

# APOSTILA DE EXERCÍCIOS

## EQE 483 – OPERAÇÕES UNITÁRIAS II

*Professor: José Luiz de Medeiros*

**Índice:**

<b>Apresentação</b> -----	03
<b>Lista de Exercícios</b> -----	04
<b>Capítulo I</b> –Análise de Graus de Liberdade em processos de Separação-----	05
<b>Capítulo IV</b> – Método McCabe-Thiele para Destilação Binária-----	07
<b>Capítulo V</b> – Destilação em Batelada (Binária)-----	28
<b>Capítulo VI</b> – Método Ponchon-Savarit para Destilação Binária-----	
<b>Capítulo VII</b> - Projeto para Destilação de Multicomponentes – Método de Fenske-Underwood-Gilliland-----	67
<b>Capítulo VII</b> – Colunas de Recheio-----	78

## ***Apresentação***

Esta apostila contém uma coletânea de provas antigas aplicadas pelo professor José Luiz de Medeiros, durante aulas sob sua responsabilidade, e tem por objetivo ajudar os alunos a acompanhar a matéria Operações Unitárias II.

Os exercícios correspondem a determinados capítulos dados em sala de aula, conforme discriminados no Índice, respeitando a ordem cronológica de sua apresentação no período de 1º semestre de 1998 ao 2º semestre de 2007.

## LISTA DE EXERCÍCIOS

Capítulo II – Análise de Graus de Liberdade em Processos de Separação**Questão 01 (P1 – 2000/02):**

O processo abaixo com colunas 1,2 e 3, será usado para cortar a carga F em 4 produtos: D2,B2,D3 e B3. Admita que o número de componentes ( $n_c$ ) é maior que 4 e que a numeração de componentes segue ordem decrescente de volatilidades relativas (isto é, “1” é o mais volátil e “ $n_c$ ” o menos volátil). Nesta lista identificam-se 4 componentes chaves  $i,j,m,n$ , dispostos em ordem decrescente de volatilidade (isto é,  $i < j < m < n$ ), tais que D2 é corte  $i-$  (“ $i$ ” e mais leves), B2 é corte centrado em “ $j$ ”, D3 é corte centrado em “ $m$ ” e B3 é corte  $n+$  (“ $n$ ” e mais pesados). Determinar (Pontuação uniforme):

- (i) Número de graus de liberdade do processo;
- (ii) Tabela de especificações para Simulação do processo;
- (iii) Tabela de especificações para Projeto do processo, levando-se em conta os dados acima;
- (iv) Com respeito ao item (iii), representar o diagrama de cortes com os “escudos bloqueadores” de cada seção.

A figura referente a esse exercício (FIG01) encontra-se na próxima página.

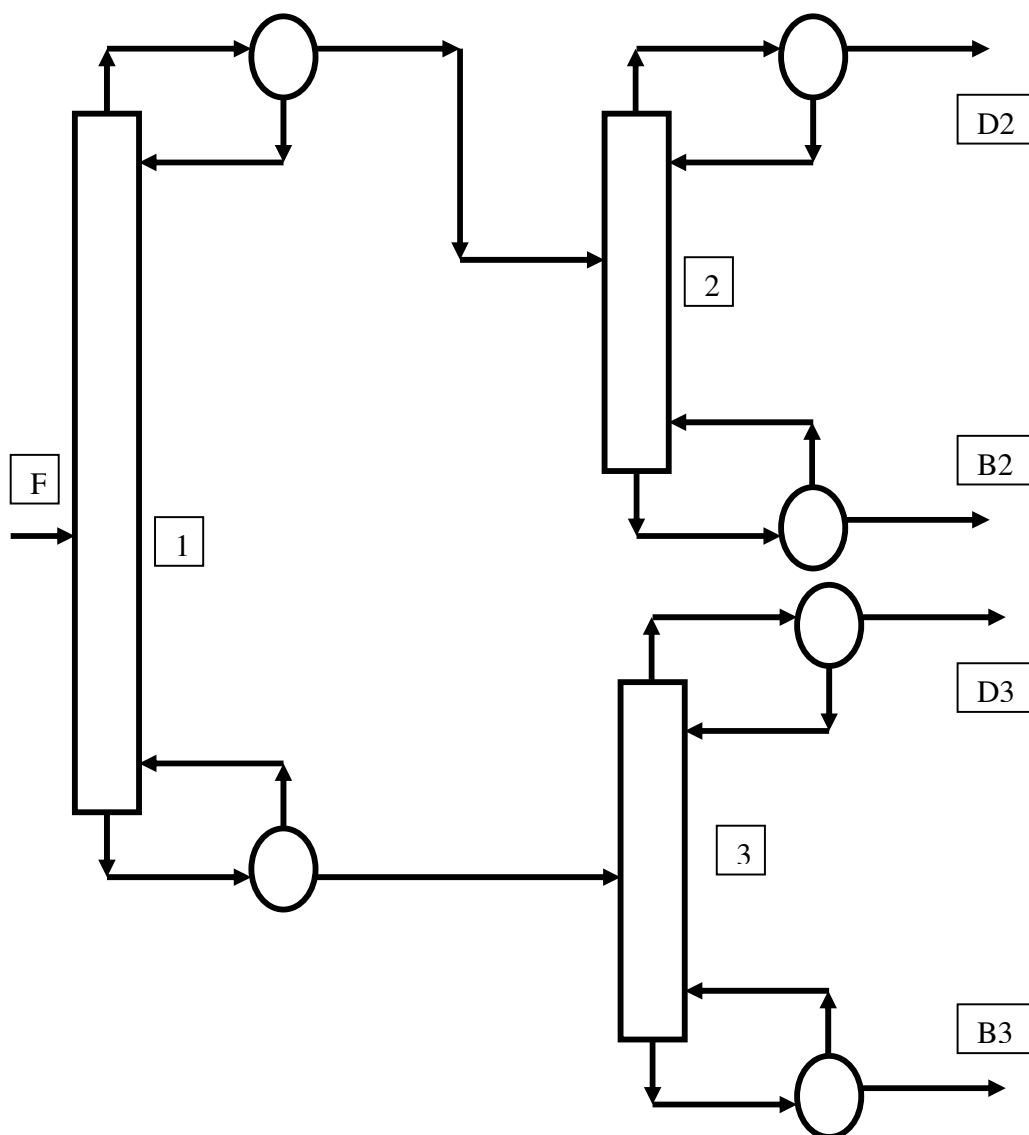


FIG01

Capítulo IV – Método McCabe-Thiele para Destilação Binária**Questão 01 (P1 – 1998/02):**

As substâncias “1” e “2” formam misturas líquidas não ideais. Dados físico-químicos relevantes são:  $P_1^{\text{SAT}}/P_2^{\text{SAT}} = 4$ ,  $G^E/RT = X_1 \cdot X_2$  ( $X_i$  fr.mol. “i”),  $\lambda = 40000$  J/gmol (calor de vaporização em  $P = 1$  bar).

Dispõe-se de uma coluna (para trabalho em  $P=1$  bar) com 6 pratos perfeitos, condensador total e refeedor parcial limitante cuja carga térmica não pode ultrapassar 40000 kW. Pretende-se processar 200 gmol/s de uma corrente líquida e saturada com 50% (mol) de “1” e 50% (mol) de “2”, de modo a gerar-se produto de fundo com 1% (mol) de “1”.

A partir destes fatos, responda:

(i) Mostre que a relação de equilíbrio líquido-vapor válida é dada por:

$$Y = (4 \cdot X \cdot F(X)) / (1 - X + 4 \cdot X \cdot F(X)) \quad , \quad F(X) = \exp(1 - 2 \cdot X)$$

sendo,  $X$  frações molares de “1” nas fases vapor e líquida respectivamente;

(ii) Para esta coluna com a composição de fundo dada, qual a máxima composição em “1” obténível no produto de topo ( $X_D^{\text{MAX}}$ ) ?

(iii) Para produto de topo com composição **90%** da máxima acima, determine as vazões e composições dos produtos. Qual será a recuperação % de “1” no topo?

(iv) Nas condições de (iii), qual o valor de **mínima razão de refluxo** de topo necessária?

(v) Nas condições de (iii), qual o valor da **máxima razão de refluxo** de topo que pode ser gerada nesta coluna tendo em vista os dados do refeedor?

(vi) Esta coluna será capaz de executar o serviço proposto? Justificar com cálculos.

**Questão 02 (P1 – 1999/01):**

As substâncias “1” e “2” formam misturas líquidas não ideais. Dados físico-químicos relevantes são:  $P_1^{\text{SAT}}/P_2^{\text{SAT}} = 2$ ,  $G^E/RT = 0.5 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot (1 + X_1)$  ( $X_i$  fr.mol. “i”),  $\lambda = 40000$  J/gmol (calor de vaporização em  $P = 1$  bar). Pretende-se processar 200 gmol/s de uma corrente líquida e saturada com 40% (mol) de “1” e 60% (mol) de “2”, de modo a gerar-se produto de fundo com 1% (mol) de “1” em uma operação de **esgotamento** com refeedor parcial (figura) em  $P=1$  bar. A razão de refluxo de fundo é denominada  $S$ . Responda:

(i) Sendo  $Y, X$  frações molares de “1” nas fases vapor e líquida, respectivamente, mostre que a relação de equilíbrio líquido-vapor válida é:

$$Y = (2 \cdot X \cdot F(X)) / (1 - X + 2 \cdot X \cdot F(X)) \quad , \quad F(X) = \exp(0.5 \cdot (1 - 3 \cdot X^2))$$

- (ii) Obtenha expressão para a volatilidade relativa 12. Este sistema é azeotrópico na pressão do problema? Em caso afirmativo, o azeótropo influenciará a operação?
- (iii) Qual a **máxima produção de fundo** ( $B^{MAX}$ ) que poderá ser gerada na operação?
- (iv) Qual o valor da mínima razão de refluxo ( $S^{MIN}$ ) necessária? Quais os valores da máxima composição em "1" no vapor de rejeito ( $X_D^{MAX}$ ) e da mínima vazão deste rejeito ( $D^{MIN}$ )?
- (v) Operando com produção a 75% da máxima possível, obtenha a vazão e composição dos produtos, as recuperações % de fundo, a razão de refluxo e a carga térmica da operação em kW. É razoável dizer que quanto maior a produção (sob carga constante) menor é a carga térmica da operação? Justifique.
- (vi) Nas condições de (v), determine o número de estágios necessários.
- (vii) Sob condições que garantam **mínimo número de estágios**, obter a vazão e composição dos produtos, as recuperações %, a razão de refluxo e carga térmica da operação em kW.

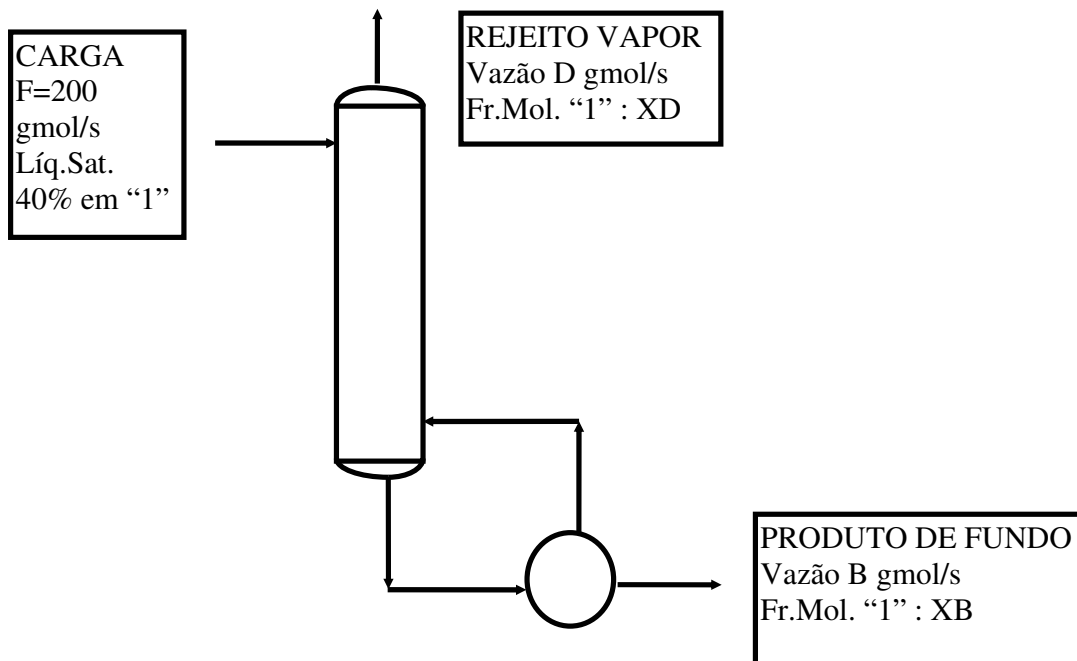


FIG02

**Questão 03 (P1- 1999/02):**

As substâncias "1" e "2" formam misturas líquidas não ideais. Dados físico-químicos relevantes são : (i)  $P_1^{SAT}/P_2^{SAT} = 2.5$ ; (ii) há azeótropo de mínima temperatura de ebulição em 96% mol de "1" ( $X_{AZ}=0.96$ ) em  $P=1$  bar; (iii) fase líquida segue modelo de excesso do tipo  $\overline{G^E}/RT = A X_1 X_2$  ( $X_i$  fr.mol. "i"). Pretende-se processar 100 gmol/s de uma corrente vapor e saturada com 40% (mol) de "1" e 60% (mol) de "2" na operação de **retificação ordinária** abaixo em



$P=1$  bar. Sendo  $X, Y$  frações molares de "1" nas fases líquida e vapor, respectivamente, responda :

- (i) Obter a relação de equilíbrio líquido-vapor válida para este sistema a  $P=1$  bar.
- (ii) Obter expressão para a volatilidade relativa  $\alpha_{12}$ . Calcular esta propriedade em  $X=0$  e em  $X=1$ . Explique a diferença com base na existência do azeótropo.
- (iii) Obter a máxima fração molar "1" de topo obtível,  $X_D^{MAX}$ , para 5 estágios teóricos na operação.
- (iv) Qual a composição do rejeito de fundo nas condições do item (iii)?

Admita agora uma separação, não mais limitada a 5 estágios teóricos, com a mesma carga anterior, sendo gerado produto de topo com fração molar  $X_D$  em "1" dado pelo valor obtido no ítem (iii). Responda:

- (v) Qual a máxima produção de topo que pode ser obtida  $D^{MAX}$ ? Quais os valores das correspondentes razão de refluxo e da composição do rejeito de fundo?
- (vi) Expressão da equação de operação para projeto com  $D=0.9 \cdot D^{MAX}$ .

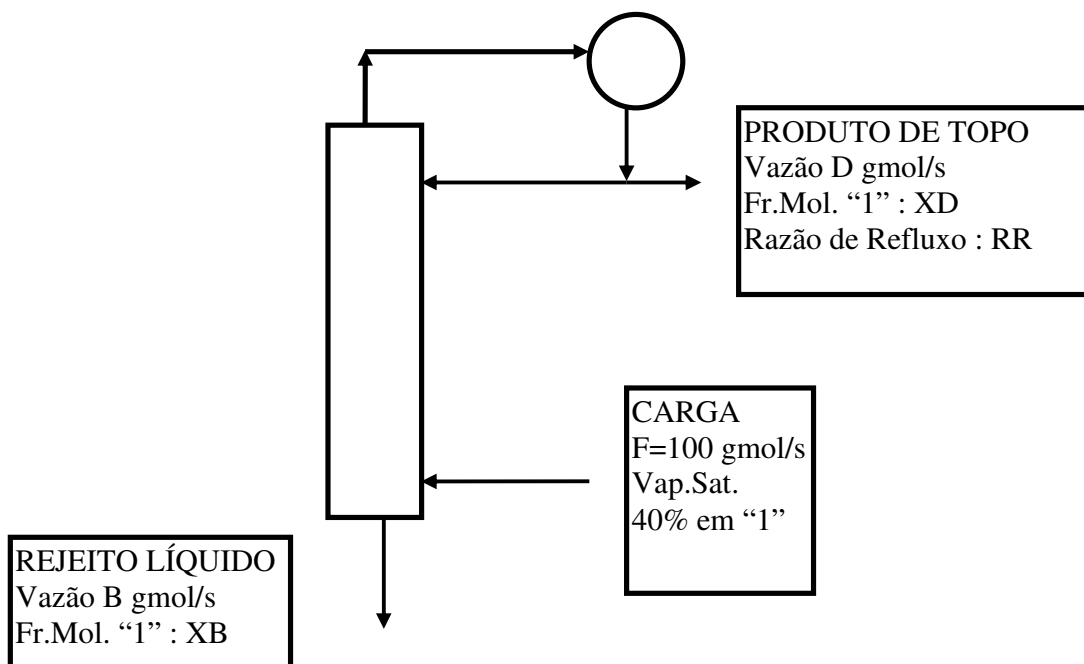


FIG03

#### Questão 04 (P1 – 2000/01):

A Figura representa uma unidade de destilação para fracionar as correntes  $F_1$  (50% (mol) de "1", 50% (mol) de "2") e  $F_2$  (25% (mol) de "1", 75% (mol) de "2") em um produto de topo D com 90% (mol) de "1" e um produto de fundo B. Ambas as alimentações têm vazão de 100 gmol/s estando líquidas e saturadas na pressão da coluna ( $P=1$  bar). A coluna não possui refeedor, sendo alimentada inferiormente com vapor puro "2" superaquecido em 30 °C. A recuperação de topo

## Capítulo IV - Método McCabe-Thiele para Destilação Binária

de componente "1" deverá ser de 95%. Com base nestes dados e nas informações a seguir, determine:

- (i) Relação de equilíbrio líquido-vapor na pressão do processo, no formato  $y = g(x)$ , onde  $y$  e  $x$  são frações molares de "1";
- (ii) A razão de refluxo mínima ( $RR^{\min}$ ) para esta separação;
- (iii) A mínima vazão de vapor "2" injetado no fundo para cumprimento do serviço desejado;
- (iv) As vazões e composições de produtos nas condições de (iii);
- (v) Projetando a separação com razão de refluxo igual ao triplo da mínima ( $RR = 3.RR^{\min}$ ), determine a vazão de vapor "2" injetado no fundo e composições e vazões de produtos;
- (vi) Nas condições de (v), determine o número de estágios necessários e os estágios ótimos de carga;
- (vii) Nas condições de (v), a carga térmica (kW) do condensador;
- (viii) As vazões e composições de produtos se a coluna estiver equipada com refeedor de fundo, sem a alimentação de vapor "2" puro.
- (ix) Sem refazer cálculos de cascata, estimar o número de estágios necessários na condição (viii).

Informações para projeto:

- Pressões de vapor (bar):  $P_1 = \exp(10 - 3800/T)$ ,  $P_2 = \exp(8.5 - 3800/T)$  ( $T \equiv K$ ,  $P \equiv \text{bar}$ )
- Há azeótropo neste sistema em  $P=1\text{bar}$  e 99% mol de "1"
- Fase vapor pode ser considerada gás ideal. Fase líquida:  $G^E/RT = A.X_1.X_2$
- Pressão da coluna:  $P = 1 \text{ bar}$
- $C_p^{\text{liq}} = 100$ ,  $C_p^{\text{vap}} = 40$  (J/gmol.K), Calor de vaporização a  $25^\circ\text{C}$ :  $\lambda = 40000$  (J/gmol)

Obs – A figura está na página seguinte.

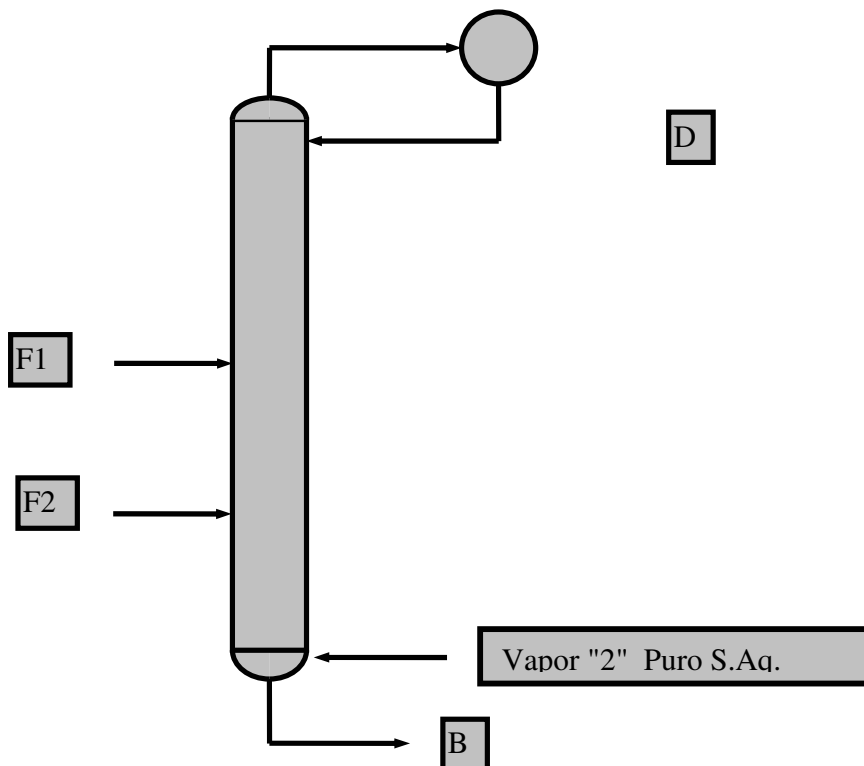


FIG04

**Questão 05 (P1 – 2001/02):**

Considere a mistura M formada por “1” e “2”, líquida e saturada em  $P=1 \text{ bar}$ , com 20% mol em “1”. Para este sistema valem os seguintes dados ( $X_k$  é fração molar de “k”):

- Fase vapor é gás ideal, e  $P_1^{SAT} / P_2^{SAT} = 2.5$  (aproximadamente constante);
- Fase líquida não-ideal :  $\overline{G}^E / RT = A X_1 X_2$  com  $A$  cte;
- Formação de azeótropo de mínima temperatura de ebulição em  $P=1 \text{ bar}$ , com 98% mol de “1”
- Entalpia média de vaporização:  $\lambda=40 \text{ kJ/gmol}$

Pretende-se processar 10 gmol/s de M de modo a gerar produto de fundo com 1% (mol) em “1” na coluna abaixo com  $N=8$  estágios perfeitos (incluindo refeedor). Adotando  $X_1 \equiv X$ , responda :

- Obter  $\alpha_{12}(X)$  e a relação de equilíbrio LV em  $P=1 \text{ bar}$ .
- Obter a máxima composição em “1” do destilado ( $X_D^{MAX}$ ) que é possível atingir nesta coluna;
- Informar a razão de refluxo utilizada e as vazões de produtos nas condições de (ii);
- Admita operação com  $X_D=0.9 \cdot X_D^{MAX}$ . Obter vazões externas e a recuperação % de “2” no fundo;

(v) Obter a seguinte relação entre as razões de refluxo de topo ( $RR$ ) e de fundo ( $S$ ) :

$$S = \left( \frac{Z - X_B}{X_D - Z} \right) (RR + 1) \quad \text{onde } Z, X_B, X_D \text{ são frações molares de "1" na carga,}$$

destilado e fundo;

(vi) Admita disponível carga térmica de 1000 kW no refeedor. Tendo em vista as condições de (iv), quais os valores de  $RR$  e  $S$  que estarão sendo usados ?

(vii) Determinar se esta coluna, nas condições de (iv)+(vi), poderá cumprir a separação.

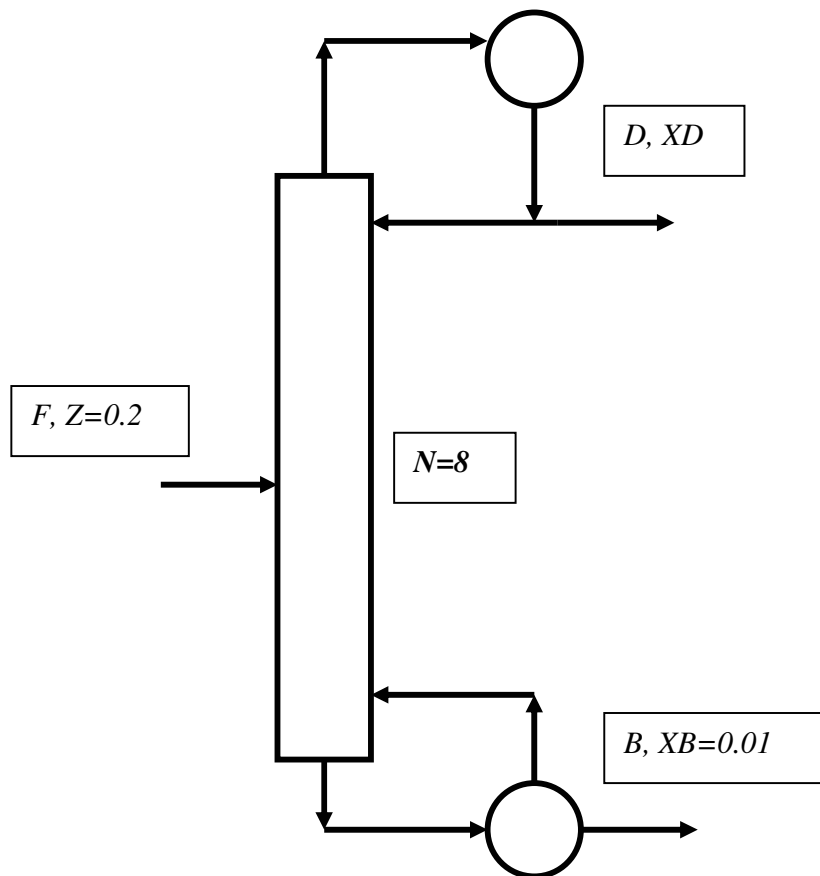


FIG05

**Questão 06 (P1 – 2002/01):**

Considere a mistura M formada por “1” e “2”, líquida e saturada em  $P=1 \text{ bar}$ , com 25% mol em “1”. Para este sistema valem os seguintes dados ( $X_k$  é fração molar de “k”) :

- Fase vapor é gás ideal, e  $P_1^{SAT} / P_2^{SAT} = 2.65$  (aproximadamente constante);
- Fase líquida não-ideal :  $\overline{G}^E / RT = A X_1 X_2$  com  $A$  cte;
- Formação de azeótropo de mínima temperatura de ebulição em  $P=1 \text{ bar}$ , com 98.5% mol de “1”
- Entalpia de vaporização média:  $\lambda=30000 \text{ J/gmol}$

Pretende-se processar 100 g/mol de M de modo a gerar produto de fundo com 0.1% (mol) em “1” na coluna abaixo com  $N=8$  estágios perfeitos (incluindo refeedor). Adotando  $X_1 \equiv X$ , responda :

- (i) Obter a relação de equilíbrio LV em  $P=1$  bar.
- (ii) Obter a máxima recuperação % de “2” no fundo,  $(REC_2' \%)^{MAX}$ , que é possível atingir na separação.
- (iii) Informar a razão de refluxo utilizada, a composição de topo ( $X_D$ ) e as vazões de produtos nas condições de (ii).
- (iv) Admita operação com  $REC_2' \% = 0.95 * (REC_2' \%)^{MAX}$ . Obter  $X_D$  e vazões de produtos da coluna.
- (v) Admita carga térmica de 4500 kW no **Condensador**. Tendo em vista as condições de (iv), quais os valores de razões de refluxo de topo e fundo ( $RR$  e  $S$ ) que estarão sendo usados?

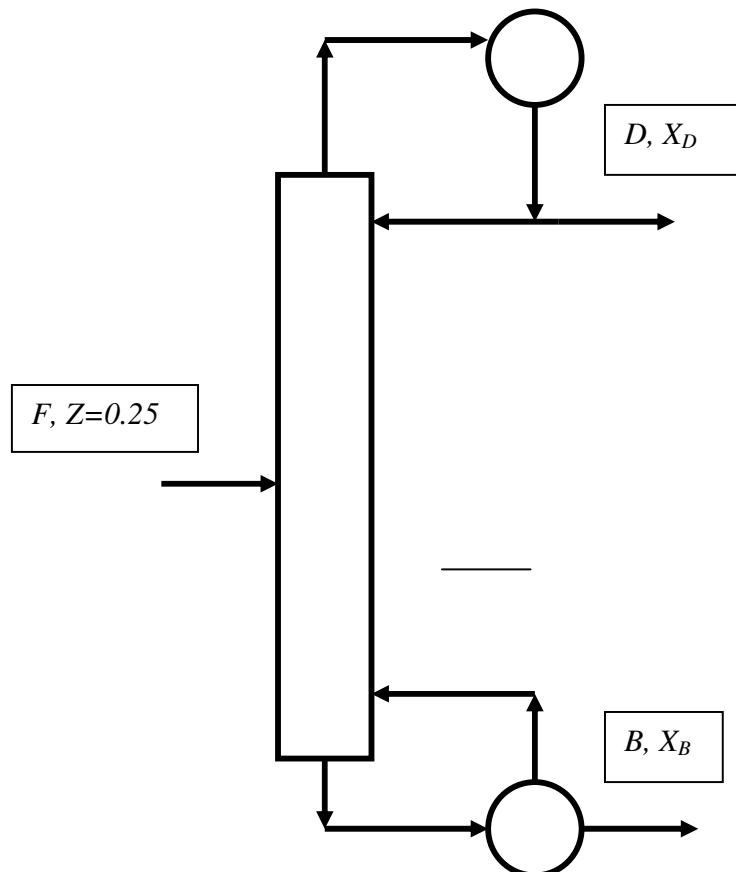


FIG06

**Questão 07 (P1-2002/02):**

As misturas formadas por “1” e “2” apresentam as seguintes características em  $P=1$  bar:

- Fase líquida descrita por :  $\overline{G^E}/RT = A X_1 X_2$  com  $A$  cte;
- Fase vapor aproximadamente como gás ideal
- Azeótropo de mínima temperatura de ebulição a 98% mol de “1”;
- Volatilidade relativa 12, em diluição infinita em “2”, igual a 6 ;
- Razão  $P_1^{SAT}/P_2^{SAT}$  aproximadamente constante
- Calor de vaporização aproximadamente constante:  $\lambda=40000$  J/gmol

Pretende-se processar corrente com 40% mol de “1” e 60% mol de “2”, **vapor e saturada**, a  $P=1$  bar, de modo a gerar destilado de topo com 80% mol de “1”. Consideram-se duas alternativas para esta separação: **Retificador RT** e **Coluna Simples CS** (Figura). Ambas alternativas operam:

- Condensador total limitado a 800 kW de carga térmica;
- Carga com  $F$  gmol/s e fração molar “1”  $Z=0.4$ ;
- Topo com  $D$  gmol/s, fração molar “1”  $X_D=0.8$  e razão de refluxo  $RR$ ;
- Fundo com  $B$  gmol/s, fração molar “1”  $X_B$  e razão de refluxo  $S$  (apenas para **CS**).

Com base nos dados determine ( $X, Y$  representam frações molares de “1” em fases L e V):

- Relação de equilíbrio LV na forma  $Y=g(X)$ ;
- O mínimo número de estágios requeridos por **RT** para este serviço;
- Os valores de  $F, D, B, X_B, RR$  e  $REC_1\%$  nas condições de (ii);
- A máxima produção possível a **RT** ( $D^{MAX}$ );
- Os valores de  $F, D, B, X_B, RR$  e  $REC_1\%$  nas condições de (iv);
- Considere **CS** operando com o valor de  $F$  obtido em (v). Mostre que  $D$  e  $REC_1\%$  crescem e que  $RR, S$  e  $B$  decrescem quando  $X_B$  cai, admitindo-se uso integral da carga térmica de topo;
- Obter, nas condições de (vi), os valores de  $D^{MAX}, REC_1\%^{MAX}, X_B^{MIN}, B^{MIN}, RR^{MIN}$  e  $S^{MIN}$  para **CS**;

A figura referente a esse exercício (FIG01) encontra-se na próxima página.

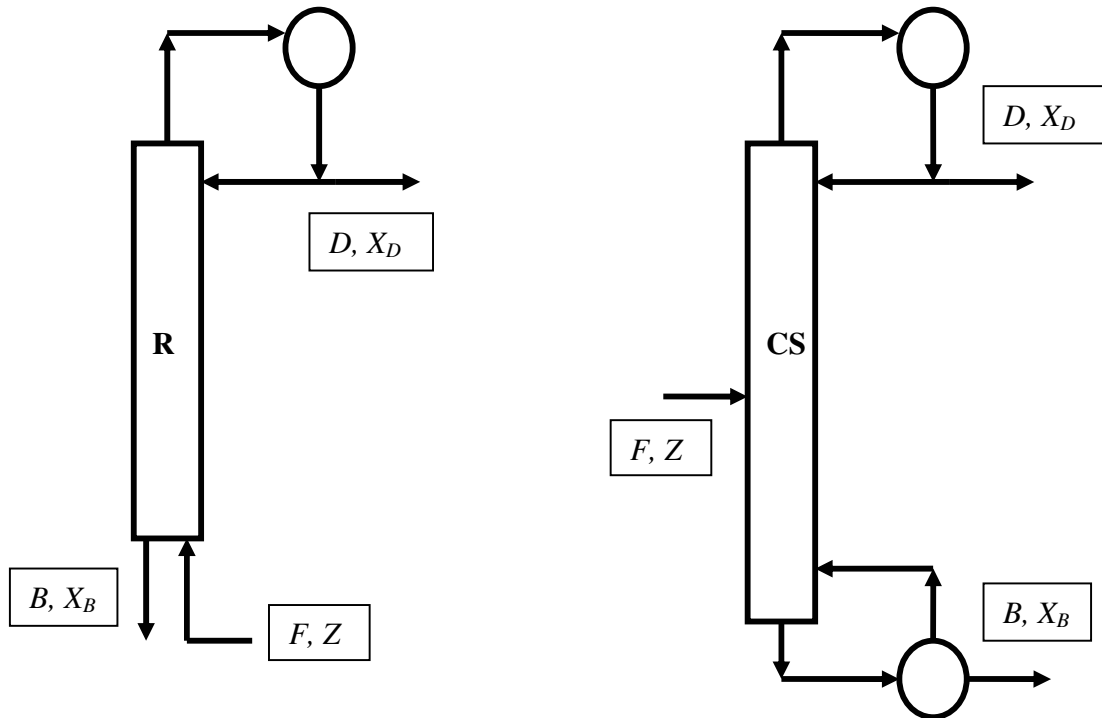


FIG07

**Questão 08 (P1 – 2003/01):**

O processo abaixo (Figura a seguir) consiste em duas colunas de destilação **A** e **B** integradas termicamente. A chapa entre **A** e **B** permite a passagem de calor entre elas, de modo que o vapor de topo de **B** condensa-se ao mesmo tempo em que ferve o fundo de **A**. Para isto há um compartimento superior em **B** dispendo de um buraco cilíndrico central para a entrada de vapor e que permite o retorno de líquido para refluxar a coluna. As colunas operam separações com metas e substâncias distintas. As especificações de separação e os sistemas termodinâmicos das colunas são mostrados na tabela 1.

A operação correta do processo exige que a integração térmica entre **A** e **B** seja cuidadosamente ajustada.

Com base nos dados, responda:

- (i) Obter valores de  $D_A$ ,  $B_A$ ,  $D_B$ ,  $B_B$ , Recuperações de topo de “1” (Col. **A**) e de “3” (Col. **B**);
- (ii) Obter o número mínimo de estágios necessários na Col. **A**;
- (iii) Levando em conta **a integração das colunas**, obter o valor da mínima razão de refluxo de topo do Processo;
- (iv) Nas condições de (iii), valor de carga térmica no trocador de calor de integração entre **A** e **B**;
- (v) Considere o projeto deste processo com razão de refluxo igual ao dobro da mínima ( $RR=2*RR^{MIN}$ ), obter valores de cargas térmicas de todos os trocadores de calor;
- (vi) Nas condições de (v), obter valores de todas as vazões internas de líquido e vapor;

(vii) Nas condições de (v), determinar o número de estágios da Col. **B** e seu estágio ótimo de carga.

<b>Coluna A</b>	<b>Coluna B</b>
<b>Pressão:</b> P=1 bar	<b>Pressão:</b> P=2 bar
<b>Substâncias:</b> 1 e 2	<b>Substâncias:</b> 3 e 4
<b>Azeótropo:</b> Não há	<b>Azeótropo:</b> Máxima Temperatura de Ebulição P=2 bar, Composição: 2% mol em "3"
<b>Fase Líquida :</b> Soluções Ideais	<b>Fase Líquida :</b> $\overline{G}^E / RT = (-)A X_3 X_4$ , A positiva
<b>Razão de Pressões de Vapor :</b> $P_1^{SAT} / P_2^{SAT} = 2.2$	<b>Razão de Pressões de Vapor :</b> $P_3^{SAT} / P_4^{SAT} = 1.95$
<b>Calor de Vaporização:</b> $\lambda=50000$ J/gmol	<b>Calor de Vaporização:</b> $\lambda=20000$ J/gmol
<b>Carga:</b> $F_A=100$ gmol/s, 40% mol em "1" ( $Z_A=0.4$ ) <b>Líquido Saturado</b>	<b>Carga:</b> $F_B=200$ gmol/s, 50% mol em "3" ( $Z_B=0.5$ ) <b>Vapor Saturado</b>
<b>Topo:</b> Composição de 99% mol em "1"	<b>Topo:</b> Composição de 99.7% mol em "3"
<b>Fundo:</b> Composição de 1% mol em "1"	<b>Fundo:</b> Composição de 17% mol em "3"

Tabela 1.

A figura referente a esse exercício (FIG08) encontra-se na próxima página.



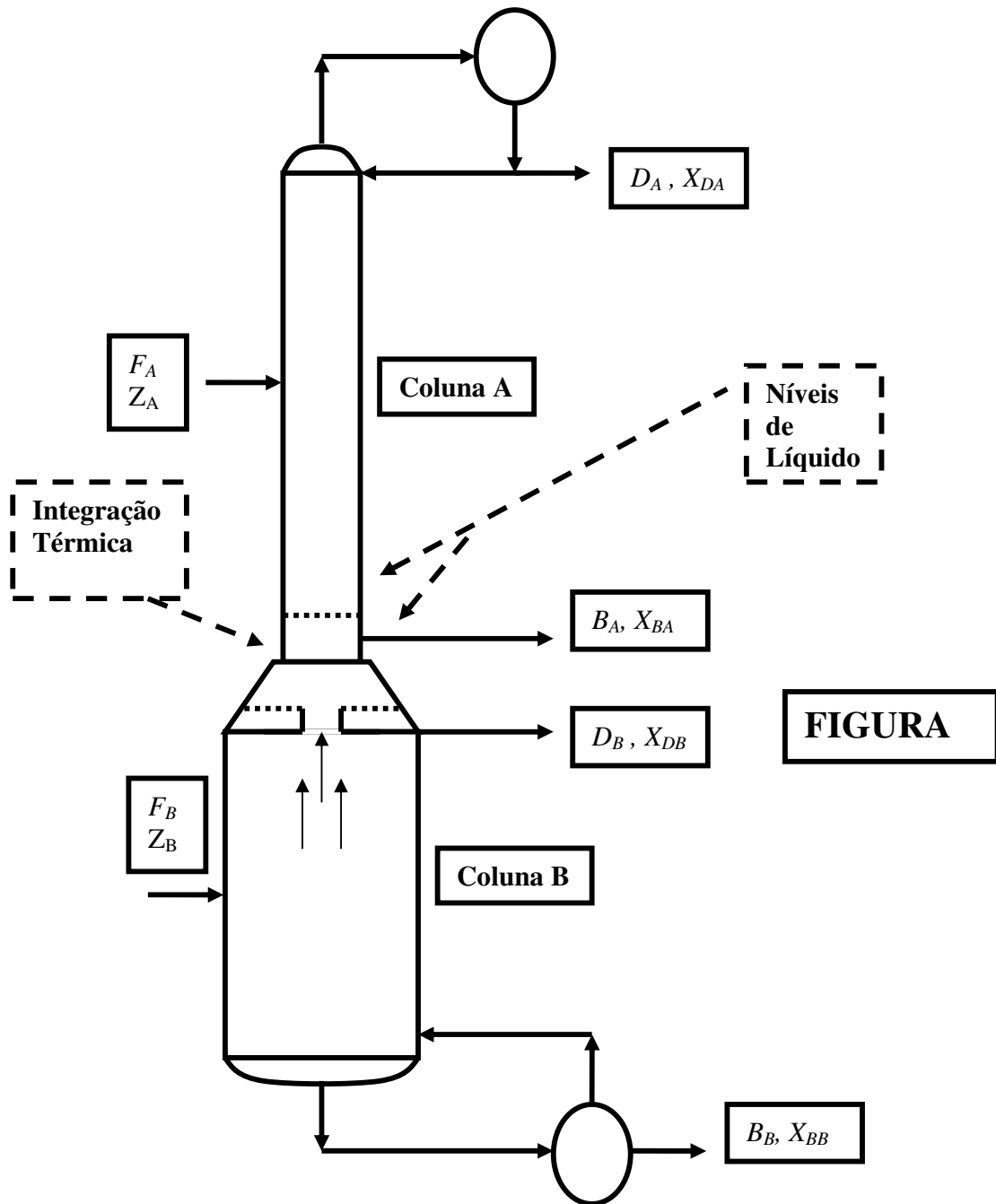


FIG08

**Questão 09 (P1 – 2003/02):**

As misturas formadas por "1" e "2" apresentam as seguintes características em  $P=1$  bar:

- Fase líquida descrita por :  $\overline{G}^E / RT = (-)A X_1 X_2$  com  $A$  cte positiva
- Fase vapor aproximadamente como gás ideal
- Azeótropo de *máxima temperatura de ebulição* em 2% mol de "1" ( $X_{AZ}=0.02$ )
- Razão  $p_1^{SAT} / p_2^{SAT}$  aproximadamente constante e igual a 2
- Calor de vaporização aproximadamente constante:  $\lambda=40000$  J/gmol

Pretende-se processar duas cargas  $F_1$  e  $F_2$ , de mesma vazão  $F$  gmol/s, ambas líquidas e saturadas, contendo substâncias "1" e "2". Estas cargas têm composições, respectivamente, de 50% mol de "1" ( $Z_1=0.5$ ) e 20% mol de "1" ( $Z_2=0.2$ ). O objetivo é gerar destilado de topo ( $D$ ) com 99% mol de "1" ( $X_D=0.99$ ) e produto de fundo ( $B$ ) com 10% mol de "1" ( $X_B=0.1$ ). O processo é mostrado na figura abaixo e opera em  $P=1$  bar. Representando  $RR$  e  $S$  as razões de refluxo de topo e de fundo, e com base nos dados fornecidos, determine:

- Relação de equilíbrio LV na forma  $Y=g(X)$ ;
- Expressões para  $D$  e  $B$  como função de  $F$ ,  $X_D$ ,  $X_B$ ,  $Z_1$  e  $Z_2$ ;
- O valor da mínima razão de refluxo para esta separação ( $RR^{MIN}$ );
- O máximo valor de  $F$  ( $F^{MAX}$ ) que poderá ser processado nesta separação admitindo-se limitação de carga térmica no refeedor a 8000 kW.

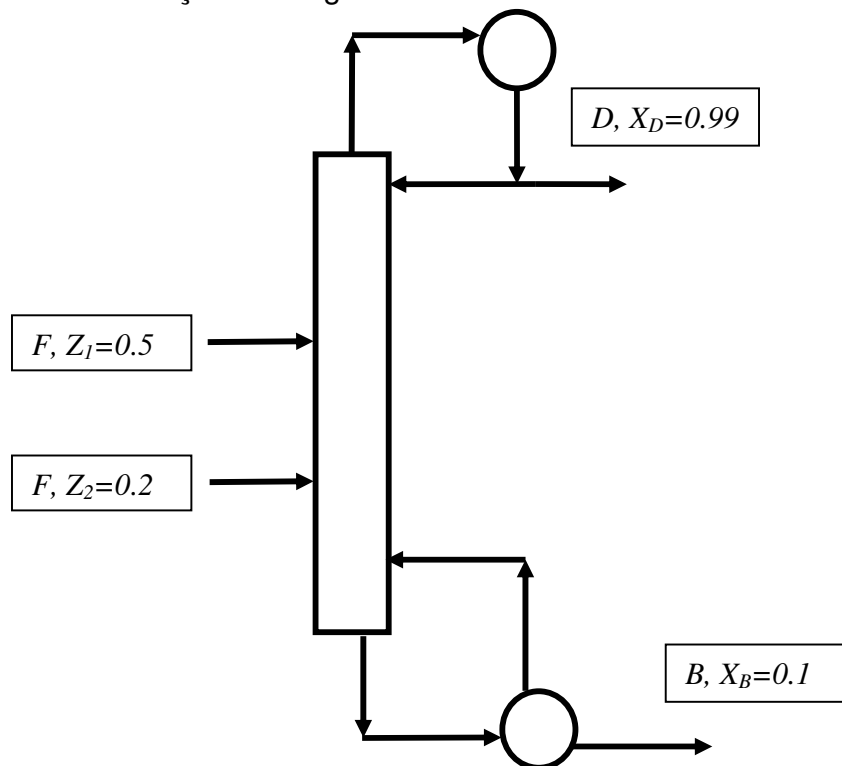


FIG09

**Questão 10 (P1 – 2004/01):**

A coluna abaixo opera a  $P=1$  bar sendo alimentada com cargas  $F_1$  (100 gmol/s, vapor saturado, 40% mol de "1") e  $F_2$  (100 gmol/s, vapor saturado, 20% mol de "1"). O objetivo principal é gerar fundo com 1% mol de "1" ( $X_B=0.01$ ). Como não dispõe de condensador, a coluna é alimentada superiormente com  $F_0$  gmol/s de líquido saturado "1" puro. O produto de topo é vapor saturado com 99% mol de "1" ( $X_D=0.99$ ). Dados termodinâmicos são apresentados abaixo. A partir disto responda:

- (i) Obter expressão para  $B$ ,  $D$ ,  $F_0$  em termos da razão de refluxo de fundo ( $S$ );
- (ii) Obter a razão de refluxo mínima desta operação ( $S^{MIN}$ );
- (iii) Obter o consumo mínimo de alimentação de topo, ( $F_0^{MIN}$ );
- (iv) Obter valores de  $B$ ,  $D$ ,  $Q_{REF}$  (a carga térmica de fundo) e a recuperação de "2" de fundo ( $REC'_2\%$ ) nas condições do item (ii);
- (v) Operando com  $S=2S^{MIN}$ , obter os valores correspondentes de  $B$ ,  $D$ ,  $F_0$ ,  $Q_{REF}$ ,  $REC'_2\%$ ;
- (vi) Determinar o número de estágios necessários e os estágios ótimos de carga admitindo eficiência de estágio de 100%.

Admita agora, a remoção da alimentação  $F_0$  e a instalação de um condensador parcial no topo da unidade operando com razão de refluxo ( $S$ ) obtida no item (v). Com base nisto responda:

- (vii) Obter os valores de  $B$ ,  $D$ ,  $F_0$ ,  $Q_{REF}$ ,  $REC'_2\%$  nesta situação;
- (viii) Nas condições do item (vii), obter os valores da razão de refluxo de topo ( $RR$ ) e da carga térmica do condensador parcial ( $Q_{COND}$ );
- (ix) Sem efetuar o projeto novamente, estimar nas condições de (vii), o número de estágios da operação;
- (x) Processando 1000gmol de carga  $F_1$  em uma operação de **destilação em batelada com retificação de topo constante** ( $X_D=0.99$ ) com  $N=8$  estágios ao todo, estimar a máxima quantidade obtível de produto de topo ( $M_D^{MAX}$ ), a mínima quantidade de resíduo no tanque que poderá ser gerado ( $H^{MIN}$ ) e sua composição ( $X_H^{MIN}$ ).

A figura referente a esse exercício (FIG10) encontra-se na próxima página.

