

DISTILLAZIONE - ESERCIZI SVOLTI

versione#C3 - Prof. A.Tonini – www.andytonini.com

INDICE: [D. RETTIFICA](#) – [D. FLASH](#) – [D. CORRENTE VAPORE](#) -

ANNOTAZIONE: -composizione di soluto A in alimentazione F: = x_{AF} , ovvero anche = z_{AF} (secondo altri testi).

***ES. A – BILANCI DISTILLAZIONE** con passaggio da massa a moli

DATI: soluzione **etanolo/acqua** $F^* = 250 \text{ kg/h}$, $z_F = 0,2$ in moli, $D = 90\%$ peso; $W = 3\%$ peso etanolo;

DETERMINARE: quantità in moli e bilanci di materia

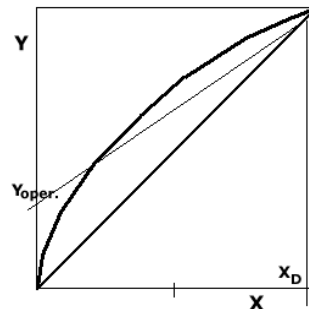
Soluzione:

Etanolo: $P_{Met} = 46$; Acqua $P_{Maq} = 18$; [kg/kmole]

alimentazione F in moli: $F^* = F z_F P_{Met} + F(1-z_F)P_{Maq}$; $\rightarrow F = F^* / (z_F P_{Met} + (1-z_F)P_{Maq}) = 10,6 \text{ kmol/h}$

$x_D = (90/46) / (90/46 + 10/18) = 0,78$; $x_W = (3/46) / (3/46 + 97/18) = 0,012$;

$F = D + W$; $F z_F = D x_D + W x_W$; $\rightarrow D = F(z_F - x_W) / (x_D - x_W) = 2,6 \text{ kmol/h}$; $\rightarrow W = 8 \text{ kmol/h}$.



***ES. B – CURVA DI EQUILIBRIO** – nota la volatilità relativa –

DATI: miscela binaria; $\alpha_{AB} = p_A^0 / p_B^0 = 2,4$; $x_D = 0,95$; riflusso $R = 1,5$;

DETERMINARE: curva di equilibrio X/Y; retta di arricchimento;

Soluzione:

$y = x \alpha_{AB} / (1 + x(\alpha_{AB} - 1))$; costruzione della tabella x/y, scelti x si ha y=:

x	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
y	0	0,21	0,38	0,51	0,62	0,71	0,78	0,85	0,91	0,96	1

Si traccia la curva x/y: per $x_D = 0,95 \rightarrow y_{oper.} = x_D / (R + 1) = 0,38$; \rightarrow retta arricch. sul diagramma.

***ES. C – BILANCI DISTILLAZIONE**

DATI: distillazione **acqua-ammoniaca**; $F = 10000 \text{ kmol/d}$, $z_F = 20\%$ moli, $x_D = 90\%$ moli contenente il 95% dell'ammoniaca inizialmente presente;

DETERMINARE: portate D e W x_W ;

soluzione:

$F = D + W$; $D x_D = 0,95 F z_F$; $\rightarrow D = 2111 \text{ kmol/d}$; $F = D + W$; $\rightarrow W = 7889 \text{ kmol/d}$; $F z_F = D x_D + W x_W$; $\rightarrow x_W = 0,0127 = 1,27\%$

***ES. D – DISTILLAZIONE PER RETTIFICA** – calcolo di q -

DATI: **miscela binaria**, $F = 250 \text{ kmol/h}$; $z_F = 0,45$; $x_D = 0,98$; $x_W = 0,05$; rapporto riflusso effettivo $R = 1,5$; sul piatto alimentazione $H_F = 3 \text{ kJ/kmol}$, $H_V = 40 \text{ kJ/kmol}$, $H_L = 4,1 \text{ kJ/kmol}$;

DETERMINARE portate D, W, L, V, L', V', punto intersezione rette arricch/strippaggio.

Soluzione:

$q = (H_V - H_F) / (H_V - H_L) = 1,03$; $D = F(z_F - x_W) / (x_D - x_W) = 107,5 \text{ kmol/h}$; $W = F - D = 142,5 \text{ kmol/h}$;

$L = D \cdot R = 161,25 \text{ kmol/h}$; $V = D(1 + R) = 268,7 \text{ kmol/h}$;

$L' = L + q z_F = 418,75 \text{ kmol/h}$; $V' = L' - W = 276,2 \text{ kmol/h}$;

punto intersezione retta arricch/strippaggio:

arricch: $y = x L/V + x_D D/V$; strippaggio: $y = x L'/V' - x_W W/V'$; uguagliando per l'intersezione:

$x(L'/V' - L/V) = x_D D/V + x_W W/V' \rightarrow x = 0,456$; da $y = x L/V + x_D D/V$ sarà $\rightarrow y = 0,666$.

***ES. E – DISTILLAZIONE PER RETTIFICA** – traffici in colonna

DATI: **miscela binaria**, $F = 150 \text{ kmol/h}$ a T_e ebollizione al 50% liquida; $z_F = 0,5$; $x_D = 0,95$; si recupera l'80% di distillato più volatile entrante; $R = 2$;

DETERMINARE: x_W ; portate D W e traffici in colonna;

soluzione:

condizione di recupero: $D x_D = 0,80 F z_F$; $\rightarrow D = 63,16 \text{ kmol/h}$; $F = D + W$; $\rightarrow W = 86,84 \text{ kmol/h}$;

$F z_F = D x_D + W x_W$; $\rightarrow x_W = 0,17$; $L = D x R$; $V = D(1 + R)$; $\rightarrow L = 126,32 \text{ kmol/h}$; $V = 189,48 \text{ kmol/h}$;

$q = 0,50$; $L' = L + q F$; $V' = L' - W$; $\rightarrow L' = 201,32 \text{ kmol/h}$; $V' = 114,48 \text{ kmol/h}$;

***ES. F – DISTILLAZIONE PER RETTIFICA** - **ETANOLO-ACQUA** -

Una colonna di distillazione viene alimentata con una portata $F = 100 \text{ kmol/h}$ di una miscela formata da acqua (A) e etanolo (E) contenente il 30% del componente più volatile (E). Il distillato D, contiene 75% di etanolo, il residuo il 3%.

L'alimentazione entra liquida in colonna alla temperatura di ebollizione. Il riflusso è $R = 3$;

Per ogni composizione ΔH di passaggio di stato è $= 40000 \text{ kJ/kmol}$;

DETERMINARE: le portate di distillato e di residuo; le portate delle correnti in colonna (V, L, V', L'); potenza termica di condensatore e ribollitore..

Soluzione: bilanci materia: $F=D+W$; $Fz_F= D x_D + W x_W$; da cui posto $W=F-D$ avremo sostituendo $Fz_F= D x_D + F x_W - D x_W$;
 $\rightarrow D = 37,5 \text{ kmol/h}$; $\rightarrow W = 62,5 \text{ kmol/h}$;
 Portate in colonna: $R = L/D=3$; $L=RD=112,5 \text{ kmol/h}$; $V = D + L = 150 \text{ kmol/h}$; $q = (L'-L)/F = 1$; $L'=W+V'=212,5$; $V'=V$;
 da cui: $Q_{\text{cond}} = V \cdot \Delta H / 3600 = 1667 \text{ Kw} = Q_{\text{rib}}$.

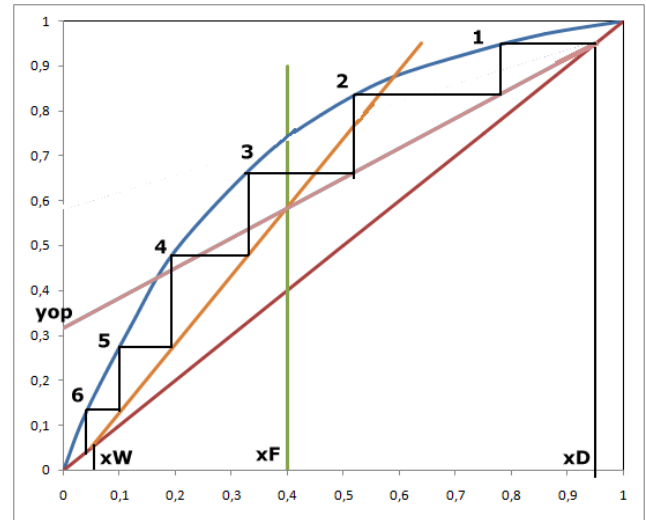
***ES. G – DISTILLAZIONE PER RETTIFICA – CURVA X/Y E BILANCI –**

Una miscela binaria ideale con $F=500 \text{ kmol/h}$ e $z_f=40\%$ in moli nel componente più volatile, deve essere distillata per ottenere un prodotto di testa $x_D=95\%$ in moli ed un residuo $x_W=5\%$ in moli rispetto al componente più volatile. L'alimentazione viene inserita liquida al punto di ebollizione ($q=1$) e la pressione totale del sistema è di 150 kPa. In queste condizioni la curva di equilibrio è data dalla seguente tabella:

x	0	0,04	0,12	0,20	0,35	0,46	0,58	0,73	0,86	1
y	0	0,13	0,32	0,49	0,69	0,79	0,87	0,93	0,97	1

il rapporto di riflusso scelto è $R = 2$.

Determinare le portate di distillato e residuo, i traffici interni nella colonna di distillazione ed il numero di stadi ideali. Determinare anche il fabbisogno di acqua di raffreddamento al condensatore di testa nell'ipotesi che questa sia disponibile a $T_{\text{iaq}}=20^\circ\text{C}$ e $T_{\text{uaq}}=40^\circ\text{C}$, $c=4,18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$; per ogni composizione il ΔH di passaggio di stato è $=40 \text{ kJ/mol}$.



Soluzione:

Bilanci di materia:

$$F = D + W = 500 \text{ kmol/h (generale)}$$

$$Fz_F = Dx_D + Wx_W \text{ (componente A)}$$

$$\rightarrow D = 194,4 \text{ kmol/h}; W = 305,6 \text{ kmol/h};$$

Portate in colonna:

$$R = L/D=2; V = D + L; L' = W + V';$$

$$q = (L'-L)/F = 1; V' = L' - W;$$

$$\rightarrow L = 388,8 \text{ kmol/h}; V = 583,3 \text{ kmol/h};$$

$$L' = q \cdot F + L = 888,8 \text{ kmol/h}; V' = 583,3 \text{ kmol/h};$$

Dal diagramma: $y_{\text{operat}}=0,32$; traccio le rette arricchimento e esaurimento; $\rightarrow N^\circ$ stadi = 6.

● Bilanci termici al **CONDENSATORE**:

$$Q_{\text{cond}} = \Delta H_{\text{cond}} \cdot V = P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c \cdot (40-20); \Delta H_{\text{COND}} = 40000 \text{ kJ/kmol}$$

$$\rightarrow Q_c = 6481 \text{ kW [kJ/s]}; \rightarrow \text{portata } P_{\text{H}_2\text{O}} = 2333 \text{ Kg/h}; Q_{\text{cond}} = Q_{\text{rib}}$$

ES.1 – DISTILLAZIONE – BENZENE-CLOROBENZENE -*

Si devono separare due composti organici ideali con una operazione di distillazione continua per rettificazione, a pressione atmosferica: benzene (P.M. 78; T eb 80,6°C) e clorobenzene (P.M. 112,6 e T eb 132,5°C). L'alimentazione, che entra in colonna al 70% liquida alla temperatura di ebollizione, è costituita dal 40% moli di benzene, con portata $F=6 \text{ kmol/h}$. Si vuole ottenere un distillato di testa al 97% moli e di coda al 1,4% moli in benzene. Il rapporto di riflusso effettivo risulta uguale a 1,4 volte quello minimo e l'efficienza della colonna è del 68%. Sapendo che l'entalpia di passaggio di stato per tutte le composizioni della miscela è $\Delta H=31,387 \text{ KJ/mol}$, determinare: le portate molari D e W; il rapporto di riflusso effettivo R; il numero di piatti effettivo, il piatto dove entra l'alimentazione.

Sapendo che nel condensatore l'acqua (cal.specif 4,18 KJ/Kg°C) entra a 15°C ed esce a 45°C e che il coefficiente globale del condensatore è $U=1,16 \text{ KW/m}^2\text{}^\circ\text{C}$, determinare la superficie del condensatore e la portata d'acqua.

DATI DI EQUILIBRIO:

X	1	0,82	0,60	0,42	0,28	0,14	0
Y	1	0,96	0,88	0,77	0,64	0,40	0

Svolgimento:

a) bilanci di materia:

$$F = D + W = 6 \text{ kmol/h (generale)}$$

$$Fz_{AF} = Dx_{AD} + Wx_{AW} \text{ (componente A)}$$

$$6 \times 0,40 = D \times 0,97 + W \times 0,014; 6 = D + W;$$

$$\rightarrow D = 2,4 \text{ kmol/h}; W = 3,6 \text{ kmol/h};$$

b) diagramma x/y dai dati di equilibrio:

fattore $q = 0,7$;

retta q con ascissa $x_F/q = 0,57$; dal diagr. $\rightarrow y_{\text{min}} = x_D / (R_{\text{min}} + 1) = 0,51$; da cui $R_{\text{min}} = 0,89$; $R_{\text{operat}} = 1,24$; $\rightarrow y = 0,43$;

traccio la retta di arricchimento da ascissa $x=y=0,97$ a $y=0,43$; dove incontra la retta q traccio la retta esaurimento fino al p.to $x=y=0,014$;

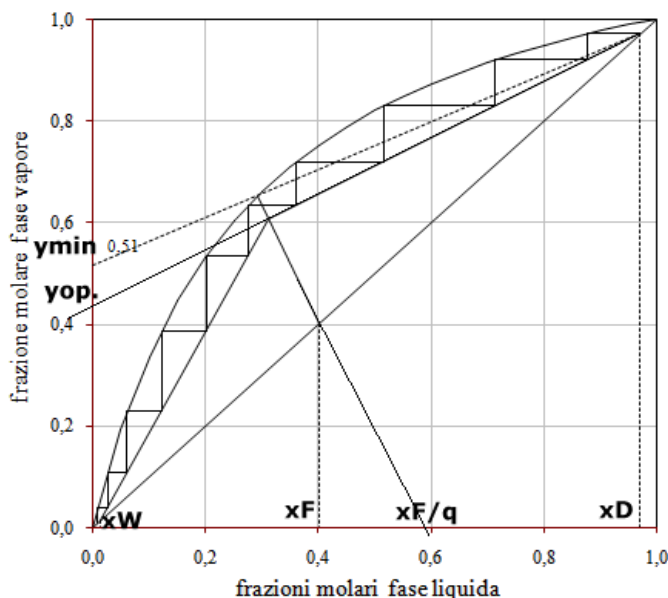
\rightarrow col metodo McCabe calcolo il N° piatti teorici = 10 (alimentazione dopo il 4); N° piatti reali = $10/0,68 = 15$;

c) bilanci di materia in colonna:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{L}/\mathbf{D} ; \mathbf{V} = \mathbf{D} + \mathbf{L} ; \mathbf{L}' = \mathbf{W} + \mathbf{V}' ; \\ \mathbf{q} &= (\mathbf{L}' - \mathbf{L})/\mathbf{F} ; \mathbf{V}' = \mathbf{L}' - \mathbf{W} ; \end{aligned} \quad \left| \begin{aligned} \rightarrow \mathbf{L} &= 1,28 \times 2,4 = 3 \text{ kmol/h} ; \mathbf{V} = 2,4 + 3,1 = 5,4 \text{ kmol/h} ; \\ \mathbf{L}' &= \mathbf{q} \times \mathbf{F} + \mathbf{L} = 0,7 \times 6 + 3,1 = 7,2 \text{ kmol/h} ; \mathbf{V}' = 3,6 \text{ kmol/h} ; \end{aligned} \right.$$

