

$$PM_L = \sum_i x_{N,i} \cdot PM_i$$

$$PM_L = 0.077 \cdot 46 + (1 - 0.077) \cdot 18 = 20.15$$

$$\rho_v = \frac{n}{V} \cdot PM_V = \frac{P}{RT} \cdot PM_V$$

$$\rho_v = \frac{100000 \cdot 44.25}{8314 \cdot 298.15} = 1.786 \text{ kg/m}^3$$

$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0,5}$$

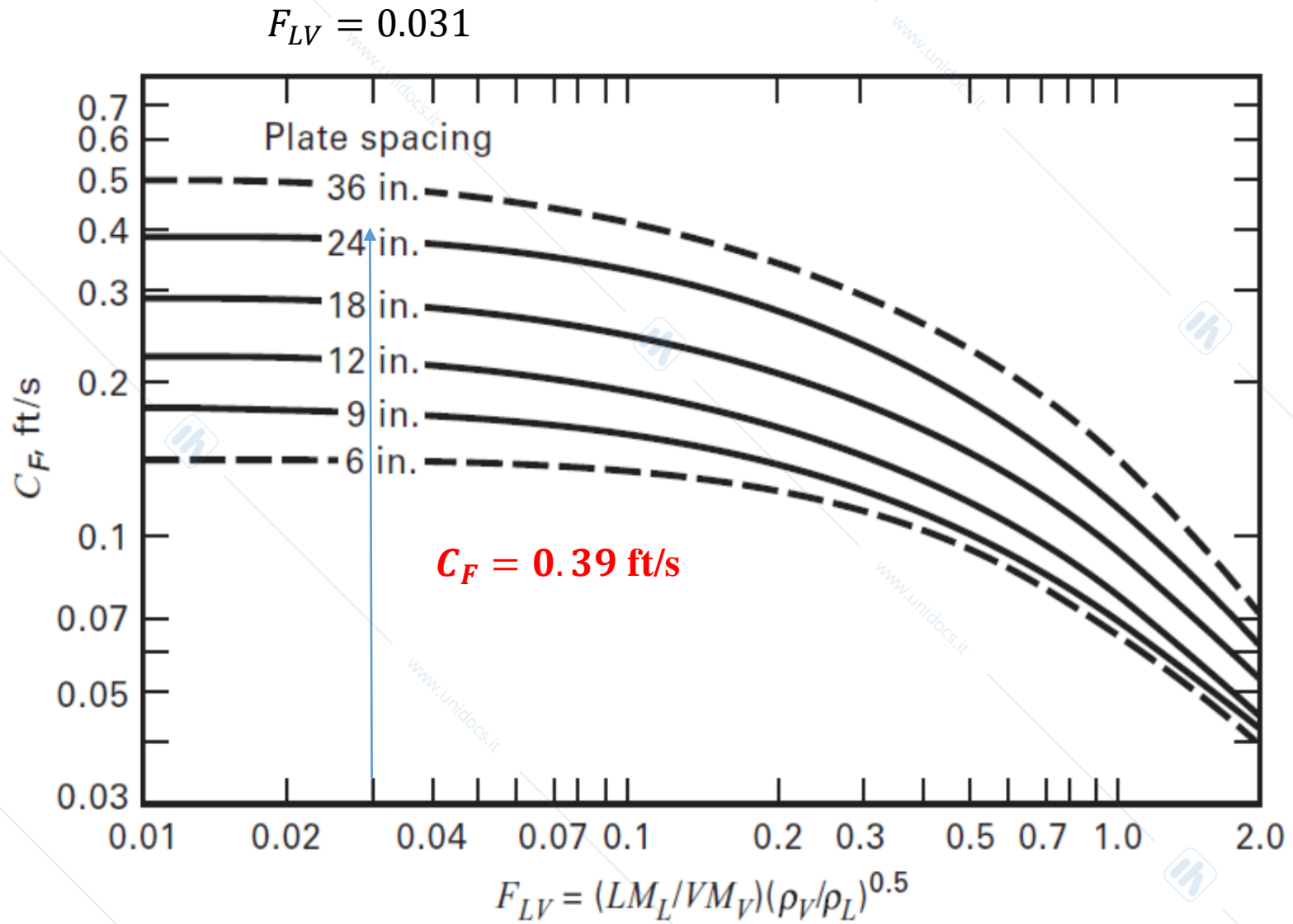
$$F_{LV} = \frac{L' \cdot 20.15}{100 \cdot 44.25} \cdot \left(\frac{1.79}{963} \right)^{0,5}$$

$$L' = L + V' \cdot (y_{N+1,EtOH} - y_{1,EtOH})$$

$$L' = 143.97 + 100 \cdot (0.125 - 0.006) = 155.89 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0,5}$$

$$F_{LV} = \frac{155.89 \cdot 20.15}{100 \cdot 44.25} \cdot \left(\frac{1.79}{957} \right)^{0,5} = 0.031$$



Dimensionamento colonna

$$C = C_F \cdot F_\sigma \cdot F_{HA} \cdot F_F = 0.39 \cdot 1.285 = 0.501 \frac{ft}{s}$$

$$\rho_f = \rho_V$$

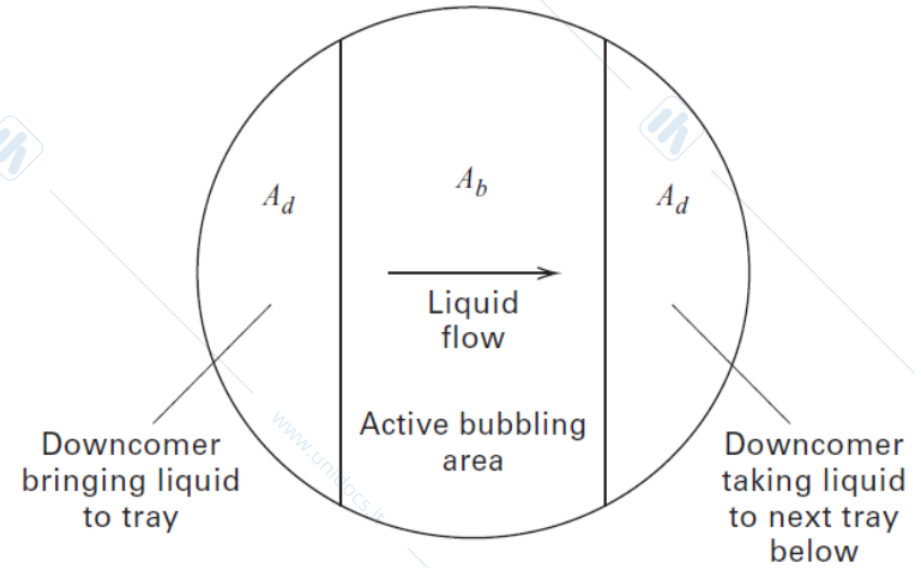
$$U_f = C \cdot \left(\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right)^{0.5} = 0.501 \cdot \left(\frac{957.95 - 1.786}{1.786} \right)^{0.5}$$

$$U_f = 11.592 \frac{ft}{s} \rightarrow 11.592 \cdot 0.3048 = 3.53 \frac{m}{s}$$

$$\frac{A_d}{A} = \begin{cases} 0.1 & F_{LV} < 0.1 \\ 0.1 + \frac{F_{LV} - 0.1}{9} & 0.1 \leq F_{LV} \leq 1.0 \\ 0.2 & F_{LV} > 1.0 \end{cases}$$

$$F_{LV} = 0.031$$

$$\frac{A_d}{A} = 0.1$$



Diametro del piatto

$$D_T = \sqrt{\frac{4 V' M_f}{0.8 \rho_f U_f \pi \left(1 - \frac{A_d}{A}\right)}}$$

$$D_T = \sqrt{\frac{4 \cdot 100 \cdot \left(\frac{1}{3600}\right) \cdot 44.25}{0.8 \cdot 1.786 \cdot 3.5299 \cdot \pi \cdot (1 - 0.1)}} = 0.587 \text{ m}$$

Area del piatto

$$A_T = \frac{\pi D_T^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 0.587^2}{4} = 0.271 \text{ m}^2$$

Altezza della torre di assorbimento

$$H_T = 3 \cdot 24'' = 1.829 \text{ m}$$

Risultati

N	3	Kremser (ideale)
N	3	McCabe-Thiele
U_f	3.530	m/s
A_T	0.271	m ²
D_T	0.587	m
H_T	1.829	m

Le richieste ambientali stanno spingendo sempre più verso tecniche di purificazione di gas provenienti dalla gassificazione di carbone e biomasse. La rimozione dei composti di zolfo, quali il Disolfuro di Carbonio (CS_2 , $\text{PM} = 76.14$), può essere ottenuta con torri di assorbimento a piatti con olio ($\text{PM} = 180 \text{ g/mol}$, $\rho = 0.81 \text{ g/cm}^3$).

Una miscela costituita da CS_2 6.5 %_v, in Azoto (N_2) alle condizioni atmosferiche ($P = 1 \text{ atm}$; $T = 25 \text{ °C}$), portata = $1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$, è trattata con olio fino a ridurre la concentrazione di CS_2 allo 0.5 %_v. Calcolare il numero di stadi ideali utilizzando una portata pari a 1.5 volte la portata minima e valutare le dimensioni della colonna (spaziatura: 24 in).

Si assume che le soluzioni siano ideali.

La tensione di vapore del CS_2 in olio è pari a 48.00 kPa.

Tensione superficiale dell'olio: 30 dyne/cm.

Fattori foaming e di attrito ai fori sono unitari (F_F , F_{HA})

La tensione di vapore è la pressione in equilibrio con il proprio liquido allo stato puro

Vale, per soluzioni diluite, la legge di Raoult:

$$P_i = P_i^0 \cdot x_i$$

e la legge di Dalton:

$$P_i = P \cdot y_i$$

da cui:

$$P \cdot y_i = P_i^0 \cdot x_i$$

In prima approssimazione (trascurando le non idealità) vale quindi:

$$H(T) = \frac{y_i}{x_i} = P_i^0$$

Ossia, la costante di Henry corrisponde, in prima approssimazione alla tensione di vapore, e:

$$K = \frac{H(T)}{P} = \frac{H(T)}{101.3} = \frac{48.00}{101.3} = 0.474$$

$$x_0 = 0$$

$$y_1 = 0.5\%_v = 0.005$$

$$y_{N+1} = 0.065\%_v = 0.065$$

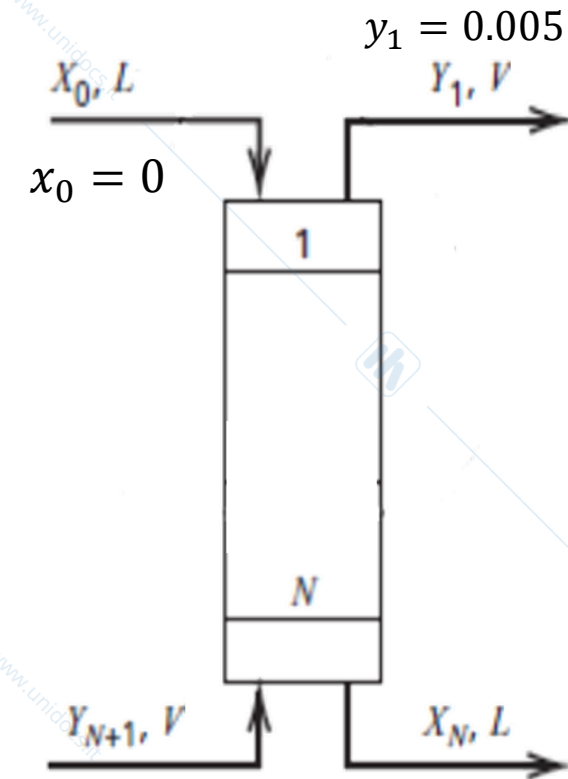
$$V'_{vol} = 1000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}$$

$$PV'_{vol} = nRT$$

$$V' = \frac{P \cdot V'_{vol}}{RT} = \frac{1000 \cdot 101325}{8314 \cdot 273.15} = 44.62 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$V = V' \cdot (1 - y_{N+1})$$

$$V = 44.62 \cdot (1 - 0.065) = 41.72 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$



$$V = 41.72 \text{ kmol/h}$$

$$y_{N+1} = 0.065$$

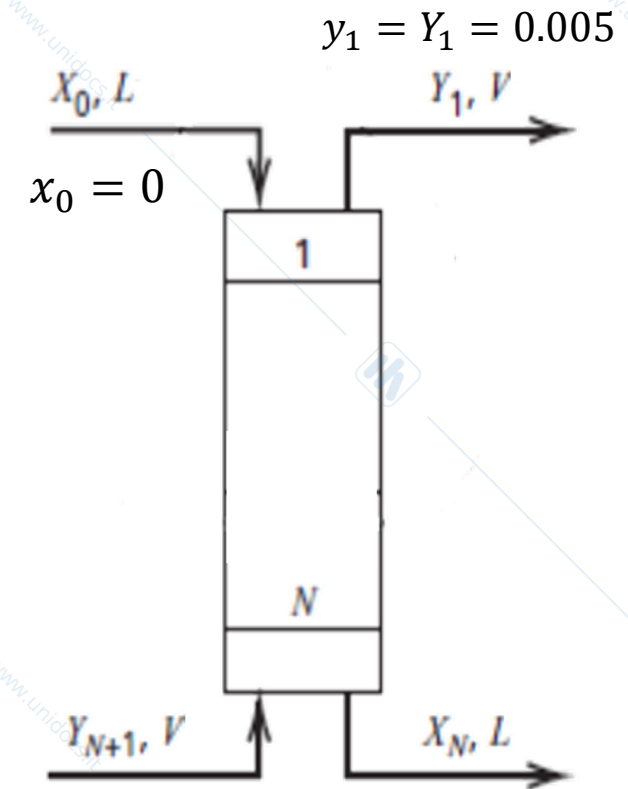
$$Y_{N+1} = \frac{y_{N+1}}{1 - y_{N+1}} = 0.070$$

$$Y_1 = \frac{y_1}{1 - y_1} = 0.005$$

$$Y = \frac{KX}{1 + X(1 - K)}$$

$$X_{N,\text{eq}} = \frac{Y_{N+1}}{K + Y_{N+1}(K - 1)}$$

$$X_{N,\text{eq}} = \frac{0.070}{0.474 + 0.070(0.474 - 1)} = 0.159$$



$$V = 41.72 \text{ kmol/h}$$

$$y_{N+1} = 0.065$$

$$Y_{N+1} = 0.070$$

$$Y_{N+1} = Y_1 + \left(\frac{L}{V}\right)_{\min} \cdot X_{N,\text{eq}}$$

$$\left(\frac{L}{V}\right)_{\min} = \frac{Y_{N+1} - Y_1}{X_{N,\text{eq}}} = \frac{0.07 - 0.005}{0.159} = 0.406$$

$$L_{\min} = \left(\frac{L}{V}\right)_{\min} \cdot V = 0.406 \cdot 41.72 = 16.925 \text{ kmol/h}$$

$$L = L_{\min} \cdot 1.5 = 25.388 \text{ kmol/h}$$

$$\frac{L}{V} = 0.609$$

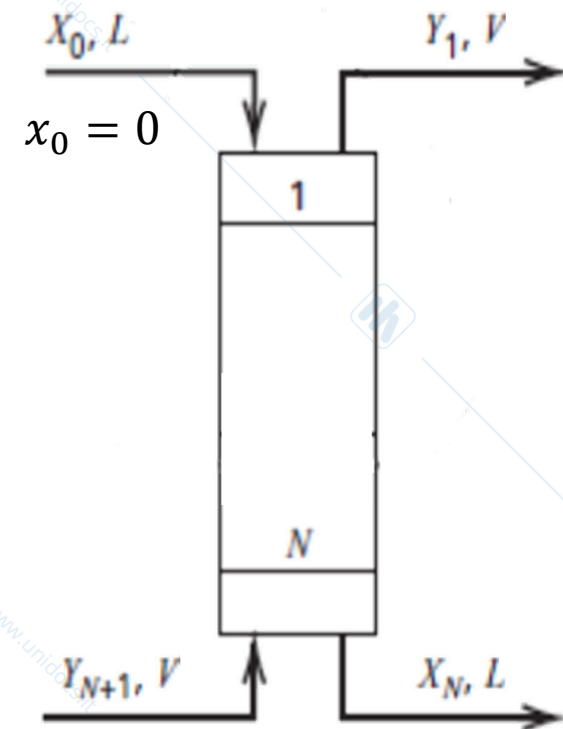
$$Y_{N+1} = Y_1 + \frac{L}{V} \cdot X_N = 0.005 + 0.609 \cdot X_N$$