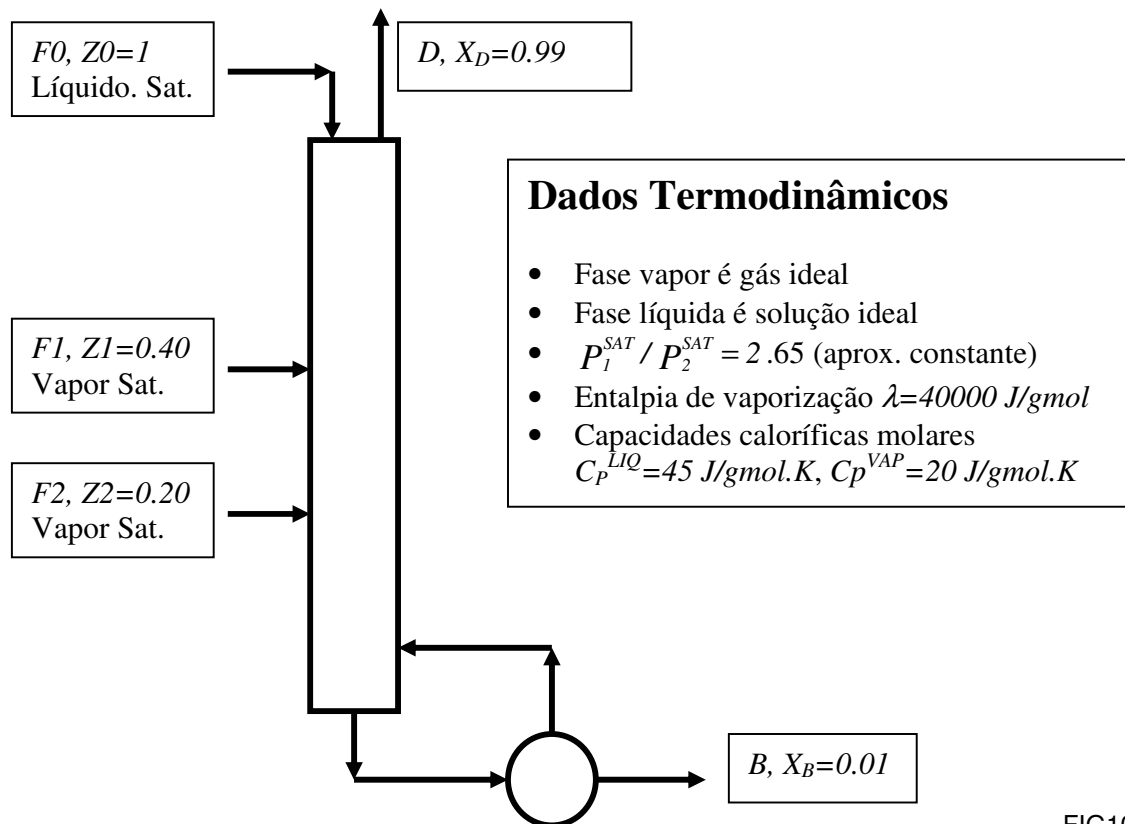


FIG10

**Questão 11 (P1 – 2004/02):**

Considere a operação de destilação na Figura abaixo utilizando carga  $F_1$  com compostos “1” e “2”, e fração molar de “1” dada por  $Z$ . Esta carga tem vazão  $2G \text{ gmol/s}$  ( $G > 0$ ), estando 50% (mol) vapor na pressão do processo. O produto de topo (vazão  $D \text{ gmol/s}$ , fração molar  $X_D$  em “1”) é vapor saturado. O produto de fundo (vazão  $B \text{ gmol/s}$ , fração molar  $X_B$  em “1”) é líquido saturado. Como a coluna não dispõe de condensador nem de refeedor, ela é alimentada superiormente pela carga  $F_0$  de líquido saturado com composição  $X_D$ , e inferiormente pela carga  $F_2$  de vapor saturado com composição  $X_B$ . Ambas as cargas  $F_0$  e  $F_2$  têm a mesma vazão de  $F \text{ gmol/s}$ . A volatilidade relativa “1”/“2” pode ser admitida constante e dada por  $\alpha = 2.75$ . São definidos os seguintes símbolos:

- $X, Y$  são frações molares em “1” de fases líquida e vapor;
- Seções são 0 (retificação) e 1 (esgotamento); Rótulo  $\infty$  refere-se à condição do item (iii);
- $X_{01}$  e  $Y_{01}$  coordenadas  $(X, Y)$  de intersecção de retas de operação das seções 0 e 1;

A partir disto, responda:

- (i) Mostre que  $X_D + X_B = 2Z$

(ii) Mostre que  $Y_{01} = \frac{2Z(F/G) + X_D}{1 + 2(F/G)}$  ,  $X_{01} = \frac{2Z(F/G) + X_B}{1 + 2(F/G)}$  ,  $X_{01} + Y_{01} = 2Z$

(iii) Mostre que a condição de mínima utilização de agente de separação (“refluxos”) corresponde a

$$\frac{F^\infty}{G} = (1/2) \left( \frac{X_D - Y_{01}^\infty}{Y_{01}^\infty - Z} \right) = (1/2) \left( \frac{X_B - X_{01}^\infty}{X_{01}^\infty - Z} \right)$$

Admita para o restante do problema as seguintes especificações da separação :  $Z = 0.5$  ,  $X_B = 0.01$

(iv) Obter o número mínimo de estágios para esta separação ( $N^{MIN}$ );

(v) Determinar o tamanho da coluna ( $N$ ) e a posição ótima de  $F_1$  ( $N_1$ ) para  $\frac{F}{G} = 2 \left( \frac{F^\infty}{G} \right)$

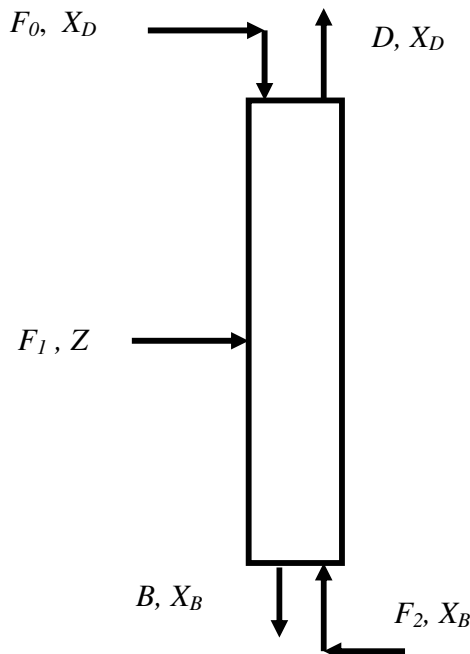


FIG11

**Questão 12 (P1 – 2005/01):**

As misturas formadas por “1” e “2” apresentam as seguintes características em  $P=1$  bar:

- Fase líquida descrita por :  $\overline{G^E} / RT = A X_1 X_2$  com  $A$  cte;
- Fase vapor aproximadamente como gás ideal
- Azeótropo de mínima temperatura de ebulição a 96% mol de “1”
- Volatilidade relativa 12, em diluição infinita em “2”, igual a 6.45;
- Razão  $P_1^{SAT} / P_2^{SAT}$  aproximadamente constante

Pretende-se processar 100gmol/s de corrente  $F$  com 20% mol de “1” e 80% mol de “2”, **líquida e saturada**, a  $P=1$  bar, de modo a gerar destilado de topo com

81% mol de "1" havendo recuperação de 98% de "1". Considera-se a coluna da Figura 1.

Com base nos dados determine ( $X, Y$  representam frações molares de "1" em fases L e V):

- Relação de equilíbrio LV na forma  $Y=g(X)$ ;
- O mínimo número de estágios requeridos para este serviço;
- Os valores de  $D, B, X_B$ ;
- A mínima razão de refluxo necessária ( $RR^{MIN}$ );
- Considerando operação com  $RR=2RR^{MIN}$ , determine o projeto da separação;

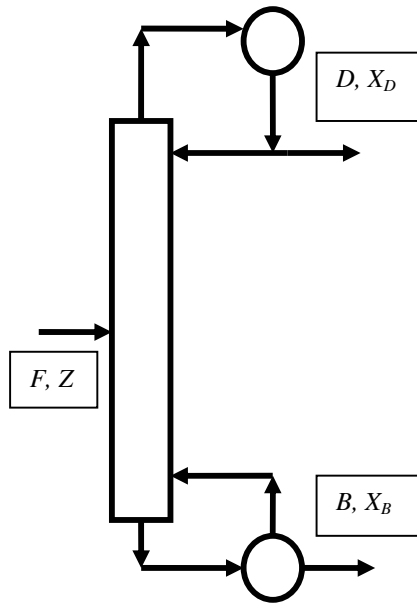


FIG12

### Questão 13 (P1 – 2005/02):

As misturas de "1" e "2" apresentam as seguintes características em  $P=1$  bar :

- Fase líquida descrita por  $\bar{G}^E / RT = Ax_1x_2$  sendo  $A$  cte positiva
- Fase vapor aproximadamente como gás ideal
- Azeótropo de *mínima temperatura de ebulição* em 92% mol de "1" ( $X_{AZ}=0.92$ )
- Razão  $p_1^{SAT} / p_2^{SAT}$  aproximadamente constante e igual a 2.35

Pretende-se utilizar a operação da Fig. a seguir ( $P=1$  bar) para processar carga  $F$  líquida e saturada contendo 40% mol em "1" e 60% mol em "2" ( $Z=0.4$ ). O objetivo é gerar fundo ( $B$  gmol/s) com 0.1% mol de "1" ( $X_B=0.001$ ). O rejeito de topo ( $D$  gmol/s) tem composição  $X_D$  em "1". Representando  $S$  a razão de refluxo de fundo, e com base nos dados fornecidos, determine

- Relação de equilíbrio LV na forma  $Y=g(X)$ .

- (ii) Expressão para  $X_D$  e  $REC'_2\%$  em função de  $B$ ,  $X_B$ ,  $F$ ,  $Z$ . Mostre que  $X_D$  e  $REC'_2\%$  crescem com  $B$ .
- (iii) A máxima produção de fundo ( $B^{MAX}/F$ ) que é possível atingir e os respectivos  $X_D^{MAX}$ ,  $REC'_2\%^{MAX}$ .
- (iv) A razão de refluxo mínima ( $S^{MIN}$ ).
- (v) O número mínimo de estágios ( $N^{MIN}$ ) da separação. Obter respectivos  $B/F$ ,  $D/F$ ,  $X_D$ ,  $S$  e  $REC'_2\%$ .
- (vi) Projetar a operação com razão de refluxo 15% superior à mínima. Obter  $B/F$ ,  $D/F$ ,  $X_D$  e  $REC'_2\%$ .

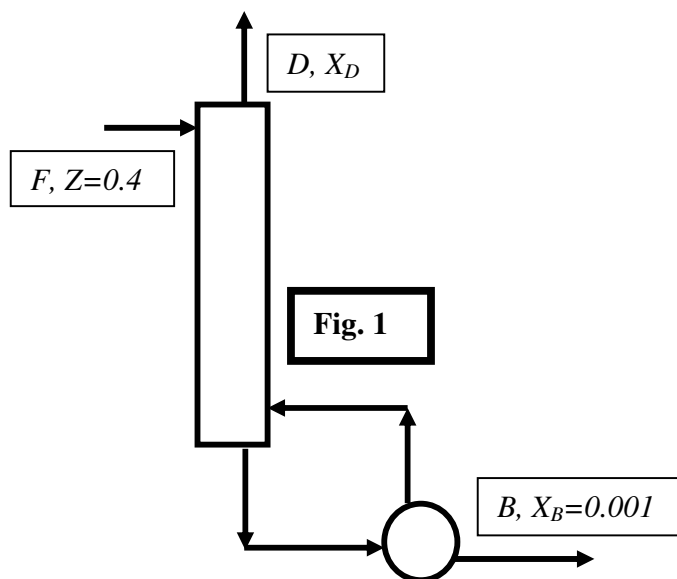


FIG13

**Questão 14 (P1 – 2006/01):**

Na Figura abaixo coluna com  $N=12$  estágios teóricos (referedor incluído) fracionando  $F1$  (70% mol de "1", 30% mol de "2",  $Z_1=0.7$ ) e  $F2$  (30% mol de "1", 70% mol de "2",  $Z_2=0.3$ ) em topo  $D$  e fundo  $B$  com *iguais vazões* ( $B=D$ ). As alimentações têm ambas *vazões iguais* a  $F$  gmol/s sendo  $F1$  líquido saturado e  $F2$  vapor saturado na pressão da coluna ( $P=1$  bar). Use volatilidade relativa constante dada em  $F2$ . A Fase líquida é solução ideal. Pressões de vapor  $P_1 = \exp(10 - 3700/T)$ ,  $P_2 = \exp(9 - 3600/T)$  ( $T \equiv K$ ,  $P \equiv \text{bar}$ ). A partir disto, responda:

- (i) Mostre que  $1 = X_D + X_B$  não importando a razão de refluxo usada;
  - (ii) Obter o *melhores topo e fundo* que poderão ser obtidos simultaneamente nesta coluna ( $X_D^{MAX}$ ,  $X_B^{MIN}$ );
- Nos itens abaixo considere a operação com  $X_D$  igual a 95% de  $X_D^{MAX}$ . Determine :
- (iii) A razão de refluxo mínima ( $RR^{min}$ ) para a separação;
  - (iv) O número mínimo de estágios ( $N^{min}$ ) para a separação;

(v) A coluna cumprirá a separação com  $RR = 3RR^{min}$  ? Obter os estágios ótimos de carga em caso positivo.

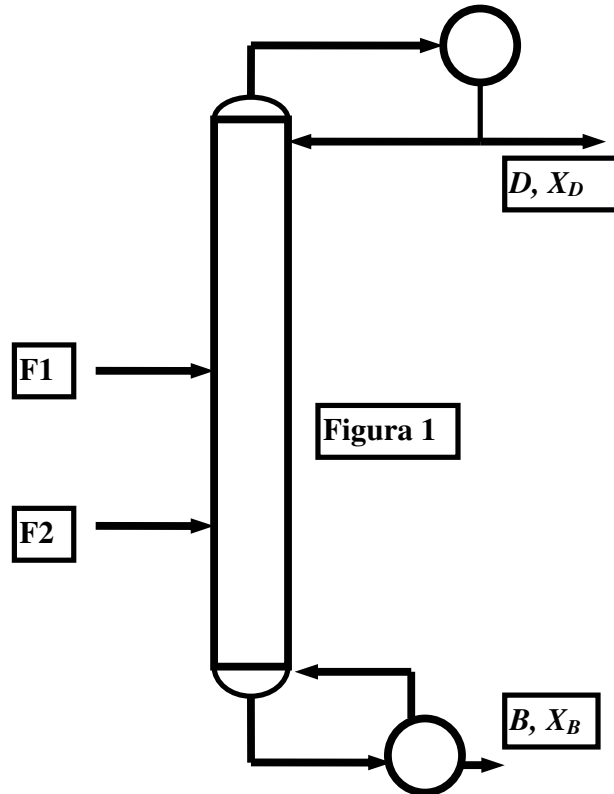


FIG14

### Questão 15 (P1 -2006/02):

Na Figura a seguir coluna com  $N=14$  estágios teóricos (refervedor incluído) fracionando  $F1$  (40% mol de "1", 60% mol de "2",  $Z_1=0.4$ ) e  $F2$  (10% mol de "1", 90% mol de "2",  $Z_2=0.1$ ) em topo  $D$  e fundo  $B$  com  $D/B=1/3$ . As alimentações têm ambas *vazões iguais* a  $F$  gmol/s sendo  **$F1$  50% vaporizada** (mol) e  $F2$  líquido saturado na pressão da coluna ( $P=1$  bar). Use volatilidade relativa constante **dada em  $F1$** . A Fase líquida é solução ideal com pressões de vapor  $P_1 = \exp(10 - 3750/T)$ ,  $P_2 = \exp(11 - 4400/T)$  ( $T \equiv K$ ,  $P \equiv \text{bar}$ ). A partir disto, responda:

- Mostre que  $1 = X_D + 3X_B$  não importando a razão de refluxo usada;
- Obter o *melhores topo e fundo* que poderão ser obtidos simultaneamente nesta coluna ( $X_D^{MAX}$ ,  $X_B^{MIN}$ );

Nos itens abaixo considere a operação com  $X_D$  igual a 95% de  $X_D^{MAX}$ . Determine :

- A razão de refluxo mínima ( $RR^{min}$ ) para a separação;
- O número mínimo de estágios ( $N^{min}$ ) para a separação;
- A coluna cumprirá a separação com  $RR = 3RR^{min}$  ? Obter os estágios ótimos de carga em caso positivo.

A figura referente a esse exercício (FIG15) encontra-se na próxima página.



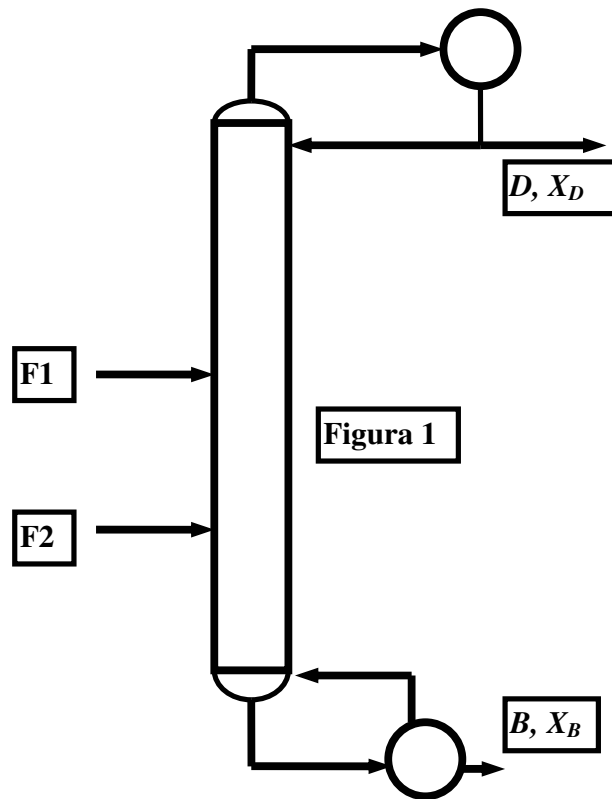


FIG15

**Questão 16 (P1 – 2007/01):**

Na Fig. a seguir destilação para separação de "1" e "2" com Recompressão de Vapor de Topo (RVT). Na RVT não há vapor de aquecimento nem água de resfriamento, ao invés, usa-se potência mecânica ( $POT$ ) no compressor (CMP) de vapor de topo ( $V_0$ ). A coluna opera a  $P=1bar$ . A saída do compressor está em  $P_C=3bar$ , assim  $V_0$  condensará acima da temperatura do refeedor ( $T_B$ ), permitindo troca de calor para a geração do vapor do fundo ( $V_j$ ) e de líquido ( $L_0$ ) a refluxar após despressurização. A carga ( $F mol/s$ ) tem 50% mol de "1" ( $Z=0.5$ ) estando no ponto de bolha a  $1bar$ . Em frações molares "1", os produtos de topo ( $D$ ) e fundo ( $B$ ) são, respectivamente,  $X_D=0.99$  e  $X_B=0.01$ , de modo que as temperaturas de topo e fundo ( $T_D, T_B$ ) são aproximadamente as de saturação de "1" e "2" puros a  $1bar$ . Com os dados abaixo, responda:

(i) Para ter  $X_D + X_B = 1$ , mostre que  $D/F = (Z + X_D - 1)/(2X_D - 1)$ . Obter  $D/F$ ,  $B/F$ .

- (ii) Obter expressão de  $POT$  em termos de  $F$ ,  $RR$ ,  $Z$ ,  $X_D$  e  $W$  (o trabalho do compressor abaixo).
- (iii) Obter a vazão máxima de carga ( $F^{MAX}$  mol/s) que é possível processar com  $POT=100kW$ ;
- (iv) Operando com  $POT=100kW$  e  $F = 70\%F^{MAX}$ , obter a razão de refluxo do processo ( $RR$ );
- (v) Projetar a separação nas condições (iv) obtendo o tamanho da coluna e a posição ótima de carga;
- (vi) Na coluna (v), e com (i), obter  $X_D$  e  $X_B$  quando CMP rodar a  $100kW$  com carga quase nula ( $F \cong 0$ ).

**Dados de Processo:**

Pressões de vapor :  $P_1^{Sat}(T) = \exp(10 - 3600/T)$ ,  $P_2^{Sat}(T) = \exp(10 - 3800/T)$   
 ( $T(K), P(bar)$ )

Usar volatilidade rel. 1/2 constante:  $\alpha = \sqrt{\alpha_D * \alpha_B}$  sendo  $\alpha_D$  e  $\alpha_B$  valores de topo e fundo a 1bar

Razão de Capacidades Caloríficas do Vapor  $V_0$ :  $\gamma = C_P^{V_0} / C_V^{V_0} = 1.2$

Trabalho (kJ/mol) do Compressor :  $W = \frac{\gamma RT_D}{\gamma - 1} (\Omega^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} - 1)$ ,  $\Omega = P_C / P$ ,  $R=8.31 * 10^{-3}$   
 kJ/mol.K.

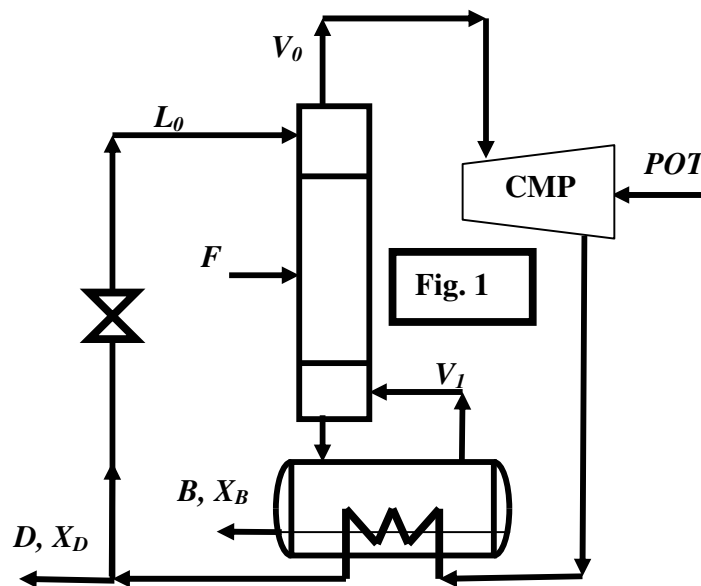


FIG16

**Questão 17 (EF – 2007/01):**

Uma coluna de destilação com  $N=12$  estágios teóricos ao todo (incluindo condensador e refeedor parciais), é usada com carga  $F$  100% vapor em pressão  $P=2bar$ .  $F$  contém 50% mol “1” e 50% mol “2”. O produto de fundo  $B$  deve ter 1%

mol de "1". A volatilidade relativa 1/2 é  $\alpha_{12} = 2.2$  aproximadamente constante.

Frações molares ( $X, Y$ ) abaixo referem-se a "1" em fases líquida e vapor, respectivamente. A partir disto, determine:

- (i) A melhor composição de destilado que é possível obter neste processo ( $X_D^{MAX}$ );
- (ii) As vazões de produtos de topo e fundo nas condições do item (i);
- (iii) Operando-se com  $X_D$  a 95% de  $X_D^{MAX}$ , obter as vazões de produtos de topo e fundo;
- (iv) Determine se a coluna cumprirá o serviço descrito no item (iii) ao utilizar razão de refluxo de topo ( $RR$ ) 100% superior ao seu valor mínimo para a separação ( $RR^{MIN}$ );

### Questão 17 (P1 – 2007/02):

As misturas de "1" e "2" apresentam as seguintes características em  $P=1$  bar :

- Fase líquida não ideal com  $\bar{G}^E / RT = AX_1X_2$  sendo  $A$  positiva
- Fase vapor aproximadamente gás ideal
- Azeótropo de *mínima temperatura de ebulição* com 93.7% mol de "1" ( $X_{AZ}=0.937$ )
- Razão  $P_1^{SAT} / P_2^{SAT}$  aproximadamente constante e igual a 2.25

Pretende-se utilizar o retificador da Fig.1 ( $P=1$  bar) com carga  $F$  vapor e saturada, injetada na base, contendo 55% mol em "1" e 45% mol em "2" ( $Z=0.55$ ). A coluna tem  $N=9$  estágios perfeitos. O objetivo é gerar topo ( $D$  gmol/s) com fração molar  $X_D$  em "1". O rejeito de fundo ( $B$  gmol/s) tem composição  $X_B$  em "1". A razão de refluxo de topo é  $RR$ . Com base nos dados e com o Método McCabe-Thiele, obtenha:

- (i) Relação de Equilíbrio LV na forma  $Y^*=g(X)$ .
- (ii) Expressão para  $X_B$ ,  $RR$  e  $REC_1\%$  em função de  $D/F$ ,  $Z$  e  $X_D$ . Mostre que  $X_B$  cai com  $D/F$ .
- (iii) O Máximo  $X_D$  que poderá ser atingido ( $X_D^{MAX}$ ) nesta coluna; Deste ponto em diante, considere a separação com  $X_D$  a 95% do  $X_D^{MAX}$  obtido acima. Determine:
- (iv) A máxima produção de topo ( $D^{MAX}/F$ ) concebível para a separação (não exatamente nesta coluna);
- (v) A razão de refluxo mínima ( $RR^{MIN}$ ) e respectivos  $B/F$ ,  $X_B^\infty$  e  $REC_1\%$ .
- (vi) Determinar se a coluna de  $N=9$  estágios cumpre o serviço com  $D/F$  igual a 70% de  $D^{MAX}/F$ .

A figura referente a esse exercício (FIG17) encontra-se na próxima página.

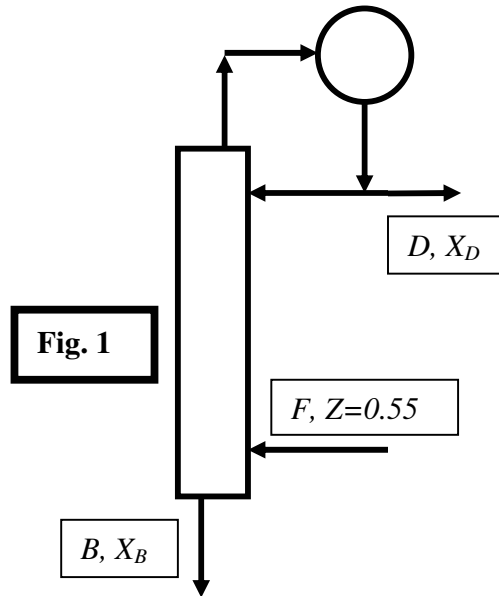


FIG17

Capítulo V – Destilação em Batelada (Binária)**Questão 01 (P1-1998/02):**

Dispõe-se de 100 kgmol de mistura líquida de “1” e “2” com 50% (mol) de “1”, sendo a volatilidade relativa de “1” com respeito a “2” aproximadamente constante e igual a 3 e o calor de vaporização da mistura igual a 40000 kJ/kgmol. Dispõe-se de uma coluna equivalente a 5 pratos teóricos (incluindo efeito do refeedor parcial) que poderá operar em destilação batelada com composição de **produto constante** nos dois esquemas mostrados abaixo (**DB1** e **DB2**). Em cada caso a vazão de vapor no interior da coluna é **fixa** em 10 kgmol/h, admitindo-se que o controlador existente é capaz de manter a especificação escolhida para cada produto por manipulação da válvula de refluxo indicada. Os dados das operações são apresentados na tabela abaixo. Com base nestes fatos, calcule :

- (i) A máxima produção de **DB1**, o produto e o resíduo de serviço (quantidade, composição);
- (ii) A máxima produção de **DB2**, o produto e o resíduo de serviço (quantidade, composição);
- (iii) Os produtos e o resíduo gerado (quantidade e composição) ao final de **DB1 + DB2**;
- (iv) Razão de refluxo de **fundo** usada em **DB1** na partida e ao término da operação;
- (v) Energia consumida por **DB1** em kWh;

<b>Característica da Operação</b>	<b>DB1</b>	<b>DB2</b>
Estágios Teóricos (inclui referv. parcial)	5	5
Rendimento (rel. à produção máxima)	90%	90%
Vazão de Vapor no Interior da Coluna	10 kgmol/h	10 kgmol/h
Fr.Molar de “1” no Produto (cte)	$XB_1 = 0.01$	$XD_2 = 0.99$
Tipo de Produto com Composição Fixa	Fundo	Topo
Quantidade de Carga	$D_0 = 100$ kgmol	Resíduo DB1
Fr.Molar de “1” na Carga	$XD_0 = 0.5$	Resíduo DB1
Quantidade de Produto Obtido	$MB_1$	$MD_2$

A figura referente a esse exercício (FIG18) encontra-se na próxima página.

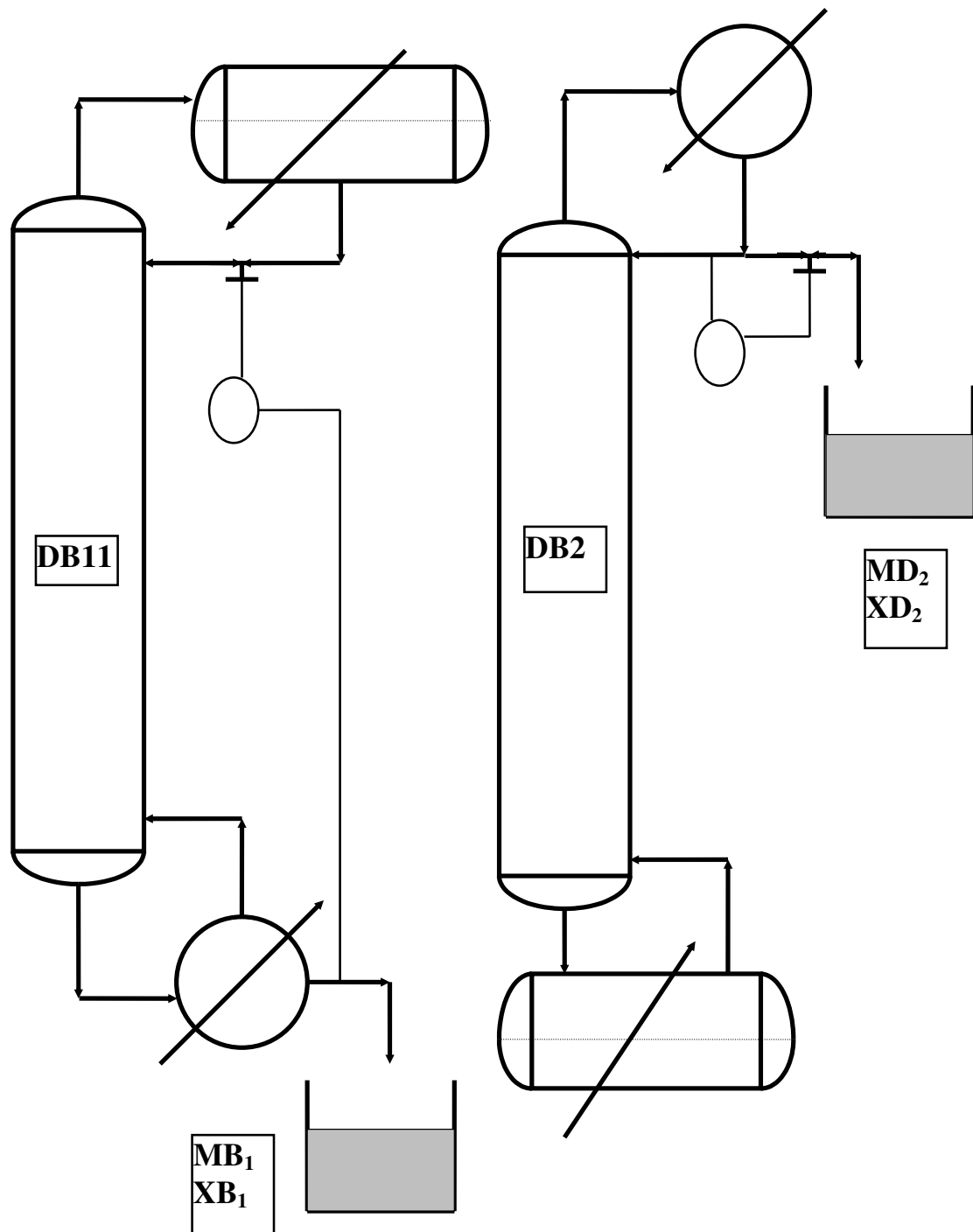


FIG18

**Questão 02 (P1 – 1999/01):**

Dispõe-se de 10000 gmol de mistura líquida e saturada com as **mesmas substâncias** “1” e “2” do **problema anterior**, tendo 20% (mol) de “1”. Dispõe-se de coluna **para destilação em batelada de esgotamento (DBE)** equivalente a 7 pratos teóricos (incluindo efeito do refeedor parcial), que poderá operar com composição de **produto de fundo constante** (figura). Pretende-se gerar produto de fundo com 1% (mol) de “1”. A vazão de vapor no interior da coluna é **fixa** em 10 gmol/s. O rendimento da **DBE** é 90%. Determine :

- (i) A máxima produção da **DBE**, o produto e o resíduo de serviço (quantidade, composição);
- (ii) Um ponto operacional (S,XD,D,B) viável na janela de destilação da **DBE**, onde S é a razão de refluxo de fundo, XD e D são a composição em “1” e quantidade (mol) de líquido no tanque e B é a vazão de fundo em gmol/s.

A figura referente a esse exercício (FIG19) encontra-se na próxima página.

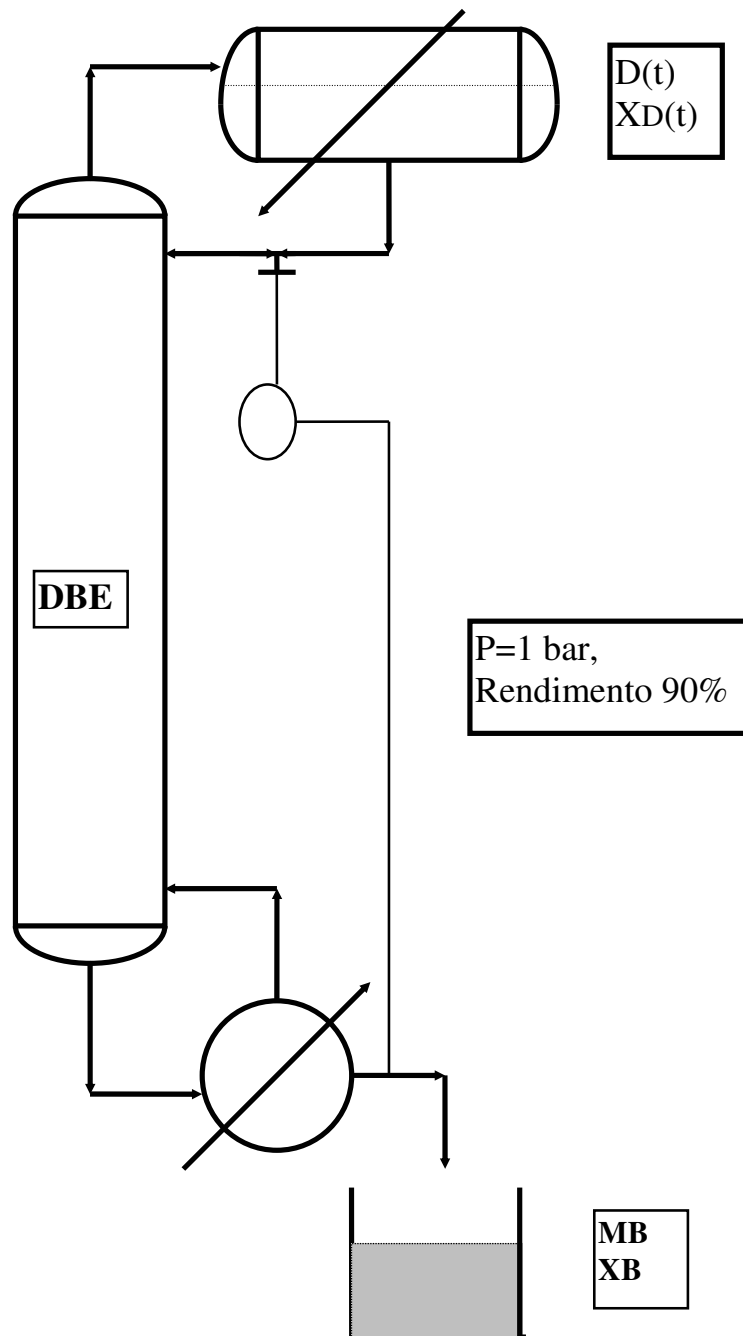


FIG19



**Questão 03 (EF – 2000/01):**

Dispõe-se de carga (F) de 10000 gmol de mistura líquida com 40% mol de “1” e 60% mol de “2”, sendo a volatilidade relativa  $\frac{1}{2}$  constante e igual a 3. Esta mistura será processada em 2 ciclos subsequentes de destilação em batelada, DB1 (esgotamento com fundo de composição constante) e DB2 (retificação com topo de composição constante), descritas na tabela e figura abaixo. Com base neste material, obter:

- (i) A máxima produção de DB1 ( $MB_1^{MAX}$ ), seu mínimo resíduo ( $D_1^{MIN}$ ) e sua composição ( $XD_1^{MAX}$ );
- (ii) Os respectivos valores acima na condição de projeto de DB1 ( $MB_1$ ,  $D_1$  e  $XD_1$ );
- (iii) Com base em (ii), as condições limites de produção para DB2 ( $MD_2^{MAX}$ ,  $B_2^{MIN}$ ,  $XB_2^{MIN}$ );
- (iv) Os respectivos valores acima na condição de projeto de DB2 ( $MD_2$ ,  $B_2$ ,  $XB_2$ );
- (v) O tempo de operação de DB1.

Operação	DB1 (Esgotamento)	DB2 (Retificação)
Estágios (Pratos+Refrator)	N=5	N=5
Carga	F=10000 gmol, Z=0.4 (em “1”)	$D_1$ gmol, $XD_1$ (em “1”)
Produto	$MB_1$ gmol, $XB_1=0.025$ (em “1”)	$MD_2$ gmol, $XD_2=0.975$ (em “1”)
Resíduo	$D_1$ gmol, $XD_1$ (em “1”)	$B_2$ gmol, $XB_2$ (em “1”)
Rendimento (Prod/Prod <sup>MAX</sup> %)	90%	90%

A figura referente a esse exercício (FIG20) encontra-se na próxima página.

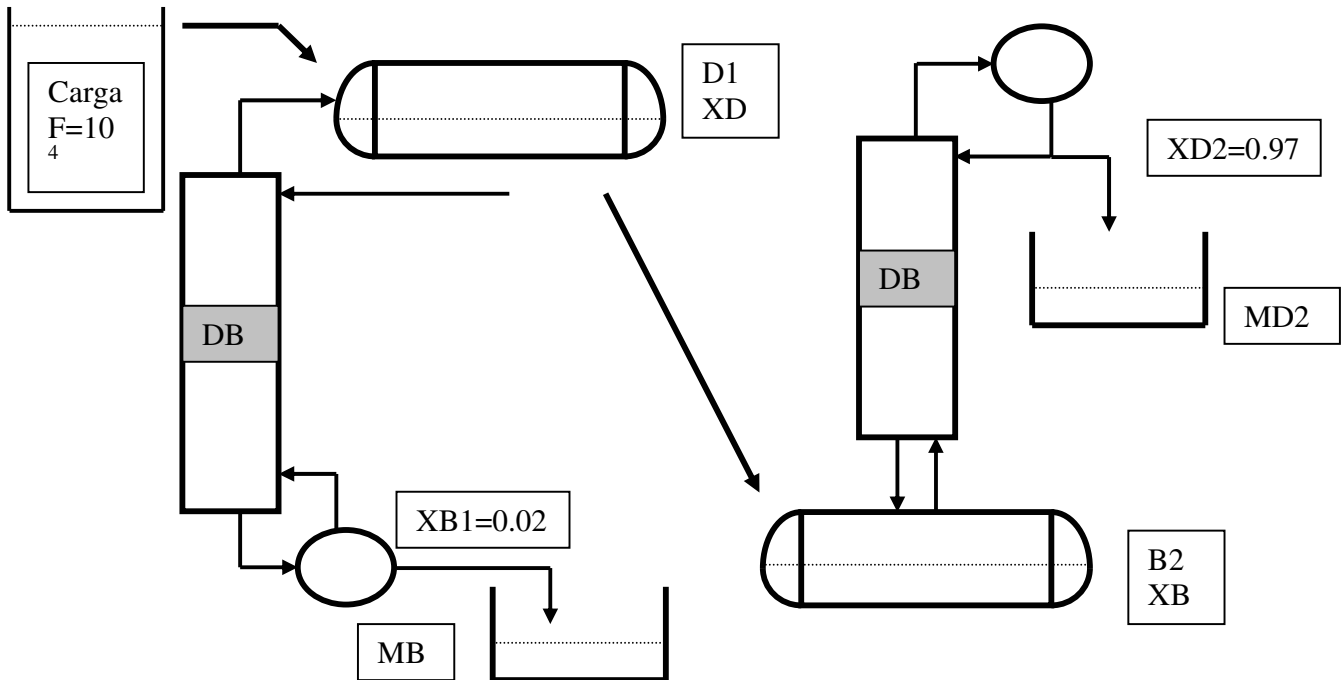


FIG20

**Questão 04 (P1 – 2000/02):**

Considere a mistura M formada por “1” e “2”, líquida e saturada em  $P=1$  bar, com 30% mol em “1”. Para este sistema valem os seguintes dados ( $X_k$  é fração molar de “k”):

- Fase vapor é gás ideal, e  $P_1^{SAT} / P_2^{SAT} = 2$  (aproximadamente constante);
- Fase líquida não-ideal:  $\overline{G^E} / RT = X_1 X_2 (A_{12} X_2 + A_{21} X_1)$  com  $A_{12}, A_{21}$  ctes;
- $\alpha_{12} = 7.34$  (em  $X_1 = 0$ ),  $\alpha_{12} = 0.95$  (em  $X_1 = 1$ )

Com base nos dados acima e adotando  $X_1 \equiv X$ , responda:

- Obter  $\alpha_{12}(X)$  e a relação de equilíbrio LV em  $P=1$  bar, obtendo  $A_{12}, A_{21}$ .
- Mostre que este sistema é azeotrópico e estime intervalo para a composição azeotrópica.
- Admitindo carga M com F gmol e a operação batelada DB1 abaixo, com  $N=5$  estágios (pratos+refervedor) e composição de fundo constante ( $X_B=0.01$  em “1”), determine a máxima produção ( $M_B^{MAX}$ ), o mínimo resíduo ( $D^{MIN}$ ) e sua composição máxima ( $X_D^{MAX}$ ).

(iv) Considere agora a operação contínua C1 abaixo, também com  $N=5$  estágios (pratos+refervedor) e fundo de composição fixa em  $X_B=0.01$ . Determine a máxima produção de fundo ( $B^{MAX}$ ), a mínima produção de topo ( $D^{MIN}$ ) e a máxima composição de topo ( $X_D^{MAX}$ ) em "1", ao processar mistura M com  $F$  gmol/s. Obter  $(REC_2'\%)^{MAX}$ .

(v) Considere operação C1 para gerar  $REC_2'\% = 90\%$  de  $(REC_2'\%)^{MAX}$ . Determine composição e vazão de produtos.

(vi) Nas condições de (v), obter mínima razão de refluxo de topo necessária ( $RR^{MIN}$ ).

(vii) Verificar se C1 operando com vazão de vapor interno igual a  $2F$  gmol/s, poderá cumprir o serviço nas condições de (v).

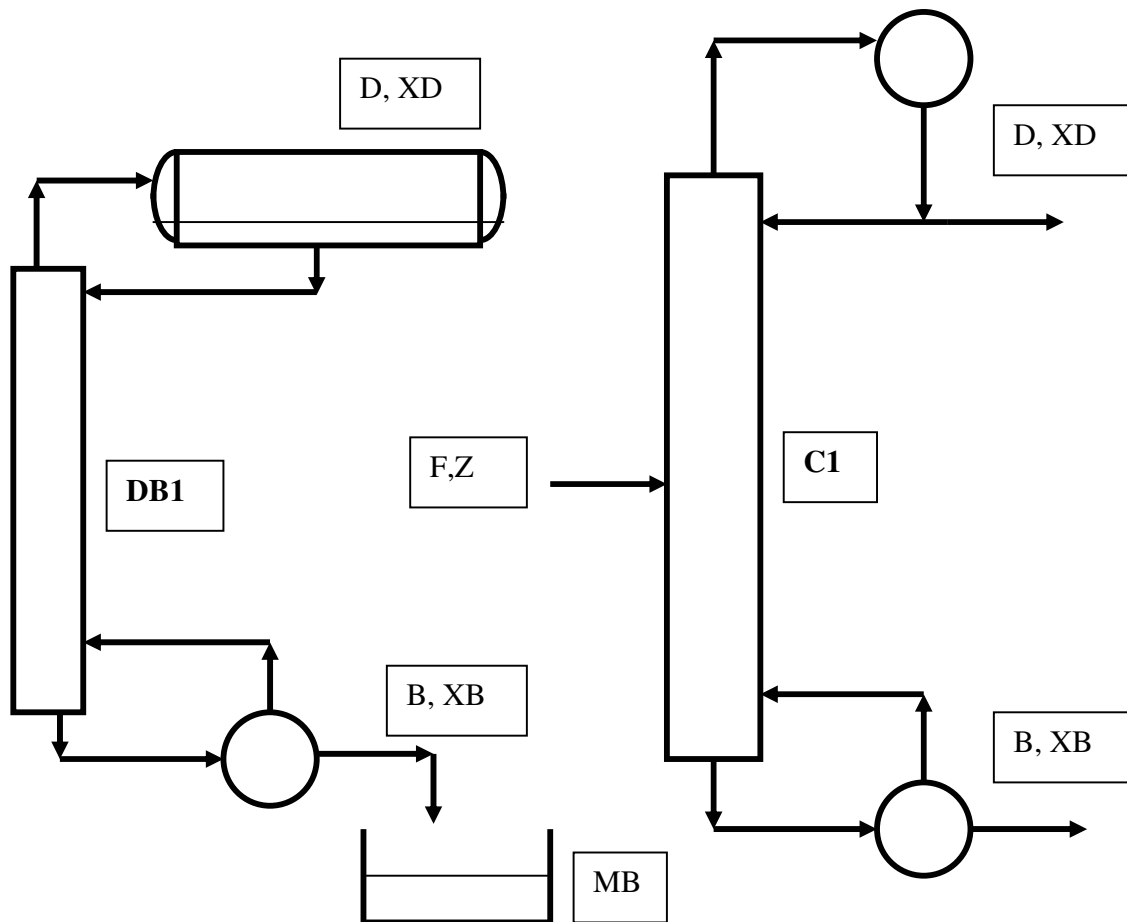


FIG21

**Questão 05 (P1 – 2001/01):**

Considere a mistura  $M$  formada por “1” e “2”, líquida e saturada em  $P=1$  bar, com 20% mol em “1”, que será encaminhada à separação por 4 alternativas de destilação (Flash Contínuo **FLS**, Esgotador Contínuo **EC**, Coluna Simples **CS** e Esgotamento em Batelada com 2 Ciclos Sucessivos **EBC1+EBC2**) de forma a gerar produto de fundo ( $B$ ) com 2% mol de “1” ( $XB$ ). Todas as operações dispõem de 500 kW de utilidade quente. As operações contínuas consomem  $F$  gmol/s de  $M$  para produzir  $D$  gmol/s no topo (composição  $XD$  em “1”) e  $B$  gmol/s no fundo (composição  $XB$  em “1”). Razão de refluxo de topo representada por  $RR$  e razão de refluxo de fundo por  $S$ . A operação **EBC1+EBC2** consome  $F$  gmol de  $M$  para produzir rejeitos de topo  $H1$  e  $H2$  (gmol) e produto de fundo  $MB$  (gmol). Demais dados nos esquemas abaixo. Para este sistema valem os seguintes dados termodinâmicos ( $X_k$  é fração molar de “k”):

- Fase vapor é gás ideal, e  $P_1^{SAT} / P_2^{SAT} = 3.5$  (constante);
- Fase líquida não-ideal :  $\overline{G^E} / RT = A X_1 X_2$  ( $A$  constante);
- Coeficiente de atividade de “1” em diluição infinita em “2” :  $\gamma_1^{\infty,2} = 4$
- Entalpia de Vaporização da Mistura em  $P=1$  bar :  $\lambda=50000$  J/gmol

Com base nos dados acima e adotando  $X_1 \equiv X$ , responda:

- Obter a volatilidade relativa  $\alpha_{12}(X)$  e a relação de equilíbrio LV em  $P=1$  bar.
- Mostre que este sistema é azeotrópico e obtenha a composição azeotrópica ( $XAZ$ ).
- Considerando a operação **FLS** obter:  $F, D, B, XD$  e  $REC2\%$ ;
- Considerando a operação **EC** obter:  $F^{MAX}, B^{MAX}, D, XD^{MAX}, S^{MIN}, REC2\%^{MAX}$ ;
- Considerando a operação **CS** para produzir destilado com  $XD$  igual a 90% da composição azeotrópica obter :  $F^{MAX}, B^{MAX}, D^{MAX}, XD$  e  $REC2\%$ ;
- Considerando a operação **CS** nas condições de (v), obter  $RR^{MIN}, S^{MIN}$ ;
- Considerando operação **EBC1+EBC2** com  $XB1=0.07$  e 3 estágios perfeitos (incluindo refeedor) por ciclo, obter  $MB^{MAX}/F, H1^{MIN}/F, H2^{MIN}/F, XD1^{MAX}, XD2^{MAX}, REC2\%^{MAX}$
- Explique as diferenças de **FLS, EC** e **CS** e ordene seus desempenhos. Qual é mais eficiente?
- Considere **CS** operando a 70% de  $D^{MAX}$ . Obter  $F, D, B, XD$  e  $REC2\%, RR, S$ ;
- Nas condições de (ix), determine o número de estágios e a posição ótima da carga para **CS**.

As figuras referentes a esse exercício (FIG22A, FIG22B, FIG22C e FIG22D) encontram-se nas próximas páginas.

