APOSTILA DE EXERCÍCIOS

EQE 483 – OPERAÇÕES UNITÁRIAS II

Professor: José Luiz de Medeiros

Índice:

Apresentação----------03
Lista de Exercícios----------04
Capitulo I –Análise de Graus de Liberdade em processos de Separação-05
Capítulo IV – Método McCabe-Thiele para Destilação Binária----------07
Capítulo V – Destilação em Batelada (Binária)----------28
Capítulo VI – Método Ponchon-Savarit para Destilação Binária----------
Capítulo VII - Projeto para Destilação de Multicomponentes – Método de Fenske-Underwood-Gilliland----------67
Capítulo VII – 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 (nc) é maior que 4 e que a numeração de componentes segue ordem decrescente de volatilidades relativas (isto é, "1" é o mais volátil e "nc" o menos volátil). Nesta lista identificam-se 4 componentes chaves i,j,m,n, dispostos em ordem decrescente de volatividade (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.

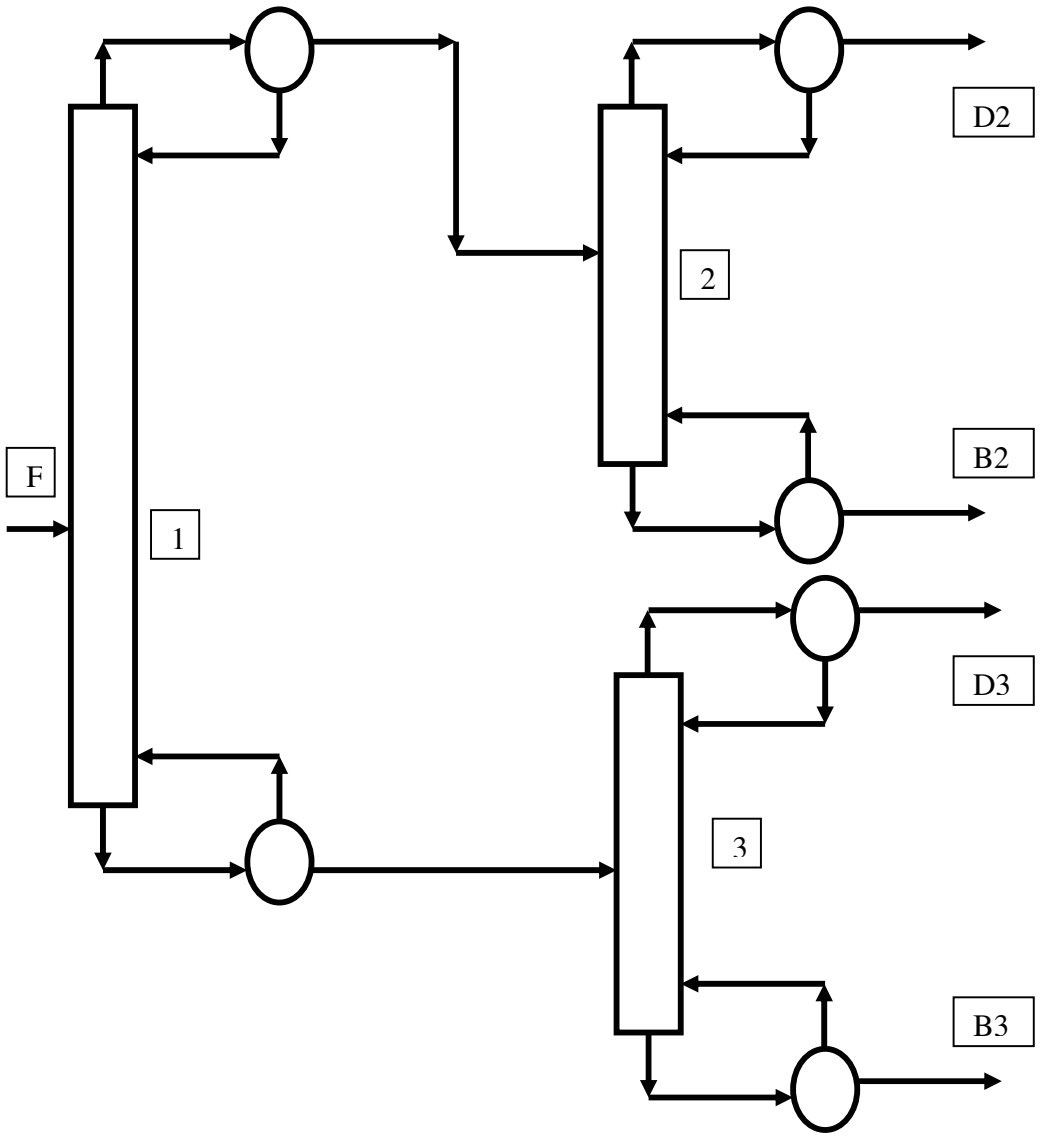

FIG01

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: $P_1^{SAT}/P_2^{SAT} = 4$, $G^E/RT = X_1*X_2$ (X_i fr.mol. "i") , λ = 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 refervedor 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:

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

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" obtenível no produto de topo ($\mathbf{X_D^{MAX}}$) ?

(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 refervedor?

(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: $P_1^{SAT}/P_2^{SAT} = 2$, $G^E/RT = 0.5*X_1*X_2*(1+X_1)$ (X_i fr.mol. "i") , λ = 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 refervedor 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:

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

(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.

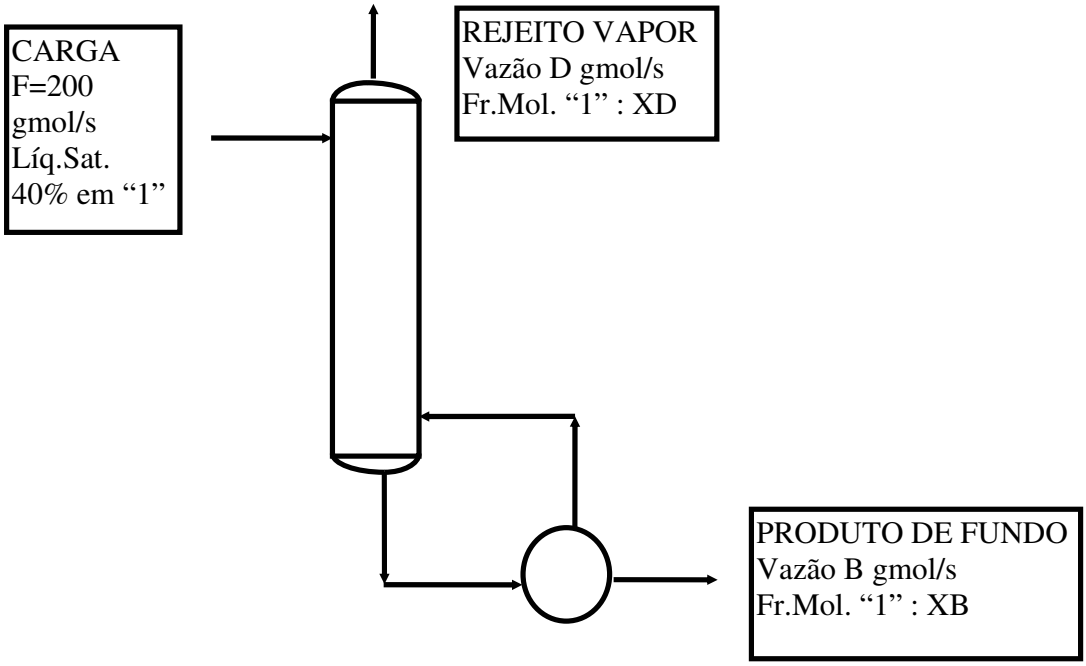

FIG02

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 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 obtenível, 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 $D=0.9*D^{MAX}$.

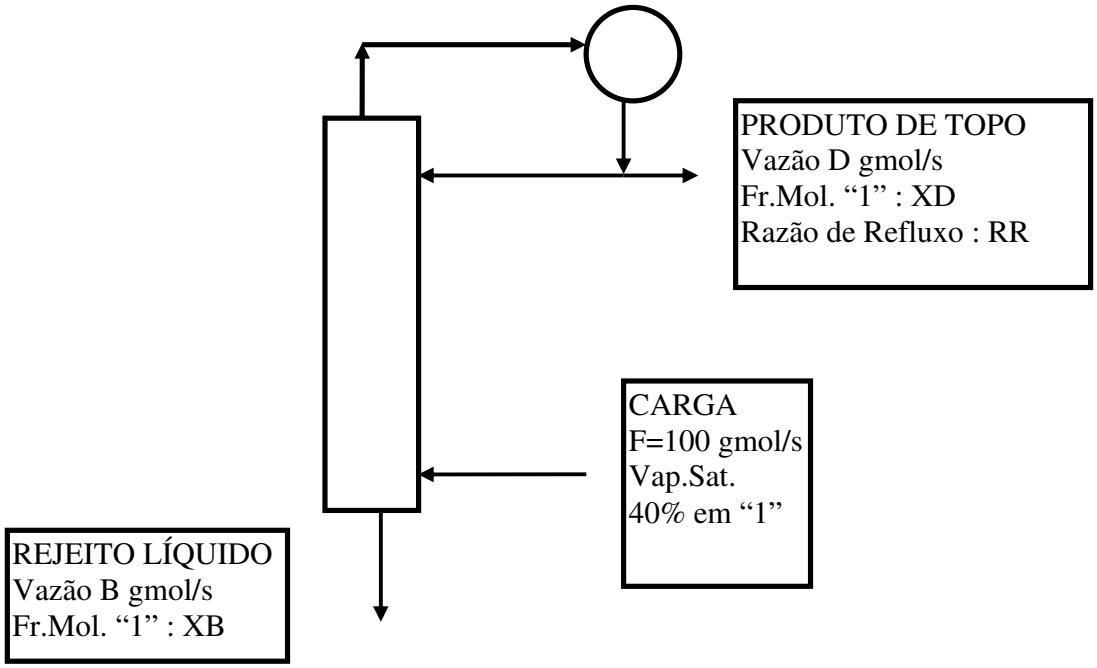

FIG03

Questão 04 (P1 – 2000/01):

A Figura representa uma unidade de destilação para fracionar as correntes F1 (50% (mol) de "1", 50% (mol) de "2") e F2 (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 refervedor, sendo alimentada inferiormente com vapor puro "2" superaquecido em 30 °C. A recuperação de topo

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 refervedor 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): $P_1 = \exp(10 - 3800/T)$, $P_2 = \exp(8.5 - 3800/T)$ ($T \equiv K$, $P \equiv bar$)
- Há azeótropo neste sistema em P=1bar 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 bar
- $Cp^{liq} = 100$, $Cp^{vap} = 40$ (J/gmol.K), Calor de vaporização a 25°C : $\lambda = 40000$ (J/gmol)

Obs – A figura está na página seguinte.

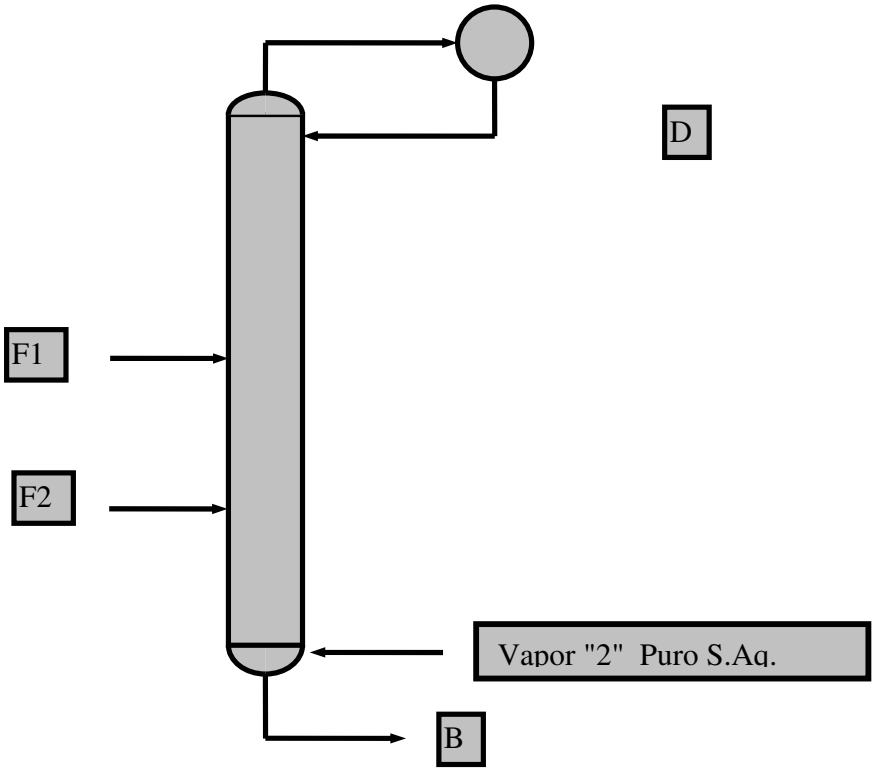

FIG04

Questão 05 (P1 – 2001/02):

Considere a mistura M formada por "1"e "2", líquida e saturada em *P=1 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 bar, com 98% mol de "1"
- Entalpia média de vaporização: λ=40 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 refervedor). Adotando $X_1 \equiv X$, responda :

(i) Obter $\alpha_{12}(X)$ e a relação de equilíbrio LV em *P=1 bar*.

(ii) Obter a máxima composição em "1" do destilado (X_D^{MAX}) que é possível atingir nesta coluna;

(iii) Informar a razão de refluxo utilizada e as vazões de produtos nas condições de (ii);

(iv) Admita operação com $X_D=0.9*X_D^{MAX}$. 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*) :

$S = (\frac{Z - X_B}{X_D - Z})(RR + 1)$ onde Z, X_B, X_D são frações molares de "1" na carga, destilado e fundo;

(vi) Admita disponível carga térmica de 1000 kW no refervedor. 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.

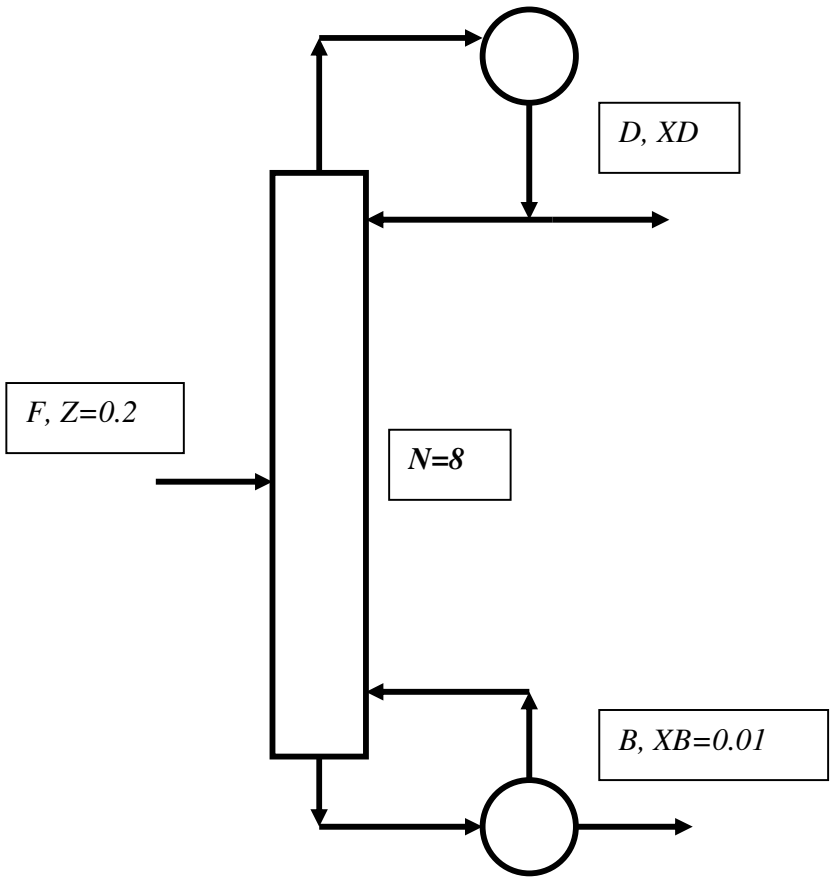

FIG05

Questão 06 (P1 – 2002/01):

Considere a mistura M formada por "1" e "2", líquida e saturada em *P=1 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 bar, com 98.5% mol de "1"
- Entalpia de vaporização média: *λ=30000 J/gmol*

Pretende-se processar 100 gmol/s de M de modo a gerar produto de fundo com 0.1% (mol) em "1" na coluna abaixo com N=8 estágios perfeitos (incluindo refervedor). 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?

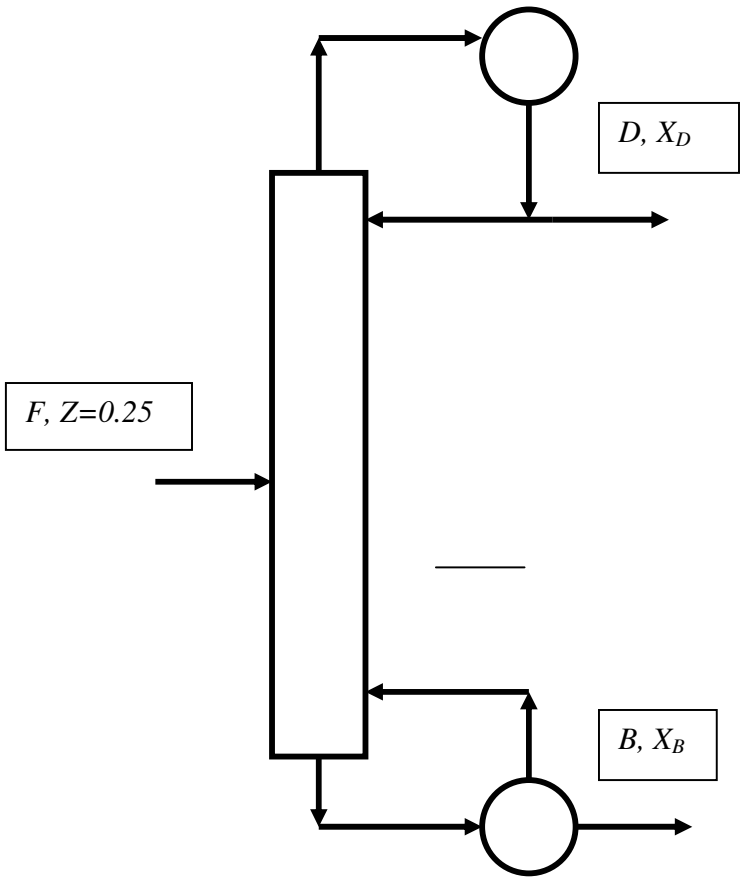

FIG06

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: *λ=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):
(i) Relação de equilíbrio LV na forma *Y=g(X);*
(ii) O mínimo número de estágios requeridos por **RT** para este serviço;
(iii) Os valores de *F, D, B,* X_B*, RR e* $REC_1\%$ nas condições de (ii);
(iv) A máxima produção possível a **RT** (D^{MAX});
(v) Os valores de *F, D, B,* X_B*, RR e* $REC_1\%$ nas condições de (iv);
(vi) 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;
(vii) 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.

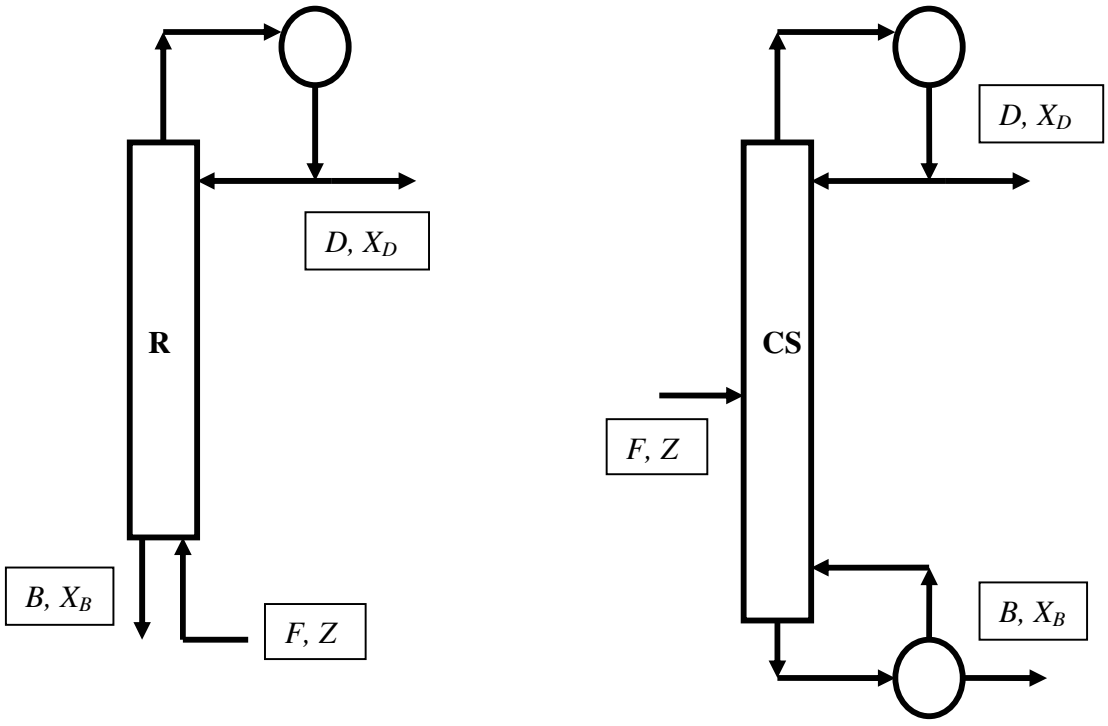

FIG07

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** dispondo 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 substancias 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.

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

Tabela 1.

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

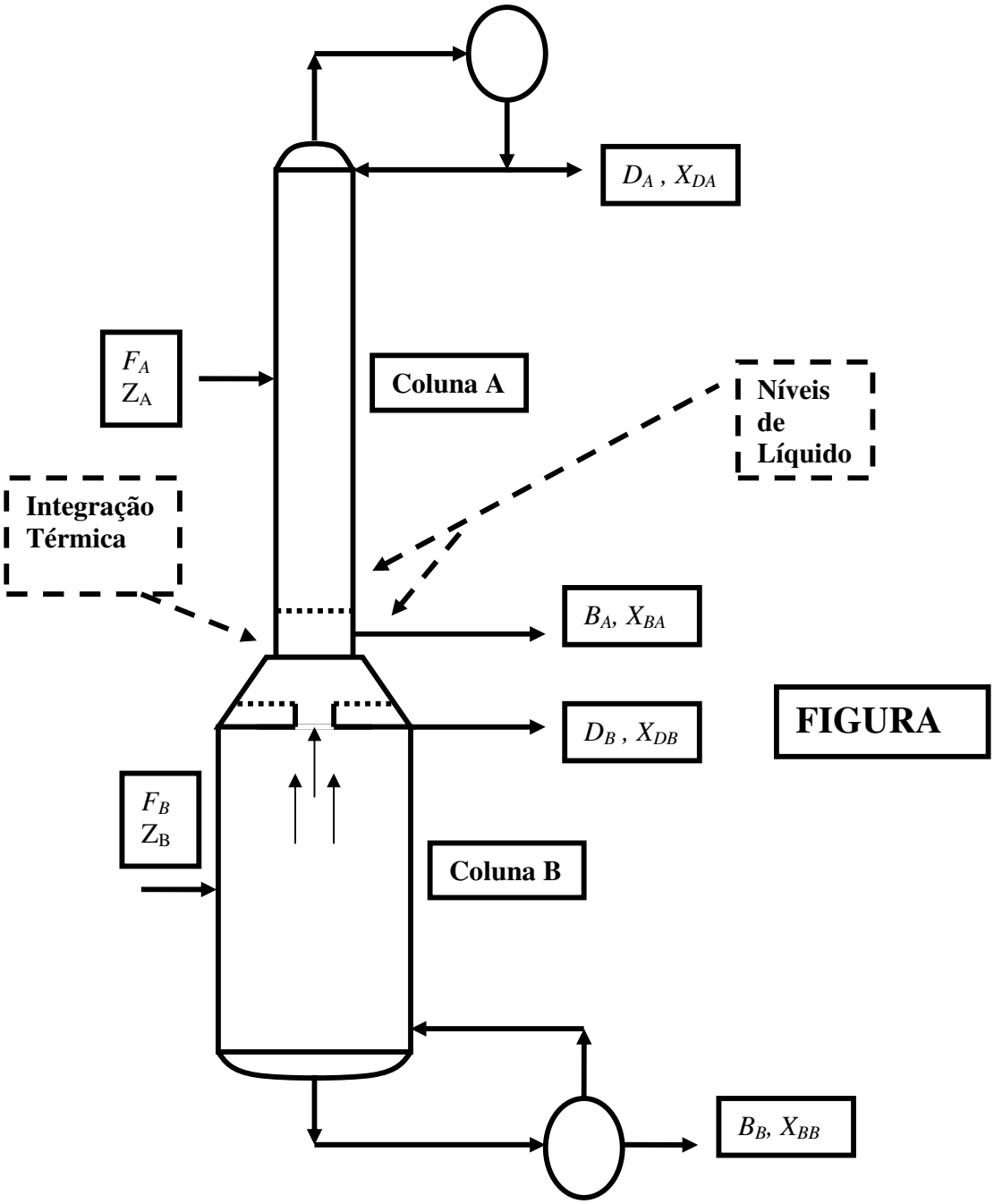
D_A , X_{DA}
F_A
Z_A
Coluna A
Níveis de Líquido
Integração Térmica
B_A, X_{BA}
D_B , X_{DB}
FIGURA
F_B
Z_B
Coluna B
B_B, X_{BB}

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

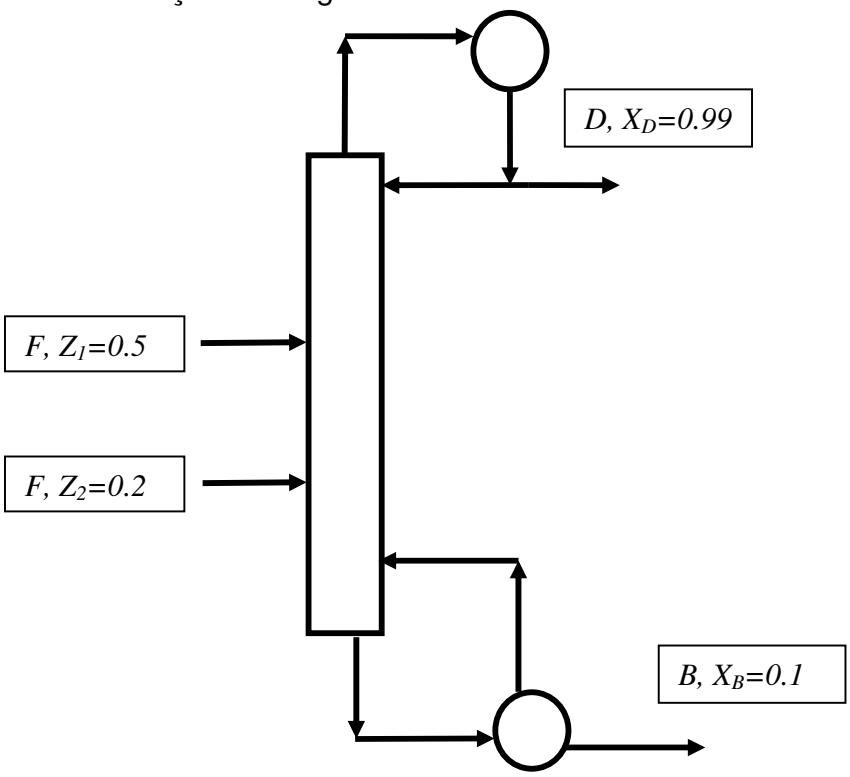

FIG09

Questão 10 (P1 – 2004/01):

A coluna abaixo opera a P=1 bar sendo alimentada com cargas *F1* (100 gmol/s, vapor saturado, 40% mol de "1") e *F2* (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 *F0* 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, F0* 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, ($F0^{MIN}$);
(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, F0,* 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 *F0* 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, F0,* 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 F1 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 obtenível 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.