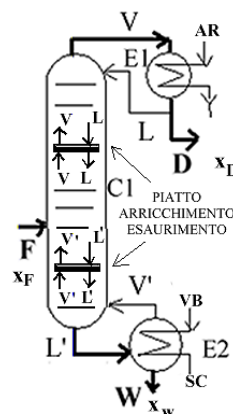
d) bilanci termici del condensatore:

$$\begin{aligned} \Delta T_{ml} &= (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln (\Delta T_1 / \Delta T_2) && \rightarrow \Delta T_{ml} = 49,08 \\ \Delta T_1 &= 80,6 - 15 = 65,6 ; \Delta T_2 = 80,6 - 45 = 35,6 ; && \mathbf{Q} = 31387 \times 5,4 / 3600 = 47,32 \text{ KW} \\ \mathbf{Q}_{cond} &= \Delta \mathbf{H} \times \mathbf{V} = \mathbf{U} \times \text{Sup.} \times \Delta T_{ml} = && \rightarrow \text{Sup.} = 47,32 / (1,16 \times 48,97) = 0,83 \text{ m}^2 \\ &= \mathbf{P}_{H_2O} \times c \times (45 - 15) ; && \rightarrow \mathbf{P}_{H_2O} = 47,32 \times 3600 / (4,18 \times 30) = 1358,44 \text{ Kg/h} \end{aligned}$$



ES.2 – DISTILLAZIONE PER RETTIFICA – METANOLO-ACQUA -*

Si devono separare con una operazione di distillazione continua per rettificazione, a pressione atmosferica due sostanze in prima approssimazione ideali: metanolo (PM 32 $T_{eb}=64,7^\circ\text{C}$) e acqua (P.M. 18 e $T_{eb} 100^\circ\text{C}$). L'alimentazione, che entra in colonna liquida alla temperatura di ebollizione, è costituita dal 40% moli di metanolo, con portata $F=250 \text{ kmol/h}$. Si vuole ottenere un distillato di testa al 95% moli e di coda al 2,5% moli in metanolo. Il rapporto di riflusso effettivo risulta uguale a 1,46 ($R_{op}=2R_{min}$) e l'efficienza della colonna è del 75%. Sapendo che l'entalpia di passaggio di stato per tutte le composizioni della miscela è $\Delta H= 32,643 \text{ kJ/mole}$, determinare: le portate molari D e W; le portate delle correnti interne alla colonna; sapendo che nel condensatore l'acqua entra a 15°C ed esce a 43°C ; calore specifico $C=4,18 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$ e che il coefficiente $U=1,28 \text{ KW/m}^2\text{}^\circ\text{C}$, determinare la superficie del condensatore e la portata d'acqua.



x	1	0,90	0,70	0,55	0,40	0,25	0,15	0,10	0
y	1	0,97	0,90	0,823	0,72	0,56	0,40	0,30	0

Svolgimento:

a) Bilanci di materia

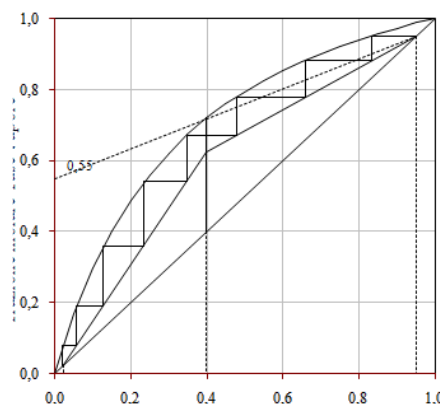
$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \mathbf{D} + \mathbf{W} = 250 \text{ kmol/h (generale)} \\ \mathbf{F}x_{AF} &= \mathbf{D}x_{AD} + \mathbf{W}x_{AW} \text{ (componente A)} \\ \rightarrow \mathbf{D} &= 101,4 \text{ kmol/h} ; \mathbf{W} = 148,6 \text{ kmol/h} ; \end{aligned}$$

b) Portate in colonna

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{L}/\mathbf{D} = 1,46 ; \mathbf{V} = \mathbf{D} + \mathbf{L} ; \mathbf{L}' = \mathbf{W} + \mathbf{V}' ; \\ \mathbf{q} &= (\mathbf{L}' - \mathbf{L})/\mathbf{F} = 1 ; \quad \mathbf{V}' = \mathbf{L}' - \mathbf{W} ; \\ \rightarrow \mathbf{L} &= 148,4 \text{ kmol/h} ; \mathbf{V} = 249,7 \text{ kmol/h} ; \\ \mathbf{L}' &= 398,4 \text{ kmol/h} ; \mathbf{V}' = 249,7 \text{ kmol/h} ; \end{aligned}$$

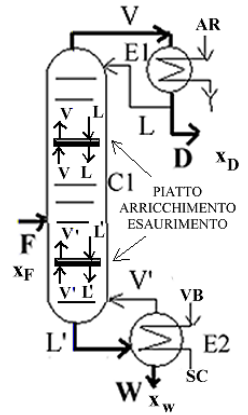
c) Bilanci termici al condensatore

$$\begin{aligned} \Delta T_{ml} &= (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln (\Delta T_1 / \Delta T_2) && \rightarrow \Delta T_{ml} = 33,80^\circ\text{C} \\ \Delta T_1 &= 64,7 - 15 = 49,7 ; && \mathbf{Q} = 32643 \times 249,7 / 3600 = 2264,43 \text{ KW} \\ \Delta T_2 &= 64,7 - 43 = 21,7 ; && \rightarrow \text{Sup. condensatore} = 2264,15 / (1,28 \times 33,80) = 52,35 \text{ m}^2 \\ \mathbf{Q}_{cond} &= \Delta \mathbf{H} \times \mathbf{V} = \mathbf{U} \times \text{Sup.} \times \Delta T_{ml} = && \rightarrow \text{portata } \mathbf{P}_{H_2O} = \\ &= \mathbf{P}_{H_2O} \times c \times (43 - 15) ; && = 2264,15 \times 3600 / (4,18 \times 28) = 69650,9 \text{ Kg/h} \end{aligned}$$



*** ES.3 – DISTILLAZIONE PER RETTIFICA - BENZENE-mXILENE -**

Si vogliono distillare, in una colonna a piatti, con funzionamento continuo, $F=1200$ Kmoli/h di una miscela composta da Benzene / m-Xilene al 30% in moli di Benzene. Il distillato ($T_D=80,6^\circ\text{C}$) deve avere una composizione in benzene pari al 97% , ed il residuo ($T_W=139,3^\circ\text{C}$) una composizione pari al 3%. L'alimentazione viene immessa in colonna alla temperatura di ebollizione e al 40% in vapore, la pressione di esercizio è di 1 atm. In queste condizioni il candidato calcoli le portate delle correnti in uscita dalla colonna di distillazione (D e W) ; supponendo che sia $R = 2 R_{min}$, e l'efficienza della colonna =68%, calcoli il numero dei piatti teorici e reali con il metodo grafico di Mc Cabe e Thiele, la portata di acqua di refrigerazione del condensatore totale di testa e la sua superficie, conoscendo:



- 1) la temperatura dell'acqua in ingresso al condensatore $t_i = 20^\circ\text{C}$, in uscita $t_u = 35^\circ\text{C}$, calore specifico $c_p=4,185$ kJ/kg°C;
- 2) il calore latente di condensazione del distillato $\Delta H= 4184$ kJ/kmol; il coefficiente globale di scambio $U= 1,16$ kw/m²°C;

I dati di equilibrio sono i seguenti:

x	1	0,90	0,72	0,58	0,40	0,27	0,19	0,10	0
y	1	0,98	0,94	0,89	0,79	0,66	0,55	0,35	0

soluzione:

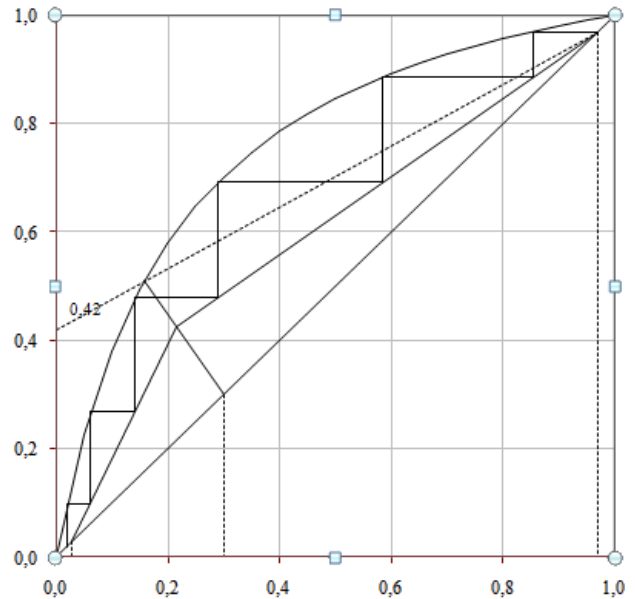
a) Bilanci di materia

$$F = D + W = 1200 \text{ Kmoli/h (generale)}$$

$$F x_{AF} = D x_{AD} + W x_{AW} \text{ (componente A)}$$

$$\rightarrow D = 344,7 \text{ kmol/h; } W = 855,3 \text{ kmol/h;}$$

b) diagramma x/y dai dati di equilibrio: fattore $q = 0,6$; retta q con ascissa $x_F/q = 0,5$; dal diagr. $\rightarrow y_{min} = x_D / (R_{min} + 1) = 0,42$; da cui $R_{min} = 1,31$; Roperat. = 2,61; $\rightarrow y = 0,27$; traccia la retta di arricchimento da ascissa $x=y=0,97$ a $y=0,27$; dove incontra la retta q traccia la retta esaurimento fino al p.to $x=y=0,03$; \rightarrow col metodo McCabe calcolo il N°piatti teorici = 6 (alimentazione dopo il 3); N°piatti reali = $6/0,68 = 9$;



c) Portate in colonna:

$$R = L/D = 2,61; V = D + L; L' = W + V';$$

$$q = (L' - L)/F = 0,6; V' = L' - W;$$

$$\rightarrow L = 900,3 \text{ kmol/h; } V = 1245 \text{ kmol/h; } L' = q \times F + L = 1620,3 \text{ kmol/h; } V' = 765 \text{ kmol/h;}$$

d) Bilanci termici al condensatore

$$\Delta T_{ml} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln (\Delta T_1 / \Delta T_2)$$

$$\Delta T_1 = 80,6 - 20 = 60,6; \Delta T_2 = 80,6 - 35 = 45,6; \rightarrow \Delta T_{ml} = 52,74^\circ\text{C}$$

$$Q_{cond} = \Delta H \times V = U \times \text{Sup.} \times \Delta T_{ml} = P_{H_2O} \times c \times (35 - 20);$$

$$Q = 1447,5 \text{ KW}$$

$$\rightarrow \text{Sup. condensatore} = 23,7 \text{ m}^2$$

$$\rightarrow \text{portata } P_{H_2O} = 83111 \text{ Kg/h}$$

ES.4 – DISTILLAZIONE PER RETTIFICA - METANOLO-ACQUA -*

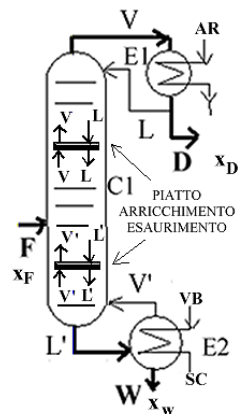
Una colonna di distillazione viene alimentata con una portata $F=900$ Kmoli/h di una miscela formata da acqua e metanolo contenente il 50% del componente più volatile. Il distillato D, contiene il 96% di metanolo, il residuo il 2%.

L'alimentazione entra in colonna alla temperatura di ebollizione allo stato di vapore saturo secco. Il riflusso è $R = 2 R_{min}$. In queste condizioni calcolare:

- a) le portate di distillato e di residuo;
- b) le portate delle correnti in colonna (V, L, V', L');
- c) il numero dei piatti teorici;
- d) il numero dei piatti effettivi, sapendo che l'efficienza della colonna è del 88%.

La curva del diagramma di equilibrio X/Y può essere disegnata conoscendo i seguenti dati:

X	0	0,05	0,11	0,15	0,26	0,44	0,61	0,83	0,91	1
Y	0	0,17	0,32	0,38	0,56	0,75	0,86	0,95	0,98	1



soluzione:

a) Bilanci di materia

$$F = D + W = 900 \text{ Kmol/h (generale)}$$

$$F x_{AF} = D x_{AD} + W x_{AW} \text{ (componente A)}$$

→ D= 459,6 kmol/h; W= 440,4 Kmol/h;

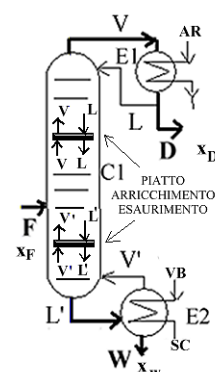
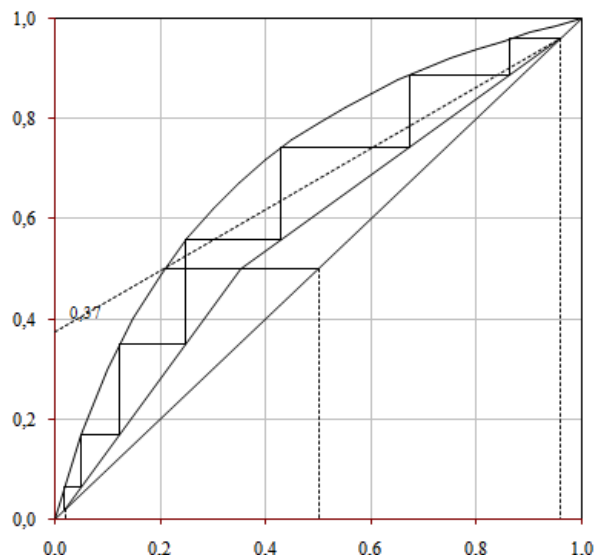
b) diagramma x/y dai dati di equilibrio:fattore q = 0,0; retta q orizzontale; dal diagr. → $y_{\min}=x_D/(R_{\min} + 1) = 0,37$; da cui Rmin = 1,57; Roperat.= 3,15; → $y = 0,23$; traccio la retta di arricchimento da ascissa $x=y=0,96$ a $y=0,23$; dove incontra la retta q traccio la retta esaurimento fino al p.to $x=y=0,02$; →col metodo McCabe calcolo il N°piatti teorici = 7 (alimentazione dopo il 4); N°piatti reali = 8;

c) Portate in colonna

$$R = L/D=3,15; V= D + L; L' = W + V';$$

$$q = (L'-L)/F = 0; \quad V' = L' - W;$$

→L= 1447,6kmol/h; V = 1907,2kmol/h;
L'=q x F + L = 1447,6 kmol/h; V' = 1007,2kmol/h;



ES.5 – DISTILLAZIONE PER RETTIFICA - ACETONE-ACQUA -*

Due composti organici ideali si devono separare con una operazione di distillazione continua per rettificazione a pressione atmosferica: acetone (P.M. 58 e $T_{eb} 56,1^{\circ}C$) e acqua (P.M. 18 e $T_{eb} 100^{\circ}C$). L'alimentazione, che entra in colonna liquida al 70% alla temperatura di ebollizione, è costituita dal 29% moli di acetone, con portata $F=75 \text{ Kmol/h}$. Si vuole ottenere un distillato di testa al 95% moli e di coda al 3,5% moli in acetone. Il rapporto di riflusso effettivo risulta uguale a 1,2 volte quello minimo e l'efficienza della colonna è del 70%. Sapendo che l'entalpia di passaggio di stato per tutte le composizioni della miscela è $\Delta H=29,295 \text{ kJ/mole}$, determinare: le portate molari D e W; il rapporto di riflusso effettivo; il numero di piatti effettivo, il piatto dove entra l'alimentazione.