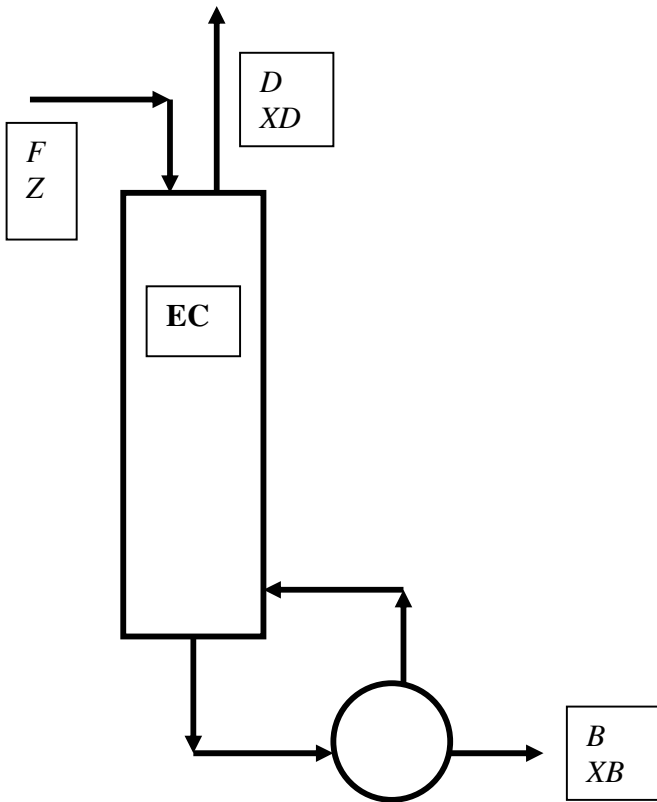


FIG22A

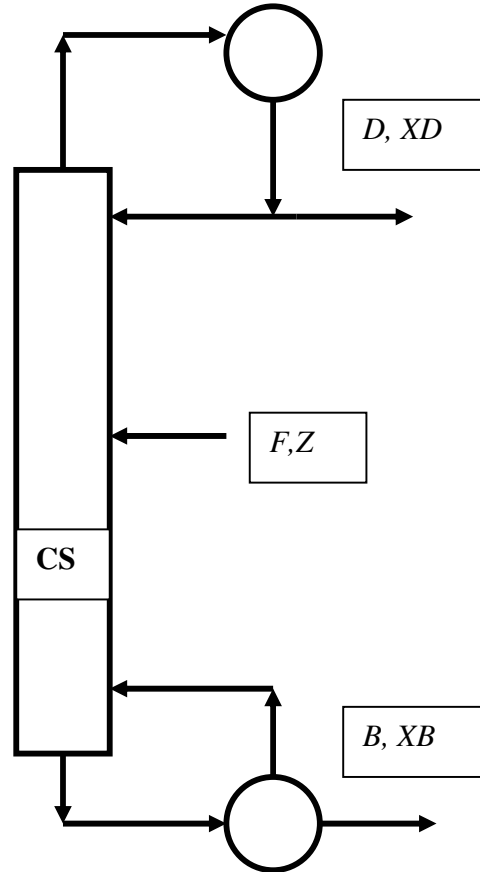


FIG22B

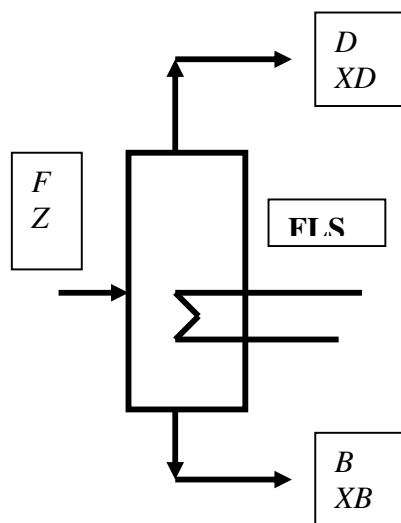


FIG22C

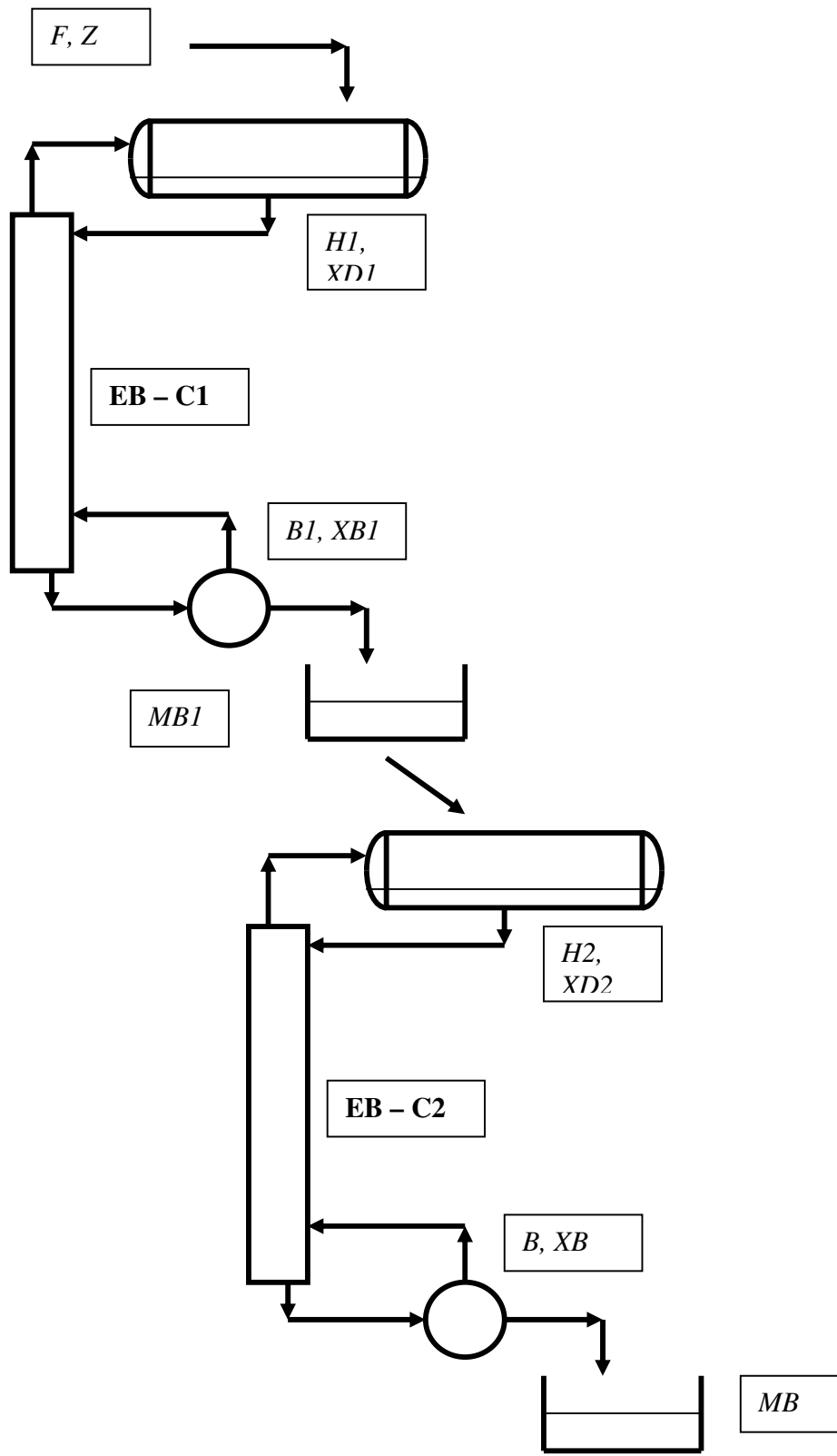


FIG22D

**Questão 06 (P1 – 2001/02):**

Considere 10000 gmol de mistura formada por “1” “2”, líquida e saturada em  $P=1 \text{ bar}$ , com 30% mol em “1”. Admite-se volatilidade relativa constante ( $\alpha=4$ ). A mistura será processada na operação batelada abaixo, com uma coluna de retificação e outra de esgotamento unidas a um tanque de carga. A planta opera com composições de topo ( $X_D = 0.99$ ), fundo ( $X_B = 0.01$ ) e tanque de carga ( $X_H = 0.3$ ) constantes. Têm-se as seguintes variáveis e valores:

- $M_B(t), B, X_B$ : gmol de produto de fundo, sua vazão (constante) e composição em “1” (constante);
- $M_D(t), D, X_D$ : gmol de produto de topo, sua vazão (constante) e sua composição em “1” (constante);
- $H(t), X_H$ : gmol de líquido retido no tanque de carga e sua composição em “1” (constante);
- $V=5 \text{ gmol/s}$  : Vazão de Vapor gerado no refeedor que é a mesma que percorre as seções;
- $B=1 \text{ gmol/s}$  : Vazão de Produto de Fundo;
- $Z=B/(D+B)$ : Fração de produto retirado pelo fundo (constante);

A operação prosseguirá com produtos e vazões constantes até consumo total do material no tanque; isto é, *não há geração de rejeitos e as taxas de produção são fixas*. Obter:

- (i) A fração de retirada de fundo ( $Z$ ) para garantir este padrão operacional;
- (ii) A vazão de destilado ( $D$ ) e as razões de refluxo usadas no fundo e topo ( $S, RR$ );
- (iii) O tempo necessário à operação ( $t$ ) para decompor a carga e os produtos geraos  $M_B, M_D$ ;
- (iv) O Número de estágios das cascatas de esgotamento e de retificação para a operação.

A figura referente a esse exercício (FIG23) encontra-se na próxima página.

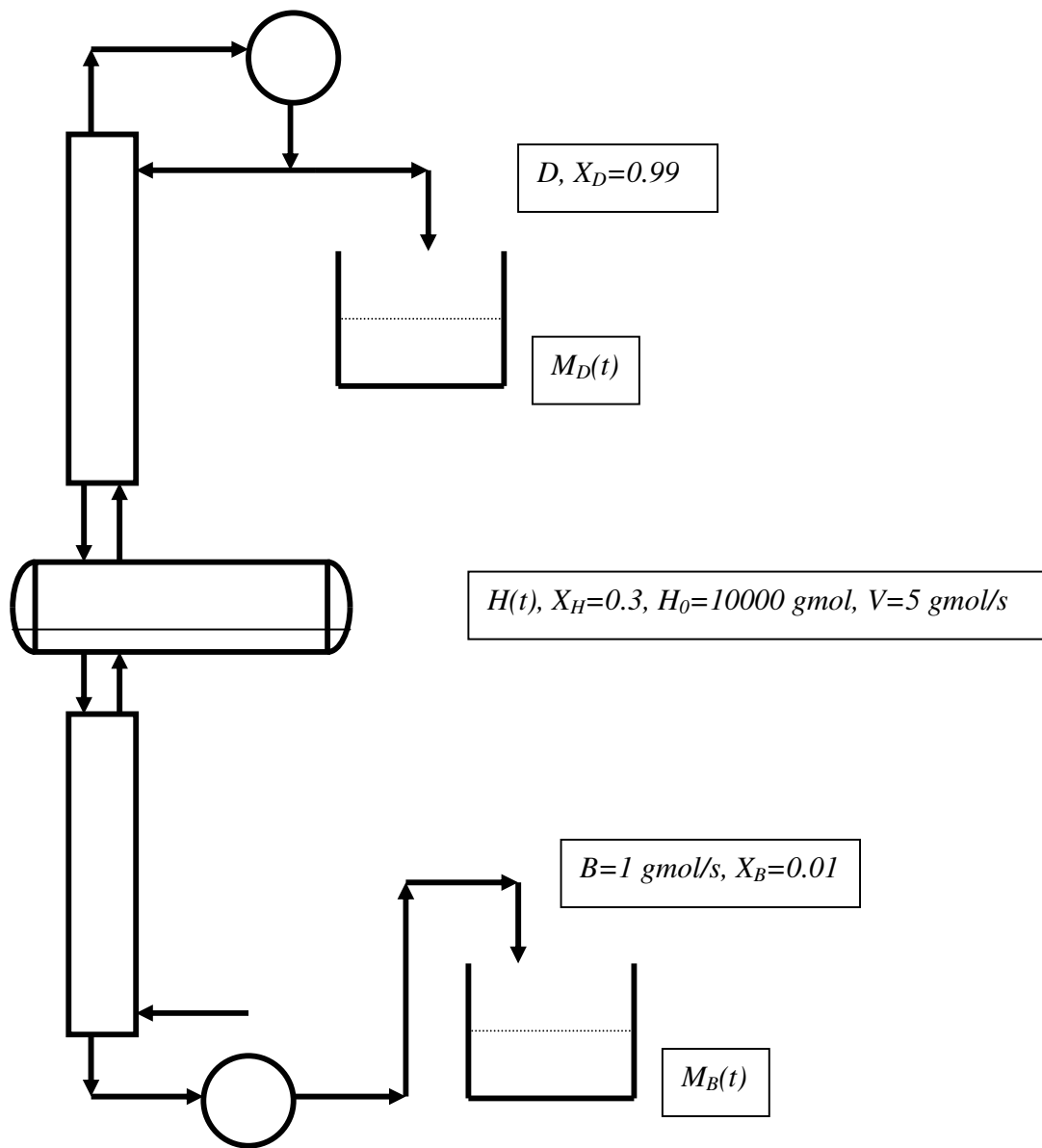


FIG23



**Questão 07 (P1 – 2002/01):**

Considere  $H_0=10000$  gmol de mistura formada por “1” e “2”, líquida e saturada em  $P=1$  bar, com 60% mol em “1” ( $X_{H0}=0.6$ ). Admite-se volatilidade relativa constante ( $\alpha=2.7$ ). A mistura será processada pelas duas operações bateladas abaixo, **DB1** e **DB2**, aplicadas em sequência (Figura), utilizando-se a mesma vazão de vapor interno ( $V=1$ gmol/s) e o mesmo número de estágios perfeitos (pratos + refeedor) dado por  $N=5$ . Operação **DB1** faz retificação com topo fixo (produto  $M_{D1}$  gmol, com composição  $X_{D1}=0.98$  e resíduo  $H_1$  gmol com composição  $X_{H1}$ ), enquanto **DB2** faz esgotamento com fundo fixo (produto  $M_{B2}$  gmol com composição  $X_{B2}=0.02$  e resíduo  $H_2$  gmol com composição  $X_{H2}$ ). Ambas operações aplicam a mesma fração  $f$  de produção relativa à produção máxima possível (isto é,  $f = M_{D1} / M_{D1}^{Max} = M_{B2} / M_{B2}^{Max}$ ). Desta forma um ciclo de aplicação **DB1** + **DB2** gera 2 produtos e 1 resíduo de acordo com o seguinte processamento  $(H_0, X_{H0}) \rightarrow (M_{D1}, X_{D1}) + (M_{B2}, X_{B2}) + (H_2, X_{H2})$ .

Com base nestes dados, responda:

(i) Mostre que 
$$X_{H1} = \frac{X_{H0} - X_{D1}}{1 - f \left( \frac{X_{H1}^{min} - X_{H0}}{X_{H1}^{min} - X_{D1}} \right)} + X_{D1}$$
 e que 
$$X_{H2} = \frac{X_{H1} - X_{B2}}{1 - f \left( \frac{X_{H2}^{max} - X_{H1}}{X_{H2}^{max} - X_{B2}} \right)} + X_{B2}$$

(ii) Obter  $f$  para que o resíduo final tenha a mesma composição da carga, isto é  $X_{H2} = X_{H0}$ ;

(iii) Obter a fração de redução de carga por ciclo,  $H_2/H_0$ , nas condições de (ii); (iv) Obter número de ciclos para que o resíduo final seja inferior a 1% da carga (admitindo (ii));

(v) Estimar o tempo (s) gasto por **DB1** no primeiro ciclo de processamento (admitindo (ii)).

A figura referente a esse exercício (FIG24) encontra-se na próxima página.

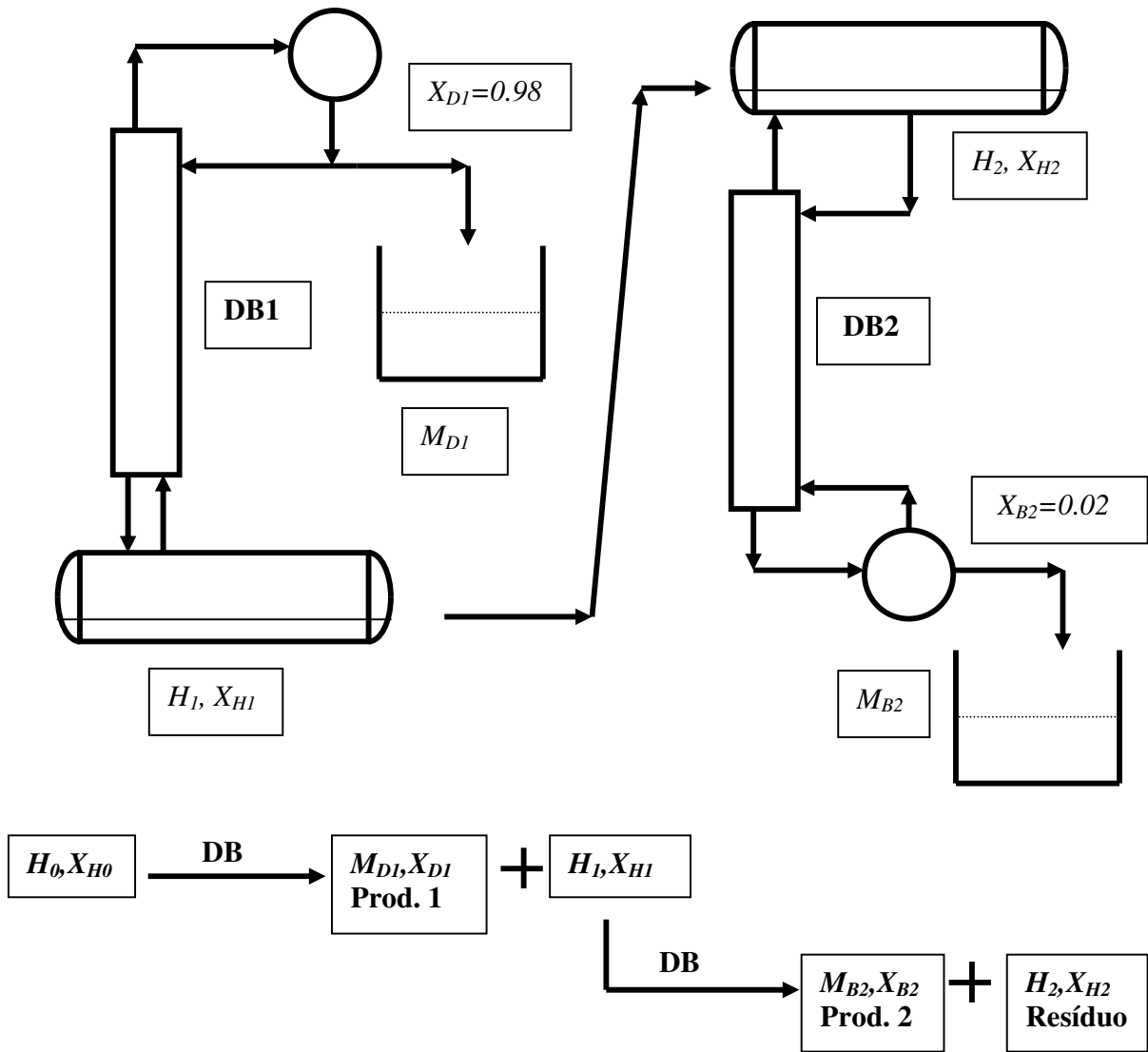


FIG24

**Questão 08 (EF – 2002/01):**

Dispõe-se de carga (F) de 10000 gmol de mistura líquida com 20% mol de “1” e 80% mol de “2”, sendo a volatilidade relativa  $\frac{1}{2}$  constante e igual a 3.2. Esta mistura será processada em 2 ciclos subsequentes de destilação em batelada: DB1 (esgotamento com fundo de composição constante) e DB2 (retificação com topo de composição constante). Determine:

- (i) A máxima produção de DB1 ( $MB_1^{MAX}$ ), seu mínimo resíduo ( $H_1^{MIN}$ ) e composição ( $XH_1^{MAX}$ );
- (ii) Os respectivos valores acima na condição de projeto de DB1 ( $MB_1$ ,  $H_1$  e  $XH_1$ );
- (iii) Com base em (ii), as condições limites de produção para DB2 ( $MD_2^{MAX}$ ,  $H_2^{MIN}$ ,  $XH_2^{MIN}$ );
- (iv) Os respectivos valores acima na condição de projeto de DB2 ( $MD_2$ ,  $H_2$ ,  $XH_2$ );
- (v) O tempo de operação de DB1.

Operação	DB1 (Esgotamento)	DB2 (Retificação)
Estágios (Pratos+Refrervedor)	N=5	N=5
Carga	F=10000 gmol, Z=0.2 (em “1”)	H <sub>1</sub> gmol, XH <sub>1</sub> (em “1”)
Produto	MB <sub>1</sub> gmol, XB <sub>1</sub> =0.01 (em “1”)	MD <sub>2</sub> gmol, XD <sub>2</sub> =0.99 (em “1”)
Resíduo	H <sub>1</sub> gmol, XH <sub>1</sub> (em “1”)	H <sub>2</sub> gmol, XH <sub>2</sub> (em “1”)
Rendimento (Prod/Prod <sup>MAX</sup> %)	95%	95%

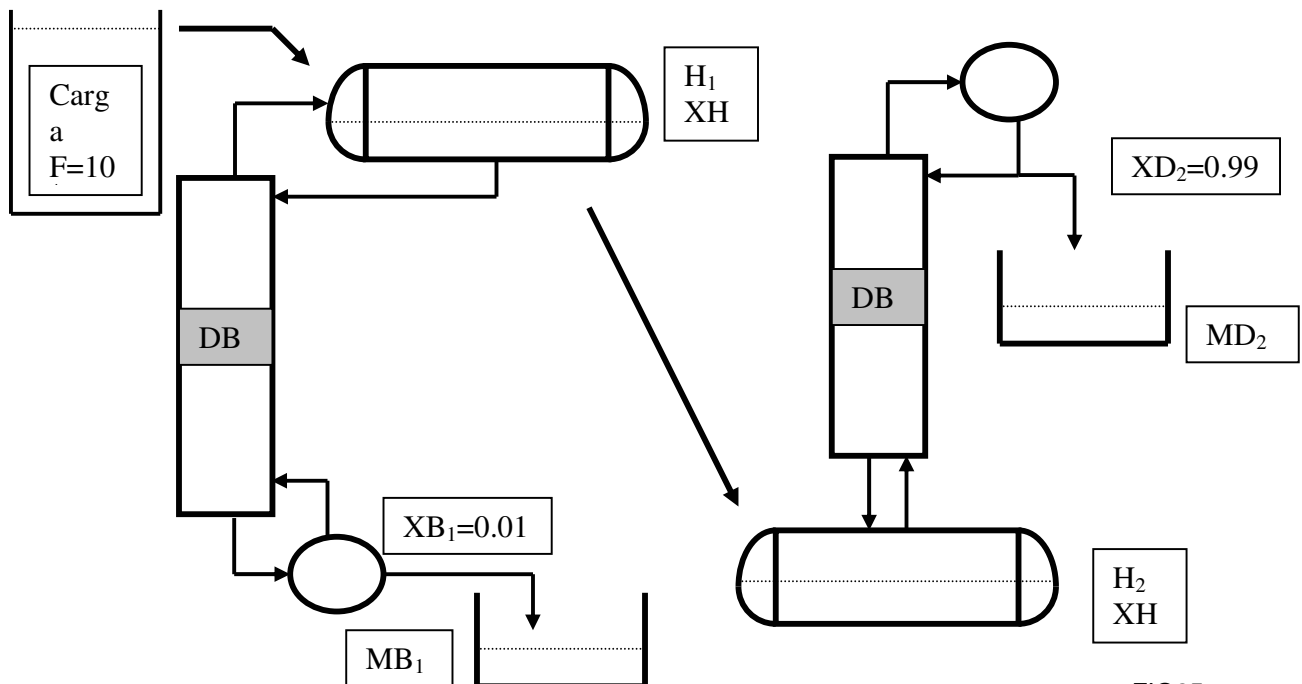


FIG25

**Questão 09 (P1 – 2002/02):**

Considere  $H_0$  gmol de mistura formada por “1” e “2”, líquida e saturada em  $P=1$  bar, com 29% mol em “1” ( $X_{H0}=0.29$ ). Admite-se volatilidade relativa constante ( $\alpha=2.7$ ). A mistura será processada pelas duas operações batelada abaixo, **DB1** e **DB2, aplicadas em seqüência (Figura)**, utilizando-se a mesma vazão de vapor interno ( $V$  gmol/s) e o mesmo número de estágios perfeitos (pratos + refeedor) dado por  $N=6$ .

Operação **DB1** faz esgotamento com fundo fixo (produto  $M_{B1}$  gmol, composição  $X_{B1}=0.01$  e resíduo  $H_1$  gmol com composição  $X_{H1}$ ), enquanto **DB2** faz retificação com topo fixo (produto  $M_{D2}$  gmol com composição  $X_{D2}=0.98$  e resíduo  $H_2$  gmol com composição  $X_{H2}$ ). Ambas operações aplicam a mesma fração  $f$  de produção relativa à produção máxima possível (isto é,  $f = M_{B1} / M_{B1}^{Max} = M_{D2} / M_{D2}^{Max}$ ). Desta forma um ciclo de aplicação **DB1 + DB2** gera 2 produtos e 1 resíduo de acordo com o seguinte processamento  $(H_0, X_{H0}) \rightarrow (M_{B1}, X_{B1}) + (M_{D2}, X_{D2}) + (H_2, X_{H2})$ .

Com base nestes dados, responda:

- (i) Obter  $f$  para que o resíduo final tenha a mesma composição da carga, isto é  $X_{H2} = X_{H0}$ ;
- (ii) Obter a fração de redução de carga por ciclo,  $H_2/H_0$ , nas condições de (i);
- (iii) Obter os coeficientes de produção por ciclo  $M_{B1}/H_0$ ,  $M_{D2}/H_0$ ;
- (iv) Obter número de ciclos para que o resíduo final seja inferior a 0.1% da carga (admitindo (i));

A figura referente a esse exercício (FIG26) encontra-se na próxima página.

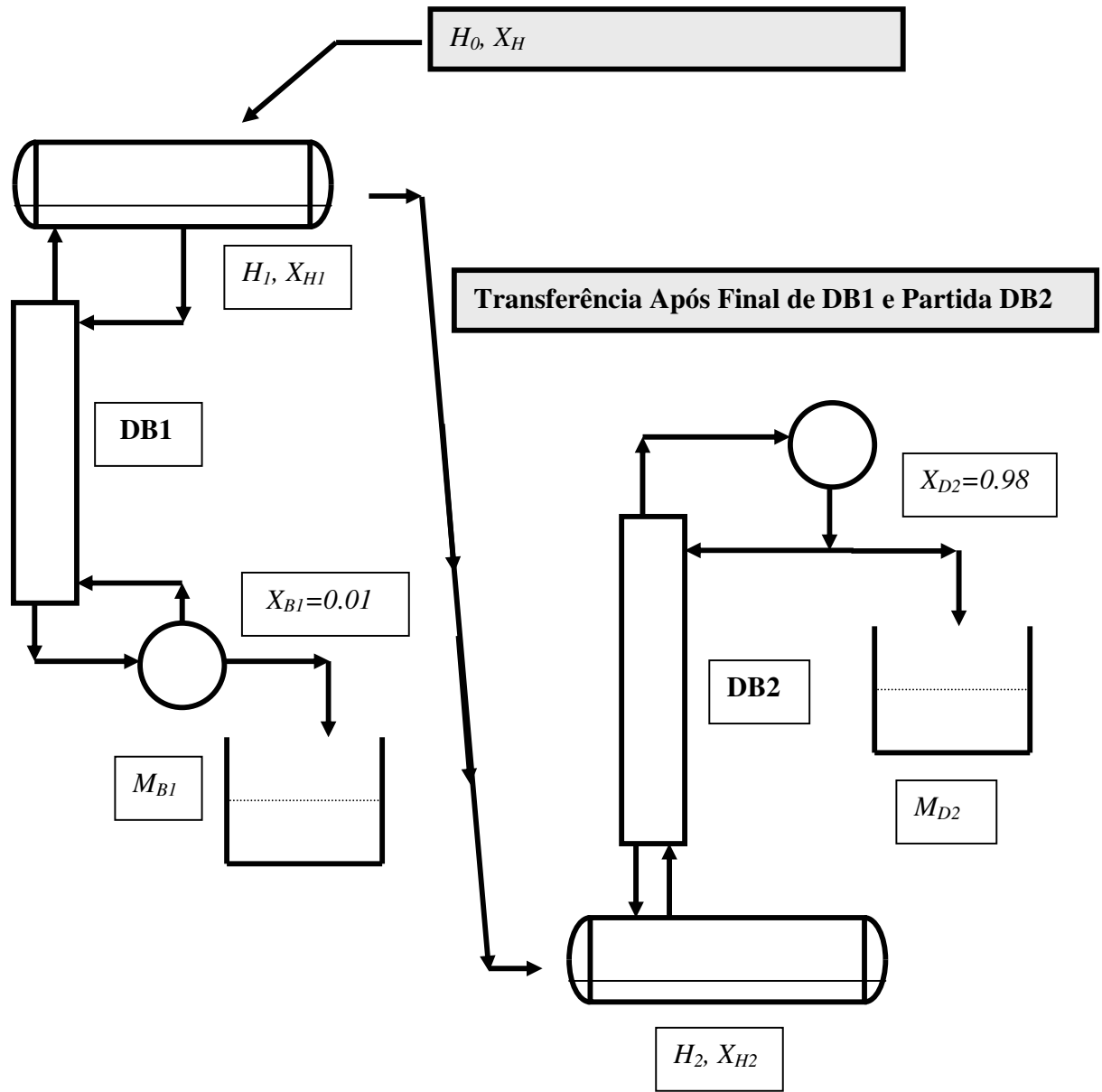


FIG26

**Questão 10 (P1 – 2003/01):**

Considere  $H_0=10000$  g mol de mistura formada por “1” e “2”, líquida e saturada em  $P=1$  bar, com 60% mol em “1” ( $X_{H0}=0.6$ ). Admite-se volatilidade relativa constante ( $\alpha=3$ ). A mistura será processada pela operação batelada **DB1**, (**Figura 2**), fazendo retificação com topo fixo. São utilizados  $N=5$  estágios perfeitos (pratos + refervedor), de modo a gerar produto de topo ( $M_{D1}$  g moles) com composição  $X_{D1}$  em “1” e resíduo  $H_1$  com composição  $X_{H1}$  em “1”. O rendimento da operação em relação à máxima produção é de  $R\%=95\%$ .

O produto  $M_{D1}$  será agora processado novamente por **DB1** de modo a gerar um segundo produto de topo final com composição  $X_{D2}=0.99$  e quantidade  $M_{D2}$ , restando resíduo  $H_2$  com composição  $X_{H2}$  em “1”. Com base nisto responda:

- Escrever  $M_{D1}$ ,  $H_1$ ,  $X_{H1}$  como funções de  $X_{D1}$ ;
- Escrever  $M_{D2}$ ,  $H_2$ ,  $X_{H2}$  como funções de  $X_{D1}$ ;
- Esboçar em gráfico o comportamento da quantidade de resíduo ( $H_1+H_2$ ) gerado como função de  $X_{D1}$

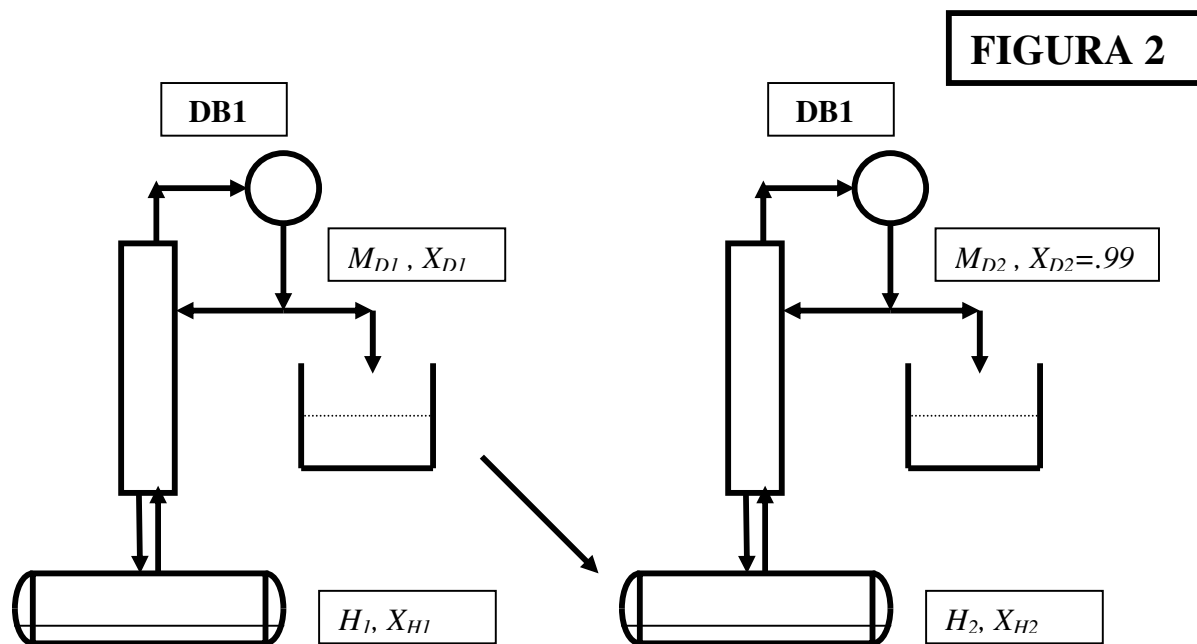


FIG27

**Questão 11 (P1 – 2003/02):**

Considere  $H_0=10000$  gmol de mistura formada por "1" e "2", líquida e saturada em  $P=1$  bar, com 39% mol em "1" ( $X_{H0}=0.39$ ). Admite-se volatilidade relativa constante ( $\alpha=3$ ) entre os componentes. A mistura será processada pela operação batelada de esgotamento abaixo, utilizando alimentação de fundo de vapor "2" puro e saturado, de modo a dispensar refervedor. A coluna dispõe de  $N=5$  estágios perfeitos e operará com valores fixos nas vazões  $F$  (2 gmol/s) e  $B$  (3 gmol/s). Os valores referentes, respectivamente, à quantidade molar e à composição em "1" no tanque de topo são  $H(t)$  e  $X_H(t)$ . O produto de fundo é coletado no tanque externo com quantidade e composição dadas por  $M_B(t)$  e  $\langle X_B \rangle(t)$ . O produto de interesse da operação será o líquido remanescente no tanque de topo ( $H_f$ ). Desta forma, a operação deverá ser projetada para encerrar quando  $X_H$  atingir 0.95 ( $X_{Hf}$ ).

Com base nestes dados, responda:

(i) Mostre que o tempo da operação pode ser calculado com as fórmulas seguintes:

$$t = \frac{H_0(1 - \exp(I))}{B - F} \quad , \quad I = \int_{X_{H0}}^{X_{Hf}} \frac{F - B}{F(Z - X_H) - B(X_B - X_H)} dX_H$$

(ii) Obter a equação de operação McCabe-Thiele para cálculo ascendente:

$$X_{n+1} = (F/B)Y_n + X_B$$

(iii) Com (i) e (ii), projetar o tempo necessário à operação;

(iv) Estimar a quantidade e composição do produto coletado no fundo ( $M_B$ ,  $\langle X_B \rangle$ ), a quantidade remanescente no topo ( $H_f$ ) e a quantidade de vapor de fundo utilizado.

A figura referente a esse exercício (FIG28) encontra-se na próxima página.

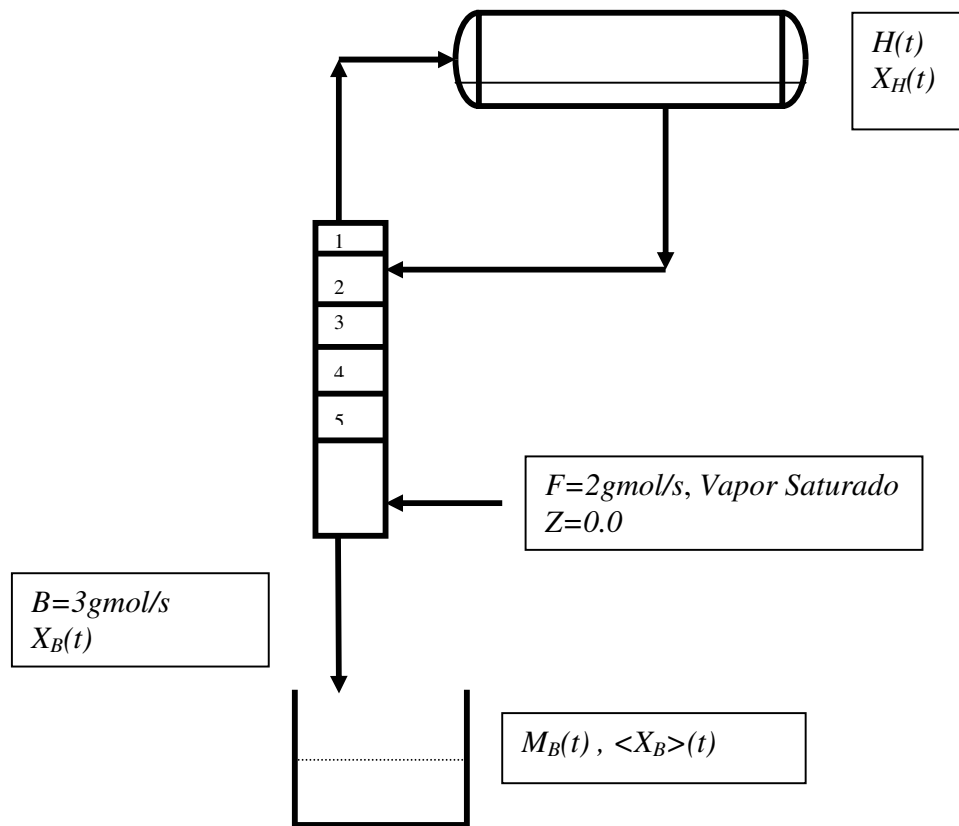


FIG28

**Questão 12 (P1 – 2004/02):**

Considere a operação batelada (FIG29), sem condensador de topo, para separar  $H_0$  moles da mesma mistura da carga  $F_1$  do questão 11 do capítulo anterior (página 20). A operação é alimentada superiormente com  $F$  gmol/s de “1” puro (líquido). A vazão de vapor interno da operação é constante, assim como as vazões  $D$  e  $F$ . São  $N$  estágios ao todo. Obter a equação de projeto do tempo ( $t$ ) da operação. Identifique condições de partida e de parada. Qual a condição básica para a operação enriquecer o tanque de fundo em “2”?

A figura referente a esse exercício (FIG29) encontra-se na próxima página.



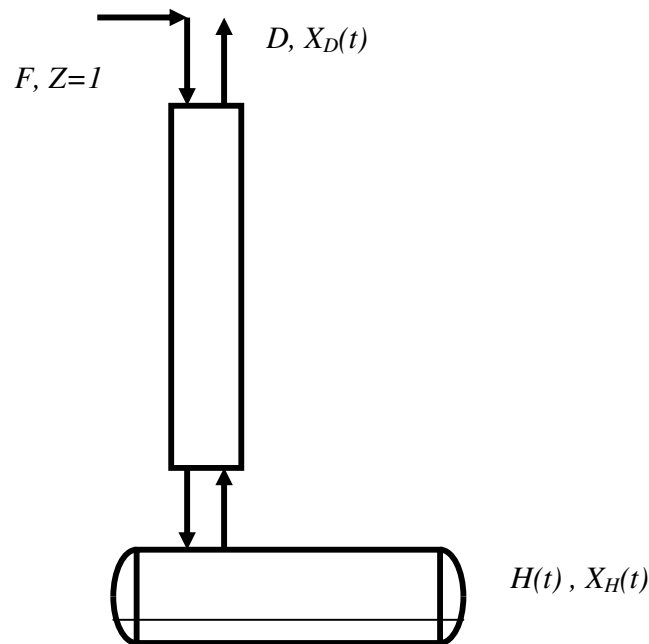


FIG29

**Questão 13 (P1 – 2005/01):**

Considere  $H_0=1000$  gmol de mistura “1”+“2”, líquida e saturada em  $P=1$  bar, com 50% mol em “1” ( $X_{H0}=0.5$ ). Admite-se volatilidade relativa constante ( $\alpha=2.95$ ). A mistura será processada pelas operações batelada abaixo, **DB1** e **DB2**, **aplicadas em sequência** (FIG30), utilizando-se a mesma vazão de vapor interno ( $V$  gmol/s) e o mesmo número de estágios perfeitos (pratos+refervedor)  $N=6$ . **DB1** faz esgotamento com fundo fixo (produto  $M_{B1}$  gmol, composição  $X_{B1}=0.01$  e resíduo  $H_1$  gmol com composição final  $X_{H1}=0.8$ ), enquanto **DB2** faz retificação com topo fixo (produto  $M_{D2}$  gmol, composição  $X_{D2}=0.99$ , resíduo  $H_2$  gmol com composição final  $X_{H2}=0.5$ ). Desta forma um ciclo de aplicação **DB1** + **DB2** gera 2 produtos e 1 resíduo final com a mesma composição da carga inicial. A partir disto, responda:

- Calcular  $M_{B1}$ ,  $H_1$  e rendimento de **DB1**  $R\% = 100 * M_{B1} / M_{B1}^{MAX}$  ;
- Obter a fração de redução de carga por ciclo,  $H_2/H_0$ ;
- Obter os coeficientes de produção por ciclo  $M_{B1}/H_0$ ,  $M_{D2}/H_0$ ;
- Obter número de ciclos para que o resíduo final seja inferior a 0.1% da carga;

A figura referente a esse exercício (FIG30) encontra-se na próxima página.

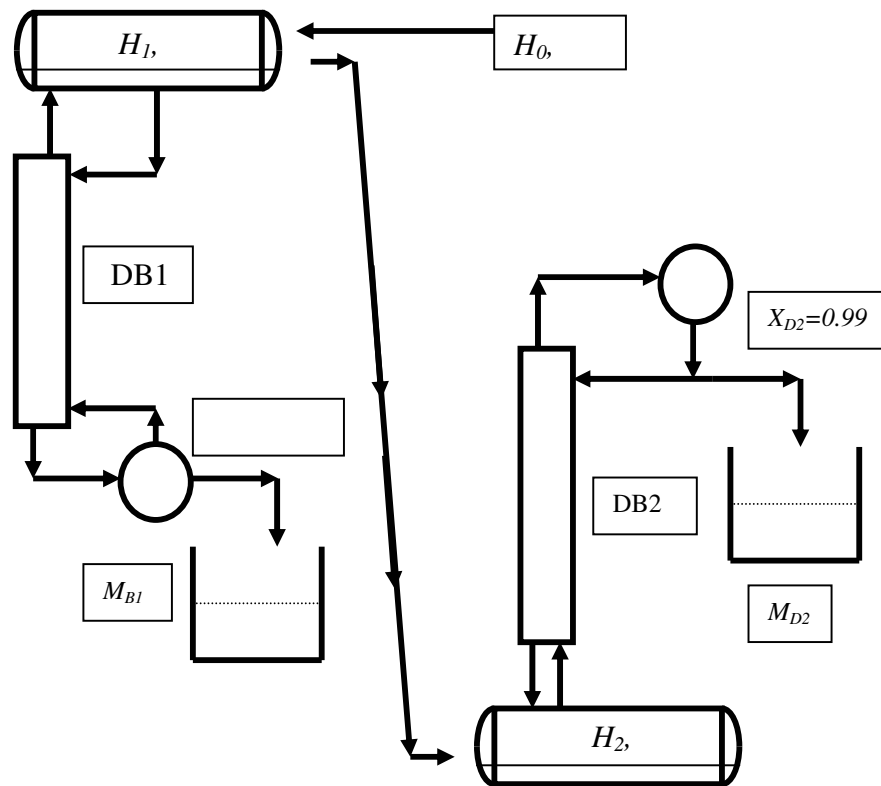


FIG30

**Questão 14 (P1 2005/02):**

Na preparação da **operação batelada** da Fig. 2, *ambos os tanques* são carregados com  $H_0$  moles de mistura "1" + "2", líquida e saturada em  $P=1$  bar, com 50% mol em "1" ( $X_{H0}=0.5$ ). Use volatilidade relativa 12 constante ( $\alpha$ ). O tanque de fundo (composição de fase líquida  $X_{HB}(t)$  em "1") é refeedor, enquanto o de topo (composição de fase líquida  $X_{HD}(t)$  em "1") é condensador. O casco da coluna tem  $N=5$  estágios perfeitos, operando com *vazões de líquido e vapor fixas e iguais a  $F$  gmol/s*. Os produtos são os líquidos finais nos tanques de topo e fundo. Não há retirada de material do processo. Responda:

- (i) Mostre que os tanques de topo e fundo operam com "hold-up" constante no tempo;
- (ii) Mostre que ao longo do tempo de batelada tem-se  $X_{HB}(t) + X_{HD}(t) = 2X_{H0}$ ;
- (iii) Representar qualitativa e graficamente os comportamentos de  $X_{HB}(t)$  e  $X_{HD}(t)$  versus  $t$ ;
- (iv) Descreva a condição temporal limite da operação. Será esta uma condição de estado estacionário?

(v) Mostre que a condição limite é  $X_{HB}^{lim} = \frac{1}{1 + \sqrt{\alpha^{N+1}}}$  e  $X_{HD}^{lim} = \frac{\sqrt{\alpha^{N+1}}}{1 + \sqrt{\alpha^{N+1}}}$ .

Obter  $X_{HB}^{lim}$  e  $X_{HD}^{lim}$  com  $\alpha=1.95$

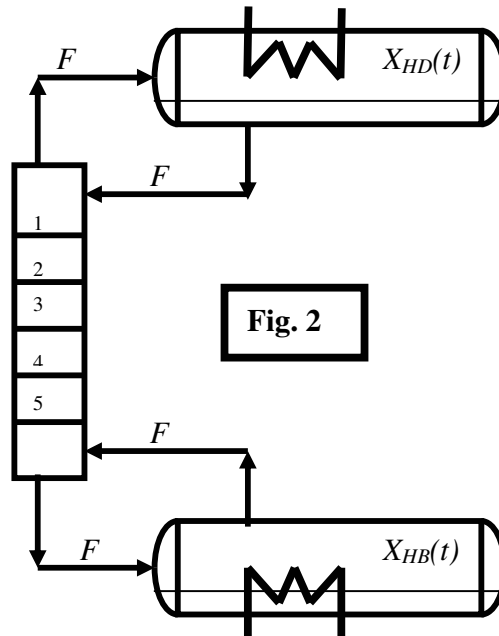


FIG31

**Questão 15 (P1 – 2006/01):**

Na FIG32 operação de esgotamento em batelada com  $N=5$  estágios teóricos processando  $H_0$  gmoles de carga "1"+"2" com 30% (mol) de "1" ( $X_{H0}=0.3$ ). A volatilidade relativa 12 é  $\alpha=3.5$ . Não há refeedor, por isto injeta-se corrente  $F$  de vazão constante ( $F$  g mol/s) com vapor saturado "2" puro ( $Z=0$ ) no fundo. Produto de fundo rico em "2" é coletado com vazão  $B(t)$  onde  $B(t) > F$ . Há controle mantendo o fundo em composição constante de  $X_B=0.01$  pelo fecho gradual da válvula de líquido do tanque de topo. Responda:

- (i) Desenvolver modelagem dinâmica para  $X_H(t)$ ,  $H(t)$  (i.e. expressões de  $dX_H(t)/dt$ ,  $dH(t)/dt$ );
- (ii) Qualificar comportamentos no tempo de  $X_H(t)$ ,  $H(t)$ ,  $B(t)/F$ ,  $X_B$ ,  $M_B(t)$  e das vazões internas  $L_o(t)$ ,  $V_o(t)$ ;
- (iii) Obter a Equação de Operação entre  $X_{n+1}$  e  $Y_n$  em termos de  $B/F$  e  $X_B$  para resolução ascendente (MPA);
- (iv) Há condição limite em  $X_H(t)$  no estado (pseudo) estacionário  $dX_H(t)/dt = 0$ . Explicar esta condição e obter a sua expressão matemática. Por que não há sentido em prosseguir a operação além deste estado?

(v) Calcular os valores limites  $X_H^{Lim}$ ,  $B^{Lim}/F$  através da condição obtida em (iv) e via resolução MPA.