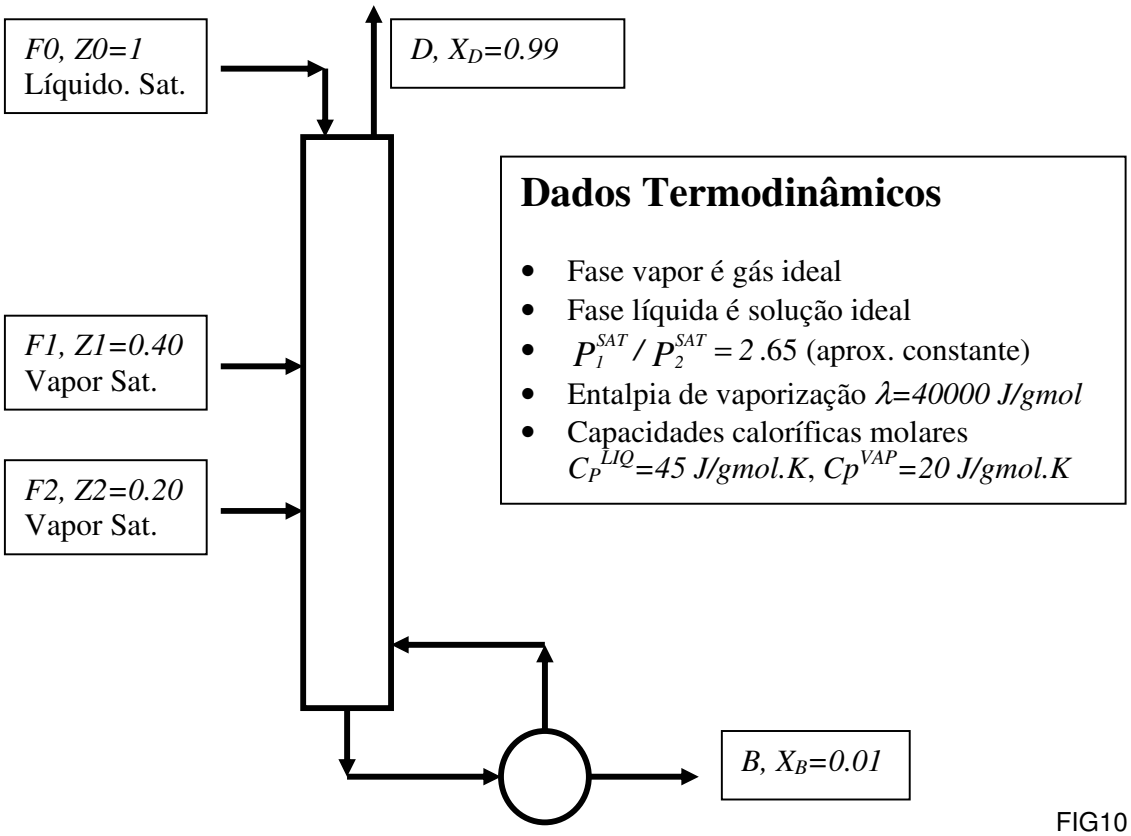

FIG10

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 $2G$ gmol/s ($G>0$), estando 50% (mol) vapor na pressão do processo. O produto de topo (vazão D gmol/s, fração molar X_D em "1") é vapor saturado. O produto de fundo (vazão B gmol/s, fração molar X_B em "1") é líquido saturado. Como a coluna não dispõe de condensador nem de refervedor, 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 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 ∞ 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 $Y_{01} = \dfrac{2Z(F/G) + X_D}{1 + 2(F/G)}$, $X_{01} = \dfrac{2Z(F/G) + X_B}{1 + 2(F/G)}$, $X_{01} + Y_{01} = 2Z$

(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 $\dfrac{F}{G} = 2\left(\dfrac{F^{\infty}}{G}\right)$

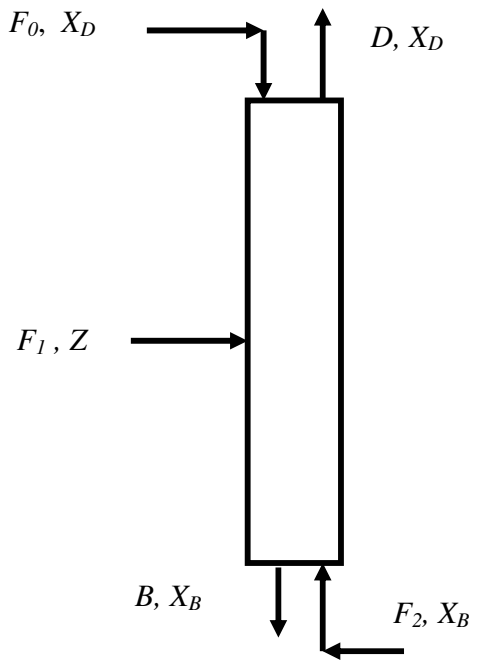

FIG11

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

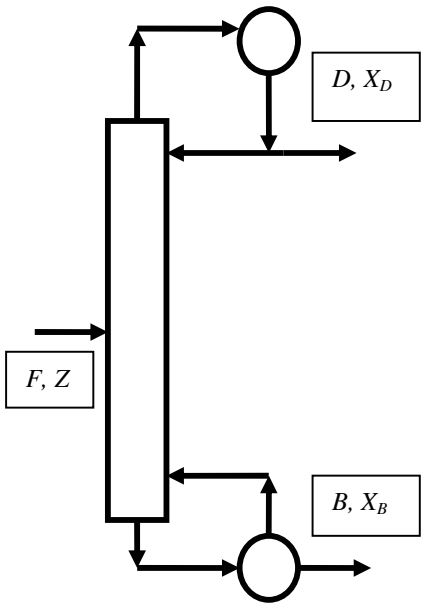

FIG12

Questão 13 (P1 – 2005/02):

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

- Fase líquida descrita por $\overline{G}^E / RT = Ax_1x_2$ 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
(i) 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 $REC_2'\%$.

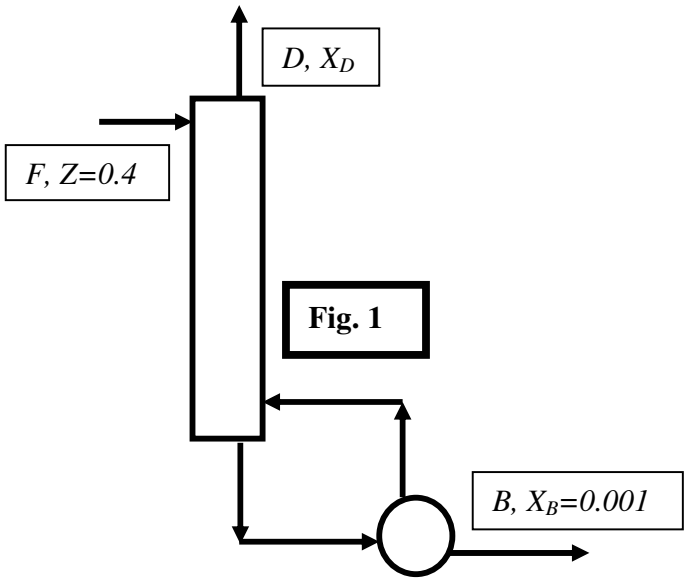

FIG13

Questão 14 (P1 – 2006/01):

Na Figura abaixo coluna com *N=12* estágios teóricos (refervedor 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, $P \equiv$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.

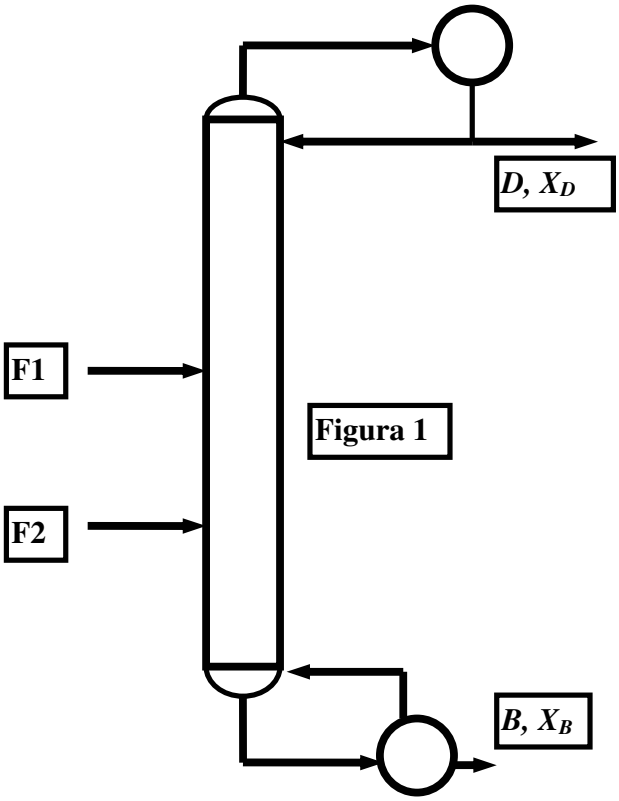

FIG14

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, $P \equiv$bar). A partir disto, responda:
(i) Mostre que $1 = X_D+3X_B$ 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.
A figura referente a esse exercício (FIG15) encontra-se na próxima página.

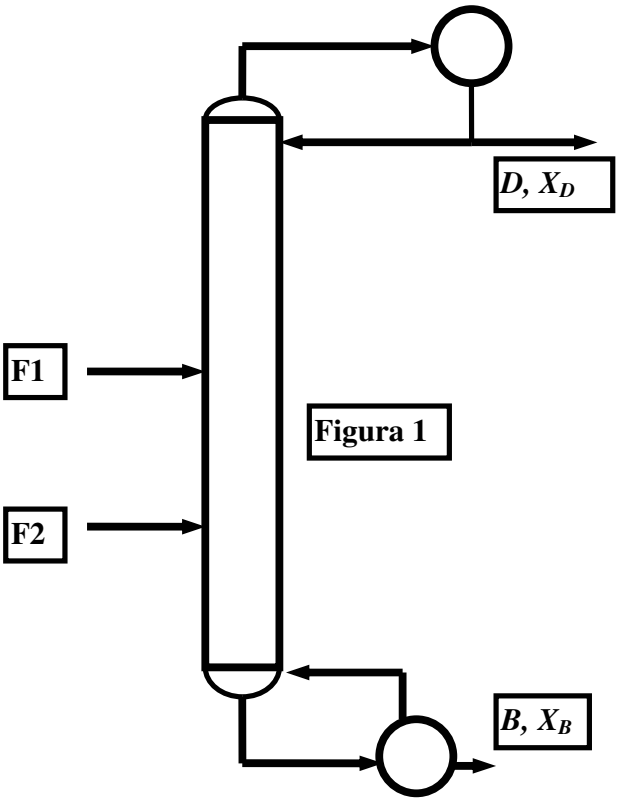

FIG15

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 refervedor (T_B), permitindo troca de calor para a geração do vapor do fundo (V_1) 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 α_D e α_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 : $W = \frac{\gamma R T_D}{\gamma - 1}(\Omega^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1)$, $\Omega = P_C / P$, $R=8.31*10^{-3}$ *kJ/mol.K.*

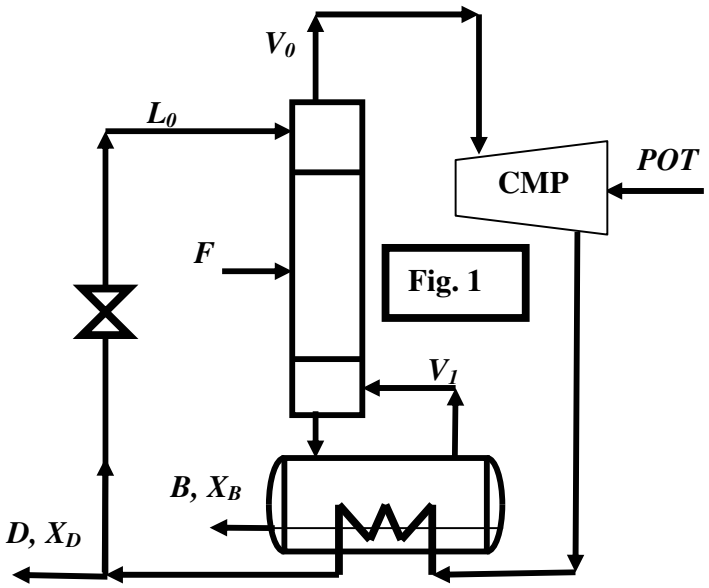

FIG16

Questão 17 (EF – 2007/01):

Uma coluna de destilação com *N=12* estágios teóricos ao todo (incluindo condensador e refervedor 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 $\overline{G}^E / RT = AX_1X_2$ 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^{∞} *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.

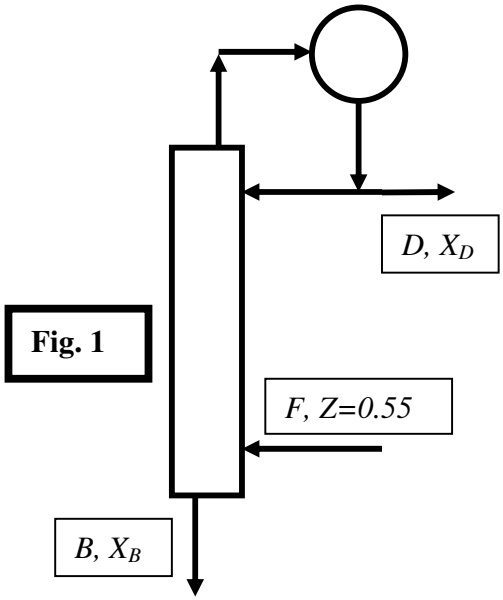

FIG17

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 refervedor 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;

Característica da Operação	**DB1**	**DB2**
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.

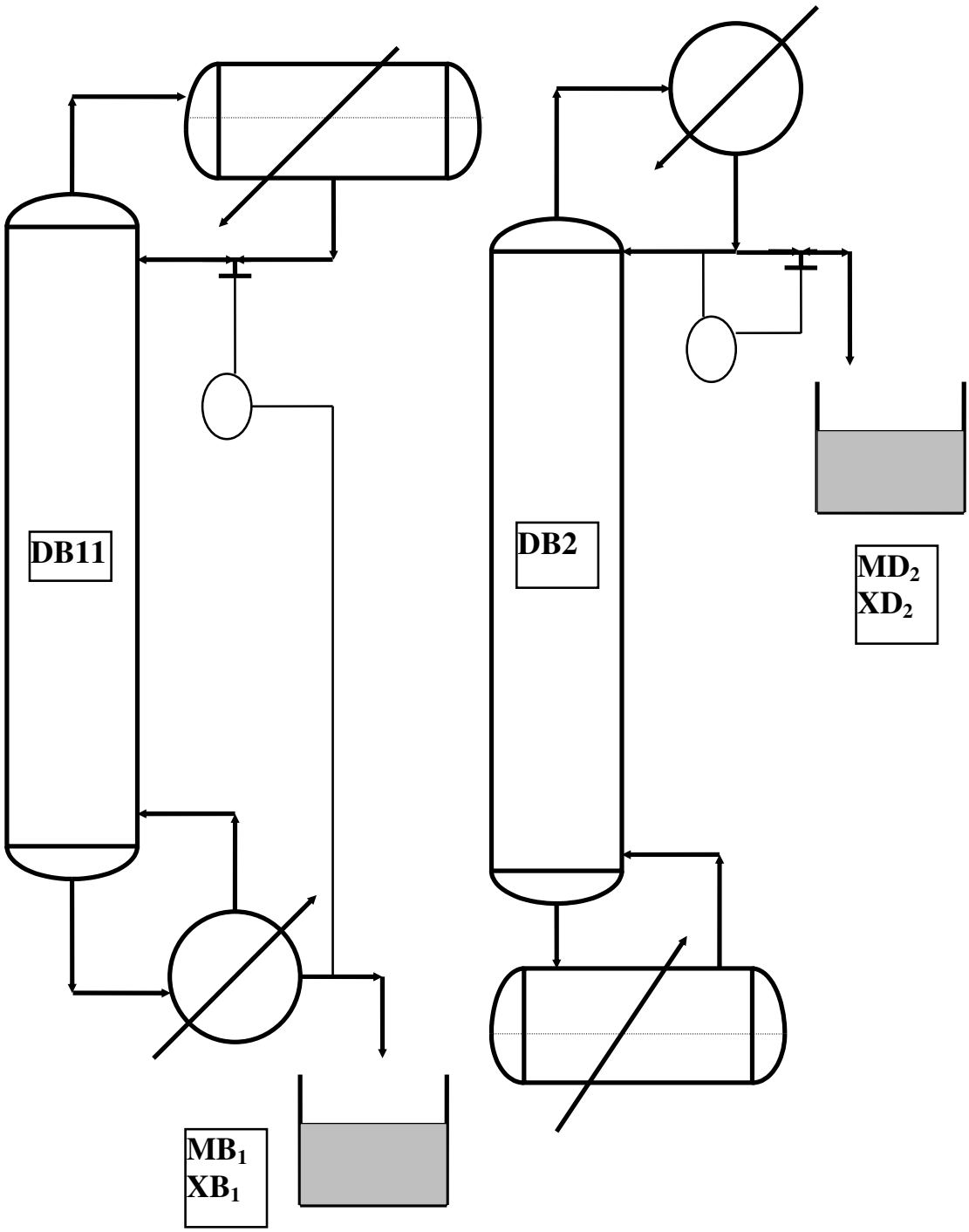

FIG18

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 refervedor 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.

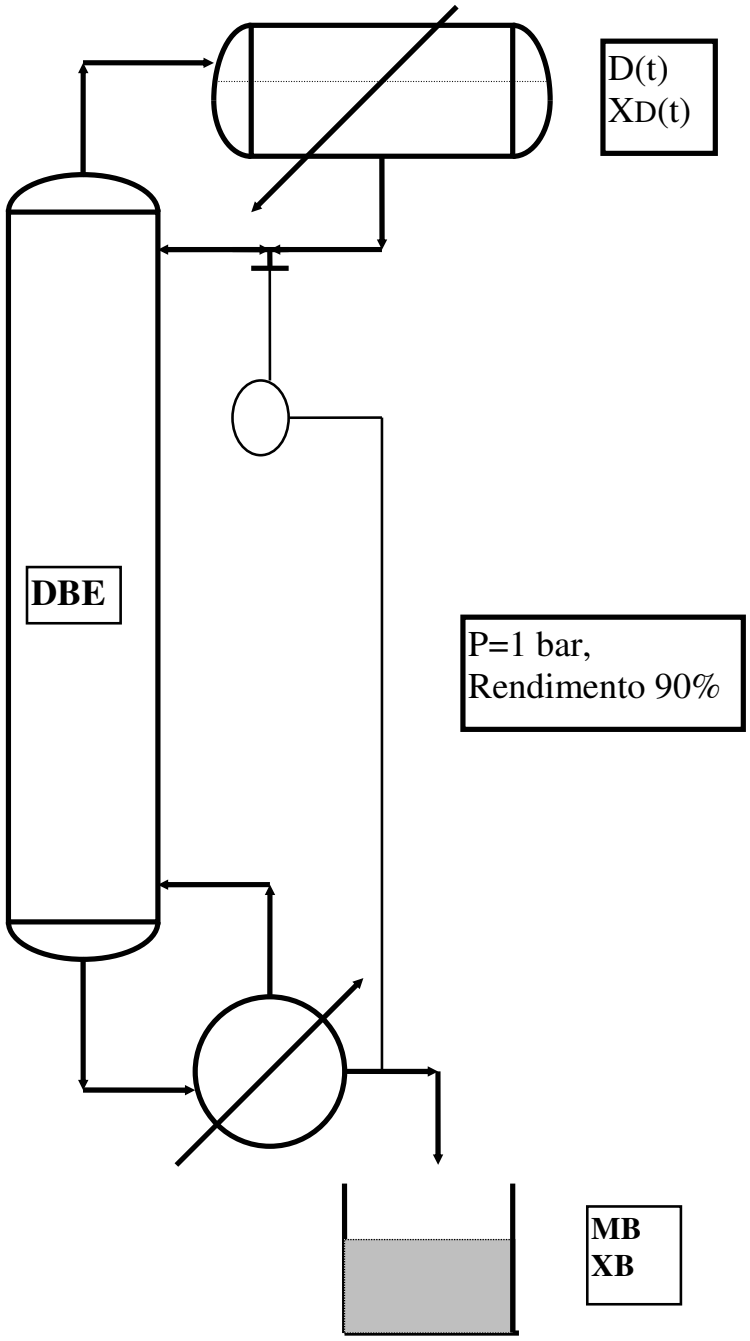

FIG19

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 ½ 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+Refervedor)	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	D1 gmol, XD_1 (em "1")	B_2 gmol, XB_2 (em "1")
Rendimento ($Prod/Prod^{MAX}$ %)	90%	90%

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

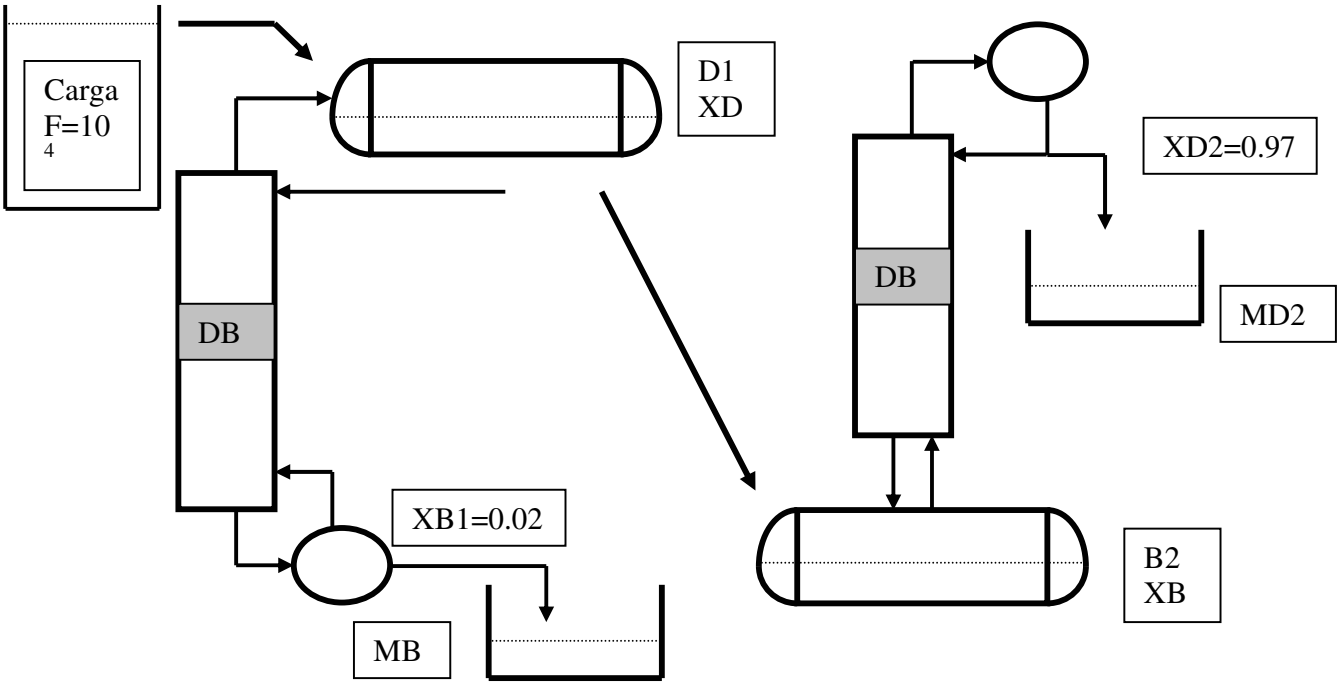

FIG20

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:

(i) Obter $\alpha_{12}(X)$ e a relação de equilíbrio LV em P=1 bar, obtendo A_{12}, A_{21}. (ii) Mostre que este sistema é azeotrópico e estime intervalo para a composição azeotrópica.

(iii) 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).

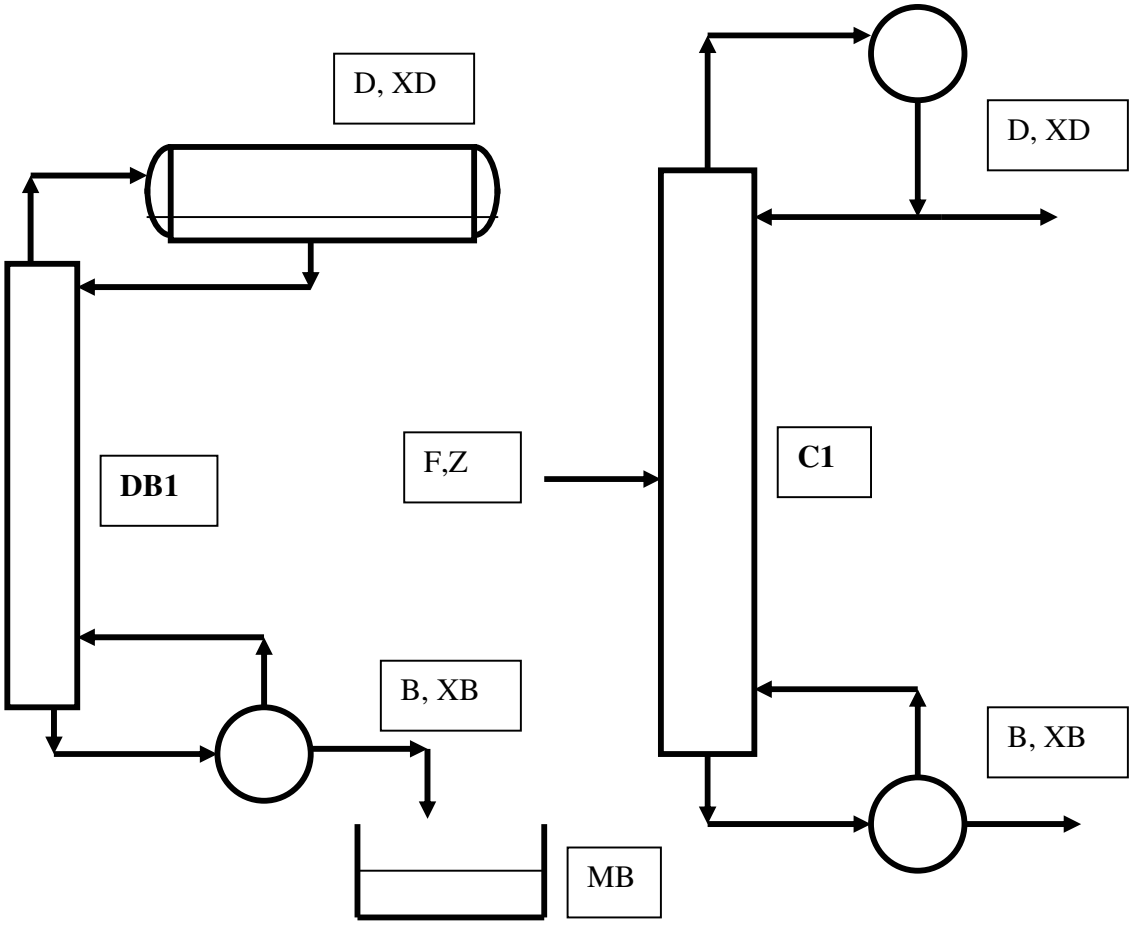

FIG21

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 : λ=50000 J/gmol

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

(i) Obter a volatilidade relativa $\alpha_{12}(X)$ e a relação de equilíbrio LV em P=1 bar.

(ii) Mostre que este sistema é azeotrópico e obtenha a composição azeotrópica (*XAZ*).

(iii) Considerando a operação **FLS** obter: *F, D, B, XD e REC2'%;*

(iv) Considerando a operação **EC** obter: F^{MAX}, B^{MAX}, *D*, XD^{MAX}, S^{MIN}, $REC2'\%^{MAX}$;

(v) 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'%*;

(vi) Considerando a operação **CS** nas condições de (v), obter RR^{MIN}, S^{MIN};

(vii) Considerando operação **EBC1+EBC2** com *XB1=0.07* e 3 estágios perfeitos (incluindo refervedor) por ciclo, obter MB^{MAX}/F, $H1^{MIN}/F$, $H2^{MIN}/F$, $XD1^{MAX}$, $XD2^{MAX}$, $REC2'\%^{MAX}$

(viii) Explique as diferenças de **FLS, EC** e **CS** e ordene seus desempenhos. Qual é mais eficiente?

(ix) Considere **CS** operando a 70% de D^{MAX}. Obter *F, D, B, XD e REC2'%, RR, S*;

(x) 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.

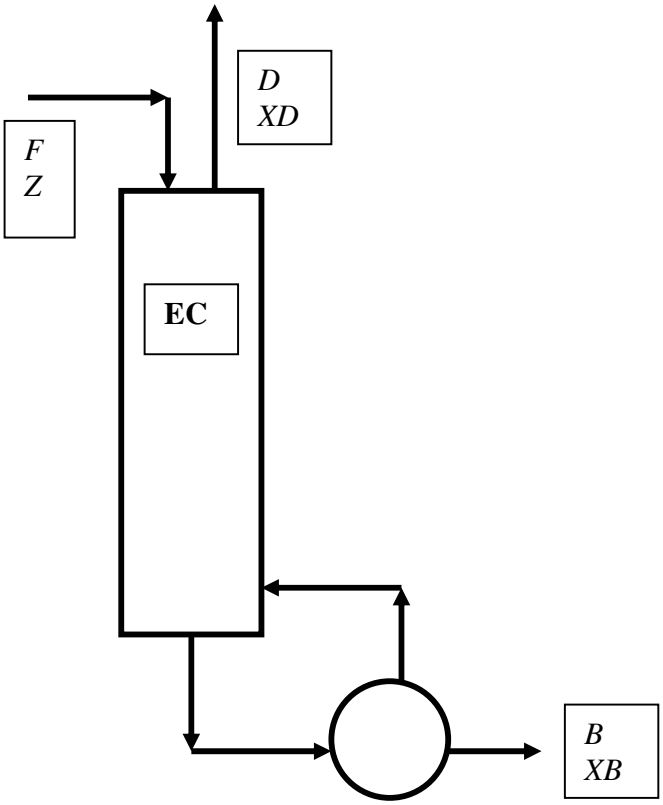

FIG22A

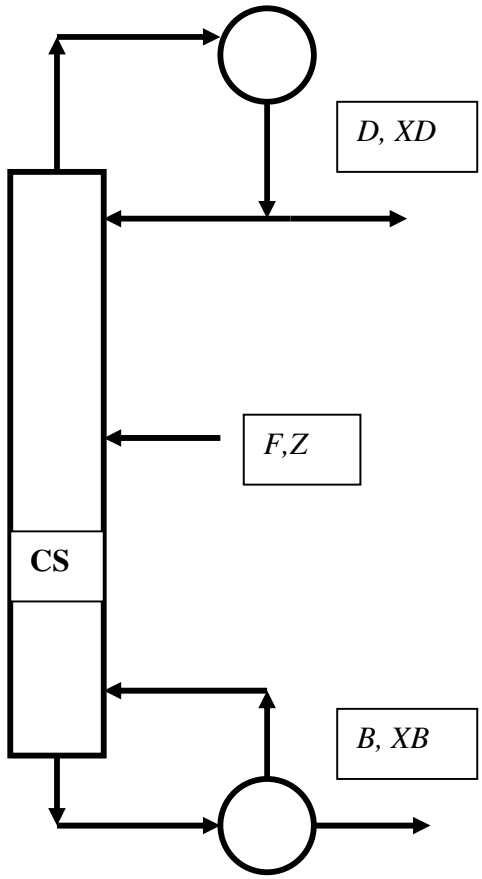

FIG22B

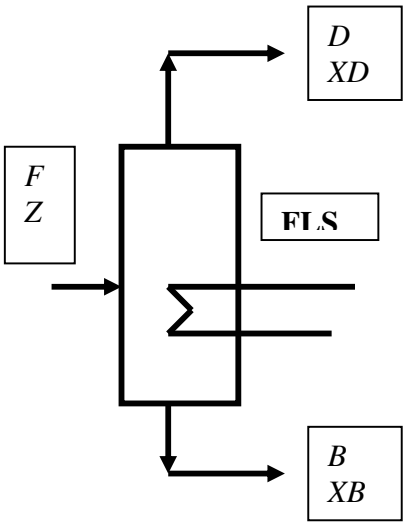

FIG22C

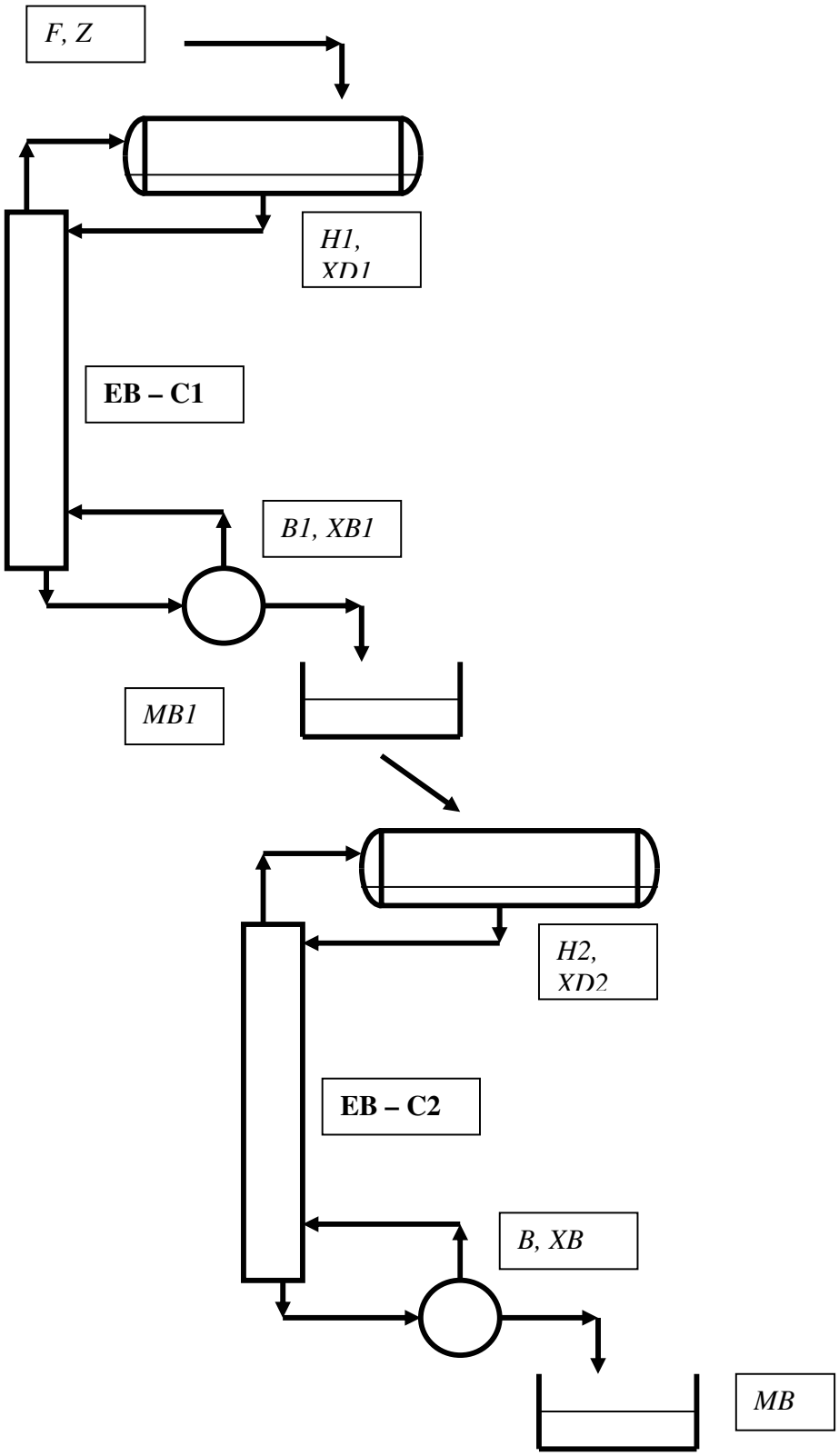

FIG22D

Questão 06 (P1 – 2001/02):

Considere 10000 gmol de mistura formada por "1" "2", líquida e saturada em *P=1 bar*, com 30% mol em "1". Admite-se volatilidade relativa constante (α*=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 gmol/s* : Vazão de Vapor gerado no refervedor que é a mesma que percorre as seções;
- *B=1 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.