Sapendo che nel condensatore l'acqua entra a $15^{\circ}C$ ed esce a $35^{\circ}C$ e che il coefficiente $U=1,16 \text{ Kw/m}^2 \cdot ^{\circ}C$, determinare la superficie del condensatore e la portata d'acqua,

DATI DI EQUILIBRIO:

X	1	0,83	0,62	0,51	0,45	0,31	0,16	0
Y	1	0,97	0,90	0,84	0,80	0,68	0,44	0

soluzione:

a) Bilanci di materia

$$F = D + W = 75 \text{ Kmol/h (generale)}$$

$$F x_{AF} = D x_{AD} + W x_{AW} \text{ (componente A)}$$

→ D= 20,9 kmol/h; W=54,1 Kmol/h;

b) diagramma x/y dai dati di equilibrio:fattore q = 0,70; retta q con ascissa $x_F/q = 0,414$; dal diagr. → $y_{\min}=x_D/(R_{\min} + 1) = 0,42$; da cui Rmin = 1,24; Roperat.= 1,49; → $y = 0,38$; traccio la retta di arricchimento da ascissa $x=y=0,95$ a $y=0,38$; dove incontra la retta q traccio la retta esaurimento fino al p.to $x=y=0,035$; →col metodo McCabe calcolo il N°piatti teorici = 9(alimentazione dopo il 4); N°piatti reali = $9/0,7=13$;

c) Portate in colonna

$$R = L/D=1,49; V= D + L; L' = W + V';$$

$$q = (L'-L)/F = 0,7; \quad V' = L' - W;$$

→L= 31,1kmol/h; V = 52 kmol/h;
L'=q x F + L = 83,6 kmol/h; V' = 29,5 kmol/h;

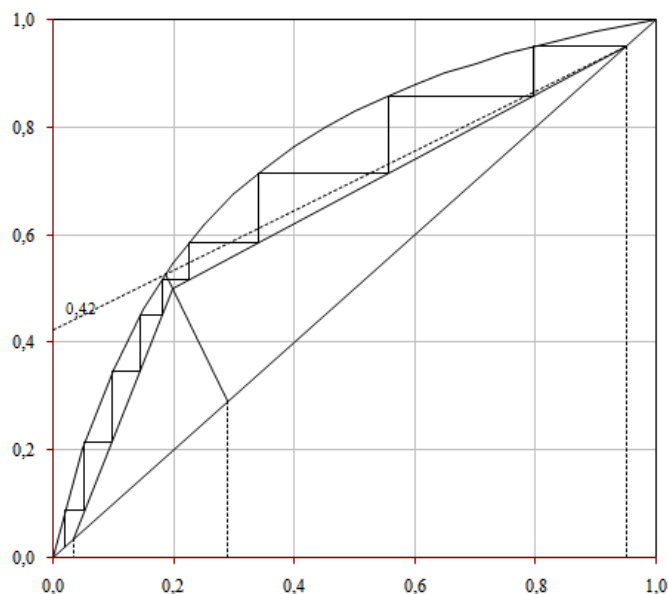
d) Bilanci termici al condensatore

$$\Delta T_{ml} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln (\Delta T_1 / \Delta T_2);$$

$\Delta T_1 = 56,1 - 15 = 41,1$; $\Delta T_2 = 56,1 - 35 = 21,1$;

$$Q_{cond} = \Delta H \times V = U \times Sup. \times \Delta T_{ml} = P_{H_2O} \times c \times (35 - 15);$$

→ $\Delta T_{ml} = 30,01^{\circ}C$
Q = 422,96 KW
→ Sup. condensatore = 12,15 m²
→ portata $P_{H_2O} = 18213,4 \text{ Kg/h}$



ES.6 – DISTILLAZIONE PER RETTIFICA BENZENE-TOLUENE-*

Due composti organici ideali si devono separare con una operazione di distillazione continua per rettifica, a pressione atmosferica: BENZENE (Teb 80,5°C) e TOLUENE (Teb 110,7 °C). L'alimentazione, che entra in colonna liquida al 50% alla temperatura di ebollizione, è costituita dal 35% moli di BENZENE, con portata **F=15 Kmol/h**. Si vuole ottenere un distillato di testa al 98% moli e di coda al 1,4% moli in benzene. Il rapporto di riflusso effettivo risulta uguale a 1,3 volte quello minimo e l'efficienza della colonna è del 70%. Sapendo che l'entalpia di passaggio di stato per tutte le composizioni della miscela è $\Delta H=31,3875$ kJ/mole, determinare: le portate molari D e W; il rapporto di riflusso effettivo; il numero di piatti effettivo, il piatto dove entra l'alimentazione.

Sapendo che nel condensatore l'acqua entra a 15°C ed esce a 30°C e che il coefficiente $U=0,81$ Kw/m²*°C, determinare la superficie del condensatore e la portata d'acqua; sapendo che il ribollitore ha coefficiente $U=1,16$ Kw/m²*°C, il Vapore di rete a $T_V=140^\circ\text{C}$, l'entalpia del vapore $H_V= 1950,5$ kJ/Kg, determinare superficie del ribollitore e portata di vapore.

DATI DI EQUILIBRIO:

soluzione:

X	1	0,86	0,60	0,49	0,35	0,22	0,14	0
Y	1	0,94	0,79	0,71	0,56	0,40	0,28	0

a) Bilanci di materia

$F = D + W = 15$ Kmol/h (generale)

$Fx_{AF} = Dx_{AD} + Wx_{AW}$ (componente A)

$\rightarrow D = 5,2$ kmol/h; $W = 9,8$ Kmol/h;

b) diagramma x/y dai dati di equilibrio: fattore $q = 0,50$; retta q con ascissa $x_F/q = 0,7$; dal diagr. $\rightarrow y_{min} = x_D / (R_{min} + 1) = 0,27$; da cui $R_{min} = 2,64$; $R_{operat.} = 3,44$; $\rightarrow y = 0,22$; traccio la retta di arricchimento da ascissa $x = y = 0,98$ a $y = 0,22$; dove incontra la retta q traccio la retta esaurimento fino al p.to $x = y = 0,014$; \rightarrow col metodo McCabe calcolo il N°piatti teorici = 17 (alimentazione dopo il 8); N°piatti reali = $17/0,7 = 25$;

c) Portate in colonna

$R = L/D = 3,44$; $V = D + L$; $L' = W + V'$;

$q = (L' - L)/F = 0,5$; $V' = L' - W$;

$\rightarrow L = 17,9$ kmol/h; $V = 23,1$ kmol/h;

$L' = 25,4$ kmol/h; $V' = 15,6$ kmol/h;

d) Bilanci termici al condensatore

$\Delta T_{ml} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln (\Delta T_1 / \Delta T_2)$

$\Delta T_1 = 80,5 - 15 = 65,5$;

$\Delta T_2 = 80,5 - 30 = 50,5$;

$Q_{cond} = \Delta H \times V = U \times Sup. \times \Delta T_{ml} = P_{H_2O} \times c \times (30 - 15)$;

$\rightarrow \Delta T_{ml} = 57,67^\circ\text{C}$

$Q = 201,8$ KW

\rightarrow Sup. condensatore = 4,32 m²

\rightarrow portata $P_{H_2O} = 11586$ Kg/h

e) Bilanci termici al ribollitore

$\Delta T_{ml} = T_V - T_T = \Delta T$

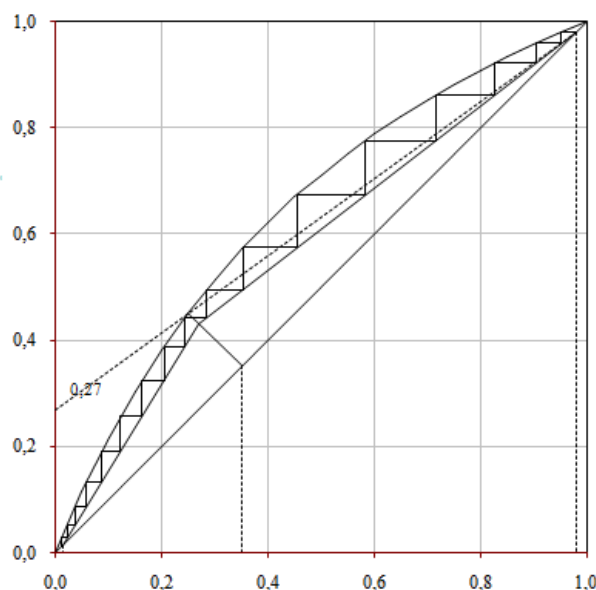
$Q_{rib} = \Delta H \times V' = U \times Sup. \times \Delta T = P_{VAP} \times H_{VAP}$;

$\Delta H = 31387,5$ kJ/kmole; $\Delta H_{VAP} = 1950,5$ kJ/Kg

$\rightarrow \Delta T_{ml} = 140 - 110,5 = 29,5^\circ\text{C}$

$Q = 136,41$ KW

\rightarrow Sup. rib = 4 m²; \rightarrow portata $P_{VAP} = 251,8$ Kg/h



ES.7 – DISTILLAZIONE PER RETTIFICA - TEMA D'ESAME 2008 -*

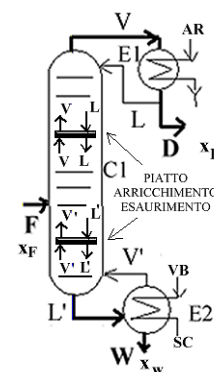
Una miscela ideale presenta, a pressione atmosferica, una curva di equilibrio liquido/vapore data dalla tabella seguente:

X liq.	0,00	0,10	0,20	0,30	0,50	0,70	0,85	1,00
Y vap.	0,00	0,375	0,55	0,675	0,84	0,90	0,95	1,00

Tali grandezze esprimono le composizioni del liquido e del vapore espresse come frazioni molari del componente più volatile.

La miscela presenta una composizione $X_f=0,30$ e da essa si vuole ottenere un distillato avente composizione $X_d=0,975$ ed un residuo di coda con $X_w=0,020$. L'operazione di rettifica continua viene condotta in una colonna nella quale la miscela è introdotta come liquido riscaldato al suo punto di ebollizione e nella quale si opera con un rapporto di riflusso effettivo il cui valore è $R=1,4$.

Con tali dati il candidato disegni la curva di equilibrio della miscela, costruisca le rette che rappresentano le condizioni di funzionamento della colonna e determini graficamente il numero teorico di stadi di equilibrio (piatti) necessari per realizzare l'operazione.



soluzione:

costruzione grafica dell'operazione di distillazione:

-curva di equilibrio x/y come dai dati;

-retta di arricchimento:

passante da ascissa $X_D=0,975$, e ordinata $y=x_D/(R+1)=0,41$

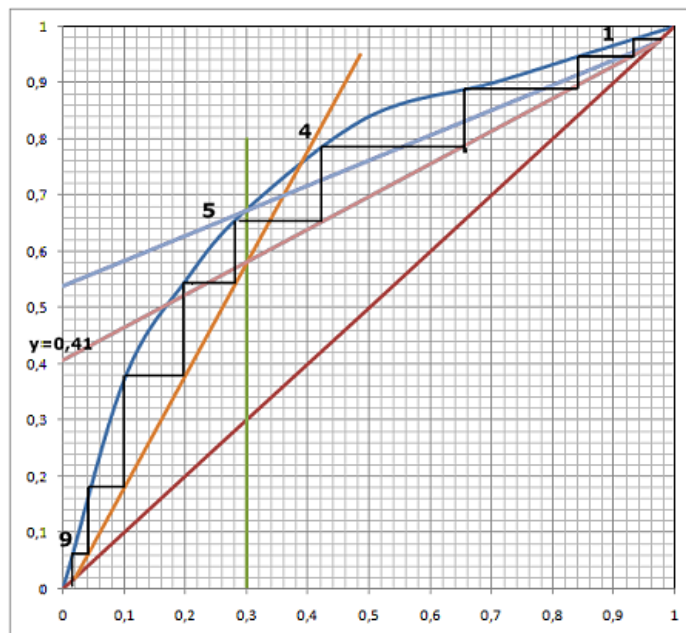
-retta q (con $q=1$) ascissa $X_F=0,30$, verticale;

-retta di esaurimento:

di ascissa $X_W=0,02$, che incontra la retta di arricchimento sulla retta q ;

calcolo grafico del n°stadi di equilibrio teorici;

N°stadi =9.

**ES.8 - DISTILLAZIONE PER RETTIFICA – TEMA DI ESAME 2010**

In un'operazione di rettifica continua, operante con un rapporto di riflusso effettivo $R = 0,85$ si producono $V=650$ kg/h di distillato generato da un vapore che condensa a $T_c = 84^\circ\text{C}$

Il calore latente di condensazione di tale vapore è $\Delta H = 1800$ kJ/kg.

Il condensatore nel quale si effettua tale operazione è alimentato con acqua industriale di raffreddamento con temperatura di ingresso $T_i = 21^\circ\text{C}$ ed uscente a $T_u = 40^\circ\text{C}$ il cui calore specifico è $c_p = 4,18$ kJ/(kg °C)

Nel condensatore nuovo ed appena installato si realizza un coefficiente globale di scambio termico $U = 2,5$ kW/(m² °C). Dopo un periodo di alcuni mesi, il condensatore presenta un coefficiente di sporcamento $R_d = 0,1$ /(m² °C)/kW dovuto principalmente all'acqua di raffreddamento, che riduce la capacità di scambio termico dell'apparecchio.

Con i dati a disposizione il candidato calcoli:

-la portata di vapore uscente dalla colonna che deve essere condensato; -la potenza termica che viene scambiata nell'apparecchio; -la portata di acqua necessaria per realizzare la condensazione; -il coefficiente globale di scambio termico quando lo scambiatore è sporco;-la temperatura media logaritmica presente nel condensatore nell'ipotesi che il liquido condensato esca dall'apparecchio alla temperatura di condensazione (84°C); -l'area di scambio necessaria per realizzare la condensazione in tali condizioni.

soluzione:

-vapore V : $V=L + D = (DR)+D = D(1+R)=1202,5$ Kg/h;

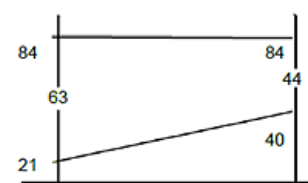
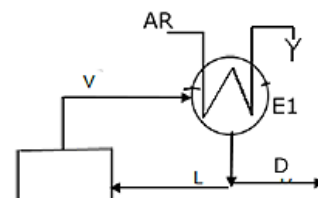
-potenza termica condensatore: $QE1= V \times \Delta H = 2164500$ Kj/Kg;

-portata d'acqua al condensatore: $QE1= Faq. \times Cp \times (40-21)$; $\rightarrow Faq. = 27253,8$ Kg/h;

-coeff.glob.scambio termico: $1/U_D = 1/U_C + R_D$; $\rightarrow U_D = 2$ KW/(m²°C);

- ΔTML : $\Delta T_1 = 84-21 = 63^\circ$; $\Delta T_2 = 84-40 = 44^\circ$; $\Delta TML = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2) = 52,93^\circ\text{C}$;

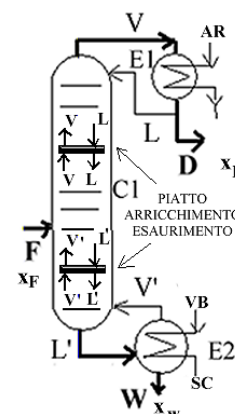
-Superficie di scambio condensatore: $QE1 = Sup \times U_D \times \Delta TML$; $\rightarrow Sup = 5,7$ m².