Al bottom della colonna:

$$X_N = \frac{Y_{N+1} - Y_1}{L/V} = \frac{0.070 - 0.005}{0.609} = 0.106$$

$$x_N = \frac{X_N}{1 + X_N} = 0.096$$

$$L = 25.38 \text{ kmol/h} \quad y_1 = Y_1 = 0.005$$

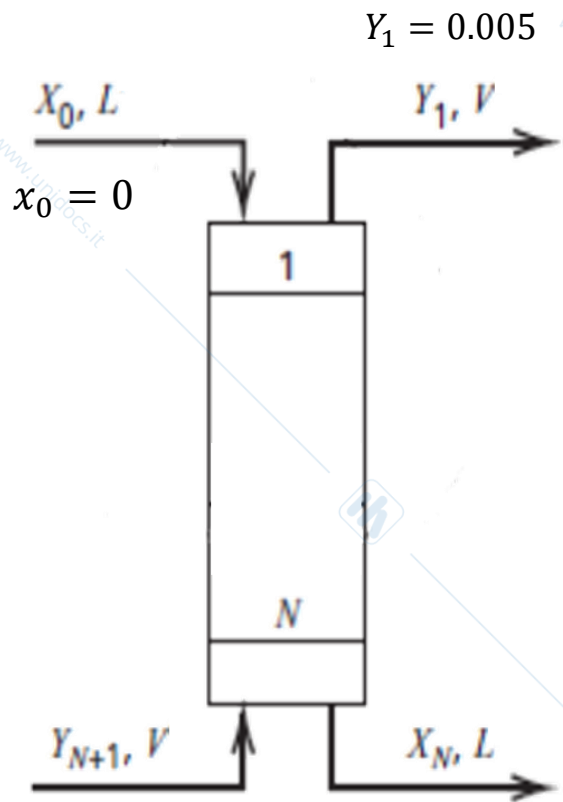


$$V = 41.72 \text{ kmol/h} \quad x_N = 0.096$$

$$y_{N+1} = 0.065 \quad X_N = 0.106$$

$$Y_{N+1} = 0.070$$

Esercizio 4



$$Y_1 = 0.005$$

$$X_0, L$$

$$x_0 = 0$$

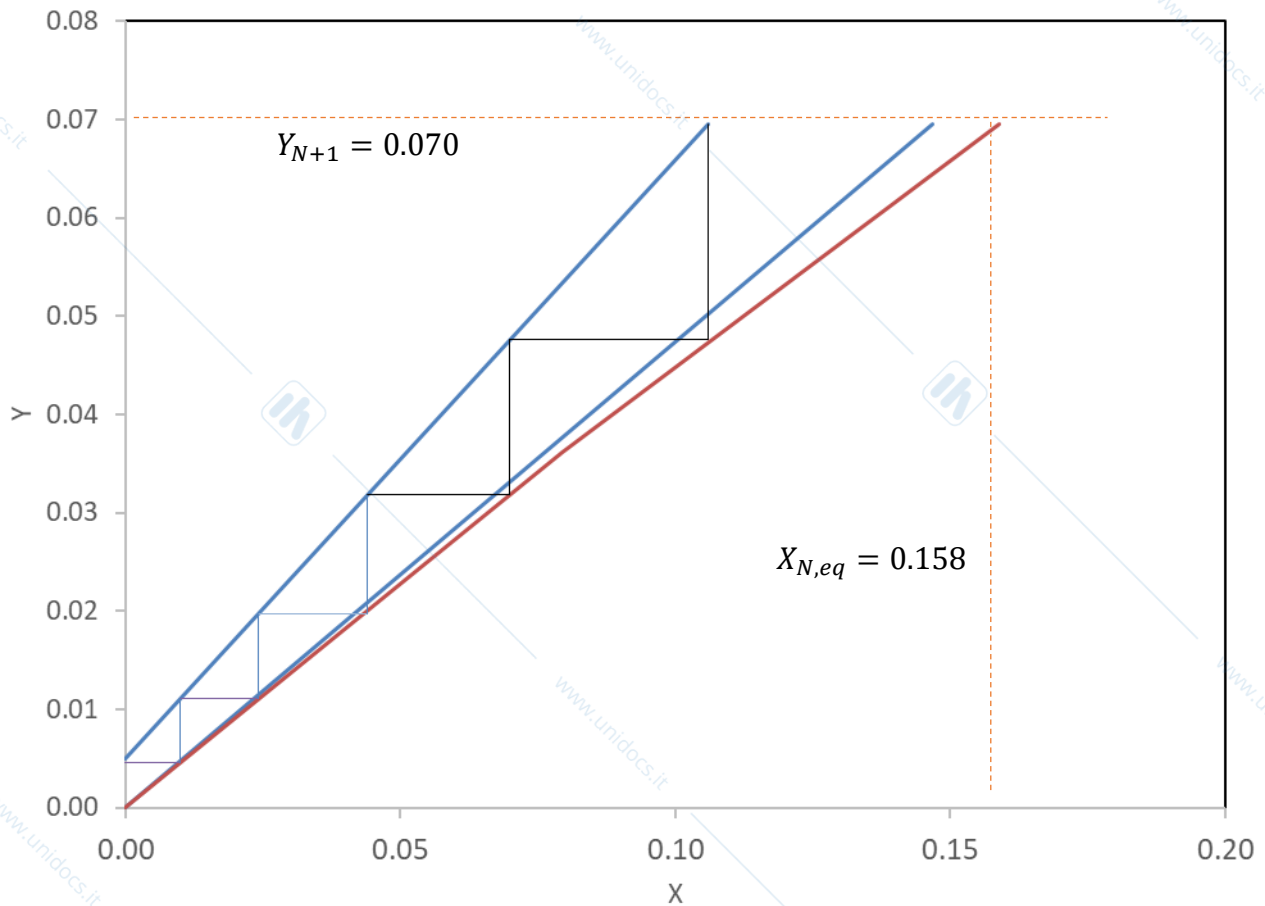
$$V = 41.71 \text{ kmol/h}$$

$$Y_{N+1} = 0.070$$

$$L = 25.38 \text{ kmol/h}$$

$$X_N = 0.106$$

$$X_{N,eq} = 0.158$$



5 piatti

$$A = \frac{L}{KV} = 1.284$$

$$N = \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{1}{A}\right) \left(\frac{y_{N+1}}{y_1}\right) + \frac{1}{A} \right]}{\ln(A)} = 5.701 \approx 6 \text{ piatti}$$

Dimensionamento colonna

$$U_f = C \cdot \left(\frac{\rho_L - \rho_f}{\rho_f} \right)^{0.5}$$

$$C = C_F \cdot F_\sigma \cdot F_{HA} \cdot F_F$$

$$F_F = 1.0$$

il sistema non produce schiuma

$$F_{HA} = 1.0$$

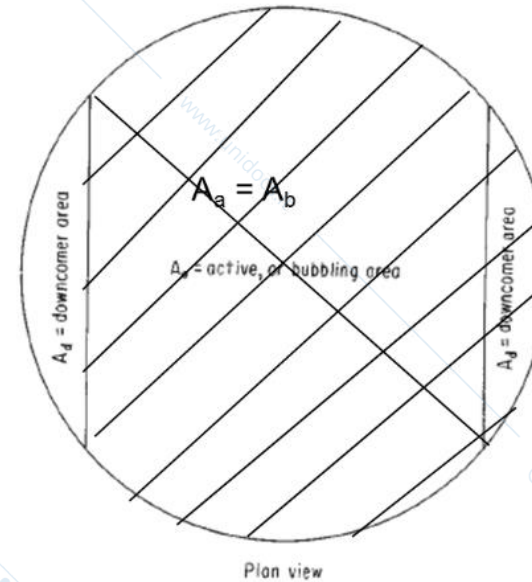
l'area dei fori è pari a 0.1 volte l'area attiva

A_h = area dei fori (hole)

A_a = area attiva

$$\frac{A_h}{A_a} \geq 0.1 \rightarrow F_{HA} = 1.0$$

$$\frac{A_h}{A_a} \leq 0.1 \rightarrow F_{HA} = 5 \left(\frac{A_h}{A_a} \right) + 0.5$$



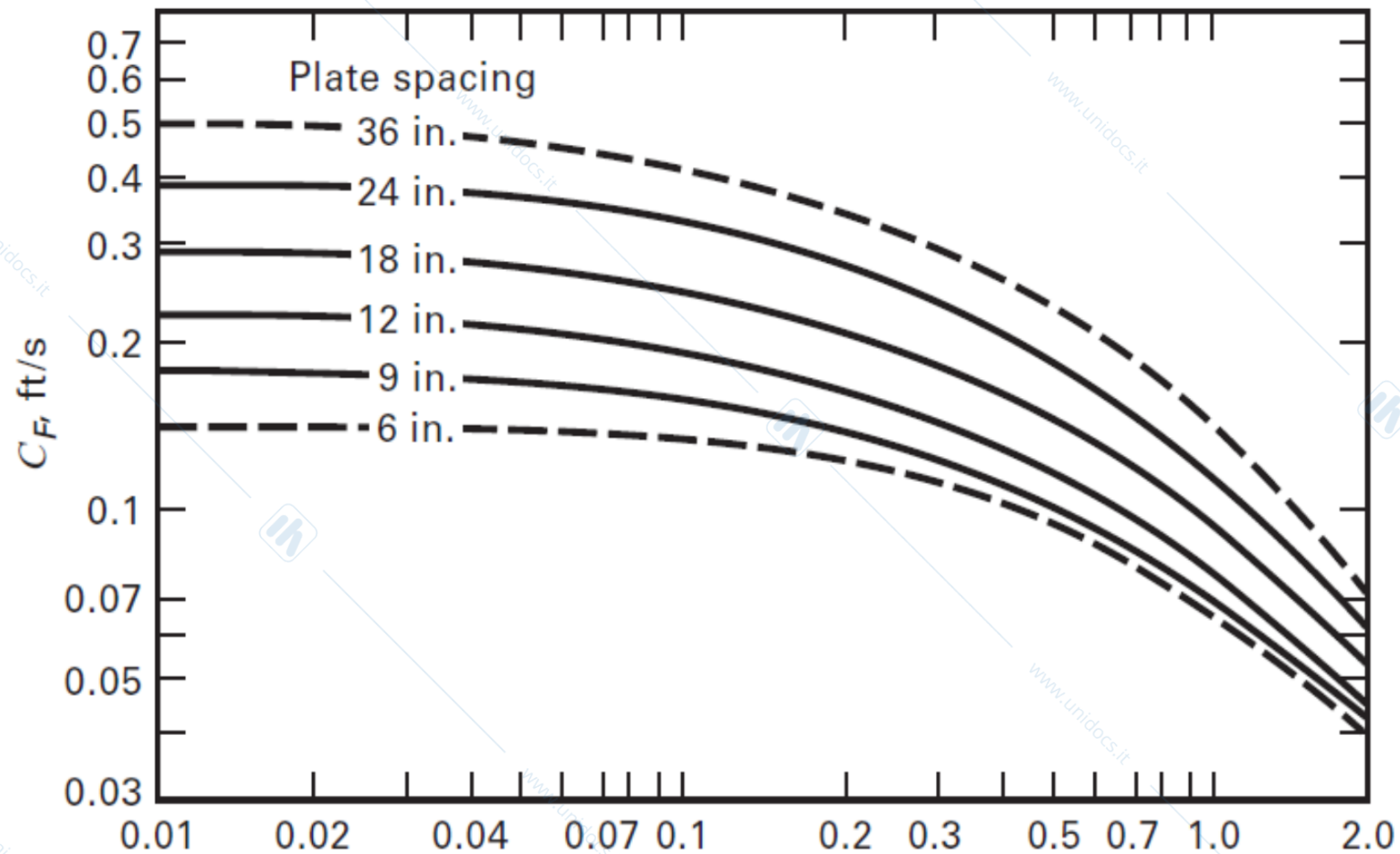
$$C = C_F \cdot F_\sigma \cdot F_{HA} \cdot F_F$$

tensione superficiale dell'olio

$$\sigma = 30 \text{ dyne/cm}$$

$$F_\sigma = \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{0.2} = \left(\frac{30}{20}\right)^{0.2} = 1.084$$

$$C = C_F \cdot 1.084$$



$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0,5}$$

Il parametro FLV è tipicamente calcolato al fondo della colonna per semplificare.
 Attenzione le densità sono in massa.

La densità della miscela di liquido ρ_L composta da elementi i-esimi con frazione in massa pari a ω :

$$\frac{1}{\rho_L} = \sum_i \frac{\omega_{L,i}}{\rho_{L,i}}$$

Conversione da frazioni molari a frazioni in massa

$$\omega_{L,i} = \frac{x_i \cdot PM_i}{\sum_i x_i \cdot PM_i}$$

Per miscele ideali, la variazione di densità dovuta al soluto assorbito è in genere trascurata:

$$\rho_L \approx \rho_{L,olio}$$

$$PM_V = \sum_i y_{N+1,i} \cdot PM_i$$

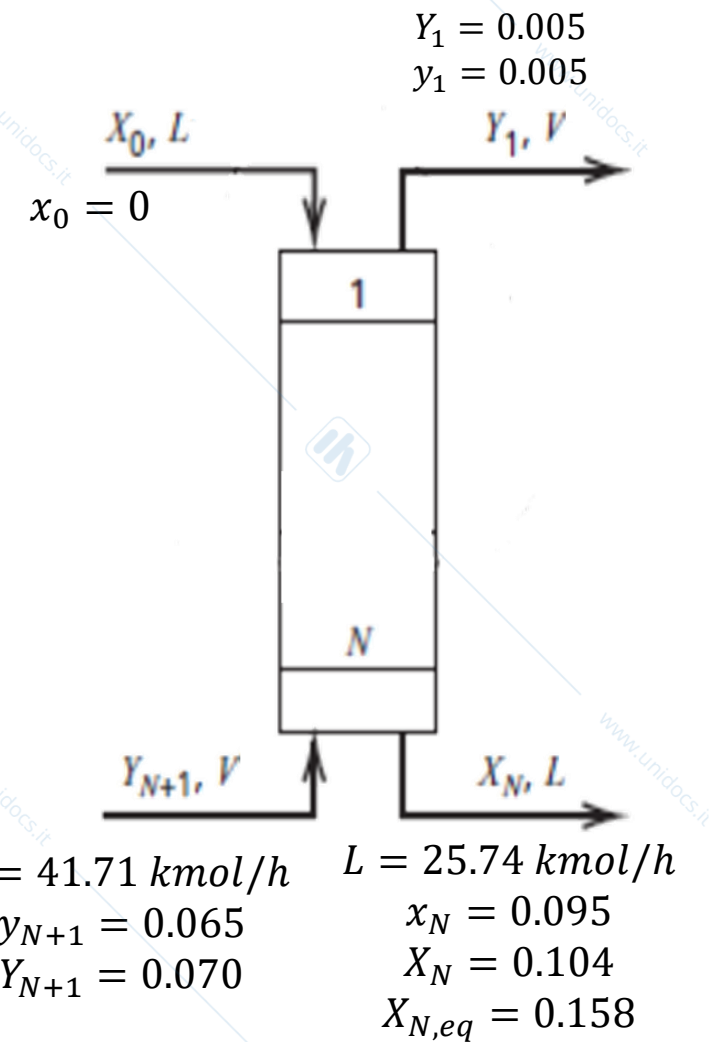
$$PM_V = 0.065 \cdot 76.14 + (1 - 0.065) \cdot 28 = 31.129$$