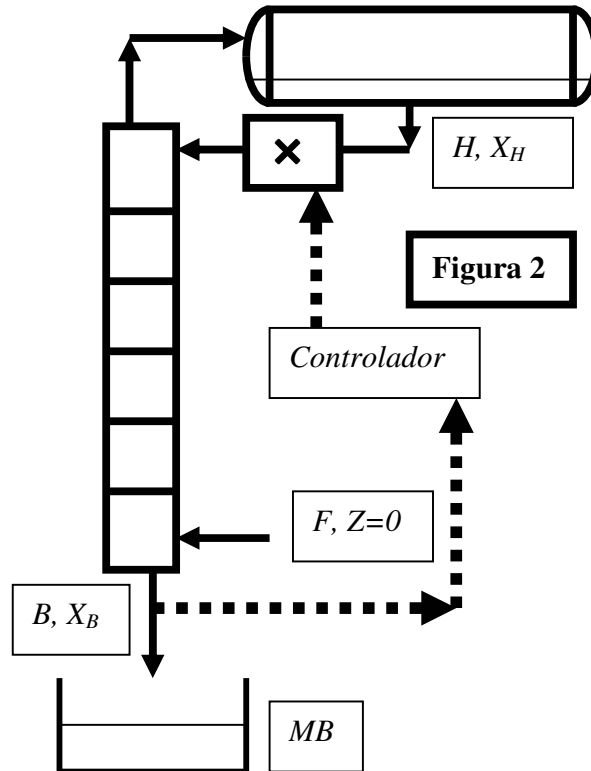


FIG32

**Questão 16 (P1 – 2006/01):**

Na FIG33 retificação em batelada com  $N=3$  estágios teóricos processando  $H_0$  gmoles de carga "1"+"2" com 60% (mol) de "1" ( $X_{H0}=0.6$ ). A volatilidade relativa 12 é  $\alpha=5$ . Não há condensador, por isto alimenta-se corrente  $F$  de **vazão constante** ( $F$  g mol/s) como líquido saturado "1" puro ( $Z=1$ ) no topo. Produto de topo rico em "1" é coletado como **vapor saturado** com vazão  $D(t)$  onde  $D(t) > F$ . O total molar de produto de topo coletado em  $t$  é  $M_D(t)$ . Há controle mantendo o topo **em composição constante**  $X_D=0.97$  pela redução gradual da carga térmica do refeedor **via fechamento gradual da válvula de vapor de aquecimento**. Responda:

- (i) Desenvolver modelagem dinâmica para  $X_H(t)$ ,  $H(t)$  (i.e. expressões de  $dX_H(t)/dt$ ,  $dH(t)/dt$ );
- (ii) Qualificar comportamentos no tempo de  $X_H(t)$ ,  $H(t)$ ,  $D(t)/F$ ,  $X_D$ ,  $M_D(t)$  e das vazões internas  $L_0(t)$ ,  $V_0(t)$
- (iii) Obter a Equação de Operação entre  $Y_{n+1}$  e  $X_n$  em termos de  $D/F$  e  $X_D$  para resolução descendente (MPD);
- (iv) Há condição limite em  $X_H(t)$  no estado (pseudo) estacionário  $dX_H(t)/dt = 0$ . Explicar esta condição e obter a sua expressão matemática. Por que não há sentido em prosseguir a operação além deste estado?

(v) Calcular os valores limites  $X_H^{Lim}$ ,  $D^{Lim}/F$  através da condição obtida em (iv) e via resolução *MPD*.

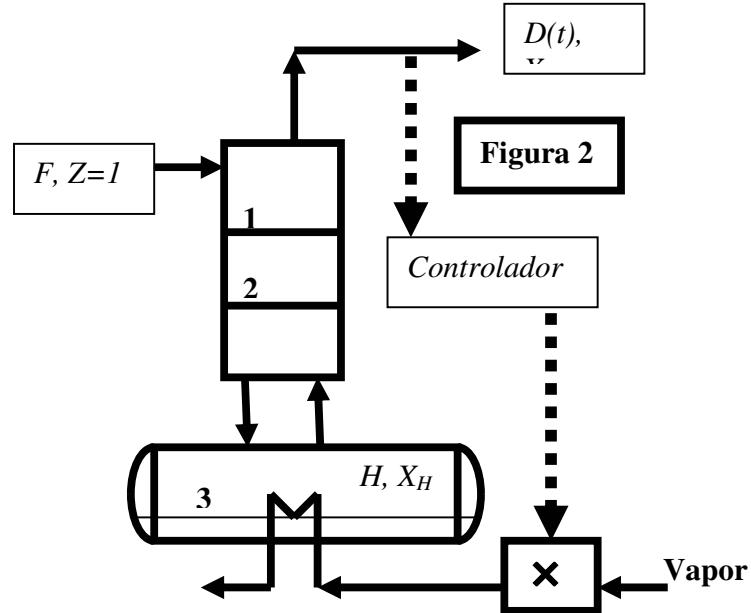


FIG33

### Questão 17 (P1 – 2007/01):

Na FIG34 *Destilação Batelada de Vaso Intermediário (DBVI)* para separar  $H_0$  moles de carga “1”+“2” líquida e saturada, com 50% mol “1” ( $X_{H0}=0.5$ ), volat. rel.  $\alpha = 2$ , entalpia de vaporização  $\lambda = 30$  kJ/mol. O vaso da *DBVI* não é aquecido tendo composição de fase líquida  $X_H(t)$  em “1”. Tanto a seção superior de pratos quanto a inferior têm, cada, 5 estágios perfeitos. Os produtos têm  $M_D$  e  $M_B$  moles. A *DBVI* usa  $D = B = constante$ . A razão de refluxo de topo ( $RR$ ) é fixada para ter-se  $X_D$  e  $X_B$  constantes. Determine:

- O modelo dinâmico da *DBVI* (i.e. expressões  $dH/dt$  e  $dX_H/dt$ );
- A condição para que a *DBVI* também tenha  $X_H = X_{H0} = constante$ ;
- Comportamentos de  $L_0$ ,  $V_0$ ,  $L_1$ ,  $V_1$ ,  $H$ ,  $X_H$ ,  $X_D$ ,  $X_B$ ,  $M_D$ ,  $M_B$  e expressões em função de  $t$ ,  $RR$ ,  $D$ ;
- O tempo da batelada ( $t_F$ ) e os totais de calor gastos com aquecimento ( $Q_0$ ) e resfriamento ( $Q_1$ ) em kJ;
- Os melhores  $X_D$  e  $X_B$  obteníveis nesta coluna ( $X_D^{MAX}$ ,  $X_B^{MIN}$ ) valendo a condição do item (ii);
- Por que não é prático operar nos valores do item (v)?

A figura referente a esse exercício (FIG34) encontra-se na próxima página.

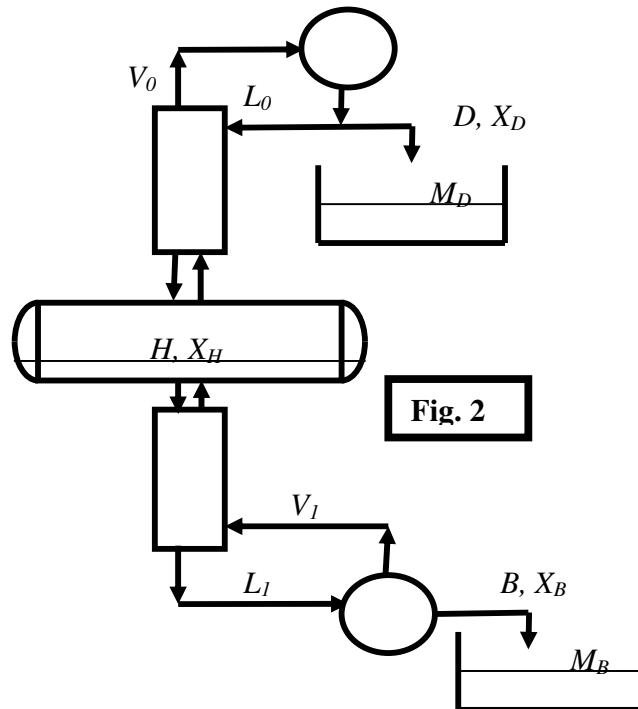


FIG34

**Questão 18 (P1 – 2007/02):**

A destilação batelada (DB) da FIG35, utiliza um tanque carregado inicialmente com  $H_0=1000$  gmol de mistura “1” + “2”, líquida e saturada em  $P=1$  bar, com 50% mol em “1” ( $X_{H0}=0.5$ ). Admita volatilidade relativa 12 constante  $\alpha=3.25$ . O tanque de fundo não é aquecido, sendo injetado nele vapor saturado “2” puro ( $Z=0$ ) com vazão  $F=1$ gmol/s constante. O vapor do tanque, com a mesma vazão  $F$ , é condensado gerando o destilado com fração molar  $X_D(t)$  em “1”, o qual é recolhido no tanque de topo com  $M_D(t)$  moles de líquido e composição média  $\langle X_D \rangle$ . Não há refluxo. O objetivo é gerar  $M_D(t)$  enriquecido em “1”. A DB é encerrada quando a fase líquida de fundo atingir  $X_{HF}$ . Responda:

- (i) Escrever as equações de modelagem dinâmica do sistema (i.e equações para  $dH/dt$ ,  $dX_H/dt$ );
- (ii) Escrever as premissas desta DB (condições de partida, parada e de operação);
- (iii) Descrever qualitativamente os comportamentos no tempo de  $X_H(t)$ ,  $H(t)$ ,  $X_D(t)$ ,  $M_D(t)$ ,  $\langle X_D \rangle$ ;
- (iv) Obter equações de projeto para: tempo da DB ( $t_F$ ); valores de produto  $M_D$ ,  $\langle X_D \rangle$ ; e resíduo  $H_F$ ;
- (v) Obter  $t_F$ ,  $M_D$ ,  $\langle X_D \rangle$ ,  $H_F$  para a DB recuperar 60% do componente “1” da carga.

A figura referente a esse exercício (FIG35) encontra-se na próxima página.

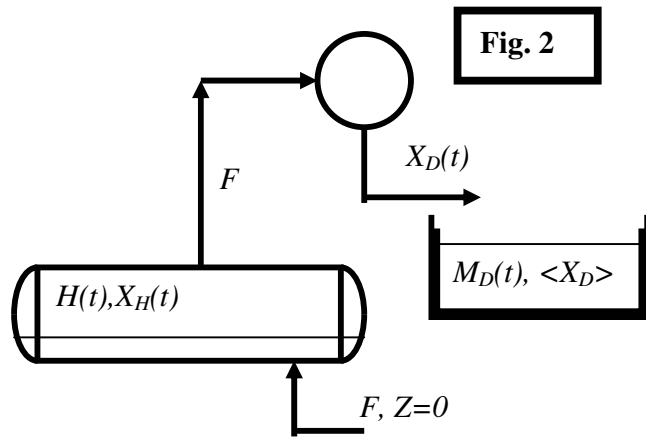


FIG35

Capítulo IV – Método Ponchon-Savarit para Destilação Binária**Questão 01 (2C – 2001/01):**

A Figura representa uma unidade de destilação para retificar a corrente F (60% (mol) de “1”, 40% (mol) de “2”) em um produto de topo D com 95% (mol) de “1” e um rejeito B. A alimentação tem vazão de 100 gmol/s sendo vapor e estando super-aquecida em 70 °C na pressão da coluna (P=1 bar). Com base nestes dados, nas informações a seguir, e aplicando o método **Ponchon-Savarit**, determine:

- (i) A máxima produção de destilado ( $D^{MAX}$ ) que a separação permite;
- (ii) A razão de refluxo mínima ( $RR^{min}$ ) para esta separação;
- (iii) As vazões e composições de todos os produtos na condição de (i) e a recuperação % de “1” no topo;
- (iv) A carga térmica na condição de (i);
- (v) Projetando a separação com razão de refluxo igual ao dobro da mínima ( $RR = 2.RR^{min}$ ), determine

as vazões e composições de produtos e a recuperação % de “1” no topo;

- (vi) Nas condições de (v), determine o número de estágios necessários;

Informações para projeto: (X, Y: Fr.molares de “1” em fase líquida e vapor)

- Entalpia de Vapor Saturado :  $\bar{H}_V = 60 - 20.Y$  (kJ/gmol)
- Entalpia de Líquido Saturado :  $\bar{H}_L = 10 + 10.X$  (kJ/gmol)
- Relação ELV :  $Y = \frac{X.F(X)}{1 - X + X.F(X)}$  ,  $F(X) = 3.exp(0.5 - X)$
- Pressão da coluna: P = 1 bar
- Capacidade Calorífica a Pressão Cte de Vapor Saturado:  $Cp^{vap} = 0.1$  (kJ/gmol.K)

A figura referente a esse exercício (FIG36) encontra-se na próxima página.



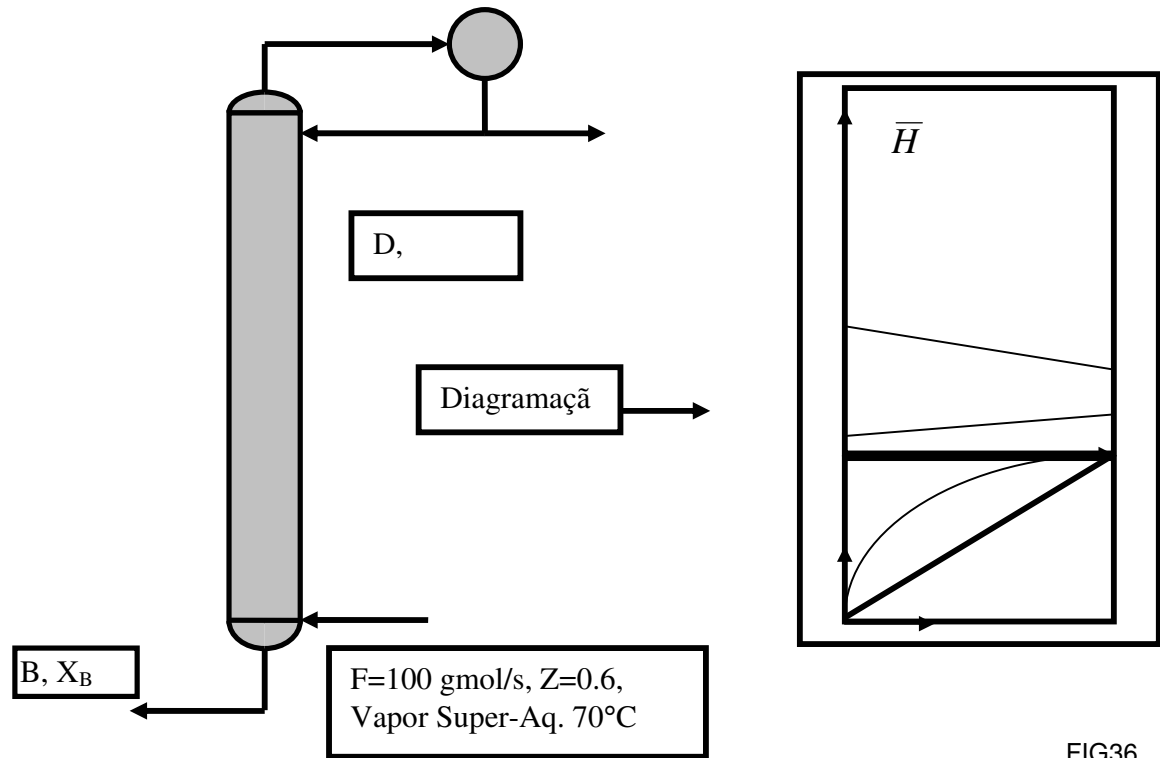


FIG36

**Questão 02 (P2 – 2002/01):**

Considere o retificador abaixo, carregado com  $F=100$  gmol/s de vapor saturado ( $P=1$ bar) tendo 60% mol de “1” e 40% mol de “2”. O objetivo é produzir destilado de topo ( $D$ ) com  $X_D= 98\%$  mol de “1”. O rejeito de fundo é  $B$  com fração molar em “1” dada por  $X_B$ . A razão de refluxo de topo é  $RR$  e a carga térmica (J/s) do condensador  $Q_0$ . Dados de entalpia e de equilíbrio a  $P=1$ bar seguem abaixo, onde  $X, Y$  são frações molares de “1”, respectivamente, em fase líquida e fase vapor

$$\bar{H}_L^{Sat} = 1000(1 + X) \quad (J / gmol), \quad \bar{H}_V^{Sat} = 20000(1 - 0.25Y) \quad (J / gmol)$$

Dados de Equilíbrio Líquido-Vapor (P=1bar)											
X	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Y	0.0	0.18	0.33	0.46	0.57	0.67	0.75	0.82	0.89	0.95	1.0

- A partir destes dados e utilizando o **Método Ponchon-Savarit**, determine:
- (i) A máxima produção possível  $D^{MAX}$ ;
  - (ii) Os valores de  $B$  e  $X_B$  nas condições de (i);

- (iii) O número de estágios e os valores de  $RR$  e  $Q_0$  nas condições de (i);
- (iv) A mínima razão de refluxo desta separação ( $RR^{MIN}$ );
- (v) A mínima produção  $D^{MIN}$  e os correspondentes valores de  $B$ ,  $X_B$ ,  $RR$  e  $Q_0$ ;
- (vi) Operando com  $D=0.9 \cdot D^{MAX}$ , obter  $B$ ,  $X_B$ ,  $RR$  e  $Q_0$ ;
- (vii) O número de estágios necessários nas condições de (vi).

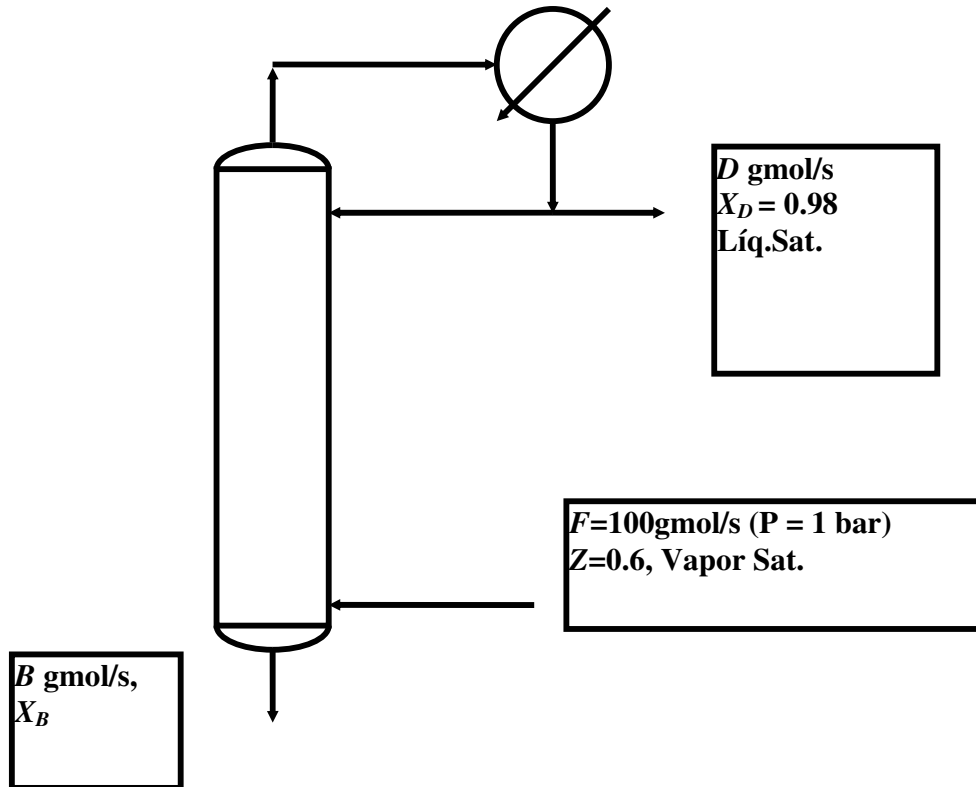


FIG37

**Questão 03 (2C – 2002/02):**

Abaixo tem-se unidade de destilação para separar a corrente  $F_1$  (40% (mol) de "1", 60% (mol) de "2") em um produto de fundo B (líquido) com 1% (mol) em "1" e um rejeito de topo D (vapor). A corrente  $F_1$  tem vazão de 100 gmol/s sendo líquida e sub-resfriada em 50 °C na pressão da coluna ( $P=1 \text{ bar}$ ). No mesmo ponto desta corrente, ingressam 100kW de calor. Como a coluna não dispõe de condensador, há alimentação líquida de topo ( $F_0$ ) contendo 100% mol de "1" e subresfriada em 25 °C. A recuperação de fundo em "2" é de 99%. A razão de refluxo de fundo ( $S$ ) é igual a 3.

A partir dos dados e com o método **Ponchon-Savarit**, determine:

- (i) A vazão de produto de fundo (B)
- (ii) A carga térmica do refeedor ( $Q_2$ ) e a vazão de  $F_0$ ;
- (ii) A vazão (D) e composição ( $X_D$ ) do rejeito de topo;

(iv) O número de estágios necessários e o estágio ótimo de carga de  $F_1$  (Escala Entalpia: 0 a 250 kJ/gmol);

Informações para projeto: ( $X, Y$  : Fr.molares de "1" em fase líquida e vapor, respectivamente)

- Entalpia de Vapor Saturado :  $\bar{H}_V = 60 - 20.Y$  (kJ/gmol)
- Entalpia de Líquido Saturado :  $\bar{H}_L = 10 + 10.X$  (kJ/gmol)
- Relação ELV :  $Y = \frac{X.F(X)}{1 - X + X.F(X)}$  ,  $F(X) = 3.\exp(0.2*(1 - 2X))$
- Capacidade Calorífica a Pressão Cte de Fase Vapor Próximo à Saturação:  
 $C_p^{vap} = 0.1$  kJ/gmol.K
- Capacidade Calorífica a Pressão Cte de Fase Líquida Próximo à Saturação:  
 $C_p^{liq} = 0.2$  kJ/gmol.K

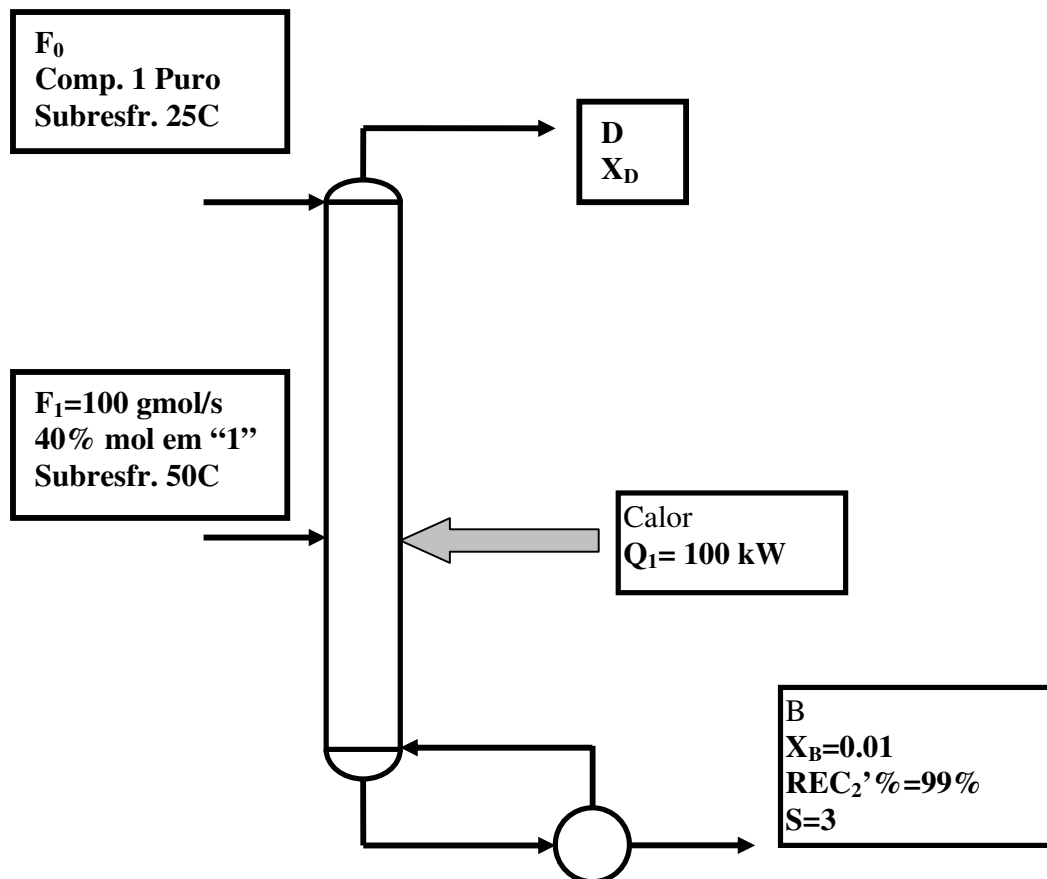


FIG38

#### Questão 04 (2C – 2003/01):

Considere a coluna abaixo para separar a corrente  $F_1$  (60% (mol) de "1", 40% (mol) de "2") em um produto de fundo B (líquido) com 1% (mol) em "1" e em topo D (vapor) com 95% mol de "1" ( $X_D = 0.95$ ). A corrente  $F_1$  tem vazão de 100

Capítulo VI - Método de Ponchon-Savarit para Destilação Binária

gmol/s sendo **vapor e saturada** na pressão da coluna ( $P=1$  bar). Como a coluna não dispõe de condensador, há alimentação líquida de topo ( $F_0$ ) contendo 90% mol de “1” e subresfriada em 80 °C. Na condição normal de operação utiliza-se carga térmica de fundo 80% maior que a mínima possível ( $Q_{REF} = 1.8 \cdot Q_{REF}^{MIN}$ ). A razão de refluxo de fundo é representada como S.

A partir dos dados abaixo e utilizando **exclusivamente** o método **Ponchon-Savarit**, determine:

- (i) A mínima vazão (gmol/s) de carga de topo ( $F_0^{MIN}$ ) necessária;
- (ii) A mínima carga térmica (kW) do refeedor ( $Q_{REF}^{MIN}$ ) necessária;
- (iii) As vazões dos produtos da coluna (D e B) na condição do ítem (i);
- (iv) Admitindo-se condição normal de operação, obter  $Q_{REF}$ ,  $F_0$ , D e B;
- (v) Nas condições do ítem (iv), obter S;
- (vi) Nas condições do ítem (iv), obter o número de estágios necessários e o estágio ótimo para  $F_1$ .

Dados para projeto: (X,Y: Fr.molares de “1” em fase líquida e vapor, respectivamente)

- Entalpia de Vapor e Líquido Saturados :  $\bar{H}_V = 50 - 10.Y$  ,  $\bar{H}_L = 10 + 10.X$  (kJ/gmol)
- Relação ELV :  $Y = \frac{X.F(X)}{1 - X + X.F(X)}$  ,  $F(X) = 2.9 \cdot \exp(0.02 \cdot (1 - 2X))$
- Capacidade Calorífica a Pressão Cte de Fase Líquida Próximo à Saturação:  $C_p^{Liq} = 0.25$  kJ/gmol.K

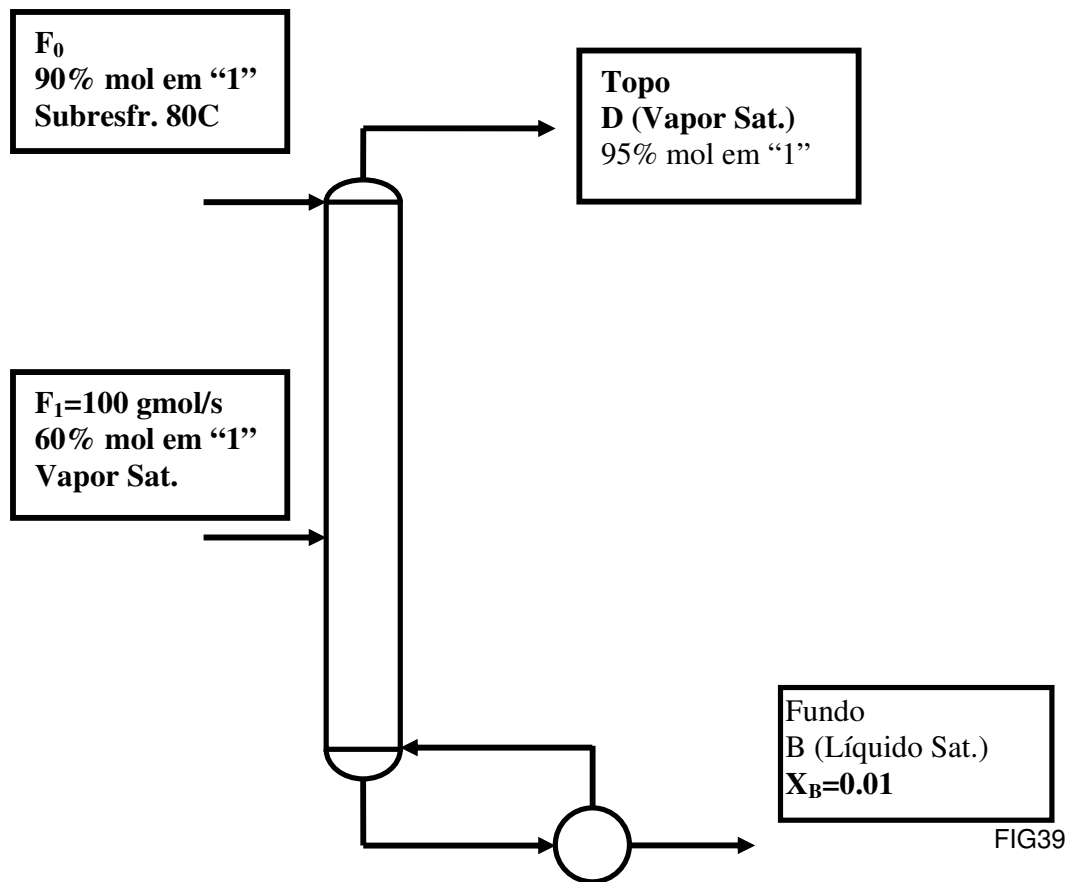


FIG39

**Questão 05 ( 2C - 2003/01):**

Abordar o Problema anterior via Método McCabe-Thiele. Usar Calor de Vaporização Médio de 30 kJ/gmol.

**Questão 06 (EF – 2003/02):**

Considere o processo abaixo, operando a  $P=1 \text{ bar}$ , alimentado com as correntes F1 (100gmol/s, vapor saturado, 70% mol de "1" e 30% mol de "2") e F2 (100gmol/s, líquido saturado, 30% mol de "1" e 70% mol de "2"). O processo utiliza condensador total e refeedor parcial, devendo gerar destilado com 98% mol de "1" ( $X_D=0.98$ ) e fundo com 2% mol de "1" ( $X_B=0.02$ ). Dados termodinâmicos são listados abaixo, onde X,Y representam frações molares de "1" :

- ELV ( $P=1 \text{ bar}$ ) :  $Y^* = \frac{2.3X \exp(0.1-0.1X)}{1-X+2.3X \exp(0.1-0.1X)}$
- Entalpia de Vapor Saturado ( $P=1 \text{ bar}$ ) :  $\bar{H}_V^{Sat} = 50+10Y \text{ (kJ / gmol)}$
- Entalpia de Líquido Saturado ( $P=1 \text{ bar}$ ) :  $\bar{H}_L^{Sat} = 10+20X \text{ (kJ / gmol)}$

Para este processo, responda:

- (i) Com o Método McCabe-Thiele, determinar a razão de refluxo mínima ( $RR^{MIN}$ ) necessária;
- (ii) Determinar o número mínimo de estágios necessários;
- (iii) Determinar cargas térmicas de topo e fundo necessárias à separação descrita no item (i);
- (iv) Com o Método Ponchon-Savarit, e adotando  $RR/RR^{MIN} = 2$ , determinar o número de estágios necessários e os estágios ótimos de cargas;
- (v) Nas condições do item (iv), determinar o comprimento de um leito de recheio, com altura de unidade global de transferência de 1m ( $H_{OG}=1\text{m}$ ), para substituir todos os estágios acima de F1. Admita que o vapor na zona de carga de F1 tem a sua composição.

A figura referente a esse exercício (FIG40) encontra-se na próxima página.

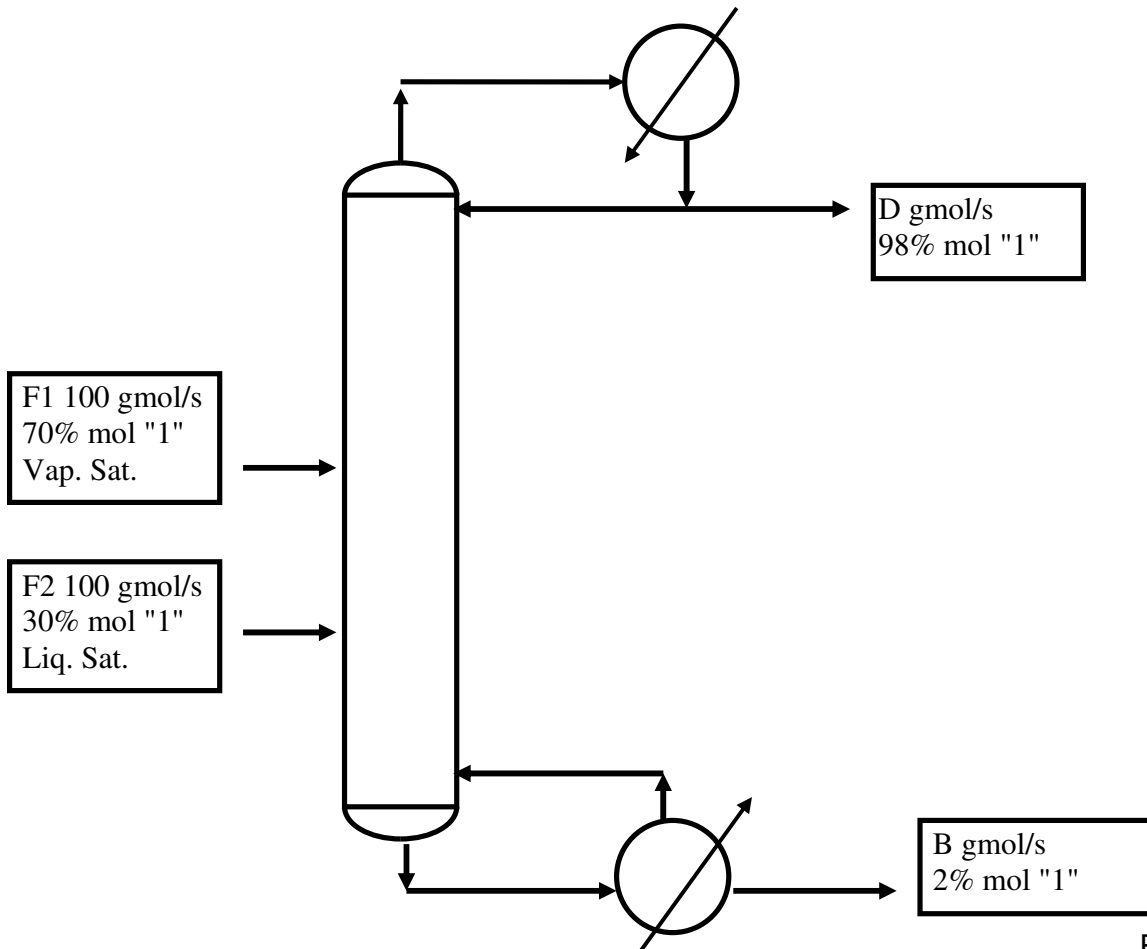


FIG40

**Questão 07 (EF – 2004/01):**

A coluna abaixo (condensador total e refeedor parcial) é alimentada com  $F_1=100\text{gmol/s}$  de **vapor saturado** (60% mol de "1", 40% mol de "2"), e  $F_2=100\text{gmol/s}$  de **líquido saturado** (20% mol de "1", 80% mol de "2") (FIG40). O destilado deverá ter 95% mol de "1" e o produto de fundo 1% mol de "1". A razão de refluxo deve ser o dobro da mínima. A pressão do processo é  $P = 1\text{bar}$ . A volatilidade relativa  $1/2$  é igual a 2.5. Sendo  $X$  e  $Y$  frações molares de "1" nas fases  $L$  e  $V$ , entalpias molares de líquido e vapor saturados ( $P=1\text{bar}$ ) são  $H_L^{\text{SAT}} = 10+10X$ ,  $H_V^{\text{SAT}} = 60-10Y$ , ambas em  $\text{kJ/gmol}$ . A partir disto, responda:

- Obter os produtos da coluna;
- Obter a razão de refluxo mínima,  $RR^{\text{MIN}}$ , do processo;
- Obter o número mínimo de estágios da separação ( $N^{\text{MIN}}$ );
- Obter o número de estágios ( $N$ ) e as posições ótimas de cargas ( $N_1$  e  $N_2$ ) via método McCabe-Thiele;

(v) Obter o número de estágios ( $N$ ) e as posições ótimas de cargas ( $N_1$  e  $N_2$ ) via método Ponchon-Savarit;

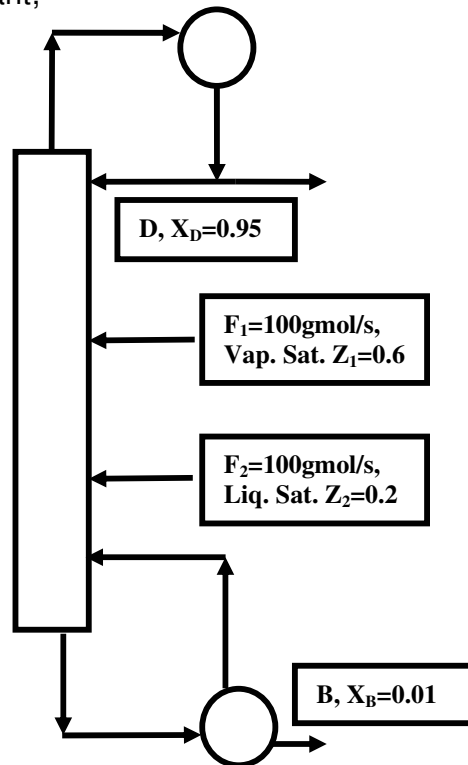


FIG41

**Questão 08 (EF – 2005/02):**

A coluna abaixo (condensador total e reboador parcial) é alimentada com  $F_1=100\text{gmol/s}$  de **líquido saturado** (50% mol de “1”, 50% mol de “2”), e  $F_2=100\text{gmol/s}$  de **vapor saturado** (10% mol de “1”, 90% mol de “2”) (Fig. 2). O destilado deverá ter 95% mol de “1” e o produto de fundo 1% mol de “1”. A razão de refluxo deve ser o **dobro da mínima**. A pressão do processo é  $P = 1\text{bar}$ . A volatilidade relativa 1/2 é igual a 2.15. Sendo  $X$  e  $Y$  frações molares de “1” nas fases L e V, entalpias molares de líquido e vapor saturados ( $P=1\text{bar}$ ) são  $H_L^{SAT} = 10+10X$ ,  $H_V^{SAT} = 70-10Y$ , ambas em kJ/gmol. Responda os itens (i) a (iv) com o método **McCabe-Thiele** e o item (v) com método **Ponchon-Savarit**.

- (i) Obter os produtos da coluna;
- (ii) Obter a razão de refluxo mínima,  $RR^{MIN}$ , do processo;
- (iii) Obter o número mínimo de estágios da separação ( $N^{MIN}$ );
- (iv) Obter o número de estágios ( $N$ ) e as posições ótimas de cargas ( $N_1$  e  $N_2$ );
- (v) Obter o número de estágios ( $N$ ) e as posições ótimas de cargas ( $N_1$  e  $N_2$ ) via método **Ponchon-Savarit**.

A figura referente a esse exercício (FIG42) encontra-se na próxima página.

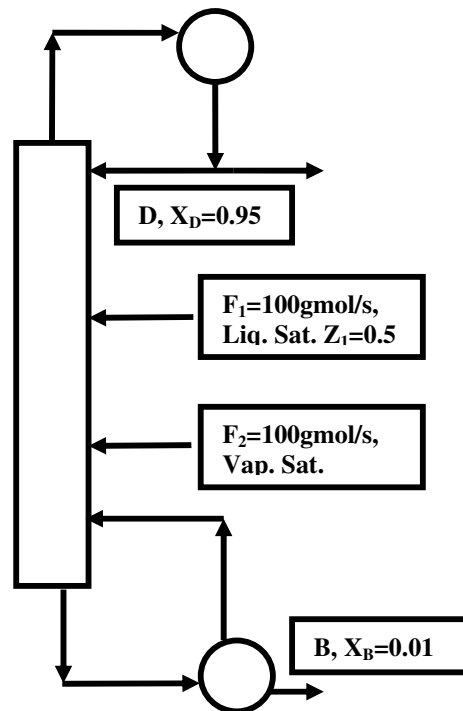


FIG42

**Questão 09 (2C – 2006/02):**

A Figura 1 mostra unidade para retificar a corrente  $F$  (40% mol “1”, 60% mol “2”) em produto de topo  $D$  com 95% mol “1” ( $X_D=0.95$ ) e rejeito  $B$  com fração molar  $X_B$  em “1”. A alimentação é vapor saturado na pressão da coluna ( $P=1\text{ bar}$ ). Como não há condensador, o topo é alimentado com líquido “1” puro sub-resfriado  $60^\circ\text{C}$  em vazão  $W$  gmol/s. Com base nos dados e aplicando o método **Ponchon-Savarit**, determine:

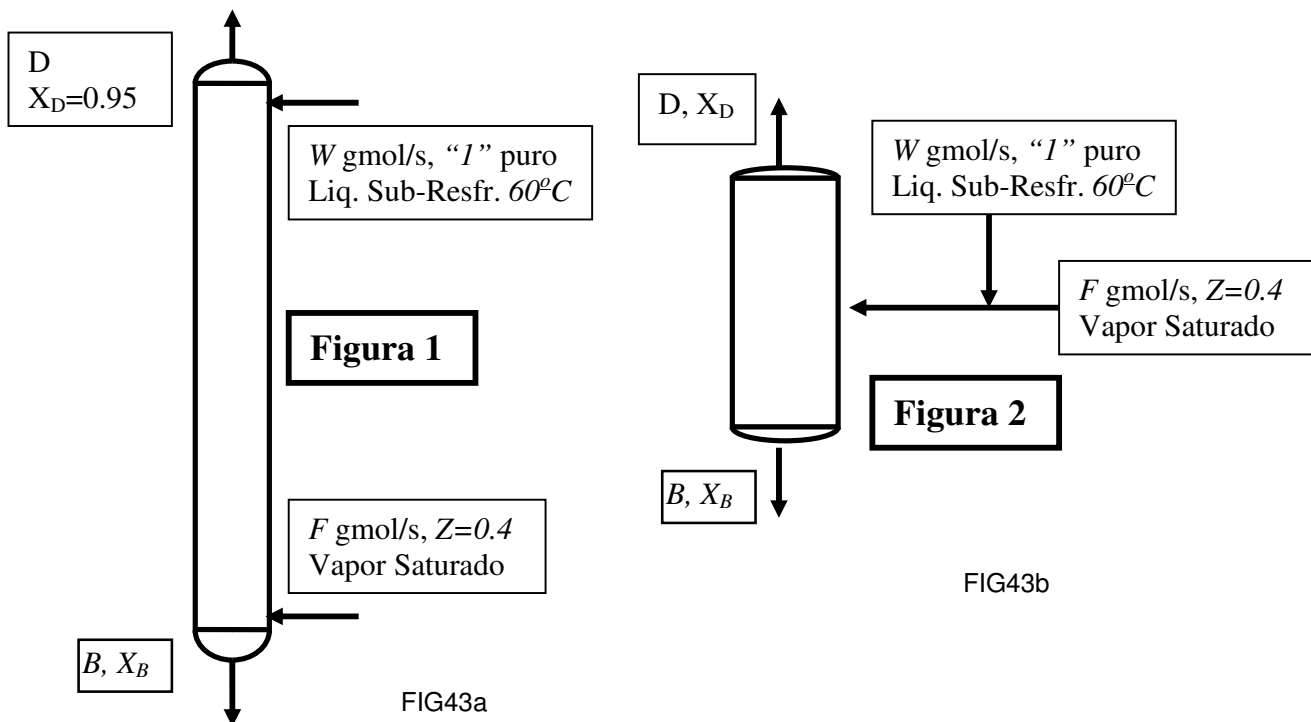
- (i) O mínimo consumo de líquido de topo por unidade de  $F$  ( $\frac{W^{MIN}}{F}$ ) que a separação permite;
- (ii) As vazões  $\frac{D}{F}$ ,  $\frac{B}{F}$  e a composição  $X_B$  na condição do item (i)
- (iii) As vazões  $\frac{D}{F}$ ,  $\frac{B}{F}$  e a composição  $X_B$  na condição  $\frac{W}{F} = 1.5 * \frac{W^{MIN}}{F}$
- (iv) O número de estágios de equilíbrio necessários à separação na condição de (iii);



- (v) Valores  $\frac{D}{F}$ ,  $\frac{B}{F}$ ,  $X_D$ ,  $X_B$  sendo  $W$  e  $F$  misturadas em **vaso de equilíbrio** (Figura 2) com  $\frac{W}{F} = 1.5 * \frac{W^{MIN}}{F}$

**Informações para Resolução: (X,Y: Fr.molares de "1" em fases líquida e vapor, respectivamente)**

- Entalpias de Vapor e de Líquido Saturados ( $P=1 \text{ bar}$ ):  $\bar{H}_V = 50 - 10.Y$ ,  $\bar{H}_L = 10 + 5.X$  (kJ/gmol)
- Relação ELV ( $P=1 \text{ bar}$ ):  $Y^* = \frac{2X}{1+X}$
- Capacidade Calorífica a Pressão Cte de Líquido Saturado :  $C_p^{Liq} = 0.2$  (kJ/gmol.K)



**Questão 10 (2P – 2007/02):**

Projetar com o Método Ponchon-Savarit, a coluna de pratos abaixo operando a  $P=1\text{bar}$  com vapor saturado  $F$  (50%mol "1" + 50%mol "2") para gerar destilado (D) com 95%mol "1" ( $X_D=0.95$ ). Determine:

- A máxima produção de topo ( $D^{MAX}/F$ );
- Os valores de  $B/F$  e  $X_B$  em (i);

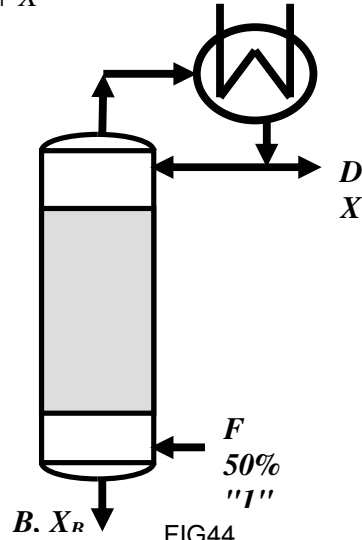
## Capítulo VI - Método de Ponchon-Savarit para Destilação Binária

(iii) Os valores de  $B/F$ ,  $X_B$  para  $D/F=0.75 \cdot D^{MAX}/F$ ;

(iv) O número de estágios necessários em (iii).

Dados termodinâmicos ( $X, Y$  fr. molar de "1" nas fases Líq. e Vapor):

- Entalpias a  $P=1\text{bar}$  (kJ/gmol):  $\bar{H}_L^{SAT} = 5 + 5X$ ,  $\bar{H}_V^{SAT} = 50 - 5Y$
- ELV a  $P=1\text{bar}$ :  $Y^* = \frac{2X}{1+X}$



### Capítulo VII – Projeto para Destilação de Multicomponentes Fenske-Underwood-Gilliland

#### **Questão 01 (P2 – 1998/02):**

Dispõe-se de uma coluna de 20 pratos teóricos, condensador **total** e refeedor **parcial** com vazão de vapor gerado **limitada** a 500 gmol/s. Pretende-se utilizar esta operação para processar corrente F líquida e saturada contendo substâncias “1” (10% mol), “2” (30% mol), “3” (20% mol) e “4” (40% mol) de modo a gerar produto de fundo com contaminação de “2” limitada a 1% da carga deste componente. As volatilidades relativas das substâncias “1”, “2”, “3”, “4” são, respectivamente, 4,2,1,0,3, podendo ser admitidas constantes. Com base nisto, responda:

- (i) Determine a máxima recuperação % de “3” que pode ser obtida no fundo.
- (ii) Projetando-se a operação com recuperação % de “3” no fundo igual a 90% da máxima possível, determine o número mínimo de estágios e a razão de refluxo mínima associados.
- (iii) Nas condições de (ii), determine a razão de refluxo de projeto e a máxima vazão de carga que poderá ser processada.

#### **Questão 02 (P2 – 1999/02):**

Projetar a operação expressa nos dados seguintes:

Substância	Carga (% mol)	Volatilidade Relativa	Recuperação % Topo
1	20	2.5	99.5%
2	10	2.0	
3	30	1.5	
4	40	1.0	0.25%

Carga Líquida e Saturada na Pressão P da Coluna.

Razão de Refluxo: 20% acima da Mínima.