**ES.9 - DISTILLAZIONE PER RETTIFICA – BENZENE-TOLUENE -***

Si vuole distillare una miscela di 2 componenti organici : Benzene-toluene, avente portata $F=9,41$ kmol/h, il più volatile è presente al 50,2 % . Si vuole ottenere un distillato al 95% e un residuo al 7% nel componente più volatile. L'alimentazione entra al 60% liquida alla Tebollizione e 40% vapore. Il vapore uscente alla temperatura di $80,5^\circ\text{C}$ viene condensato utilizzando acqua entrante a $T_{aqi} = 18^\circ\text{C}$ e $T_{aqu} = 35^\circ\text{C}$ in uscita, il condensatore funziona con $U_d=0,81$ kW/m²°C, $\Delta H_{COND}=31,3875$ kJ/kmol. Il ribollitore di coda utilizza vapore di rete V_o alla $T_o=150^\circ\text{C}$, con $\Delta H_{cond,VO}=1921,4$ kJ/Kg e $U_d=1,16$ kW/m²°C, mentre la temperatura di ebollizione del piatto di coda è $T^\circ=110,7^\circ\text{C}$ e $\Delta H_{RIBW}=41,85$ kJ/mol.

Con i valori delle frazioni molari riportati in tabella, disegnare la curva di equilibrio e calcolare il numero di piatti teorici e di quelli reali considerando una efficienza della colonna pari a 80% .

X :	0,	0,10,	0,25,	0,35,	0,50,	0,70,	0,80,	1
Y :	0,	0,215,	0,45,	0,57,	0,71,	0,85,	0,91,	1



2. Calcolare la portata del distillato D e del residuo di coda W in Kmol/h, operando con un riflusso R effettivo pari a 1,35 volte quello minimo. 3. Calcolare la superficie del condensatore di testa e la portata di acqua da utilizzare (caq= 4,18 kJ/kg °C) 4. Calcolare il calore da somministrare al ribollitore di coda. 5)calcolare la portata del vapore di rete utilizzato.

soluzione: N.B.: **componente A benzene**

a) Bilanci di materia

$$F = D + W = 9,41 \text{ Kmol/h (generale)}$$

$$F x_{AF} = D x_{AD} + W x_{AW}$$

$$\rightarrow D = 4,6 \text{ kmol/h; } W = 4,8 \text{ Kmol/h;}$$

b) diagramma x/y dai dati di equilibrio:fattore q = 0,60; retta q con ascissa xF/q = 0,84; dal diagr. → y_{min}=x_D/(R_{min}+1) = 0,39; da cui R_{min} = 1,43;

Roperat.= 1,93; →y= 0,32; traccio la retta di arricchimento da ascissa x=y=0,95 a y=0,32; dove incontra la retta q traccio la retta esaurimento fino al p.to x=y=0,07; →col metodo McCabe calcolo il N°piatti teorici = 12; **N°piatti reali** = 12/0,8=16;

c) Portate in colonna:

$$R = L/D = 1,93; V = D + L; L' = W + V';$$

$$q = (L' - L)/F = 0,6; V' = L' - W;$$

$$\rightarrow L = 8,9 \text{ kmol/h; } V = 13,5 \text{ kmol/h;}$$

$$L' = q \times F + L = 14,6 \text{ kmol/h; } V' = 9,8 \text{ kmol/h;}$$

d) Bilanci termici al **CONDENSATORE**

$$\Delta T_{ml} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln (\Delta T_1 / \Delta T_2)$$

$$\Delta T_1 = 80,5 - 18 = 62,5; \Delta T_2 = 80,5 - 35 = 45,5;$$

$$Q_{cond} = \Delta H_{cond} \times V = U \times \text{Sup.} \times \Delta T_{ml}$$

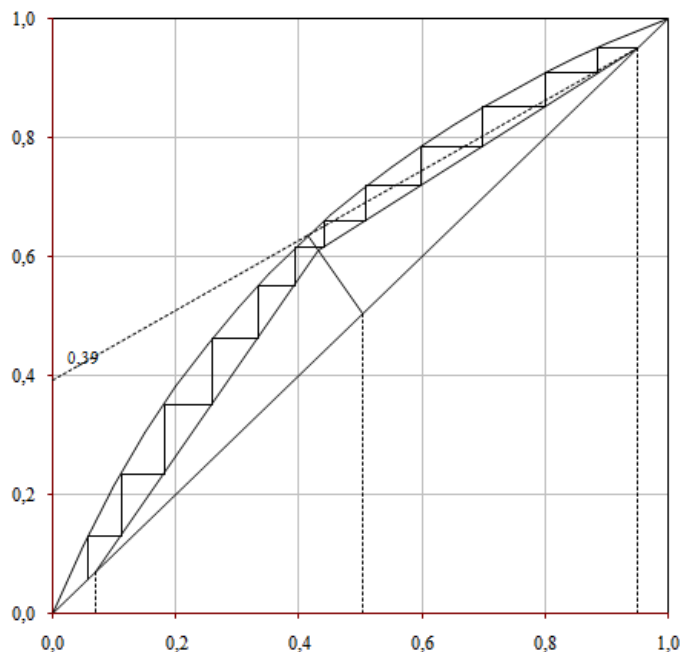
$$= P_{H_2O} \times c \times (35 - 18); \Delta H_{COND} = 31387,5 \text{ kJ/kmol}$$

e) Bilanci termici al **RIBOLLITORE**

$$\Delta T_{ml} = T_V - T_T = \Delta T; \rightarrow \Delta T = 150 - 110,5 = 39,5^\circ\text{C}$$

$$Q_{rib} = \Delta H \times V' = U \times \text{Sup.} \times \Delta T = P_{VAP} \times \Delta H_{VAP};$$

$$\Delta H_{RIBW} = 41850 \text{ kJ/kmole}; \Delta H_{VAP} = 1921,4 \text{ kJ/Kg}$$



$$\rightarrow \Delta T_{ml} = 53,54^\circ\text{C}$$

$$Q = 118,01 \text{ kW [kJ/s]}$$

$$\rightarrow \text{Sup. condensatore} = 2,72 \text{ m}^2$$

$$\rightarrow \text{portata } P_{H_2O} = 5978,4 \text{ Kg/h}$$

$$Q_{rib.} = 113,59 \text{ kW [kJ/s]}$$

$$\rightarrow \text{Sup.rib.} = 2,49 \text{ m}^2$$

$$\rightarrow \text{portata } P_{VAP} = 113,59 \times 3600 / 1921,4 = 212,82 \text{ kg/h}$$

ES.10 - DISTILLAZIONE PER RETTIFICA -*

Una **miscela organica** avente portata **F=200 Kmol/h** al 45% nel componente più volatile viene sottoposta a rettificazione continua per ottenere un distillato al 95% e un residuo all'8%. L'alimentazione entra liquida al punto d'ebollizione del liquido che trova nel piatto. Si utilizza un rapporto di riflusso R = 1,5 R_{min}. Calcolare i traffici in colonna e il numero di piatti. Calcolare il calore necessario al ribollitore (vapore di rete a T=160°C). Determinare la quantità di acqua necessaria per condensare il vapore di testa, avente T= 120°C, sapendo che l'acqua entra a 20° ed esce a 50°C. Determinare inoltre la superficie di scambio del condensatore di testa. Curva di equilibrio X-Y passa per i seguenti punti:

X:	0/	0,05/	0,1/	0,2/	0,35/	0,45/	0,6/	0,7/	0,8/	1
Y:	0/	0,15/	0,35/	0,55/	0,72/	0,82/	0,9/	0,96/	0,98/	1

Si conoscono:

$$U_{COND} = 7,15 \text{ Kw/m}^2 \text{ }^\circ\text{C (coeff.glob.scambio);}$$

$$U_{RIB} = 10 \text{ Kw/m}^2 \text{ }^\circ\text{C (coeff.glob.scambio);}$$

$$C_p = 4,18 \text{ Kj/kg}^\circ\text{C (calore specifico dell'acqua)}$$

$$\Delta H_{COND} \text{ vap.rete} = 1892,3 \text{ Kj/kg (calore latente del vapore di}$$

$$\text{rete}); \Delta H_{EV-COND} = 40 \text{ Kj/mole (cal.lat. vapore a qualsiasi composizione)}$$

soluzione:

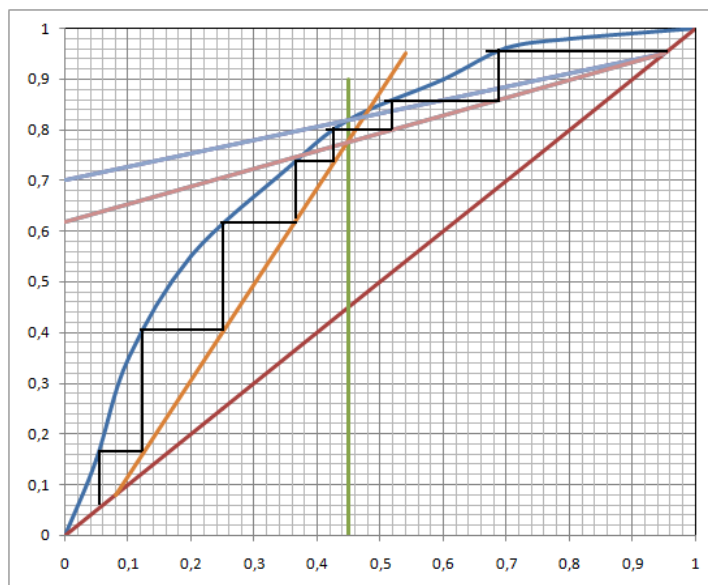
a) Bilanci di materia

$$F = D + W = 200 \text{ Kmol/h (generale)}$$

$$F x_{AF} = D x_{AD} + W x_{AW}$$

$$\rightarrow D = 85,06 \text{ kmol/h; } W = 114,94 \text{ Kmol/h;}$$

b) diagramma x/y dai dati di equilibrio:fattore q = 1; retta q verticale; dal diagr. → y_{min}=x_D/(R_{min}+1) = 0,7; da cui R_{min} = 0,36; Roperat.= 0,54; →y= 0,62;



traccio la retta di arricchimento da ascissa $x=y=0,95$ a $y=0,62$; dove incontra la retta q traccio la retta esaurimento fino al p.to $x=y=0,08$; →col metodo McCabe calcolo il N° piatti teorici = 7;

c) Portate in colonna

$$R = L/D = 0,536; V = D + L; L' = W + V';$$

$$q = (L' - L)/F = 1; V' = L' - W;$$

$$\rightarrow L = 45,57 \text{ kmol/h}; V = 130,62 \text{ kmol/h};$$

$$L' = q \times F + L = 245,55 \text{ kmol/h}; V' = 130,6 \text{ kmol/h};$$

d) Bilanci termici al **CONDENSATORE**

$$\Delta T_{ml} = (\Delta T1 - \Delta T2) / \ln (\Delta T1 / \Delta T2)$$

$$\Delta T1 = 120 - 20 = 100; \Delta T2 = 120 - 50 = 70;$$

$$Q_{cond} = \Delta H_{cond} \times V = U \times \text{Sup.} \times \Delta T_{ml} = P_{H2O} \times c \times (50 - 20);$$

$$\Delta H_{COND} = 40000 \text{ kJ/kmol}$$

$$\rightarrow \Delta T_{ml} = 84,11^{\circ}\text{C}$$

$$Q_c = 1451,4 \text{ kW [kJ/s]}$$

$$\rightarrow \text{Sup. condensatore} = 2,41 \text{ m}^2$$

$$\rightarrow \text{portata } P_{H2O} = 41666 \text{ Kg/h}$$

e) Bilanci termici al **RIBOLLITORE**

$$Q_{rib} = \Delta H \times V' = P_{VAP} \times \Delta H_{VAP};$$

$$\Delta H_{RIBW} = 40000 \text{ kJ/kmole}; \Delta H_{VAP} = 1892,3 \text{ kJ/Kg}$$

$$Q_{rib.} = 1451,16 \text{ kW [kJ/s]}; \text{Sup.rib.} = 6,91 \text{ m}^2;$$

$$\rightarrow \text{portata } P_{VAP} = 1451,16 \times 3600 / 1892,3 = 2761 \text{ kg/h}$$

ES.11 DISTILLAZIONE PER RETTIFICA – nESANO-nOTTANO-*

Si vuole distillare una miscela di n-esano e n-ottano avente portata $F = 400 \text{ Kmol/h}$ con un $XD = 96\%$, $XW = 4\%$. L'alimentazione entra al 45% in n-esano con 40% allo stato di vapore saturo al punto di ebollizione. La T iniziale dell'alimentazione è 20°C . Si opera con un riflusso maggiorato del 25% rispetto all' R_{min} in condizioni pinch.

Il vapore di testa esce alla $T^{\circ} = 71,8^{\circ}\text{C}$ e viene fatto condensare in un condensatore a fascio tubero che utilizza acqua avente $T_{aqi} = 20^{\circ}\text{C}$ e $T_{aqu} = 35^{\circ}\text{C}$.