$$PM_L = \sum_i x_{N,i} \cdot PM_i$$

$$PM_L = 0.096 \cdot 76.14 + (1 - 0.096) \cdot 180 = 170.04$$

$$\rho_v = \frac{n}{V} \cdot PM_V = \frac{P}{RT} \cdot PM_V$$

$$\rho_v = \frac{1 \cdot 31.13}{0.082 \cdot 298.15} = 1.273 \text{ kg/m}^3$$

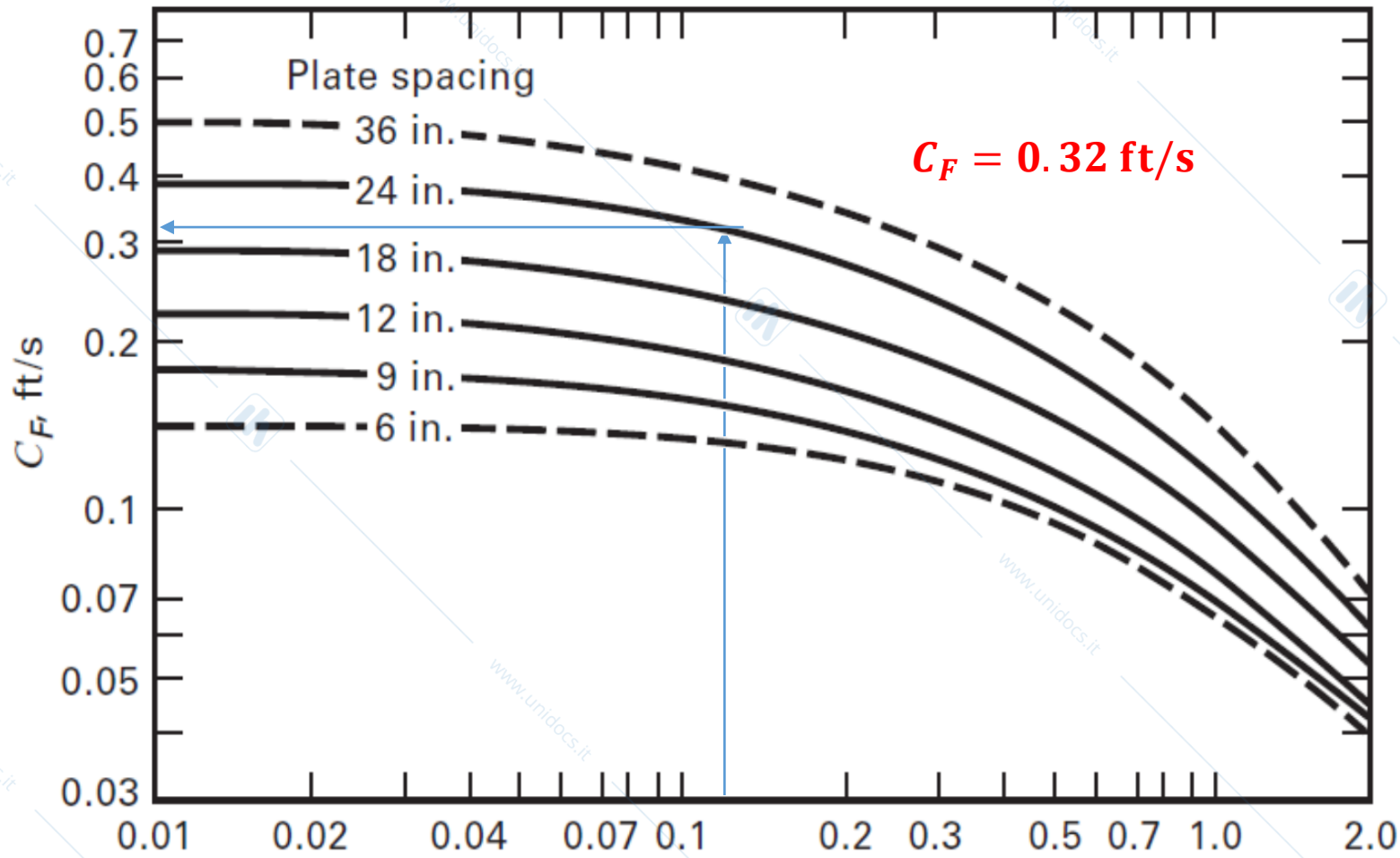


$$L' = L + V' \cdot (y_{N+1} - y_1) = 28.064 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0,5}$$

$$F_{LV} = \frac{28.054}{44.618} \cdot \left(\frac{1.273}{810} \right)^{0.5} = 0.136$$

$$F_{LV} = 0.136$$



$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0,5}$$

Dimensionamento colonna

$$C = C_F \cdot F_\sigma \cdot F_{HA} \cdot F_F = 0.32 \cdot 1.084 = 0.347 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

$$\rho_f = \rho_v$$

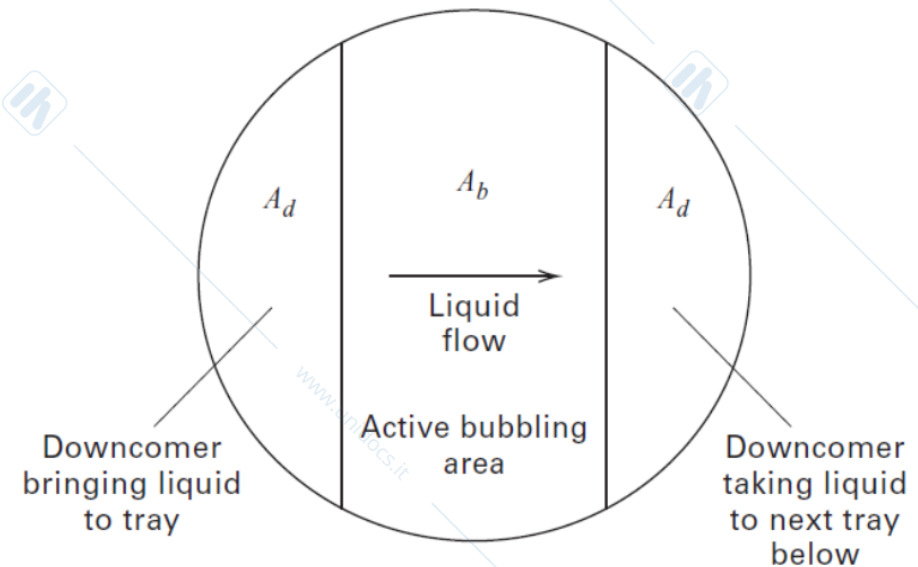
$$U_f = C \cdot \left(\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v} \right)^{0.5} = 0.347 \left(\frac{810 - 1.273}{1.273} \right)^{0.5} = 8.746 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

$$U_f = 2.663 \text{ m/s}$$

$$\frac{A_d}{A} = \begin{cases} 0.1 & F_{LV} < 0.1 \\ 0.1 + \frac{F_{LV} - 0.1}{9} & 0.1 \leq F_{LV} \leq 1.0 \\ 0.2 & F_{LV} > 1.0 \end{cases}$$

$$F_{LV} = 0.136$$

$$\frac{A_d}{A} = 0.104$$



Diametro del piatto

$$D_T = \sqrt{\frac{4 V' M_f}{0.8 \rho_f U_f \pi \left(1 - \frac{A_d}{A}\right)}}$$

$$D_T = \sqrt{\frac{4 \cdot \left(\frac{44.618}{3600}\right) \cdot 31.129}{0.8 \cdot 1.273 \cdot 2.663 \cdot \pi \cdot (1 - 0.104)}} = 0.450 \text{ m}$$

Area del piatto

$$A_T = \frac{\pi D_T^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 0.450^2}{4} = 0.159 \text{ m}^2$$

Altezza della torre di assorbimento

$$H_T = 6 \cdot 24'' \cdot 0.00254 = 3.658 \text{ m}$$

Risultati

N	5	Kremser
N	6	McCabe-Thiele
U_f	2.663	m/s
A_T	0.159	m ²
D_T	0.450	m
H_T	3.658	m

Da una corrente d'aria di $20000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ occorre rimuovere acido cloridrico (HCl) presente con una concentrazione pari a $100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$, fino a un valore di $3 \text{ mg}/\text{Nm}^3$. L'operazione viene effettuata tramite acqua in una colonna a piatti a 40°C e pressione pari a 3 bar.

$$PM_{\text{HCl}} = 36.50 \text{ g/mol}$$

$$\sigma_{\text{H}_2\text{O}} = 70 \text{ dyne/cm}$$

$$F_{\text{HA}} = 1$$

$$F_{\text{F}} = 1$$

La costante di Henry (H) a 298 K è pari a 19 bar e il valore di $\left(\frac{d\ln H}{dT^{-1}}\right) = 600 \text{ K}$, e vale:

$$H(T) = H_{298\text{K}}^0 \cdot e^{\left[-\left(\frac{d\ln H}{dT^{-1}}\right)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right]}$$

Calcolare la portata d'acqua necessaria – pari a 1.5 volte la portata minima - e dimensionare la colonna considerando una spaziatura di 24 in.

$$T = 40 + 273.15 = 313.15 \text{ K}$$

$$H(T) = H_{298\text{K}}^0 \cdot e^{\left[-\left(\frac{d\ln H}{dT}\right)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right]}$$

$$H(T = 313.15 \text{ K}) = 19 \cdot e^{\left[-600 \cdot \left(\frac{1}{313.15} - \frac{1}{298.15}\right)\right]} = 20.94 \text{ bar}$$

$$K = \frac{H(T)}{P} = \frac{20.94 \text{ bar}}{3 \text{ bar}} = 6.981$$

$$PV'_{\text{vol}} = nRT$$

$$V' = \frac{P \cdot V'_{\text{vol}}}{RT} = \frac{20000 \text{ Nm}^3/\text{h} \cdot \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \cdot 1 \text{ atm}}{0.082 \frac{\text{L atm}}{\text{K mol}} \cdot \frac{1000 \text{ mol}}{\text{kmol}} \cdot 273.15 \text{ K}} = 892.92 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$V_{\text{HCl}} = 100 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \cdot 20000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1}{1000000 \cdot 36.50} = 0.055 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$V = V' - V_{\text{HCl}} = 892.87 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$Y_{\text{N}+1} \approx y_{\text{N}+1} = \frac{V_{\text{HCl}}}{V'} = 6.14 \times 10^{-5}$$

$$C_{\text{HCl}} = 3 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \cdot \frac{1}{1000000 \cdot 36.50} = 8.22 \times 10^{-8} \frac{\text{kmol}}{\text{Nm}^3}$$

In prima approssimazione, vista la trascurabile quantità di acido cloridrico:

$$V_{1,\text{HCl}} \approx C_{\text{HCl}} \cdot V'$$

$$V_{1,\text{HCl}} \approx 8.22 \times 10^{-8} \frac{\text{kmol}}{\text{Nm}^3} \cdot 20000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} = 0.00164 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \ll 892.87 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$V'_1 = V = 892.87 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$Y_1 \approx y_1 = \frac{V_{1,\text{HCl}}}{V'_1} = \frac{0.00164}{892.87} = 1.84 \times 10^{-6}$$

$$X_{N,eq} = \frac{Y_{N+1}}{K} = \frac{0.0000614}{6.981} = 8.79 \times 10^{-6}$$

$$\left(\frac{L}{V}\right)_{\min} = \frac{Y_{N+1} - Y_1}{X_{N,eq}} = \frac{0.0000614 - 1.84 \times 10^{-6}}{8.79 \times 10^{-6}} = 6.672$$

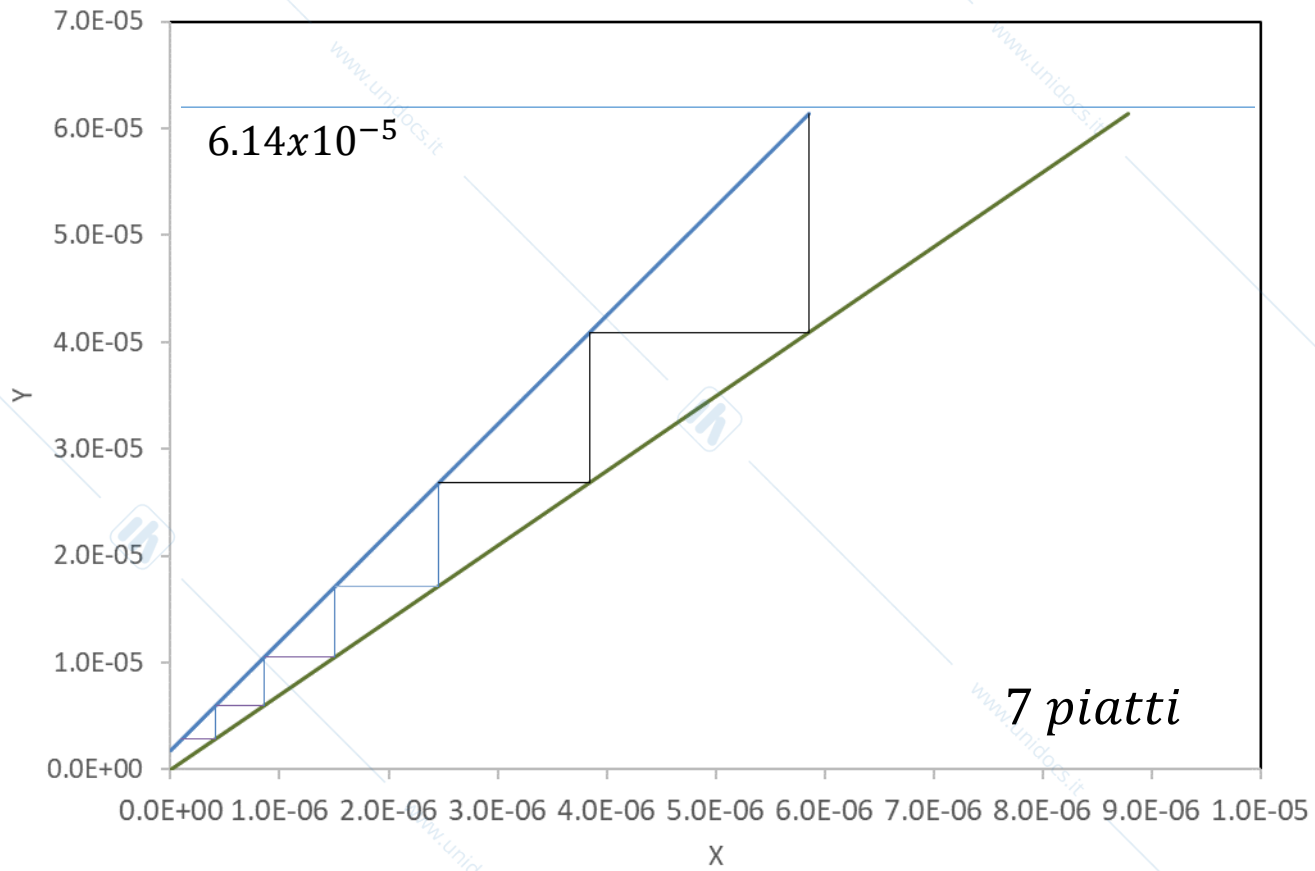
$$L_{\min} = \left(\frac{L}{G}\right)_{\min} \cdot V = 6046.71 \text{ kmol/h}$$

$$L = L_{\min} \cdot 1.5 = 9070.062 \text{ kmol/h}$$

$$\frac{L}{V} = 10.158$$

$$X_N \approx x_N = \frac{Y_{N+1} - Y_1}{L/V} = 5.86 \times 10^{-6}$$

Esercizio 5



$$A = \frac{L}{KV} = 1.455$$

$$N = \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{1}{A} \right) \left(\frac{y_{N+1}}{y_1} \right) + \frac{1}{A} \right]}{\ln(A)} = 6.6 \approx 7 \text{ piatti}$$