Calor Latente de Vaporização da Mistura:  $\lambda=25000$  J/gmol

Carga Térmica Máxima do Refervedor:  $10^4$  kW

Com base nisto, determine:

- (i) Número Mínimo de Estágios;
- (ii) Separação dos Demais Componentes;
- (iii) Razão de Refluxo Mínima e a Correspondente Separação dos Demais Componentes;
- (iv) Número de Estágios Necessários;
- (v) Máxima Vazão de Carga que poderá ser Processada

**Questão 03 (EF – 2000/01):**

Dispõe-se de corrente líquida e saturada em  $P=20$  bar contendo (mol) 20% de etano (C2), 40% de propeno (C3=), 40% de propano (C3) e 20% de butanos (C4), sendo as volatilidades relativas constantes e iguais, respectivamente, a 4.0, 1.2, 1.0 e 0.3. Pretende-se cortar esta corrente entre C3= e C3, de modo a gerar um topo rico em C3= para utilização petroquímica e um fundo com valor de combustível apenas. Seja  $b$  a razão (molar) C3/C3= que expressa a contaminação de C3= no produto de fundo. Admita disponível uma coluna de  $N$  estágios teóricos ao todo, que aceita, no máximo, 200 gmol/s de vapor no seu interior. Dentro do contexto aproximado da metodologia Fenske-Underwood-Gilliland, Determine:

- (i) A máxima recuperação de topo de C3= em termos de  $(N,b)$ , calculando-a em  $b=50$  e  $N=50$ ;
- (ii) As recuperações de topo e fundo de todos os compostos e as vazões dos produtos gerados, admitindo operação a 90% da máxima recuperação de C3= obtida acima;
- (iii) Nas condições de (ii), o número mínimo de estágios para esta separação;
- (iv) Nas condições de (ii), a razão de refluxo mínima para esta separação;
- (v) A razão de refluxo da operação e a máxima vazão de carga admissível nesta coluna.

**Questão 04 (P2 – 2000/02):**

Dispõe-se de uma coluna de 20 estágios teóricos ao todo. Pretende-se utilizar esta operação para processar corrente  $F$  vapor e saturada contendo substâncias "1" (30% mol), "2" (20% mol), "3" (20% mol) e "4" (30% mol) de modo a gerar produtos de topo e de fundo com iguais contaminações, em termos de número de moles, respectivamente, de "4" e de "1". As volatilidades relativas das substâncias "1", "2", "3", "4" são, respectivamente, 1.7, 1.5, 1.0, 0.9, podendo ser admitidas constantes. Com base nisto, responda:

- (i) Determine o **mínimo** valor desta contaminação mútua que pode ser obtida (responda em termos percentuais com respeito à carga de cada composto).
- (ii) Projetando-se a operação com contaminações 20% superiores às mínimas, determine a composição e vazão de todos os produtos.
- (iii) Nas condições de separação de componentes chaves de (ii), determine a razão de refluxo mínima associada e a composição e vazão de todos os produtos, **sob refluxo mínimo**.

Compare os resultados de (ii) e (iii) com respeito à separação de não-chaves.

**Questão 05 (EF – 2001/01):**

Dispõe-se de uma corrente  $F$ , **vapor e saturada**, contendo as substâncias S1, S2, S3 e S4 com teores respectivamente 10%, 30%, 20% e 40% em mol. As volatilidades relativas destas substâncias são respectivamente 5.0, 2.0, 1.0 e 0.5. Dispõe-se de uma coluna com 20 estágios teóricos ao todo, com refeedor com capacidade máxima de processo de 100 gmol/s. Deseja-se produzir um corte S2/S3 de  $F$  com esta coluna tal que a recuperação (gmol/s) de S3 no topo seja igual à recuperação (gmol/s) de S2 no fundo, admitindo-se razão de refluxo 30% superior à mínima.

Determine:

- (i) A mínima contaminação (gmol/s) de S2 no produto de fundo que pode ser obtida com esta coluna.
- (ii) A razão de refluxo para gerar contaminação de S2 no fundo 20% superior à mínima obtida no item (i).
- (iii) A máxima vazão de corrente  $F$  que poderá ser processada com esta coluna nas condições do item (ii).

**Questão 06 (P2 – 2002/01):**

Considere a corrente  $F$ , descrita na Tabela seguinte, que deverá ser separada em um produto de topo e outro de fundo (Figura). No topo deverá haver recuperação de 95% de “2”, enquanto no fundo recupera-se 95% de “4”. A corrente  $F$  está 20% (mol) vaporizada na pressão do processo ( $P=2$  bar). Admita que o calor de vaporização neste problema pode ser tomado como constante e dado por  $\lambda=25000$  J/gmol.

Componente	% Mol em F ( $Z$ )	Volatilidade Relativa ( $\alpha$ )
1	10	4
2	20	2
3	20	1.5
4	20	1
5	30	0.3

Considerações do projeto desta coluna indicam que há disponibilidade de exatamente 10000 kW de carga térmica no **refeedor** a ser usado. De modo que **todas** as situações propostas nesta questão deverão adotar esta restrição. Com base nisto determine:

- (i) A máxima vazão de  $F$  que poderá ser processada sob esta carga térmica;
- (ii) A razão de refluxo na condição de (i);
- (iii) Vazões e composições dos produtos na condição de (i);
- (iv) Definindo ponto operacional com  $F=0.7 \cdot F^{MAX}$ , obter novos valores da razão de refluxo, além das vazões e composições de produtos;

## Capítulo VIII -Projeto para Destilação Multicomponente - Método de Fenske-Underwood-Gilliland

(v) Determinar o número de estágios necessários ao projeto dado em (iv), e a correspondente posição ótima da carga.

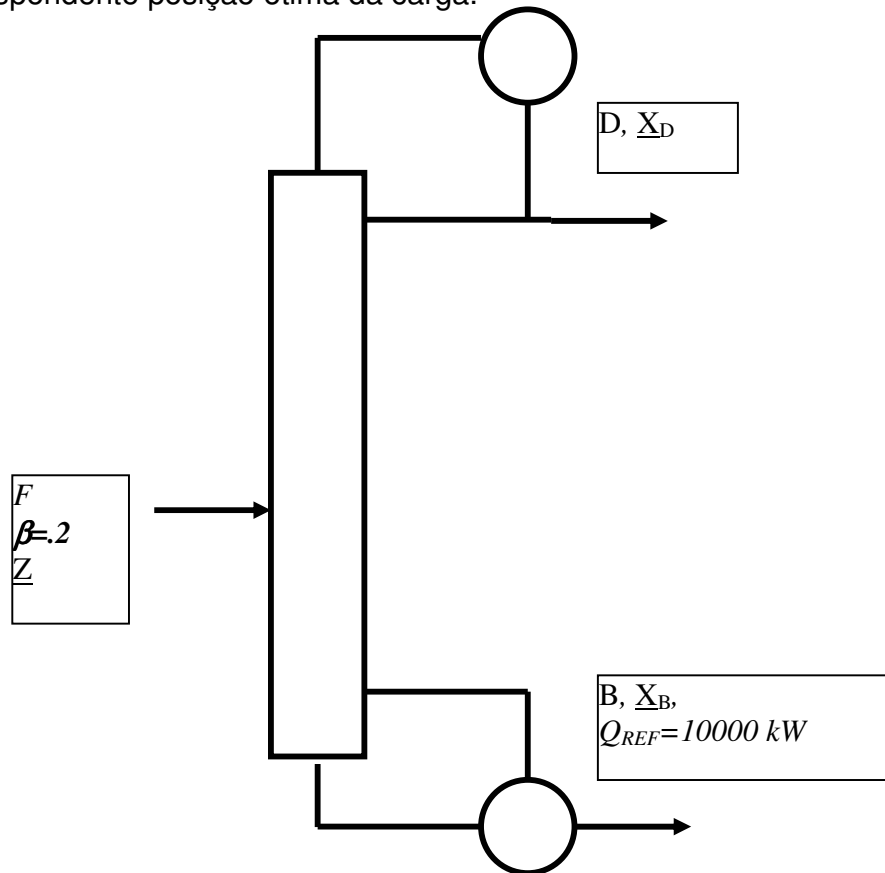


FIG45

**Questão 07 (EF – 2002/01):**

Dispõe-se de corrente líquida e saturada em  $P=20$  bar contendo (mol) 20% de etano ( $C_2$ ), 30% de propeno ( $C_3=$ ), 30% de propano ( $C_3$ ) e 20% de butanos ( $C_4$ ), sendo as volatilidades relativas constantes e iguais, respectivamente, a 4.0, 1.15, 1.0 e 0.3. Pretende-se cortar esta corrente de modo a gerar topo rico em  $C_3=$  para utilização petroquímica e um fundo com valor de combustível apenas. Seja  $b$  a razão (molar)  $C_3=/C_3$  que expressa a contaminação de  $C_3$  no topo. Admita disponível uma coluna de  $N$  estágios teóricos ao todo, que aceita, no máximo, 100 gmol/s de vapor no seu interior. Determine:

- A máxima recuperação de topo de  $C_3=$  em termos de  $(N,b)$ , calculando-a em  $b=20$ ,  $N=40$ ;
- As recuperações de topo e fundo de todos os compostos e as vazões dos produtos gerados, admitindo operação a 80% da máxima recuperação de  $C_3=$  obtida acima;
- Nas condições de (ii), o número mínimo de estágios para esta separação;
- Nas condições de (ii), a razão de refluxo mínima para esta separação;
- A razão de refluxo da operação e a máxima vazão de carga admissível nesta coluna.

**Questão 08 (P2 – 2002/02):**

Considere o projeto da operação expressa nos dados seguintes:

Substância	Carga (% mol)	Volatilidade Relativa	Recuperação % Topo
1	30	2.9	99.5%
2	10	2.1	
3	20	2.0	
4	40	1.0	0.5%

Carga 100% vaporizada na Pressão P da Coluna.

Razão de Refluxo: 30% acima da Mínima.

Calor Latente de Vaporização da Mistura:  $\lambda=30000$  J/gmol

Carga Térmica Máxima do Refervedor:  $10^4$  kW

Com base nisto, determine:

- (i) Composições de Fases Líquida e Vapor da Carga;
- (ii) Número Mínimo de Estágios;
- (iii) Separação de Projeto dos Demais Componentes;
- (iv) Razão de Refluxo Mínima e a Separação de Componentes sob Refluxo Mínimo;
- (v) Número de Estágios Necessários para o Projeto;
- (vi) Máxima Vazão de Carga que poderá ser Processada

**Questão 09 (EF – 2003/01):**

Considere a separação da corrente abaixo (F gmol/s), líquida e saturada em  $P=15$  bar. A separação deverá permitir, no máximo, 0.1% da alimentação de  $C_4H_{10}$  no topo, e, no máximo, 0.1% da alimentação de  $C_3H_6$  no fundo. Operando-se com razão de refluxo 30% superior à mínima e com **Condensador Parcial** de carga térmica limitada a 1800 kW, determinar a máxima vazão de carga que poderá ser processada. Dados Fornecidos:

- Calor de Vaporização Médio na Separação :  $\lambda=32$  kJ/gmol
- Alimentação e Volatilidades Relativas :

Componente	Fração Molar em F	Volatilidade Relativa
$C_3H_6$	0.1	2.3
$C_3H_8$	0.1	2.0
i $C_4H_{10}$	0.2	1.0
$C_4H_{10}$	0.6	0.6

**Questão 10 (EF – 2003/01):**

Considere o problema anterior sendo resolvido pelo Método McCabe-Thiele para Destilação Binária. Os dois componentes corresponderão aos chaves do Problema 1 com as respectivas volatilidades relativas. Note que estes componentes deverão ter seus teores na carga acrescidos dos teores dos não-chaves vizinhos.

**Questão 11 (P2 – 2003/02):**

A Tabela descreve separação da corrente **F líquida e saturada** para geração de topo rico em C3H6. A razão de refluxo utilizada deverá estar 30% acima da mínima ( $RR/RR^{MIN}=1.3$ ) e a disponibilidade de carga térmica no condensador é de 80kJ por gmol de carga ( $Q_{Cond}/F=80$  kJ/gmol). A partir disto, responda:

	Fração Molar em F	Topo	Volatilidade Rel.	Pressão	Calor Vaporização
C2H6	10%	$\frac{REC_{C3H6}}{REC_{C3H8}} \geq 100$	3	<b>P=20 bar</b>	$\lambda = 25kJ/gmol$
C3H6	30%		1.3		
C3H8	40%		1		
C4H10	20%		0.4		

- (i) Obter expressão para a Razão de Refluxo Mínima em função da recuperação de topo de C3H6;
- (ii) Dada a limitação térmica acima, obter a máxima recuperação de topo de C3H6 ( $REC_{C3H6}^{Max}$ ) possível;
- (iii) Usando-se  $REC_{C3H6} = 99\%$  de  $REC_{C3H6}^{Max}$ , obter o Número Mínimo de Estágios e os produtos gerados;
- (iv) Estimar o número de estágios necessários à separação.

**Questão 12 (P2 – 2004/01):**

Utiliza-se coluna com 15 pratos perfeitos, **refervedor** e **condensador parciais** para separar corrente F (100 gmol/s) **vapor e saturada** com substâncias “1” (10% mol), “2” (20% mol), “3” (40% mol) e “4” (30% mol), de modo a gerar produto de fundo com razão “2”/”3” inferior a 1/40 em moles. As volatilidades relativas de “1”, “2”, ”3”, ”4” são, respectivamente, 3,3,1,8,1,0,4. O calor de vaporização da mistura é de 30 kJ/gmol. Com base nisto, responda:

- (i) Determine o **máxima** recuperação % de “3” que pode ser obtida no fundo;
- (ii) Projetando-se com recuperação de fundo de “3” **20% inferior à máxima**, determine todos os produtos;
- (iii) Determine, nas condições de (ii), cargas térmicas de fervedor e condensador **sob refluxo mínimo**;



(iv) Determine se uma razão de refluxo 100% superior à mínima poderá cumprir o serviço;

**Questão 13 (P2 – 2004/02):**

Dispõe-se de coluna de 20 estágios teóricos ao todo. Pretende-se utilizar esta operação para processar corrente F **vapor e saturada** contendo substâncias “1” (30% mol), “2” (20% mol), “3” (20% mol) e “4” (30% mol) de modo a gerar produtos de topo e de fundo com iguais contaminações, em termos de número de moles, respectivamente, de “4” e de “1”. As volatilidades relativas das substâncias “1”, “2”, “3”, “4” são, respectivamente, 1.3, 1.1, 0.9, 0.8, podendo ser admitidas constantes. Com base nisto, responda:

- (i) Calcule o **mínimo** valor desta contaminação mútua que pode ser obtido.
- (ii) Projetando-se a operação com contaminações 20% superiores às mínimas, determine composição e vazão de produtos.
- (iii) Nas condições de separação de (ii), determine a razão de refluxo mínima correspondente;
- (iv) Obter a composição e vazão de todos os produtos **sob refluxo mínimo**. Compare resultados (ii) e (iv).

**Questão 14 (P2 – 2005/01):**

A Tabela descreve separação da corrente **F líquida e saturada**.

Composto	Fr. Molar em F	Topo	Volatilidade Relativa	Pressão	Fundo
C2H6	10%	$\frac{REC_{C3H6}}{REC_{C3H8}} \geq 100$	3.3	<b>P=30 bar</b>	$\frac{REC'_{C3H8}}{REC'_{C3H6}} \geq 200$
C3H6	40%		1.23		
C3H8	30%		1		
C4H10	20%		0.43		

A partir disto, obtenha:

- (i) A vazão e composição dos produtos da coluna;
- (ii) O número mínimo de estágios necessários;
- (iii) A razão de refluxo mínimo desta separação;
- (iv) A vazão e composição dos produtos sob refluxo mínimo;

**Questão 15 (EF – 2005/01):**

Há uma corrente F, **vapor e saturada**, com substâncias S1, S2, S3 e S4 com teores respectivamente 20%, 20%, 30% e 30% em mol. As volatilidades relativas destas substâncias são respectivamente 3.1, 1.7, 1.0 e 0.5. Dispõe-se de uma coluna com 15 estágios teóricos ao todo. Deseja-se produzir um corte S2/S3

Capítulo VIII -Projeto para Destilação Multicomponente - Método de Fenske-Underwood-Gilliland nesta coluna onde a recuperação (gmol/s) de S3 no topo igual à recuperação (gmol/s) de S2 no fundo. Determine:

- (i) A mínima contaminação (gmol/s) de S2 no produto de fundo que pode ser obtida;
- (ii) A razão de refluxo mínima para gerar contaminação de S2 no fundo 30% superior à mínima obtida;

**Questão 16 (P2 – 2005/02):**

A Tabela descreve separação da corrente **F líquida e saturada** na pressão de  $P=1$  bar.

Comp.	Fr. Mol em F	Topo	Volatilidade Relativa	Entalpia de Vaporização	Razão de Refluxo	Fundo
1	30%	$REC_4 \% = 1\%$	1.9	$\lambda=40 \text{ kJ/gmol}$	$RR=1.3*RR_{MIN}$	$REC'_1 \% = 1\%$
2	20%		1.5			
3	20%		1.3			
4	30%		1.0			

A partir disto, obtenha:

- (i) A vazão e composição dos produtos da coluna;
- (ii) A vazão e composição dos produtos sob refluxo mínimo;
- (iii) A vazão de carga (F) que poderia ser processada sob disponibilidade de 10000 kW de aquecimento.

**Questão 17 (P2 – 2006/01):**

A Tabela descreve separação da corrente **F 50% vaporizada** na pressão do processo.

Composto	Fr. Mol em F	Topo	Volatilidade Rel.	Pressão	Fundo
C2H6	10%	$\frac{REC_{C3H8}}{REC_{C4H10}} \geq 100$	3.8	<b>P=3 bar</b>	$\frac{REC'_{C4H10}}{REC'_{C3H8}} \geq 100$
C3H8	20%		2.2		
iC4H10	40%		1.3		
C4H10	20%		1		
C5H12	10%		0.5		

A entalpia de vaporização média é  $\lambda = 30 \text{ kJ} / \text{gmol}$ . A partir disto:

- (i) Estimar a vazão e composição dos produtos da coluna em condição normal de processo;
- (ii) Estimar o número mínimo de estágios necessários;
- (iii) Estimar a mínima carga térmica de refeedor por gmol de carga processada

que é possível obter ( $\frac{Q_{Ref}^{Min}}{F}$ );

(iv) Estimar a vazão e composição dos produtos nas condições de (iii).

**Questão 18 (P2 – 2006/02):**

Na Tabela separação da carga **F 50% vaporizada** ( $\beta = 0.5$ ) na pressão da coluna. As composições (fr. mol.) de **F** e das suas **fases líquida e vapor** são representadas, respectivamente, por  $Z_k, X_k^F, Y_k^F$  ( $k = 1..4$ ).

Composto	$Z_k$ ( $k=1..4$ )	Topo	Volatilidade Rel. ( $\alpha_k$ )	Pressão	Razão Reflux.	Fundo
1	30%	$\frac{REC_1}{REC_4} \geq 100$	2	<b>P=5 bar</b>	$\frac{RR}{RR^{MIN}} = 1.3$	$\frac{REC'_4}{REC'_1} \geq 100$
2	20%		1.5			
3	20%		1.2			
4	30%		1			

A entalpia de vaporização é  $\lambda = 30kJ / gmol$ . A partir disto:

(i) Estimar a vazão e composição dos produtos da coluna **na condição normal de processo**;

(ii) Estimar o número mínimo de estágios necessários;

(iii) Mostre que é possível escrever  $Y_k^F = \alpha_k \cdot X_k^F \cdot \theta$  para  $k = 1..4$ , onde

$$\theta = \frac{1}{\sum_{k=1}^4 \alpha_k \cdot X_k^F};$$

(iv) Com (iii) e com os balanços do Flash, mostre que  $X_k^F = \frac{Z_k}{1 - \beta + \alpha_k \cdot \beta \cdot \theta}$  para

$k = 1..4$ ;

(v) Com (iii),(iv), mostre que  $X_k^F, Y_k^F$  são obtidas após resolver

$$\sum_{k=1}^4 \frac{Z_k}{1 - \beta + \alpha_k \cdot \beta \cdot \theta} - 1 = 0 \text{ para } 0 < \theta < 1;$$

(vi) Obter a **mínima** carga térmica de refeedor por mol de carga ( $\frac{Q_{REF}^{MIN}}{F}$ )

que é possível no processo;

(vii) Obter a vazão e composição dos produtos da coluna nas condições de (vi).

**Questão 19 (P2 – 2007/01):**

A Tabela descreve separação da corrente **F líquida e saturada** na pressão de  $P=1$  bar. A separação deve ser projetada de modo que  $D=B$ , isto é, as **vazões de produtos de topo e fundo devem ser iguais**.

## Capítulo VIII - Projeto para Destilação Multicomponente - Método de Fenske-Underwood-Gilliland

Comp.	Fr. Mol em F	Topo	Volatilidade Relativa	Entalpia de Vaporização
1	15%	$REC_2\% = 99\%$	2.4	$\lambda = 40 \text{ kJ/gmol}$
2	30%		1.4	
3	30%		1.0	
4	25%		0.5	

A partir disto, obtenha:

- (i) A vazão e composição dos produtos da coluna;
- (ii) O número mínimo de estágios da separação;
- (iii) O número de estágios ao operar com carga térmica do refeedor em

$$\dot{Q}_{REF} / F = 1.2 * \dot{Q}_{REF}^{MIN} / F$$

**Questão 20 (EF – 2007/01):**

Na Tabela separação por destilação da corrente **F 100% vapor** na pressão do processo. A partir disto:

Composto	Frações mol. em F	Recuperações Topo	Volatilidades Relativas	Pressão	Recuperações Fundo
1	30%	$\frac{REC_1}{REC_4} \geq 80$	1.9	<b>P=5bar</b>	$\frac{REC'_4}{REC'_1} \geq 100$
2	20%		1.4		
3	20%		1.2		
4	30%		1.0		

- (i) Obter as composições e vazões dos produtos da separação;
- (ii) Obter o número mínimo de estágios da separação ( $N^{MIN}$ );
- (iii) Estimar o mínimo valor da razão de refluxo de fundo ( $S^{MIN}$ ) da separação;
- (iv) Estimar as composições e vazões dos produtos na condição do item (iii).

**Questão 22 (P2 – 2007/02):**

Na Tabela separação da carga **F** líquido saturado na pressão da coluna com frações molares  $Z_k$  ( $k=1..4$ ).

Composto	$Z_k$ ( $k=1..4$ )	Topo	Volatilidade Rel. ( $\alpha_k$ )	Fundo
1	25%	$\frac{REC_1}{REC_4} \geq 100$	1.9	$\frac{REC'_4}{REC'_1} \geq 100$
2	25%		1.6	
3	25%		1.3	
4	25%		1	

Capítulo VIII -Projeto para Destilação Multicomponente - Método de Fenske-Underwood-Gilliland

A entalpia de vaporização na pressão da coluna é  $\lambda = 30 \text{ kJ / gmol}$ . A partir disto:

- (i) Estimar a vazão e composição dos produtos da coluna **na condição normal de processo**;
- (ii) Estimar o número mínimo de estágios necessários;
- (iii) Estimar a máxima taxa de alimentação possível ( $F^{MAX}$ ) para carga térmica do refeedor de 4500 kW como fator limitante;
- (iv) Estimar a vazão e composição dos produtos da coluna em (iii);

**Questão 22 (EF – 2007/02):**

Há uma corrente F, **vapor e saturada**, com substâncias S1, S2, S3 e S4 com teores respectivamente 20%, 20%, 30% e 30% em mol. As volatilidades relativas destas substâncias são respectivamente 3.1, 1.7, 1.0 e 0.5. Dispõe-se de uma coluna com 16 estágios teóricos ao todo. Deseja-se produzir um corte S2/S3 nesta coluna onde a recuperação (gmol/s) de S3 no topo igual à recuperação (gmol/s) de S2 no fundo. Determine:

- (i) A mínima contaminação (gmol/s) de S2 no produto de fundo que pode ser obtida;
- (ii) Trabalhando com contaminação de S2 no fundo 100% superior à mínima, obter os produtos da separação;
- (iii) O número mínimo de estágios necessários à separação do item (ii);
- (iv) A razão de refluxo necessária para efetuar a separação do item (ii) na coluna acima.

Capítulo VIII – Colunas de Recheio**Questão 01 (P2 – 1998/01):**

Dispõe-se de uma corrente vapor (VE) contendo as substâncias “A” (40% mol) e “B” (60% mol) na vazão de 1300 gmol/s. Dispõe-se de uma corrente líquida (LE) contendo “A” (5% mol) e “C” (95% mol) na vazão de 500 gmol/s. Pretende-se contactar LE e VE em dois processos distintos de modo a transferir “A” da fase vapor para a líquida, sendo geradas as correntes produto LS e VS, respectivamente líquida (contendo “A” e “C”) e vapor (contendo “A” e “B”). Admita que as substâncias “B” e “C” são inertes e não mudam de fase. A relação de equilíbrio entre as fases é

$X^* = (1/3)Y(5+Y)/(1+Y)$  (onde Y e X são frações molares de “A”, respectivamente nas fases V e L).

Chamando XE e YE as frações molares de “A” respectivamente nas correntes LE e VE, e XS e YS as frações molares de “A” respectivamente nas correntes LS e VS, determine:

- (i) Os valores de LS, VS, XS, YS se as correntes de entrada são contactadas em um tambor de equilíbrio (“flash”) conforme FIG46a abaixo.
- (ii) Os valores de LS, VS, XS, YS se as correntes de entrada são contactadas em contracorrente em coluna de recheio de modo a absorver-se o **máximo possível** de “A” conforme FIG46b abaixo. Qual será o comprimento deste leito de recheio?
- (iii) Os valores de LS, VS, XS, YS se as correntes de entrada são contactadas em contracorrente em coluna de recheio de modo a absorver-se 95% do **máximo possível** de “A” (obtido no item (ii)) conforme FIG46b abaixo.
- (iv) O comprimento do leito de recheio necessário para a operação do item (iii) admitindo-se conhecidas as seguintes alturas de unidades de transferência: HL = 0.9 m, HG = 1.2 m.

As figuras referentes a esse exercício (FIG46a e FIG46b) encontram-se na próxima página.

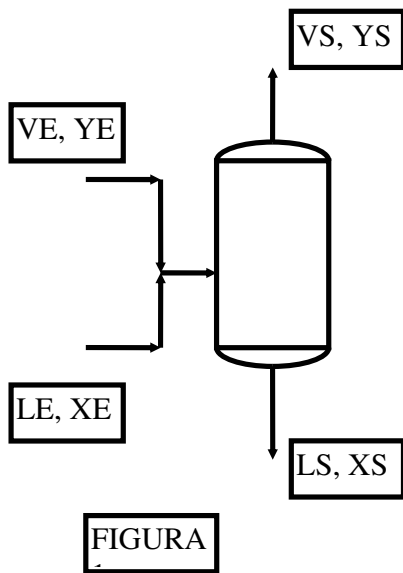


FIG46a

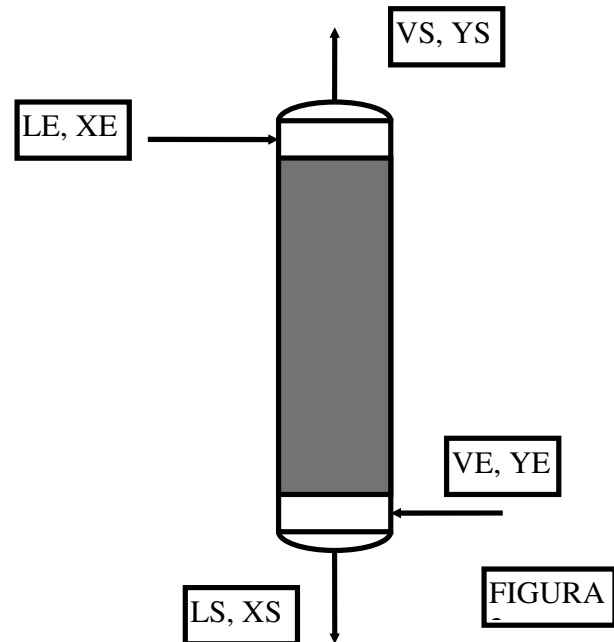


FIG46b

**Questão 02 (EF – 1998/01):**

A coluna com recheio RASCHIG 1" abaixo será empregada na retificação de 100 gmol/s de vapor saturado com 70% mol de "1" e 30% mol de "2" na pressão  $P$  do processo, de modo a gerar destilado vapor com 95% mol de "1". A volatilidade relativa  $1/2$  é constante e igual a 2.0. O recheio opera com alturas de unidades de transferência constantes e dadas por  $H_G = H_L = 1\text{m}$ . Outros dados relevantes são : (a) Densidades  $\rho^{\text{LIQ}}=1\text{g/cm}^3$ ,  $\rho^{\text{VAP}}= 0.01\text{g/cm}^3$ ; (b) Viscosidade em fase líquida  $\mu^{\text{LIQ}}=1\text{ cP}$ ; (c) Massas Moleculares  $MM_1=30$ ,  $MM_2=40$ . A partir destes dados e das **observações sobre cálculos** abaixo, determine:

(i) Máxima vazão de produto retificado,  $D^{\text{MAX}}$ , que poderá ser gerado; a correspondente máxima recuperação de "1",  $\text{REC1}^{\text{MAX}}$ , a razão de refluxo nesta situação,  $\text{RR}^*$ , e a vazão e composição do rejeito do retificador, também nesta situação.

(ii) Mínimo comprimento necessário de recheio,  $Z_c^{\text{MIN}}$ .

(iii) Nas condições de (ii), as vazões e composições dos produtos, a razão de refluxo,  $\text{RR}^{**}$ , e  $\text{REC1}\%$ .

(iv) Operando com  $D=0.9 \cdot D^{\text{MAX}}$  e a 60% da condição de inundação deste recheio, obter  $\text{REC1}\%$ , a razão de refluxo,  $\text{RR}$ , as vazões e composições dos produtos.

(v) Nas condições de (iv), obter o comprimento de recheio,  $Z_c$ , e o diâmetro da coluna,  $D_c$ .

**OBSERVAÇÃO:** Basear cálculos de alturas de unidades globais de transferência e de diâmetro na **extremidade inferior** da coluna.

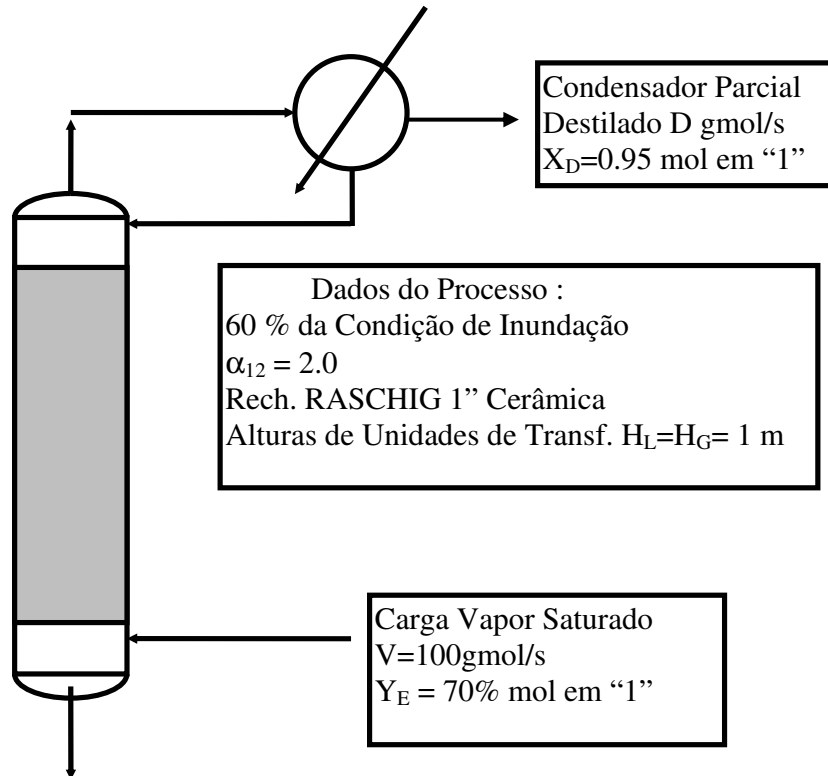


FIG47

**Questão 03 (EF – 1998/01):**

Repetir a resolução do problema anterior para uma **coluna de pratos** substituindo o conceito de **comprimento de recheio** por **número de pratos perfeitos**, e dispensando o cálculo do diâmetro da coluna. Pontuação : análoga à anterior.

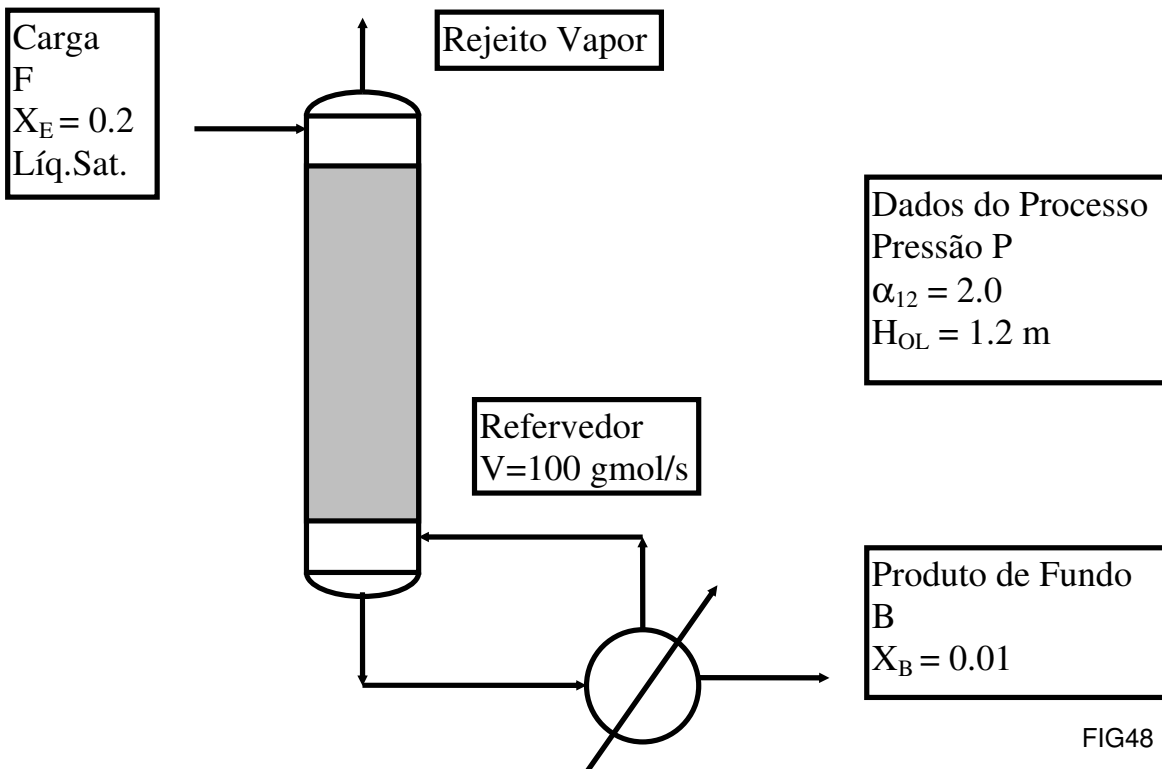
**Questão 04 (P2 – 1998/02):**

Pretende-se projetar operação de recheio para esgotamento (figura) de corrente F líquida e saturada (pressão P) com 20% (mol) de "1" e 80% (mol) de "2" de modo a obter-se produto B com 1% (mol) de "1" e 99% (mol) de "2". Nas condições do processo a volatilidade relativa entre "1" e "2" é igual a 2.0. O refeedor da operação é **limitante** no projeto de modo que a vazão de vapor de esgotamento **está fixada** em  $V = 100$  gmol/s. O recheio utilizado opera com altura



de unidade global de transferência conhecida:  $H_{OL} = 1.2$  m. Tendo em vista estes fatos, responda:

- (i) Determine a máxima vazão de carga ( $F_{MAX}$ , em gmol/s) que poderá ser *teoricamente* processada, o comprimento de recheio *nesta situação*, o valor da razão de refluxo do refeedor correspondente e as vazões e composições dos produtos da operação.
- (ii) Operando-se com carga igual a 90% de  $F_{MAX}$ , determine a composição e vazão de todos os produtos e a recuperação % de fundo de "2". Qual a percentagem de folga da razão de refluxo do refeedor relativamente à mínima ( $S^*100/S_{MIN}$ ) ?
- (iii) Nas condições do item (ii), determine o comprimento de recheio necessário.



**Questão 05 (P2 – 1998/02):**

Substâncias "1" e "2" formam azeótropo de mínima temperatura de ebulição em  $P=1$  bar com 83% mol de "1". A razão de pressões de vapor das substâncias é dada por  $P_1^{SAT}/P_2^{SAT} = 2.5$ . Dispõe-se de um retificador extrativo com 8 pratos perfeitos e condensador **total** para utilização com o "entrainer" "E" não-volátil em  $P=1$  bar. A razão de coeficientes de atividade "1" e "2" **sob excesso** de "E" é  $[\gamma_1/\gamma_2]^{E=\infty} = 1.3$ . O retificador será alimentado com **mistura azeotrópica vapor saturado** pretendendo-se **produto de topo** com 99.99% (mol) de "1" (figura). Tendo em mente as características gerais da operação de um retificador com agente extrativo, admitindo possibilidade de utilização ilimitada de "E" e mantendo

um pouco de calma para evitar contas desnecessárias, determine, justificando com cálculos, se existe possibilidade desta operação cumprir o serviço proposto.

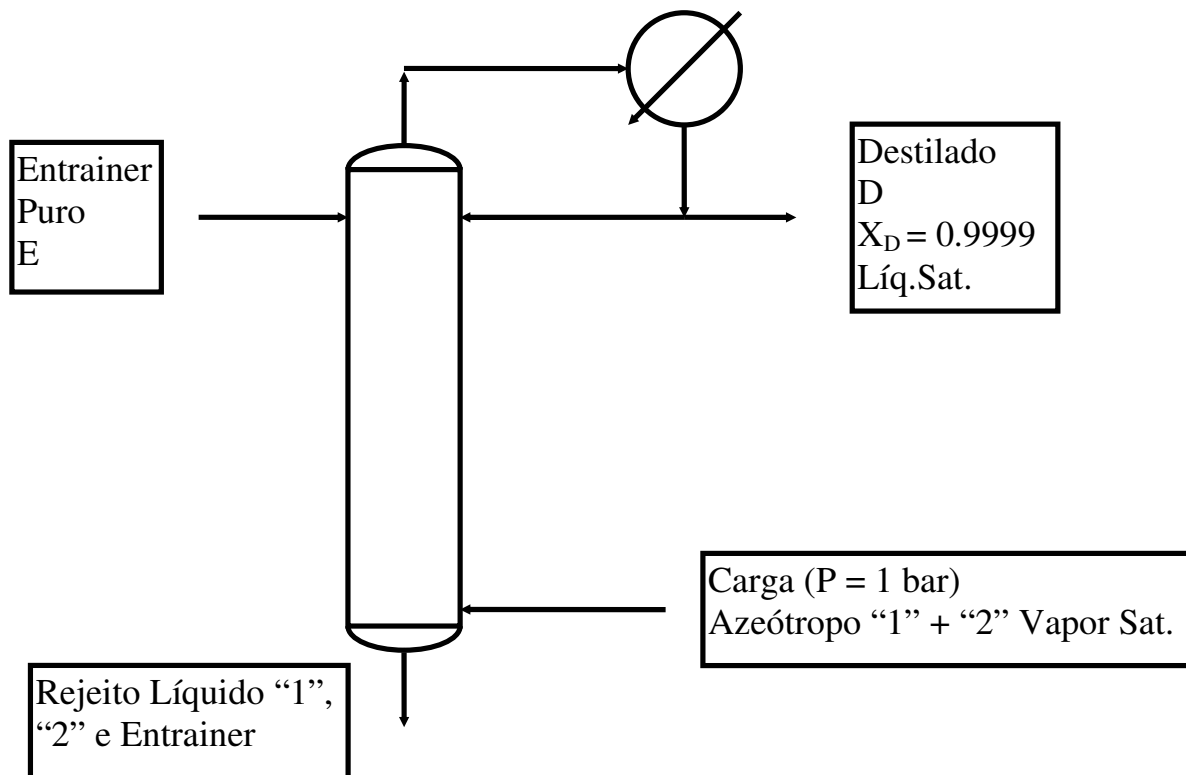


FIG49

### Questão 06 (EF – 1998/02):

Um experimento para determinação de  $H_G$  e  $H_L$  utiliza uma coluna de destilação em **refluxo total** com 2m de recheio Raschig cerâmico de 1". A coluna opera com as substâncias "1" e "2", com volatilidade relativa 2.5 (Figura). O experimento determinou que a composição do líquido na base da coluna é de 25% mol em "1" e que a composição do líquido no topo é de 85% mol em "1". A diferença de pressão entre o refulvedor e o condensador é de 8.4 cm  $H_2O$ . Com base nisto, determine:

- (i) Os valores (m) das alturas de unidades globais de transferência  $H_{OL}$  e  $H_{OG}$  para esta operação;
- (ii) Com  $H_{OL}$  e  $H_{OG}$ , obtenha  $H_L$  e  $H_G$  em (m);
- (iii) Estimar a % da condição de inundação em que o sistema está operando (usar  $\rho_{LIQ} = 0.9 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{VAP} = 0.05 \text{ g/cm}^3$ ).

A figura referente a esse exercício (FIG50) encontra-se na próxima página.

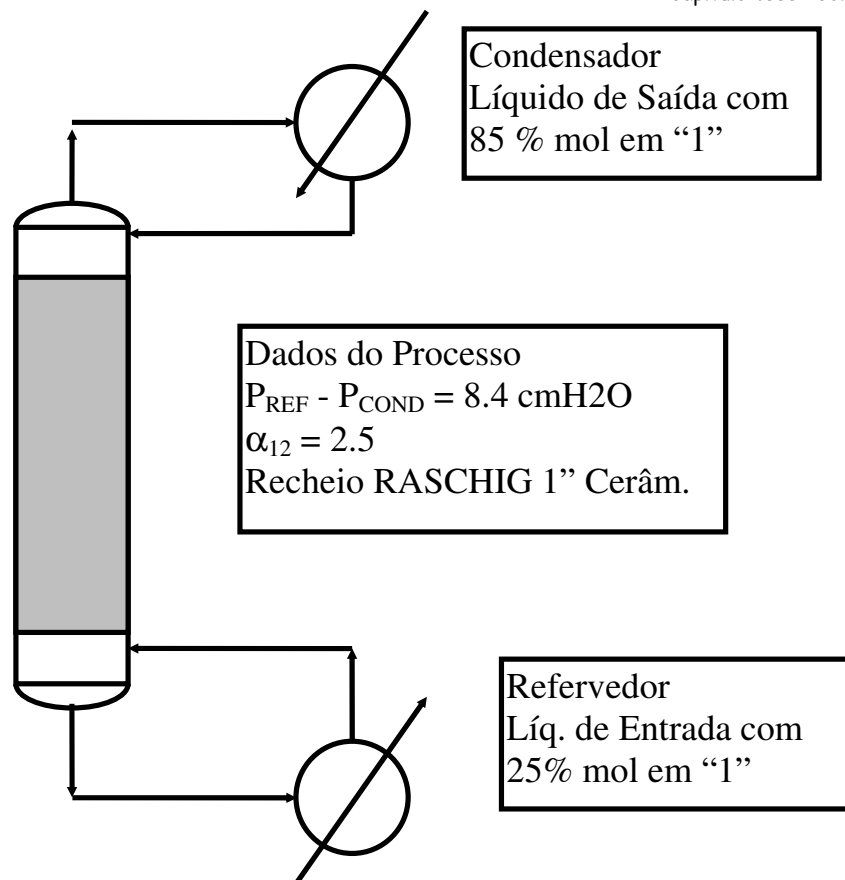


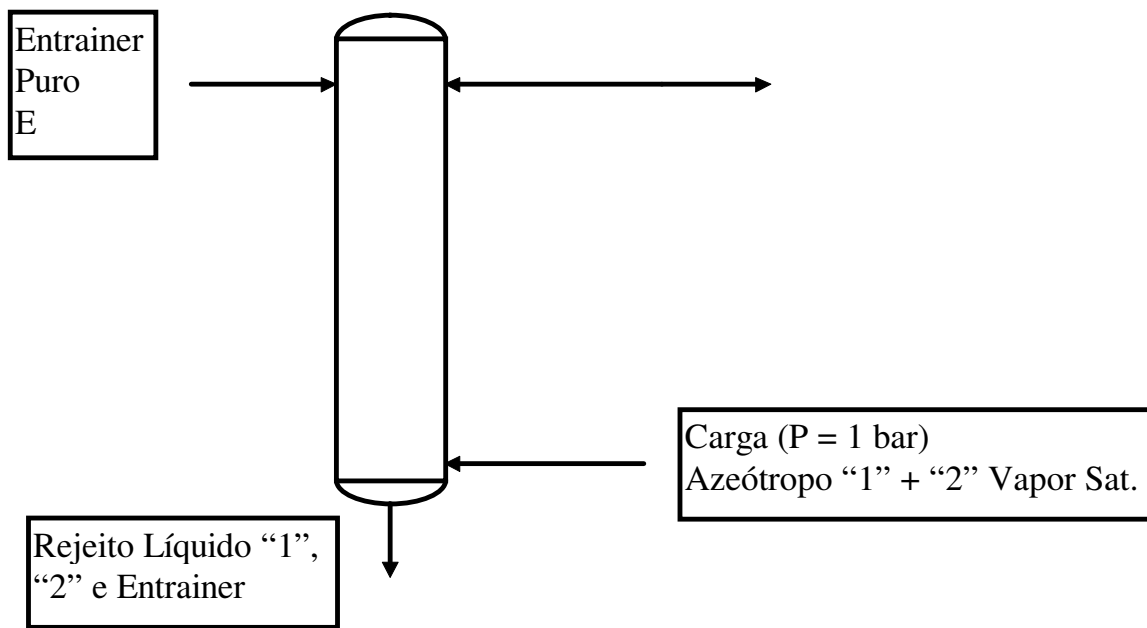
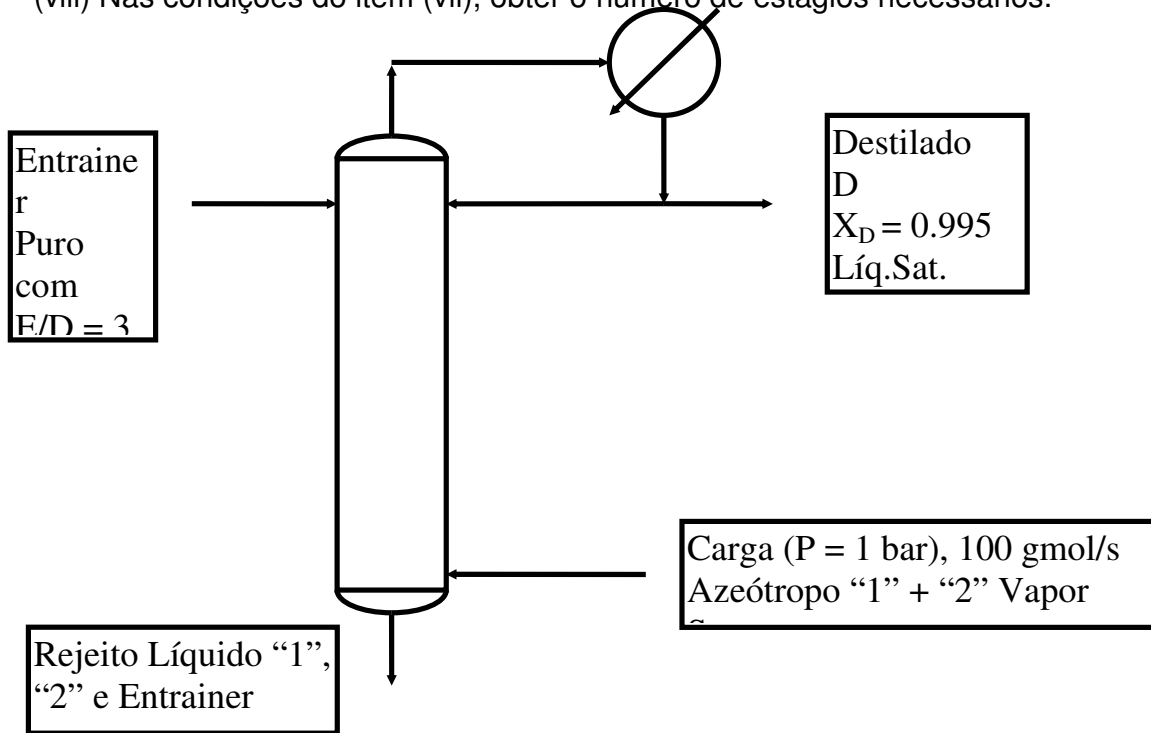
FIG50

**Questão 07 (EF – 1998/02):**

Substâncias "1" e "2" formam azeótropo de mínima temperatura de ebulição em  $P=1$  bar com 85% mol de "1". A razão de pressões de vapor das substâncias é dada por  $P_1^{SAT}/P_2^{SAT} = 2.0$ . Pretende-se utilizar um retificador extrativo com condensador **total** e "entrainer" "E" **não-volátil** em  $P=1$  bar. A razão de coeficientes de atividade "1" e "2" **sob excesso** de "E" é  $[\gamma_1/\gamma_2]^{E=\infty} = 1.5$ . O retificador será alimentado com 100 gmol/s de **mistura azeotrópica vapor saturado** pretendendo-se **produto de topo** com 99.5% (mol) de "1" (figura). A unidade deverá ser projetada com razão molar "entrainer"/destilado dada por  $E/D$  igual a 3.0. Admitindo coordenadas composicionais para fase líquida em Base Isenta de Entrainer (BIE) e que o "entrainer" não está presente em fase vapor, determine :

- (i) Expressão da Curva de Equilíbrio para este sistema na presença de "entrainer" usando coordenadas BIE;
- (ii) Expressões para a volatilidade relativa  $\alpha_{12}$  sob presença e sob ausência de "entrainer";
- (iii) A mínima razão molar "entrainer"/Líquido de refluxo  $(E/L)^{MIN}$  para esta separação;
- (iv) Número mínimo de estágios para esta separação. Qual seria a vazão (BIE) de destilado na situação correspondente ?