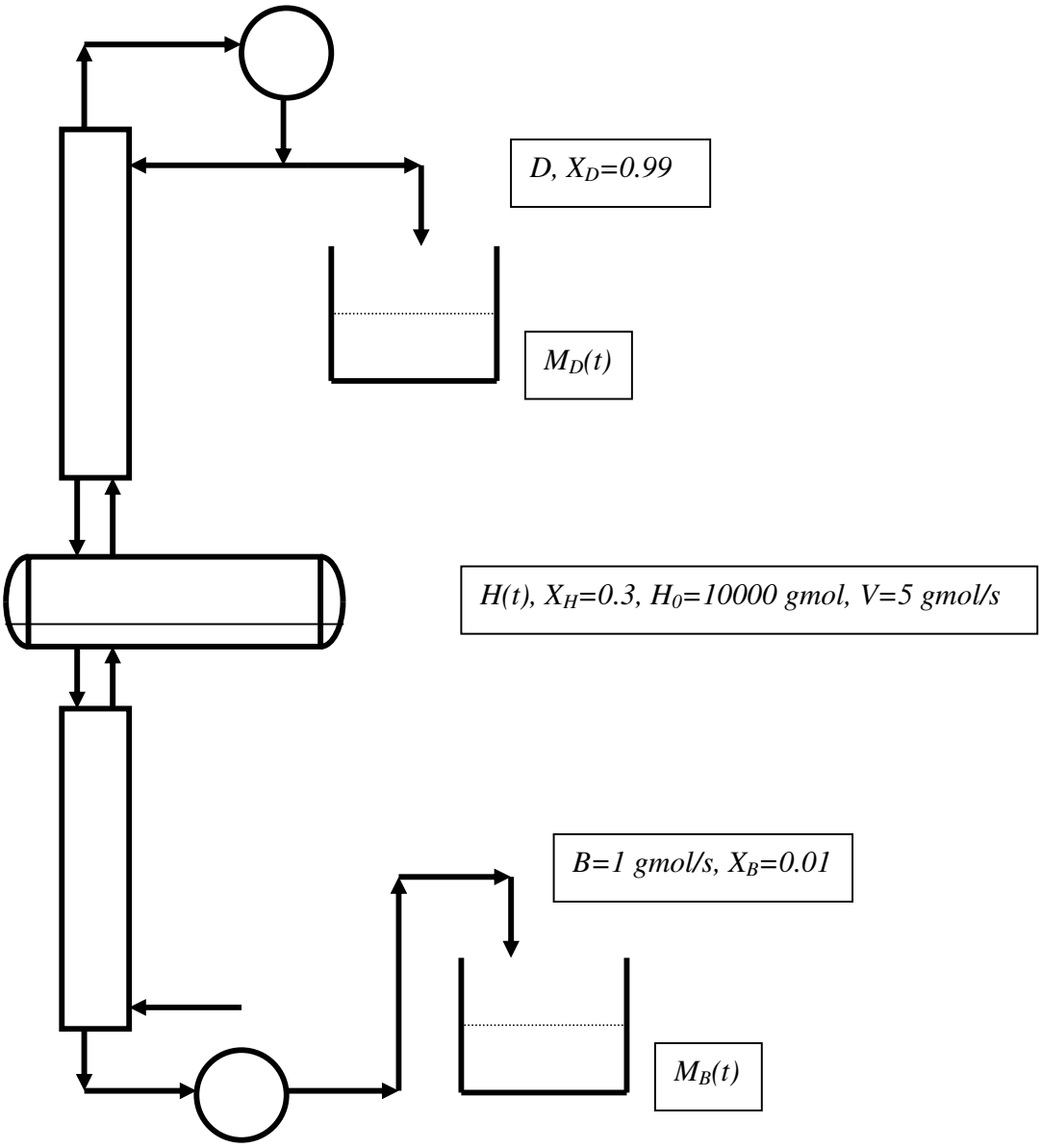

FIG23

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

(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.

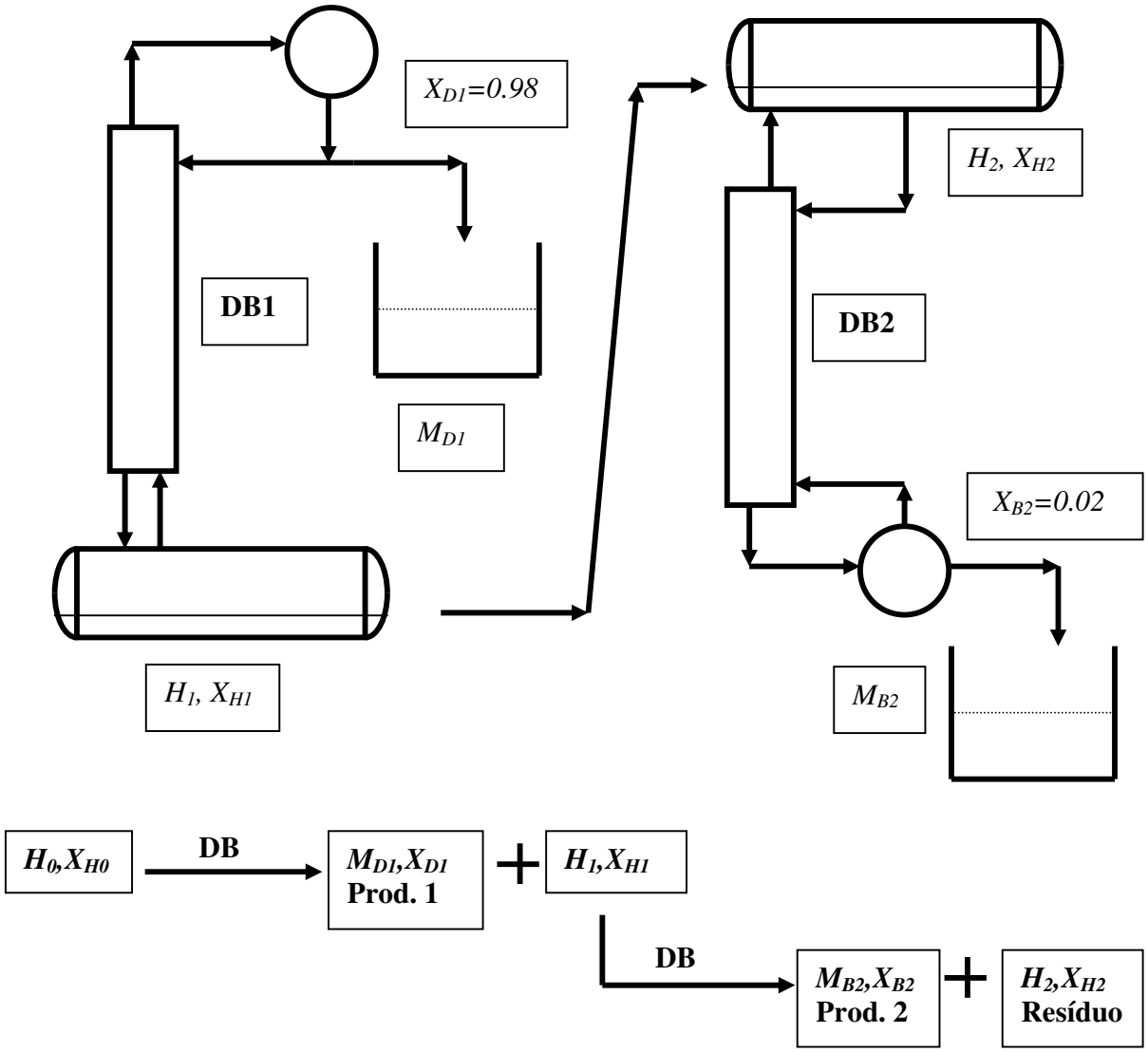
X_{D1}=0.98
DB1
M_{D1}
H_1, X_{H1}
H_2, X_{H2}
DB2
X_{B2}=0.02
M_{B2}
H_0,X_{H0}
DB
M_{D1},X_{D1}
Prod. 1
H_1,X_{H1}
DB
M_{B2},X_{B2}
Prod. 2
H_2,X_{H2}
Resíduo

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 ½ 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+Refervedor)	N=5	N=5
Carga	F=10000 gmol, Z=0.2 (em "1")	H_1 gmol, XH_1 (em "1")
Produto	MB_1 gmol, XB_1=0.01 (em "1")	MD_2 gmol, XD_2=0.99 (em "1")
Resíduo	H_1 gmol, XH_1 (em "1")	H_2 gmol, XH_2 (em "1")
Rendimento ($Prod/Prod^{MAX}$ %)	95%	95%

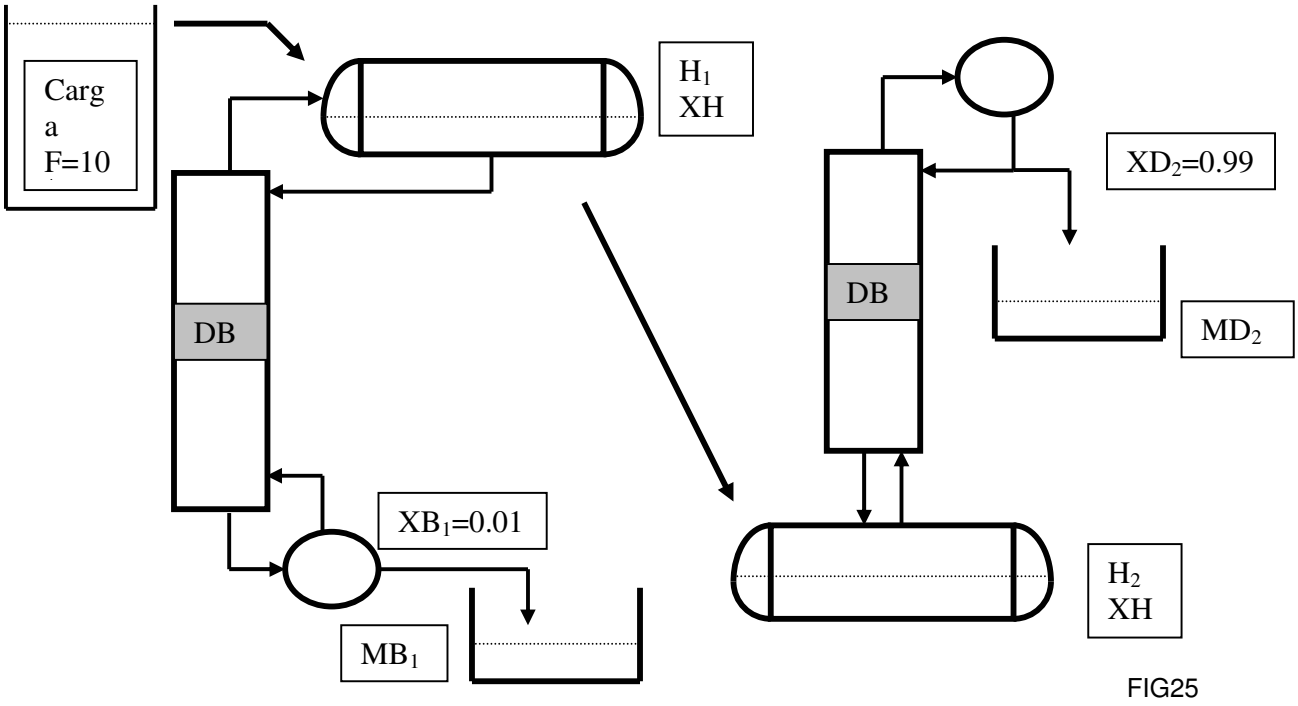

FIG25

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 sequência (Figura)**, utilizando-se a mesma vazão de vapor interno (*V* gmol/s) e o mesmo número de estágios perfeitos (pratos + refervedor) 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.

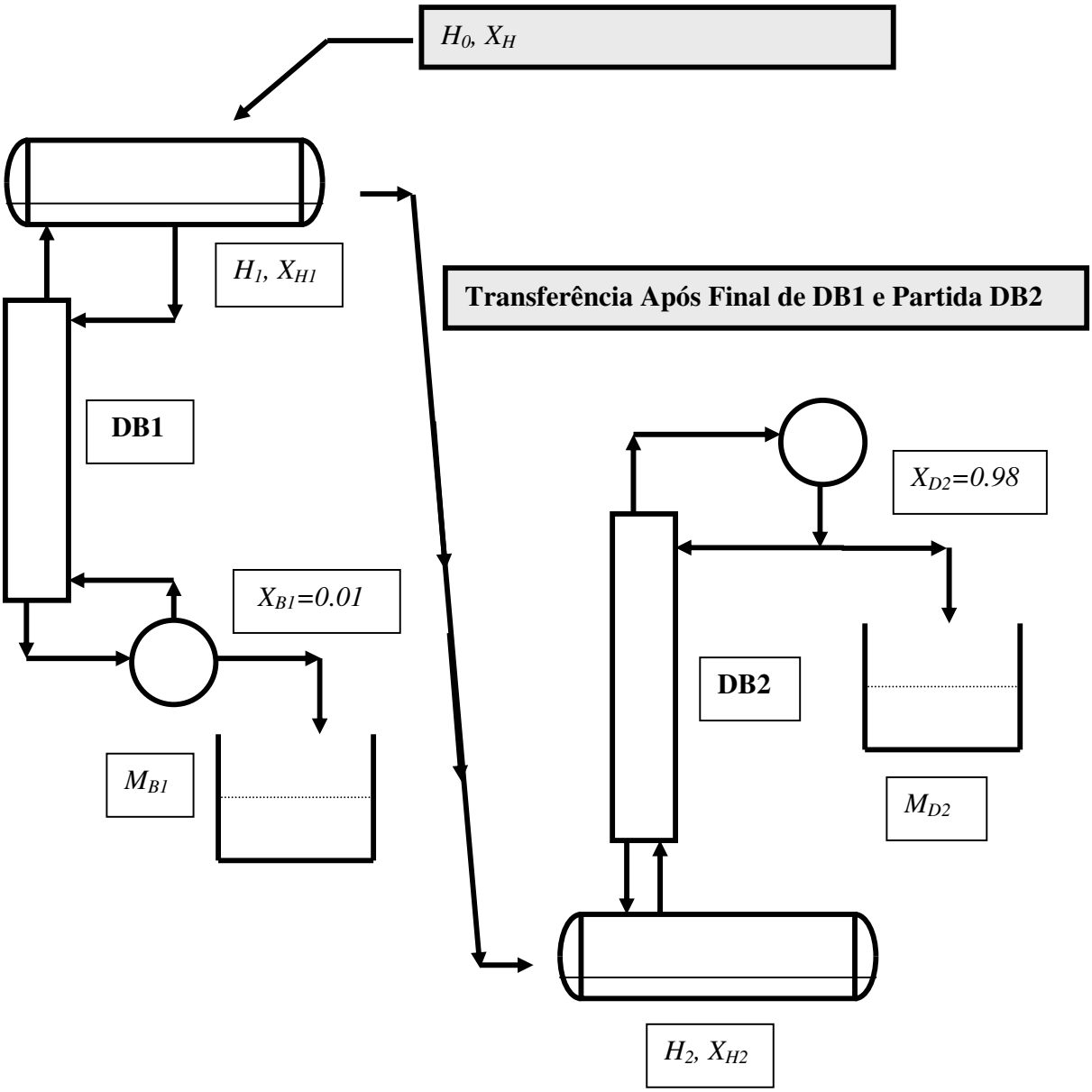
H_0, X_H
H_1, X_{H1}
Transferência Após Final de DB1 e Partida DB2
DB1
X_{D2}=0.98
X_{B1}=0.01
DB2
M_{B1}
M_{D2}
H_2, X_{H2}

FIG26

Questão 10 (P1 – 2003/01):

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 ($\alpha=3$). 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} gmoles) 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:
(i) Escrever M_{D1}, H_1, X_{H1} como funções de X_{D1};
(ii) Escrever M_{D2}, H_2, X_{H2} como funções de X_{D1};
(iii) Esboçar em gráfico o comportamento da quantidade de resíduo (H_1+ H_2) gerado como função de X_{D1}

FIGURA 2

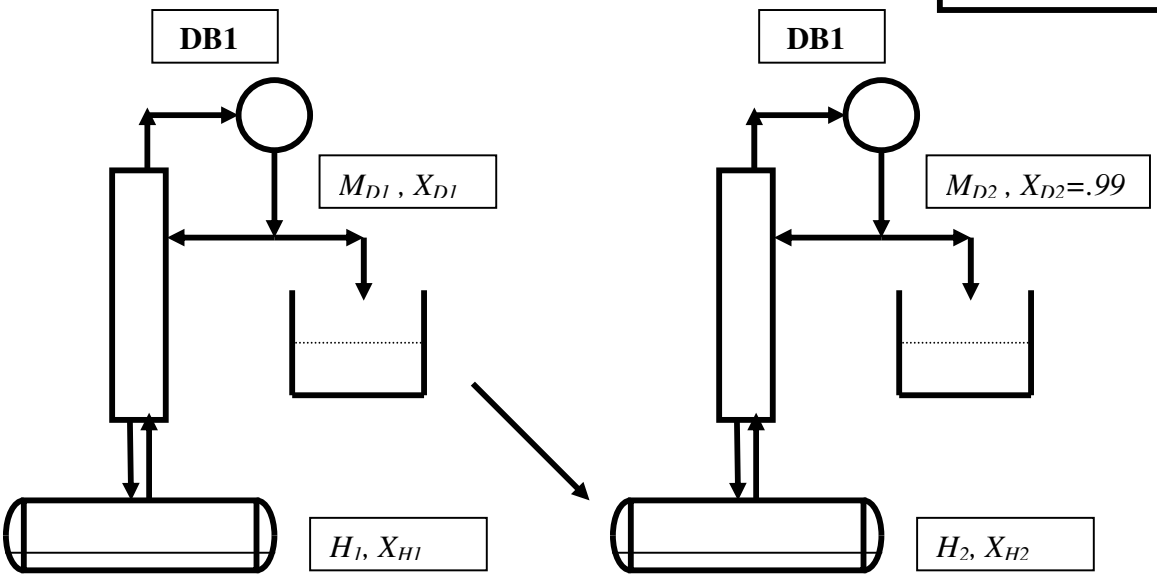

FIG27

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:

$$t = \frac{H_0(1-\exp(I))}{B-F} \quad , \quad I = \int_{XH_0}^{XH_f} \frac{F-B}{F(Z-X_H)-B(X_B-X_H)} dX_H$$

(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.

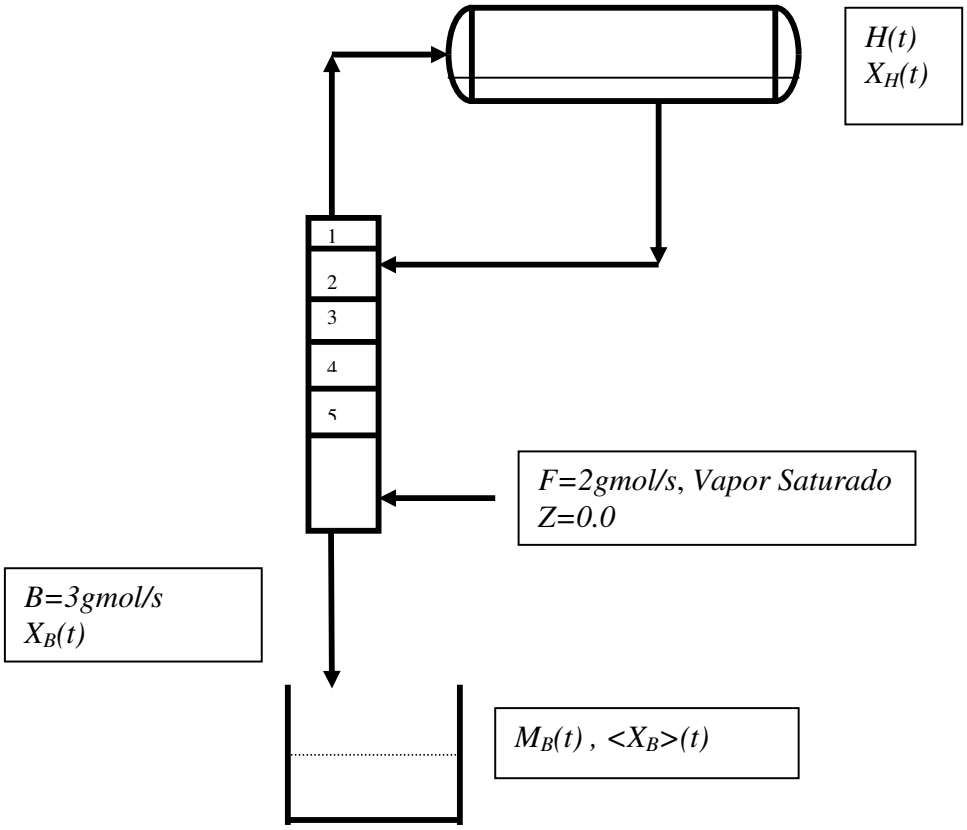

FIG28

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.

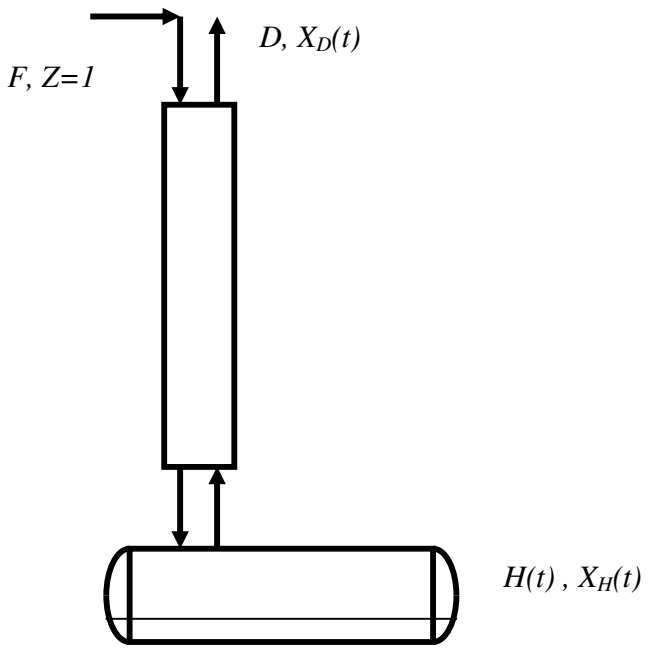

FIG29

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:

(i) Calcular M_{B1}, H_1 e rendimento de **DB1** $R\% = 100 * M_{B1} / M_{B1}^{MAX}$;

(ii) Obter a fração de redução de carga por ciclo, H_2/H_0;

(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;

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

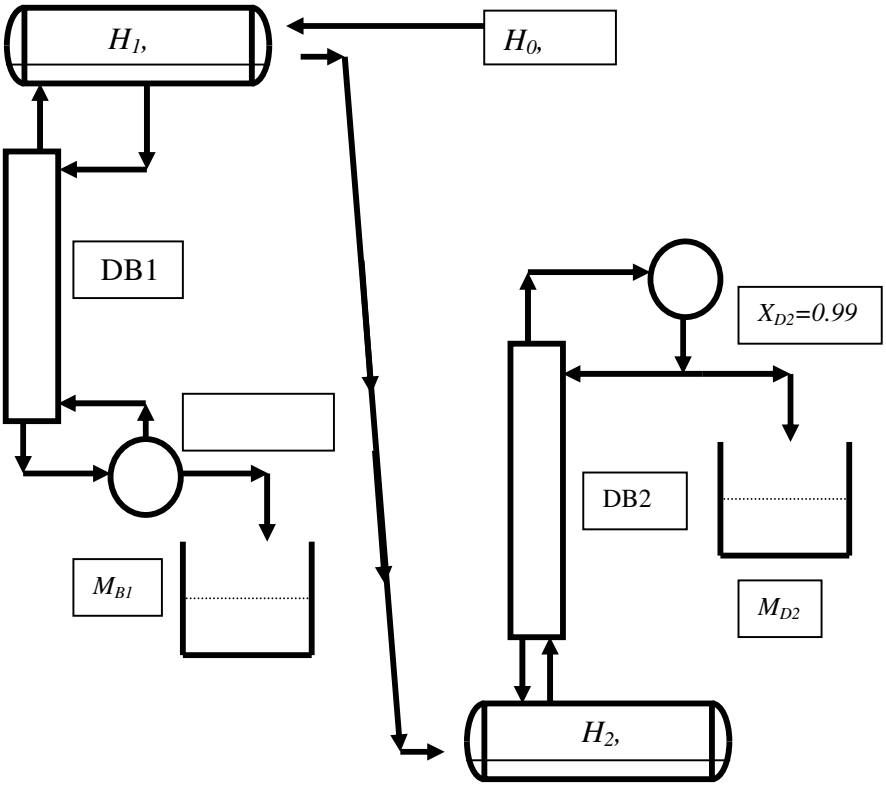

FIG30

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 (α). O tanque de fundo (composição de fase líquida $X_{HB}(t)$ em "1") é refervedor, 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 $X_{HB}^{lim} = \dfrac{1}{1+\sqrt{\alpha^{N+1}}}$ e $X_{HD}^{lim} = \dfrac{\sqrt{\alpha^{N+1}}}{1+\sqrt{\alpha^{N+1}}}$.

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

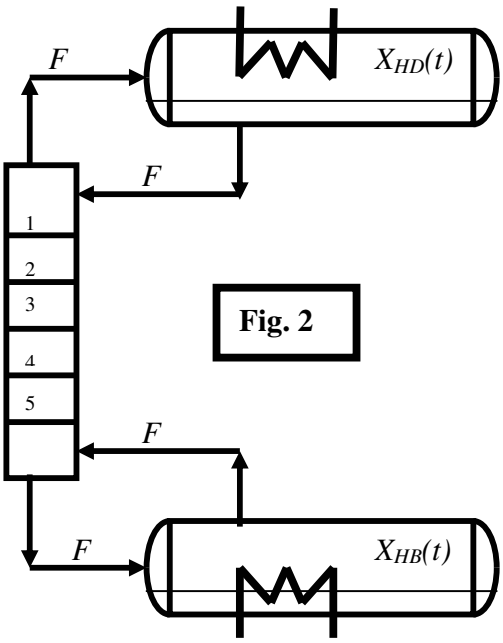

FIG31

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 refervedor, por isto injeta-se corrente F de vazão constante (F gmol/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 $L_0(t)$, $V_0(t)$;

(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*.