Dimensionamento colonna

$$U_f = C \cdot \left(\frac{\rho_L - \rho_f}{\rho_f} \right)^{0.5}$$

$$C = C_F \cdot F_\sigma \cdot F_{HA} \cdot F_F$$

$$F_F = 1.0$$

il sistema non produce schiuma

$$F_{HA} = 1.0$$

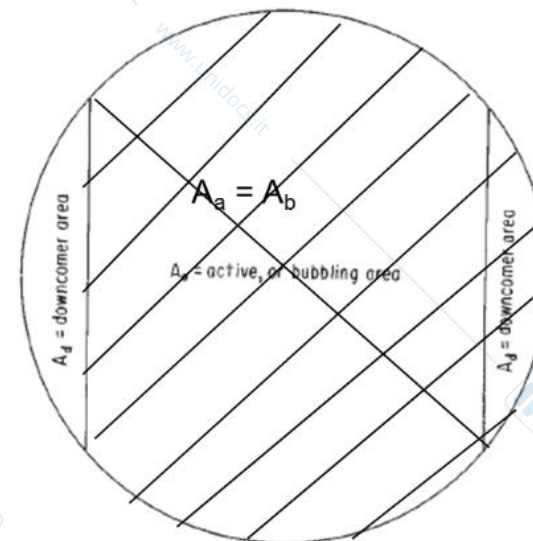
area dei fori è pari a 0.1 volte l'area attiva

A_h = area dei fori (hole)

A_a = area attiva

$$\frac{A_h}{A_a} \geq 0.1 \rightarrow F_{HA} = 1.0$$

$$\frac{A_h}{A_a} \leq 0.1 \rightarrow F_{HA} = 5 \left(\frac{A_h}{A_a} \right) + 0.5$$



Plan view

$$C = C_F \cdot F_\sigma \cdot F_{HA} \cdot F_F$$

tensione superficiale dell'olio

$$\sigma = 70 \text{ dyne/cm}$$

$$F_\sigma = \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{0.2} = \left(\frac{70}{20}\right)^{0.2} = 1.285$$

$$C = C_F \cdot 1.285$$

$$PM_V \approx PM_{aria}$$

$$PM_L \approx PM_{acqua}$$

$$\rho_V = \frac{n}{V} \cdot PM_V = \frac{P}{RT} \cdot PM_V$$

$$\rho_V = \frac{3 \cdot \frac{1}{1.01325} \frac{bar}{atm} \cdot 28.84}{0.082 \cdot 313.15} = 3.325 \text{ kg/m}^3$$

Per miscele ideali, la variazione di densità dovuta al soluto assorbito è in genere trascurata:

$$\rho_L \approx \rho_{L,solvente}$$

In alcuni casi viene fornita perché di difficile valutazione

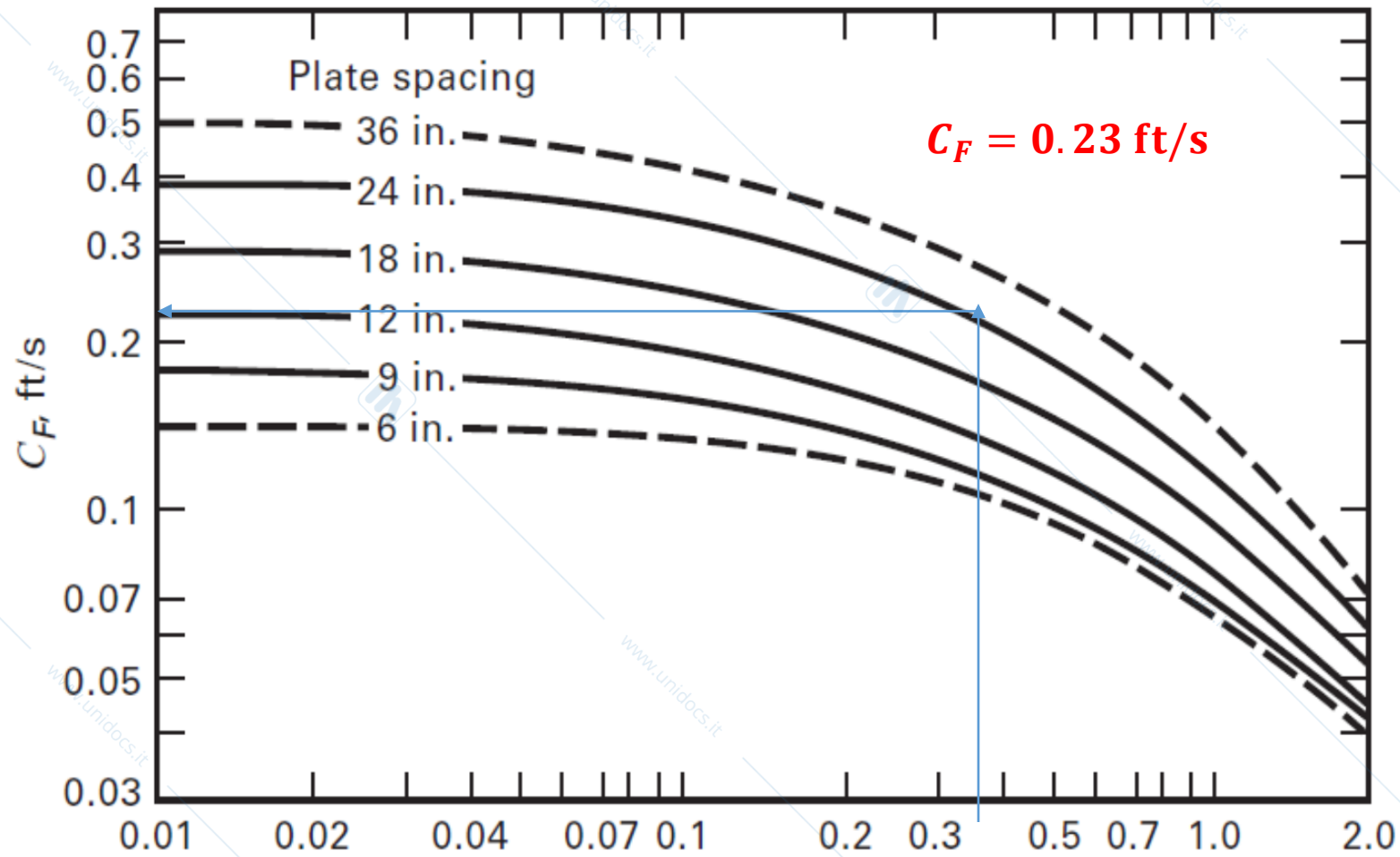
$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0,5}$$

$$L' = L + V' \cdot (y_{N+1} - y_1)$$

$$L' = 9070.062 + 892.35 \cdot (y_{N+1} - y_1) = 9070.133 \text{ kmol/h}$$

$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0,5} = 0.366$$

$$F_{LV} = 0.37$$



$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0,5}$$

Dimensionamento colonna

$$C = C_F \cdot F_\sigma \cdot F_{HA} \cdot F_F = 0.23 \cdot 1.285 = 0.295 \text{ ft/s}$$

$$\rho_f = \rho_V$$

$$U_f = C \cdot \left(\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right)^{0.5} = 5.116 \text{ ft/s}$$

$$U_f = 1.56 \text{ m/s}$$

$$\frac{A_d}{A} = \begin{cases} 0.1 & F_{LV} < 0.1 \\ 0.1 + \frac{F_{LV} - 0.1}{9} = 0.130 & 0.1 \leq F_{LV} = 0.37 \leq 1.0 \\ 0.2 & F_{LV} > 1.0 \end{cases}$$

Diametro del piatto

$$D_T = \sqrt{\frac{4 V' M_f}{0.8 \rho_f U_f \pi \left(1 - \frac{A_d}{A}\right)}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \left(\frac{892.925}{3600}\right) \cdot 28.84}{0.8 \cdot 3.325 \cdot 1.558 \cdot \pi \cdot (1 - 0.130)}} = 1.558 \text{ m}$$

Area del piatto

$$A_T = \frac{\pi D_T^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 1.59^2}{4} = 1.982 \text{ m}^2$$

Altezza della torre di assorbimento

$$H_T = 24'' \cdot 0.00254 = 4.267 \text{ m}$$

Risultati

N	7	Kremser
N	7	McCabe-Thiele
U_f	1.558	m/s
A_T	1.982	m ²
D_T	1.589	m
H_T	4.267	m

Una corrente di metano (CH_4 , 95%v) e propano (C_3H_8 , 5%v) viene trattata a 25°C e 30 bar con un olio puro, non volatile ($\text{PM} = 180$; $\rho = 810 \text{ kg/m}^3$).

Con riferimento a $7500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ di gas in ingresso, calcolare il numero di stadi ideali per ottenere una corrente di metano al 99.9% mol, con metodo grafico e con il metodo di Kremser, e le dimensioni della colonna (spaziatura: 24 in), utilizzando una portata di liquido pari a 1.8 volte la portata minima.

$$\sigma_{\text{olio}} = 30 \text{ dyne/cm}$$

$$F_{\text{HA}} = 1; F_{\text{F}} = 1$$

Costante di Henry (Propano/Olio, 25°C) = 12 bar

$$PM_{CH_4} = 12 + 4 = 16$$

$$PM_{C_3H_8} = 12 \cdot 3 + 8 = 44$$

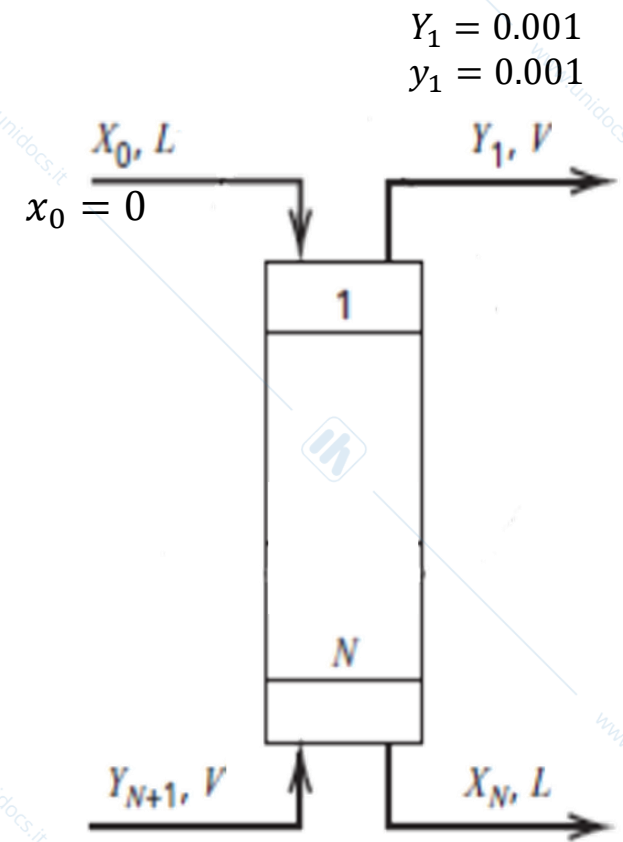
$$V' = \frac{P \cdot V'_{vol}}{RT} = \frac{7500 \frac{Nm^3}{h} \cdot \frac{1000 L}{m^3} \cdot 1 atm}{0.082 \frac{L atm}{K mol} \cdot \frac{1000 mol}{kmol} \cdot 273.15 K} = 334.63 \frac{kmol}{h}$$

$$y_{N+1} = 0.050$$

$$Y_{N+1} = \frac{y_{N+1}}{1 - y_{N+1}} = 0.052$$

$$V = V' \cdot (1 - y_{N+1})$$

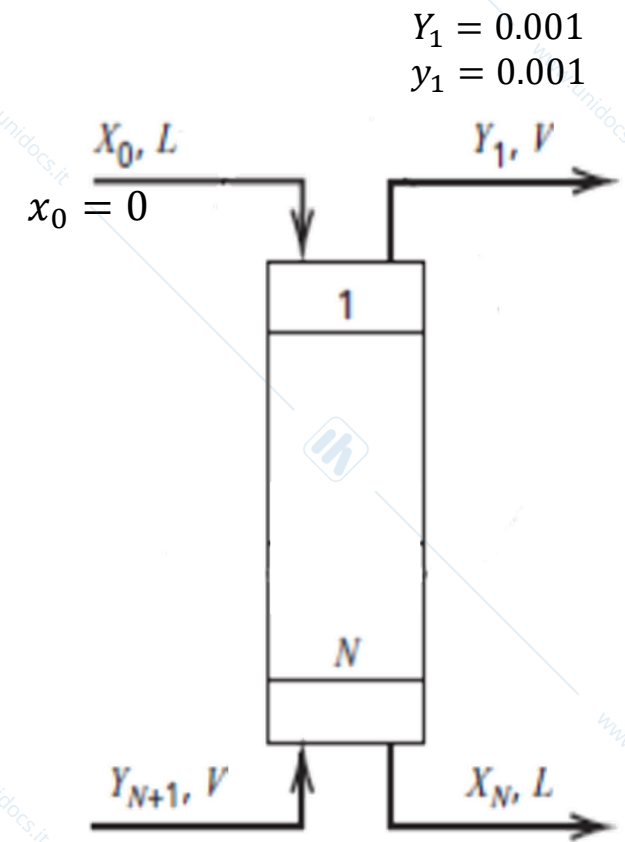
$$V = 334.63 \cdot (1 - 0.050) = 317.90 \frac{kmol}{h}$$



$$K = \frac{12 \text{ bar}}{30 \text{ bar}} = 0.4$$

$$x_{N,\text{eq}} = \frac{y_{N+1}}{K} = \frac{0.05}{0.4} = 0.132$$

$$X_{N,\text{eq}} = \frac{x_{N,\text{eq}}}{1 - x_{N,\text{eq}}} = 0.143$$



$$Y_1 = 0.001$$

$$y_1 = 0.001$$

$$V' = 334.63 \text{ kmol/h}$$

$$y_{N+1} = 0.050$$

$$Y_{N+1} = 0.052$$

$$\left(\frac{L}{V}\right)_{\min} = \frac{Y_{N+1} - Y_1}{X_{N,\text{eq}}} = \frac{0.052 - 0.001}{0.143} = 0.361$$

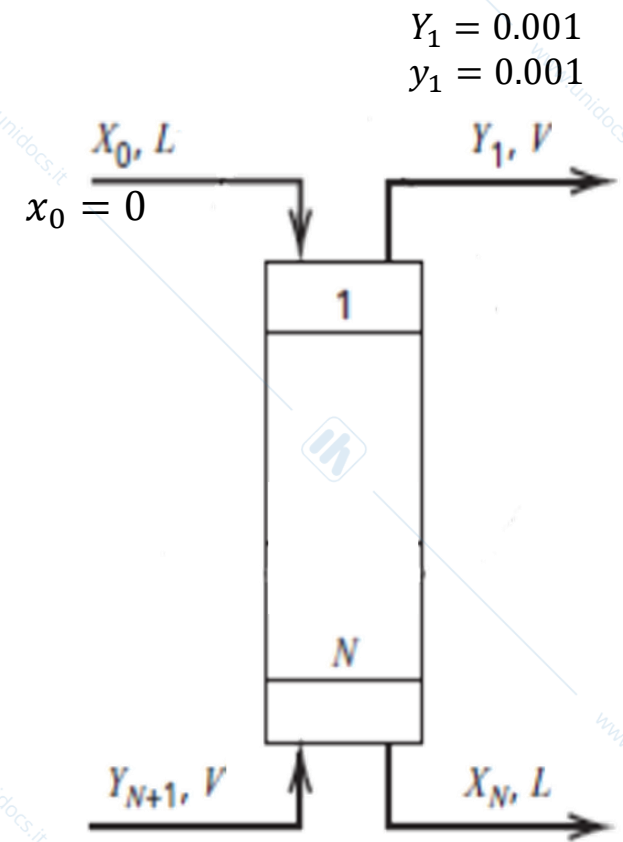
$$L_{\min} = \left(\frac{L}{G}\right)_{\min} \cdot V = 0.361 \cdot 317.90 = 114.76 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