- (v) A máxima produção da unidade ( $D^{MAX}$ ) para esta separação, a recuperação % de "1" correspondente e as vazões e composições de todos os produtos;
- (vi) A razão de refluxo mínima (BIE) para esta separação;
- (vii) Operando com  $D = 90\%$  de  $D^{MAX}$ , obter a vazão e composição dos produtos, a recuperação % de "1" no topo e a razão de refluxo correspondente;
- (viii) Nas condições do item (vii), obter o número de estágios necessários.



**Questão 08 (P1 – 1999/01):**

Com respeito à **mesma carga** e sistema termodinâmico do **problema 02 do Capítulo I (pág 07)**, pretende-se adotar operação de **retificação extrativa** (FIG52) sendo alimentada carga de **"entrainer" E não-volátil** na região superior da coluna ainda na pressão  $P=1$  bar. O "entrainer" interage termodinamicamente com as demais substâncias em fase líquida de acordo com  $\overline{G}^E/RT = A X_1 X_2 - B X_2 X_3$  onde "E" corresponde ao componente "3", sendo a volatilidade relativa 12 sob excesso de "entrainer" igual a 3.6. Sejam  $X, Y$  frações molares de "1" nas fases líquida e vapor, respectivamente, em base isenta de "entrainer" (B.I.E) e  $\theta$  a fração molar de líquido "não-entrainer" ("1+2"). Admita operação com razão de refluxo de topo (B.I.E) dada por  $RR=3$ . Responda :

- (i) Obter a relação de equilíbrio líquido-vapor válida para esta operação a  $P=1$  bar (em termos de  $X, Y$  e  $\theta$ ).
- (ii) Obter a mínima razão "entrainer"/destilado  $(E/D)^{MIN}$  para topo  $X_D=0.99$  (B.I.E).

Considere o projeto da operação com  $(E/D)=3*(E/D)^{MIN}$ , para topo  $X_D=0.99$  (B.I.E), e  $RR=3$ . Responda :

- (iii) Obter as vazões e composições de todos os produtos da operação. Obter REC1%.
- (iv) Obter a vazão necessária de "entrainer".
- (v) Determinar o número de estágios necessários para este serviço de separação.
- (vi) Explicar como determinaria a máxima produção ( $D^{MAX}$ ) da operação.

A figura referente a esse exercício (FIG52) encontra-se na próxima página.

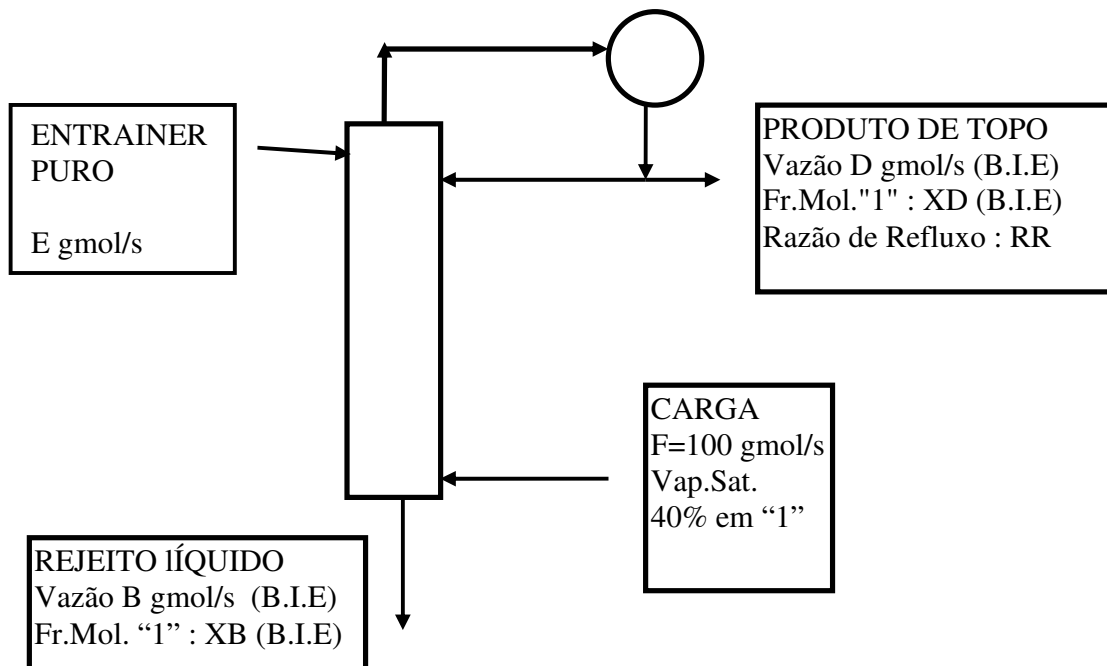


FIG52

**Questão 09 (P2 – 1999/01):**

A operação abaixo utiliza certo tipo de recheio para retificar  $F=100$  g mol/s de vapor saturado ( $P=1$  bar) com 60% mol de "1" (Z) e 40% mol de "2", gerando destilado ( $D$  g mol/s) com 96% mol de "1" ( $X_D$ ). A volatilidade relativa  $\frac{1}{2}$  é igual a 2.0 e a altura de unidade global de transferência é aproximadamente independente da razão de refluxo.

Três regimes operacionais são considerados: (I) Refluxo total ( $D=0$ ); (II) Máximo produto ( $D^{MAX}$ ); (III) Produção ( $D=0.9 \cdot D^{MAX}$ ). Sabe-se que a condição (I) exigiu 3m deste recheio. Com base nestes dados responda:

- (i) Mostre que no caso (I) :  $N_{OL} = \ln(X_D^2 \cdot (1-Z) / (Z^2 \cdot (1-X_D)))$
- (ii) Obter  $H_{OL}$  via o resultado anterior;
- (iii) Resolver caso (II) obtendo  $D^{MAX}$ , a respectiva razão de refluxo, as vazões e composições de correntes e a recuperação % de "1" no topo;
- (iv) Obter as mesmas quantidades do ítem (iii) com referência ao caso (III);
- (v) Obter o comprimento de recheio para o caso (III).

A figura referente a esse exercício (FIG53) encontra-se na próxima página.

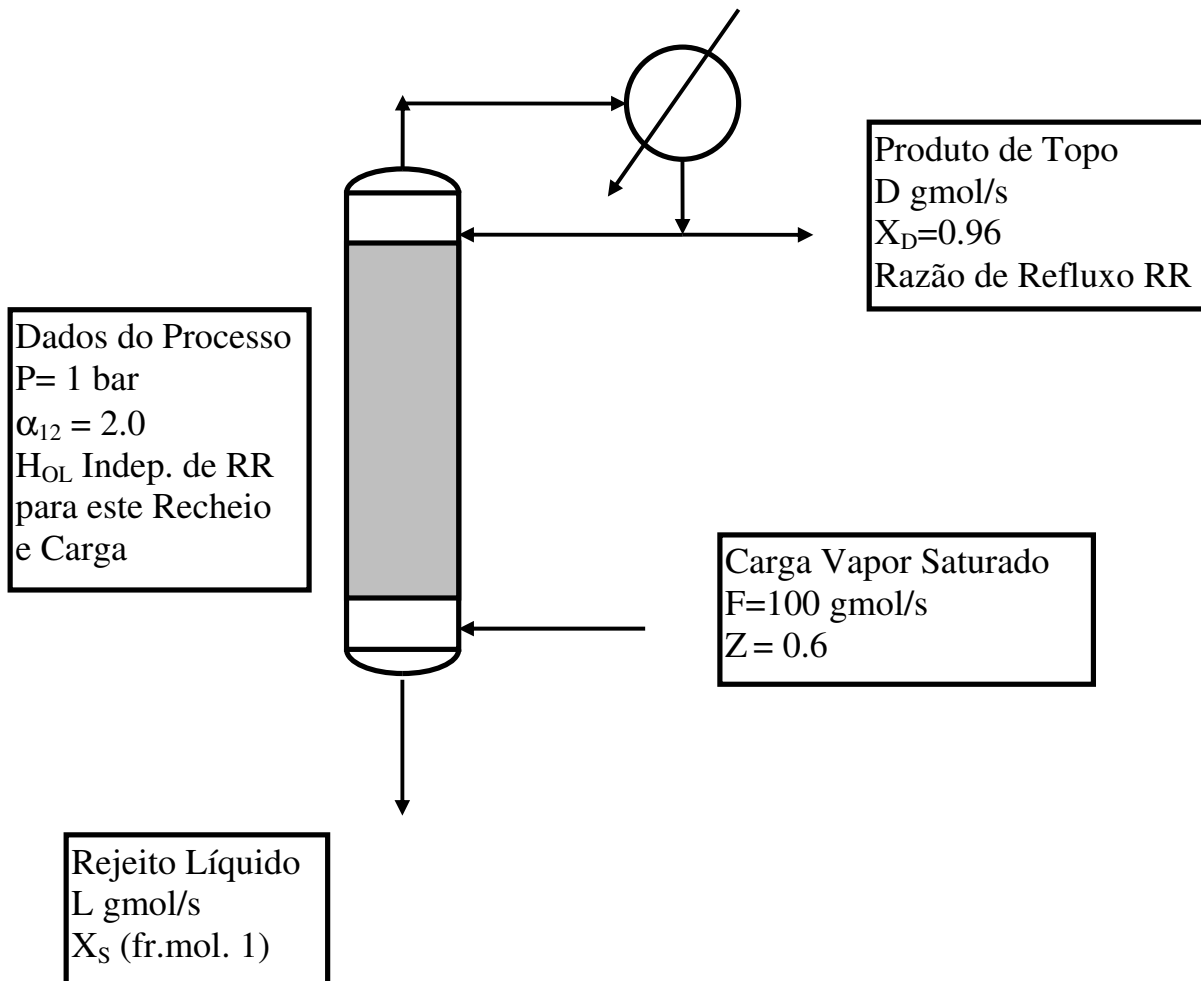


FIG53

**Questão 10 (EF – 1999/01):**

A coluna com recheio cerâmico RASCHIG 1" abaixo será empregada na **absorção** de 100 gmol/s de gás contendo 20% mol de soluto "1" e 80% mol de inerte não-solúvel "2" com solvente não-volátil de modo a gerar gás tratado com teor de "1" inferior a 0.1% mol. A pressão do processo é  $P = 10 \text{ bar}$ . Dados termodinâmicos a seguir ( $X, Y$  frações molares de "1" no líquido e gás respectivamente) :

Fase gás não ideal: Massa Mol  $MM^{\text{VAP}} = 40$ , Densidade  $\rho^{\text{VAP}} = 0.01 \text{ g/cm}^3$

Fase líquida não-ideal: Massa Mol  $MM^{\text{LIQ}} = 80$ , Dens.  $\rho^{\text{LIQ}} = 1 \text{ g/cm}^3$ , Viscos.  $\mu^{\text{LIQ}} = 1 \text{ cP}$

Coefficiente de Fugacidade de "1" no gás:  $\phi_1 = 0.85$  (constante)

Constante de Henry de "1" no solvente:  $H_1 = 50 \text{ bar}$

Coefficiente de Atividade de "1" no solvente:  $\gamma_1 = \exp(X^2)$

O recheio opera com alturas de unidades de transferência constantes e dadas por  $H_G = H_L = 1\text{m}$ . O solvente é alimentado puro. Basear cálculos de alturas de unidades globais de transferência e de diâmetro na **extremidade inferior** da coluna. Determine:

- (i) Expressão da relação de equilíbrio líquido-vapor  $Y^*=g(X)$  para este problema;
- (ii) **Mínimo comprimento** de recheio ( $Z_c^{\text{MIN}}$ ) necessário para esta separação;
- (iii) **Mínima vazão de solvente** necessário para esta separação;
- (iv) As composições e vazões de **todas as correntes** nas condições do item (ii);
- (v) As composições e vazões de **todas as correntes** nas condições do item (iii);
- (vi) Operando com taxa de solvente 40% acima da mínima e a 60% da condição de inundação deste recheio, obter as vazões e composições de correntes;
- (vii) Nas condições de (vi), obter o comprimento de recheio  $Z_c$  necessário;
- (viii) Nas condições de (vi), obter as composições de interface gás-líq na base da coluna;
- (ix) Nas condições de (vi), obter o diâmetro da coluna,  $D_c$ , e a pressão de saída do gás.

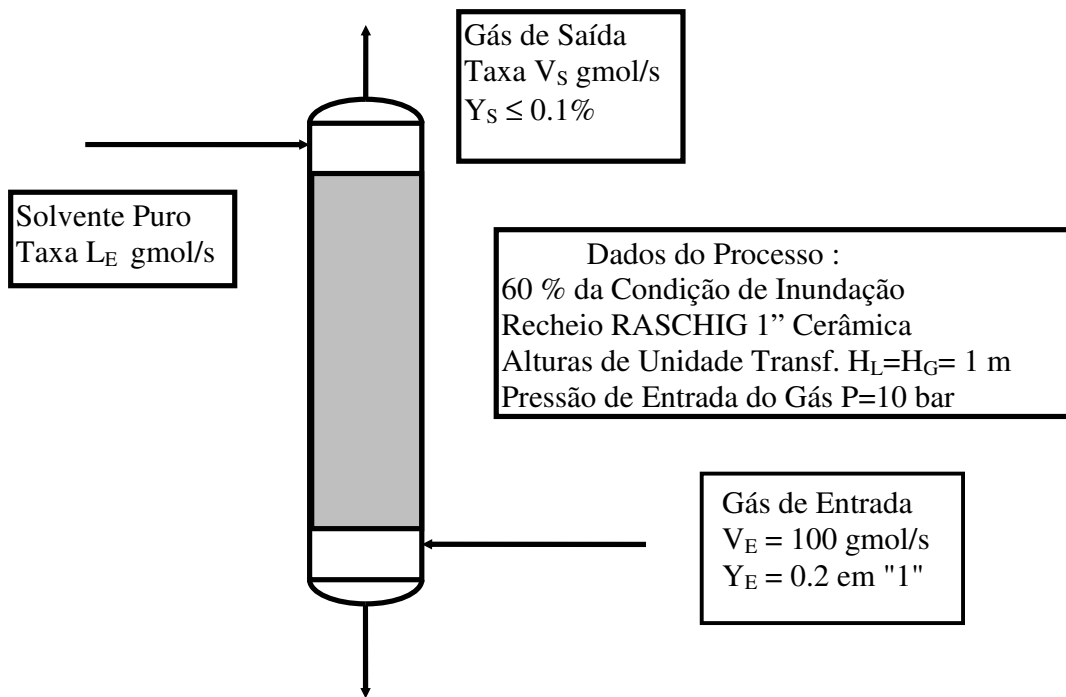


FIG54

### Questão 11 (P2 – 2000/02):

Uma corrente  $F$  de 100 gmol/s de óleo leve, em  $P=25$  bar, contém 15% mol de etano dissolvido. Pretende-se recuperar este etano por esgotamento do óleo em contra-corrente com metano, inicialmente puro, em coluna de recheio Raschig cerâmico 1" (Figura 1). Comparativamente ao etano, pode-se Considerar que o



metano é praticamente insolúvel no óleo nas condições do processo. Dados relevantes são os seguintes :

- Constante de Henry do etano no óleo:  $H^{ET/OLEO} = 85$  bar (aprox. constante)
- Coef. de atividade do etano no óleo :  $\gamma = \exp(X^2)$  (X : fr. molar de etano )
- Coef. de fugacidade do etano no gás :  $\phi = 0.85$  (aprox. constante)
- Fator de compressibilidade na fase gás:  $Z = 0.9$  (aprox. constante)
- Massa molecular do óleo puro:  $MM = 200$
- Densidade e Viscosidade da fase líquida:  $\rho^{LIQ} = 0.8$  g/cm<sup>3</sup>,  $\mu^{LIQ} = 0.02$  g/(cm.s)
- Alturas de Unidades de Transferência:  $H_L = H_G = 1$  m (aprox. constantes)

A coluna deve obter teor de etano no óleo esgotado inferior a 0.001 em fr. molar. Determine:

- (i) A mínima vazão de metano ( $V_E^{MIN}$ ) para cumprir o serviço;
- (ii) As vazões e composições de todas as correntes nas condições de (i);
- (iii) O mínimo comprimento de recheio necessário ( $Z_C^{MIN}$ );
- (iv) As vazões e composições de todas as correntes nas condições de (iii);
- (v) Operando-se com taxa de metano igual ao dobro do obtido em (i),  $V_E = 2V_E^{MIN}$ , obter vazões e composições de todas as correntes e a recuperação % de etano;
- (vi) Nas condições de (v), obter o comprimento de recheio necessário ( $Z_C$ );
- (vii) O diâmetro da coluna, sob 60% da condição de inundação, e nas condições de (v);
- (viii) Se, ao invés da coluna, a corrente de metano obtida em (v) for diretamente contactada com F em um tambor de separação (Figura 2), obter as composições e vazões de produtos e a recuperação de etano obtida;

A figura referente a esse exercício (FIG55) encontra-se na próxima página.

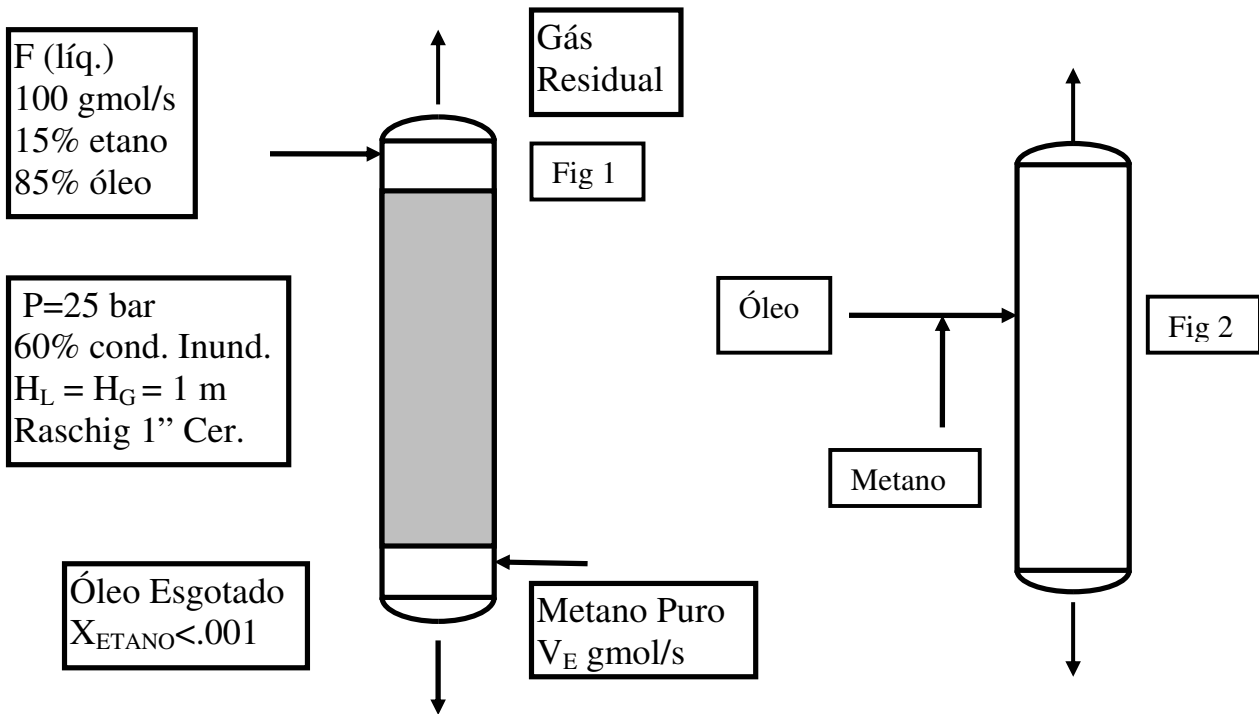


FIG55

**Questão 12 (EF – 2000/02):**

Dispõe-se de 1000 gmol de mistura líquida de "1" e "2" com 60% (mol) de "1", sendo a volatilidade relativa de "1" com respeito à "2" constante e igual a 2.5. Pretende-se utilizar uma coluna de recheio **RASCHIG 1"** cerâmico para gerar 3 produtos de topo **P1**, **P2** e **P3**, com diferentes composições, via sucessivas retificações em batelada (figura). A separação será impulsionada por 10 gmol/s de vazão interna de vapor escoando a 60% da condição de inundação do recheio, garantindo alturas de unidades de transferência de massa para filmes líquido e vapor aproximadamente constantes dadas por  $H_L=1$ m e por  $H_G=1$ m. Valores para densidade e viscosidade de fases são  $\mu^{LIQ}=1$ cP,  $\rho^{LIQ}=0.9$  g/cm<sup>3</sup>,  $\rho^{VAP}=0.01$  g/cm<sup>3</sup>. Cada produto será gerado sob certa razão de refluxo constante e deverá cumprir parâmetros composicionais e de programação conforme mostrado na tabela da página seguinte :

Produto Coletado	P1	P2	P3
Quantidade	100 gmol	200 gmol	300 gmol
<b>Critério Composicional de Coleta</b>	$X_D \geq 0.96$	$X_D \geq 0.85$	$X_D \geq 0.74$
<b>Composição Aproximada do Produto (<math>\langle X_D \rangle_{\text{Aprox}}</math>)</b>	0.98	0.9	0.8
<b>Composição do Produto (<math>\langle X_D \rangle</math>)</b>	$\langle X_{D1} \rangle$	$\langle X_{D2} \rangle$	$\langle X_{D3} \rangle$
Razão de Refluxo Durante Coleta	RR1	RR2	RR3
Composição do Tanque Inferior ao <b>Final da Coleta do Produto</b>	$X_{B1}$	$X_{B2}$	$X_{B3}$
Vazão de Destilação Durante Coleta	$D_1$ gmol/s	$D_2$ gmol/s	$D_3$ gmol/s
Tempo de Duração da Coleta	$t_1$	$t_2$	$t_3$
Vazão de Líquido na Coluna	$L_1$	$L_2$	$L_3$

Com base nos dados fornecidos e adotando aproximações McCabe-Thiele e de concentração de "hold-up" operacional no tanque refeedor, responda:

- (i) Determine as composições do tanque refeedor  $X_{B1}$ ,  $X_{B2}$  e  $X_{B3}$  ao final de cada coleta a partir das composições aproximadas de cada produto;
- (ii) Com base em (i), determine as razões de refluxo mínimas  $RR_1^{\text{MIN}}$ ,  $RR_2^{\text{MIN}}$ ,  $RR_3^{\text{MIN}}$  correspondentes ao estado aproximado da separação ao final da coleta de cada produto;
- (iii) Sabendo que ao longo da coleta de cada produto será usada razão de refluxo igual ao dobro da respectiva razão mínima acima obtida, determine o valor de  $RR_1$ ,  $RR_2$ ,  $RR_3$ , das vazões de destilação correspondentes  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ , dos tempos de coleta  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  e das vazões  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ;
- (iv) Determine o valor do comprimento mínimo de recheio necessário às condições de composição obtidas em (i) ao final da coleta do primeiro produto ( $Z_{C1}^{\text{MIN}}$ );
- (v) A operação será projetada com comprimento de recheio necessário à separação segundo as condições composicionais ao final da geração de  $P_2$ . Obter este comprimento ( $Z_C$ );
- (vi) Admitindo que as massas moleculares de fases líquida e vapor são iguais, estimar o diâmetro de recheio ( $D_C$ ) necessário à separação segundo as condições composicionais ao final da geração de  $P_2$ ;
- (vii) Dadas às respostas (i) e (iv), estimar a composição inicial do destilado coletado para formação de  $P_2$  ( $X_{D2}^{\text{INI}}$ );

A figura referente a esse exercício (FIG56) encontra-se na próxima página.

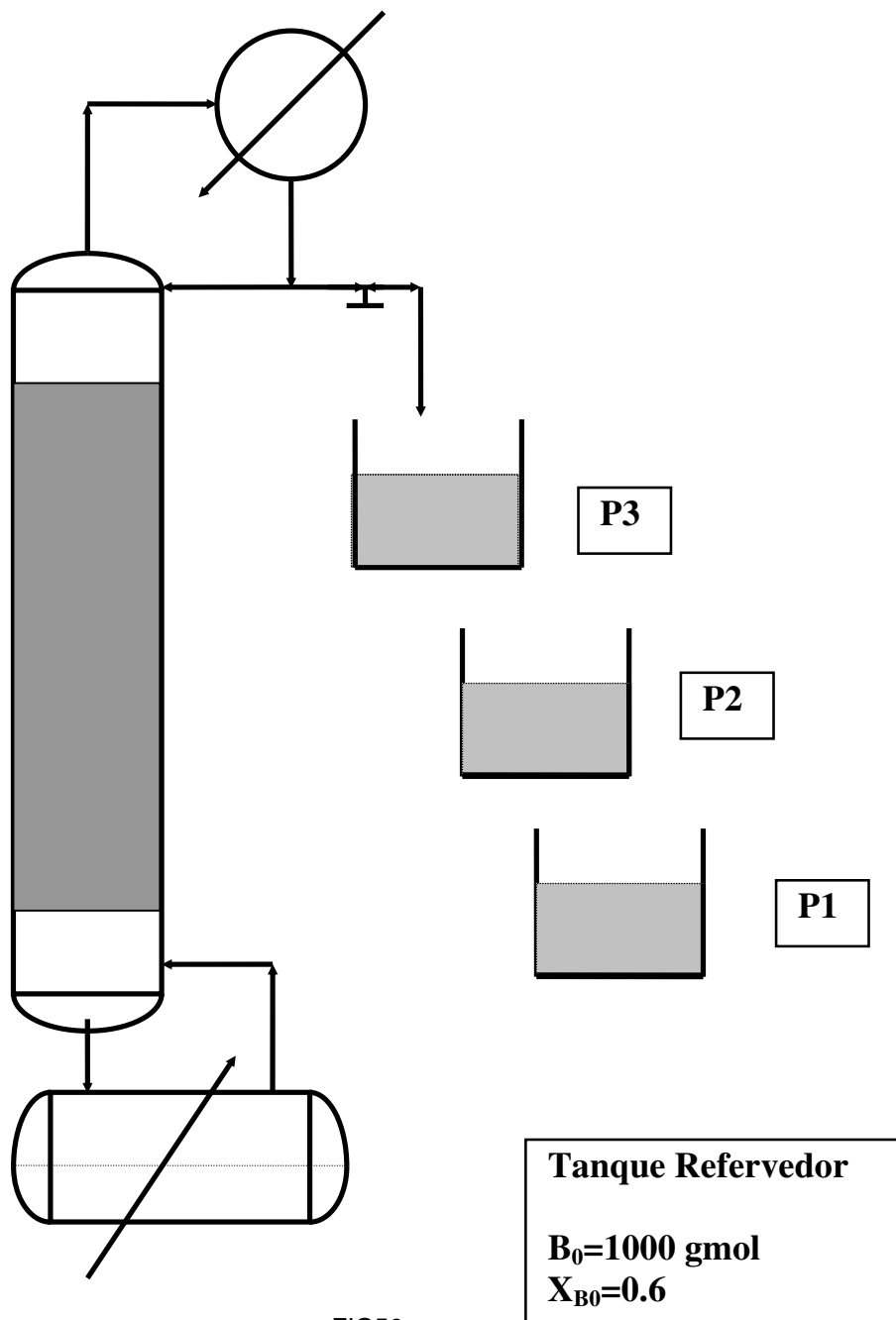


FIG56

**Questão 13 (P2 – 2001/01):**

Uma corrente F de vapor saturado ( $P=1$  atm) contém substâncias “1” e “2” em composição azeotrópica. Esta corrente será tratada pelo retificador **extrativo** abaixo operando com leito de **recheio** Raschig cerâmico de 1”. O retificador é alimentado no topo com “**Entrainer**” E não volátil, visando-se à geração de destilado com 99.9% de “1” em mol. Os seguintes termos e dados são apresentados:

**Dados Termodinâmicos e de Transporte:**

- Razão de Pressões de Vapor  $P_1^{\text{SAT}}/P_2^{\text{SAT}} = 2.0$  (constante)
- Fase Vapor é Gás Ideal apenas com “1” e “2”
- Composição e Temperatura Azeotrópica ( $P=1$  atm):  $X_{\text{AZ}} = 0.865$  (fr.molar “1”),  $T_{\text{AZ}} = 360\text{K}$
- Massas Moleculares:  $MM_1 = 40$  g/gmol,  $MM_2 = 50$  g/gmol,  $MM_E = 115$  g/gmol
- Calor de Vaporização de Misturas Líquidas de “1” e “2” na Presença de E:  $\lambda = 30000$  J/gmol
- Validade da Aproximação McCabe-Thiele em Base Isenta de “Entrainer” (BIE)
- Modelo de Fase Líquida com/sem “Entrainer” :  $\bar{G}^E / RT = AX_1X_2 - BX_2X_3$  (“3” : E)
- Viscosidade e Densidade de Fase Líquida :  $\mu^L = 1$  cP ,  $\rho^L = 1000$  kg/m<sup>3</sup>
- Volatilidade Relativa 1/2 em  $P=1$  atm sob Excesso de “Entrainer”:  $\alpha_{12}^{\text{Exc.E}} = 3.1$
- Constante do Gás Ideal:  $R=82.05$  atm.cm<sup>3</sup>/gmol.K

**Termos e Definições a Serem Usadas no Restante do Problema:**

- **BIE:** Base Isenta de “Entrainer”
- $X, Y, Z, X_D, X_B$ : **Sempre** Frações Molares de “1” BIE em Fases Líquida, Vapor, Carga, Topo, Fundo
- $L, V, F, D, B$ : **Sempre** Vazões BIE de Fases, Carga, Destilado, Fundo etc, em gmol/s
- $L_E$ : Vazão de E em Fase Líquida em gmol/s
- RR: Razão de Refluxo BIE de Topo
- **TVCE** Todas as Vazões e Composições Externas
- $\text{REC}_1\%$ : Recuperação Percentual de “1” no Topo da Operação
- $Z_C, D_C$ : Comprimento (m) e Diâmetro (m) do Leito de Recheio
- Q: Carga Térmica da Operação em kW

**Dados da Operação (Figura 1):**

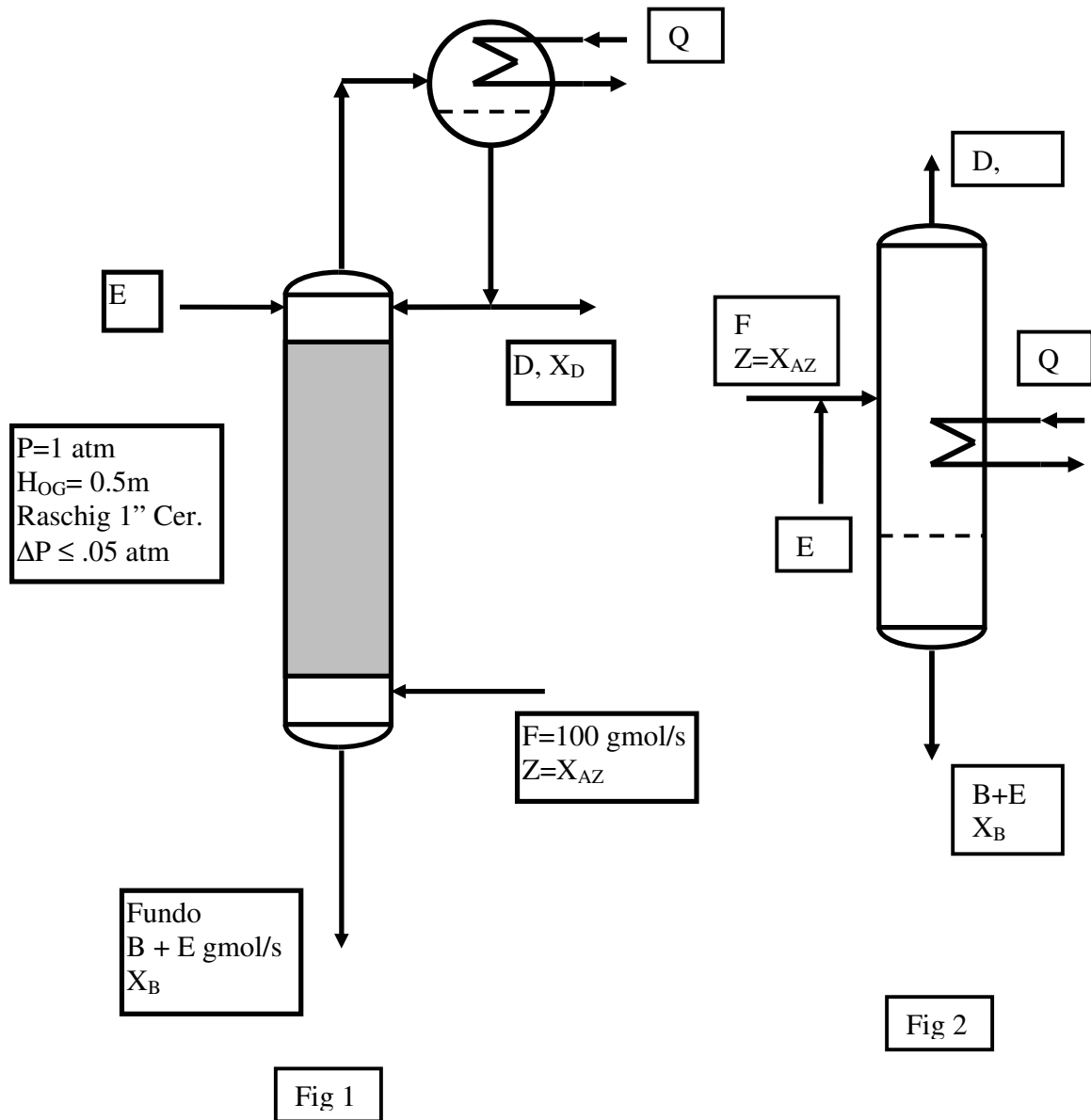
- $P = 1$  atm
- Destilado  $X_D = 0.999$ , Vazão D gmol/s, Condensador Total
- Recheio Raschig Cerâmico 1”

- Carga  $F = 100 \text{ gmol/s}$ ,  $Z = X_{AZ}$ , Vapor Saturado em  $P = 1 \text{ atm}$
- Carga de "Entrainer" acima do recheio:  $E \text{ gmol/s}$
- $E/D = 4$
- Altura Global de Unidade de Transferência (BIE):  $H_{OG} = 0.5 \text{ m}$  (Aprox. Constante)
- Perda de Pressão Máxima no Leito:  $0.05 \text{ atm}$

Com base nestes dados, determine:

- Expressão para volatilidade relativa  $\frac{1}{2}$  na presença de  $E$  e a relação ELV na forma  $Y^*=g(X)$ ;
- A máxima razão de refluxo ( $RR^{MAX}$ ) em que a operação é viável com  $E/D=4$ ;
- Obter TVCE e  $REC_1\%$  nas condições do item (ii);
- Em que condições  $Z_C$  será mínimo para gerar este destilado e qual é este valor  $Z_C^{MIN}$ ?
- Obter TVCE e  $REC_1\%$  nas condições do item (iv);
- Voltando ao caso  $E/D=4$ , obter a produção máxima da operação  $D^{MAX}$ ;
- Obter e TVCE e  $REC_1\%$  nas condições do item (vi);
- Obter a mínima razão de refluxo da operação ( $RR^{MIN}$ );
- Operando com  $RR = 1.3 * RR^{MIN}$ , obter TVCE e  $REC_1\%$ ;
- Nas condições do item (ix), obter  $Z_C$ ;
- Nas condições do item (ix), obter  $D_C$  e a % de Inundação do ponto operacional;
- Se, ao invés da coluna, as correntes  $E$  e  $F$  forem misturadas em um tambor de separação (Figura 2) sob a ação da mesma carga térmica do condensador da coluna nas condições do item (ix), obter TVCE e  $REC_1\%$ .

As figuras referentes a esse exercício (FIG57a e FIG57b) encontram-se na próxima página.



**Questão 14 (EF – 2001/01):**

Dispõe-se de uma corrente vapor (VE) contendo as substâncias “A” (35% mol) e “B” (65% mol) na vazão de 1000 gmol/s. Dispõe-se de uma corrente líquida (LE) contendo “A” (2% mol) e “C” (98% mol) na vazão de 550 gmol/s. Pretende-se contactar LE e VE em dois processos distintos de modo a transferir “A” da fase vapor para a líquida, sendo geradas as correntes produto LS e VS , respectivamente líquida (contendo “A” e “C”) e vapor (contendo “A” e “B”). Admita

que as substâncias “B” e “C” são inertes e não mudam de fase. A relação de equilíbrio entre as fases é

$$X^* = (1/4)Y(5.1+Y)/(1.5+Y) \text{ (onde } Y \text{ e } X \text{ são frações molares de "A", respectivamente nas fases V e L)}$$

Chamando XE e YE as frações molares de “A” respectivamente nas correntes LE e VE, e XS e YS as frações molares de “A” respectivamente nas correntes LS e VS, determine:

- (i) Os valores de LS, VS, XS, YS se as correntes de entrada são contactadas em um tambor de equilíbrio (“flash”) conforme FIG58a abaixo.
- (ii) Os valores de LS, VS, XS, YS se as correntes de entrada são contactadas em contracorrente em coluna de recheio de modo a absorver-se o **máximo possível** de “A” conforme figura 2 abaixo. Qual será o comprimento deste leito de recheio
- (iii) Os valores de LS, VS, XS, YS se as correntes de entrada são contactadas em contracorrente em coluna de recheio de modo a absorver-se 95% do **máximo possível** de “A” (obtido no item (ii)) conforme FIG58b abaixo.
- (iv) O comprimento do leito de recheio necessário para a operação do item (iii) admitindo-se conhecidas as seguintes alturas de unidades de transferência: HL = 1 m, HG = 1 m.

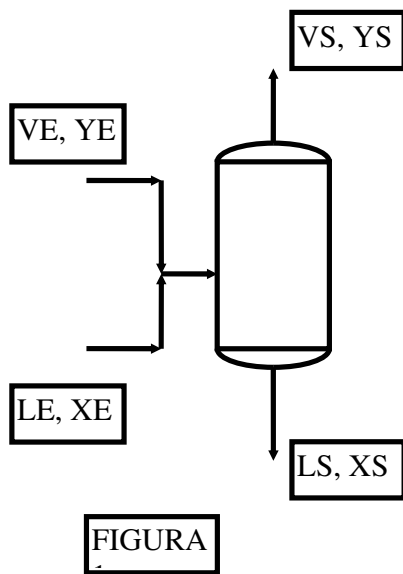


FIG58a

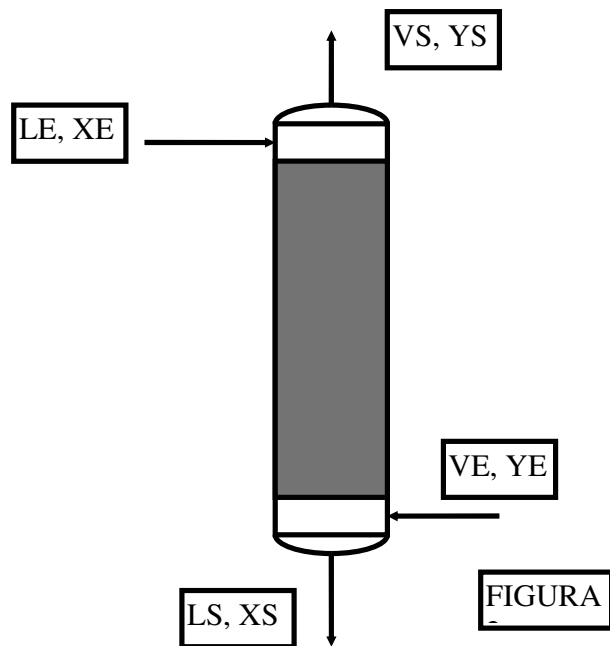


FIG58b



**Questão 15 (2C – 2001/01):**

A figura representa operação de recheio para esgotar corrente F líquida com 100gmol/s de 20% (mol) de “A” e 80% de “B” de modo a gerar produto de fundo com 99.9% de “B”. O esgotamento será feito com corrente gás com 0.25% (mol) de “A”, 5% (mol) de “C” e o restante de inerte I. Dados termodinâmicos e da operação são mostrados abaixo. Na fase gás o esgotamento é impulsionado pela decomposição de “A” em equilíbrio para “C” :  $A(g) \leftrightarrow 2C(g)$ , sob a relação de equilíbrio químico  $Y_C = \sqrt{KY_A/P}$  . O gás de entrada satisfaz esta relação. ( $Y, X$  representam frações molares nas fases gás e líquida). Determine:

- (i) A Equação de Operação deste processo;
- (ii) A mínima vazão de Gás ( $V_E^{MIN}$ , em gmol/s) para executar o serviço;
- (iii) As vazões e composições de produtos na condição (ii);
- (iv) O comprimento de recheio necessário na condição (ii);
- (v) As vazões e composições de produtos admitindo-se vazão de Gás 40% superior à mínima;
- (vi) O comprimento de recheio ( $Z_C$ ) necessário na condição (v);
- (vii) O diâmetro da coluna ( $D_C$ ) e a perda de carga ( $\Delta P$ ) do gás no processo sob condição (v);

Dados:

- Relação ELV para “A” :  $Y_A = (0.3 + X_A).X_A$
- $K=5$  (Equilíbrio Químico),  $P=5$  bar, Recheio Raschig 1”, 60 % da Condição de Inundação
- Alturas de unidades de transferência:  $H_L=1$ m,  $H_G=1.2$  m,
- Massas Moleculares: A:60, B:120, C:30, I:20
- Fase Líquida: Viscosidade  $\mu=2$  cP, Densidade  $\rho=850$  kg/m<sup>3</sup>, Temperatura  $T=380$  K
- “B”: não-volátil; “C”, “I” : não-condensáveis

A figura referente a esse exercício (FIG59) encontra-se na próxima página.

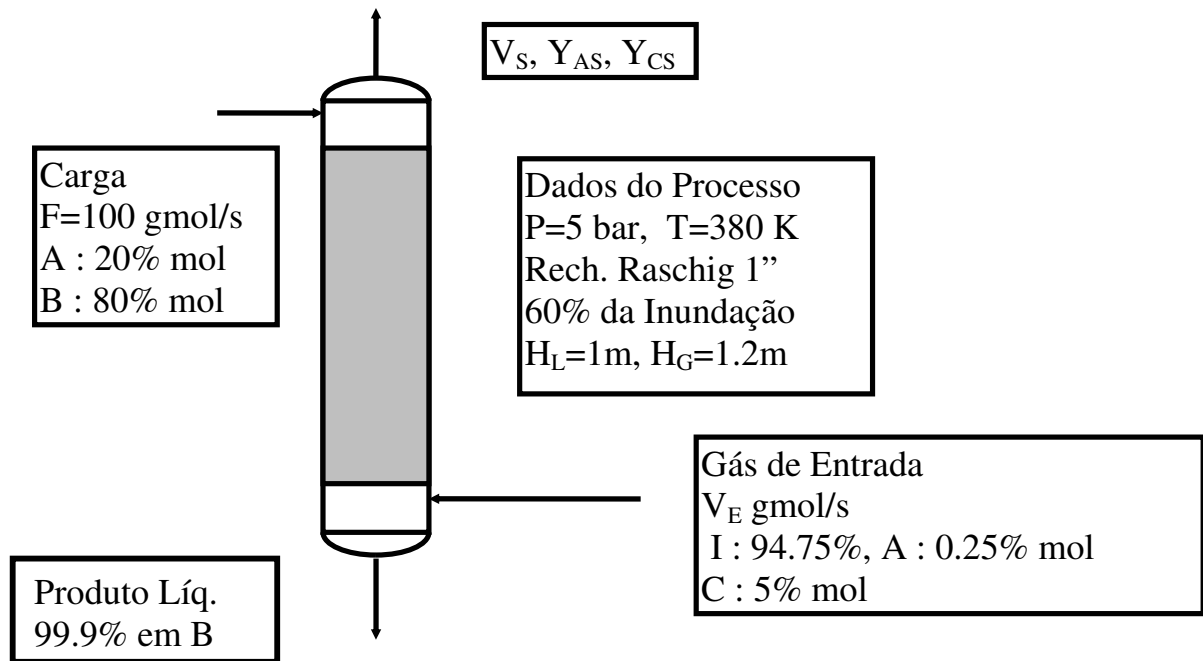


FIG59

**Questão 16 (EF – 2001/02):**

Considere 10000 gmol de mistura formada por "1" e "2", líquida e saturada em  $P=1 \text{ bar}$ , com 60% mol em "1". Admite-se volatilidade relativa constante ( $\alpha=2.5$ ). A mistura será processada na **operação batelada** abaixo, com uma coluna de **retificação em pratos** e outra de **esgotamento em recheio** unidas a um tanque de carga intermediário (Figura). A planta opera com composições de topo ( $X_D = 0.99$ ), fundo ( $X_B = 0.02$ ) e tanque de carga ( $X_H = 0.6$ ) constantes.

Têm-se as seguintes variáveis e valores:

- $M_B(t), B, X_B$  gmol de produto de fundo, sua vazão (const.) e seu teor em "1" (const.);
- $M_D(t), D, X_D$ : gmol de produto de topo, sua vazão (const.) e seu teor em "1" (const.);
- $H(t), X_H$ : gmol de líquido retido no tanque de carga e seu teor em "1" (const.);
- $V$ : gmol/s de vapor (gerado no refeedor) em ambas as seções (const.);
- $L_o, L_i$ : gmol/s de líquido nas seções de retificação e de esgotamento (const.);
- $D=1 \text{ gmol/s}$ : Vazão de produto de Topo (const.);
- $Z=B/(D+B)$ : Fração de produto retirado pelo fundo (const.);
- $RR, S$ : Razões de refluxo das seções de retificação e de esgotamento (const.);

- $H_L=1m$ : Altura de unidade de transferência pelo filme líquido no leito de recheio;
- $H_G=1.2m$ : Altura de unidade de transferência pelo filme gás no leito de recheio;

A operação prosseguirá com produtos e vazões constantes até consumo total do material no tanque; isto é, *não há geração de rejeitos e as taxas de produção são fixas*. A razão de refluxo de fundo (S) é igual a duas vezes a mínima necessária à separação que ocorre no esgotamento:  $S=2.S^{MIN}$ . Com base nestes fatos, determine:

- (i) A fração de retirada de fundo (Z) para garantir este padrão operacional;
- (ii) A vazão de fundo (B);
- (iii) A razão mínima de refluxo na seção de esgotamento  $S^{MIN}$ ;
- (iv) A razão mínima de refluxo na seção de retificação  $RR^{MIN}$ ;
- (v) As razões de refluxo usadas no fundo e topo (S, RR);
- (vi) As vazões de vapor (V) e de líquido ( $L_0, L_1$ ) no interior da unidade;
- (vii) O tempo necessário à operação (t) para decompor a carga e os produtos gerados  $M_B, M_D$ ;
- (viii) O Número de estágios necessários na cascata de retificação;
- (ix) O comprimento de recheio necessário na cascata de esgotamento;
- (x) Se esta unidade for posta para operar com  $D=B=0$ , que valores serão gerados para  $X_D$  e  $X_B$ , admitindo-se os valores obtidos nos itens (viii) e (ix) ?

A figura referente a esse exercício (FIG60) encontra-se na próxima página.