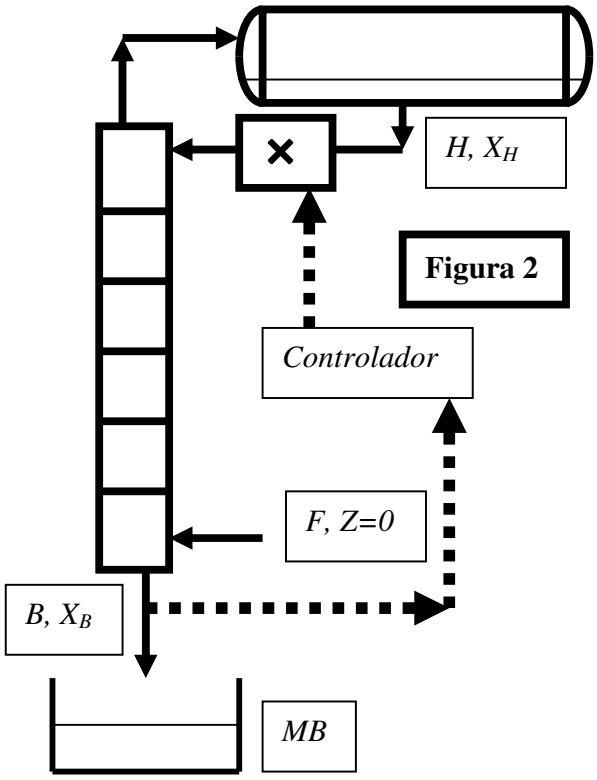

FIG32

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* gmol/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 refervedor ***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*.

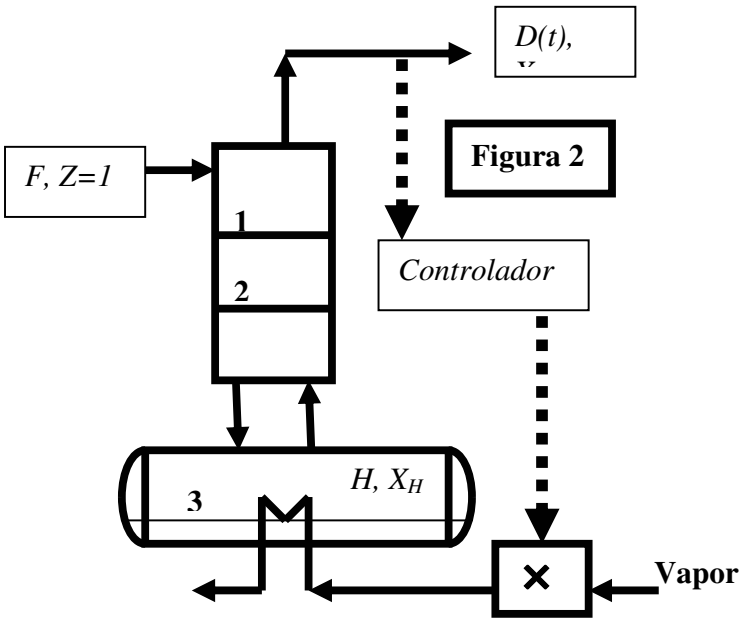

FIG33

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

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

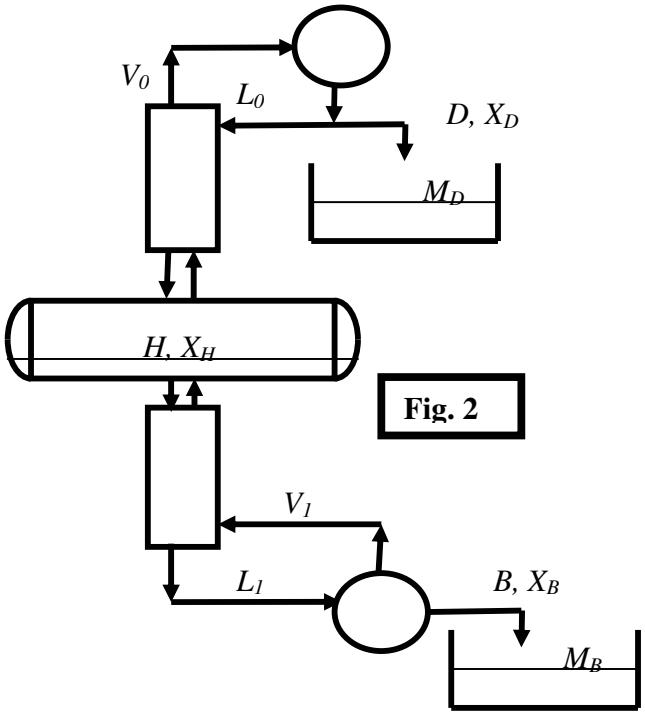

FIG34

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 $<X_D>$. 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 $X_H(t)$, $H(t)$, $X_D(t)$, $M_D(t)$, $<X_D>$;

(iv) Obter equações de projeto para: tempo da DB(t_F); valores de produto M_D, $<X_D>$; e resíduo H_F;

(v) Obter t_F, M_D, $<X_D>$, H_F para a DB recuperar 60% do componente "1" da carga.

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

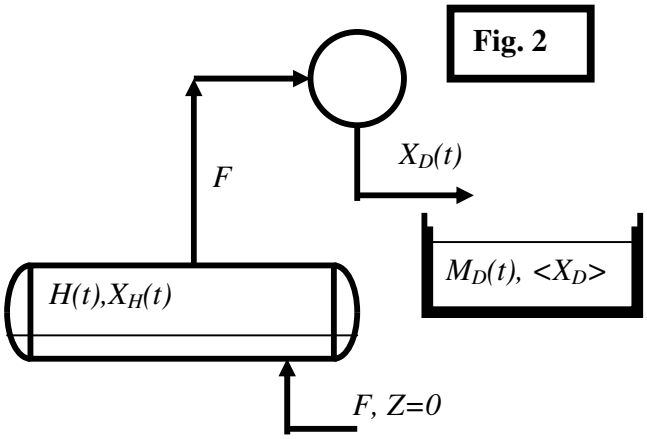

FIG35

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 : $\overline{H}_V = 60 - 20.Y$ (kJ/gmol)
- Entalpia de Líquido Saturado : $\overline{H}_L = 10 + 10.X$ (kJ/gmol)
- Relação ELV : $Y = \dfrac{X.F(X)}{1 - X + X.F(X)}$, $F(X) = 3.\exp(0.5 - X)$
- 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.

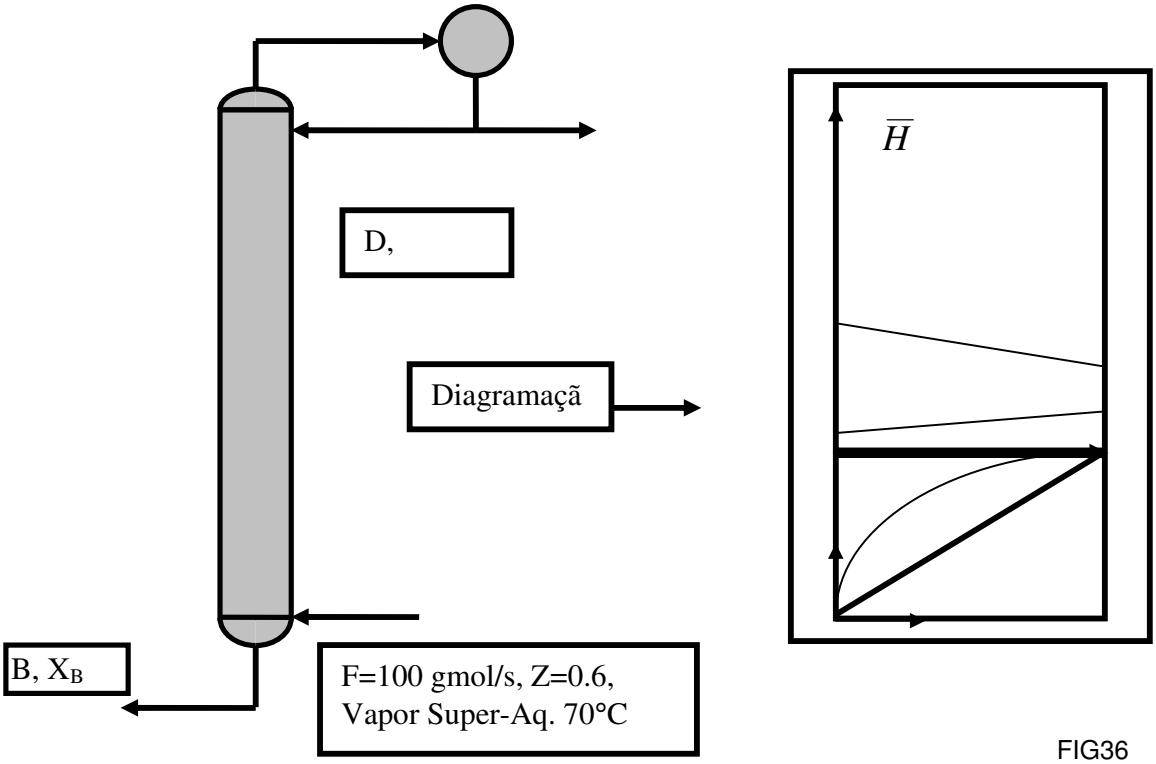

FIG36

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

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

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 $D=0.9*D^{MAX}$, obter *B*, X_B, *RR* e Q_0;
(vii) O número de estágios necessários nas condições de (vi).

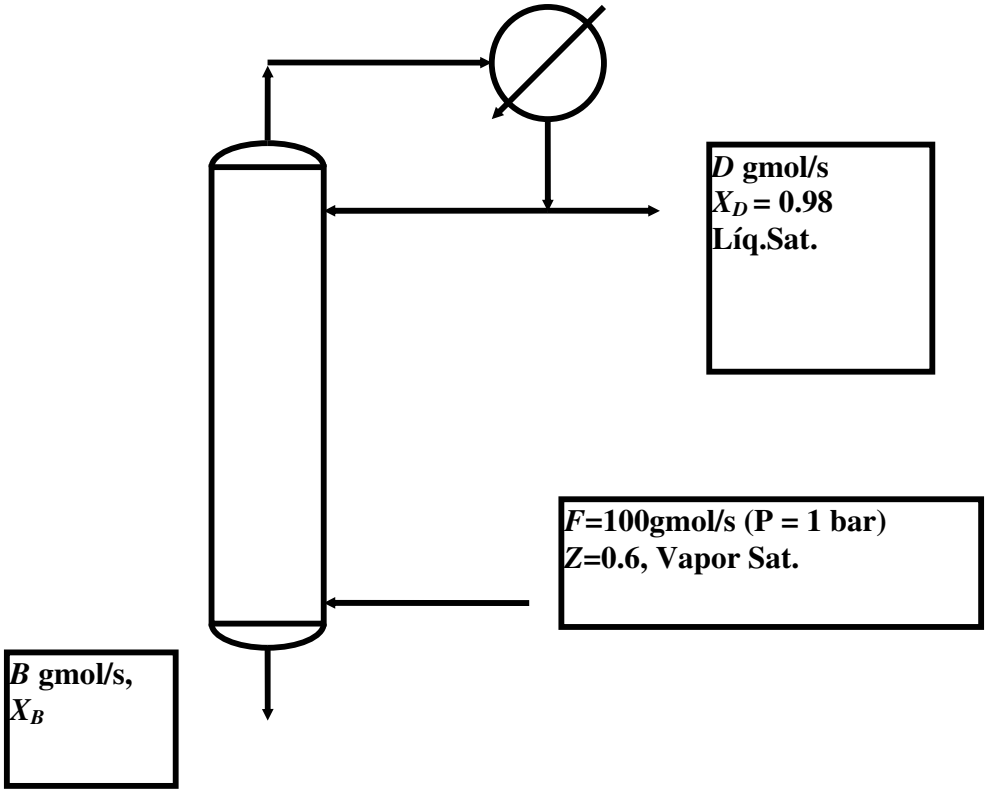

FIG37

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

Capacidade Calorífica a Pressão Cte de Fase Líquida Próximo à Saturação: Cp^{Liq} = 0.2 kJ/gmol.K

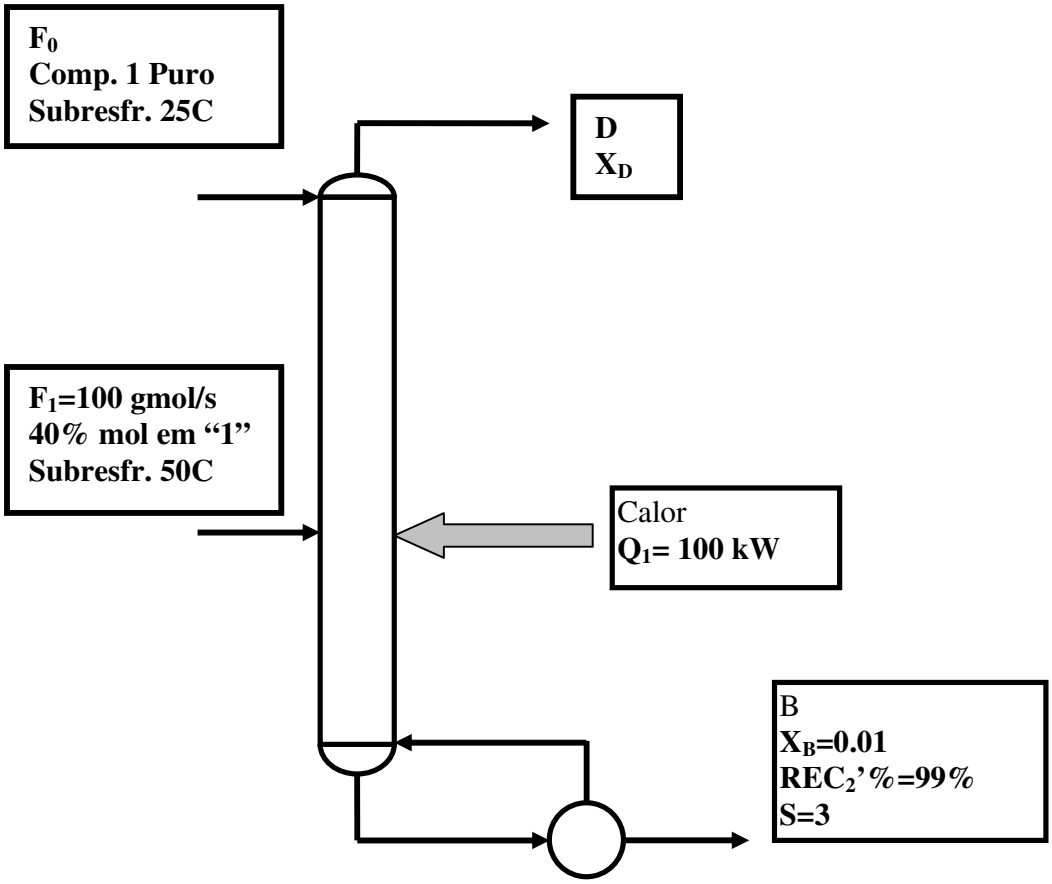

FIG38

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

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 ($Q_{REF} = 1.8*Q_{REF}^{MIN}$). 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 refervedor (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 : $\overline{H}_V = 50 - 10.Y$, $\overline{H}_L = 10 + 10.X$ (kJ/gmol)
- Relação ELV : $Y = \dfrac{X.F(X)}{1 - X + X.F(X)}$, $F(X) = 2.9 * \exp(0.02 * (1 - 2X))$
- Capacidade Calorífica a Pressão Cte de Fase Líquida Próximo à Saturação: $Cp^{Liq} = 0.25$ kJ/gmol.K

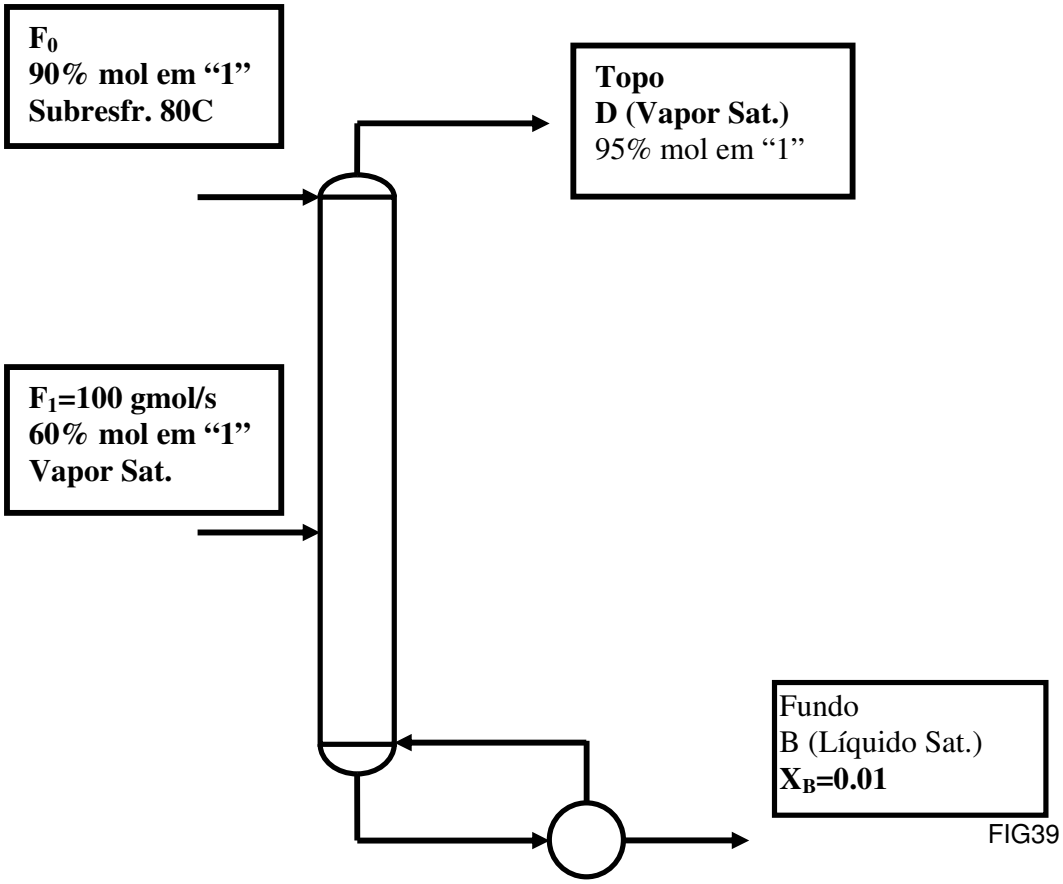

FIG39

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

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}=1m), 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.

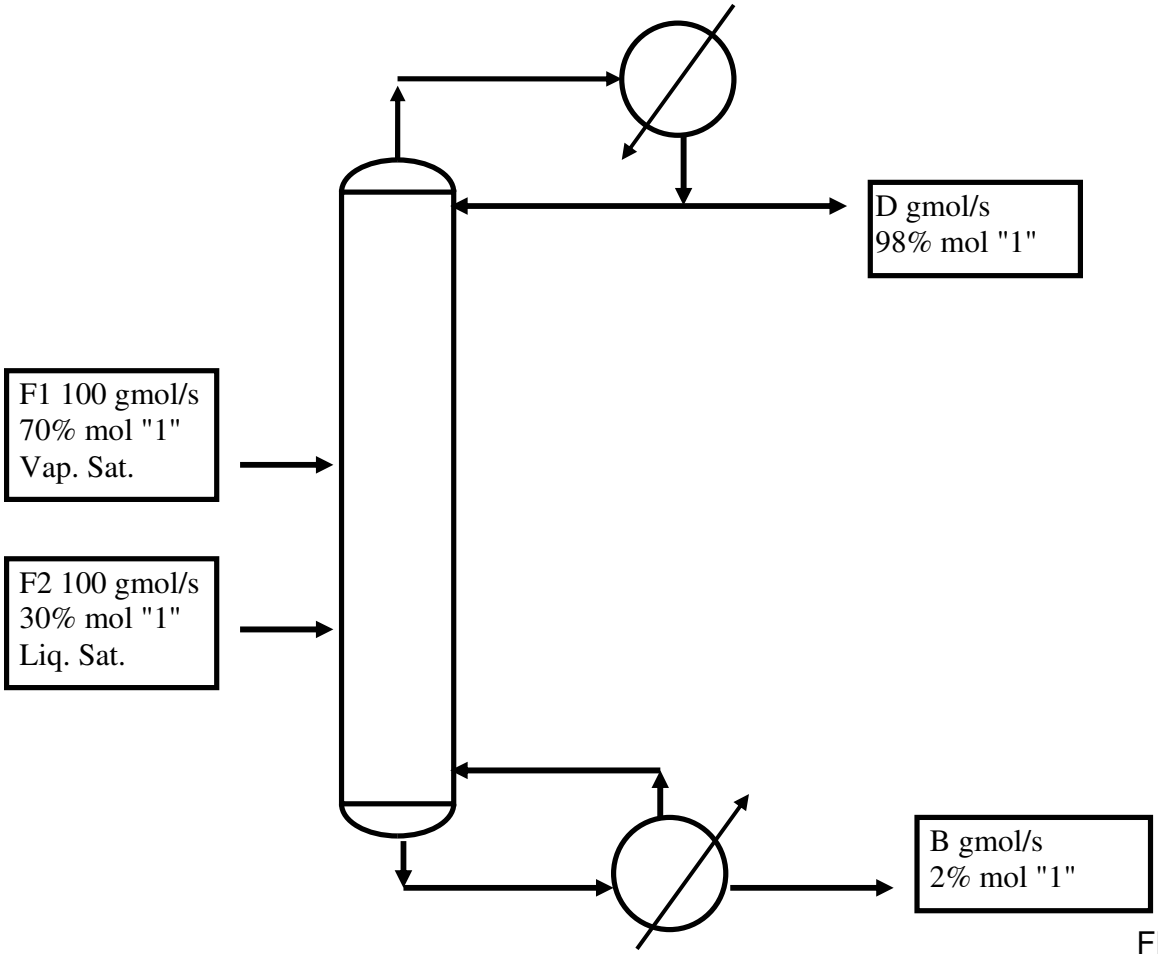

FIG40

Questão 07 (EF – 2004/01):

A coluna abaixo (condensador total e refervedor parcial) é alimentada com F_1=100gmol/s de **vapor saturado** (60% mol de "1", 40% mol de "2"), e F_2=100gmol/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 = 1bar. 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=1bar) são H_L^{SAT} = 10+10X, H_V^{SAT}= 60-10Y, ambas em kJ/gmol. A partir disto, responda:
(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) 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;

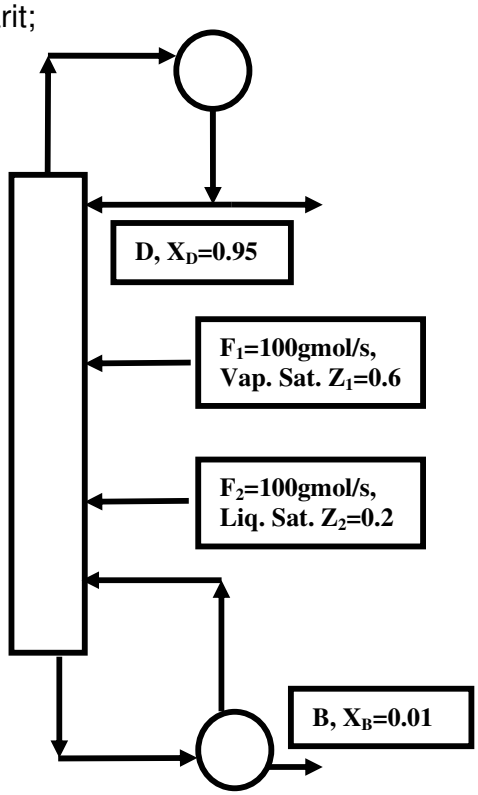

FIG41

Questão 08 (EF – 2005/02):

A coluna abaixo (condensador total e refervedor parcial) é alimentada com F_1=100gmol/s de **líquido saturado** (50% mol de "1", 50% mol de "2"), e F_2=100gmol/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 = 1bar. 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=1bar*) 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.

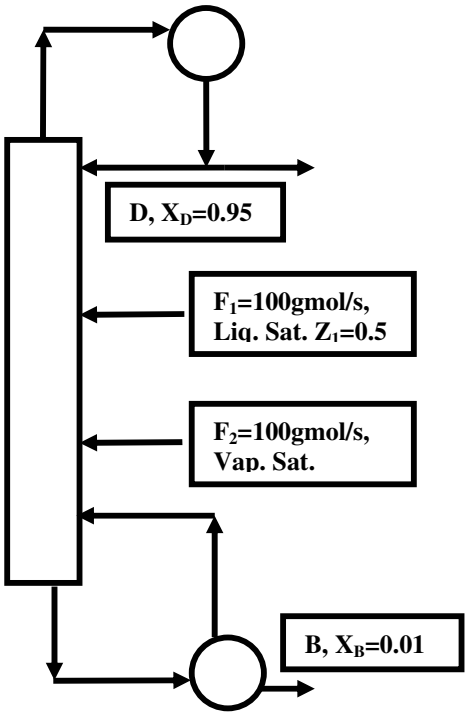

FIG42

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 bar*). Como não há condensador, o topo é alimentado com líquido "1" puro sub-resfriado 60ºC 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 bar*): $\bar{H}_V = 50 - 10.Y$, $\bar{H}_L = 10 + 5.X$ (kJ/gmol)
- Relação ELV (*P=1 bar*) : $Y^* = \frac{2X}{1+X}$
- Capacidade Calorífica a Pressão Cte de Líquido Saturado : $C_P^{Liq} = 0.2$ (kJ/gmol.K)

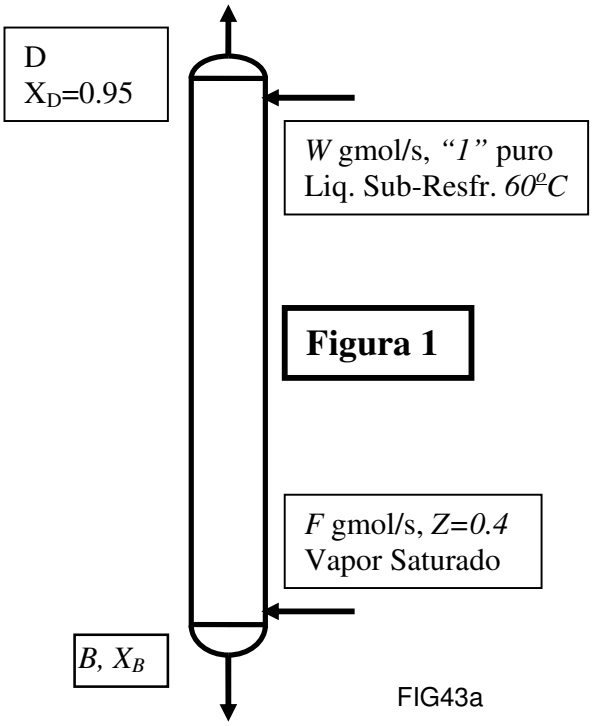

FIG43a

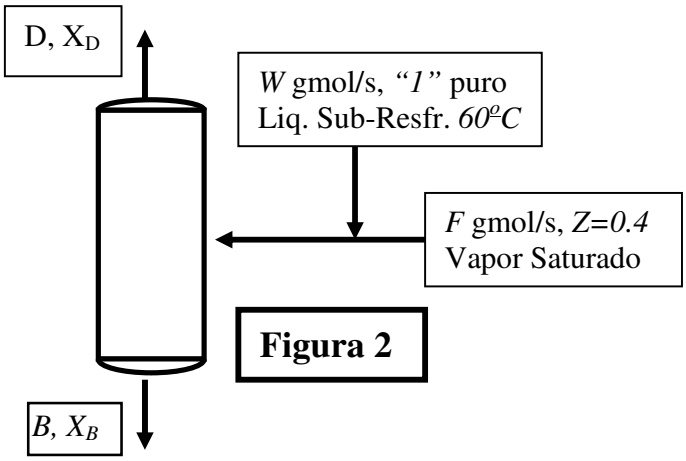

FIG43b

Questão 10 (2P – 2007/02):

Projetar com o Método Ponchon-Savarit, a coluna de pratos abaixo operando a P=1bar com vapor saturado F (50%mol "1" + 50%mol "2") para gerar destilado (D) com 95%mol "1" (X_D=0.95). Determine:
(i) A máxima produção de topo (D^{MAX}/F);
(ii) Os valores de *B/F* e X_B em (i);

(iii) Os valores de *B/F*, X_B para $D/F=0.75*D^{MAX}/F$;
(iv) O número de estágios necessários em (iii).
Dados termodinâmicos (*X,Y* fr.molar de "1" nas fases Líq. e Vapor):

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

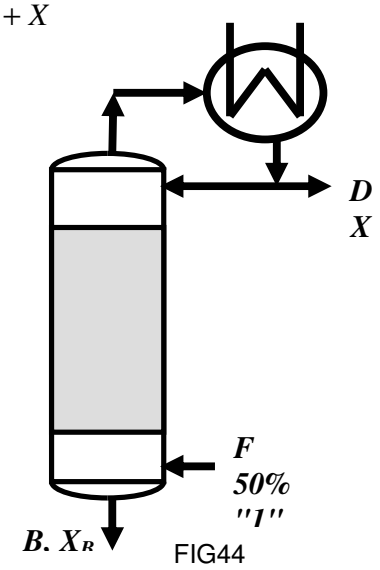

FIG44

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 refervedor **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: λ=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 refervedor 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 λ=25000 J/gmol.