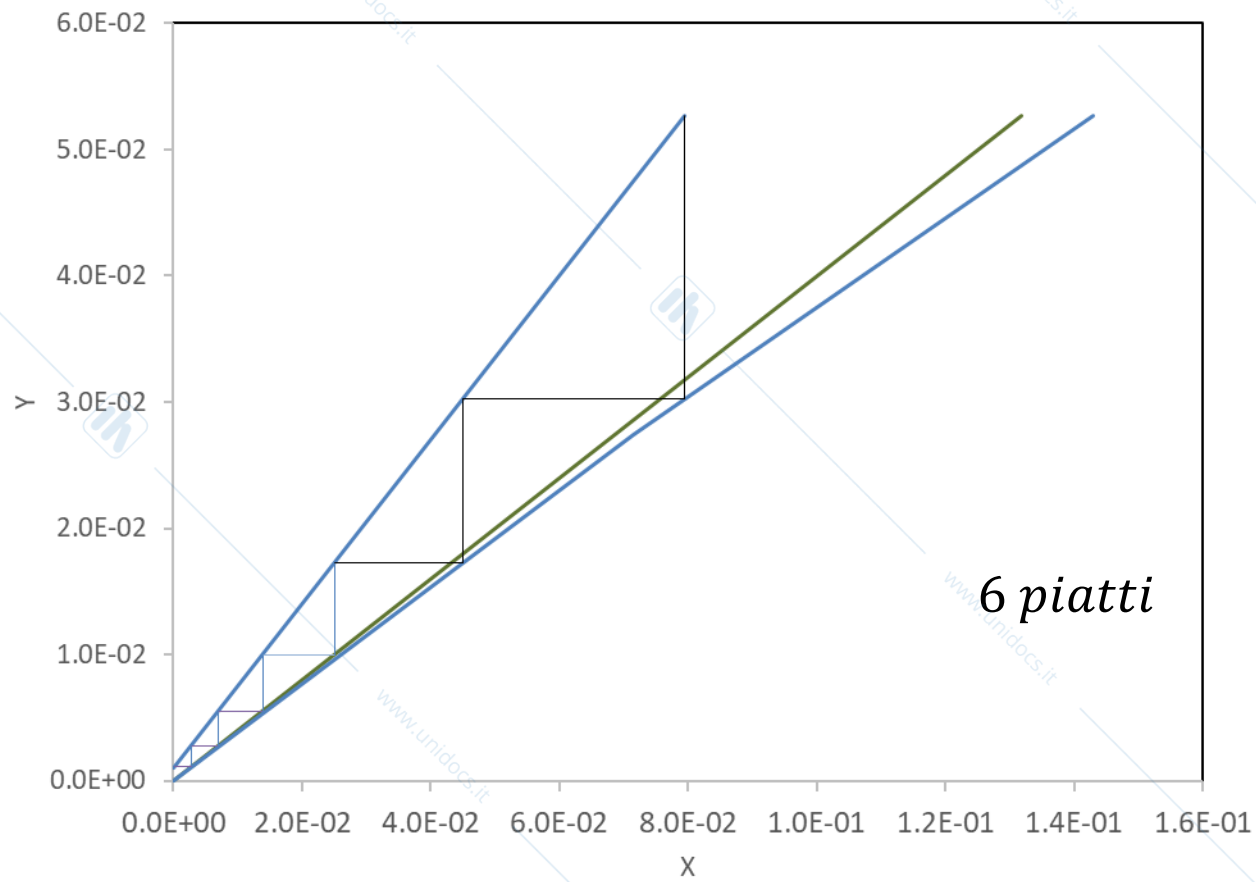
$$L = L_{\min} \cdot 1.8 = 206.57 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$\frac{L}{V} = 0.65$$

Costruzione della retta operativa

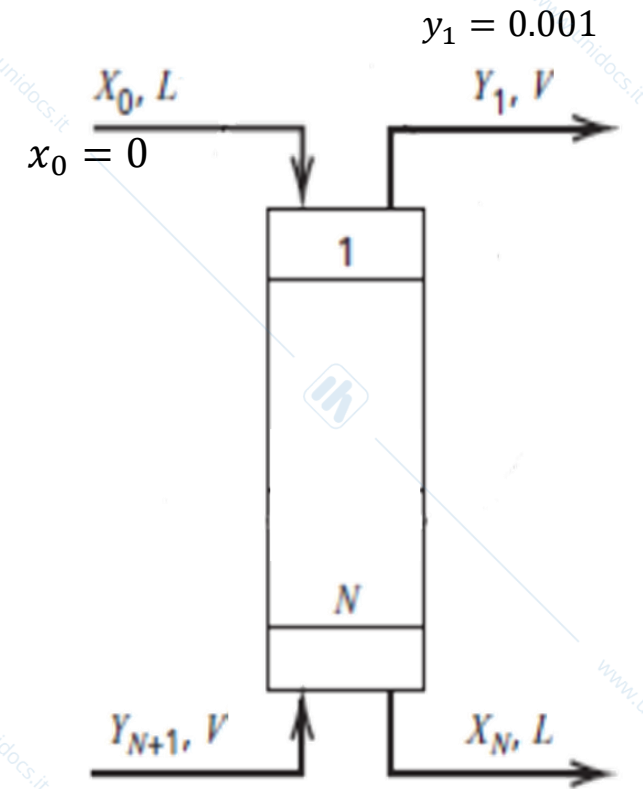
$$X_N = \frac{Y_{N+1} - Y_1}{\frac{L}{V}} = 0.0795$$





$$A = \frac{L}{KV} = 1.626$$

$$N = \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{1}{A} \right) \left(\frac{y_{N+1}}{y_1} \right) + \frac{1}{A} \right]}{\ln(A)} = 6.6 \approx 7 \text{ piatti}$$



$$V' = 334.63 \text{ kmol/h}$$

$$y_{N+1} = 0.050$$

Dimensionamento colonna

$$U_f = C \cdot \left(\frac{\rho_L - \rho_f}{\rho_f} \right)^{0.5}$$

$$C = C_F \cdot F_\sigma \cdot F_{HA} \cdot F_F$$

$$F_F = 1.0$$

il sistema non produce schiuma

$$F_{HA} = 1.0$$

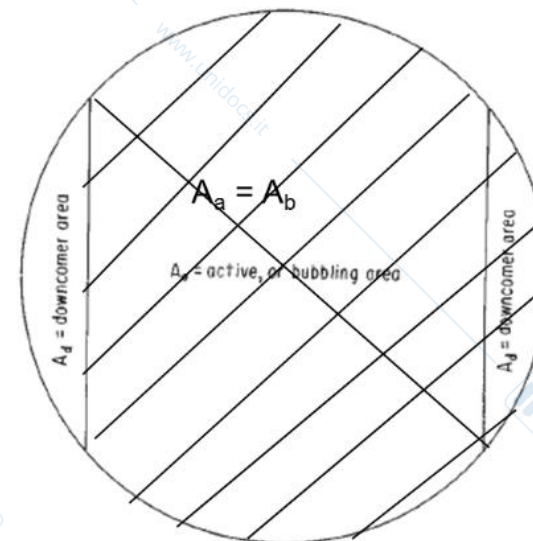
area dei fori è pari a 0.1 volte l'area attiva

A_h = area dei fori (hole)

A_a = area attiva

$$\frac{A_h}{A_a} \geq 0.1 \rightarrow F_{HA} = 1.0$$

$$\frac{A_h}{A_a} \leq 0.1 \rightarrow F_{HA} = 5 \left(\frac{A_h}{A_a} \right) + 0.5$$



Plan view

tensione superficiale dell'olio
 $\sigma = 30 \text{ dyne/cm}$

$$F_{\sigma} = \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{0.2} = \left(\frac{30}{20}\right)^{0.2} = 1.084$$

$$C = C_F \cdot F_{\sigma} \cdot F_{HA} \cdot F_F = C_F \cdot 1.084$$

$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0,5}$$

$$PM_V = \sum_i y_{N+1,i} \cdot PM_i$$

$$PM_V = 0.05 \cdot 44 + (1 - 0.05) \cdot 16 = 17.400$$

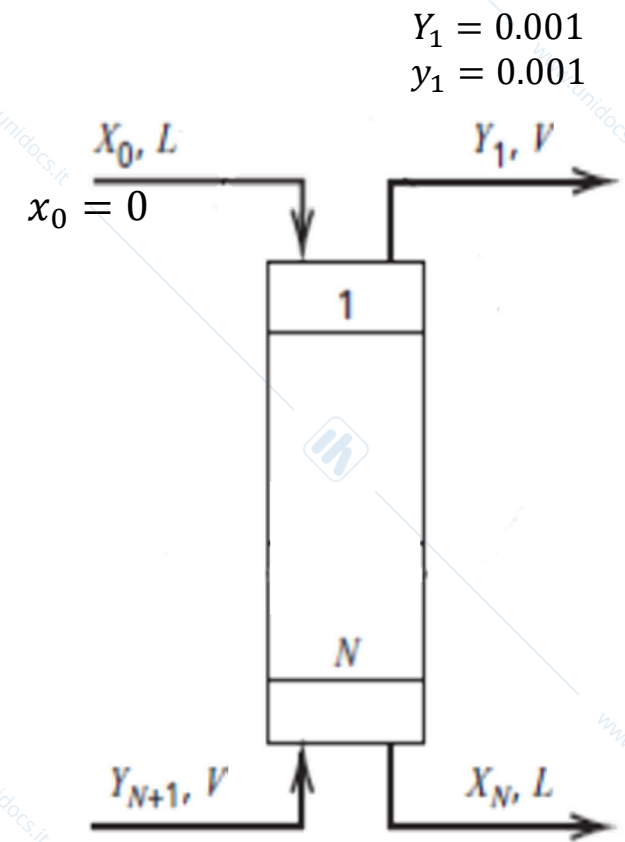
$$PM_L = \sum_i x_{N,i} \cdot PM_i$$

$$PM_L = 0.0736 \cdot 44 + (1 - 0.0736) \cdot 180 = 170.00$$

$$V' = 334.63$$

$$L' = L + V' \cdot (y_{N+1} - y_1)$$

$$L' = 206.57 + 334.63 \cdot (0.05 - 0.001) = 222.97 \text{ kmol/h}$$



$$Y_1 = 0.001$$

$$y_1 = 0.001$$

$$y_{N+1} = 0.050$$

$$Y_{N+1} = 0.052$$

$$\rho_v = \frac{n}{V} \cdot PM_V = \frac{P}{RT} \cdot PM_V$$

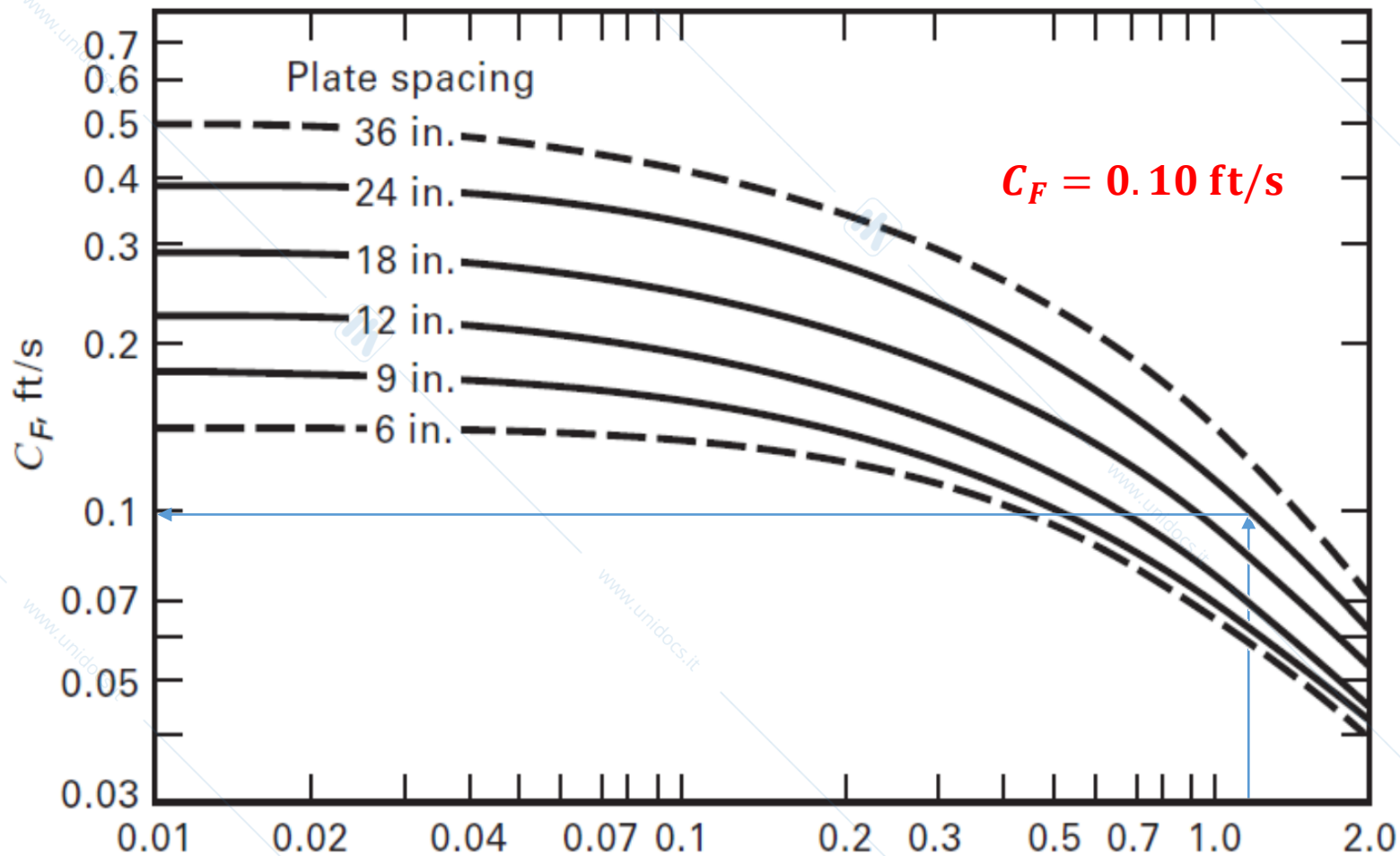
$$\rho_v = \frac{30 \text{ bar} \cdot \frac{100 \text{ kPa}}{\text{bar}}}{8.314 \frac{\text{l kPa}}{\text{mol K}} \cdot \frac{\text{m}^3}{1000 \text{ l}} \cdot 298.15 \text{ K}} \cdot 17.40 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \frac{\text{kg}}{1000 \text{ g}} = 21.07 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Per miscele ideali, la variazione di densità dovuta al soluto assorbito è in genere trascurata:

$$\rho_L \approx \rho_{L,\text{solvente}}$$

In alcuni casi viene fornita, perché di difficile valutazione

$$F_{LV} = F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0,5} = 1.05$$



$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0,5}$$

Dimensionamento colonna

$$C = C_F \cdot F_\sigma \cdot F_{HA} \cdot F_F = 0.10 \cdot 1.084 = 0.108 \text{ ft/s}$$

$$U_f = C \cdot \left(\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right)^{0.5} = 0.664 \text{ ft/s}$$

$$U_f = 0.202 \text{ m/s}$$

$$\frac{A_d}{A} = \begin{cases} 0.1 & F_{LV} < 0.1 \\ 0.1 + \frac{F_{LV} - 0.1}{9} & 0.1 \leq F_{LV} \leq 1.0 \\ 0.2 & F_{LV} = 1.050 > 1.0 \end{cases}$$

Diametro del piatto

$$D_T = \sqrt{\frac{4 V' M_f}{0.8 \rho_f U_f \pi \left(1 - \frac{A_d}{A}\right)}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \left(\frac{334.63}{3600}\right) \cdot 44}{0.8 \cdot 21.07 \cdot 0.202 \cdot \pi \cdot (1 - 0.200)}} = 0.869 \text{ m}$$

Area del piatto

$$A_T = \frac{\pi D_T^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 0.869^2}{4} = 0.593 \text{ m}^2$$

Altezza della torre di assorbimento

$$H_T = 24'' \cdot 0.00254 = 4.267 \text{ m}$$

Risultati

N	7	Kremser
N	6	McCabe-Thiele
u_f	0.202	m/s
A_T	0.593	m ²
D_T	0.869	m
H_T	4.267	m

Aria inquinata da toluene (C_7H_8 ; $PM = 92 \text{ g/mol}$) deve essere assorbita in un olio non volatile ($PM = 200$; $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$; $\sigma_{\text{olio}} = 20 \text{ dyne/cm}$).