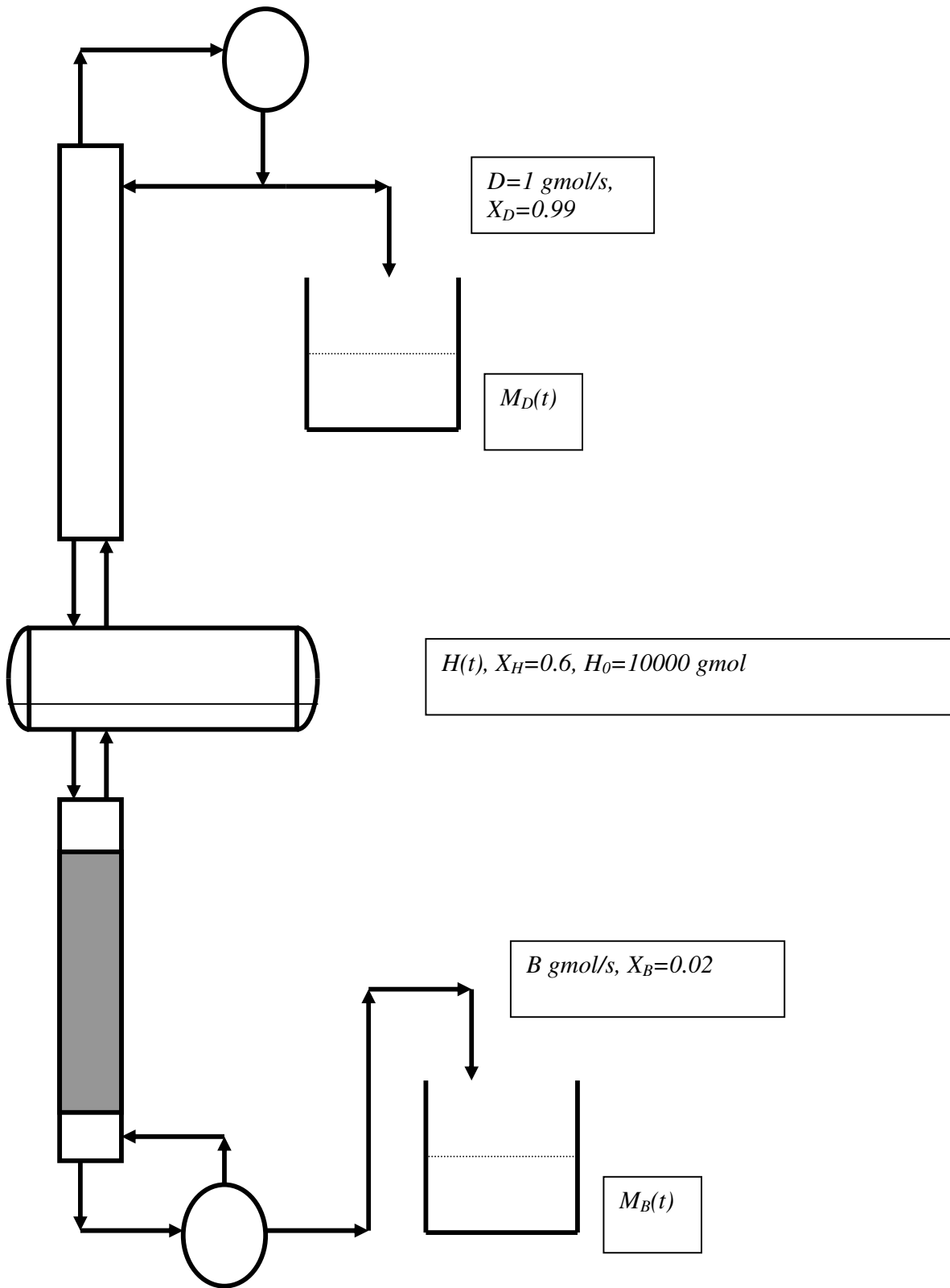


FIG60

**Questão 17 (P2 – 2002/02):**

A operação abaixo utiliza certo tipo de recheio para retificar  $F=100$  gmol/s de vapor saturado ( $P=1$  bar) com 76% mol de "1" ( $Z$ ) e 24% mol de "2", gerando destilado ( $D$  gmol/s) com 99% mol de "1" ( $X_D$ ). A volatilidade relativa  $\frac{1}{2}$  ( $\alpha$ ) é igual a 2.4 e a altura de unidade global de transferência é aproximadamente independente da razão de refluxo.

Três regimes operacionais são considerados: (I) Refluxo total ( $D=0$ ); (II) Máximo produto ( $D^{MAX}$ ); (III) Produção ( $D=0.94 \cdot D^{MAX}$ ). Sabe-se que a condição (I) exigiu 3.3m deste recheio. Com base nestes dados responda:

(i) Mostre que no caso (I) : 
$$N_{OG} = \left( \frac{1}{\alpha - 1} \right) \ln \left( \frac{X_D (1 - Z)^\alpha}{Z (1 - X_D)^\alpha} \right)$$

(ii) Obter  $H_{OG}$  via o resultado anterior;

(iii) Resolver caso (II) obtendo  $D^{MAX}$ , a respectiva razão de refluxo, as vazões e composições de correntes e a recuperação % de "1" no topo;

(iv) Obter o valor de  $N_{OG}$  para o caso II e o respectivo comprimento de recheio necessário. Explique, matematicamente, a razão destes valores.

(v) Obter as mesmas quantidades do item (iii) com referência ao caso (III);

(vi) Obter o comprimento de recheio para o caso (III).

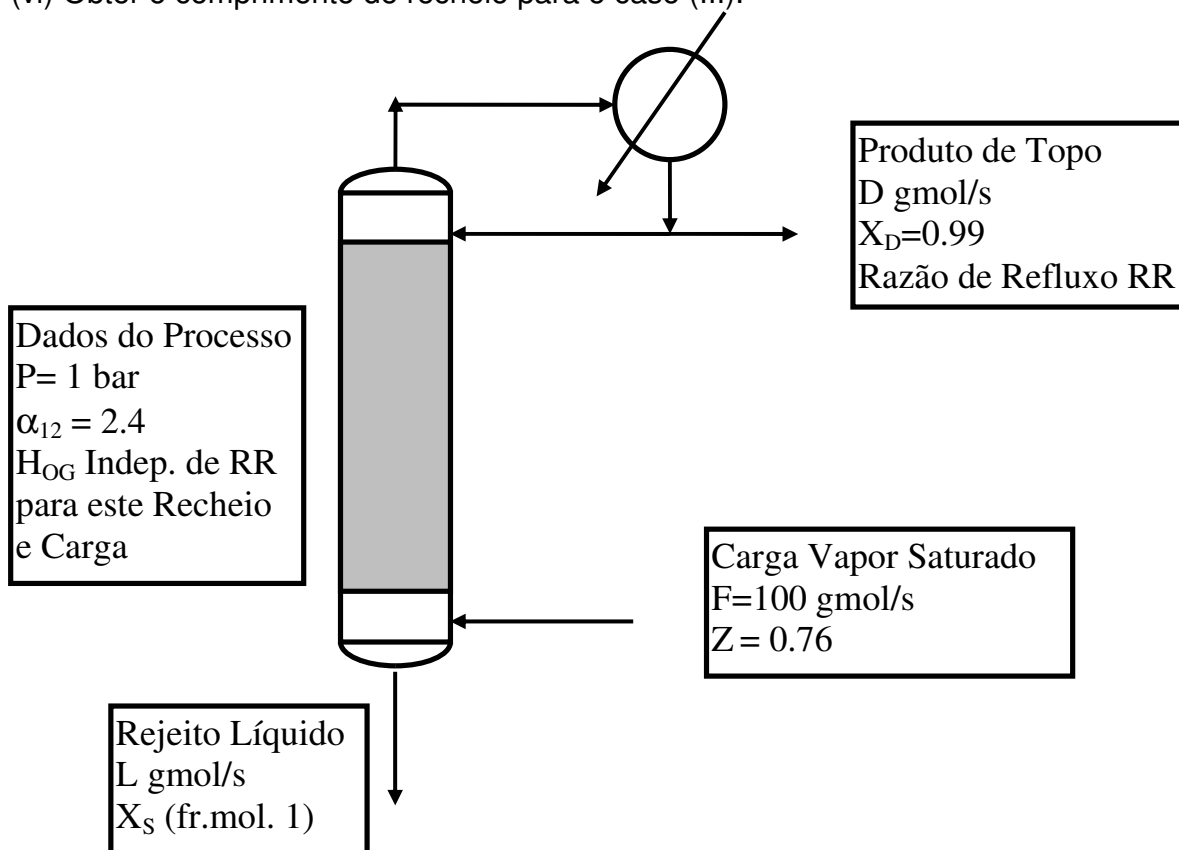


FIG61

**Questão 18 (P2 - 2002/02):**

A figura mostra experimento para determinar alturas de unidade de transferência de certo recheio na destilação de compostos "1" e "2". Dados termodinâmicos e operacionais são listados abaixo. O experimento apontou que o líquido em ebulição na base da coluna tem 4% mol em "1" e que o líquido em refluxo tem 90% mol em "1".

**Dados Termodinâmicos e do Experimento:**

- Pressão do experimento:  $P=1\text{bar}$
- Comprimento e Diâmetro do Leito de Recheio:  $Z=3.4\text{m}$ ,  $D=0.2\text{m}$
- Carga Térmica do Refervedor:  $Q_{REF}=10\text{ kW}$
- Relação de Eq. Líq.-Vapor ( $x,y$  fr. molares de "1"):  $y = \frac{2 \cdot x \cdot \exp(0.2 - 0.4x)}{1 - x + 2 \cdot x \cdot \exp(0.2 - 0.4x)}$
- Entalpia de Vapor Saturado:  $\bar{H}_V^{Sat} = 25000 - 5000y$  ( $J / \text{gmol}$ )
- Entalpia de Líquido saturado:  $\bar{H}_L^{Sat} = 5000 + 4000 \cdot x - 4000 \cdot x^2$  ( $J / \text{gmol}$ )
- Altura de Unidade de Transferência Filme V:  $H_G = 1 + \exp(-0.1 \cdot V / S)$   
( $V$  vazão de vapor em  $\text{gmol/s}$ ;  $S$  área de seção do recheio em  $\text{m}^2$ )

A partir disto, determine:

- (i) Estimativa para a carga térmica (kW) do condensador;
- (ii) Estimativa para as vazões ( $\text{gmol/s}$ ) de vapor e de líquido no topo e na base da coluna;
- (iii) Estimativa para a altura de unidade de transferência  $H_L$  (m) admitindo que seja independente das vazões  $V$  ou  $L$ ;
- (iv) Estimativa para a Altura Equivalente (m) de Prato Teórico ( $HETP$ ) através do método Ponchon-Savarit e usando que  $HETP=Z/N$  onde  $N$  é o número de estágios teóricos;

A figura referente a esse exercício (FIG62) encontra-se na próxima página.

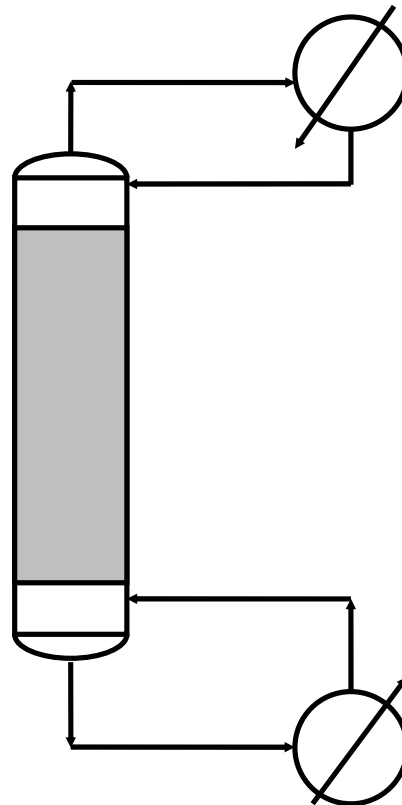


FIG62

**Questão 19 (EF – 2002/02):**

A coluna com recheio RASCHIG 1" abaixo será empregada na retificação de 100 gmol/s de vapor saturado com 70% mol de "1" e 30% mol de "2" na pressão P do processo, de modo a gerar destilado vapor com 95% mol de "1". A volatilidade relativa  $1/2$  é constante e igual a 2.0. O recheio opera com alturas de unidades de transferência constantes e dadas por  $H_G = H_L = 1\text{m}$ .

A partir destes dados, determine:

- (i) Máxima vazão de produto retificado,  $D^{\text{MAX}}$ , que poderá ser gerado; a correspondente máxima recuperação de "1",  $\text{REC1\%}^{\text{MAX}}$ , a razão de refluxo nesta situação e a vazão e composição do rejeito do retificador, também nesta situação.
- (ii) Mínimo comprimento necessário de recheio,  $Z_c^{\text{MIN}}$ .
- (iii) Nas condições de (ii), as vazões e composições dos produtos, a razão de refluxo e  $\text{REC1\%}$ .
- (iv) Operando com  $D=0.9 \cdot D^{\text{MAX}}$  obter  $\text{REC1\%}$ , a razão de refluxo, as vazões e composições dos produtos.
- (v) Nas condições de (iv), obter o comprimento de recheio,  $Z_c$ .

A figura referente a esse exercício (FIG63) encontra-se na próxima página.

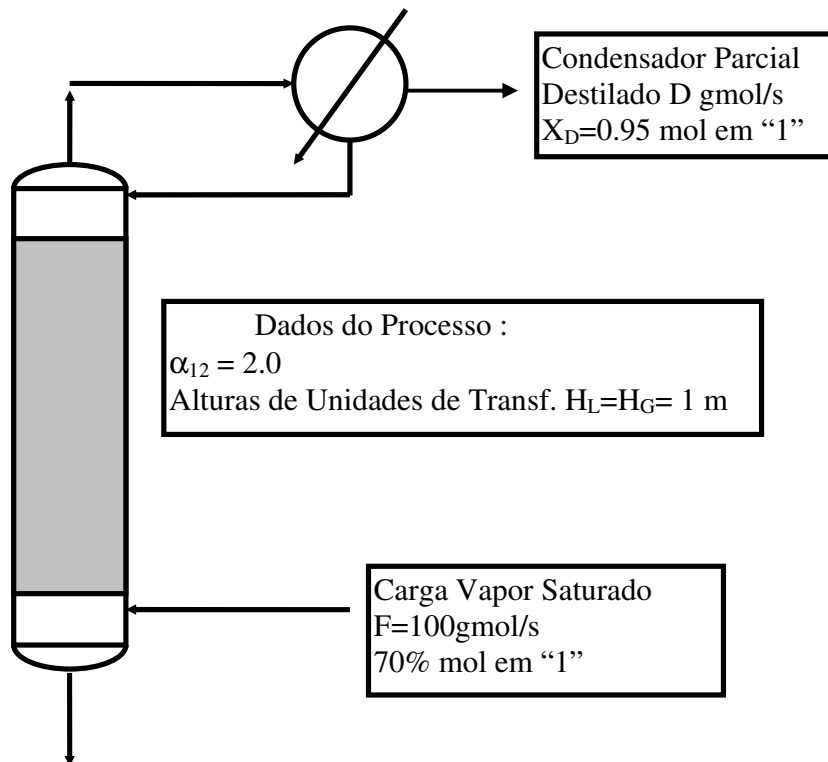


FIG63

**Questão 20 (EF – 2002/02):**

Considere o problema anterior no caso em que se usa uma **coluna de pratos** ao invés da seção de recheio da figura acima, adotando-se o mesmo condensador parcial. Determine:

- (i) Máxima vazão de produto retificado,  $D^{MAX}$ , que poderá ser gerado; a correspondente máxima recuperação de "1",  $REC1\%^{MAX}$ , a razão de refluxo nesta situação e a vazão e composição do rejeito do retificador, também nesta situação.
- (ii) Mínimo número de estágios necessários.
- (iii) Nas condições de (ii), as vazões e composições dos produtos, a razão de refluxo e  $REC1\%$ .
- (iv) Operando com  $D = 0.9 \cdot D^{MAX}$  obter  $REC1\%$ , a razão de refluxo, as vazões e composições dos produtos.
- (v) Nas condições de (iv), obter o número de estágios necessários.

**Questão 21 (2C – 2002/02):**

A figura representa operação com dois leitos de recheio (leito 0 e leito 1) para separar corrente  $F_1$  **líquida e saturada** (100 g mol/s de 40% (mol) de "1" e 60% de "2") gerando-se produto de fundo com 2% de "1" e recuperando-se 98%



de "2". A volatilidade relativa é constante e igual a 2. A coluna não dispõe de condensador, sendo alimentada superiormente pela corrente  $F_0$  **líquida e saturada** contendo "1" puro. O recheio é tal que as alturas de unidades de transferência são constantes e dadas por  $H_L=1\text{m}$  e  $H_V=1\text{m}$ .

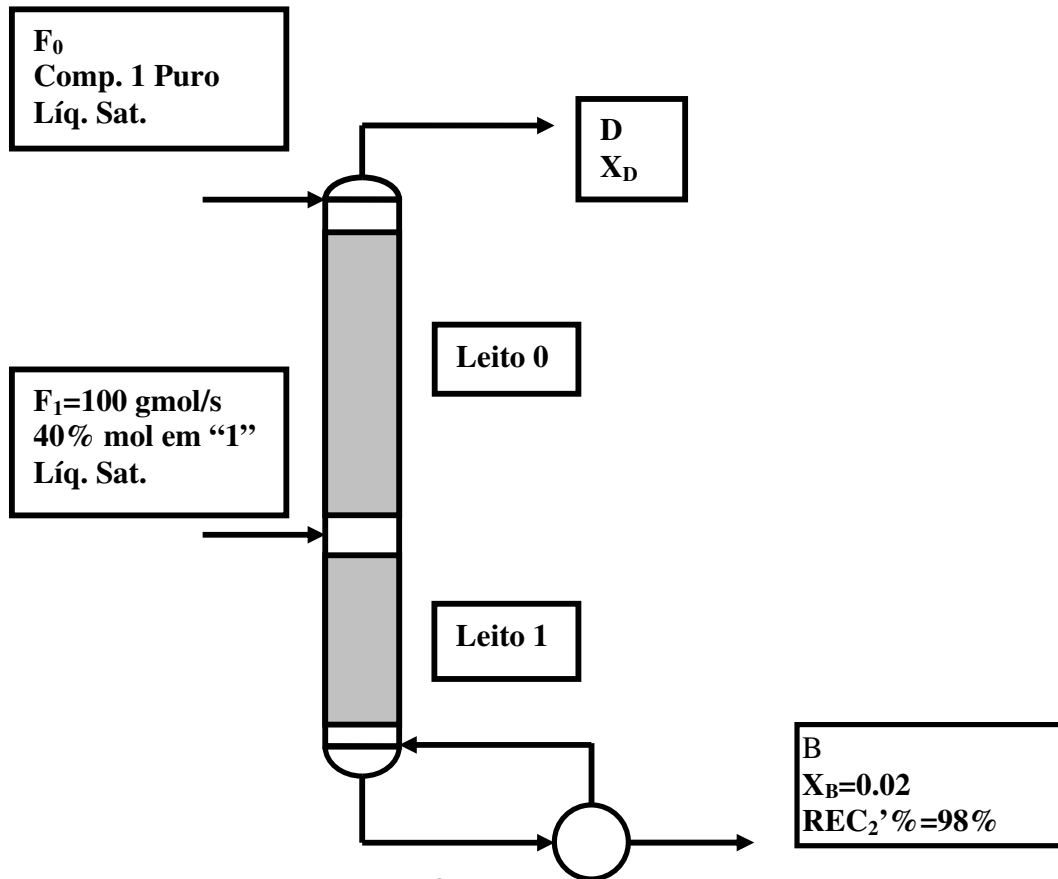
A partir deste dados e das informações abaixo, determine :

- (i) A mínima razão de refluxo de fundo ( $S^{\text{MIN}}$ );
- (ii) As vazões e composições de todos os produtos e cargas na condição de (i);
- (iii) Admita operação com  $S=2*S^{\text{MIN}}$ . Obter vazões e composições de produtos nesta condição;
- (iv) Obter o comprimento de recheio ( $Z_{C0}$ ) necessário ao leito 0 na condição (iii);
- (v) Obter o comprimento de recheio ( $Z_{C1}$ ) necessário ao leito 1 na condição (iii);

Informações:

- Volatilidade relativa:  $\alpha=2$
- Admitir validade da Aproximação McCabe-Thiele

Alturas de unidades de transferência constantes:  $H_L=1\text{m}$ ,  $H_G=1.2\text{m}$ .



**Questão 22 (P2 – 2003/01):**

A figura mostra **coluna de recheio** para retificar corrente **vapor saturada** ( $F=100$  gmol/s) contendo 60% mol de composto "1" e o restante de "2". Dados termodinâmicos e operacionais abaixo. A coluna utiliza **condensador parcial**, devendo gerar destilado vapor com 95% mol de "1".

**Dados:**

- Pressão:  $P=1\text{ bar}$
- Leito de Recheio Raschig Cerâmico 1" com Comprimento  $Z_C$
- Relação de Eq. Líq.-Vapor ( $x,y$  fr. molares de "1") :  $y^* = \frac{2.2.x}{1+1.2.x}$
- Entalpia de Vapor Saturado :  $\bar{H}_V^{Sat} = 35 - 5y$  (kJ / gmol)
- Entalpia de Líquido saturado :  $\bar{H}_L^{Sat} = 5 + 5.x$  (kJ / gmol)
- Alturas (constantes) de Unidades de Transferência :  $H_G = 1\text{ m}$ ,  $H_L = 1\text{ m}$

A partir disto, e admitindo vazões constantes ao longo do leito, determine:

- Máxima produção possível de destilado ( $D^{MAX}$ );
- Vazões e composições de produtos nas condições de (i);
- Carga térmica do condensador nas condições de (i);
- Razão de refluxo nas condições de (i);
- Comprimento de recheio necessário nas condições de (i);
- Mínimo comprimento de recheio necessário a esta separação ( $Z_C^{MIN}$ );
- Vazões e composições de produtos nas condições de (vi).

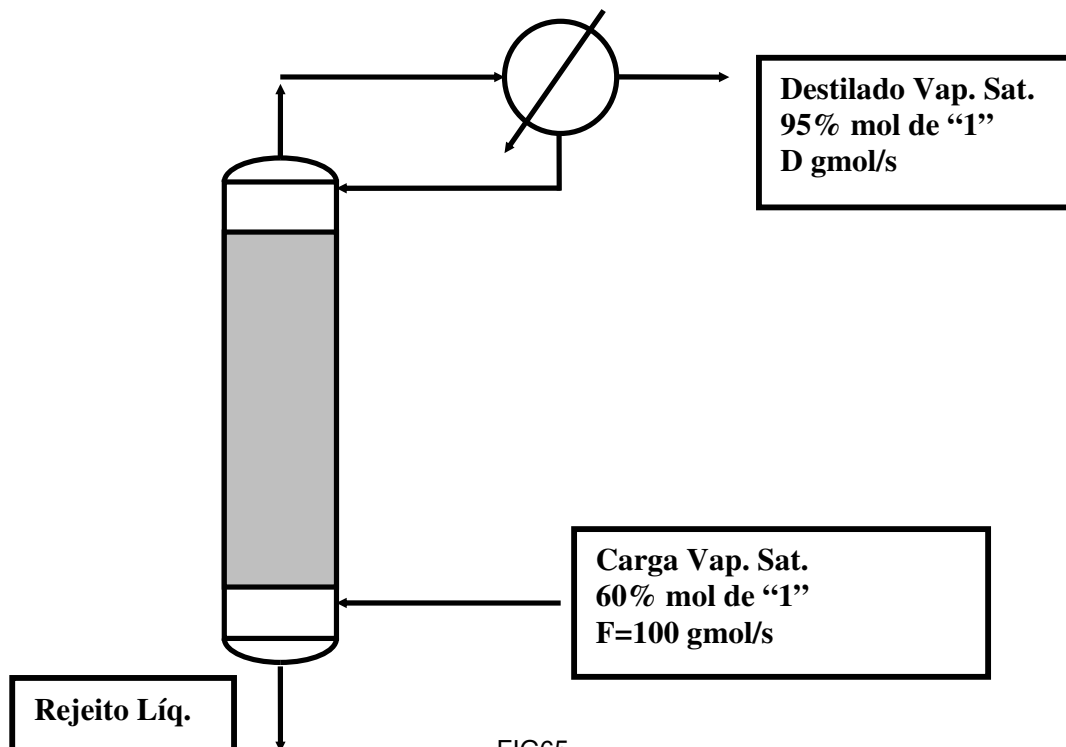


FIG65

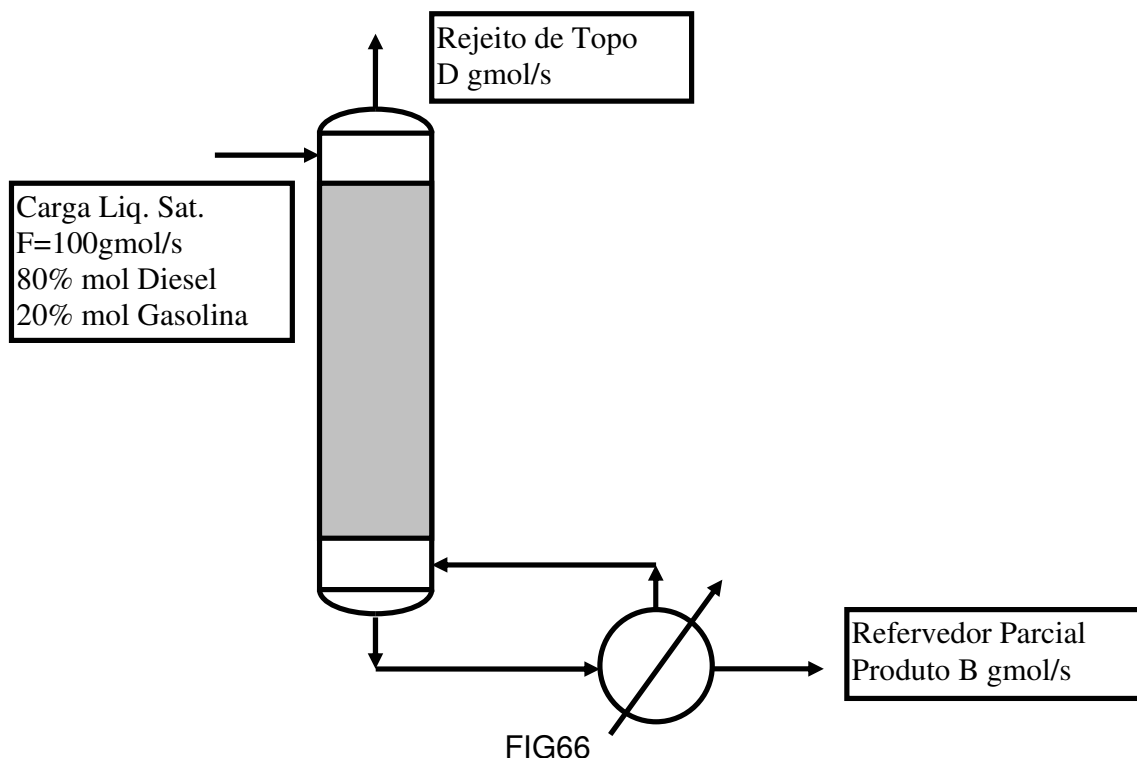
**Questão 23 (P2 – 2003/01):**

Utilizando o **Método Ponchon-Savarit**, refazer os itens (i), (ii), (iii) e (iv) do problema anterior.

**Questão 24 (EF – 2003/01):**

Coluna com recheio RASCHIG 1" será empregada no esgotamento de 100 gmol/s de óleo diesel (80% mol) contaminado com compostos de gasolina (20% mol) na pressão  $P=2\text{bar}$ . O objetivo é gerar diesel de fundo com no máximo 0.1% de gasolina. Pode-se adotar volatilidade relativa constante e igual a 3 entre gasolina e diesel. Alturas de unidades de transferência (constantes) para o caso são  $H_G = H_L = 1\text{m}$ . Determine:

- (i) Máxima vazão de produto esgotado,  $B^{\text{MAX}}$ , que poderá ser gerado;
- (ii) A recuperação % de diesel, a razão de refluxo (S) e o rejeito de topo na situação do item (i);
- (iii) Mínimo comprimento necessário de recheio a esta separação,  $Z_c^{\text{MIN}}$ ;
- (iv) Nas condições de (iii), as vazões/composições de produtos, a razão de refluxo e recuperação % de diesel.



**Questão 25 (P2 – 2003/01):**

Na figura **coluna de recheio** para retificar corrente **vapor saturada** ( $F$  gmol/s) com 90% mol de C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> e o restante de C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>. A coluna utiliza **condensador parcial** gerando destilado vapor de C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> com pureza petroquímica (99.5% mol). Abaixo dados termodinâmicos e operacionais ( $x, y$  frações molares de C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>).

- Pressão:  $P=25\text{bar}$
- Leito Raschig Cerâmico 1" com Alturas de Unidades de Transferência  $H_G = 0.25\text{m}$ ,  $H_L = 0.25\text{m}$
- ELV: Usar Volatilidade Relativa Constante Gerada nas **Condições de Carga**
- Fase Líquida é Solução Ideal; Coeficientes de Fugacidade em Fase Vapor :  $\hat{\phi}_{C_3H_6}^V = .83$ ;  $\hat{\phi}_{C_3H_8}^V = .85$
- Pressões de Vapor ( $P^{Sat}(\text{bar})$ ,  $T(\text{K})$ ):  
 $P_{C_3H_6}^{Sat}(T) = \exp(10.01 - 2254.1/T)$ ,  $P_{C_3H_8}^{Sat}(T) = \exp(9.98 - 2304.1/T)$
- Entalpia de Vapor e de Líquido Sat. ( $P=25\text{ bar}$ ) :  $\bar{H}_V^{Sat} = 32 + 2y \text{ kJ/gmol}$ ,  
 $\bar{H}_L^{Sat} = 13 + 4x \text{ kJ/gmol}$
- Usar Aproximação McCabe-Thiele ao longo da coluna

A partir disto, determine:

- Máxima produção possível de destilado por gmol de carga ( $D^{MAX}/F$ );
- A Razão de refluxo e vazões e composições de produtos nas condições de (i);
- Carga térmica por gmol de carga ( $Q_C/F$ ) do condensador nas condições de (i);
- Obter a razão de refluxo necessária para a coluna operar com  $D/D^{MAX} = 50\%$ ;
- Nas condições (iv), obter o comprimento de recheio ( $Z_C$ ) da separação;
- Nas condições (iv) e sob limite no condensador a 1100 kW, obter a máxima vazão possível de carga.

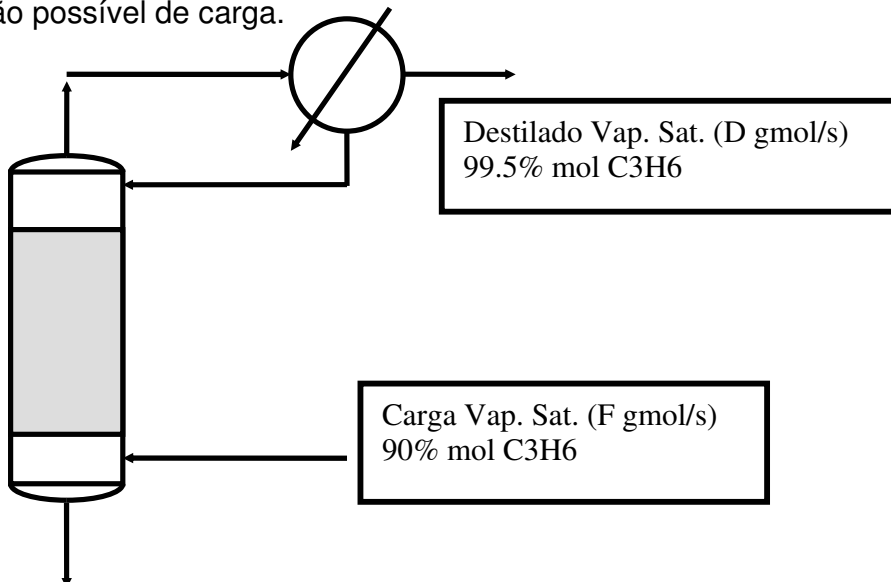
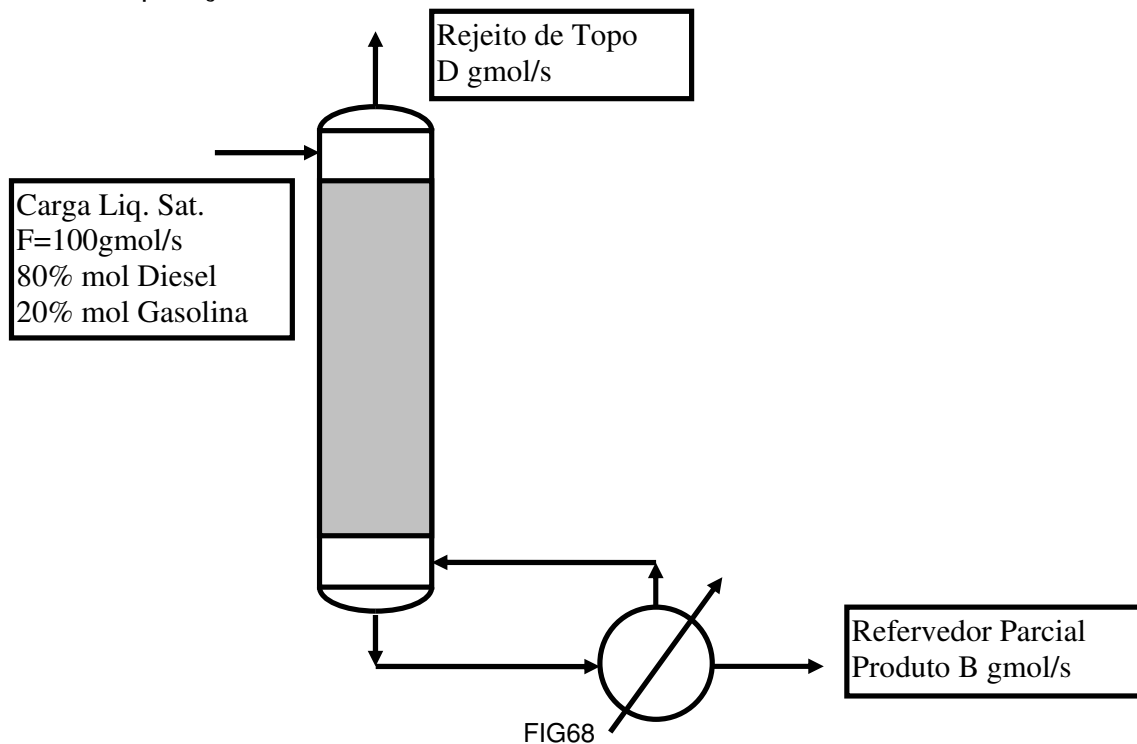


FIG67

**Questão 26 (EF – 2003/01):**

Coluna com recheio RASCHIG 1" será empregada no esgotamento de 100 gmol/s de óleo diesel (80% mol) contaminado com compostos de gasolina (20% mol) na pressão  $P=2\text{bar}$ . O objetivo é gerar diesel de fundo com no máximo 0.1% de gasolina. Pode-se adotar volatilidade relativa constante e igual a 3 entre gasolina e diesel. Alturas de unidades de transferência (constantes) para o caso são  $H_G = H_L = 1\text{m}$ . Determine:

- (i) Máxima vazão de produto esgotado,  $B^{\text{MAX}}$ , que poderá ser gerado;
- (ii) A recuperação % de diesel, a razão de refluxo ( $S$ ) e o rejeito de topo na situação do item (i);
- (iii) Mínimo comprimento necessário de recheio a esta separação,  $Z_c^{\text{MIN}}$ ;
- (iv) Nas condições de (iii), as vazões/composições de produtos, a razão de refluxo e recuperação % de diesel.

**Questão 27 (2C – 2003/02):**

A unidade abaixo deve separar a corrente  $F_1$  (50% mol de "1", 50% mol de "2") em um fundo B com 1% mol "1" e um topo D (vapor) com 95% mol "1". A corrente  $F_1$  tem 100 gmol/s sendo líquida e sub-resfriada em  $50\text{ }^\circ\text{C}$  na pressão da coluna ( $P=1\text{ bar}$ ). Não há condensador, de modo que carrega-se líquido de topo ( $F_0$ ) com 100% mol de "1" e sub-resfriada em  $50\text{ }^\circ\text{C}$ . A razão de refluxo de fundo é representada por  $S$ . Seguem dados para projeto ( $X, Y$  são frações molares de "1")

no líquido e no vapor). Considere inicialmente que a coluna é toda de pratos, no item (v) a seção inferior será substituída por recheio.

- Entalpia de Vapor Saturado (P=1 bar) :  $\bar{H}_V = 50 - 10.Y$  (kJ/gmol)
- Entalpia de Líquido Saturado (P=1 bar) :  $\bar{H}_L = 10.X$  (kJ/gmol)
- ELV :  $Y = \frac{X.F(X)}{1 - X + X.F(X)}$  ,  $F(X) = 2.45 \exp(0.1*(1 - X))$
- Capacidade Calorífica a Pressão Cte de Fase Vapor Próximo à Saturação :  $C_p^{Vap} = 0.089$  kJ/gmol.K
- Capacidade Calorífica a Pressão Cte de Fase Líquida Próximo à Saturação :  $C_p^{Liq} = 0.16$  kJ/gmol.K

A partir disto, responda:

- Com o **Método McCabe-Thiele**, determine o valor da mínima razão de refluxo de fundo ( $S^{MIN}$ );
- Nas condições do item (i), determine a carga térmica do refeedor ( $Q_R^\infty$ ) e as vazões  $F_0^\infty$ ,  $D^\infty$  e  $B^\infty$ ;
- Trabalhando com  $S = 2.2 * S^{MIN}$  e usando o **Método Ponchon-Savarit**, determine o número de estágios necessários (N) e o estágio ótimo de entrada de  $F_1$  ( $N_1$ );
- Nas condições do item (iii), determine a carga térmica do refeedor ( $Q_R$ ) e as vazões  $F_0$ ,  $D$  e  $B$ .
- Pretende-se substituir o trecho de estágios entre  $F_1$  e o refeedor parcial por uma **seção de recheio** com alturas de unidades de transferências dadas por  $H_L = H_G = 0.5$ m. Admitindo as condições de projeto do item (iii), determine o comprimento ( $Z_C$ ) desta seção.

A figura referente a esse exercício (FIG69) encontra-se na próxima página.

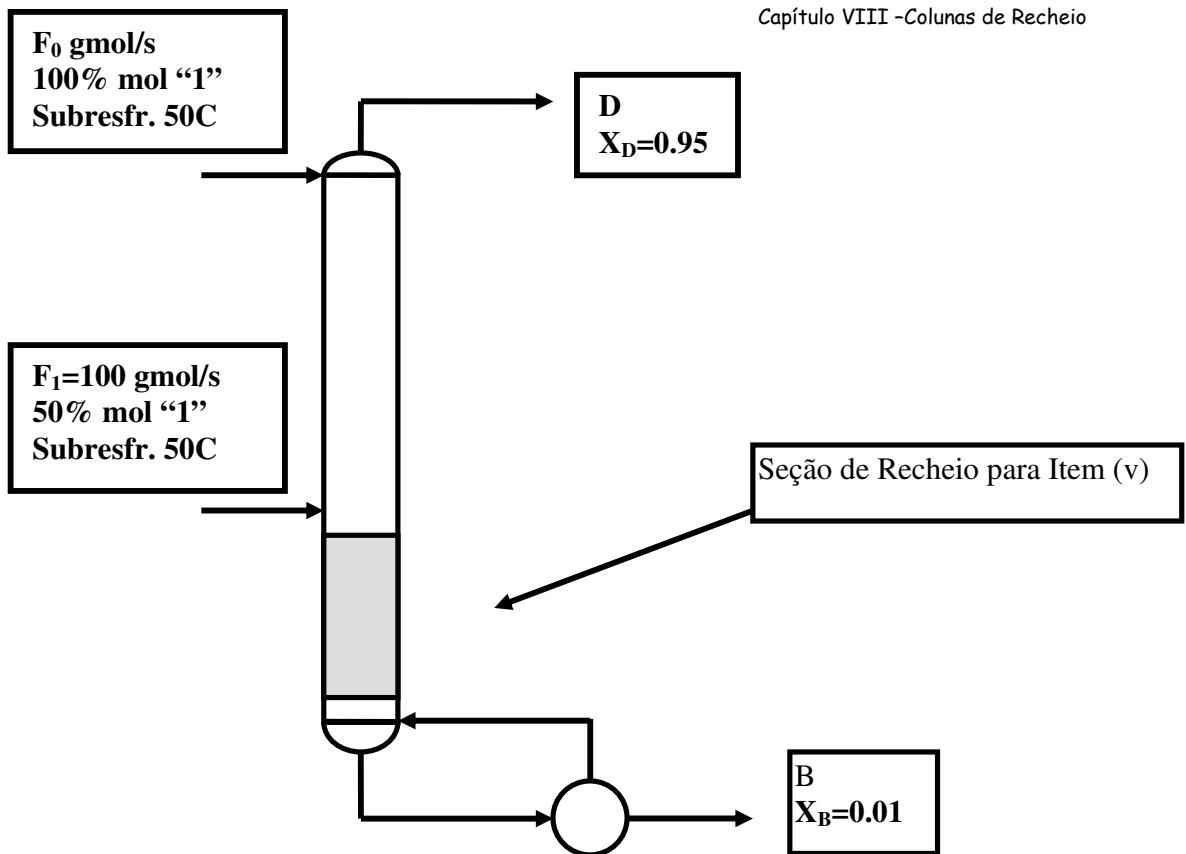


FIG69

**Questão 28 (P2 – 2004/01):**

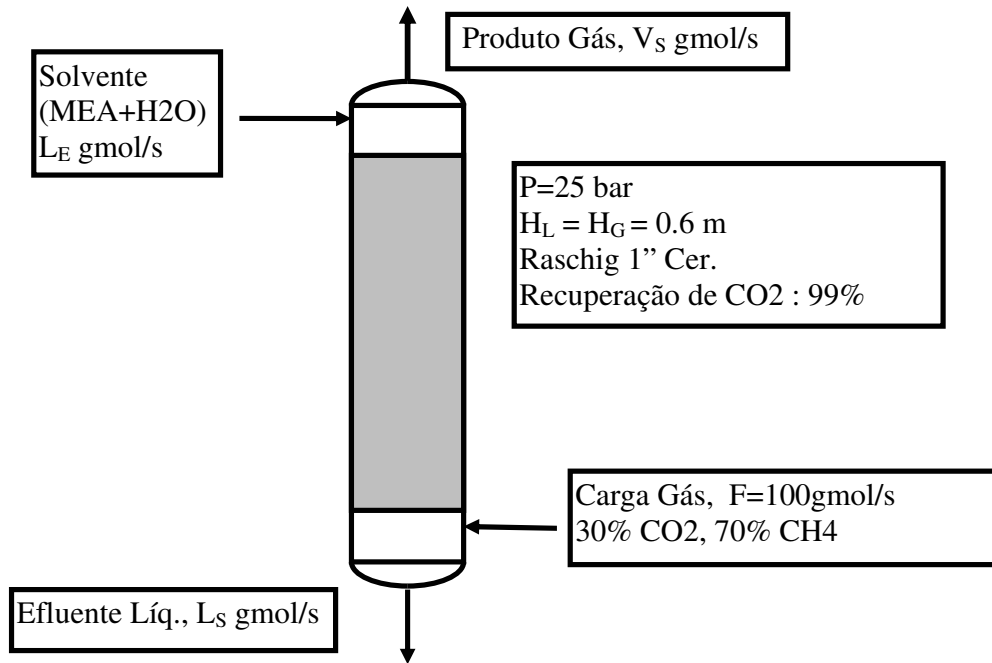
Uma corrente gasosa  $F$  de 100 gmol/s contém 30% mol de  $\text{CO}_2$  e 70% de  $\text{CH}_4$ , estando inicialmente na pressão de  $P=25$  bar e temperatura de  $T=35^\circ\text{C}$ . Pretende-se purificar o  $\text{CH}_4$  absorvendo-se o  $\text{CO}_2$  com uma solução aquosa de MEA (monoetanolamina) em contra-corrente na coluna de recheio Raschig Cerâmico 1" mostrada abaixo. Comparativamente ao  $\text{CO}_2$ , pode-se considerar que o  $\text{CH}_4$  é praticamente insolúvel na fase líquida e que MEA e água não vaporizam nas condições do processo. Sendo  $X$  e  $Y$  frações molares de  $\text{CO}_2$  em cada fase, têm-se os dados abaixo válidos para o processo:

- Relação de Equilíbrio Líquido-Vapor para distribuição de  $\text{CO}_2$  :  $Y^* = 5X - 11.5X^2 + 9.1X^3$
- Alturas de Unidades de Transferência:  $H_L = H_G = 0.6\text{m}$  (aprox. constantes)
- Recuperação de  $\text{CO}_2$  pelo solvente: 99%
- Inicialmente a solução aquosa de MEA não contém  $\text{CO}_2$

A partir disto, determine:

- A mínima vazão (gmol/s) de solvente (MEA+água) ( $L_E^{\text{MIN}}$ ) para cumprir o serviço;
- As vazões e composições de todas as correntes nas condições de (i);

- (iii) O mínimo comprimento de recheio necessário ( $Z_C^{\text{MIN}}$ );  
 (iv) As vazões e composições de todas as correntes nas condições de (iii);  
 (v) Operando-se com taxa de solvente 80% maior que o obtido em (i),  $L_E = 1.8L_E^{\text{MIN}}$ , obter vazões e composições de todas as correntes;  
 (vi) Nas condições de (v), obter o comprimento de recheio necessário ( $Z_C$ ).



### Questão 29 (EF – 2004/01):

Utiliza-se coluna de recheio (Raschig 1", cerâmico) a  $T=25\text{C}$  e  $P=1\text{bar}$  para esgotar a acetona de  $100\text{gmol/s}$  de corrente líquida contendo 90% (mol) de água e 10% (mol) de acetona, usando-se contato com  $\text{N}_2$  puro em contracorrente (FIG71). O teor final de acetona no produto líquido deve ser inferior a 0.1% (mol). A partir dos dados do processo abaixo, e sendo  $Y, X$  frações molares de acetona nas fases  $V$  e  $L$ , responda:

- Obter relação de equilíbrio líquido-vapor, válida para esta operação, na forma  $Y=g(X)$ ;
- Obter o mínimo consumo de  $\text{N}_2$  necessário ( $V_E^{\text{MIN}}$ ) e todas as correntes nesta condição de operação;
- Usando vazão de  $\text{N}_2$  50% superior à mínima, obter todas as correntes do processo;
- Nas condições de (iii), obter o comprimento necessário de recheio ( $Z_C$ );

### DADOS TERMODINÂMICOS E DE RECHEIO

- Pressão de saturação da Acetona em  $T=25\text{C}$ ,  $P^{\text{SAT}}=0.5\text{bar}$
- Alturas de unidades de transferência do recheio:  $H_L=H_G=0.5\text{m}$



- Coeficiente de atividade da Acetona na fase aquosa:  $\gamma^{liq} = \exp((1-X)^2)$

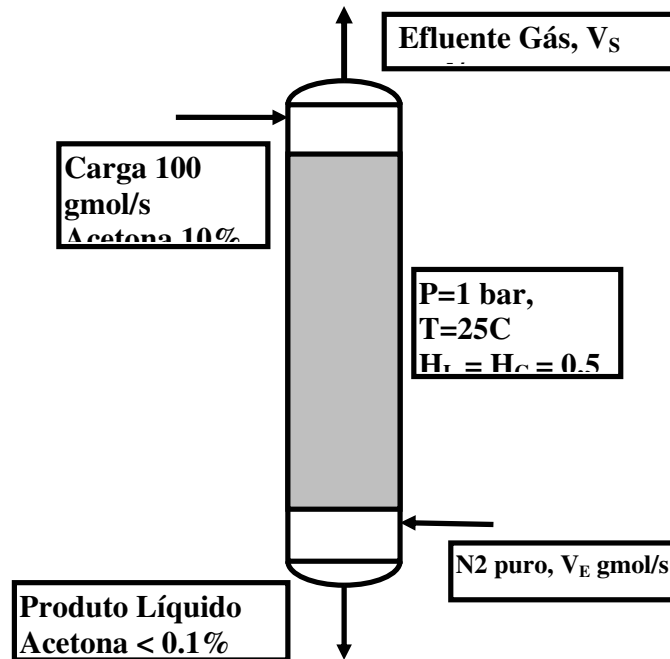


FIG71

### Questão 30 (P2 – 2004/02):

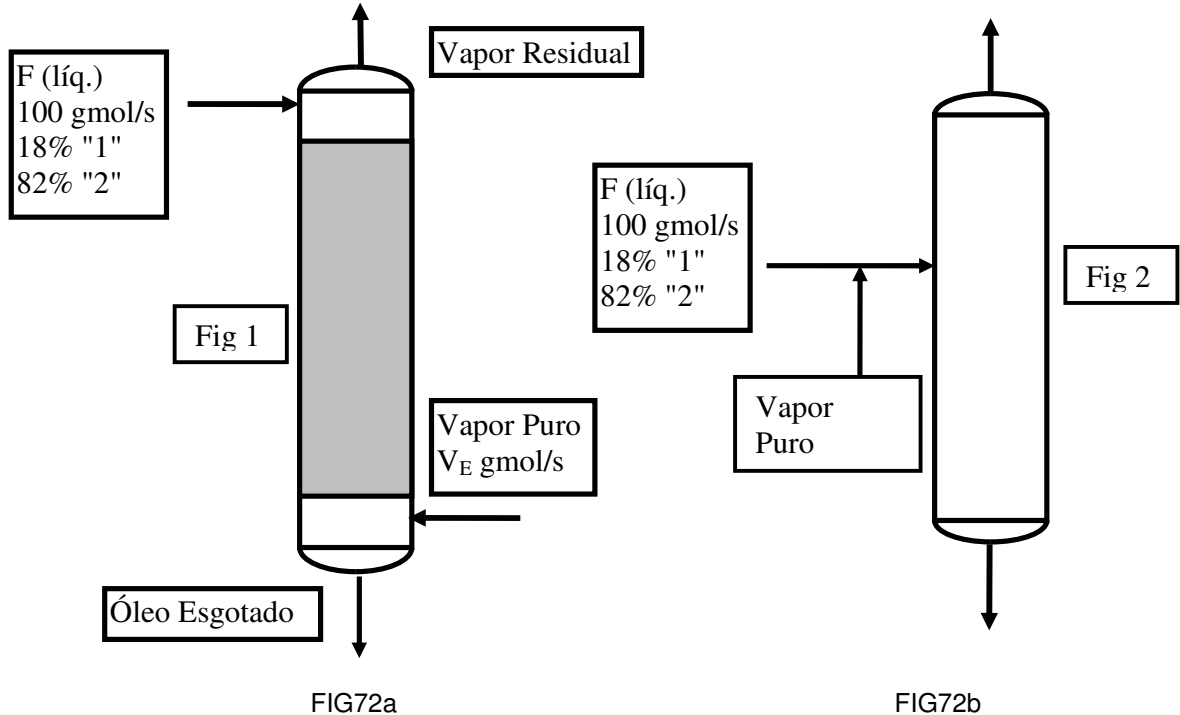
Uma corrente líquida F de 100 gmol/s de óleo vegetal, contém 18% (mol) de contaminante volátil "1" e 82% (mol) de substâncias não voláteis, aqui agrupadas como composto "2". Pretende-se remover 99.5% do composto "1" por esgotamento do óleo em contra-corrente com vapor de água puro e saturado ( $P=1\text{bar}$ ), em coluna de recheio Raschig cerâmico 1" (FIG72a). As correntes são alimentadas a  $T=100^\circ\text{C}$ . Admite-se que o vapor de água é praticamente insolúvel no óleo. Dados relevantes são os seguintes :

- Pressão de vapor de "1" nas condições do processo :  $P_1^{SAT} = 0.8 \text{ bar}$  (aprox. constante)
- Coeficiente de atividade de "1" no óleo vegetal :  $\gamma_1 = 1 + 0.6(X - 1)^2$  ( $X$  : fr. molar de "1" )
- Alturas de Unidades de Transferência:  $H_L = H_G = 0.6\text{m}$  (aprox. constantes)

A partir disto, responda:

- A mínima vazão de vapor ( $V_E^{MIN}$ ) para cumprir o serviço;
- As vazões e composições de todas as correntes nas condições de (i);
- O mínimo comprimento de recheio necessário ( $Z_C^{MIN}$ );
- As vazões e composições de correntes nas condições de (iii);
- Usando-se taxa de vapor 50% superior ao obtido em (i), obter vazões e composições de correntes;
- Nas condições de (v), obter o comprimento de recheio necessário ( $Z_C$ );

(vii) Se, ao invés da coluna, a corrente de vapor obtida em (v) é diretamente contactada com F em vaso de separação (FIG72b), obter as composições e vazões de produtos e a remoção % de "1" obtida.