Dati di equilibrio:

X:	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Y:	0	0,36	0,56	0,68	0,77	0,83	0,88	0,92	0,95	0,98	1

altri dati:

$C_p = 4,18 \text{ kJ / Kg }^{\circ}\text{C}$; $U_D = 0,09 \text{ kW/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$; testa col. $\Delta H_{cond} = 251,1 \text{ kJ/Kmol}$;

Calcolare il numero di piatti; i traffici in colonna; il calore da sottrarre al condensatore, la portata di acqua per condensare il vapore e la superficie del condensatore.

soluzione:

a) Bilanci di materia

$$F = D + W = 400 \text{ Kmol/h (generale)}$$

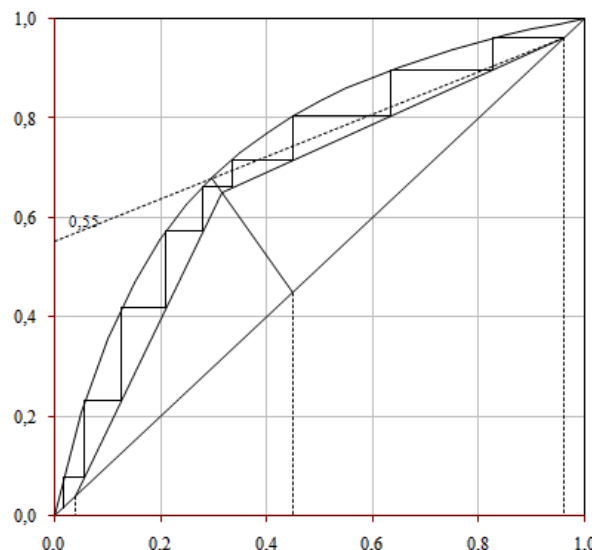
$$\underline{F x_{AF} = D x_{AD} + W x_{AW}}$$

$$\rightarrow D = 178,3 \text{ kmol/h}; W = 221,7 \text{ Kmol/h};$$

b) diagramma x/y dai dati di equilibrio: fattore $q = 0,6$; dal diagr. →

$$y_{min} = x_D / (R_{min} + 1) = 0,55; \text{ da cui } R_{min} = 0,74; \text{ Roperat.} = 0,92; \rightarrow y = 0,5;$$

traccio la retta di arricchimento da ascissa $x=y=0,96$ a $y=0,5$;
dove incontra la retta q traccio la retta esaurimento fino al p.to
 $x=y=0,04$; →col metodo McCabe calcolo il N° piatti teorici = 9;



c) Portate in colonna

$$R = L/D = 0,92; V = D + L; L' = W + V';$$

$$q = (L' - L)/F = 0,6; V' = L' - W;$$

$$\rightarrow L = 163,9 \text{ kmol/h}; V = 342,2 \text{ kmol/h};$$

$$L' = q \times F + L = 403,9 \text{ kmol/h}; V' = 182,2 \text{ kmol/h};$$

d) Bilanci termici al **CONDENSATORE**

$$\Delta T_{ml} = (\Delta T1 - \Delta T2) / \ln (\Delta T1 / \Delta T2)$$

$$\Delta T1 = 71,8 - 20 = 49,8; \Delta T2 = 71,8 - 35 = 36,8;$$

$$Q_{cond} = \Delta H_{cond} \times V = U \times \text{Sup.} \times \Delta T_{ml} = P_{H2O} \times c \times (35 - 20);$$

$$\Delta H_{COND} = 252,1 \text{ kJ/kmol}$$

$$\rightarrow \Delta T_{ml} = 43,89^{\circ}\text{C}$$

$$Q_c = 23,87 \text{ kW [kJ/s]}$$

$$\rightarrow \text{Sup. condensatore} = 6,04 \text{ m}^2$$

$$\rightarrow \text{portata } P_{H2O} = 1370,4 \text{ Kg/h}$$

ES.12 DISTILLAZIONE PER RETTIFICA – TOLUENE – STIRENE -**

Una miscela contenente due sostanze organiche, è sottoposta a rettifica continua. La miscela, inizialmente alla temperatura di 40°C , viene preriscaldata ed entra nella colonna al 75% liquido al punto di ebollizione con una portata di $F = 7200 \text{ Kmol/h}$. Le composizioni delle correnti, espresse come frazioni molari del componente più volatile toluene(A), sono: alimentazione $X_F = 0,45$; distillato $X_D = 0,98$; residuo $X_W = 0,015$. Il riflusso viene realizzato con un rapporto effettivo: $Reff. = 1,9 R_{min}$. Le temperature di esercizio sono le seguenti: -temperatura di condensazione dei vapori di testa: $110,7^{\circ}\text{C}$; -temperatura di ebollizione dell'alimentazione: 125°C ; -temperatura di ebollizione del residuo: $145,2^{\circ}\text{C}$. Il calore latente di condensazione-evaporazione della miscela è di 40 kJ/Kmol , costante per tutte le composizioni. Il condensatore di testa a fascio tubero viene refrigerato con acqua, calore specifico $4.18 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$, entra a $T_{aqi} = 35^{\circ}\text{C}$ esce a $T_{aqu} = 60^{\circ}\text{C}$.

Calcolare: Il numero di piatti effettivi, (rendimento $\eta = 75\%$), i traffici in colonna, la portata di acqua al condensatore; l'area di scambio termico del condensatore sapendo che in esso si realizza un coefficiente globale di scambio termico $U_{cond}=1,5 \text{ kW}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})$; il calore da somministrare al ribollitore di coda, la sua superficie e la portata di vapore di rete, considerando $U_{rib}=1,5 \text{ kW}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})$, $T_{coda}=145,2^\circ\text{C}$, $T_{vapore \text{ di rete}}=170^\circ\text{C}$ con $\Delta H_{COND} = 1863,24 \text{ kJ/kg}$.

Dati di equil:

X:	0	0,05	0,15	0,20	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,80	0,90	1
Y:	0	0,12	0,32	0,40	0,47	0,59	0,68	0,76	0,83	0,91	0,96	1

soluzione:

a) Bilanci di materia

$$F = D + W = 7200 \text{ Kmol/h (generale)}$$

$$F x_{AF} = D x_{AD} + W x_{AW}$$

$$\rightarrow D = 3245,6 \text{ kmol/h; } W = 3954,4 \text{ Kmol/h;}$$

b) diagramma x/y dai dati di equilibrio: fattore $q = 0,75$; dal diagr.

$$\rightarrow y_{min} = x_D / (R_{min} + 1) = 0,39; \text{ da cui } R_{min} = 1,5; \text{ Roperat.} = 2,847;$$

$\rightarrow y = 0,25$; traccio la retta di arricchimento da ascissa $x = y = 0,98$ a $y = 0,25$; dove incontra la retta q traccio la retta esaurimento fino al p.to $x = y = 0,015$; \rightarrow col metodo McCabe calcolo il N°piatti teorici = 13; N°piatti reali = $Nt/0,75 = 18$;

c) Portate in colonna

$$R = L/D = 2,847; V = D + L; L' = W + V';$$

$$q = (L' - L)/F = 0,75; V' = L' - W;$$

$$\rightarrow L = 9239 \text{ kmol/h; } V = 12484,4 \text{ kmol/h;}$$

$$L' = q \times F + L = 14639 \text{ kmol/h; } V' = 10684,4 \text{ kmol/h;}$$

e) Bilanci termici al CONDENSATORE

$$\Delta T_{ml} = (\Delta T1 - \Delta T2) / \ln (\Delta T1 / \Delta T2)$$

$$\Delta T1 = 110,7 - 35 = 75,7^\circ; \Delta T2 = 110,7 - 60 = 50,7^\circ;$$

$$Q_{cond} = \Delta H_{cond} \times V = U \times \text{Sup.} \times \Delta T_{ml} = P_{H_2O} \times c \times (60 - 35);$$

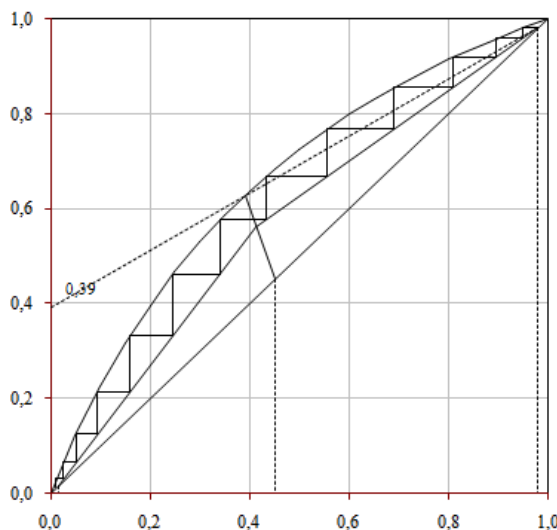
$$\Delta H_{COND} = 40 \text{ kJ/kmol}$$

f) Bilanci termici al RIBOLLITORE

$$Q_{rib} = U_{rib} \times \text{Sup} \times \Delta T = \Delta H \times V' = P_{VAP} \times \Delta H_{VAP};$$

$$\Delta H_{RIBW} = 40 \text{ kJ/kmole;}$$

$$\Delta H_{VAP} = 1863,24 \text{ kJ/Kg}$$



$$\rightarrow \Delta T_{ml} = 62,32^\circ\text{C}$$

$$Q_c = 138,72 \text{ kW [kJ/s]}$$

$$\rightarrow \text{Sup. condensatore} = 1,48 \text{ m}^2$$

$$\rightarrow \text{portata } P_{H_2O} = 4778 \text{ Kg/h}$$

$$\Delta T = 170 - 145,2 = 24,8^\circ\text{C};$$

$$Q_{rib} = 118,72 \text{ kW [kJ/s]}$$

$$\text{Sup} = Q / (U_{rib} \times \Delta T) = 3,19 \text{ m}^2;$$

$$\rightarrow \text{portata } P_{VAP} = 118,8 \times 3600 / 1863,24 = 229,4 \text{ kg/h}$$

ES.13 DISTILLAZIONE PER RETTIFICA – TEMA DI ESAME '12 -*

Una miscela a due componenti, la cui composizione è $x_F = 0,56$ (più volatile), è sottoposta a rettificazione continua. Si ottiene un distillato di composizione $x_D = 0,98$ (componente più volatile) e un prodotto di fondo di composizione $x_W = 0,05$. La portata della miscela è $F = 3,5 \text{ mol/s}$ ed entra in colonna allo stato liquido e alla temperatura $T_F = 122^\circ\text{C}$. Il distillato esce a $T_D = 88^\circ\text{C}$ e il prodotto di coda esce a $T_W = 144^\circ\text{C}$. Si opera con un rapporto di riflusso effettivo $R = 1,45$ e nel condensatore di testa si sottrae solo calore latente. Per tutte le composizioni della miscela il calore latente è $\Delta H = 34 \text{ kJ/mol}$ e il calore specifico è $c_p = 0,165 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot ^\circ\text{C})$.

Ipotizzando che le perdite termiche siano trascurabili, con i dati a disposizione il candidato calcoli:

- la portata del distillato e del prodotto di coda;
- la portata del vapore di testa;
- la potenza termica da sottrarre nel condensatore di testa;
- la potenza termica da fornire nel ribollitore di coda.

Soluzione:

a) Bilanci di materia

$$F = D + W = 3,5 \text{ mol/s}$$

$$F x_{AF} = D x_{AD} + W x_{AW}; 3,5 \times 0,56 = D \times 0,98 + W \times 0,05;$$

$$R = 1,45; q = 1;$$

$$\rightarrow D = 1,92 \text{ mol/s; } W = 1,58 \text{ mol/s;}$$

$$\rightarrow L = R \times D = 2,784 \text{ mol/s; } V = L + D = 4,7 \text{ mol/s}$$

b) Bilanci termici al CONDENSATORE

$$Q_{cond} = \Delta H_{cond} \times V = 34 \times 4,7;$$

$$\Delta H_{COND} = 34 \text{ kJ/mol}$$

$$\rightarrow Q_c = 159,8 \text{ kW [kJ/s]} \text{ potenza termica condens.}$$

c) Potenza termica da fornire al ribollitore Q_r : Bilancio termico sulla colonna

$$Q_F + Q_{rib} = Q_D + Q_W + Q_{cond}; Q_{rib} = Q_D + Q_W + Q_{cond} - Q_F;$$

$$Q_F = F \times c_p \times T_F = 3,5 \times 0,165 \times 122 = 70,46 \text{ kW;}$$

$$Q_D = D \times c_p \times T_D = 1,92 \times 0,165 \times 88 = 27,9 \text{ kW; } Q_W = W \times c_p \times T_W = 1,58 \times 0,165 \times 144 = 37,5 \text{ kW; } \rightarrow Q_{rib} = 154,74 \text{ kW.}$$

ES.14 DISTILLAZIONE PER RETTIFICA – simil TEMA DI ESAME 1990 -*

Una miscela ideale a due componenti, la cui composizione è $x_F = 0,4$ (più volatile), è sottoposta a rettificazione continua. Si ottiene un distillato di composizione $x_D = 0,975$ (componente più volatile) e un prodotto di fondo di composizione $x_W = 0,02$. La portata della miscela è $F = 6 \text{ kmol/h}$ ed entra in colonna al 50% allo stato liquido alla temperatura di ebollizione e 50% vapore al p.to rugiada. Si opera con un rapporto di riflusso effettivo $R = 1,4 R_{\text{minimo}}$. Per tutte le composizioni della miscela il calore latente è $\Delta H = 31,401 \text{ kJ/mol}$. Sono noti i valori della curva di equilibrio X/Y . Con i dati a disposizione il candidato calcoli: la portata di distillato di testa e coda, le portate di liquido e vapore nella colonna, la quantità di calore da sottrarre nel condensatore e da fornire nel ribollitore, il N°piatti teorici. Dati di equilibrio:

X:	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Y:	0	0,3	0,47	0,612	0,68	0,75	0,8	0,86	0,91	0,96	1

soluzione:

a) Bilanci di materia

$$\begin{aligned} F &= D + W = 6 \text{ kmol/h} && \rightarrow D = 2,39 \text{ kmol/h;} \\ Fx_F &= Dx_D + Wx_W && W = 3,61 \text{ kmol/h;} \end{aligned}$$

b) diagramma x/y dai dati di equilibrio: fattore $q = 0,5$; dal diagr. $\rightarrow y_{\text{min}} = x_D / (R_{\text{min}} + 1) = 0,4$; da cui $R_{\text{min}} = 1,44$; $R_{\text{operat.}} = 1,4 R_{\text{min}} = 2,01$; $\rightarrow y = 0,32$; traccio la retta di arricchimento da ascissa $x = y = 0,975$ a $y = 0,32$; dove incontra la retta q traccio la retta esaurimento fino al p.to $x = y = 0,02$;

\rightarrow col metodo McCabe calcolo il N°piatti teorici = 12;

c) Portate in colonna

$$\begin{aligned} R &= L/D = 2; \quad V = D + L; \quad L' = W + V'; \\ q &= (L' - L)/F = 0,5; \quad V' = L' - W; \end{aligned}$$

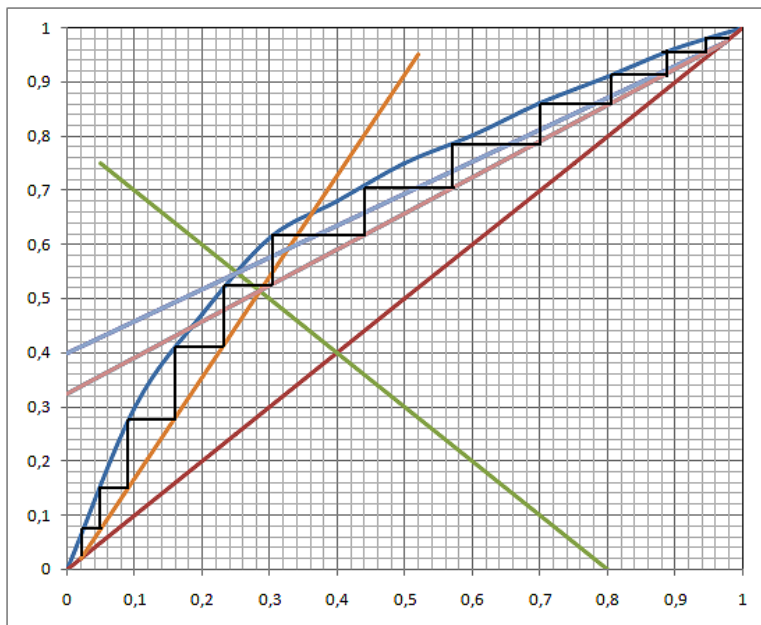
$$\begin{aligned} \rightarrow L &= 4,8 \text{ kmol/h}; \quad V = 7,19 \text{ kmol/h}; \\ L' &= q \times F + L = 7,8 \text{ kmol/h}; \quad V' = 4,19 \text{ kmol/h}; \end{aligned}$$

d) Bilanci termici al CONDENSATORE

$$\begin{aligned} Q_{\text{cond}} &= \Delta H_{\text{cond}} \times V \\ \Delta H_{\text{COND}} &= 31401 \text{ kJ/kmol}; \rightarrow Q_c = 62,73 \text{ kW} \quad [\text{kJ/s}] \end{aligned}$$

e) Bilanci termici al RIBOLLITORE

$$Q_{\text{rib}} = V' \times \Delta H_{\text{RIBW}}; \quad \Delta H_{\text{RIBW}} = 31401 \text{ kJ/kmol}; \rightarrow Q_{\text{rib}} = 36,57 \text{ kW} \quad [\text{kJ/s}]$$



ES.15 DISTILLAZIONE PER RETTIFICA – SIMIL-TEMA DI ESAME '98-*

Una miscela ideale a due componenti, la cui composizione è $x_F = 0,3$ (più volatile), è sottoposta a rettificazione continua. Si ottiene un distillato di composizione $x_D = 0,98$ (componente più volatile) e un prodotto di fondo di composizione $x_W = 0,015$. La portata della miscela è $F = 3,5 \text{ mol/s}$ ($12,6 \text{ kmol/h}$) ed entra in colonna allo stato liquido alla temperatura di ebollizione. Si opera con un rapporto di riflusso effettivo $R = 1,5 R_{\text{minimo}}$. Per tutte le composizioni della miscela il calore latente è $\Delta H = 28,5 \text{ kJ/mol}$ e calore specifico $c = 0,16 \text{ kJ/mol}^\circ\text{C}$. Sono noti i valori della curva di equilibrio X/Y . L'alimentazione è disponibile a 25°C e $T_{\text{eboll.}} = 85^\circ\text{C}$. Con i dati a disposizione il candidato calcoli: la portata di distillato di testa e coda, le portate di liquido e vapore nella colonna, la quantità di calore da sottrarre nel condensatore e da fornire nel ribollitore, il N°piatti teorici, la quantità di calore al preriscaldatore.