Nell'aria entrante è presente una concentrazione in massa di toluene pari a 100 mg/m^3 .

L'olio non contiene toluene.

Si vuole assorbire il 99.5% del soluto in una colonna a piatti operante a $P = 1 \text{ bar}$ e $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Con riferimento a 100 kmol/h di gas, si dimensiona la colonna (spaziatura $24''$, $L = 2 L_{\text{min}}$) nell'ipotesi di gas perfetto e miscele ideali.

La relazione della tensione di vapore (relazione di Antoine) è:

$$\log_{10} P^o [\text{kPa}] = a - \frac{b}{T [^\circ\text{C}] + c}$$

$$a = 16.0137 ; b = 3096.52 ; c = - 53.7$$

$$F_{\text{HA}} = 1 ; F_{\text{F}} = 1$$

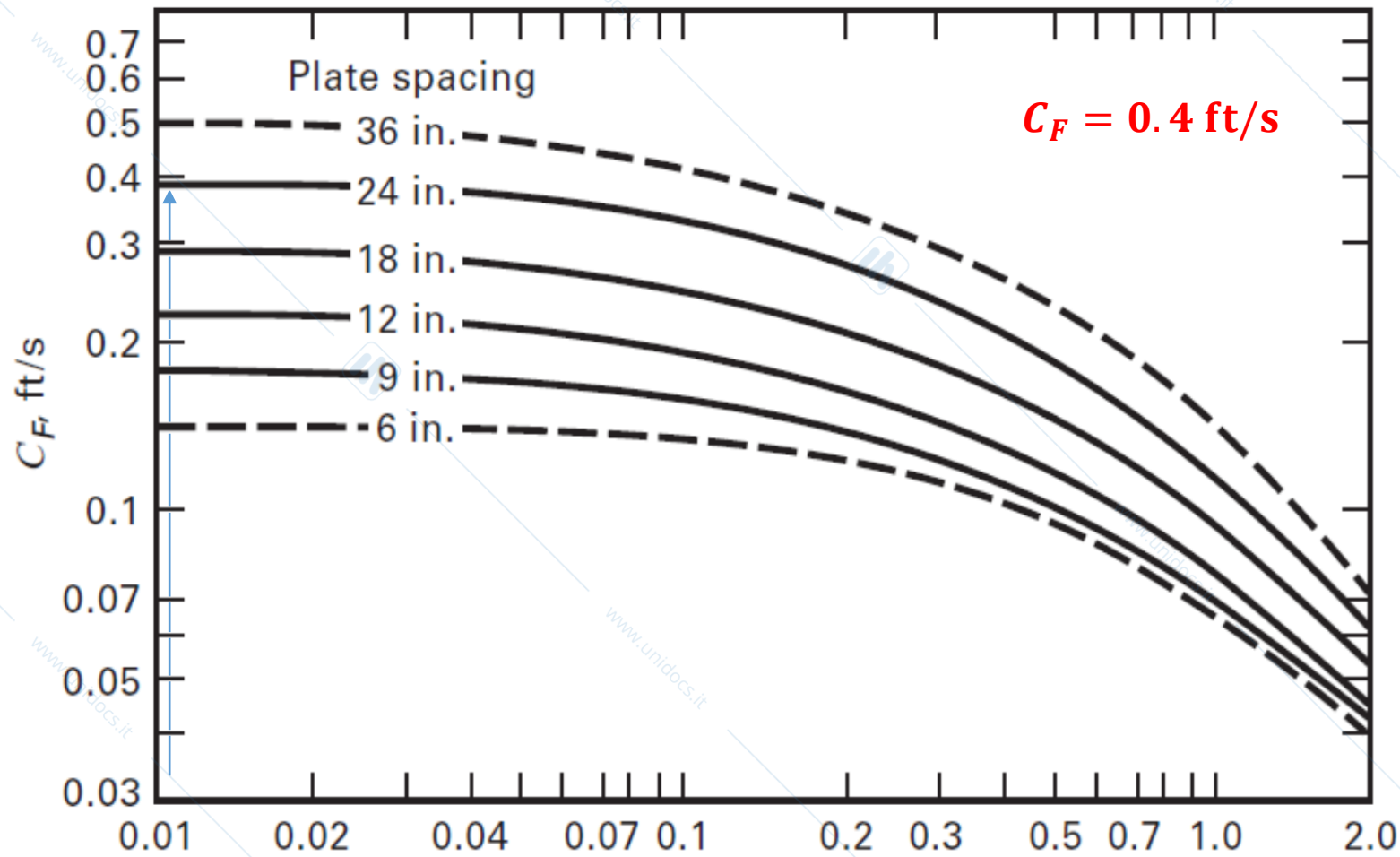
Equazione di Antoine

$$\log_{10} P^o [kPa] = a - \frac{b}{T[^\circ C] + c} = 16.0137 - \frac{3096.52}{25 - 53.7} = 2.093 \text{ kPa}$$

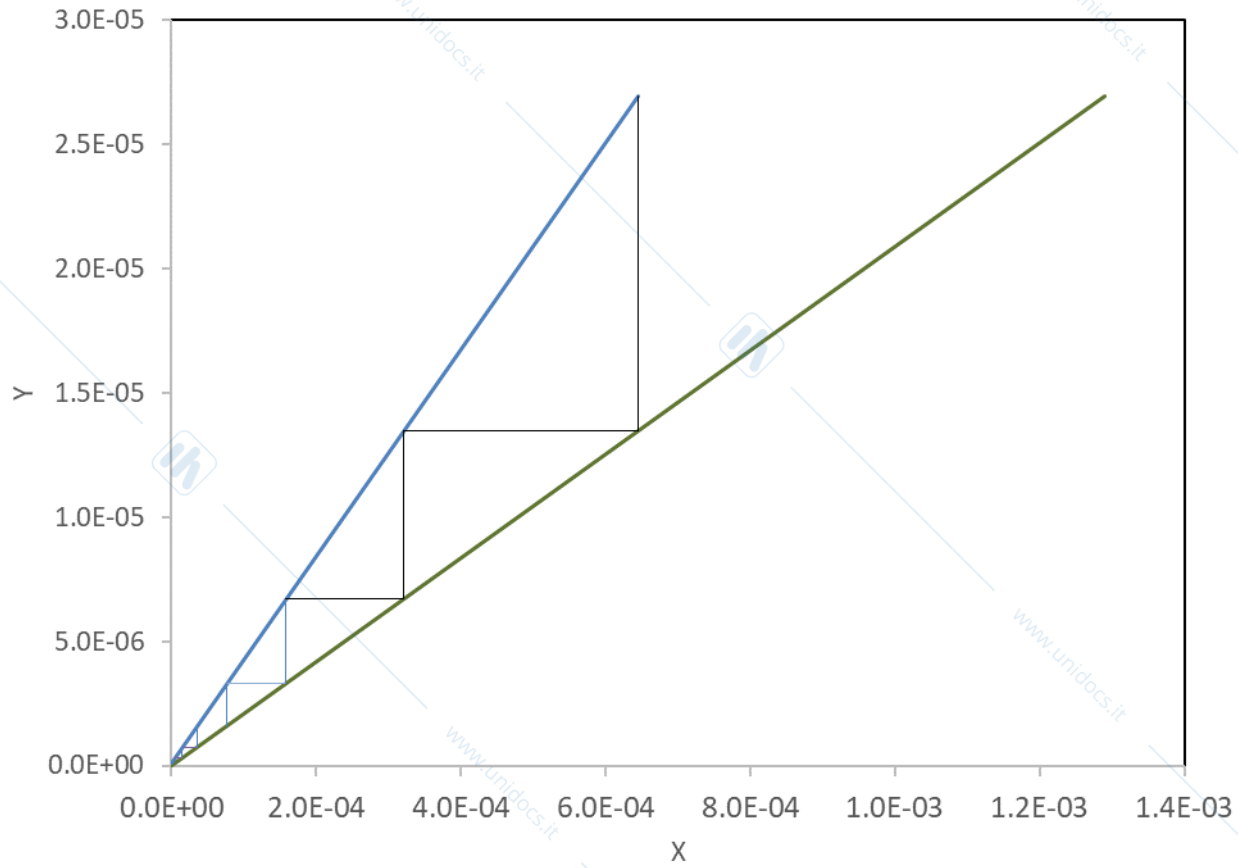
In mancanza della costante di Henry, la tensione di vapore identifica una relazione di Raoult:

$$K = \frac{y}{x} = \frac{P^o}{P} = \frac{2.093}{100} = 0.0209$$

$$F_{LV} = 0.01$$



$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0,5}$$



Risultati

N	7	Kremser
N	7	McCabe-Thiele
U_f	3.384	m/s
A_T	0.282	m ²
D_T	0.600	m
H_T	4.267	m

Da una corrente d'aria di $1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ occorre rimuovere l'Acido Cloridrico (HCl , $\text{PM} = 36.5$) presente con una concentrazione pari a $800 \text{ mg}/\text{Nm}^3$, fino a un valore di $2 \text{ mg}/\text{Nm}^3$.

L'operazione viene effettuata tramite acqua in una colonna a piatti a 25°C e pressione pari a 2 bar.

Calcolare la portata d'acqua necessaria – pari a 3 volte la portata minima - e dimensionare la colonna considerando una spaziatura di 24 in.

HCl:

$$y = 0.36 x$$

$\rho_{\text{sol}} \text{ acqua acida}$

$$1030 \text{ kg}/\text{m}^3$$

Fattori foaming e di attrito unitari (FF, FHA)

Tensione superficiale dell'acqua σ : $70 \text{ dyne}/\text{cm}$

$$PV'_{\text{vol}} = nRT$$

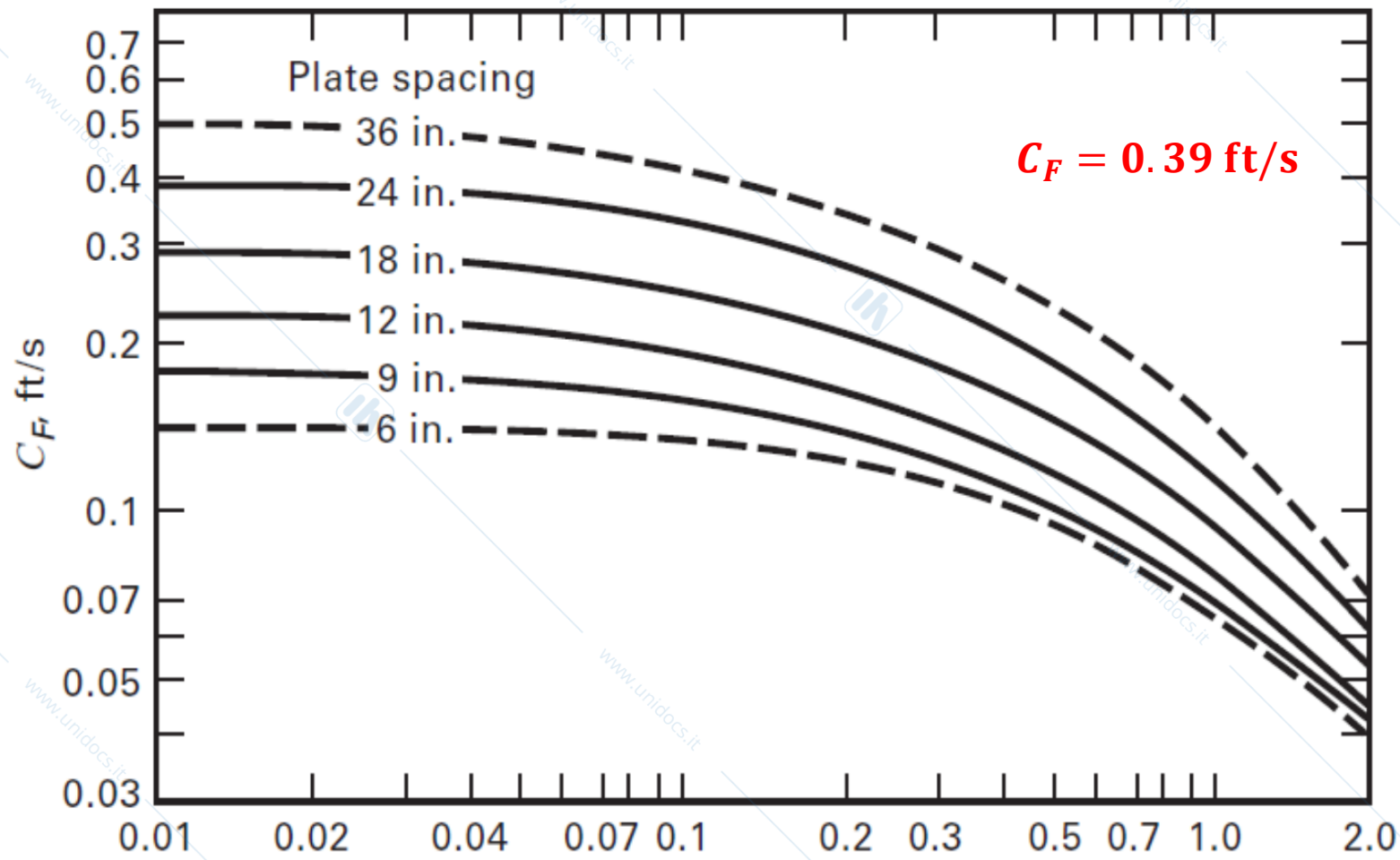
$$V' = \frac{P \cdot V'_{\text{vol}}}{RT} = \frac{1000 \text{ Nm}^3/\text{h} \cdot \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \cdot 1 \text{ atm}}{0.082 \frac{\text{L atm}}{\text{K mol}} \cdot \frac{1000 \text{ mol}}{\text{kmol}} \cdot 273.15 \text{ K}} = 44.618 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$V_{\text{HCl}} = 800 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \cdot 1000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1}{1000000 \cdot 36.50} = 0.0219 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