Componente	**% Mol em F ($\underline{Z}$)**	**Volatilidade Relativa (α)**
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 **refervedor** 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 $F=0.7*F^{MAX}$, obter novos valores da razão de refluxo, além das vazões e composições de produtos;

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

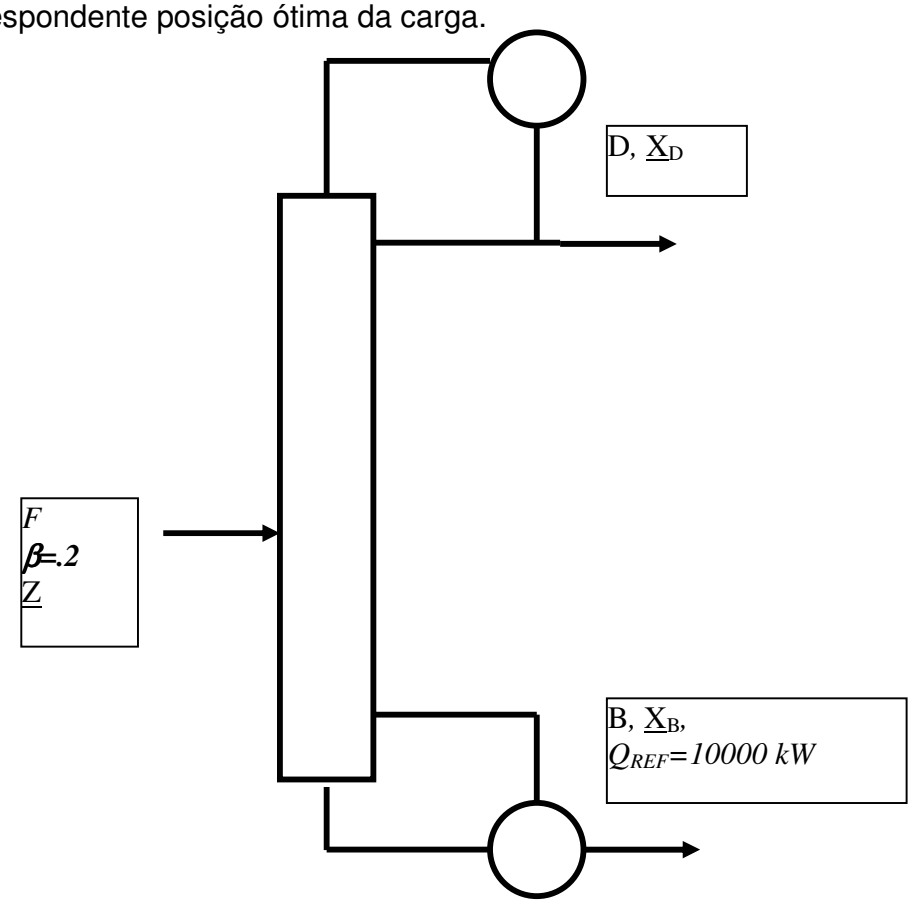

FIG45

Questão 07 (EF – 2002/01):

Dispõe-se de corrente líquida e saturada em P=20 bar contendo (mol) 20% de etano (C2), 30% de propeno (C3=), 30% de propano (C3) e 20% de butanos (C4), 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 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 topo. Admita disponível uma coluna de N estágios teóricos ao todo, que aceita, no máximo, 100 gmol/s de vapor no seu interior. Determine:

(i) A máxima recuperação de topo de C3= em termos de (N,b), calculando-a em b=20, N=40;

(ii) As recuperações de topo e fundo de todos os compostos e as vazões dos produtos gerados, admitindo operação a 80% 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 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: λ=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 C4H10 no topo, e, no máximo, 0.1% da alimentação de C3H6 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 : λ=32 kJ/gmol
- Alimentação e Volatilidades Relativas :

Componente	Fração Molar em F	Volatilidade Relativa
C3H6	0.1	2.3
C3H8	0.1	2.0
iC4H10	0.2	1.0
C4H10	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	**P=20 bar**	λ = 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 refervedor 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	**P=30 bar**	$\frac{REC'_{C3H8}}{REC'_{C3H6}} \geq 200$
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

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	*λ=40 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	**P=3 bar**	$\frac{REC'_{C4H10}}{REC'_{C3H8}} \geq 100$
C3H8	20%		2.2		
iC4H10	40%		1.3		
C4H10	20%		1		
C5H12	10%		0.5		

A entalpia de vaporização média é $\lambda = 30kJ/gmol$. 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 refervedor por gmol de carga processada que é possível obter ($\frac{\dot{Q}^{Min}_{Ref}}{F}$);

(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. (α_k)**	**Pressão**	**Razão Reflx.**	**Fundo**
1	30%	$\frac{REC_1}{REC_4} \geq 100$	2	**P=5 bar**	$\frac{RR}{RR^{MIN}} = 1.3$	$\frac{REC_4'}{REC_1'} \geq 100$
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 $Y_k^F = \alpha_k . X_k^F . \theta$ para $k = 1..4$, onde $\theta = \frac{1}{\sum_{k=1}^{4} \alpha_k . X_k^F}$;

(iv) Com (iii) e com *os balanços do Flash*, mostre que $X_k^F = \frac{Z_k}{1 - \beta + \alpha_k . \beta . \theta}$ para $k = 1..4$;

(v) Com (iii),(iv), mostre que X_k^F, Y_k^F são obtidas após resolver $\sum_{k=1}^{4} \frac{Z_i}{1 - \beta + \alpha_k . \beta . \theta} - 1 = 0$ para $0 < \theta < 1$;

(vi) Obter a ***mínima*** carga térmica de refervedor por mol de carga ($\frac{\dot{Q}_{REF}^{Min}}{F}$) 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**.

Comp.	Fr. Mol em F	*Topo*	**Volatilidade Relativa**	**Entalpia de Vaporização**
1	15%	*REC_2% = 99%*	2.4	*λ=40 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 refervedor 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	**P=5bar**	$\frac{REC'_4}{REC'_1} \geq 100$
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. (α_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	

A entalpia de vaporização na pressão da coluna 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) Estimar a máxima taxa de alimentação possível (F^{MAX}) para carga térmica do refervedor 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.

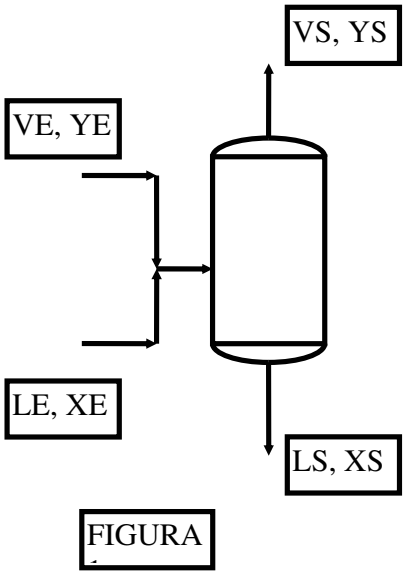

FIG46a

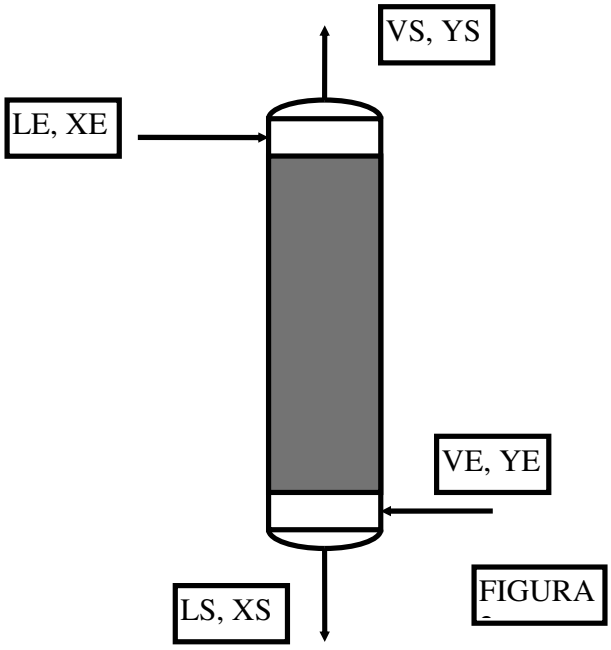

FIG46b

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 $\mathbf{H_G = H_L}$ =1m. Outros dados relevantes são : (a) Densidades ρ^{LIQ}=1g/cm3, ρ^{VAP}= 0.01g/cm3; (b) Viscosidade em fase líquida μ^{LIQ}=1 cP; (c) Massas Moleculares MM1=30, MM2=40. A partir destes dados e das **observações sobre cáculos** abaixo, 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, RR*, e a vazão e composição do rejeito do retificador, também nesta situação.

(ii) Mínimo comprimento necessário de recheio, Zc^{MIN}.

(iii) Nas condições de (ii), as vazões e composições dos produtos, a razão de refluxo, RR**, e REC1%.

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

(v) Nas condições de (iv), obter o comprimento de recheio, Zc, e o diâmetro da coluna, Dc.

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

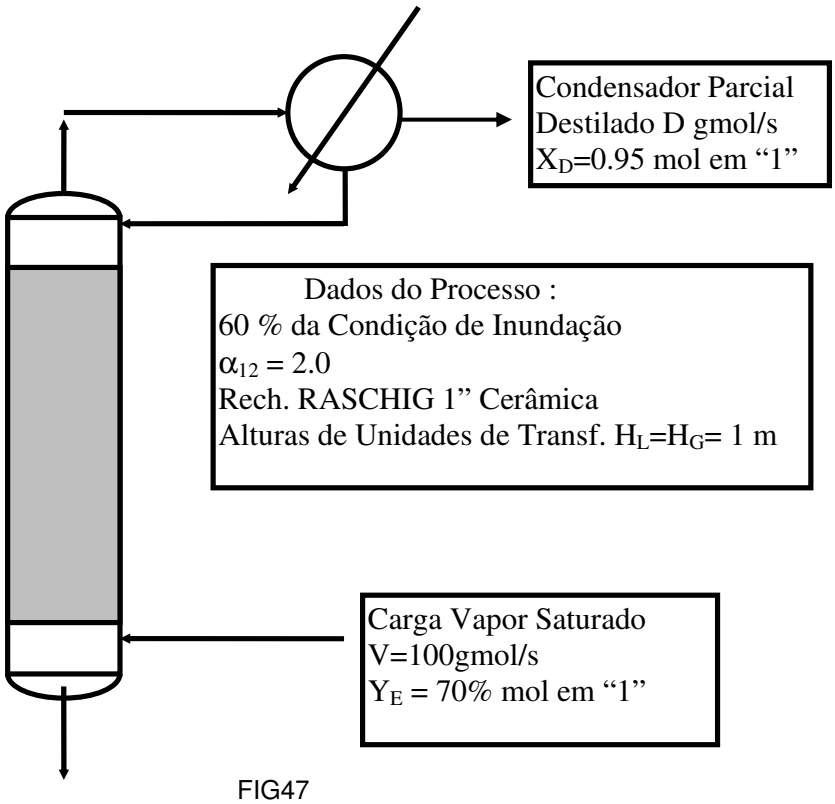

FIG47

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 refervedor 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 refervedor 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 refervedor relativamente à mínima ($S*100/S_{MIN}$) ?

(iii) Nas condições do item (ii), determine o comprimento de recheio necessário.

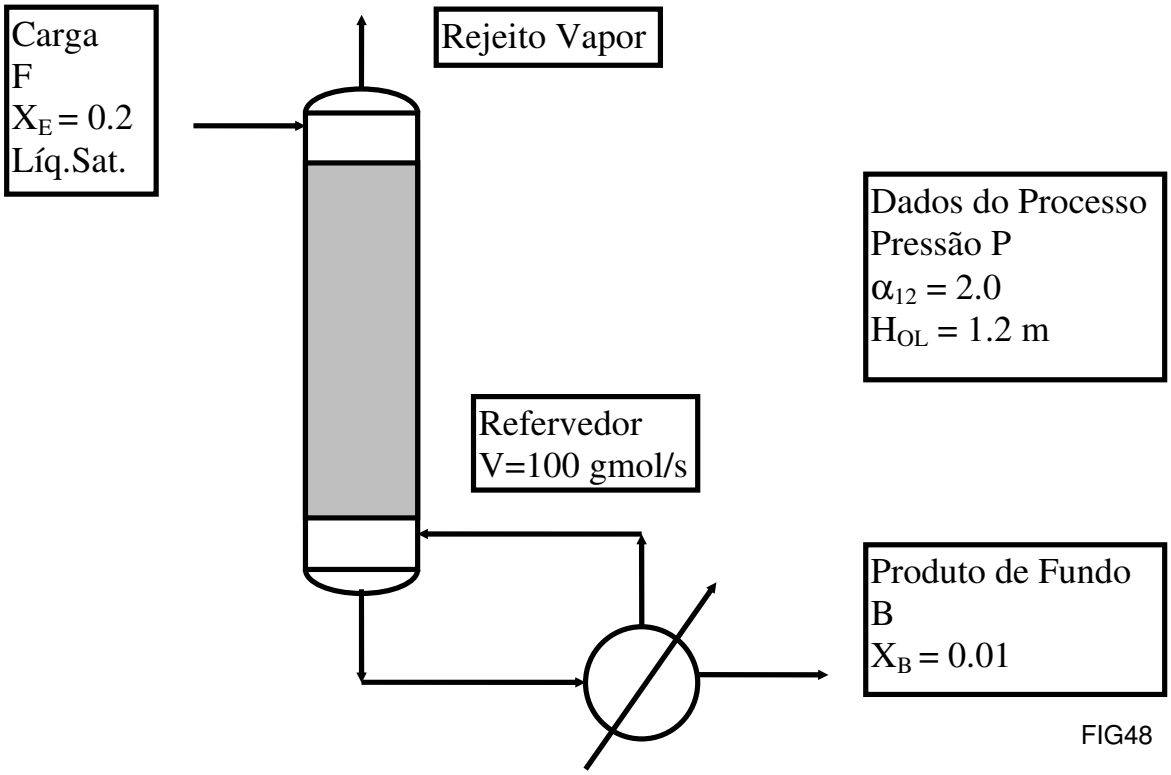

FIG48

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.

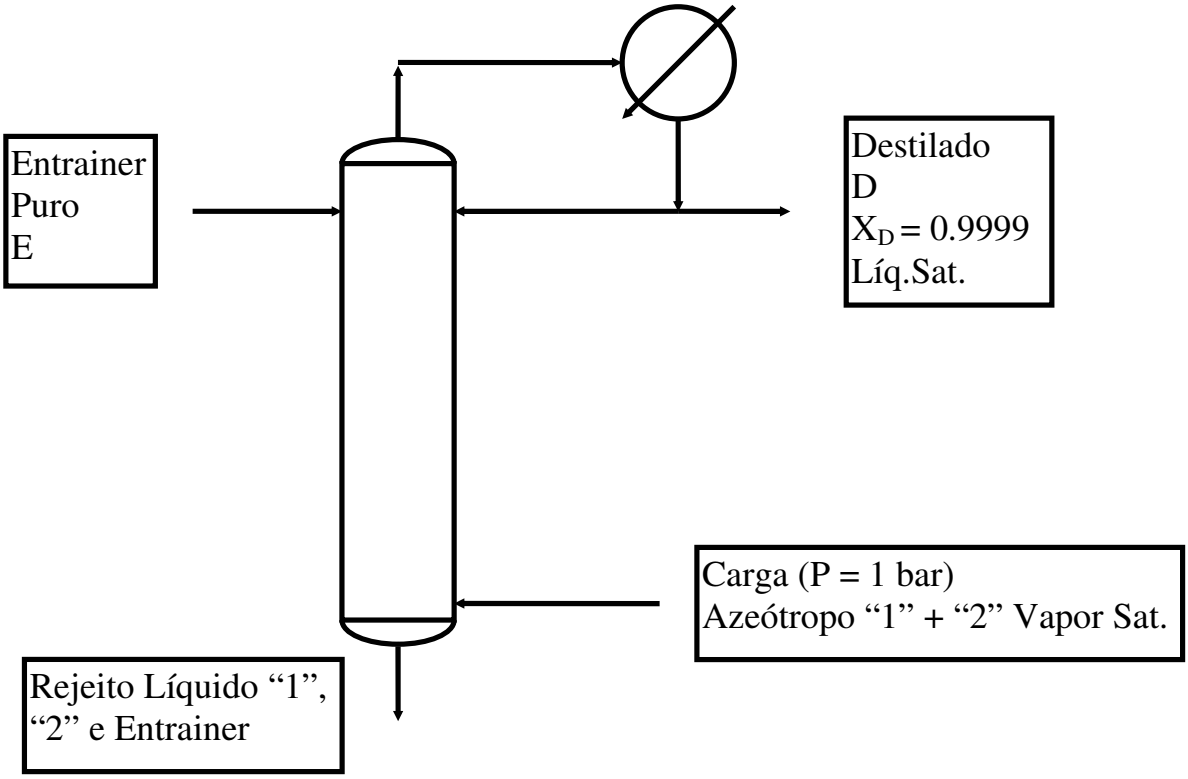

FIG49

Questão 06 (EF – 1998/02):

Um experimento para determinação de $\mathbf{H_G}$ **e** $\mathbf{H_L}$ 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 refervedor 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 ρ_{LIQ} = 0.9 g/cm3, ρ_{VAP} = 0.05 g/cm3).

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

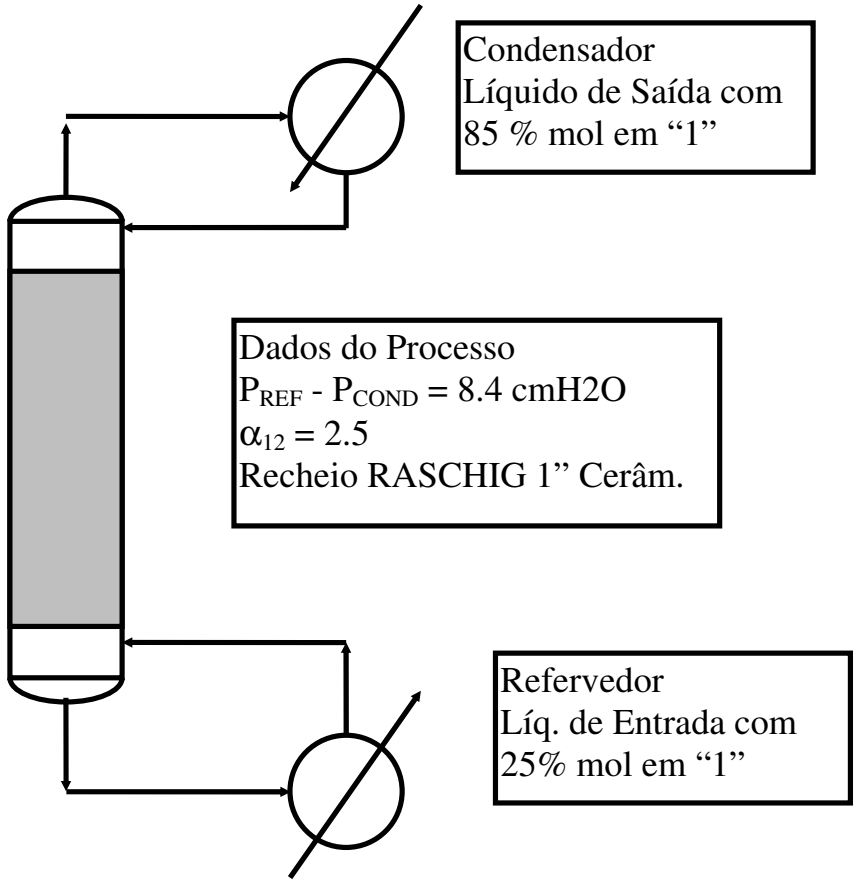

FIG50

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 α_{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.

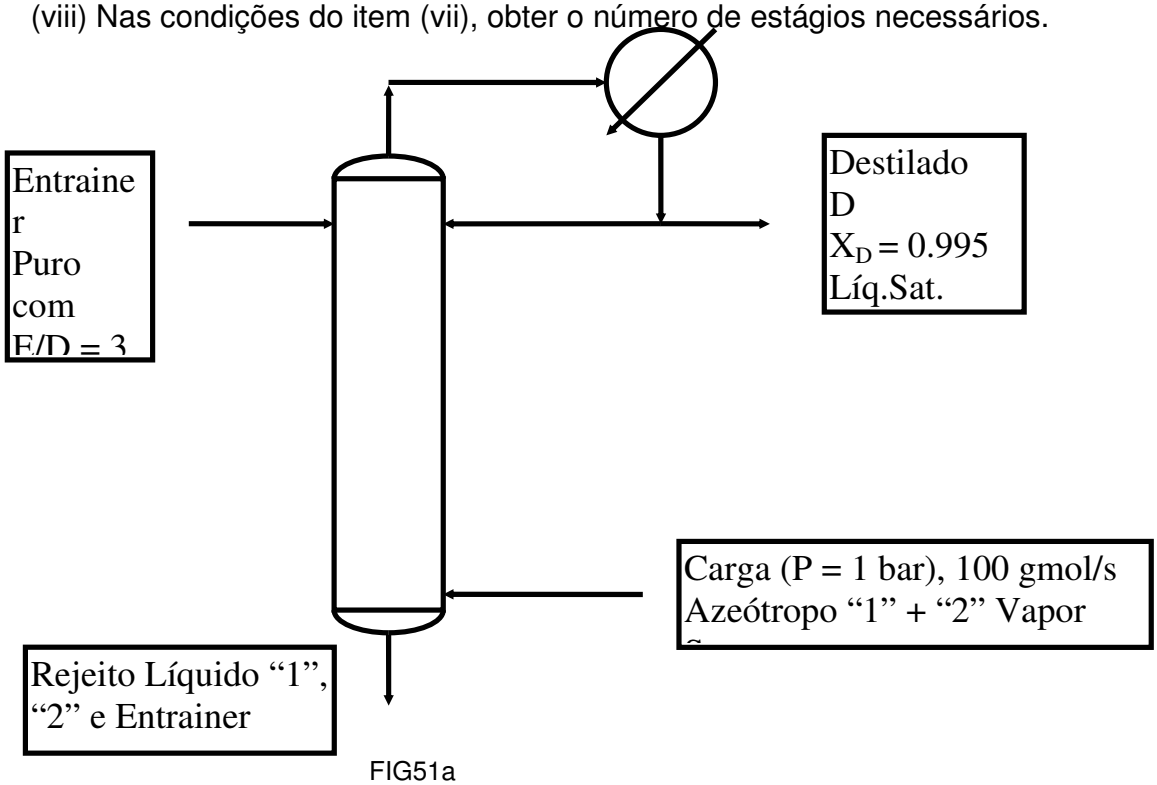

FIG51a

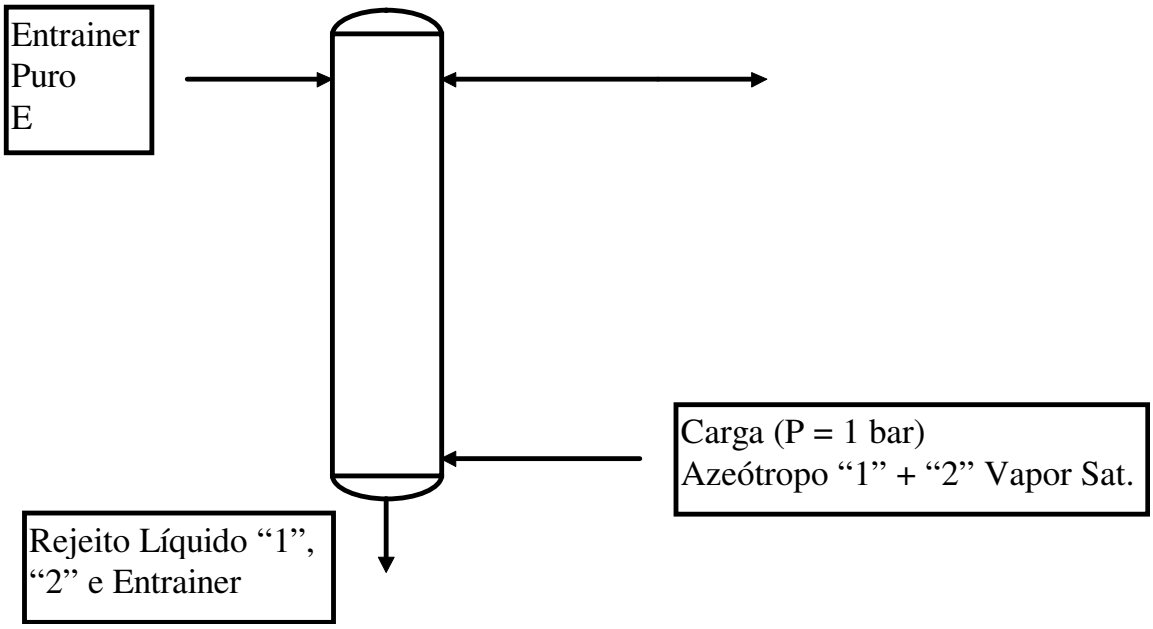

FIG51b

Questão 08 (P1 – 1999/01):

Com respeito **à mesma carga** e sistema termodinâmico do **problema 02 do Capitulo 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 **θ** 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 θ).
(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.

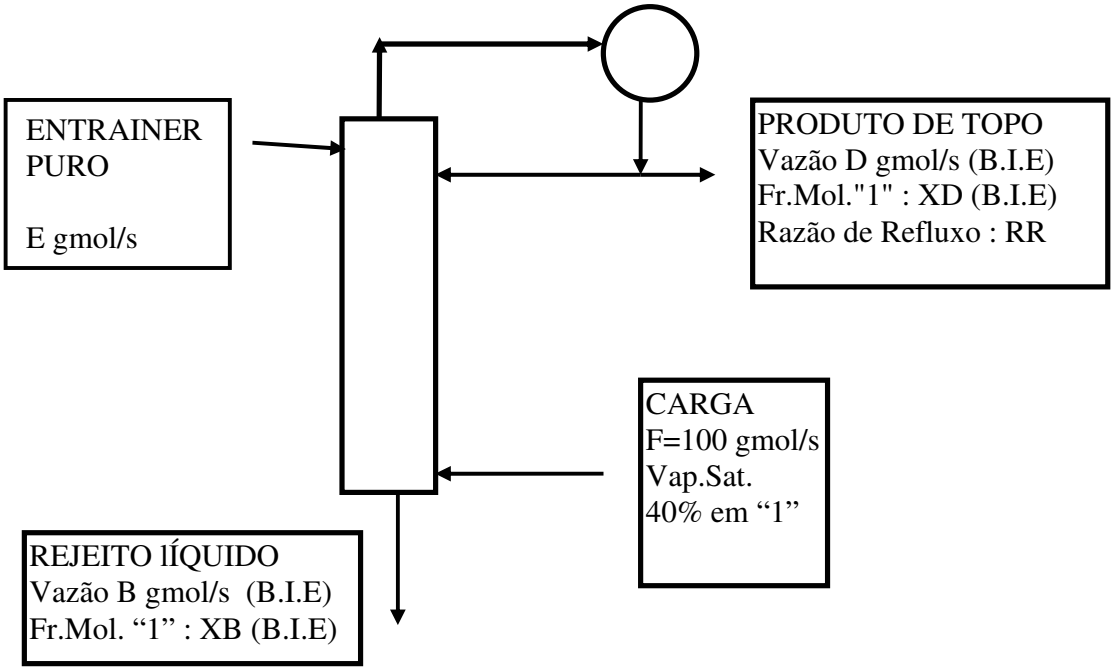

FIG52

Questão 09 (P2 – 1999/01):

A operação abaixo utiliza certo tipo de recheio para retificar F=100 gmol/s de vapor saturado (P=1 bar) com 60% mol de "1" (Z) e 40% mol de "2", gerando destilado (D gmol/s) com 96% mol de "1" (X_D). A volatilidade relativa ½ 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 ($D=0.9*D^{MAX}$). Sabe-se que a condição (I) exigiu 3m deste recheio. Com base nestes dados responda:

(i) Mostre que no caso (I) : $N_{OL}=\ln(X_D^2.(1-Z)/(Z^2.(1-X_D)))$
(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.

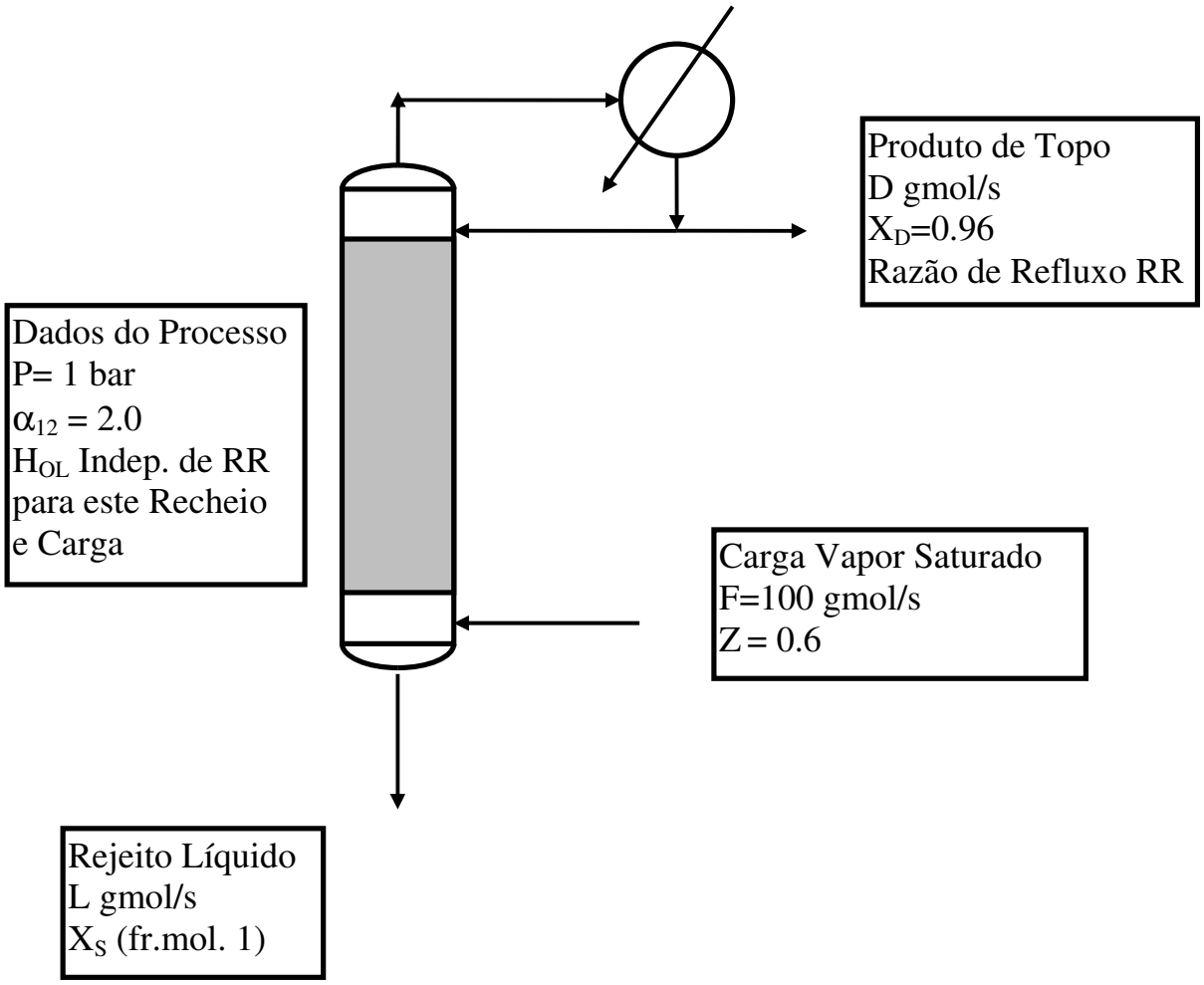

FIG53

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 bar. Dados termodinâmicos a seguir (X,Y frações molares de "1" no líquido e gás respectivamente) :

Fase gás não ideal: Massa Mol MM^{VAP}= 40, Densidade ρ^{VAP}= 0.01g/cm3
Fase líquida não-ideal: Massa Mol MM^{LIQ} = 80, Dens. ρ^{LIQ}=1g/cm3, Viscos. μ^{LIQ}=1 cP
Coeficiente de Fugacidade de "1" no gás: ϕ_1 = 0.85 (constante)
Constante de Henry de "1" no solvente: H_1 = 50 bar
Coeficiente de Atividade de "1" no solvente: $\gamma_1 = \exp(X^2)$

O recheio opera com alturas de unidades de transferência constantes e dadas por $\mathbf{H_G = H_L}$ =1m. 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 (Zc^{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 ítem (ii);
(v) As composições e vazões de **todas as correntes** nas condições do ítem (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 Zc 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, Dc, e a pressão de saída do gás.