Dati di equilibrio:

X:	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Y:	0	0,3	0,47	0,6	0,68	0,75	0,81	0,86	0,91	0,96	1

soluzione:

Bilanci di materia

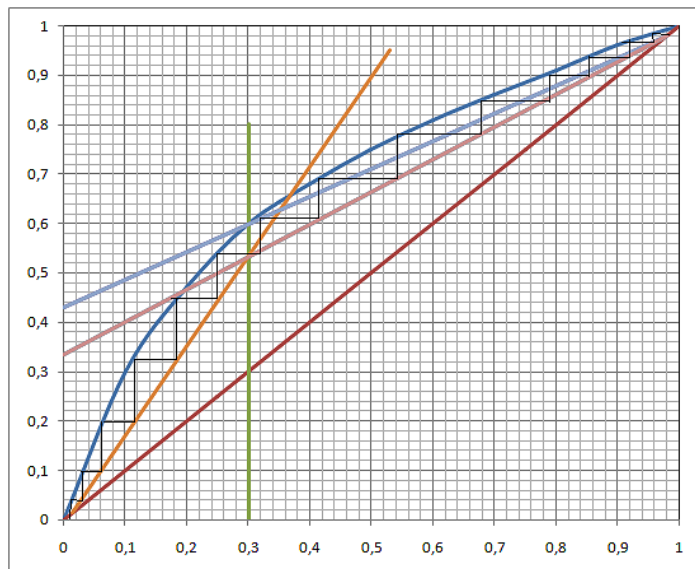
$$\begin{aligned} F &= D + W = 3,5 \text{ mol/s} && \rightarrow D = 1,03 \text{ mol/s}; \quad W = 2,47 \text{ mol/s}; \\ Fx_{AF} &= Dx_{AD} + Wx_{AW}; \end{aligned}$$

a) diagramma x/y dai dati di equilibrio: fattore $q = 1$; dal diagr. $\rightarrow y_{\text{min}} = x_D / (R_{\text{min}} + 1) = 0,43$; da cui $R_{\text{min}} = 1,28$; $R_{\text{operat.}} = 1,92$; $\rightarrow y = 0,34$; traccio la retta di arricchimento da ascissa $x = y = 0,98$ a $y = 0,43$; dove incontra la retta q traccio la retta esaurimento fino al p.to $x = y = 0,015$; \rightarrow col metodo McCabe calcolo il N°piatti teorici = 14;

c) Portate in colonna

$$\begin{aligned} R &= L/D = 1,9; \quad V = D + L; \quad L' = W + V'; \\ q &= (L' - L)/F = 1; \quad V' = L' - W; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow L &= 1,98 \text{ mol/s}; \quad V = 3,02 \text{ mol/s}; \\ L' &= q \times F + L = 5,48 \text{ mol/s}; \quad V' = 3,02 \text{ mol/s}; \end{aligned}$$



d) Bilanci termici al **CONDENSATORE**

$$Q_{cond} = \Delta H_{cond} \times V ; \Delta H_{COND} = 28,5 \text{ kJ/mol}; \rightarrow Q_c = 85,98 \text{ kW [kJ/s]}$$

e) Bilanci termici al **RIBOLLITORE**

$$Q_{rib} = V' \times \Delta H_{RIBW};$$

$$\Delta H_{RIBW} = 28,5 \text{ kJ/mol}; \rightarrow Q_{rib} = 85,98 \text{ kW [kJ/s]}$$

PRERISCALDAMENTO:

$$Q_{risc} = F \times C_x \times \Delta T = 3,5 \times 0,16 \times (85 - 25) = 33,6 \text{ kW.}$$

ES.16 – DISTILLAZIONE PER RETTIFICA - ETANOLO-ACQUA -*

Una colonna di distillazione viene alimentata con una portata $F = 31 \text{ Kmoli/h}$ di una miscela formata da acqua (A) e etanolo (E) contenente il 32% del componente più volatile (E). Il distillato D, contiene 85% di etanolo, il residuo il 4%.

L'alimentazione entra liquida in colonna alla temperatura di ebollizione. Il riflusso è $R = 1,4 R_{min}$; $T_D = 78,4^\circ$, $T_W = 100^\circ\text{C}$; Per ogni composizione ΔH di passaggio di stato è $= 40 \text{ kJ/mol}$; condensatore: acqua in ingresso $T_{aqi} = 18^\circ$, uscita $T_{aqu} = 40^\circ\text{C}$, $cp = 4,18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, coeff. $U = 1,1 \text{ kW/m}^2\text{C}$; ribollitore $U = 1,5 \text{ kW/m}^2\text{C}$, usa vapore di rete a $T_v = 130^\circ\text{C}$ $\Delta H_{cond} = 1979,56 \text{ kJ/kg}$. In queste condizioni calcolare: le portate di distillato e di residuo; le portate delle correnti in colonna (V, L, V', L'); il numero dei piatti teorici; il numero dei piatti effettivi, sapendo che l'efficienza della colonna è del 75%; potenza termica e superfici di scambio di condensatore e ribollitore, la portata di acqua di raffreddamento e di vapore di rete.

La curva del diagramma di equilibrio X/Y può essere disegnata conoscendo i seguenti dati:

X	0	0,05	0,10	0,15	0,25	0,45	0,60	0,85	0,90	1
Y	0	0,11	0,20	0,29	0,43	0,65	0,77	0,93	0,95	1

soluzione:

Bilanci di materia

$$F = D + W = 31 \text{ Kmoli/h (generale)}$$

$$F x_{AF} = D x_{AD} + W x_{AW} \text{ (componente A)}$$

$$\rightarrow D = 10,7 \text{ kmol/h}; W = 20,3 \text{ Kmoli/h};$$

diagramma x/y dai dati di equilibrio: fattore $q = 1$; retta q verticale; dal diagr. $\rightarrow y_{min} = x_D / (R_{min} + 1) = 0,32$; da cui $R_{min} = 1,7$; $R_{operat.} = 2,37$; $\rightarrow y = 0,25$; traccio la retta di arricchimento da ascissa $x = y = 0,85$ a $y = 0,25$; dove incontra la retta q traccio la retta esaurimento fino al p.to $x = y = 0,04$; \rightarrow col metodo McCabe calcolo il N° piatti teorici = 12 (alimentazione dopo il 4); N° piatti reali = 17;

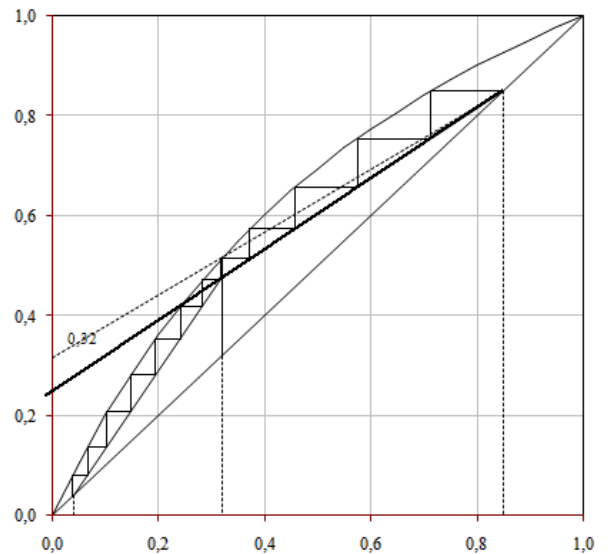
Portate in colonna

$$R = L/D = 2,37; V = D + L; L' = W + V';$$

$$q = (L' - L)/F = 1; V' = L' - W;$$

$$\rightarrow L = 25,4 \text{ kmol/h}; V = 36,1 \text{ kmol/h};$$

$$L' = q \times F + L = 56,4 \text{ kmol/h}; V' = 36,1 \text{ kmol/h};$$



Bilanci termici al **CONDENSATORE:**

$$\Delta T_{ml} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln (\Delta T_1 / \Delta T_2)$$

$$\Delta T_1 = 78,4 - 18 = 60,4^\circ; \Delta T_2 = 78,4 - 40 = 38,4^\circ\text{C};$$

$$Q_{cond} = \Delta H_{cond} \times V = U \times \text{Sup.} \times \Delta T_{ml} = P_{H_2O} \times c \times (40 - 18);$$

$$\Delta H_{COND} = 40000 \text{ kJ/kmol}$$

$$\rightarrow \Delta T_{ml} = 48,53^\circ\text{C}; Q_c = 401,63 \text{ kW [kJ/s]}$$

$$\rightarrow \text{Sup. condensatore} = 7,52 \text{ m}^2; \rightarrow \text{portata } P_{H_2O} = 15723 \text{ Kg/h}$$

Bilanci termici al **RIBOLLITORE:**

$$Q_{rib} = U_{rib} \times \text{Sup} \times \Delta T = \Delta H \times V_B = P_{VAP} \times \Delta H_{VAP};$$

$$\Delta H_{RIBW} = 40 \text{ kJ/mole}; \Delta H_{VAP} = 1979,56 \text{ kJ/Kg}$$

$$\Delta T = 130 - 100 = 30^\circ\text{C};$$

$$Q_{rib} = 401,63 \text{ kW [kJ/s]}$$

$$\text{Sup} = Q / (U_{rib} \times \Delta T) = 9 \text{ m}^2;$$

$$\rightarrow \text{portata } P_{VAP} = 401,63 \times 3600 / 1979,56 = 730,4 \text{ kg/h}$$

ES.17 – DISTILLAZIONE per RETTIFICA – simil TEMA ESAME '96 -*

Una miscela acquosa ideale a due componenti, la cui composizione è $x_F = 0,8$ (soluto più volatile), è sottoposta a rettificazione continua. Si ottiene un distillato di composizione $x_D = 0,99$ (componente più volatile) e un prodotto di fondo di composizione $x_W = 0,1$. La portata della miscela è $F = 2 \text{ mol/s}$ ed entra in colonna come liquido alla temperatura di ebollizione. Si opera con un rapporto di riflusso effettivo $R = 1,5$. Per tutte le composizioni della miscela il calore latente è $\Delta H = 40 \text{ kJ/mol}$. Con i dati a disposizione il candidato calcoli: la portata di distillato di testa e coda, le portate di liquido e vapore nella colonna, la quantità di calore da sottrarre nel condensatore e da fornire nel ribollitore, e la portata d'acqua, sapendo che la $T_{distillato}$ di testa $T_d = 110^\circ\text{C}$, di coda $T_w = 145^\circ\text{C}$, nel condensatore, con coeff. globale $U = 1,5 \text{ kW/m}^2\text{C}$, l'acqua entra a $T_{aqi} = 35^\circ\text{C}$ esce a $T_{aqu} = 60^\circ\text{C}$, cal. specif. $C = 4,18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$.

Soluzione:

Bilanci di materia

$$F = D + W = 2 \text{ mol/s (generale)}$$

$$F x_{AF} = D x_{AD} + W x_{AW} \text{ (componente A)}$$

$$\rightarrow D = 1,57 \text{ mol/s}; W = 0,43 \text{ mol/s};$$

Portate in colonna:

$$R = L/D = 1,5; V = D + L; L' = W + V';$$

$$q = (L' - L)/F = 1; V' = L' - W;$$

$$\rightarrow L = 2,37 \text{ mol/s}; V = 3,94 \text{ mol/s}; L' = q \times F + L = 4,37 \text{ mol/s}; V' = 3,94 \text{ mol/s};$$

Bilanci termici al **CONDENSATORE:**

$$\Delta T_{ml} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln (\Delta T_1 / \Delta T_2); Q_{cond} = \Delta H_{cond} \times V = U \times \text{Sup.} \times \Delta T_{ml} = P_{H_2O} \times c \times (60 - 35); \Delta H_{COND} = 40 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta T_1 = 110 - 35 = 75^\circ\text{C}; \quad \Delta T_2 = 110 - 60 = 50^\circ\text{C}; \quad \rightarrow \Delta T_{ml} = 61,66^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow Q_c = 157,6 \text{ kW [kJ/s]}; \rightarrow \text{Sup. condensatore} = 1,7 \text{ m}^2; \rightarrow \text{portata } P_{H_2O} = 1,51 \text{ kg/s} = 5429 \text{ Kg/h}; Q_{cond} = Q_{rib}.$$

***ES.17B – DISTILLAZIONE per RETTIFICA – simil TEMA ESAME '93**

Miscela 2 composti organici – rettifica in colonna a piatti – riflusso con condensazione parziale nel 1° condensatore come L, il resto condensato nel 2° condensatore come prod.testa D.

-DATI: portata $F = 5 \text{ kmol/h}$ $T_{if} = 55^\circ\text{C}$, $z_F = 0,35$ (componente più volatile); ingresso colonna liquido a Tebollizione $= 120^\circ\text{C}$; $\Delta H_{evap/cond} = 45 \text{ kJ/mol}$; $C_p = 167 \text{ J/mol}^\circ\text{C}$; $R = 2,2$ effettivo; $x_D = 0,98$; $x_W = 0,03$; condensatore a $T_C = 75^\circ\text{C}$; ribollitore a $T_R = 135^\circ\text{C}$, con vap.saturo a $T = 150^\circ\text{C}$ e coeff. $U_R = 1200 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$;

DETERMINARE: D, W, potenza termica da sottrarre ai 2 condensatori (solo condensaz.), calore di preriscaldamento alimentazione, area scambio termico ribollitore.