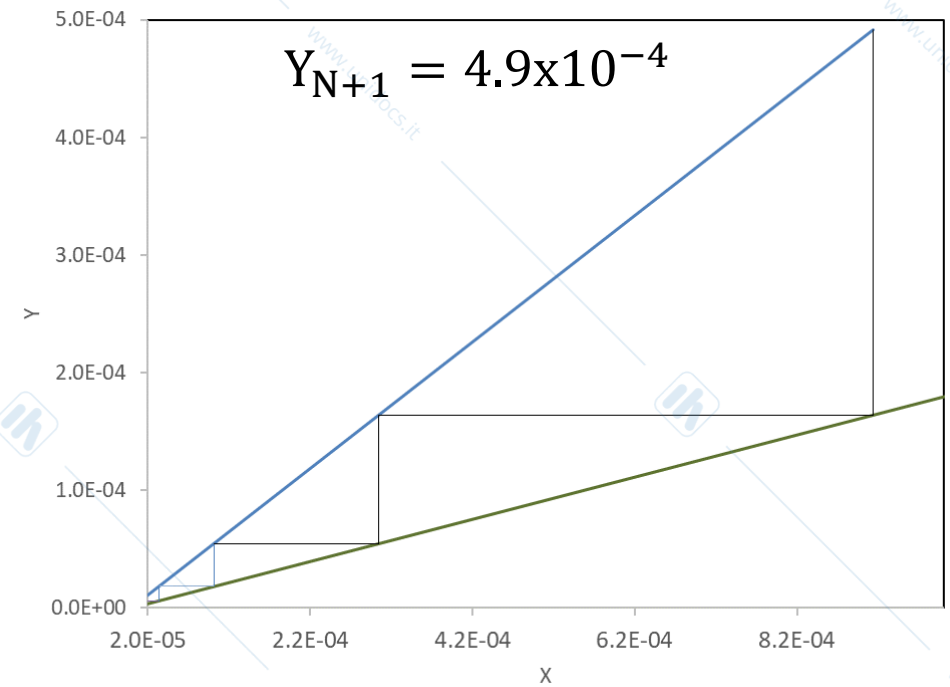
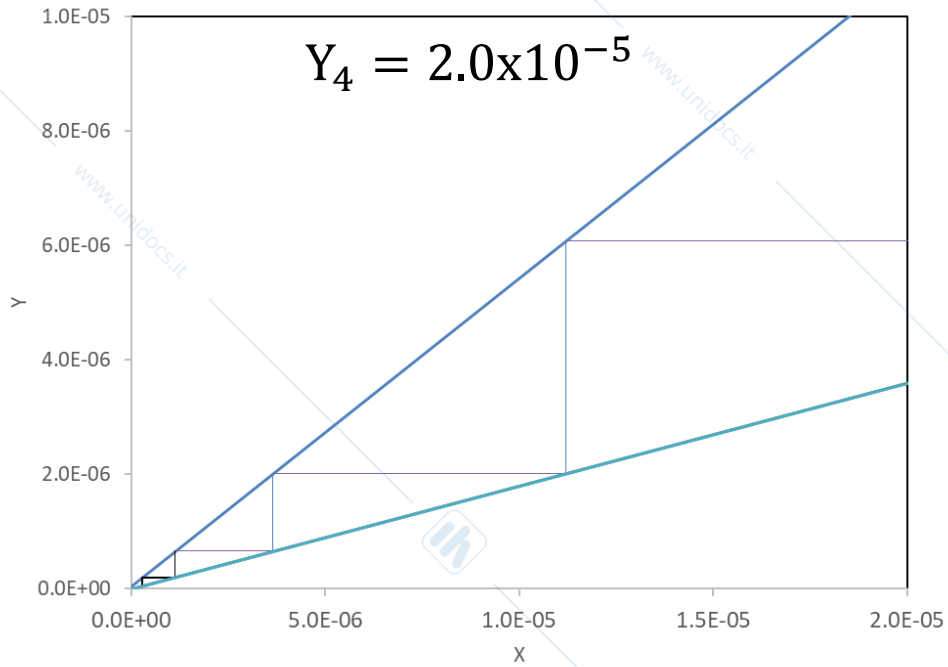
$$V = V' - V_{\text{HCl}} = 44.5956 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$Y_{\text{N}+1} \approx y_{\text{N}+1} = \frac{V_{\text{HCl}}}{V'} = 4.9 \times 10^{-4}$$

$$F_{LV} = 0.016$$



$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L}\right)^{0,5}$$



Costruzione su 2 sezioni, piatti = 8

Risultati

N	8	Kremser
N	8	McCabe-Thiele
U_f	3.205	m/s
A_T	0.066	m ²
D_T	0.291	m
H_T	4.877	m

Le richieste ambientali stanno spingendo sempre più verso tecniche di purificazione di Syngas provenienti dalla gassificazione di carbone e biomasse. Tra gli altri, la rimozione dei composti di zolfo, quali il Disolfuro di Carbonio (CS_2 , $\text{PM} = 76.14$), può essere ottenuta con torri di assorbimento a piatti con olio ($\text{PM} = 180 \text{ g/mol}$, densità $\rho = 0.81 \text{ g/cm}^3$).

Una miscela costituita da CS_2 alla concentrazione del 6.5% in moli in azoto (N_2) alle condizioni atmosferiche ($P = 1 \text{ bar}$; $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$), con portata pari a $1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$, si tratta con olio fino a ridurre la concentrazione di CS_2 allo 0.5% in moli.

Si assume che le soluzioni siano ideali. La tensione di vapore del CS_2 è pari a 366 mmHg.

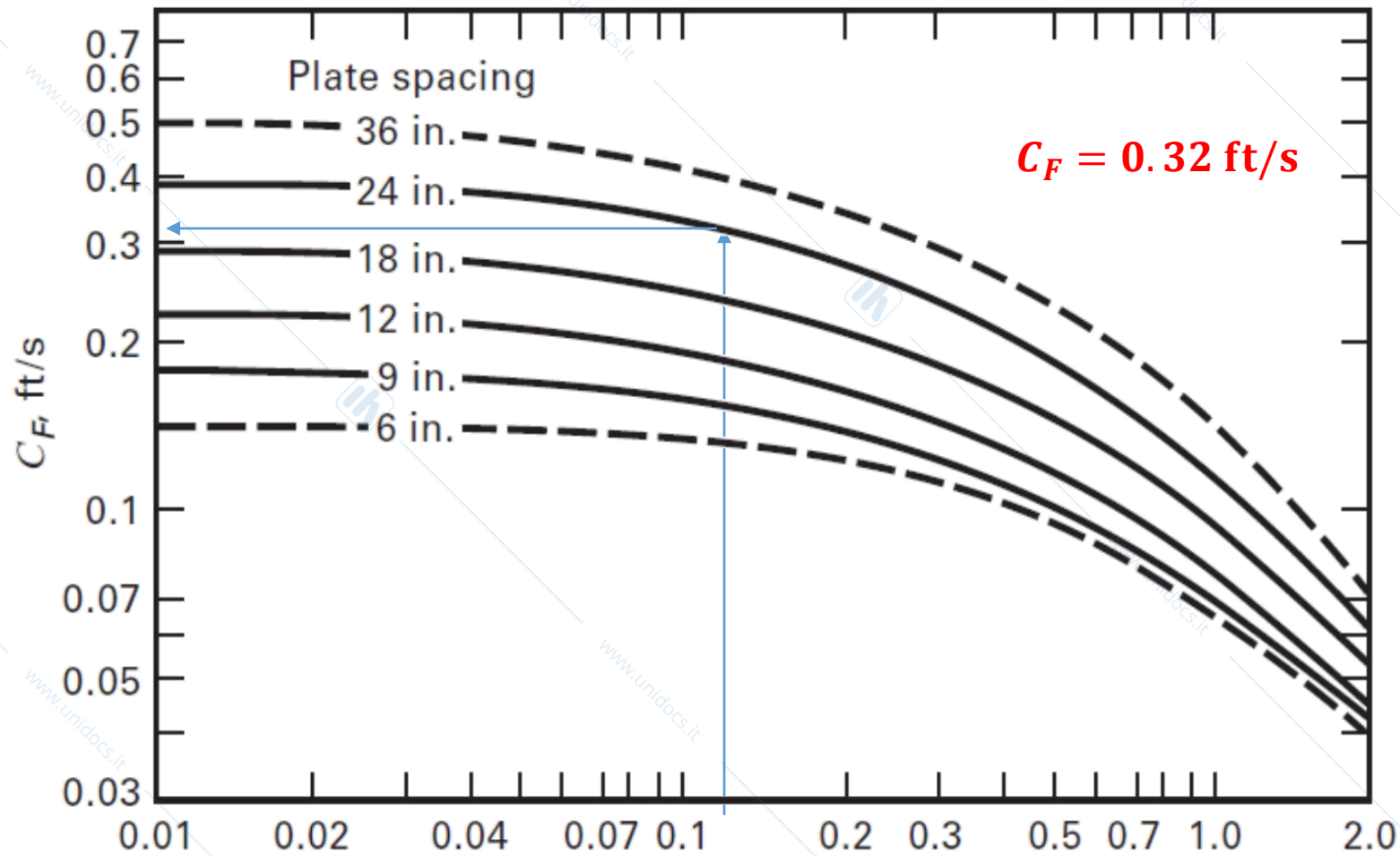
Calcolare il numero di stadi ideali con il metodo grafico utilizzando una portata di liquido pari al doppio della portata minima, e con il metodo di Kremser.

Valutare le dimensioni della colonna (spaziatura: 24 in).

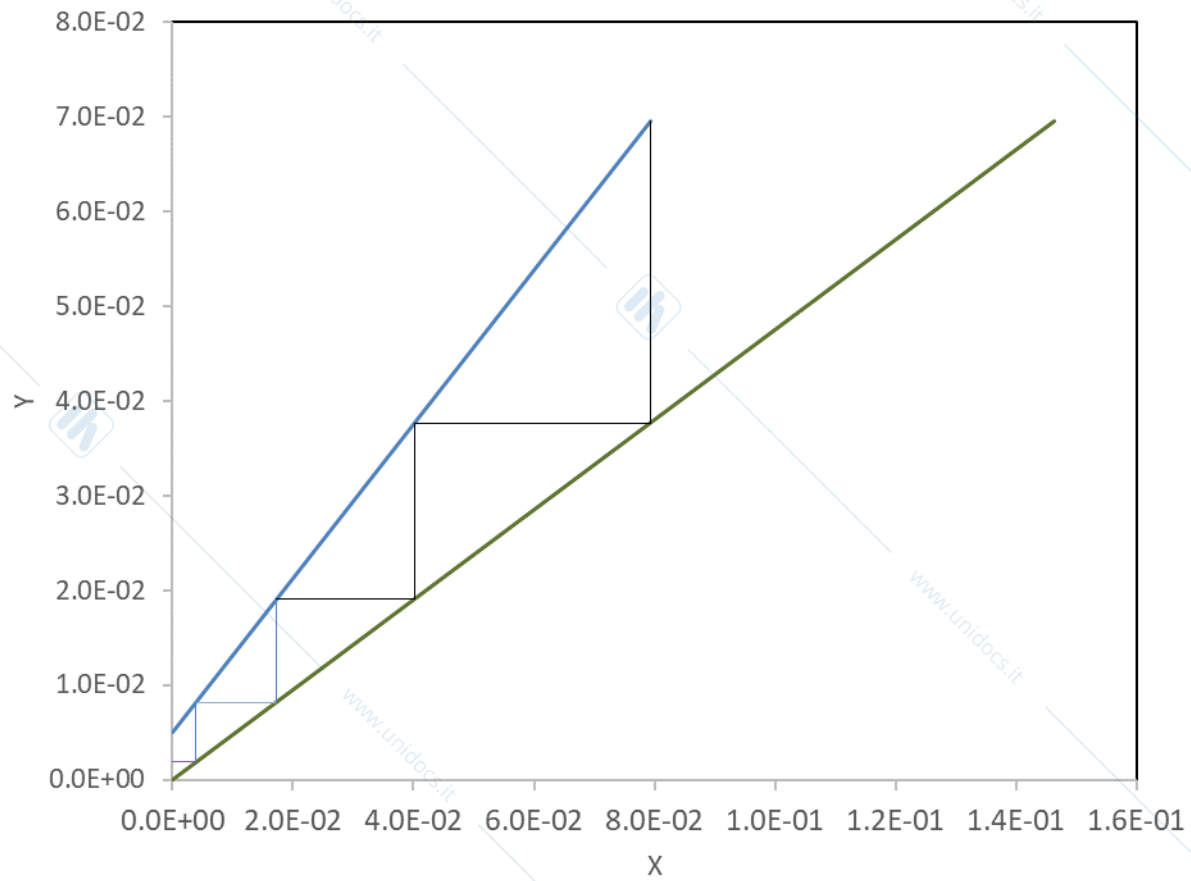
Tensione superficiale dell'olio σ : 30 dyne/cm

Fattori foaming e di attrito ai fori unitari (FF, FHA)

$$F_{LV} = 0.181$$



$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L}\right)^{0.5}$$



Risultati

N	4	Kremser
N	4	McCabe-Thiele
U_f	2.6457	m/s
A_T	0.158	m ²
D_T	0.449	m
H_T	2.438	m

Si consideri l'assorbimento in Acqua di Acido Cloridrico (HCl, PM = 36.50) in una colonna a piatti operante a $P = 1$ bar e $T=25^{\circ}\text{C}$.

La corrente gassosa, costituita da aria e acido cloridrico (HCl, PM=36), ha una portata di $2200 \text{ Nm}^3/\text{h}$; l'inquinante è presente in ingresso con una frazione molare pari a 8 %.

La colonna opera con 8 piatti reali.

Calcolare, ipotizzando di utilizzare acqua pura, la composizione del gas uscente nell'ipotesi che la colonna permetta di assorbire il 98 % dell'HCl entrante ($RA = 0.98$), la portata minima di liquido corrispondente, e progettare la colonna di assorbimento (Spacing: 18").

Costante di Henry (HCl/Acqua, bar @25°C): $Y = 0.36 X$

Tensione superficiale dell'acqua σ : 70 dyne/cm

Fattori foaming e di attrito (F_F, F_{HA}) ai fori unitari

$$y_{N+1} = 0.080$$

$$Y_{N+1} = \frac{y}{1-y} = 0.087$$

Rapporto di Assorbimento RA

$$RA = \frac{n_{sol,ass}}{n_{sol,in}} = \frac{n_{sol,in} - n_{sol,out}}{n_{sol,in}} = \frac{VY_{N+1} - VY_1}{VY_{N+1}} = \frac{Y_{N+1} - Y_1}{Y_{N+1}} = 0.98$$

$$Y_1 = Y_{N+1} \cdot (1 - 0.98) = 0.0017$$

$$y_1 = \frac{Y_1}{1 + Y_1} = 0.0017$$

$$V'_{vol} = 2200 \frac{Nm^3}{h}$$

$$PV'_{vol} = nRT$$

$$V' = \frac{P \cdot V'_{vol}}{RT} = \frac{2200 \cdot 100000}{8314 \cdot 273.15} = 98.16 \text{ kmol/h}$$

$$V = V' \cdot (1 - y_{N+1})$$

$$V = 44.62 \cdot (1 - 0.080) = 90.31 \text{ kmol/h}$$

$$N = \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{1}{A}\right) \left(\frac{y_{N+1}}{y_1}\right) + \frac{1}{A} \right]}{\ln(A)}$$

$$A = 1.5 (> 1)$$

$$N = \frac{\ln \left(46.08 \cdot \left(1 - \frac{1}{1.5}\right) + \frac{1}{1.5} \right)}{\ln(1.5)} = 6.84 < 8$$

$$A = 1.25 (> 1)$$

$$N = \frac{\ln \left(46.08 \cdot \left(1 - \frac{1}{1.25}\right) + \frac{1}{1.25} \right)}{\ln(1.25)} = 10.3 < 8$$