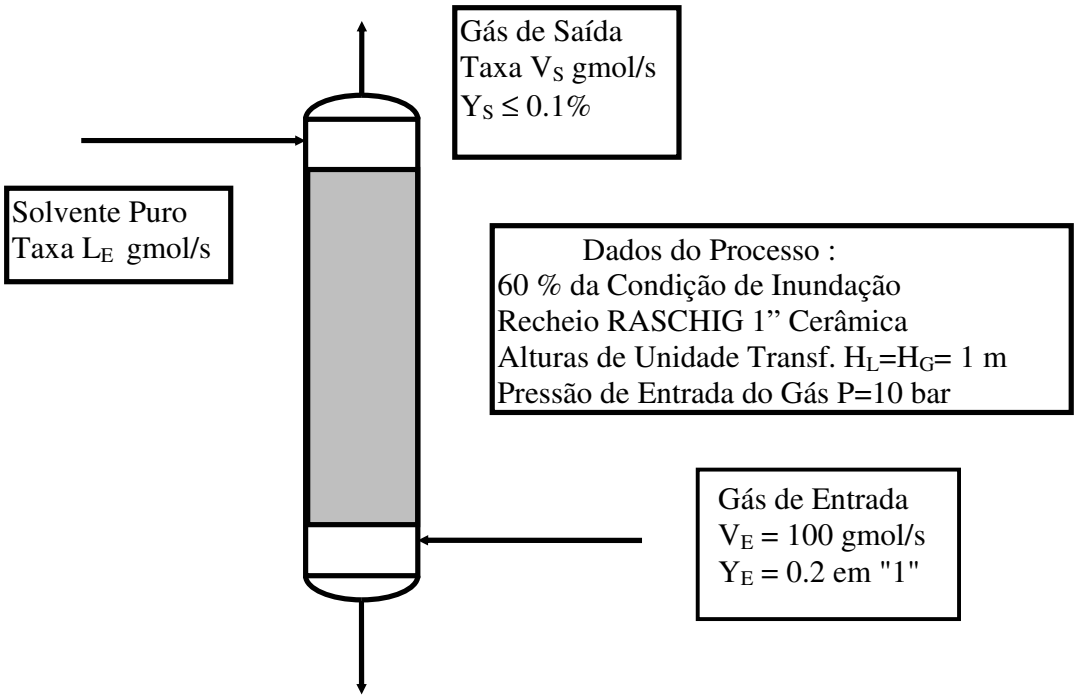

FIG54

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 : ϕ=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: ρ^{LIQ}=0.8 g/cm^3, μ^{LIQ}=0.02 g/(cm.s)
- Alturas de Unidades de Transferência: $H_L=H_G$= 1m (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.

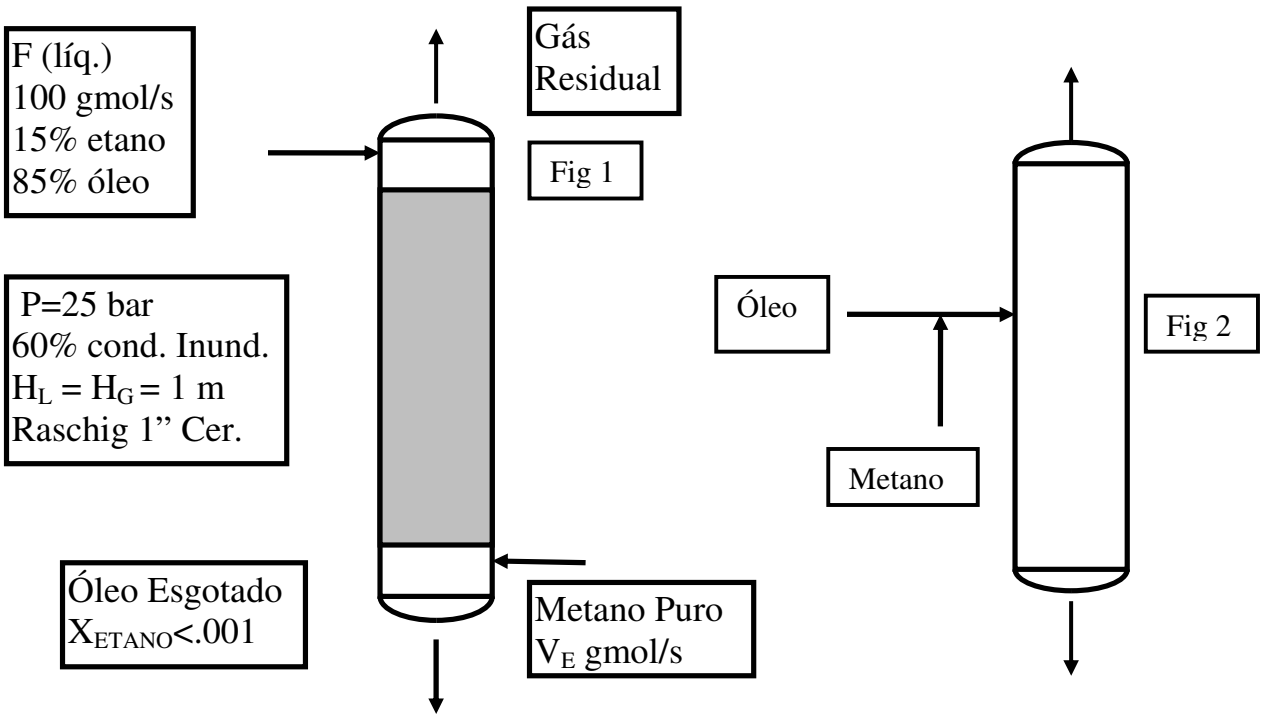

FIG55

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 $\mathbf{H_L}$=1m e por $\mathbf{H_G}$=1m . Valores para densidade e viscosidade de fases são μ^{LIQ} =1cP, ρ^{LIQ} =0.9 g/cm^3, ρ^{VAP} =0.01 g/cm^3**.** 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**
Critério Composicional de Coleta	**$X_D \geq 0.96$**	**$X_D \geq 0.85$**	**$X_D \geq 0.74$**
Composição Aproximada do Produto ($<X_D>_{Aprox}$)	**0.98**	**0.9**	**0.8**
Composição do Produto ($<X_D>$)	**$<X_{D1}>$**	**$<X_{D2}>$**	**$<X_{D3}>$**
Razão de Refluxo Durante Coleta	**RR1**	**RR2**	**RR3**
Composição do Tanque Inferior ao **Final da Coleta do Produto**	**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 refervedor, responda:

(i) Determine as composições do tanque refervedor $\mathbf{X_{B1}}$, $\mathbf{X_{B2}}$ e $\mathbf{X_{B3}}$ ao final de cada coleta a partir das composições aproximadas de cada produto;
(ii) Com base em (i), determine as razões de refluxo mínimas $\mathbf{RR_1^{MIN}}$, $\mathbf{RR_2^{MIN}}$, $\mathbf{RR_3^{MIN}}$ 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 $\mathbf{RR_1, RR_2, RR_3}$, das vazões de destilação correspondentes $\mathbf{D_1}$, $\mathbf{D_2}$, $\mathbf{D_3}$, dos tempos de coleta $\mathbf{t_1}$, $\mathbf{t_2}$, $\mathbf{t_3}$ e das vazões $\mathbf{L_1}$, $\mathbf{L_2}$, $\mathbf{L_3}$;
(iv) Determine o valor do comprimento mínimo de recheio necessário às condições de composição obtidas em (i) ao final da coleta do primeiro produto ($\mathbf{Z_{C1}^{MIN}}$);
(v) A operação será projetada com comprimento de recheio necessário à separação segundo as condições composicionais ao final da geração de $\mathbf{P_2}$. Obter este comprimento ($\mathbf{Z_C}$);
(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 $\mathbf{P_2}$;
(vii) Dadas às respostas (i) e (iv), estimar a composição inicial do destilado coletado para formação de $\mathbf{P_2}$ ($\mathbf{X_{D2}^{INI}}$);

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

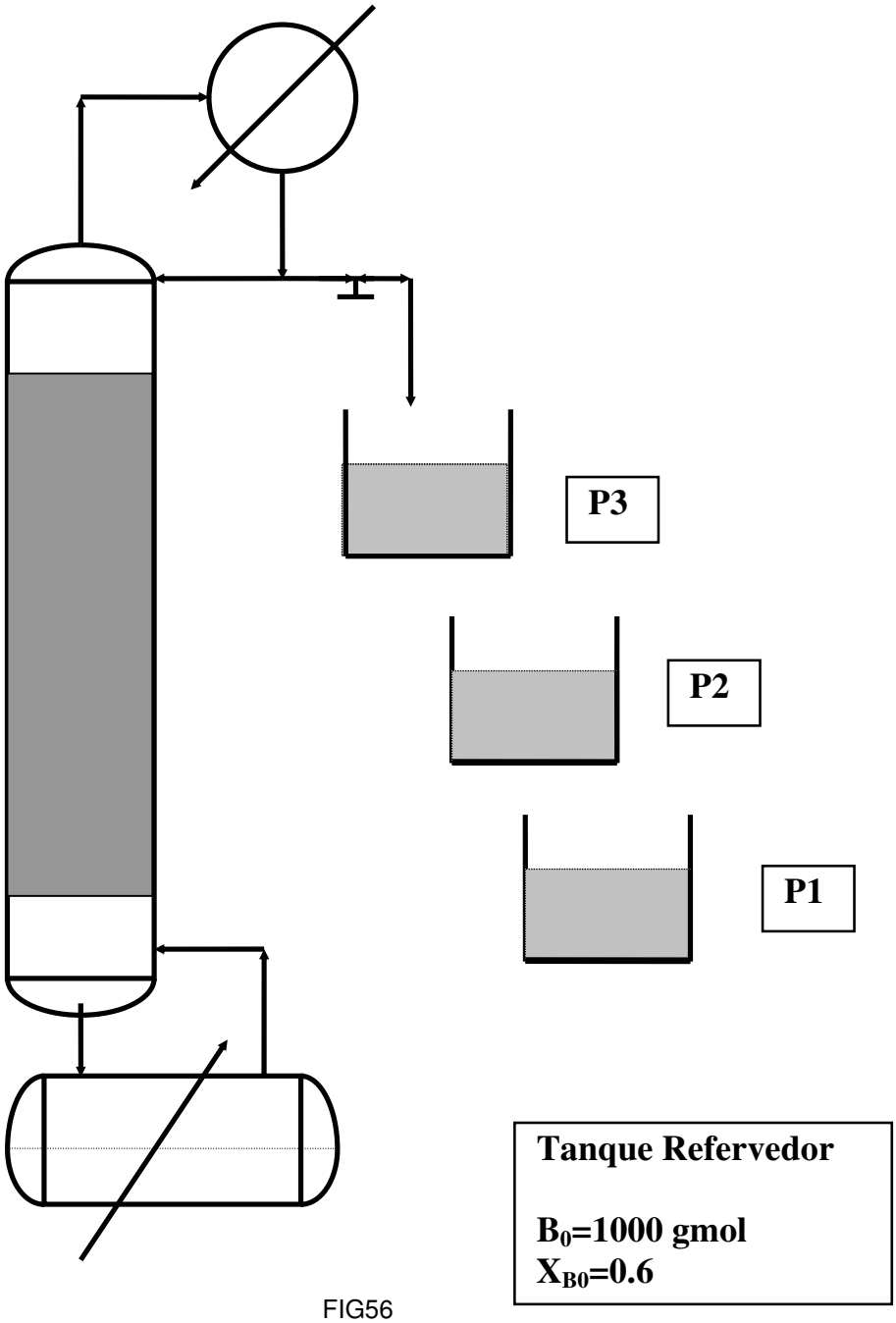

FIG56

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^{SAT}/P_2^{SAT} = 2.0 (constante)
- Fase Vapor é Gás Ideal apenas com "1" e "2"
- Composição e Temperatura Azeotrópica (P=1 atm): X_{AZ} = 0.865 (fr.molar "1"), T_{AZ} = 360K
- 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: λ = 30000 J/gmol
- Validade da Aproximação McCabe-Thiele em Base Isenta de "Entrainer" (BIE)
- Modelo de Fase Líquida com/sem "Entrainer" : $\overline{G}^E / RT = AX_1X_2 - BX_2X_3$ ("3" : E)
- Viscosidade e Densidade de Fase Líquida : μ^L = 1 cP , ρ^L = 1000 kg/m^3
- Volatilidade Relativa 1/2 em P=1 atm sob Excesso de "Entrainer": $\alpha_{12}^{Exc.E}$ = 3.1
- Constante do Gás Ideal: R=82.05 atm.cm^3/gmol.K

Termos e Definições a Serem Usadas no Restante do Problema:

- **BIE**: **B**ase **I**senta de "**E**ntrainer"
- 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 T**odas as **V**azões e **C**omposições **E**xternas
- 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 gmol/s, Z = X_{AZ}, Vapor Saturado em P = 1 atm
- Carga de "Entrainer" acima do recheio: E gmol/s
- E/D = 4
- Altura Global de Unidade de Transferência (BIE): H_{OG} = 0.5 m (Aprox. Constante)
- Perda de Pressão Máxima no Leito: 0.05 atm

Com base nestes dados, determine:
(i) Expressão para volatilidade relativa ½ na presença de E e a relação ELV na forma Y*=g(X);
(ii) A máxima razão de refluxo (RR^{MAX}) em que a operação é viável com E/D=4;
(iii) Obter TVCE e REC_1% nas condições do item (ii);
(iv) Em que condições Z_C será mínimo para gerar este destilado e qual é este valor Z_C^{MIN}?
(v) Obter TVCE e REC_1% nas condições do item (iv);
(vi) Voltando ao caso E/D=4, obter a produção máxima da operação D^{MAX};
(vii) Obter e TVCE e REC_1% nas condições do item (vi);
(viii) Obter a mínima razão de refluxo da operação (RR^{MIN});
(ix) Operando com RR= 1.3*RR^{MIN}, obter TVCE e REC_1%;
(x) Nas condições do item (ix), obter Z_C;
(xi) Nas condições do item (ix), obter D_C e a % de Inundação do ponto operacional;
(xii) 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.

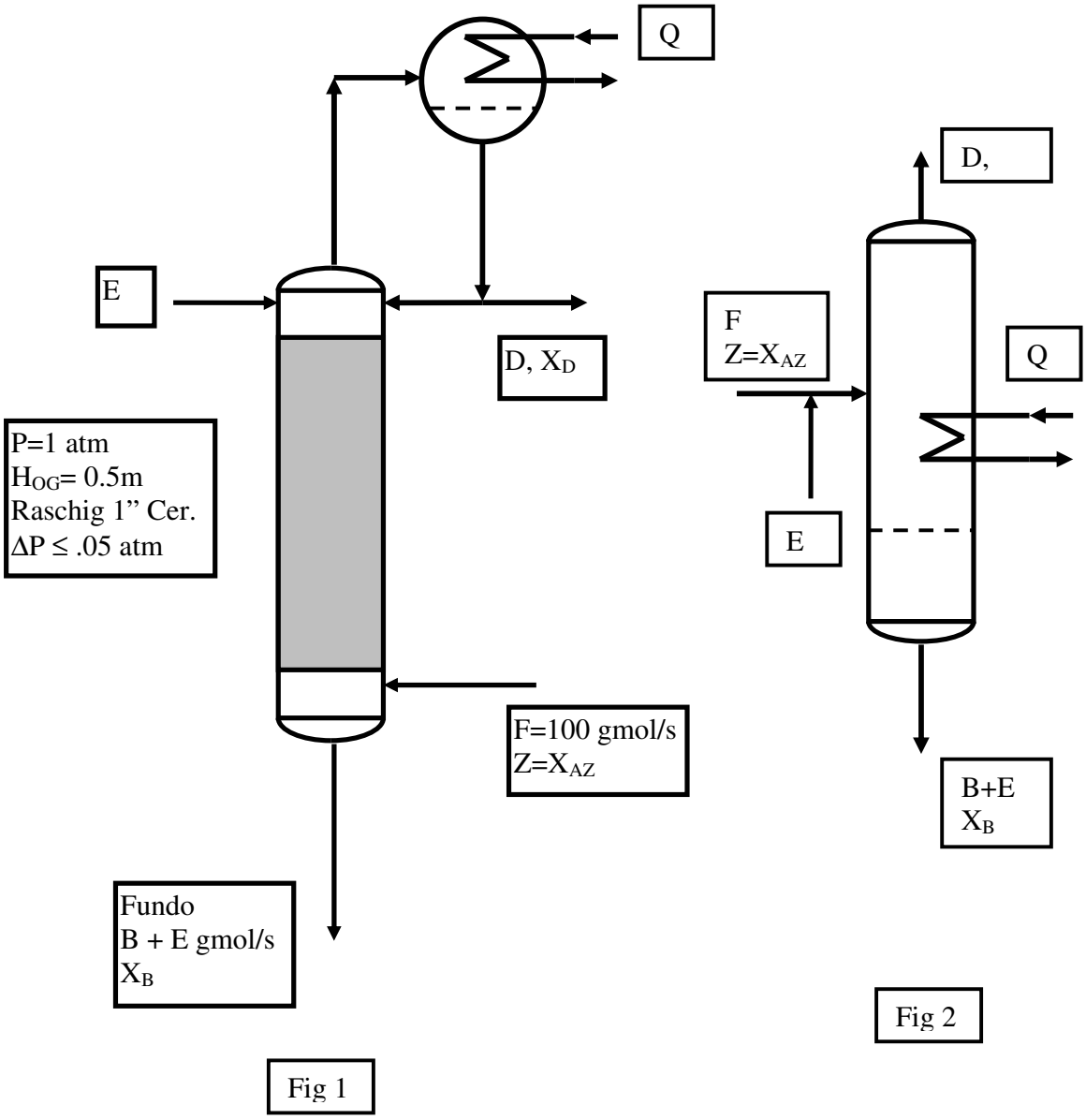

FIG57a FIG57b

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) (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 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.

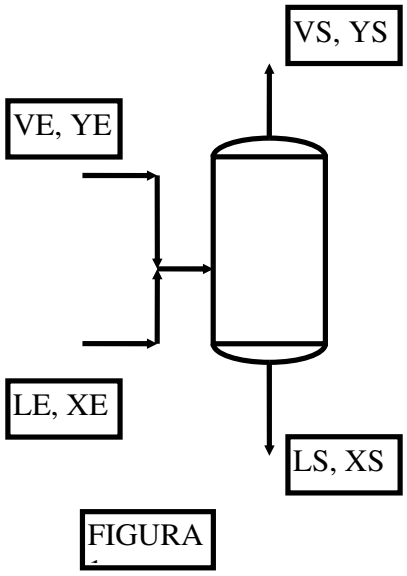

FIG58a

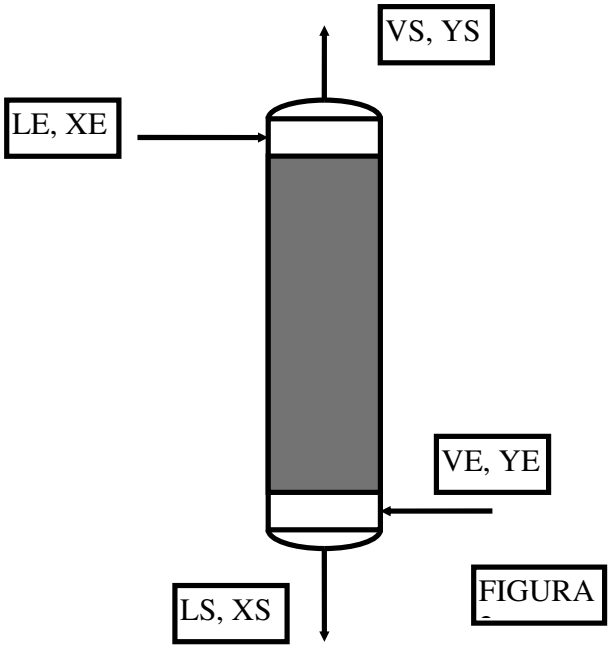

FIG58b

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) ↔ 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 (ΔP) 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=1m, H_G=1.2 m,
- Massas Moleculares: A:60, B:120, C:30, I:20
- Fase Líquida: Viscosidade μ=2 cP, Densidade ρ=850 kg/m3, Temperatura T=380 K
- "B": não-volátil; "C", "I" : não-condensáveis

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

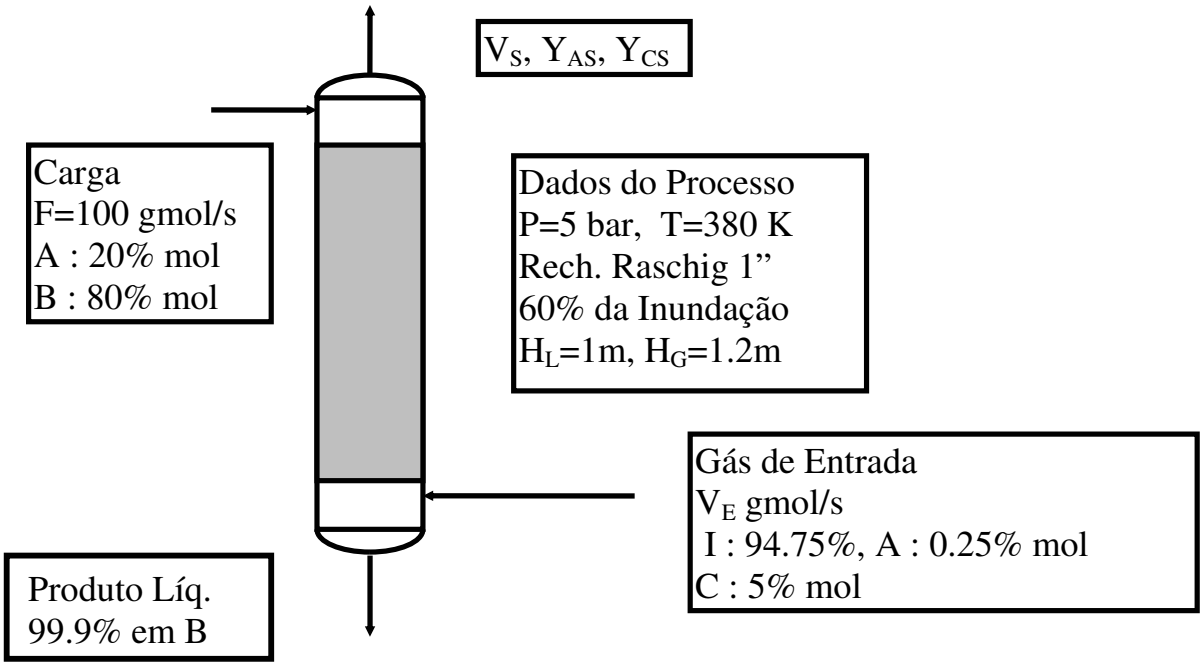

FIG59

Questão 16 (EF – 2001/02):

Considere 10000 gmol de mistura formada por "1"e "2", líquida e saturada em *P=1 bar*, com 60% mol em "1". Admite-se volatilidade relativa constante (α*=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 refervedor) em ambas as seções (const.);
- L_0, L_1: gmol/s de líquido nas seções de retificação e de esgotamento (const.);
- D=1 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.

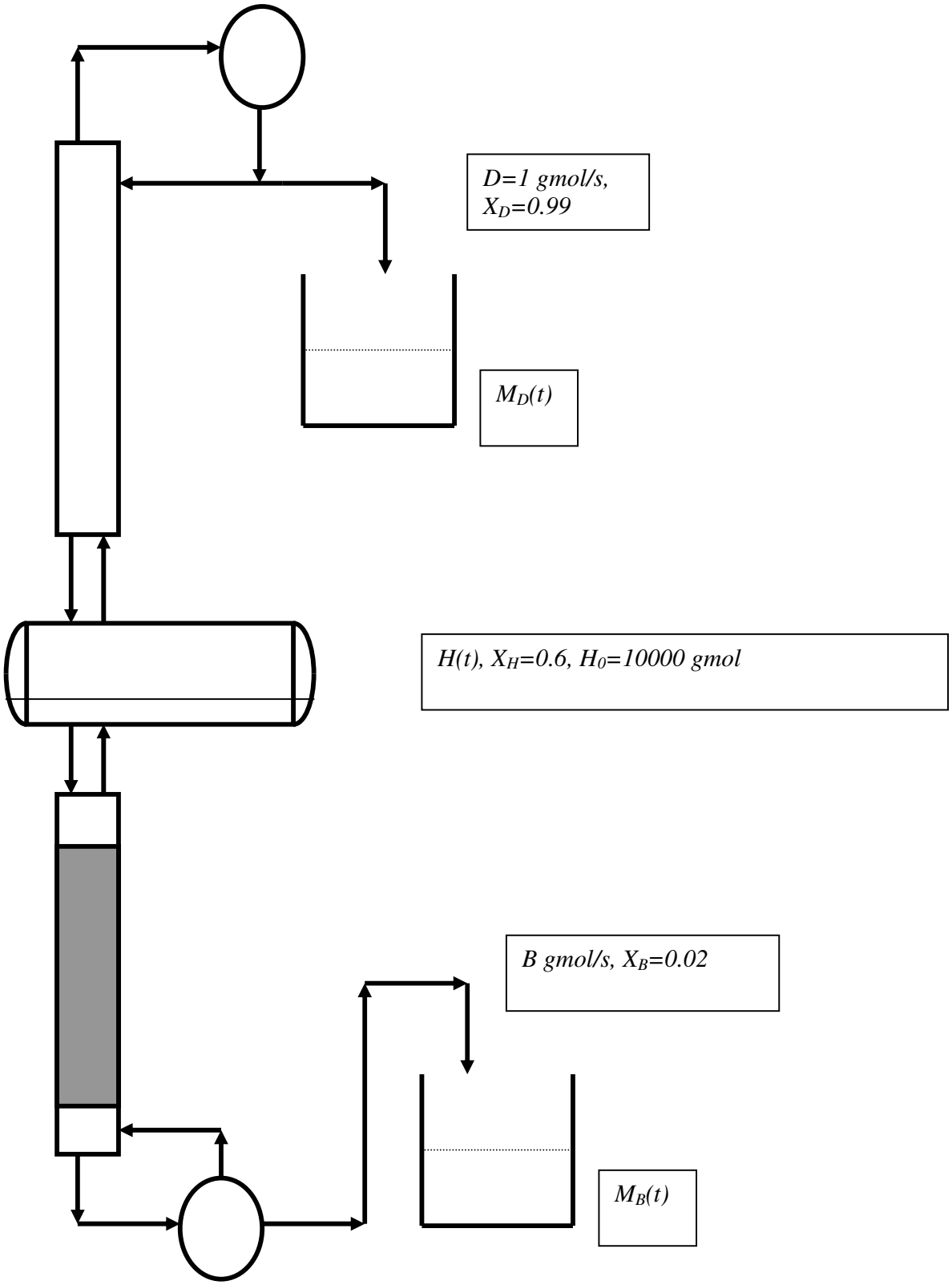

FIG60

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 ½ (α) 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 ($D=0.94*D^{MAX}$). Sabe-se que a condição (I) exigiu 3.3m deste recheio. Com base nestes dados responda:

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

(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 ítem (iii) com referência ao caso (III);

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

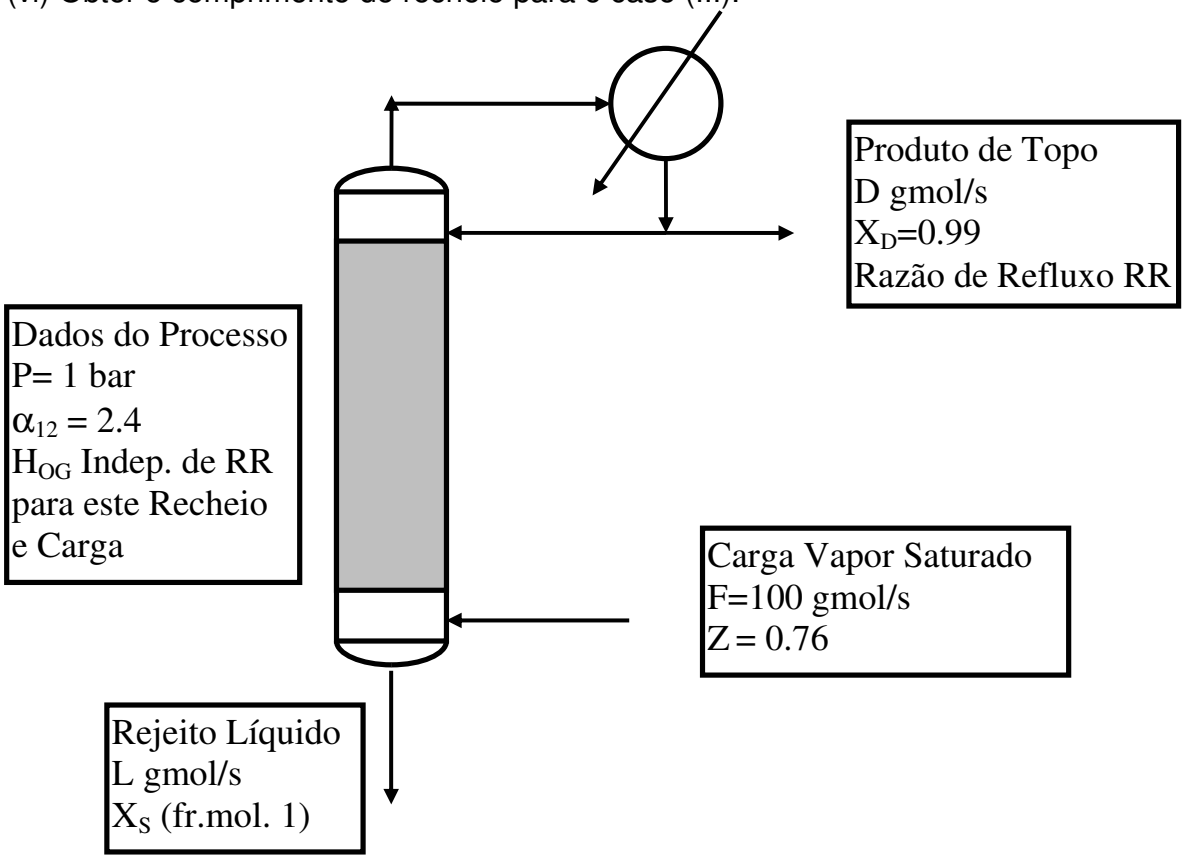

FIG61

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

A partir disto, determine:
(i) Estimativa para a carga térmica (kW) do condensador;
(ii) Estimativa para as vazões (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.