**Questão 31 (EF – 2004/02):**

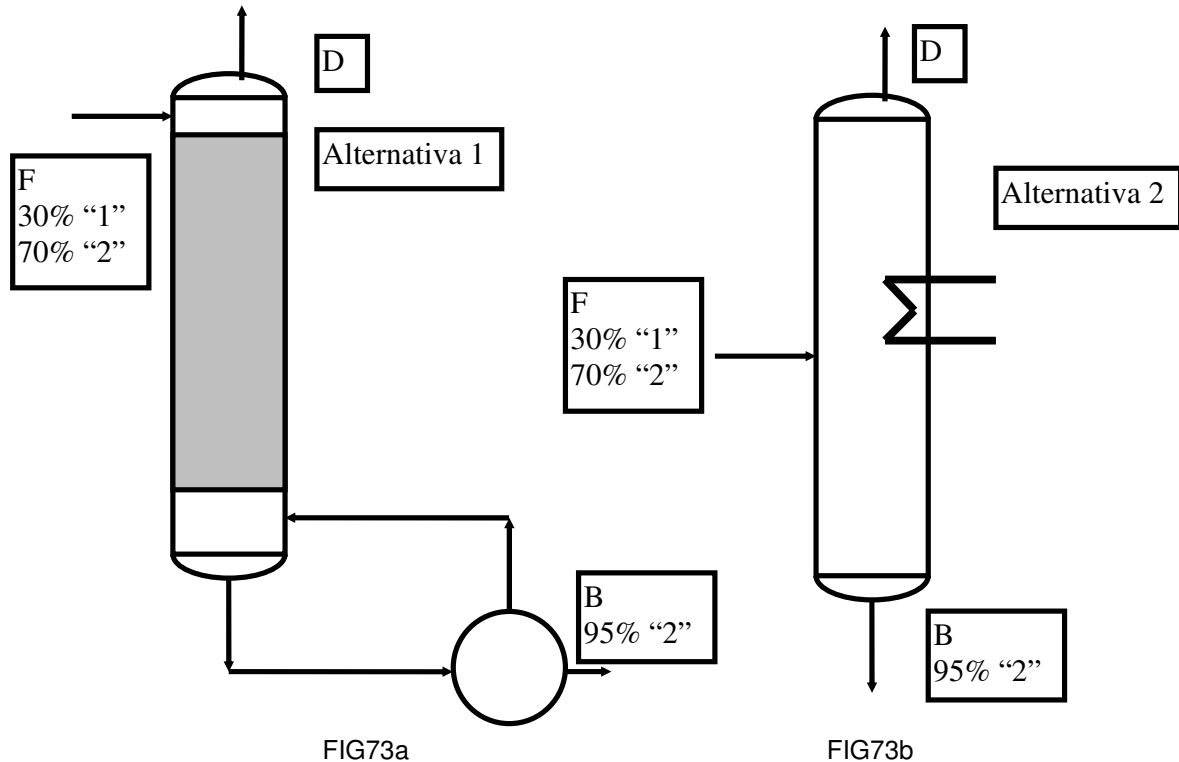
Pretende-se processar corrente F líquida e saturada ( $P=1\text{bar}$ ) tendo 30% (mol) de "1" e 70% (mol) de "2", de modo a obter produto líquido de fundo, B, com 95% mol de "2". Duas alternativas são propostas: (1) coluna de esgotamento em recheio Raschig 1" cerâmico (FIG73a) e o vaso de separação a "flash" (FIG73b). Ambas as unidades deverão produzir líquido de fundo com 95% de "2" e operar a  $P=1\text{bar}$ . A volatilidade relativa "1"/"2" pode ser admitida constante e calculada nas condições de F. Considere os seguintes dados:

- Pressões de vapor  $T(\text{K})$ ,  $P(\text{bar})$  :  
 $P_1^{SAT}(T) = \exp(10 - 3300/T)$ ,  $P_2^{SAT}(T) = \exp(9.8 - 3600/T)$
- Entalpias (kJ/gmol) de Saturação ( $X, Y$  frações molares de "1") :  
 $H_L^{SAT} = 10 + 10X$ ,  $H_V^{SAT} = 50 - 10Y$
- Aplicar aproximação McCabe-Thiele neste problema
- Alturas de unidades de transferência para o recheio:  $H_L = H_G = 0.8m$

A partir disto, determine:

- (i) A razão de refluxo mínima de fundo ( $S^{MIN}$ ) para operar a alternativa (1);
- (ii) As vazões e composições de produtos quando a alternativa (1) opera nas condições do item (i);
- (iii) O mínimo comprimento de recheio necessário à alternativa (1);

- (iv) As vazões e composições de produtos quando a alternativa (1) opera nas condições do item (iii);
- (v) Operando com razão de refluxo de fundo (S) 50% superior à mínima, determine o comprimento necessário de recheio à alternativa (1);
- (vi) As vazões e composições de produtos e a recuperação % de fundo de "2" ( $REC_2\%$ ), quando a alternativa (1) opera nas condições do item (v);
- (vii) Determine se a alternativa (2) poderá cumprir o serviço. Em caso positivo, quais os produtos gerados e a recuperação % de fundo de "2" ( $REC_2\%$ ).



**Questão 32 (EF – 2004/02):**

Admitindo razão de refluxo de fundo (S) 40% superior à mínima no problema anterior, determinar o tamanho da Alternativa 1 acima, no caso em que a coluna opera com pratos perfeitos. Utilizar o Método Ponchon-Savarit nesta resolução.

**Questão 33 (P2 – 2005/01):**

Na figura **coluna de recheio** para retificar carga **vapor saturado** ( $F$  gmol/s) com 50% mol de "A" e o restante em "B". Utiliza-se condensador total gerando-se destilado  $D$  com 95% mol de "A" ( $X_D=0.95$ ). Abaixo dados termodinâmicos e operacionais ( $X, Y$  frações molares de "A").

- Pressão :  $P=30bar$

- Leito Raschig Cerâmico 1" com Alturas de Unidades de Transferência  $H_G = 0.5m, H_L = 0.5m$
- ELV: Usar Volatilidade Relativa Constante Gerada nas **Condições de Carga**
- Fase Líquida é Solução Ideal; Coeficientes de Fugacidade em Fase Vapor :  $\hat{\phi}_A^V = .80; \hat{\phi}_B^V = .83$
- Pressões de Vapor ( $P^{Sat}(\text{bar}), T(\text{K})$ ):  
 $P_A^{Sat}(T) = \exp(10 - 2100/T), P_B^{Sat}(T) = \exp(9 - 2000/T)$
- Entalpia de Vapor e de Líquido Sat. ( $P=30\text{bar}$ ) :  $\bar{H}_V^{Sat} = 30 - 2Y \text{ kJ/gmol}, \bar{H}_L^{Sat} = 10 + 4X \text{ kJ/gmol}$
- Usar Aproximação McCabe-Thiele ao longo da coluna

Determine:

- Máxima produção possível de destilado por gmol de carga ( $D^{MAX}/F$ );
- A razão de refluxo, vazões e composições de produtos nas condições de (i);
- A razão de refluxo, vazões e composições de produtos para a coluna operar com  $D/D^{MAX} = 80\%$ ;
- Carga térmica do condensador por gmol de carga ( $Q_C/F$ ) nas condições de (iii);
- Nas condições de (iii), obter o comprimento de recheio ( $Z_C$ ) da separação.

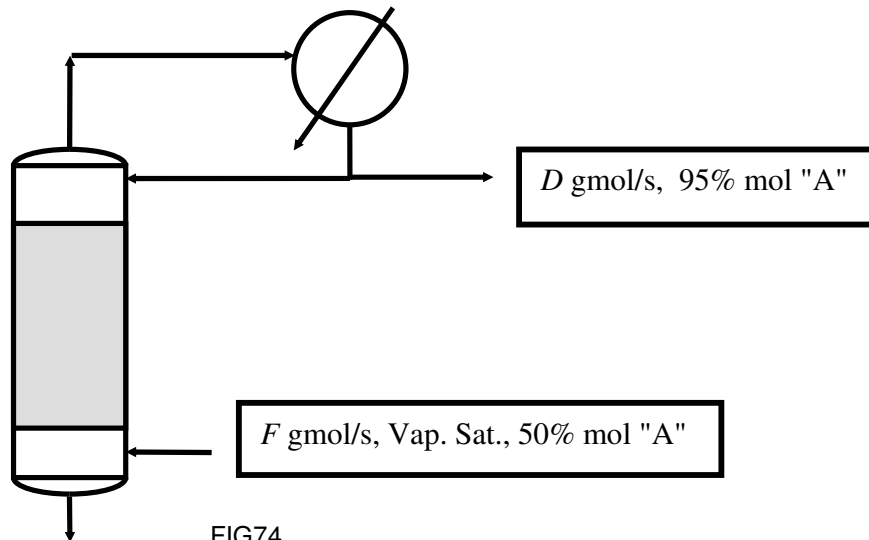


FIG74

**Questão 34 (P2 – 2005/01):**

Considere a separação da questão anterior. Utilize a relação de equilíbrio obtida, dados de entalpia e a razão de refluxo do seu item (iii). Executando-se esta separação em um **retificador de estágios** com condensador total, determine o número de estágios necessários com o Método Ponchon-Savarit.

**Questão 35 (EF – 2005/01):**

Há corrente vapor (VE=100gmol/s) com "A" (50%mol) e "B" (50%mol). Há corrente líquida (LE=150gmol/s) com "A" (3%mol) e "C" (97%mol). LE e VE são contactados para transferir "A" do gás para o líquido, gerando-se produtos LS e VS, respectivamente líquido (com "A" e "C") e vapor (com "A" e "B"). Substâncias "B" e "C" não mudam de fase. XE, YE, XS e YS são frações molares de "A" nas correntes LE, VE, LS e VS. A relação de equilíbrio LV está abaixo. Determine:

$$X^* = Y \left( \frac{1+Y}{3+Y} \right) \quad (X \text{ e } Y \text{ são frações molares de "A", respectivamente nas fases L e V})$$

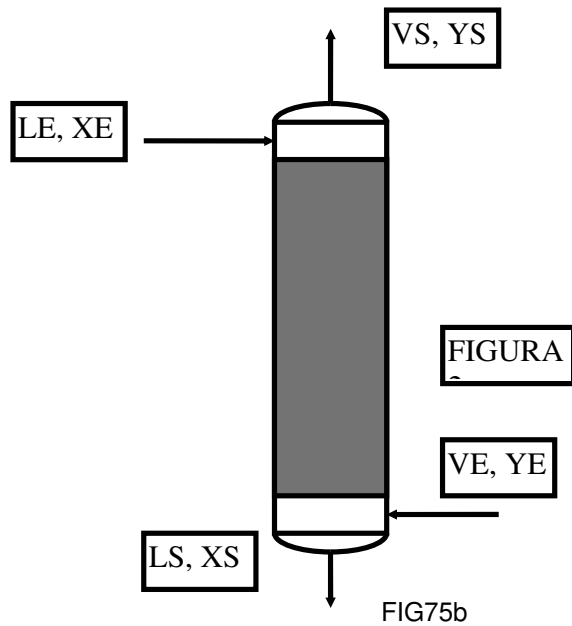
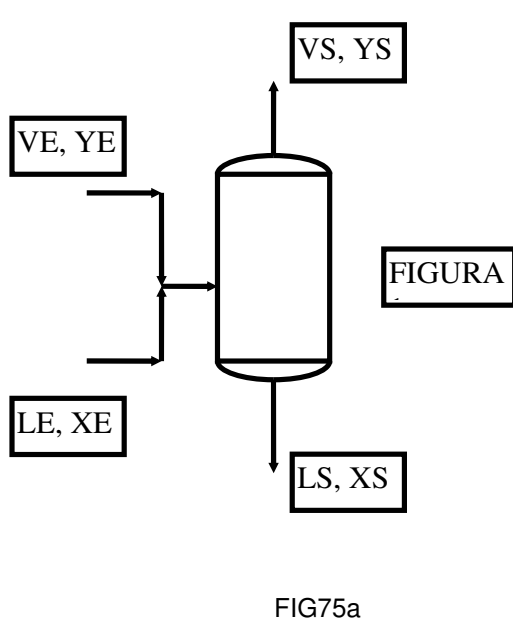
V)

(i) LS, VS, XS, YS se LE, VE são contactadas em vaso de equilíbrio ("flash") (FIG75a);

(ii) LS, VS, XS, YS se LE, VE são contactadas com recheio (FIG75b) retirando o **máximo possível** de "A".

(iii) LS, VS, XS, YS se LE, VE são contactadas com recheio retirando 95% do **máximo possível** de "A".

(iv) O comprimento de recheio nas condições (iii) com alturas de unidades de transferência HL=HG= 1m.



**Questão 36 (P2 – 2005/02):**

Na figura **coluna de recheio** para esgotar carga **líquida saturada** ( $F$  gmol/s) com 50% mol de "1" e o restante em "2". Utiliza-se refeedor parcial gerando-se fundo  $B$  com 2 % mol de "1" ( $X_B=0.02$ ). A razão de refluxo de fundo é  $S$ . Abaixo dados termodinâmicos e operacionais ( $X, Y$  frações molares de "1").

- Pressão:  $P=1\text{bar}$

- Leito Raschig Cerâmico 1" com Alturas de Unidades de Transferência  $H_G = 0.6m$ ,  $H_L = 0.6m$
- ELV : Usar Volatilidade Relativa 12 Constante dada por  $\alpha = 1.95$
- Entalpia de Vapor e de Líq. Sat. ( $P=1bar$ ):  $\bar{H}_V^{Sat} = 40 - 5Y \text{ kJ / gmol}$ ,  
 $\bar{H}_L^{Sat} = 10 + 5X \text{ kJ / gmol}$
- Usar Aproximação McCabe-Thiele ao longo da coluna

Determine:

- Máxima produção possível de fundo por gmol de carga ( $B^{MAX}/F$ );
- A razão de refluxo, vazões e composições de produtos nas condições de (i);
- Mínimo comprimento de recheio necessário ( $Z_C^{MIN}$ ) e os respectivos produtos e composições;
- A razão de refluxo, vazões e composições de produtos para a coluna operar com  $S=2*S^{MIN}$ ;
- Carga térmica do refeedor por gmol de carga ( $Q_R/F$ ) nas condições de (iv);
- Nas condições de (iv), o comprimento de recheio ( $Z_C$ ) da separação.

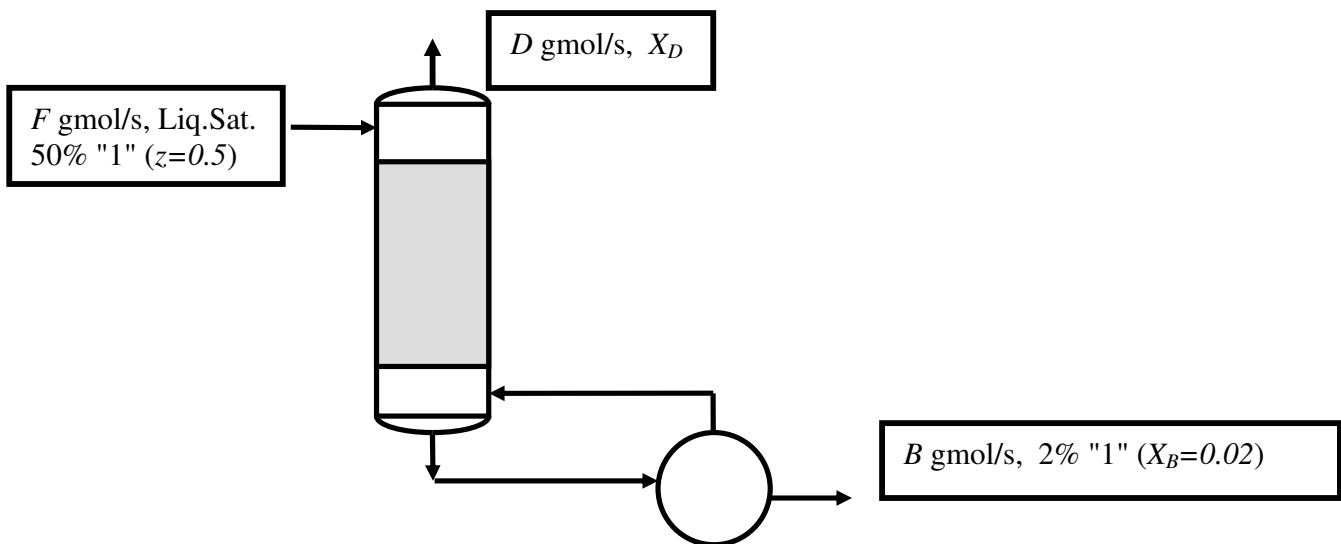


FIG76

**Questão 37 (P2 – 2005/02):**

Considere a separação da QUESTÃO 1. Utilize as relações de equilíbrio e de entalpia dadas e a razão de refluxo do seu item (iv). Executando-se esta separação em um **esgotador de estágios** com **refeedor parcial** (como na figura), determine o número de estágios necessários com o Método Ponchon-Savarit.

**Questão 38 (EF – 2005/02):**

Utiliza-se coluna de recheio (Raschig 1", cerâmico) a  $T=60C$  e  $P=12\text{ bar}$  para esgotar líquido volátil "A" de  $100\text{ gmol/s}$  de corrente líquida contendo 80% (mol) de inerte "B" e 20% (mol) de "A", usando-se contato com  $N_2$  puro em contracorrente (FIG77). O teor final de "A" no produto líquido deve ser inferior a 0.1% (mol). A partir dos dados abaixo, e sendo Y,X frações molares de "A" nas fases V e L, responda:

- Obter relação de equilíbrio líquido-vapor, válida para esta operação, na forma  $Y=g(X)$ ;
- Obter o mínimo consumo de  $N_2$  necessário ( $V_E^{MIN}$ ) e todas as correntes nesta condição de operação;
- Usando vazão de  $N_2$  50% superior à mínima, obter todas as correntes do processo;
- Nas condições de (iii), obter o comprimento necessário de recheio ( $Z_C$ );

**DADOS TERMODINÂMICOS E DE RECHEIO**

- Pressão de saturação de "A" a  $T=60C$ :  $P^{SAT}=6\text{ bar}$
- Alturas de unidades de transferência do recheio:  $H_L=H_G=0.7m$
- Coeficiente de atividade de "A" na fase líquida:  $\gamma_A^{Liq} = \exp(1.2(1-X)^2)$
- Coeficiente de fugacidade de "A" na fase vapor:  $\hat{\phi}_A^{Vap} = 0.9$

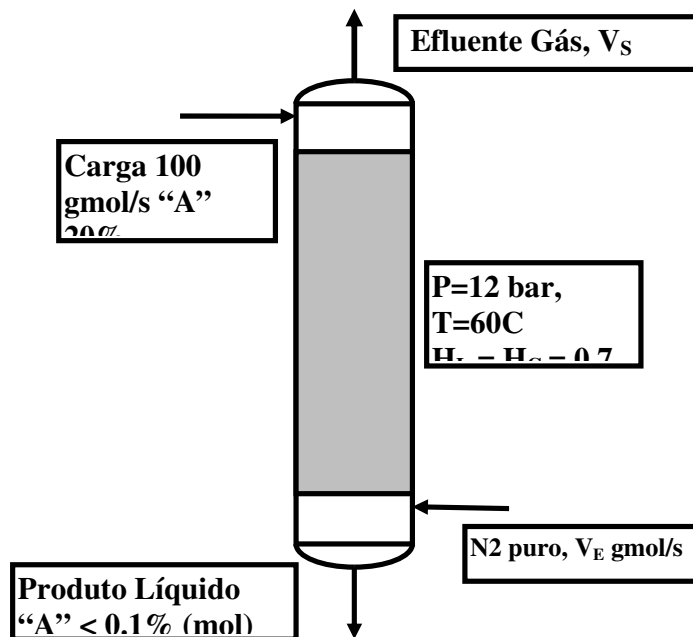


FIG77

**Questão 39 (P2 – 2006/01):**

Na figura **coluna de recheio** para esgotar carga **líquida saturada** ( $F$  gmol/s) com 40% mol de "1" ( $Z=0.4$ ) e o restante em "2". Não há refeedor, por isto injeta-se corrente  $W$  **vapor saturado** de "2" puro na base da coluna, visando a gerar fundo  $B$  (gmol/s) com 1% mol de "1" ( $X_B=0.01$ ). O resíduo vapor no topo da coluna tem vazão  $D$  (gmol/s) e fr. molar  $X_D$  em "1". Dados termodinâmicos/operacionais ( $X, Y$  fr. mol de "1") são:

- Pressão  $P=1bar$  e Entalpias de Vapor e de Líquido Sat. (kJ/gmol)  
 $\bar{H}_V^{Sat} = 40 - Y$ ,  $\bar{H}_L^{Sat} = 10 + 2X$
- Leito Raschig Cerâmico 1" com Alturas de Unidades de Transferência  $H_G = 0.7m$ ,  $H_L = 0.7m$  constantes
- ELV: Volatilidade Relativa constante e igual a 2.1
- Usar Aproximação McCabe-Thiele ao longo da coluna

Determine:

- A equação de operação do processo em termos de  $q=W/F$ ;
- Mínimo consumo de vapor de esgotamento por gmol de carga ( $q^{MIN}=W^{MIN}/F$ ) neste serviço;
- Vazões e composições das correntes externas nas condições de (ii);
- Mínimo comprimento de recheio da separação ( $Z_C^{MIN}$ );
- Vazões e composições das correntes externas nas condições de (iv);
- Vazões e composições das correntes externas para a coluna operar com  $q/q^{MIN} = 1.3$ ;
- O comprimento de recheio ( $Z_C$ ) necessário em (vi).

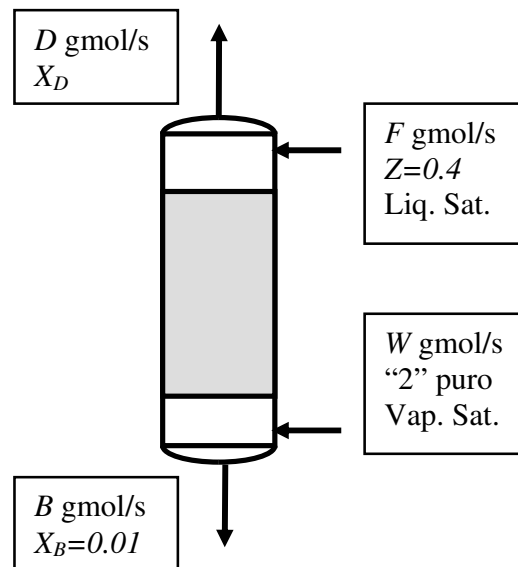


FIG78



**Questão 40 (P2 -2006/01):**

Considere a separação da questão anterior. Utilize a relação de equilíbrio e os dados de entalpia fornecidos. Agora a separação ocorre com  $W/F=0.85$  substituindo-se o recheio por **estágios de equilíbrio**. Responda às questões abaixo com o Método Ponchon-Savarit e considerando o diagrama  $\bar{H}$  vs  $X, Y$ .

- (i) Obter graficamente a corrente  $M$  referente à **Adição Adiabática** de  $F$  e  $W$  usando  $W/F=0.85$ ;
- (ii) Explique por que  $M$  também representa a **Adição Adiabática** de  $D$  e  $B$ ;
- (iii) Com (i) e (ii) obter graficamente  $D$  e  $X_D$ , obtendo assim os valores de  $D/F$ ,  $B/F$ ;
- (iv) Com (iii) obter o número de estágios da separação.

**Questão 41 (EF – 2006/01):**

Na figura **coluna de recheio** para tratar um óleo ( $L_E = 100$  gmol/s) contendo 20% mol de componente volátil "A" ( $X_E=0.2$ ) e o restante em componente não volátil "B". O objetivo é remover 99% do "A" existente no óleo via contato em contracorrente com  $V_E$  gmol/s de  $CH_4$  puro gás injetado na base da coluna. O resíduo gás no topo da coluna tem vazão  $V_S$  (gmol/s) e fr. molar  $Y_S$  em "A", enquanto o óleo tratado de fundo tem vazão  $L_S$  (gmol/s) e fr. Molar  $X_S$  em "A". Admita que o  $CH_4$  não é solúvel no óleo. Dados termodinâmicos e operacionais ( $X, Y$  fr. mol de "A" no óleo e no gás, respectivamente), são:

- Pressão  $P=3bar$ , ELV :  $X^* = Y/3 + Y^2/6$
- Leito Raschig Cerâmico 1"
- Alturas de Unidades de Transferência  $H_G = H_L = 0.6m$

Determine:

- (i) A mínima vazão de gás alimentado ( $V_E^{MIN}$ ) para o serviço;
- (ii) Vazões/composições de correntes externas nas condições de (i);
- (iii) Mínimo comprimento de recheio da separação ( $Z_C^{MIN}$ );
- (iv) Vazões/composições de correntes externas nas condições de (iii);
- (v) Vazões/composições de correntes externas com  $V_E/V_E^{MIN} = 1.4$ ;
- (vi) O comprimento de recheio ( $Z_C$ ) necessário em (v).

A figura referente a esse exercício (FIG79) encontra-se na próxima página.

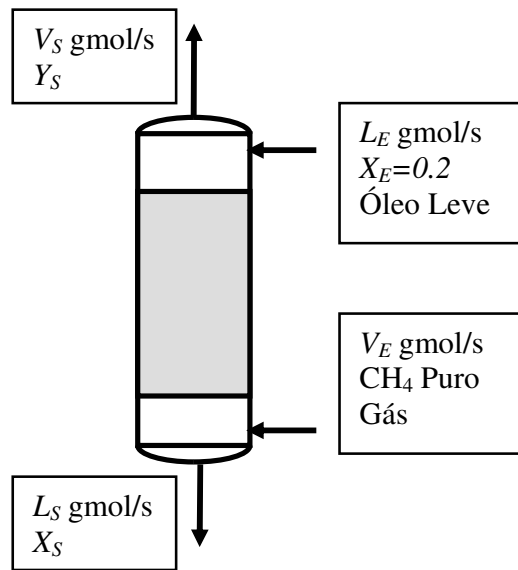


FIG79

**Questão 42 (P2 – 2006/02):**

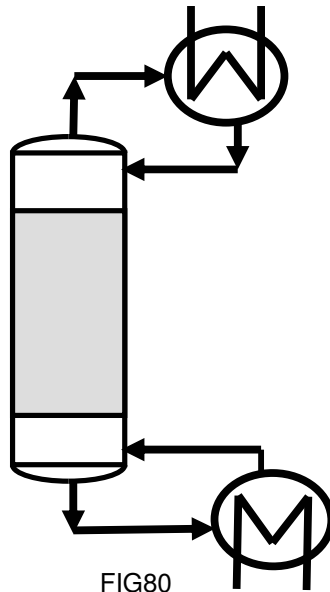
Na figura coluna de recheio de laboratório operando estacionariamente em *refluxo total* (i.e. em qualquer ponto da coluna as vazões de líquido e vapor são iguais). Usamos espécies "1" e "2" com volatilidade relativa constante ( $\alpha_{12}=2.1$ ). As correntes que deixam os trocadores de calor estão *saturadas*. Dados termodinâmicos e operacionais ( $X, Y$  são fr. molares de "1") são:

- Pressão  $P=1\text{bar}$ ;
- Seção de recheio com comprimento  $Z_C=2.5\text{m}$ ;
- Entalpias de Vapor e Líq. Sat. (kJ/mol)  $\bar{H}_V^{Sat} = 50 - 10Y$ ,  $\bar{H}_L^{Sat} = 10 + 5X$
- Composição **da fase líquida na saída** do condensador:  $X_D=0.9$
- Composição **da fase líquida no interior** do refeedor:  $X_B=0.1$
- Usar Aproximação McCabe-Thiele ao longo da coluna

Determine:

- A Equação de Operação para cálculos de recheio;
- As composições nas entradas e saídas dos trocadores de calor;
- O Número de Unidades de Transferência  $Nog$  e a respectiva Altura de Unidade de Transferência  $Hog$ ;
- O Número de Unidades de Transferência  $Nol$  e a respectiva Altura de Unidade de Transferência  $Hol$ ;

A figura referente a esse exercício (FIG80) encontra-se na próxima página.

**Questão 43 (P2 – 2006/02):**

Considere a separação da QUESTÃO 1 com os mesmos  $X_D$ ,  $X_B$ , dados de equilíbrio e de entalpia. A unidade é idêntica, exceto que o recheio é substituído por **pratos perfeitos (i.e. de equilíbrio)**. Responda os itens abaixo com o Método Ponchon-Savarit no diagrama  $\bar{H}$  vs  $X, Y$ .

- (i) Determinar quantos **pratos perfeitos** são necessários na coluna;
- (ii) Sabendo que a carga térmica do reteredor é de 3700 W, obter a carga térmica do condensador;
- (iii) Calcular as **vazões de entrada e de saída** do condensador e do reteredor nas condições (ii).

**Questão 44 (EF – 2006/02):**

Na figura **coluna de recheio** para tratar carga  $F$  (50% mol "1" + 50% mol "2") vapor e saturada na pressão do processo de  $P=1\text{bar}$ , visando a produto de topo  $D$  vapor com fração molar  $X_D$  em "1". O Rejeito de fundo tem  $B$  mol/s com fração molar  $X_B$  em "1". A coluna é alimentada no topo com  $W$  mol/s de líquido saturado com 98% mol de "1". O leito de recheio mede  $Z_C=5\text{m}$ . Dados termodinâmicos e operacionais ( $X, Y$  fr. mol de "1" no líquido e vapor, respectivamente), são:

- Pressão  $P=1\text{bar}$ ; ELV :  $Y^* = \frac{9X}{3+5X+X^2}$
- Usar Aproximação McCabe-Thiele

- Alturas de Unidades de Transferência  $H_G = H_L = 1m$

Determine:

- O Valor da Constante de Henry de "1" em "2";
  - Expressão para a Volatilidade Relativa 12;
  - A Equação de Operação da unidade em termos de  $W/F$ ;
  - O máximo teor de "1" obtível no topo ( $X_D^{MAX}$ );
  - Vazões/composições de correntes externas na condição de (iv);
- Considere, a partir deste ponto, a operação com  $X_D=95\%$  de  $X_D^{MAX}$ .

Determine:

- Mínimo comprimento de recheio da separação ( $Z_C^{MIN}$ );
- Vazões/composições de correntes externas na condição de (vi);
- Mínima razão de líquido de topo ( $W^{MIN}/F$ ) e vazões/composições de correntes externas para este  $X_D$ ;
- Vazões/composições de correntes externas com  $W/F=2* W^{MIN}/F$ ;
- Determine se a unidade cumprirá o serviço sendo operada como em (ix);
- Considere agora a coluna operando **com pratos** no lugar do recheio; usando os mesmos  $X_D$  e  $W/F$  do item anterior, determine o **número de pratos** necessários para cumprir o serviço.

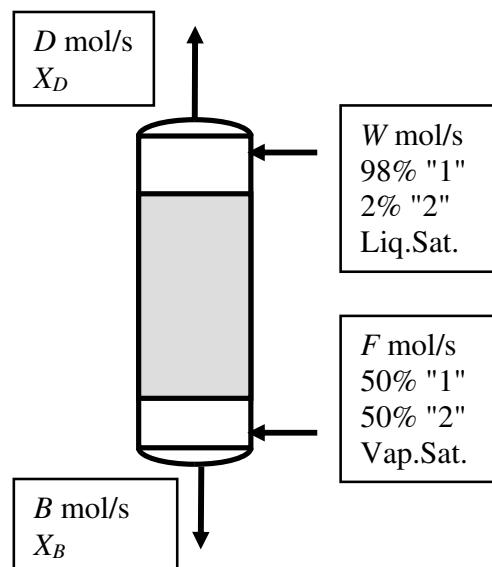


FIG81

**Questão 45 (2C – 2006/02):**

A Figura 3 representa operação de recheio para tratar corrente  $V_E$  gás com 100gmol/s sendo 30% mol "A" e 70% mol "I", de modo a gerar produto de topo  $V_S$  com 99.9% mol "I". A espécie "I" não se dissolve na fase líquida. A coluna é alimentada no topo com corrente líquida  $L_E$  contendo "B" puro. A absorção de "A" na fase líquida é auxiliada pela sua destruição **via reação química de equilíbrio**

$A+B \leftrightarrow C$  a qual obedece à relação de equilíbrio químico  $K = \frac{X_C}{X_A \cdot X_B}$  onde  $Y, X$

representam frações molares nas fases gás e líquida. As espécies "B" e "C" não vaporizam. Dados termodinâmicos e da operação seguem abaixo. A partir disto, responda:

(i) Mostre, pelo equilíbrio químico na fase líquida em toda coluna, que  $X_B = \frac{1 - X_A}{1 + X_A}$ ,  $X_C = \frac{(1 - X_A) \cdot X_A}{1 + X_A}$

(ii) Mostre que a soma de vazões de "B" e "C" é constante em toda a fase líquida da coluna. Denomine esta soma de  $L_I$ , a vazão de "inerte" da fase líquida;

(iii) Mostre que  $L = \frac{L_I}{1 - X_A}$  onde  $L$  é a vazão molar da fase líquida em algum ponto

da coluna;

(iv) Sendo  $X_A$  a fração molar de "A" na fase líquida em algum ponto da coluna, obtenha a taxa (gmol/s) de "A" convertido em "C" desde o topo da operação até este ponto;

(v) Com (iv), obter a Equação de Operação do processo;

(vi) Determinar a mínima taxa de líquido de topo ( $L_E^{MIN}$ ) para o serviço;

(vii) Determinar as vazões e composições externas da coluna na condição (vi);

(viii) Usando  $L_E = 1.4 * L_E^{MIN}$ , determine as vazões e composições externas da coluna;

(ix) Determine o comprimento necessário de recheio ( $Z_C$ ) nas condições do item (viii).

Dados:

- Relação ELV para "A" :  $X_A^* = \frac{4Y_A}{2 + 3Y_A + Y_A^2}$ ; "B" e "C" não-voláteis; "I" não-condensável;
- $K=1$  (Constante de Equilíbrio Químico)
- $P=5 \text{ bar}$ , Recheio Raschig 1" Cer, Operação aproximadamente isotérmica a 320K.
- Alturas de unidades de transferência:  $H_L=1\text{m}$ ,  $H_G=1 \text{ m}$ .

A figura referente a esse exercício (FIG82) encontra-se na próxima página.

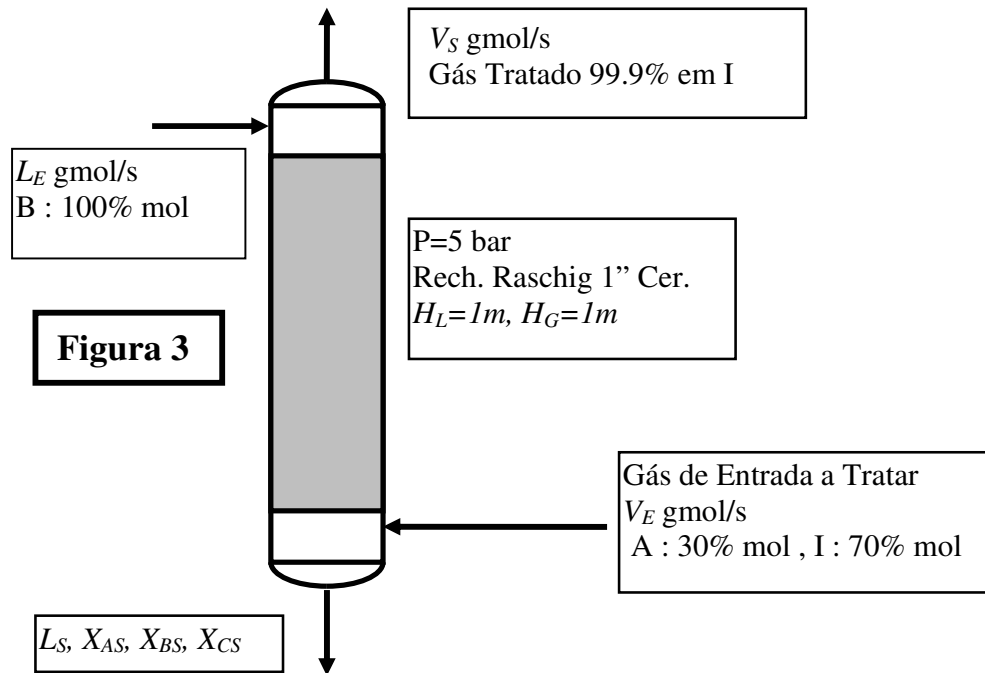


FIG82

**Questão 46 (P2 – 2007/01):**

Na figura **coluna de recheio** para esgotar carga **líquida saturada** ( $F$  gmol/s) com 50% mol de "1" e o restante em "2". Utiliza-se refeedor parcial gerando fundo  $B$  com 2 % mol de "1" ( $X_B=0.02$ ). A razão de refluxo de fundo é  $S$ . Abaixo dados termodinâmicos e operacionais ( $X, Y$  frações molares de "1").

- Pressão  $P=1bar$ ; Razão de pressões de vapor :  $P_1^{SAT} / P_2^{SAT} = 1.8$  (aprox. constante)
- Fase líquida não ideal com  $\bar{G}^E / RT = AX_1X_2(1 + X_1)$ ; Azeótropo em  $P=1bar$  com 90% mol "1"
- Leito Raschig Cerâmico 1" com Alturas de Unidades de Transferência  $H_G = H_L = 0.5m$
- Entalpias de Vapor e de Líq. Sat. ( $P=1bar$ ):  $\bar{H}_V^{Sat} = 50 - 10Y$  kJ/gmol,  $\bar{H}_L^{Sat} = 10 - 5X$  kJ/gmol
- Usar Aproximação McCabe-Thiele ao longo da coluna

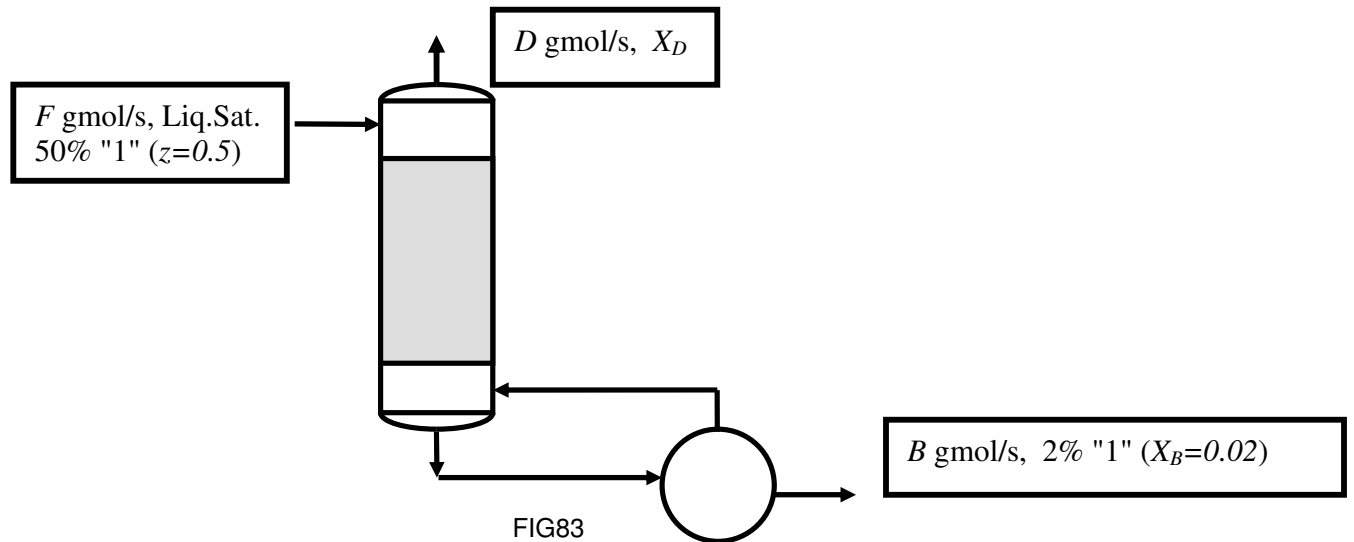
Determine:

- Mínima carga térmica de refeedor por mol de carga ( $\mathcal{Q}_{REF}^{MIN} / F$ ) que é possível usar;
- A razão de refluxo, vazões e composições de produtos nas condições de (i);
- A carga térmica por mol de carga e os produtos gerados para operar com **mínimo tamanho** de recheio;

(iv) A razão de refluxo, vazões e composições de produtos para operar a

$$\mathcal{Q}_{REF} / F = 1.1 * \mathcal{Q}_{REF}^{MIN} / F ;$$

(v) Nas condições de (iv), o comprimento de recheio ( $Z_C$ ) da separação.



#### Questão 47 (P2 – 2007/01):

Considere a separação da questão anterior em **esgotador de pratos e refulvedor parcial**. Utilize relações de equilíbrio e de entalpia dadas. Responda usando **exclusivamente** o Método Ponchon-Savarit:

- (i) Refazer itens (i), (ii) e (iv) da Questão 1;
- (ii) Determinar o Número de Estágios necessários para a separação.

#### Questão 48 (EF – 2007/01):

Na figura **coluna de recheio** para tratar carga vapor  $F$  (20% mol "1" + 80% mol "2") na pressão do processo de  $P=5\text{bar}$ , visando a produto de topo  $V_S$  vapor com 1% mol "1".

O processo alimenta solvente  $L_E$  (mol/s) pelo topo com 0.2% mol em "1". Dados termodinâmicos e operacionais ( $X, Y$  fração molar de "1" no líquido e vapor respectivamente), são:

- Pressão  $P=5\text{bar}$ , Relação ELV :  $Y^* = 2X + X^2 / 2$
- Solvente em  $L_E$  é não volátil e não dissolve "2"
- Alturas de Unidades de Transferência  $H_G = H_L = 0.6\text{m}$

Determine:

- (i) O valor da Constante de Henry de "1" no solvente;
- (ii) A Equação de Operação da unidade;
- (iii) O mínimo consumo de solvente ( $L_E^{MIN}$ ) para o serviço;
- (iv) Vazões/composições de correntes externas para o item (iii);

- (v) Vazões/composições de correntes externas com  $L_E / L_E^{MIN} = 1.4$  ;  
 (vi) O comprimento do leito de recheio nas condições do item (v);

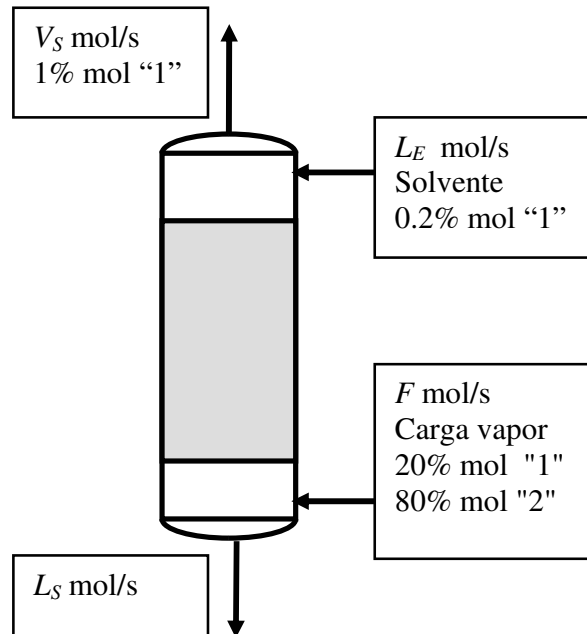


FIG84

**Questão 49 (P2 – 2007/02):**

Na figura, coluna de recheio a  $P=1bar$  para remover a umidade ( $H_2O$ ) da corrente **gasosa**  $F=100gmol/s$  com  $10\%mol H_2O + 90\%mol N_2$ . A coluna opera contato do gás em contracorrente com solução líquida  $S$  contendo  $60\%mol H_2O + 40\%mol H_2SO_4$ . O gás tratado  $G$  deve ter  $0.2\%mol$  de  $H_2O$ . O líquido residual  $W$  deixa a coluna pelo fundo. Embora haja efeitos térmicos, a coluna é refrigerada de modo que todas as correntes estão a  $50^\circ C$ . Dados termodinâmicos e operacionais ( $X, Y$  são fr. molares  $H_2O$  em cada fase) são:

- $P=1bar, T=50^\circ C$  (aprox. cte)
- Alturas de unidades de transferência do recheio  $H_L=H_G=1m$
- Fugacidade de  $H_2O$  (bar) na fase líquida a  $50^\circ C$ :

$$f_{H_2O} = 0.04656 * X^5 - 0.3071 * X^7 + 1.334 * X^{10} - 0.9502 * X^{12}$$

Determine:

- (i) A mínima vazão de solução  $S^{MIN}$  para cumprir o serviço;  
 (ii) O mínimo comprimento de recheio ( $Z_C^{MIN}$ ) deste serviço;



- (iii) As vazões e composições de produtos em (ii);  
(iv) Com  $S = 1.6 * S^{MIN}$  obter vazões e composições de produtos;  
(v) Obter o comprimento de recheio ( $Z_C$ ) nas condições de (iv).

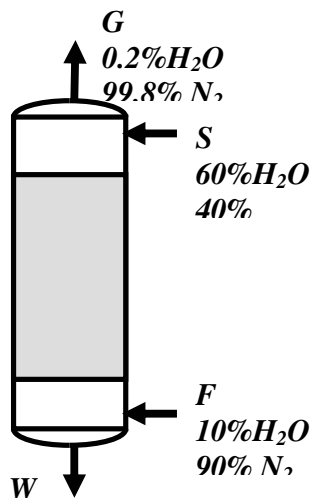


FIG85