Soluzione:

Bilanci di materia

Portate in colonna:

$$F = D + W = 5 \text{ kmol/h (generale)}$$

$$R = L/D = 2,2; \quad L = RD = 3,7 \text{ kmol/h}; \quad V = V' = D + L = 5,38 \text{ kmol/h};$$

$$F x_{AF} = D x_{AD} + W x_{AW} \text{ (componente A)}$$

$$L' = W + V' = 8,7 \text{ kmol/h}; \quad q = (L' - L)/F = 1;$$

$$\rightarrow D = 1,68 \text{ kmol/h}; \quad W = 3,32 \text{ kmol/h};$$

$$1^\circ \text{RIBOLLITORE: } Q_1 = \Delta H \cdot L = 166500/3600 = 46,25 \text{ kW [kJ/s]}$$

$$2^\circ \text{RIBOLLITORE: } Q_2 = \Delta H \cdot D = 1,68 \cdot 45000/3600 = 21 \text{ kW}$$

$$\text{PRERISCALDAMENTO ALIM. } Q_F = F C_p (120 - 55) = 15,1 \text{ Kw};$$

$$\text{RIBOLLITORE: } Q_R = \Delta H \cdot V' = 67,25 \text{ Kw}; \quad \text{Sup} = Q_R / [U \cdot (150 - 135)] = 3,74 \text{ m}^2.$$

***ES.17C – DISTILLAZIONE per RETTIFICA – simil TEMA ESAME '95**

DATI: colonna a piatti rettifica continua di soluzione acquosa etanolo $F = 50 \text{ kmol/h}$, $x_F = 0,22$, a Tebollizione; distillato di testa $x_D = 0,80$; di coda $x_W = 0,03$; rapp.riflusso effettivo $R = 3$; cal.latente evap/cond.a tutte le composizioni $\Delta H = 40 \text{ kJ/mol}$; \rightarrow si preleva da piatto sopra alimentazione un taglio laterale con frazione in etanolo $x_P = 0,50$, che asporta il 25% etanolo totale entrante nell'alimentazione;

DETERMINARE: portate D, W, P [taglio laterale]; potenza termica condensatore e ribollitore;

soluzione:

alimentazione: $F = 50 \text{ kmol/h}$; etanolo $F = 50 \cdot 0,22 = 11 \text{ kmol/h}$;

taglio laterale P: etanolo $P = 0,25 \cdot 11 = 2,75 \text{ kmol/h}$; $P = 2,75/0,50 = 5,5 \text{ kmol/h}$;

bilanci:

$$F = D + P + W; \quad F x_F = D x_D + P x_P + W x_W;$$

$$\rightarrow W = F - D - P; \quad F x_F = D x_D + P x_P + [F - D - P] x_W;$$

$$\rightarrow D = 9 \text{ kmol/h}; \quad W = 35,5 \text{ kmol/h};$$

$$R = L/D; \quad L = 3 \cdot 9 = 27 \text{ kmol/h}; \quad V = L + D = 36 \text{ kmol/h};$$

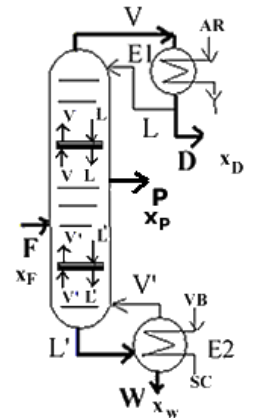
$$\rightarrow q = 1 = (L' - L^*)/F; \quad L^* = L - P = 27 - 5,5 = 21,5 \text{ kmol/h}; \quad \rightarrow L' = F + L^* = 71,5 \text{ kmol/h};$$

$$V' = L' - W = 36 \text{ kmol/h};$$

bilanci termici:

$$Q_{cond.} = \Delta H \cdot V = 40 \cdot 36 \cdot 1000/3600 = 400 \text{ kJ/s} = \text{kW};$$

$$Q_{ribol.} = \Delta H \cdot V' = 40 \cdot 36 \cdot 1000/3600 = 400 \text{ kJ/s} = \text{kW};$$



ES.18 DISTILLAZIONE per RETTIFICA – **ACETONE-ACQUA** -*

VEDI TABELLA PER DATI E RISULTATI – p=149,96 kPa – nota curva di equilibrio

Acetone-Acqua-

DATI:F=500 kmol/h;

XF=0,4; Xd=0,95;

Xw=0,05;

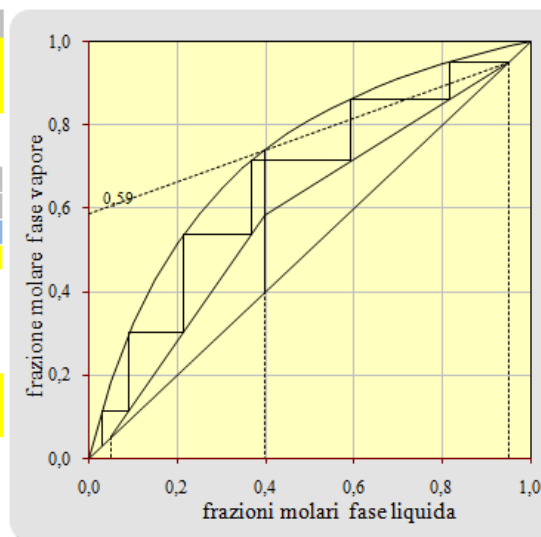
q=1 (liq. a tebollizione)

Rop=3,21 Rmin;

curva equilibrio:

x	y
0	0
0,1	0,32
0,2	0,515
0,3	0,646
0,4	0,739
0,5	0,81
0,6	0,864
0,7	0,908
0,8	0,944
0,9	0,975
1	1

sost più volatile		T _{eb} (°C)		α _{medio} = 4,25	
Acetone		68,1			
Acqua		111,8			max diff. = 1,041
sost meno volatile		149,96 : Pressione (kPa)			
Alimentazione F		Distillato D		Fondo W	
Portata F	Composizione xF	Composizione x			
500	0,4	0,95	0,05		
in Kmoli/h		Portate:	194,4	305,6	
Fattore Q		1			
Maggiorazione riflusso		3,21			
R _{min} =	0,62	y min. =	0,59		
R _{op} =	2,00	y effett. =	0,32		
Numero di piatti		6			
Alimentazione dopo il piatto		2			
Traffici in colonna		Liquido	Vapore		
Arricchimento		388,1	582,5		in Kmoli/h
Esaurimento		888,1	582,5		in Kmoli/h



Distillazione miscela Acetone Acqua

ES.18B – DISTILLAZIONE per RETTIFICA – **BENZENE-CLOROBENZENE** -*

VEDI TABELLA PER DATI E RISULTATI – p=101 kPa – nota curva di equilibrio -

Benzene –Clorobenzene

DATI:F=10000kmol/h

XF=0,45; Xd=0,98;

Xw=0,02;

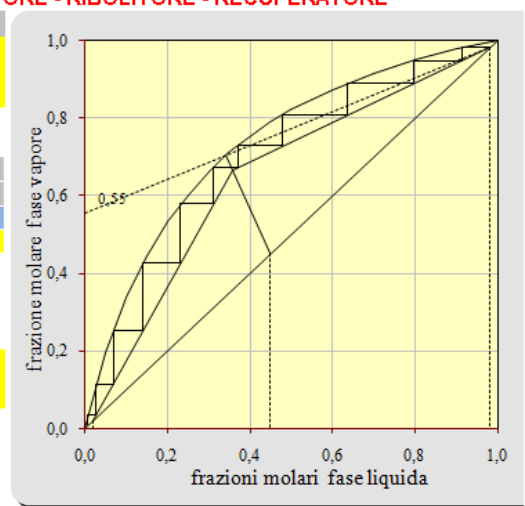
q=0,7 (70% liq. a Tebolliz)

Roper=1,32 Rmin;

curva equilibrio:

x	y
0	0
0,1	0,335
0,2	0,531
0,3	0,66
0,4	0,751
0,5	0,819
0,6	0,872
0,7	0,914
0,8	0,948
0,9	0,976
1	1

DISTILLAZIONE PER RETTIFICA - CONDENSATORE - RIBOLITORE - RECUPERATORE					
sost più volatile		T _{eb} (°C)		α _{medio} = 4,53	
Benzene		80,5			
Clorobenzene		132,3			max diff. = 0,660
sost meno volatile		101 : Pressione (kPa)			
Alimentazione F		Distillato D		Fondo W	
Portata F	Composizione xF	Composizione x			
10000	0,45	0,98	0,02		
in Kmoli/h		Portate:	4479,2	5520,8	
Fattore Q		0,7			
Maggiorazione riflusso		1,32			
R _{min} =	0,77	y min. =	0,55		
R _{op} =	1,02	y effett. =	0,49		
Numero di piatti		11			
Alimentazione dopo il piatto		5			
Traffici in colonna		Liquido	Vapore		
Arricchimento		4564,6	9043,8		in Kmoli/h
Esaurimento		11564,6	6043,8		in Kmoli/h



Distillazione miscela Benzene Clorobenze

***ES.18C** – DISTILLAZIONE per RETTIFICA – **BENZENE-CLOROBENZENE** – simil testo -

VEDI TABELLA PER DATI E RISULTATI – p=101 kPa – nota curva di equilibrio -

DATI: F=10000kmol/h

X_F=0,45; X_D=0,98; X_w=0,02;q=0,7 (70%

liq. a Tebolliz); Roper=1,26 Rmin;

soluzione: vedi tab. accanto→

DIAMETRO DELLA COLONNA: (1°metodo)

sezione di testa,p=1bar;T=353K;T°=273K

V=kmol/h;portata volumetrica:

Q_V= V/3600x22,4 T/T° (m³/s)

scelto da tab. v=0,65 m/s vel.vapori in

colonna, →distanza tra piatti=0,65 m;

Q_V =71,28 m³/s;

→diam_{Testa} = √(4 QV/πv)= 11,82 m;

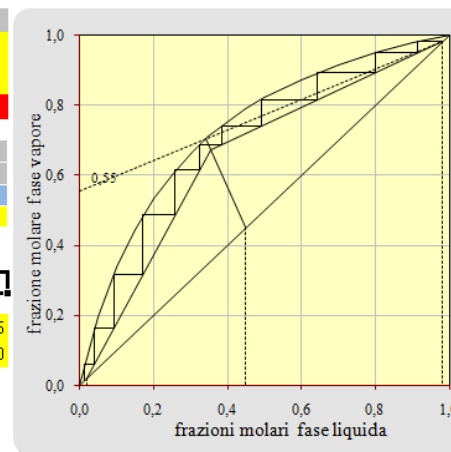
Sez.coda:p=1bar;T=405,3K;v=0,65m/s;

Q_V =54 m³/s; →diam_{Coda} =√(4 QV/πv)=

10,29 m;

(INIZIO)

sost più volatile		T _{eb} (°C)		α _{medio} = 4,53	
Benzene		80,5			
Clorobenzene		132,3			max diff. = 0,660
sost meno volatile		101 : Pressione (kPa)			
Alimentazione F		Distillato D		Fondo W	
Portata F	Composizione xF	Composizione x			
10000	0,45	0,98	0,02		
in Kmoli/h		Portate:	4479,2	5520,8	
Fattore Q		0,7			
Maggiorazione riflusso		1,26			
R _{min} =	0,77	y min. =	0,55		
R _{op} =	0,98	y effett. =	0,50		
Numero di piatti		11			
Alimentazione dopo il piatto		5			
Traffici in colonna		Liquido	Vapore		
Arricchimento		4367,5	8846,7		in Kmoli/h
Esaurimento		11367,5	5846,7		in Kmoli/h



ESERCIZI SU DISTILLAZIONE FLASH:-----**ES.1 – DISTILLAZIONE FLASH**

Si vuole distillare, con una distillazione flash, una miscela organica di due componenti aventi notevoli differenze delle tensioni di vapore e quindi delle temperature di ebollizione. La portata della soluzione è: $F = 50$ kmol/h; l'alimentazione entra al 40% nel componente più volatile, la distillazione termina al 46% vaporizzata alla T di ebollizione.

La curva di equilibrio Y / X è la seguente:

X: 0 0,12 0,25 0,35 0,50 0,70 0,81 1

Y: 0 0,36 0,6 0,73 0,85 0,95 0,98 1

Determinare:

1. la composizione dei vapori di testa y_D [e anche $=x_D$];
2. la composizione del liquido di coda x_W .
3. le portate di liquido W e di distillato D .

SOLUZIONE:

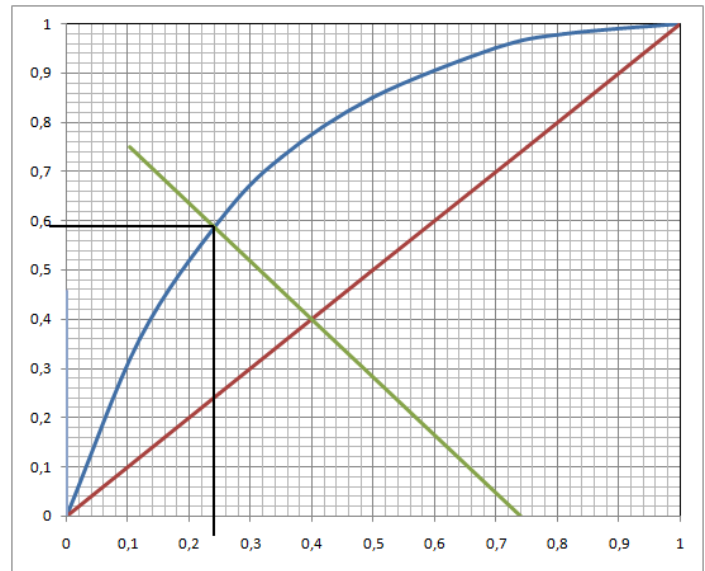
dal diagramma: posto $q=1-0,46=0,54$, $z_F=0,40$; retta q: $Y_D = q/(q-1) x_W - 1/(q-1) z_F$;

la retta q incontra le ascisse nel p.to [$Y=0; X = z_F/q = 0,74$] e sulla diagonale per $z_F=0,40$;

dal diagramma, incontro retta q con curva equilibrio: $y_D=0,59$; $x_W=0,24$

bilanci di materia: $F = D + W$; $Fz_F = Dy_D + Wx_W$; e similmente (assenza di ricircoli) $W = F \cdot q$; $D = F \cdot (1-q)$;

da cui $D=23$ kmol/h; $W=27$ kmol/h.

***ES.2 – DISTILLAZIONE FLASH- ALCOOL-ACQUA**

Si vuole distillare, con una distillazione flash, una miscela di due componenti alcol isopropilico al 20% e acqua;. La portata della soluzione è: $F = 500$ kmol/h; le condizioni finali sono di evaporazione al 20%, quindi 80% liquida alla Tebollizione.

La curva di equilibrio Y / X è la seguente:

X | 0/ 0,13/0,32/0,47/0,52/0,59/0,79/0,80/0,93/0,96/1

Y | 0/ 0,5/0,54/ 0,59/0,6/ 0,63/ 0,75/ 0,77/ 0,9/0,95/ 1

Determinare:

1. la composizione dei vapori di testa y_D ;
2. la composizione del liquido di coda x_W .
3. le portate di liquido W e di distillato D .