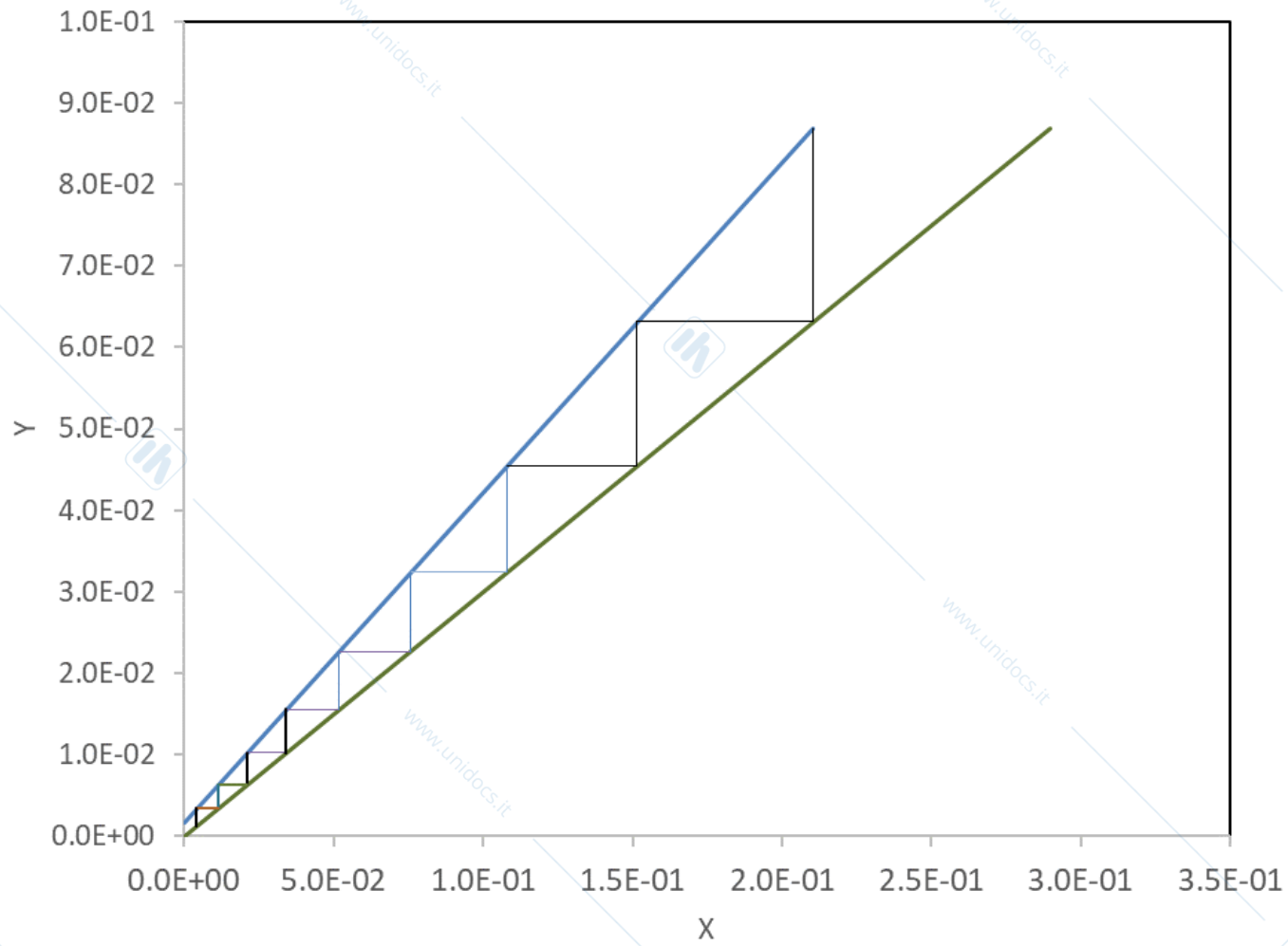
$$A = 1.35 \rightarrow N = 8.4$$

$$A = 1.35 = \frac{1}{K} \frac{L}{V}$$

$$\frac{L}{V} = 0.3 \cdot 1.35 = 0.405$$

$$L = 0.405 \cdot 90.31 \hat{=} 36.54 \text{ kmol/h}$$

Esercizio 10



Dimensionamento colonna

$$U_f = C \left(\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right)^{0.5}$$

$$C = C_F \cdot F_\sigma \cdot F_{HA} \cdot F_F$$

$$F_F = 1.0$$

il sistema non produce schiuma

$$F_{HA} = 1.0$$

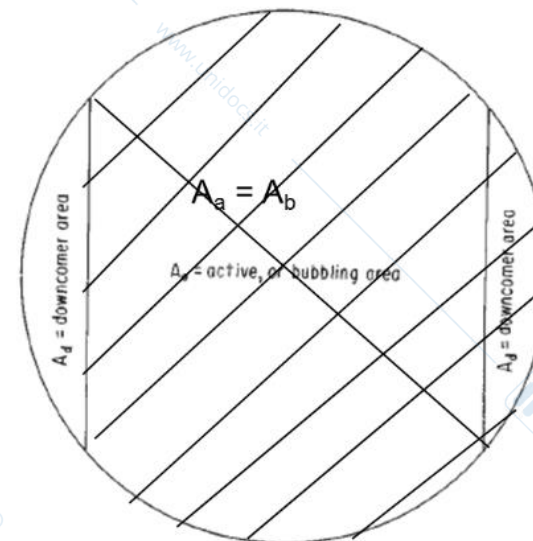
area dei fori è pari a 0.1 volte l'area attiva

A_h = area dei fori (hole)

A_a = area attiva

$$\frac{A_h}{A_a} \geq 0.1 \rightarrow F_{HA} = 1.0$$

$$\frac{A_h}{A_a} \leq 0.1 \rightarrow F_{HA} = 5 \left(\frac{A_h}{A_a} \right) + 0.5$$



Plan view

$$C = C_F \cdot F_\sigma \cdot F_{HA} \cdot F_F$$

$$F_\sigma = \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{0.2} = \left(\frac{70}{20}\right)^{0.2} = 1.285$$

$$C = C_F \cdot 1.2854$$

La densità della miscela di liquido ρ_L composta da elementi i -esimi con frazione in massa pari a ω :

$$\frac{1}{\rho_L} = \sum_i \frac{\omega_{L,i}}{\rho_{L,i}}$$

Conversione da frazioni molari a frazioni in massa

$$\omega_{L,i} = \frac{x_i \cdot PM_i}{\sum_i x_i \cdot PM_i}$$

$$X_N = \frac{Y_{N+1} - Y_N}{0.42} = 0.205$$

$$x_N = \frac{X_N}{1 + X_N} = 0.170$$

$$PM_V = \sum_i y_{N+1,i} \cdot PM_i = 29.453$$

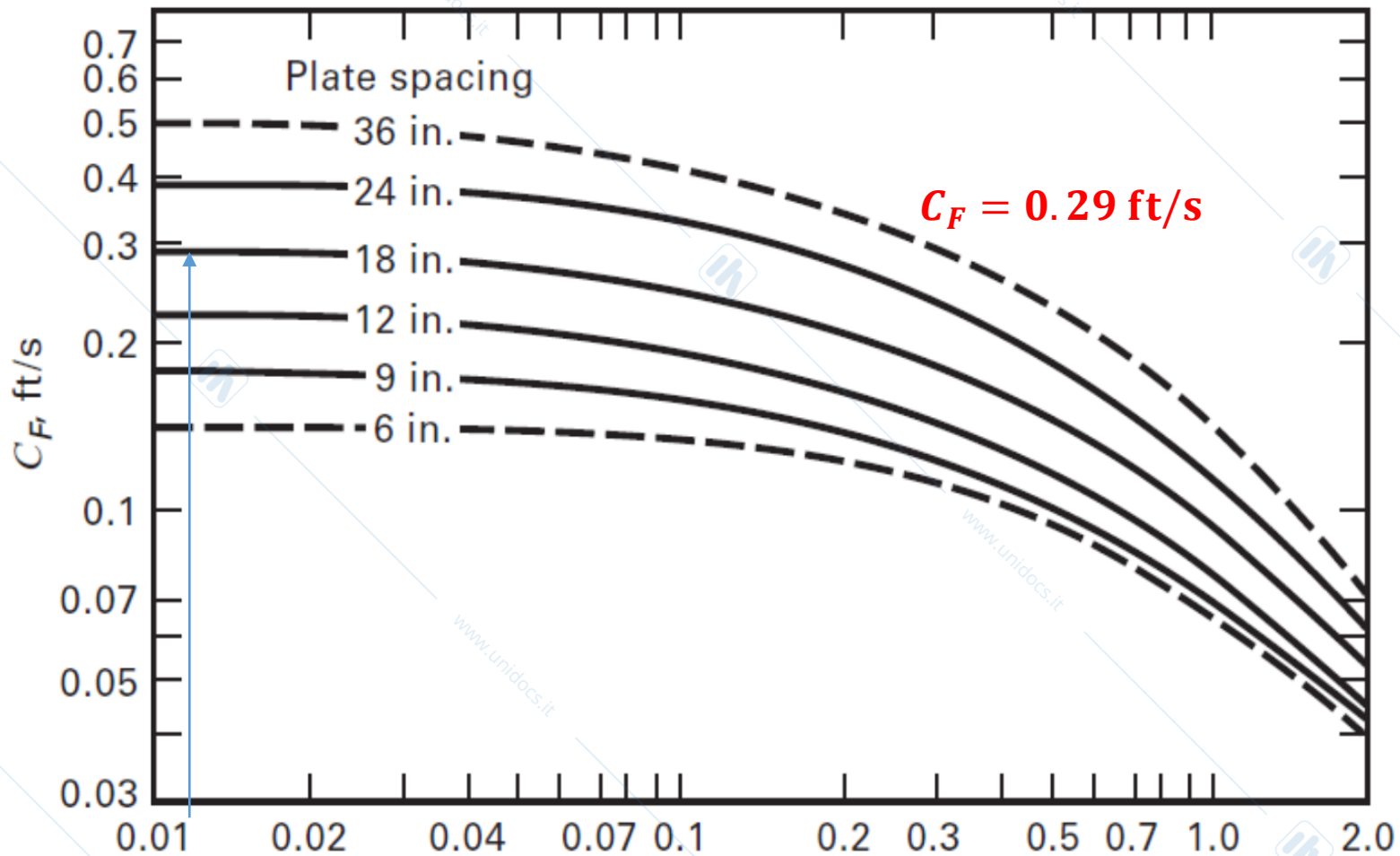
$$PM_L = \sum_i x_{N,i} \cdot PM_i = 21.142$$

$$\rho_v = \frac{P}{RT} \cdot PM_V = 1.189 \text{ kg/m}^3$$

$$L' = L + V' \cdot (y_{N+1} - y_1) = 44.22 \text{ kmol/h}$$

$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{0,5} = 0.011$$

$$F_{LV} = 0.011$$



$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0.5}$$

$$C = C_F \cdot F_\sigma \cdot F_{HA} \cdot F_F = ft/s$$

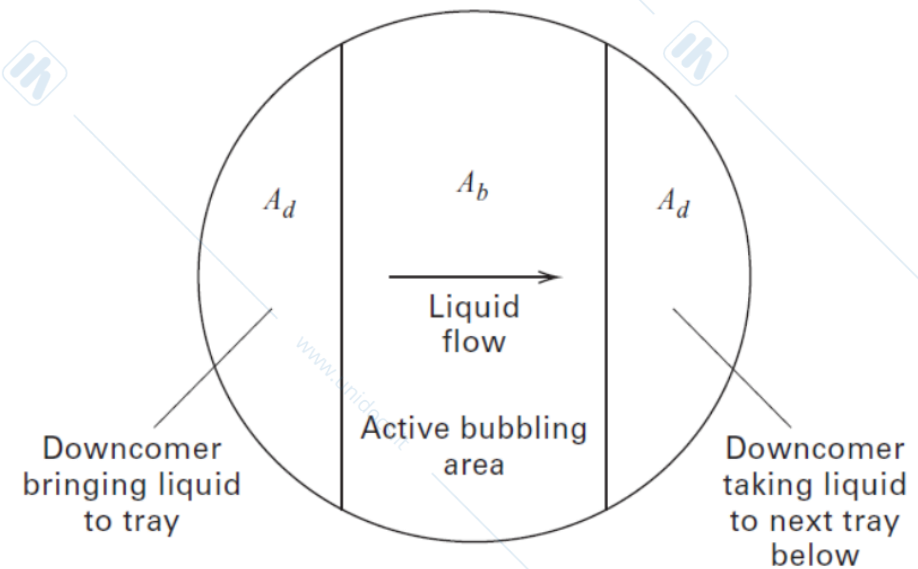
$$\rho_f = \rho_V$$

$$U_f = C \left(\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right)^{0.5} = 10.80 \text{ ft/s}$$

$$U_f = 3.29 \text{ m/s}$$

$$F_{LV} = 0.01 > 0.1 \rightarrow \frac{A_d}{A} = 0.1$$

$$\frac{A_d}{A} = \begin{cases} 0.1 & F_{LV} < 0.1 \\ 0.1 + \frac{F_{LV} - 0.1}{9} & 0.1 \leq F_{LV} \leq 1.0 \\ 0.2 & F_{LV} > 1.0 \end{cases}$$



$$D_T = \sqrt{\frac{4 V' M_f}{0.8 \rho_f u_f \pi \left(1 - \frac{A_d}{A}\right)}} = 0.603 \text{ m}$$

$$A_T = \frac{\pi D_T^2}{4} = 0.285 \text{ m}^2$$

$$H_T = 8 \cdot 18'' \cdot 0.00254 = 4.115 \text{ m}$$

Risultati

N	9	Kremser
N	9	McCabe-Thiele
U_f	3.288	m/s
A_T	0.285	m ²
D_T	0.603	m
H_T	4.115	m

$$A = \frac{L}{KV}$$

$$N = \frac{\ln\left[\left(1 - \frac{1}{A}\right)\left(\frac{y_{N+1} - y_1^*}{y_1 - y_1^*}\right) + \frac{1}{A}\right]}{\ln(A)}$$

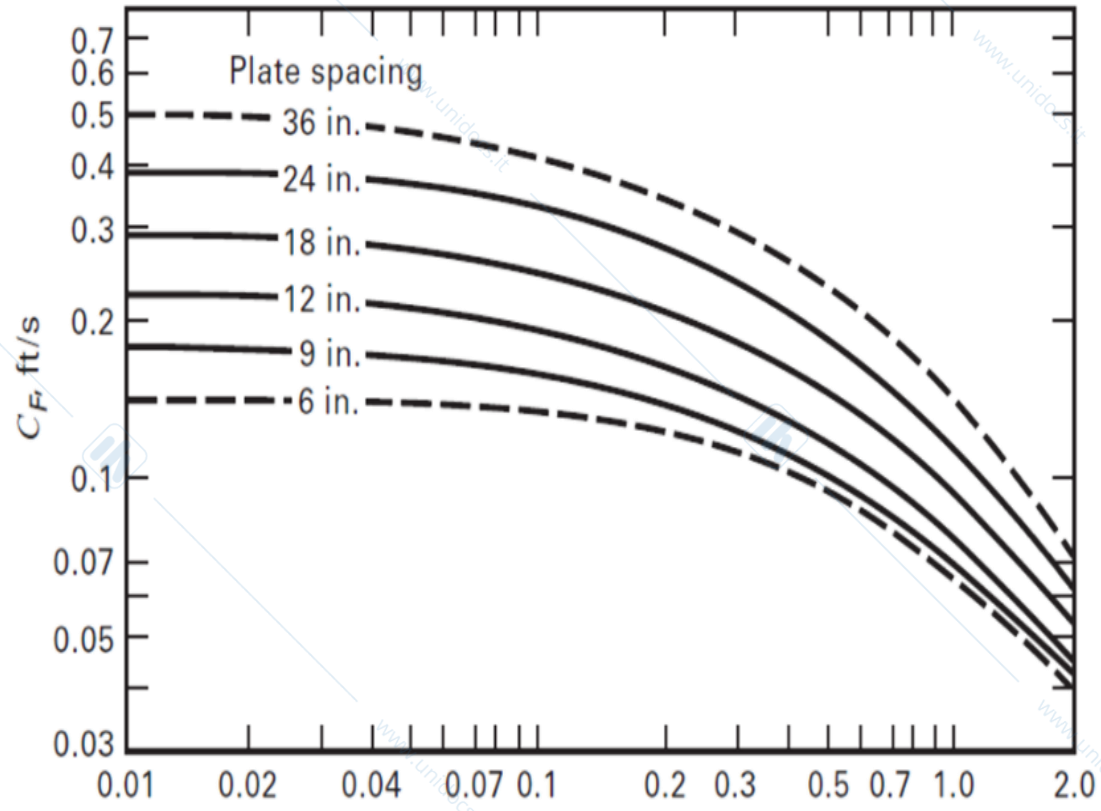
$$U_f = C \left(\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v}\right)^{0.5}$$

$$C = C_F \cdot F_\sigma \cdot F_{HA} \cdot F_F$$

$$F_\sigma = \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{0.2}$$

$$\frac{A_d}{A} = \begin{cases} 0.1 & F_{LV} < 0.1 \\ 0.1 + \frac{F_{LV} - 0.1}{9} & 0.1 \leq F_{LV} \leq 1.0 \\ 0.2 & F_{LV} > 1.0 \end{cases}$$

$$D_T = \sqrt{\frac{4 V' M_v}{0.8 \rho_f U_f \pi \left(1 - \frac{A_d}{A}\right)}}$$



$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_L}\right)^{0.5}$$