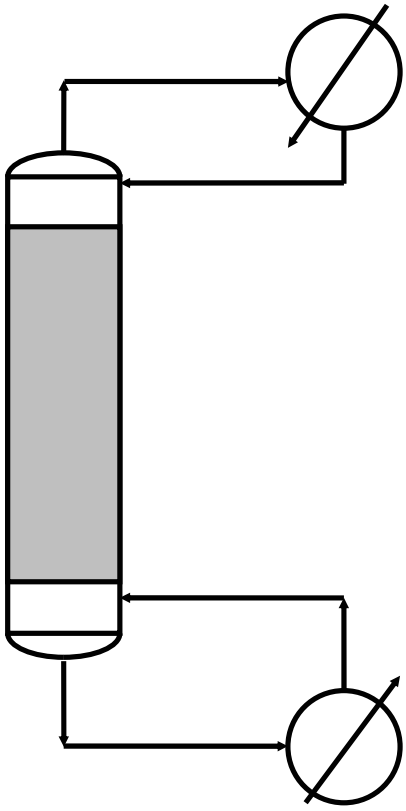

FIG62

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 $\mathbf{H_G = H_L}$ =1m.

A partir destes dados, 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 comprimento necessário de recheio, Zc^{MIN}.

(iii) Nas condições de (ii), as vazões e composições dos produtos, a razão de refluxo e REC1%.

(iv) Operando com $D=0.9*D^{MAX}$ obter REC1%, a razão de refluxo, as vazões e composições dos produtos.

(v) Nas condições de (iv), obter o comprimento de recheio, Zc.

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

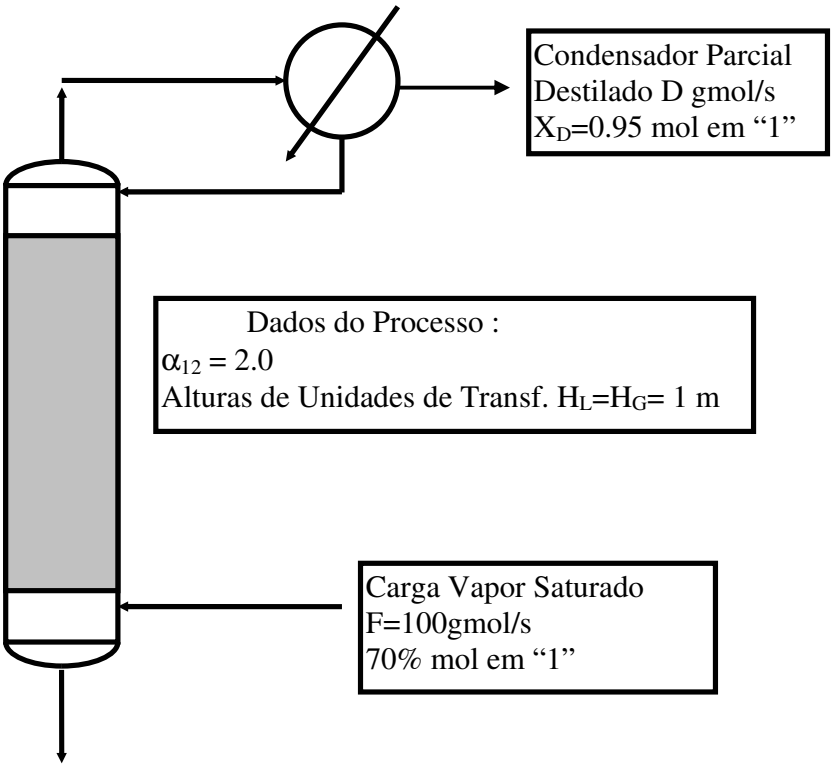

FIG63

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 $D=0.9*D^{MAX}$ 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** (100gmol/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=1m e H_V=1m.

A partir deste dados e das informações abaixo, determine :

(i) A mínima razão de refluxo de fundo (S^{MIN});

(ii) As vazões e composições de todos os produtos e cargas na condição de (i);

(iii) Admita operação com $S=2*S^{MIN}$. 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: α=2
- Admitir validade da Aproximação McCabe-Thiele

Alturas de unidades de transferência constantes: H_L=1m, H_G=1.2 m.

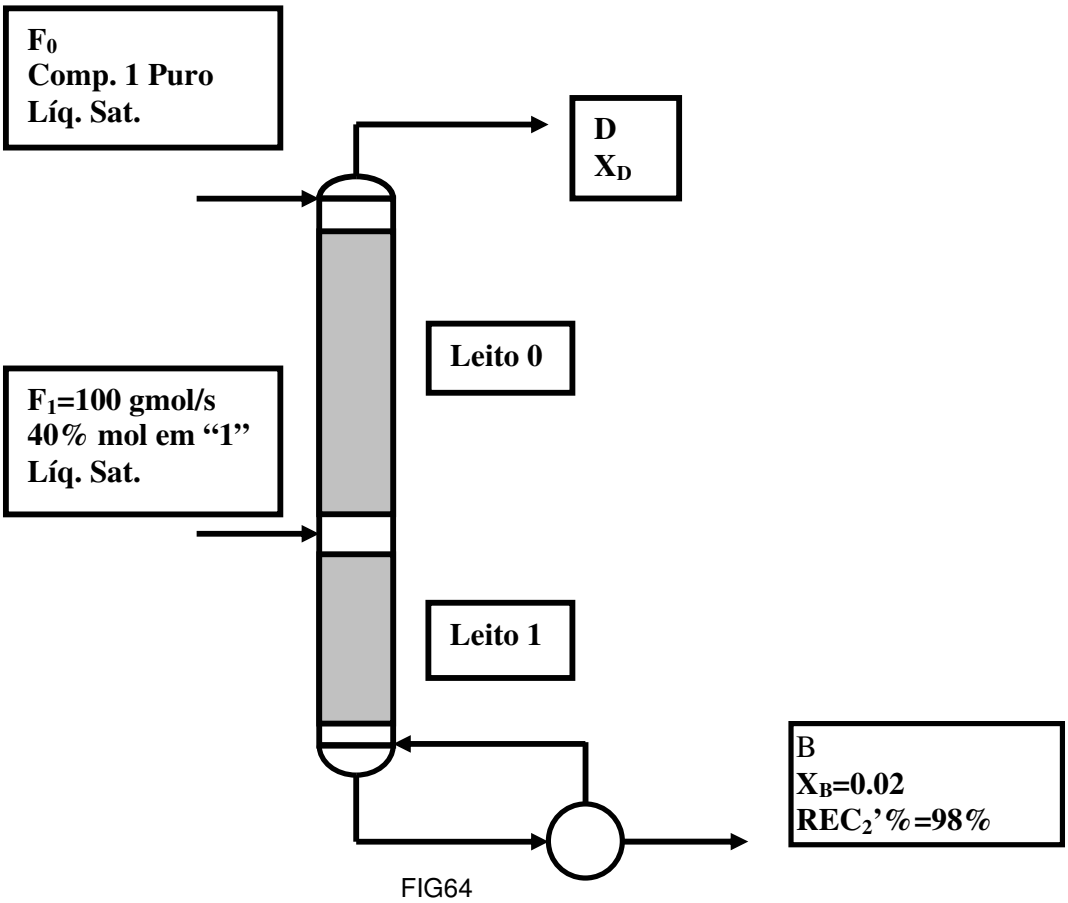

FIG64

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

A partir disto, e admitindo vazões constantes ao longo do leito, determine:
(i) Máxima produção possível de destilado (D^{MAX});
(ii) Vazões e composições de produtos nas condições de (i);
(iii) Carga térmica do condensador nas condições de (i);
(iv) Razão de refluxo nas condições de (i);
(v) Comprimento de recheio necessário nas condições de (i);
(vi) Mínimo comprimento de recheio necessário a esta separação (Z_C^{MIN});
(vii)Vazões e composições de produtos nas condições de (vi).

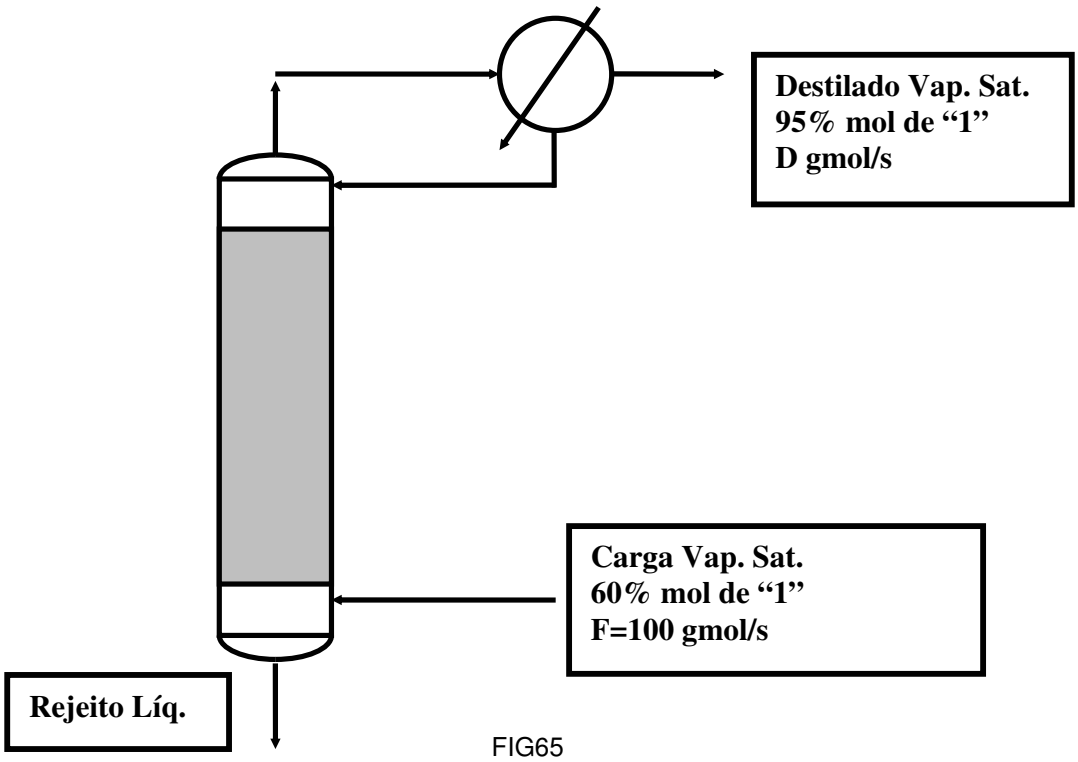

FIG65

Questão 23 (P2 – 2003/01):

Utilizando o **Método Ponchon-Savarit**, refazer os ítens (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=2bar. 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 $\mathbf{H_G = H_L}$ =1m. Determine:
(i) Máxima vazão de produto esgotado, B^{MAX}, que poderá ser gerado;
(ii) A recuperação % de diesel, a razão de refluxo (S) e o rejeito de topo na situação do ítem (i);
(iii) Mínimo comprimento necessário de recheio a esta separação, Zc^{MIN};
(iv) Nas condições de (iii), as vazões/composições de produtos, a razão de refluxo e recuperação % de diesel.

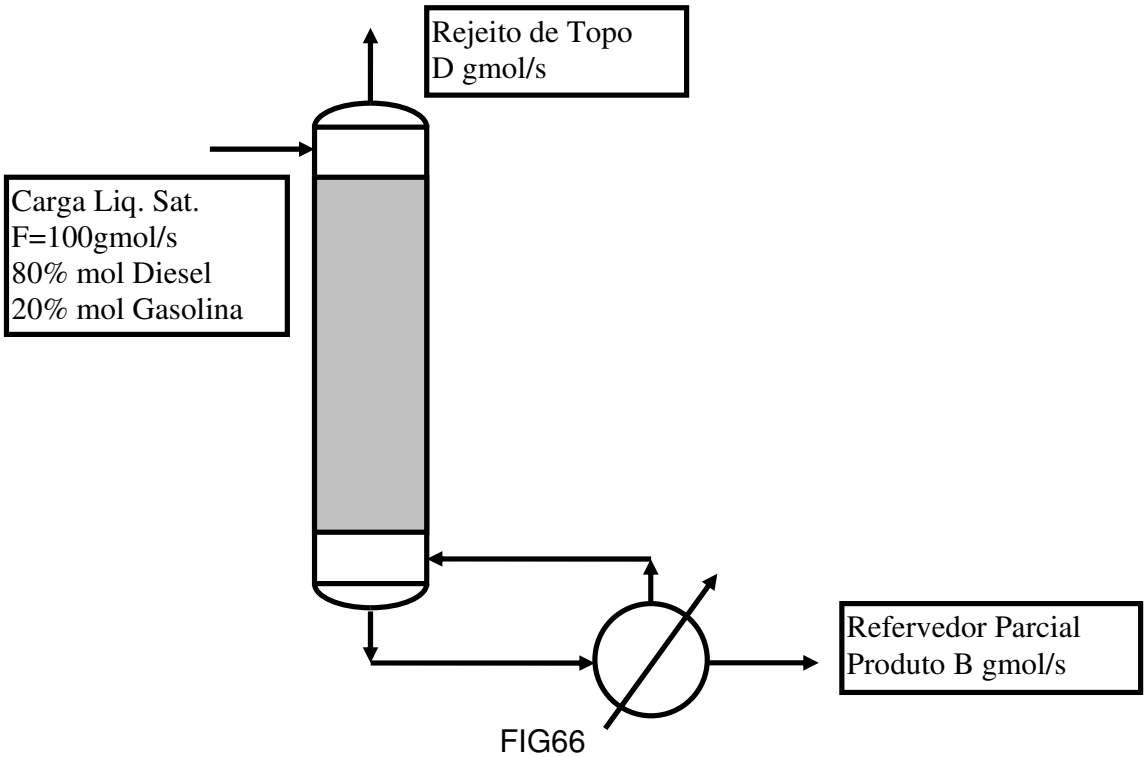

FIG66

Questão 25 (P2 – 2003/01):

Na figura **coluna de recheio** para retificar corrente **vapor saturada** (*F* gmol/s) com 90% mol de C3H6 e o restante de C3H8. A coluna utiliza **condensador parcial** gerando destilado vapor de C3H6 com pureza petroquímica (99.5% mol). Abaixo dados termodinâmicos e operacionais (*x,y* frações molares de C3H6).

- Pressão: *P=25bar*
- Leito Raschig Cerâmico 1" com Alturas de Unidades de Transferência $H_G = 0.25m$, $H_L = 0.25\,m$
- ELV: Usar Volatilidade Relativa Constante Gerada nas **Condições de Carga**
- Fase Líquida é Solução Ideal; Coeficientes de Fugacidade em Fase Vapor : $\hat{\phi}^V_{C3H6} = .83$; $\hat{\phi}^V_{C3H8} = .85$
- Pressões de Vapor (P^{Sat}(bar), T(K)): $P^{Sat}_{C3H6}(T) = \exp(10.01 - 2254.1/T)$, $P^{Sat}_{C3H8}(T) = \exp(9.98 - 2304.1/T)$
- Entalpia de Vapor e de Líquido Sat. (P=25 bar) : $\overline{H}^{Sat}_V = 32 + 2y \;\; kJ/gmol$, $\overline{H}^{Sat}_L = 13 + 4x \;\; kJ/gmol$
- Usar Aproximação McCabe-Thiele ao longo da coluna

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

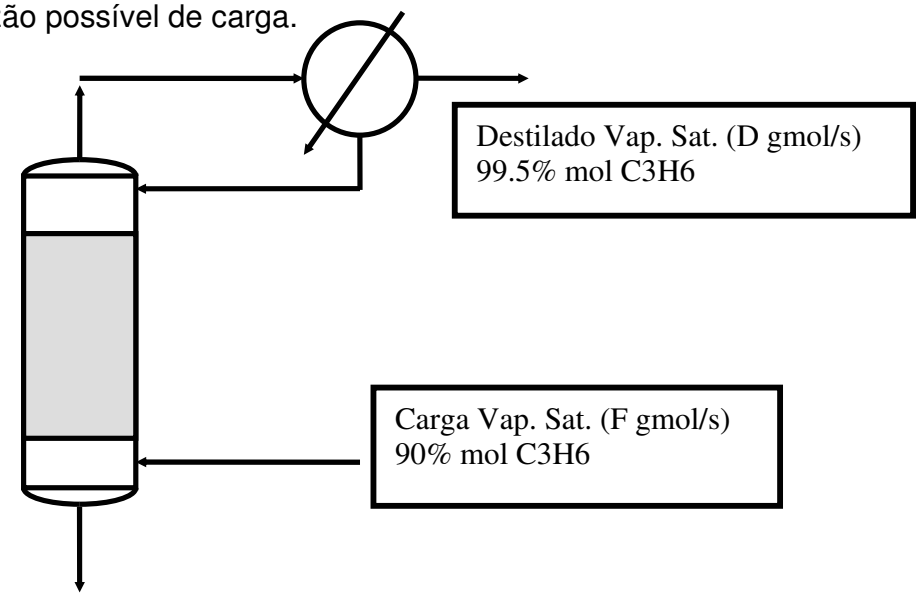

FIG67

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=2bar. 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 $\mathbf{H_G = H_L}$ =1m. Determine:
(i) Máxima vazão de produto esgotado, B^{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, Zc^{MIN};
(iv) Nas condições de (iii), as vazões/composições de produtos, a razão de refluxo e recuperação % de diesel.

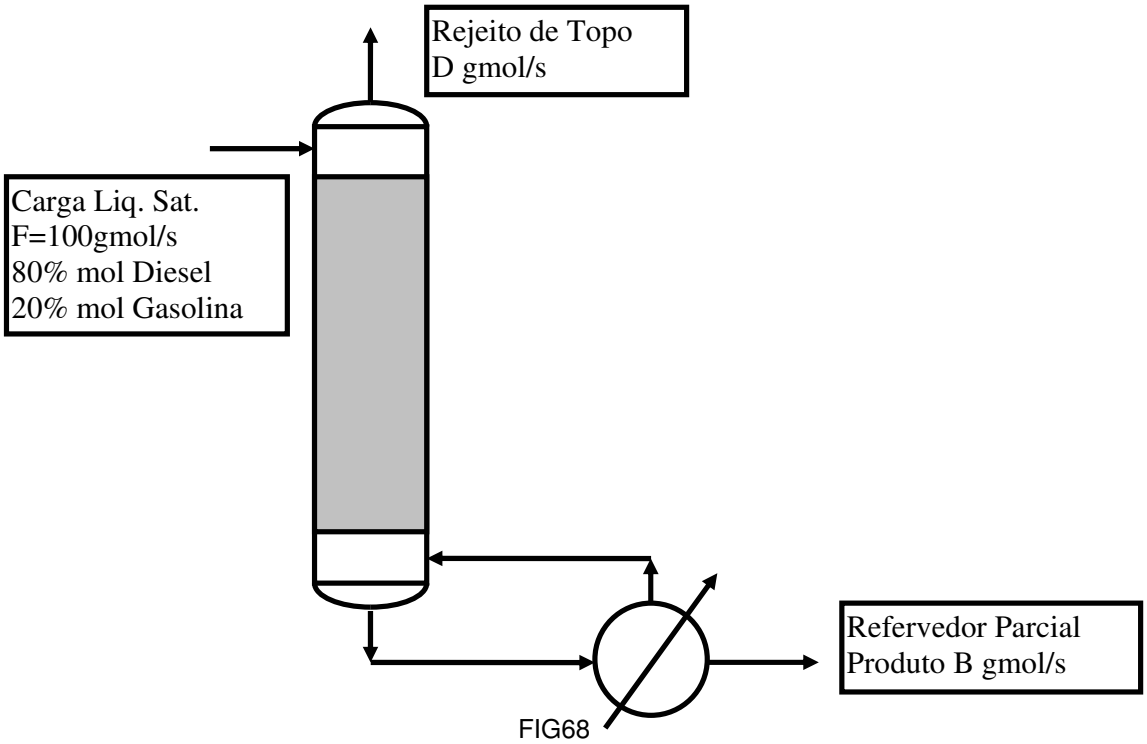

FIG68

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 °C na pressão da coluna (P=1 bar). Não há condensador, de modo que carrega-se líquido de topo (F_0) com 100% mol de "1" e sub-resfriada em 50 °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) : $\overline{H}_V = 50 - 10.Y$ (kJ/gmol)
- Entalpia de Líquido Saturado (P=1 bar) : $\overline{H}_L = 10.X$ (kJ/gmol)
- ELV : $Y = \dfrac{X.F(X)}{1 - X + X.F(X)}$, $F(X) = 2.45\exp(0.1*(1-X))$
- Capacidade Calorífica a Pressão Cte de Fase Vapor Próximo à Saturação : Cp^{Vap} = 0.089 kJ/gmol.K
- Capacidade Calorífica a Pressão Cte de Fase Líquida Próximo à Saturação : Cp^{Liq} = 0.16 kJ/gmol.K

A partir disto, responda:

(i) Com o **Método McCabe-Thiele**, determine o valor da mínima razão de refluxo de fundo (S^{MIN});

(ii) Nas condições do item (i), determine a carga térmica do refervedor (Q_R^{∞}) e as vazões F_0^{∞}, D^{∞} e B^{∞};

(iii) 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);

(iv) Nas condições do item (iii), determine a carga térmica do refervedor (Q_R) e as vazões F_0, D e B.

(v) Pretende-se substituir o trecho de estágios entre F1 e o refervedor 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.

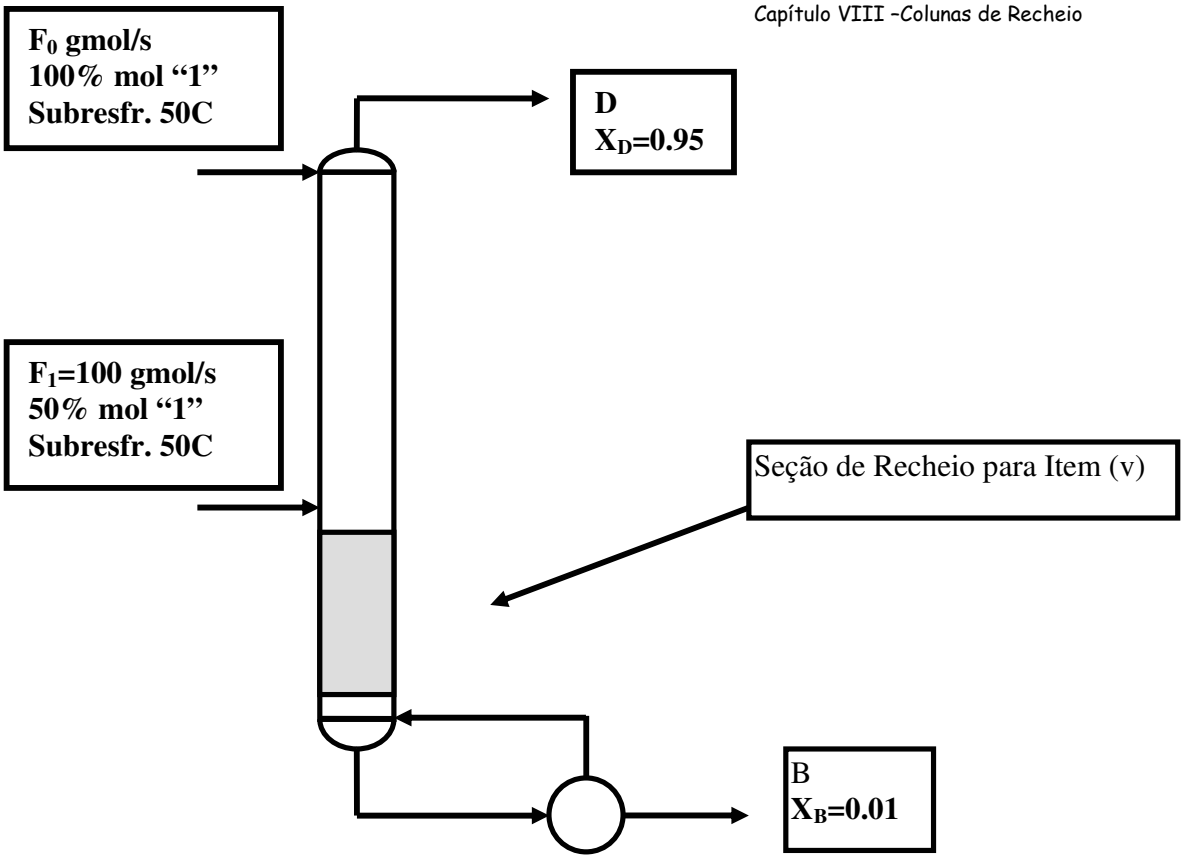

FIG69

Questão 28 (P2 – 2004/01):

Uma corrente gasosa F de 100 gmol/s contém 30% mol de CO2 e 70% de CH4, estando inicialmente na pressão de P=25 bar e temperatura de T=35C. Pretende-se purificar o CH4 absorvendo-se o CO2 com uma solução aquosa de MEA (monoetanolamina) em contra-corrente na coluna de recheio Raschig Cerâmico 1" mostrada abaixo. Comparativamente ao CO2, pode-se considerar que o CH4 é praticamente insolúvel na fase líquida e que MEA e água não vaporizam nas condições do processo. Sendo X e Y frações molares de CO2 em cada fase, têm-se os dados abaixo válidos para o processo:

- Relação de Equilíbrio Líquido-Vapor para distribuição de CO2 : $Y^{*}=5X - 11.5X^2 + 9.1X^3$
- Alturas de Unidades de Transferência: $H_L=H_G= 0.6m$ (aprox. constantes)
- Recuperação de CO2 pelo solvente: 99%
- Inicialmente a solução aquosa de MEA não contém CO2

A partir disto, determine:
(i) A mínima vazão (gmol/s) de solvente (MEA+água) (L_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 solvente 80% maior que o obtido em (i), $L_E=1.8L_E^{MIN}$, obter vazões e composições de todas as correntes;
(vi) Nas condições de (v), obter o comprimento de recheio necessário (Z_C).

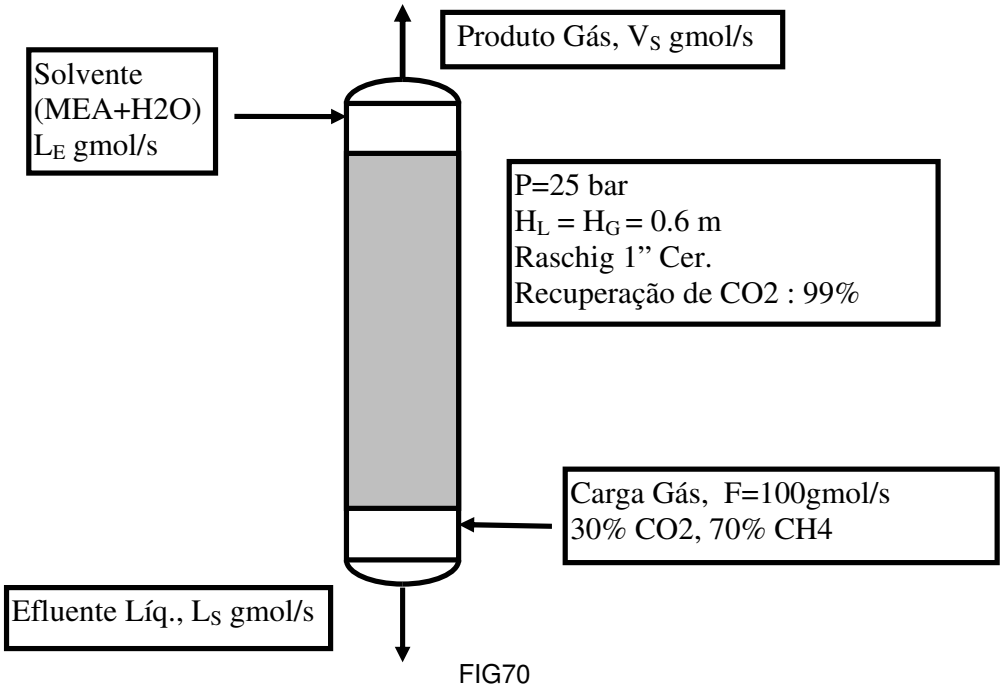

FIG70

Questão 29 (EF – 2004/01):

Utiliza-se coluna de recheio (Raschig 1", cerâmico) a T=25C e P=1bar para esgotar a acetona de 100gmol/s de corrente líquida contendo 90% (mol) de água e 10% (mol) de acetona, usando-se contato com 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:
(i) Obter relação de equilíbrio líquido-vapor, válida para esta operação, na forma Y=g(X);
(ii) Obter o mínimo consumo de N_2 necessário (V_E^{MIN}) e todas as correntes nesta condição de operação;
(iii) Usando vazão de N_2 50% superior à mínima, obter todas as correntes do processo;
(iv) Nas condições de (iii), obter o comprimento necessário de recheio (Z_C);

DADOS TERMODINÂMICOS E DE RECHEIO

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

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

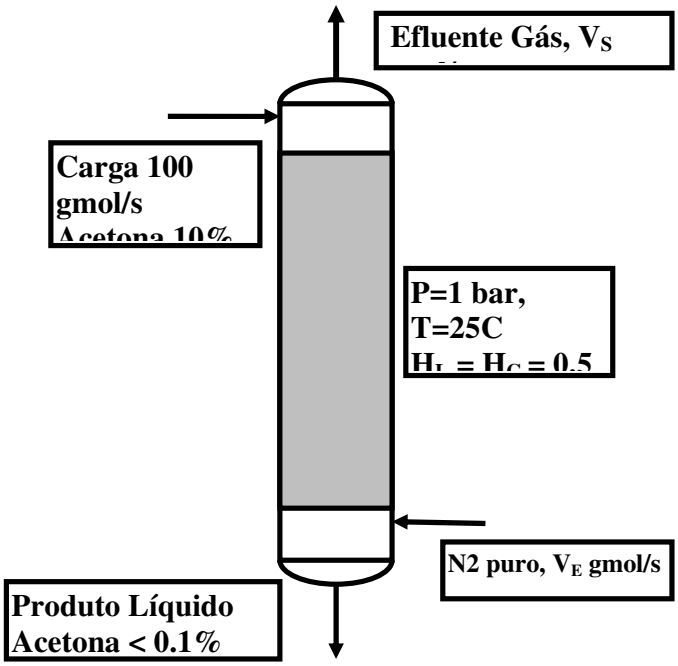

FIG71

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 substancias 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=1bar), em coluna de recheio Raschig cerâmico 1" (FIG72a). As correntes são alimentadas a T=100°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 : $P_1^{SAT} = 0.8\ bar$ (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= 0.6m (aprox. constantes)

A partir disto, responda:
(i) A mínima vazão de vapor (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 correntes nas condições de (iii);
(v) Usando-se taxa de vapor 50% superior ao obtido em (i), obter vazões e composições de correntes;
(vi) 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.