Soluzione: fattore $q = 0,80$; $z_F=0,20$; azeotropo $\Rightarrow x=0,7$;

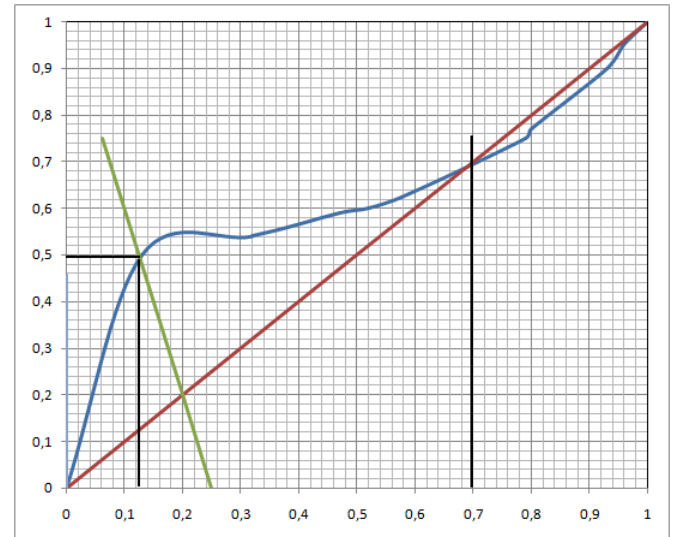
retta q: $Y_D = q/(q-1) x_W - 1/(q-1) z_F$;

la retta q incontra le ascisse nel p.to [$Y=0; X = z_F/q = 0,25$] e sulla diagonale per $z_F=0,20$;

dal diagramma, incontro retta q con curva equilibrio: $y_D = 0,5$; $x_W = 0,122$;

bilanci di materia: $F = D + W$; $Fx_F = Dy_D + Wx_W$; similmente (assenza di ricircoli) $W = F \cdot q$; $D = F \cdot (1-q)$;

da cui $D=100$ kmol/h; $W=400$ kmol/h

**ES. 3 - DISTILLAZIONE FLASH**

Una portata $F=650$ kmol/h di una miscela costituita dal 20% in moli del componente più volatile viene sottoposta a distillazione flash ottenendo, nelle condizioni finali di temperatura e pressione, una vaporizzazione del 25%. La curva di equilibrio liquido-vapore è espressa dalla seguente tabella:

x | 0, 0,1, 0,3, 0,5, 0,7, 0,9, 1,

y | 0, 0,3, 0,6, 0,75, 0,86, 0,96, 1

Determinare le portate e le composizioni del distillato e del residuo

Soluzione: fattore $q = 0,75$; $z_F=0,20$;

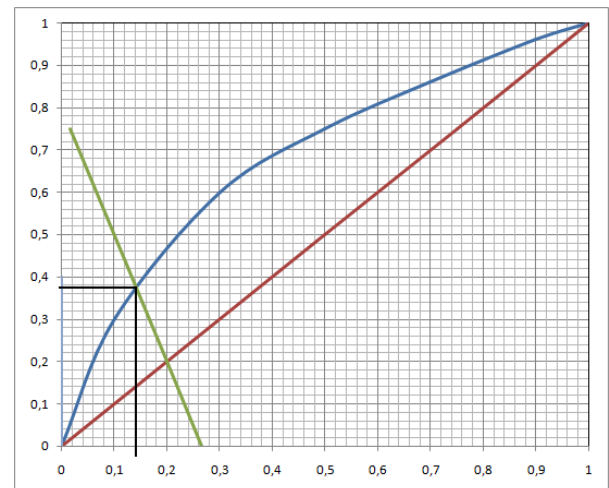
retta q: $Y_D = q/(q-1)x_W - 1/(q-1) z_F$; la retta q incontra le ascisse per $Y=0$; $\rightarrow X = z_F/q = 0,26$; dal diagramma, incontro retta q con curva

equilibrio: $y_D = 0,37$; $x_W = 0,14$;

bilanci di materia: $F = D + W$; $Fz_F = Dy_D + Wx_W$;

similmente (assenza di ricircoli) $W = F \cdot q$; $D = F \cdot (1-q)$;

da cui $D=162,5$ kmol/h; $W=487,5$ kmol/h



***ES. 4 - DISTILLAZIONE FLASH – ACQUA- ACETONE**

Una miscela acqua/acetone di portata $F=500 \text{ kmol/h}$, contenente il **30%** in moli di acetone, viene inviata ad una sistema di rettifica flash operante a pressione atmosferica. La miscela arriva in colonna come 50% liquido e 50% vapore saturo, ed il calore fornito è necessario per una vaporizzazione del **60%**.

Calcolare le portate e le composizioni del Distillato e del Residuo, nota la curva equilibrio seguente:

x	0	0,10	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
y	0	0,35	0,55	0,67	0,76	0,83	0,88	0,92	0,95	0,98	1

Soluzione:

fattore $q=0,40$; $z_F=0,30$;

retta q : $Y_D = q/(q-1)x_W - 1/(q-1)z_F$;

la retta q incontra le ascisse per $Y=0$; $\rightarrow X = z_F/q = 0,75$;

dal diagramma, incontro retta q con curva equilibrio:

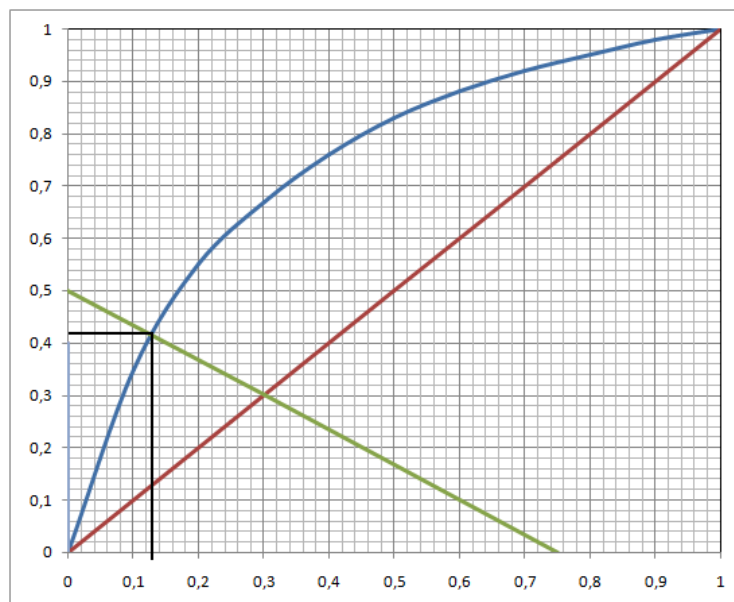
$y_D=0,42$; $x_W=0,13$;

bilanci di materia: $F = D + W$; $Fx_F = Dy_D + Wx_W$;

similmente (assenza di ricircoli)

$W = F \cdot q$; $D = F \cdot (1-q)$;

da cui $D=300 \text{ kmol/h}$; $W = 200 \text{ kmol/h}$.

**ES. 5 - DISTILLAZIONE FLASH – TEMA ESAME 2017 (quesito 1)–**

Una miscela liquida bicomponente si sottopone a distillazione d'equilibrio (flash). Le concentrazioni di equilibrio, nelle condizioni di flash, sono riportate nella seguente tabella dove sono riportate le frazioni molarie del componente più volatile x , quella nel liquido, y e quella nel vapore.

x	0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1
y	0	0,51	0,70	0,80	0,86	0,90	0,93	0,95	0,97	0,99	1

Si opera in continuo con una portata di alimentazione $F=1,2 \text{ kmol/s}$. la composizione della miscela alimentata, espressa come frazione molare del componente più volatile, è $z_F=0,40$. Nell'unico stadio della distillazione si ottiene una vaporizzazione del 20% in moli. Tracciare il grafico d'equilibrio e calcolare portata e composizione del liquido e del vapore ottenuti.

soluzione:

dati: $F=1,2 \text{ kmol/s}$; $z_F=0,40$; la distillazione termina al **20%** vaporizzata alla T di ebollizione $\rightarrow q=0,80$.

dalla tab.equilibrio data traccio la curva equilibrio;

traccio la retta q : $y=[q/(q-1)] \cdot x - [1/(q-1)] \cdot z_F$;

sul diagramma, posto che $q=0,80$ [vaporizzazione 20%], traccio la retta q per $[y=0; x=z_F/q=0,5]$ e per punto sulla diagonale di ascissa $z_F=0,40$;

dall'incontro della retta q con curva equilibrio ottengo le composizioni:

$\rightarrow y_D=0,80$ vapore; $x_W=0,30$ liquido;

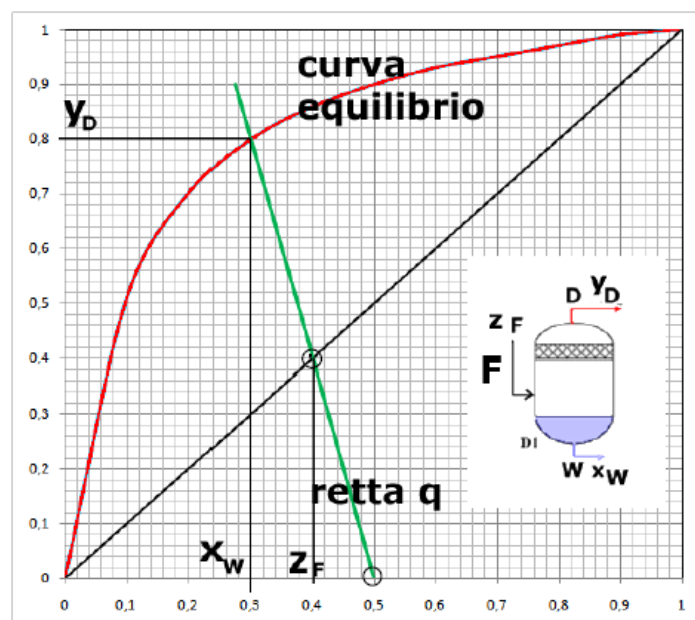
dai bilanci di materia:

$F = D + W$; $Fz_F = Dx_D + Wx_W$;

A causa assenza di ricircoli, [e comunque sostituendo i valori noti nel sistema di 2 equazioni], si ottiene:

\rightarrow portata **liquido di coda** $W = F \cdot q = 0,96 \text{ kmol/s}$;

portata **vapore di testa** $D = F \cdot (1-q) = 0,24 \text{ kmol/s}$;



ESERCIZI SU DISTILLAZIONE IN CORRENTE DI VAPORE

Es.1 – nitrobenzene

Separazione di nitrobenzene da miscela per distillazione in corrente di vapore [liquidi immiscibili]; $p=101\text{ kPa}$ [1 bar]. Determinare $T_{\text{ebollizione}}$ e rapporto tra portate Vapore e nitrobenzene; noto diagramma Hausbrandt.

Svolgimento:

nitrobenzene $T_{N,eboll} = 484\text{K} = 211^\circ\text{C}$ a $p^\circ_N = 101\text{kPa}$;
 da intersezione curva Vap H2O [a 101kPa]/curva Nitrobenzene:

$T = 372\text{K} = 99^\circ\text{C}$; $p^\circ_N = 2,7\text{kPa}$;

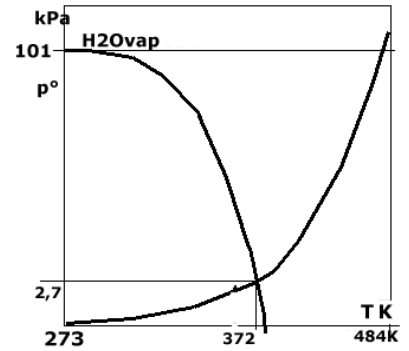
Rapporto portate F_{VAP} / F_N vapore-nitrobenzene:

$p^\circ_{VAP} / p^\circ_N = y_{VAP} \cdot P_{tot} / [y_N \cdot P_{tot}]$; $P_{tot} = p^\circ_N + p^\circ_{VAP}$;

$p^\circ_{VAP} = [101 - 2,7]\text{ kPa}$

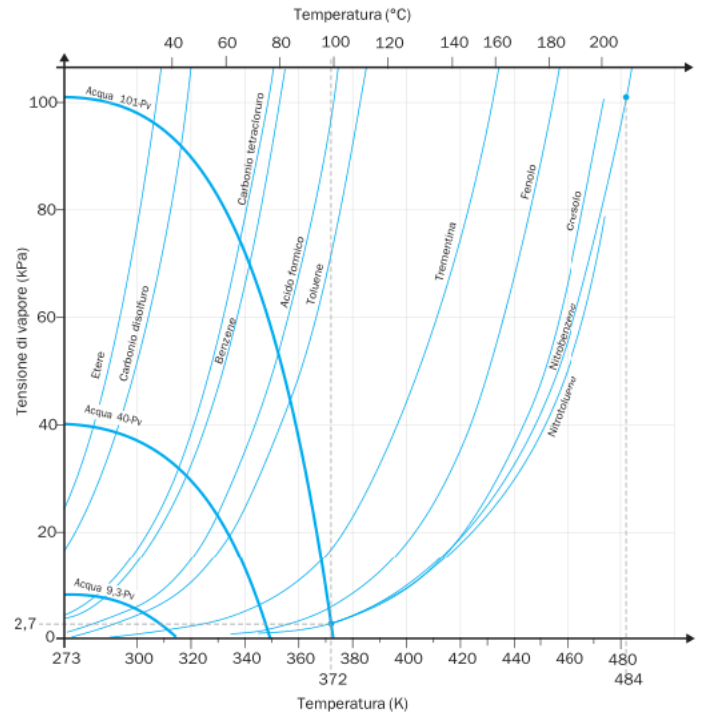
rapporto tra le frazioni molari è uguale al rapporto tra le portate molari; semplificando:

$F_{VAP} / F_N = y_{VAP} / y_N = [101 - 2,7] / 2,7 = 36,4$.



Es.2 – tema esame 2002 -

Una miscela di composti organici immiscibili con l'acqua viene depurata dalle impurezze altobollenti mediante distillazione in corrente di vapore realizzata a pressione atmosferica. Il peso molecolare medio dei composti organici vale 130 mentre la tensione di vapore della miscela, in funzione della temperatura, è riassunta nella tabella, insieme a quella dell'acqua; tenendo presenti le caratteristiche della miscela di composti, il candidato determini la temperatura alla quale avviene la distillazione e calcoli quanti chilogrammi di acqua occorre impiegare per ottenere un chilogrammo di organici purificati.



Temperatura	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	100 °C
Pv-organico	20 mmHg	30 mmHg	50 mmHg	120 mmHg	300 mmHg	660 mmHg
Pv-acqua	92 mmHg	149 mmHg	233 mmHg	370 mmHg	525 mmHg	760 mmHg

un chilogrammo di organici

soluzione:

2 liquidi immiscibili: $P_{tot} = p^\circ_{VAP} + p^\circ_O$;

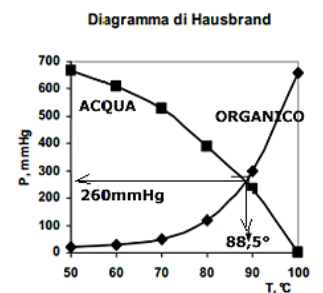
dai dati tensione vapore si costruisce il diagramma, con la curva tens.vap. per l'organico, curva per l'acqua la differenza $P_{tot} - p^\circ_O$; dall'incrocio si ottiene:

$\rightarrow T = 88,5^\circ\text{C}$ temp. ebollizione a $P_{tot} = \text{somma } p^\circ_{VAP} + p^\circ_O$,

$\rightarrow p^\circ_O = 260\text{ mmHg}$; $p^\circ_{VAP} = P_{tot} - p^\circ_O = 760 - 260 = 500\text{ mmHg}$;

per miscele vapori ideali si ottiene:

$p^\circ_{VAP} / p^\circ_O = n_{VAP} / n_O = (m_{VAP} / PM_{VAP}) / (m_O / PM_O) = (500 / 18) / (260 / 130) = 0,266\text{ kgvap.aq/kg olio}$.



(INIZIO)