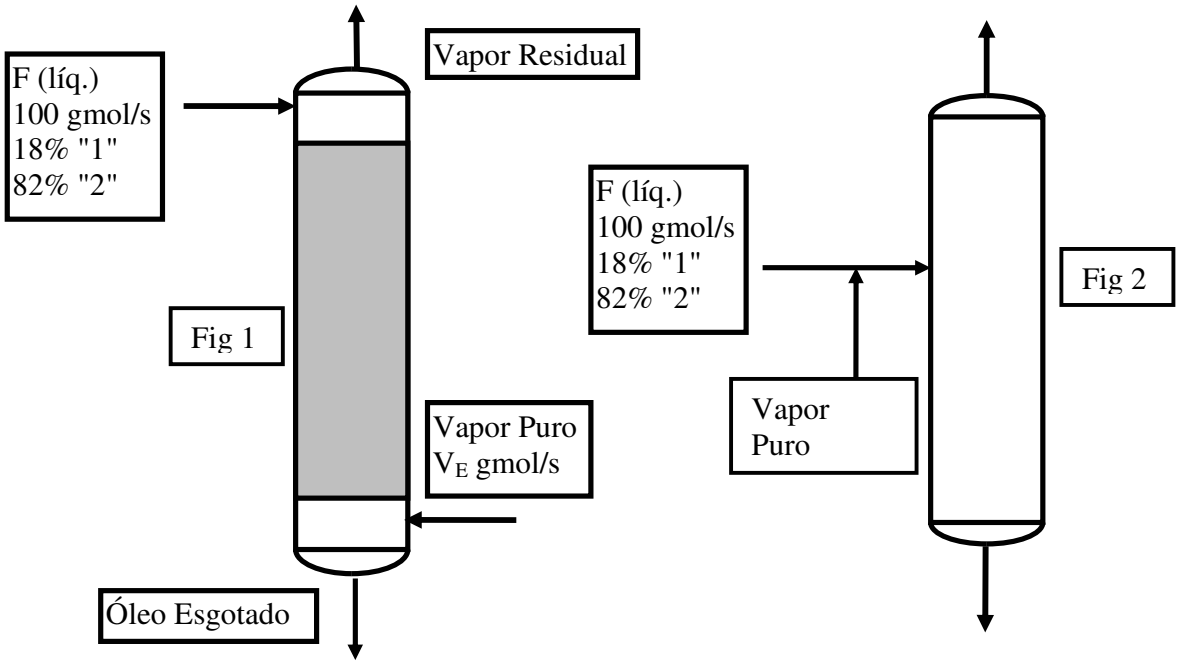

FIG72a FIG72b

Questão 31 (EF – 2004/02):

Pretende-se processar corrente F líquida e saturada (P=1bar) 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=1bar. A volatilidade relativa "1"/"2" pode ser admitida constante e calculada nas condições de F. Considere os seguintes dados:

- Pressões de vapor *T*(K), *P*(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'%).

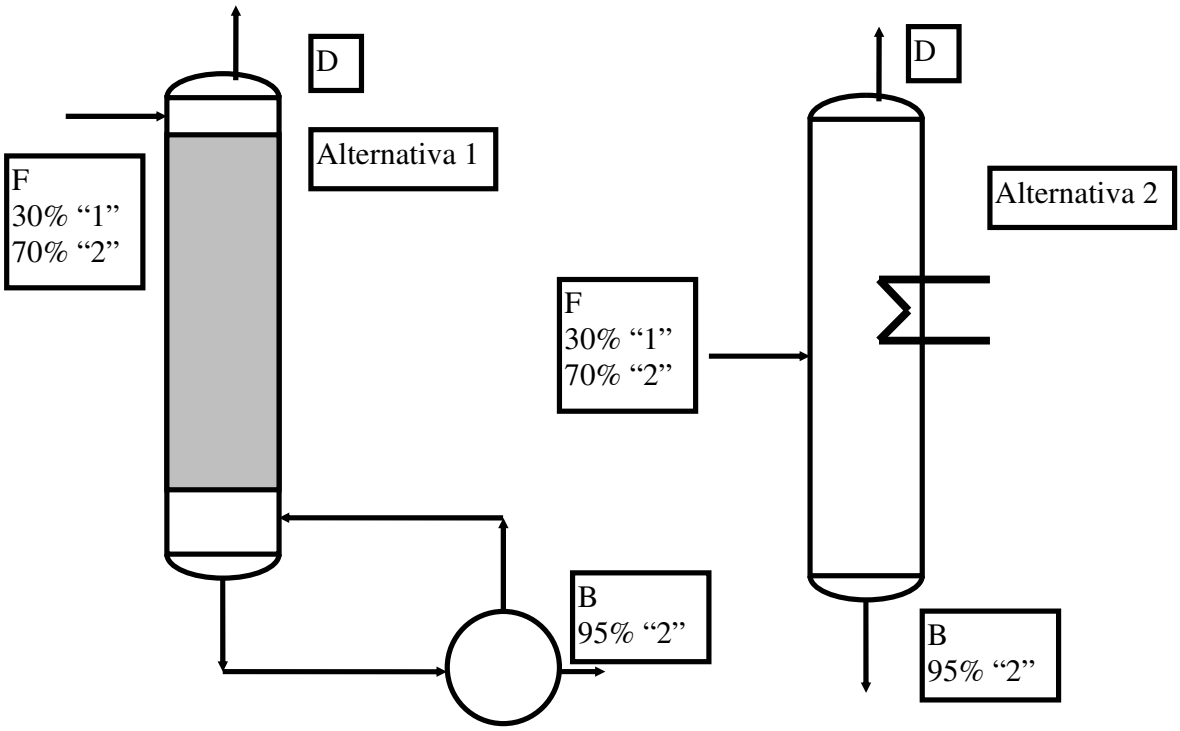

FIG73a FIG73b

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}(bar), T(K)): $P_A^{Sat}(T) = exp(10 - 2100/T),\quad P_B^{Sat}(T) = exp(9 - 2000/T)$
- Entalpia de Vapor e de Líquido Sat. (*P=30bar*) : $\overline{H}_V^{Sat} = 30 - 2Y\ \ kJ/gmol$, $\overline{H}_L^{Sat} = 10 + 4X\ \ kJ/gmol$
- Usar Aproximação McCabe-Thiele ao longo da coluna

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

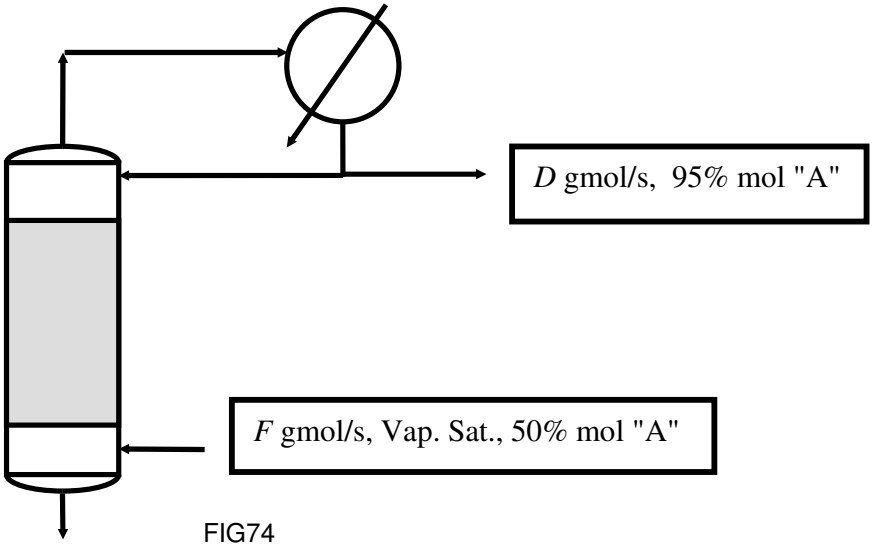

FIG74

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:

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

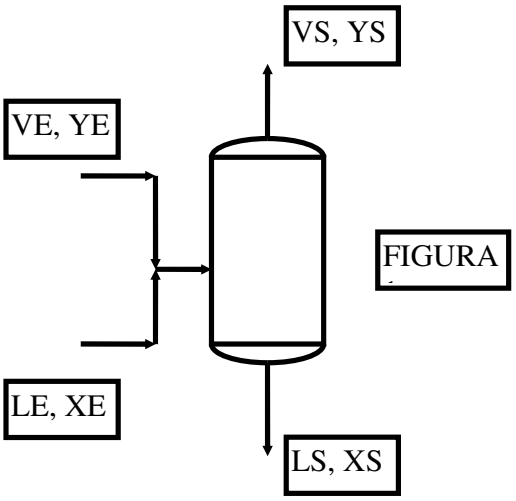

FIG75a

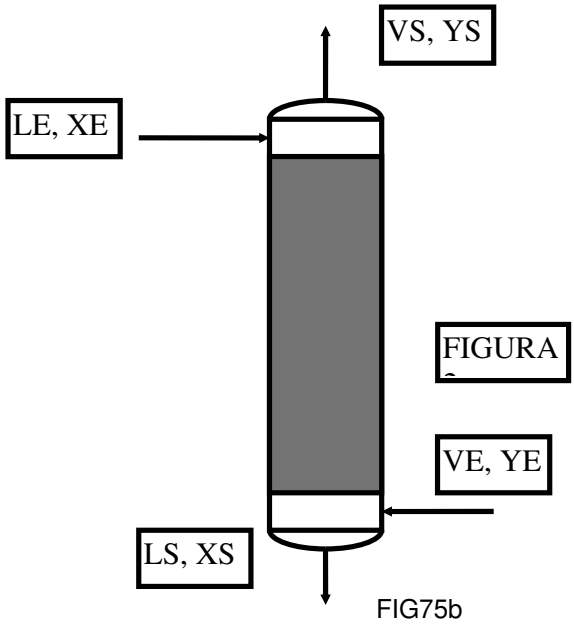

FIG75b

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 refervedor 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=1bar*

- 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*): $\overline{H}_V^{Sat} = 40 - 5Y \;\; kJ/gmol$, $\overline{H}_L^{Sat} = 10 + 5X \;\; kJ/gmol$
- Usar Aproximação McCabe-Thiele ao longo da coluna

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

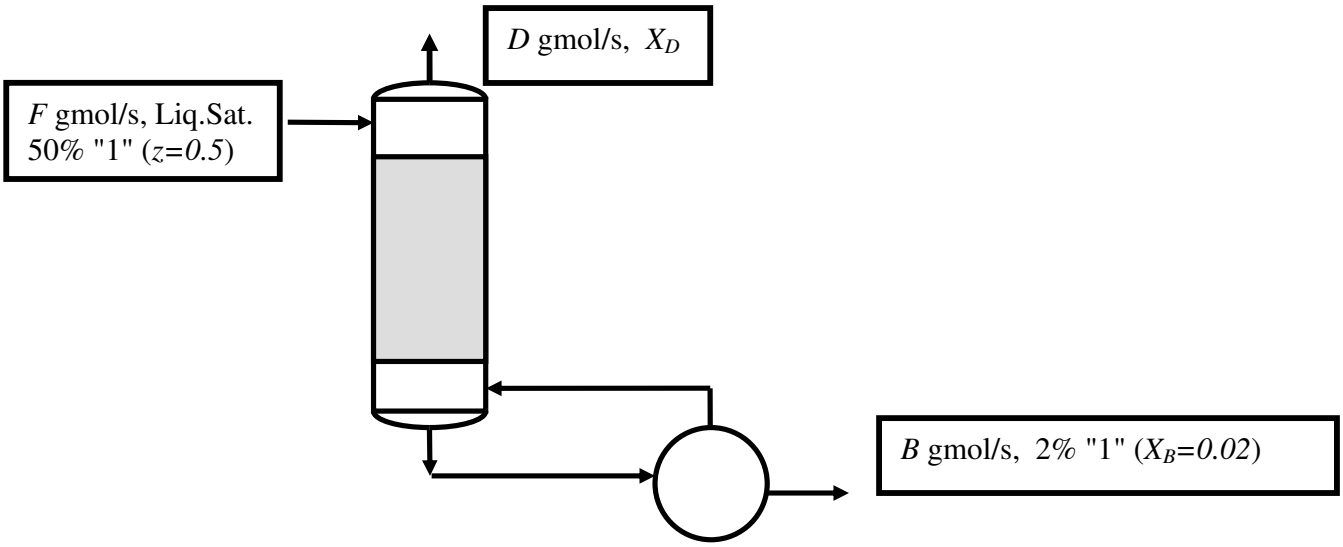

FIG76

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 **refervedor 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 bar* para esgotar líquido volátil "A" de 100gmol/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:

(i) Obter relação de equilíbrio líquido-vapor, válida para esta operação, na forma *Y=g(X);*

(ii) Obter o mínimo consumo de N_2 necessário (V_E^{MIN}) e todas as correntes nesta condição de operação;

(iii) Usando vazão de N_2 50% superior à mínima, obter todas as correntes do processo;

(iv) 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* : $P^{SAT}=6\ bar$
- 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 : $\hat{\phi}_A^{Vap} = 0.9$

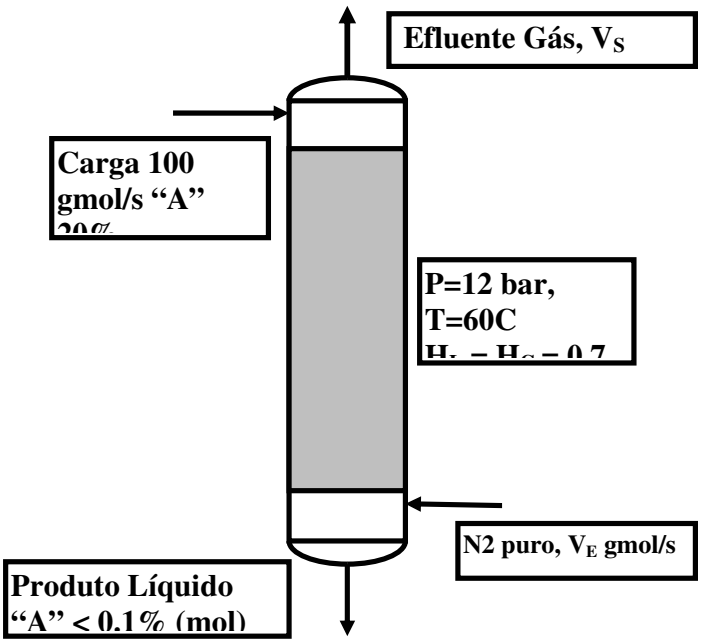

FIG77

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 refervedor, 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:

(i) A equação de operação do processo em termos de $q=W/F$;

(ii) Mínimo consumo de vapor de esgotamento por gmol de carga ($q^{MIN}=W^{MIN}/F$) neste serviço;

(iii) Vazões e composições das correntes externas nas condições de (ii);

(iv) Mínimo comprimento de recheio da separação (Z_C^{MIN});

(v) Vazões e composições das correntes externas nas condições de (iv);

(vi) Vazões e composições das correntes externas para a coluna operar com $q/q^{MIN} = 1.3$;

(vii) O comprimento de recheio (Z_C) necessário em (vi).

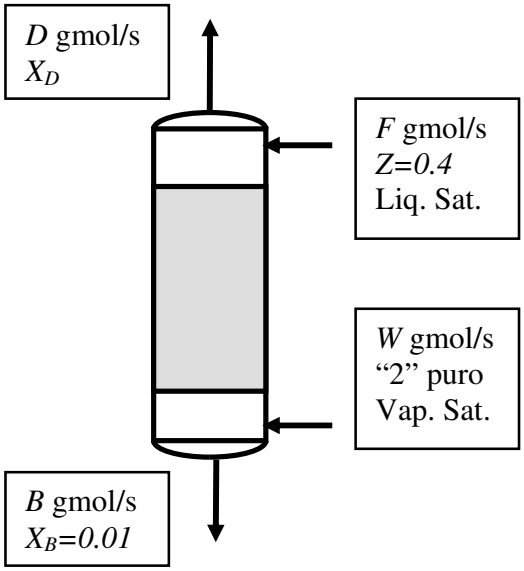

FIG78

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 $\overline{H}\ vs\ X,Y$.

(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.

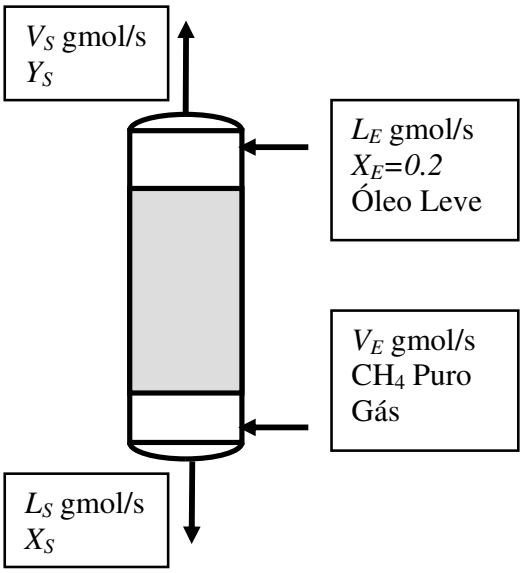

FIG79

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=1bar*;
- Seção de recheio com comprimento $Z_C=2.5m$;
- 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 refervedor: $X_B=0.1$
- Usar Aproximação McCabe-Thiele ao longo da coluna

Determine:
(i) A Equação de Operação para cálculos de recheio;
(ii) As composições nas entradas e saídas dos trocadores de calor;
(iii) O Número de Unidades de Transferência *Nog* e a respectiva Altura de Unidade de Transferência *Hog*;
(iv) 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.

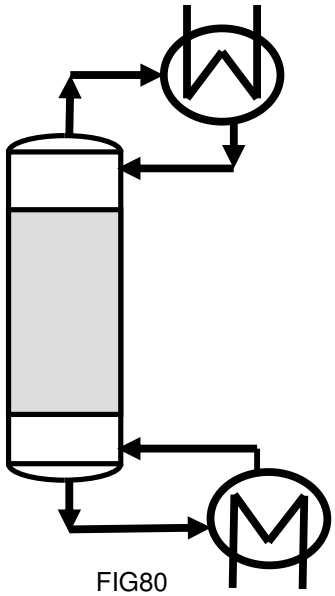

FIG80

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 $\overline{H}\ vs\ X, Y$.

(i) Determinar quantos **pratos perfeitos** são necessários na coluna;
(ii) Sabendo que a carga térmica do refervedor é de 3700 W, obter a carga térmica do condensador;
(iii) Calcular as **vazões de entrada e de saída** do condensador e do refervedor 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=1bar*, 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*=5m.* Dados termodinâmicos e operacionais (*X,Y* fr. mol de "1" no líquido e vapor, respectivamente), são:

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

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

Determine:
(i) O Valor da Constante de Henry de "1" em "2";
(ii) Expressão para a Volatilidade Relativa 12;
(iii) A Equação de Operação da unidade em termos de *W/F*;
(iv) O máximo teor de "1" obtenível no topo (X_D^{MAX});
(v) 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:
(vi) Mínimo comprimento de recheio da separação (Z_C^{MIN});
(vii) Vazões/composições de correntes externas na condição de (vi);
(viii) Mínima razão de líquido de topo (W^{MIN}/F) e vazões/composições de correntes externas para este X_D;
(ix) Vazões/composições de correntes externas com $W/F=2^* W^{MIN}/F$;
(x) Determine se a unidade cumprirá o serviço sendo operada como em (ix);
(xi) Considere agora a coluna operando ***com pratos*** no lugar do recheio; usando os mesmos X_D e *W/F* doitem anterior, determine o ***número de pratos*** necessários para cumprir o serviço.

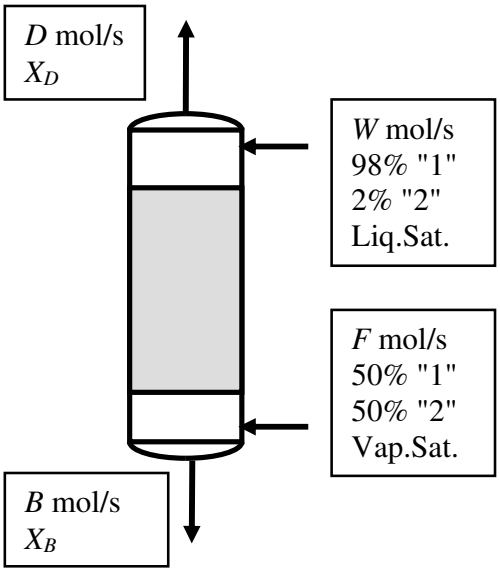

FIG81

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 ↔ C a qual obedece à relação de equilíbrio químico $K = \frac{X_C}{X_A.X_B}$ 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 $X_B = \frac{1-X_A}{1+X_A}$, $X_C = \frac{(1-X_A).X_A}{1+X_A}$

(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 bar*, Recheio Raschig 1" Cer, Operação aproximadamente isotérmica a 320K.
- Alturas de unidades de transferência: H_L=1m, H_G=1 m.

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

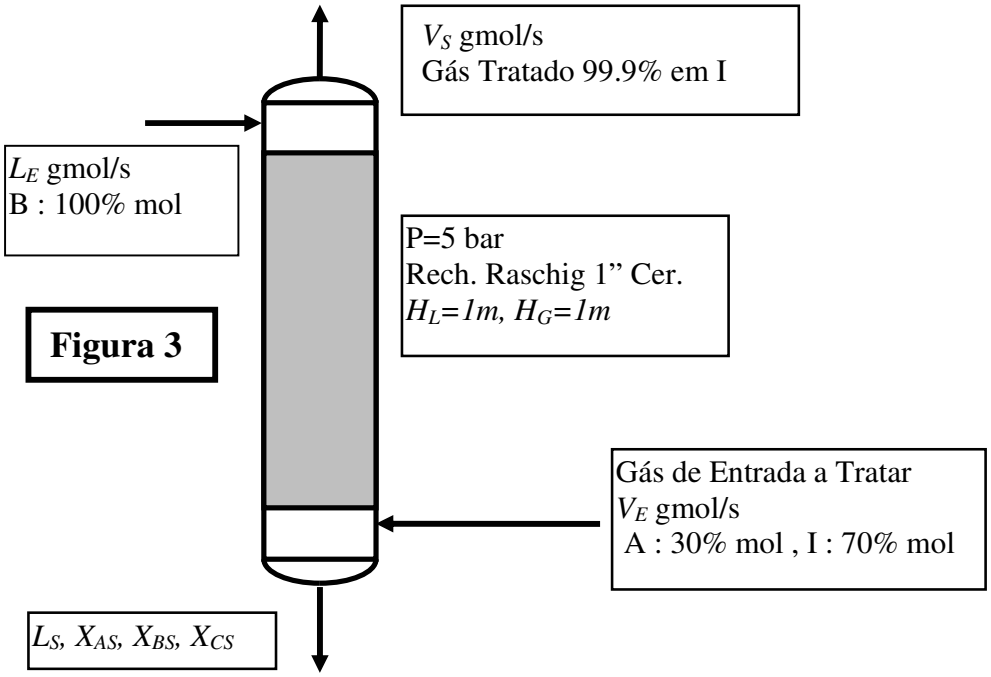

FIG82

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 refervedor 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 $\overline{G}^E / RT = AX_1X_2(1+X_1)$; 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*): $\overline{H}_V^{Sat} = 50 - 10Y \;\; kJ/gmol$, $\overline{H}_L^{Sat} = 10 - 5X \;\; kJ/gmol$
- Usar Aproximação McCabe-Thiele ao longo da coluna

Determine:

(i) Mínima carga térmica de refervedor por mol de carga ($\dot{Q}_{REF}^{MIN} / F$) que é possível usar;

(ii) A razão de refluxo, vazões e composições de produtos nas condições de (i);

(iii) 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 $\dot{Q}_{REF} / F = 1.1 * \dot{Q}_{REF}^{MIN} / F$;

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

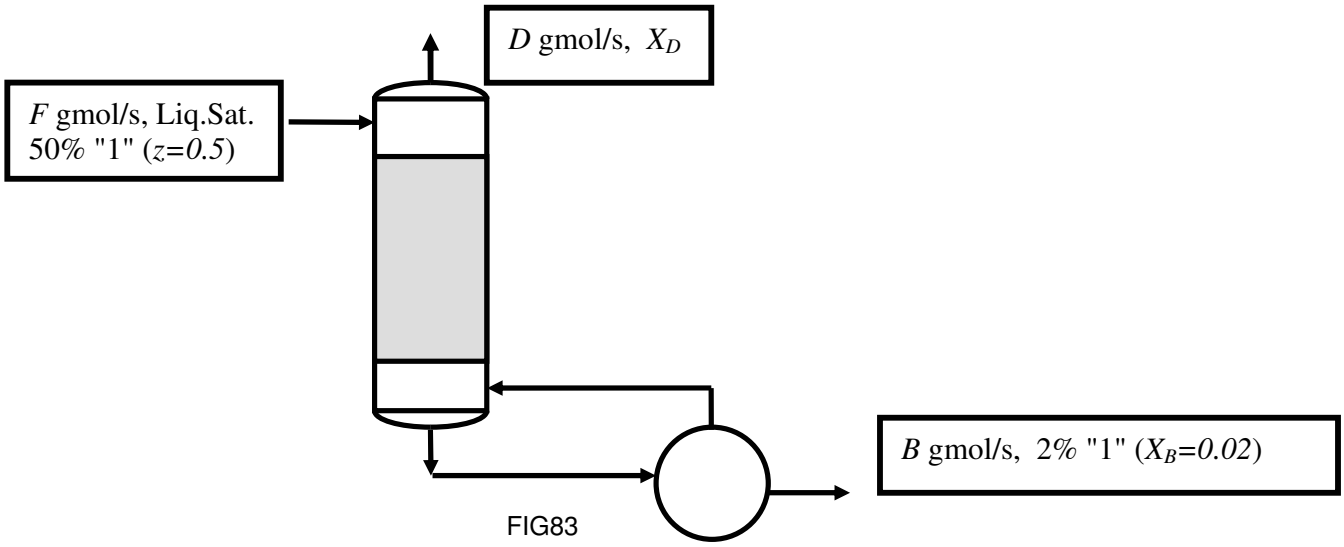

FIG83

Questão 47 (P2 – 2007/01):

Considere a separação da questão anterior em **esgotador de pratos e refervedor 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=5bar*, 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=5bar*; Relação ELV : $Y^* = 2X + X^2/2$
- Solvente em L_E é não volátil e não dissolve "2"
- Alturas de Unidades de Transferência $H_G = H_L = 0.6m$

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);

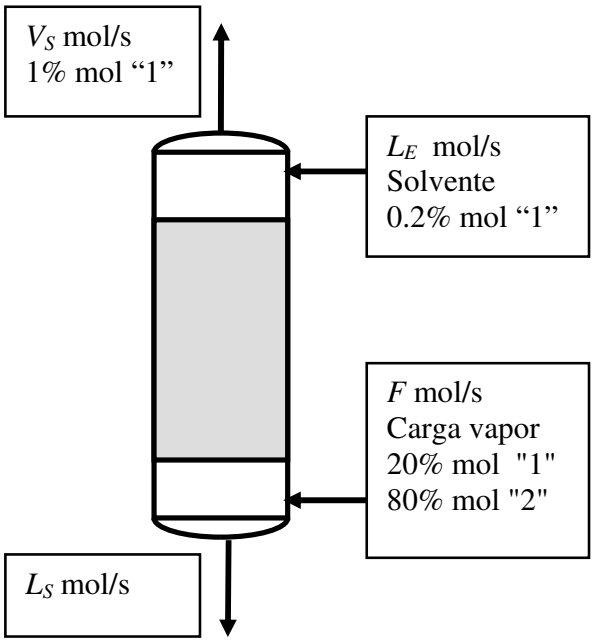

FIG84

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°C. Dados termodinâmicos e operacionais (*X,Y* são fr. molares H_2O em cada fase) são:

- *P=1bar, T=50°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°C:
  $f_{H2O} = 0.04656 * X^5 - 0.3071 * X^7 + 1.334 * X^{10} - 0.9502 * X^{12}$

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).

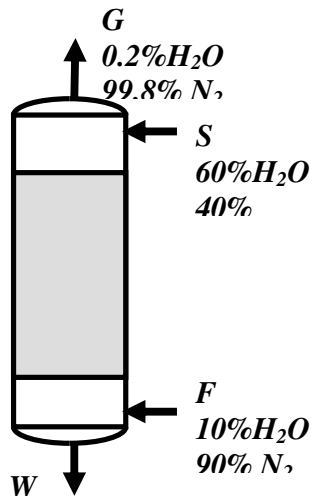

FIG85