

Escola de Química - UFRJ

Março de 2012

DISCIPLINA

ENGENHARIA DE PROCESSAMENTO DE GÁS NATURAL EQE753

Carga Horária 36 hs

**José Luiz de Medeiros
Engenharia Química – UFRJ
jlm@eq.ufrj.br
Tel. 21-2562-7535**

OBJETIVOS

- # Fundamentos de Termodinâmica, Equilíbrio Líquido-Vapor (ELV), Cálculo de Propriedades Termodinâmicas, Equações de Estado (EOS)**
- # Termodinâmica de Sistemas GN e GN Rico em CO₂, Comportamento de Fase (Phase Behavior)**
- # Equipamentos de Processamento de GN**
- # Fundamentos Teóricos do Projeto e Simulação de Processos de Separação do Processamento de GN**
- # Fluxogramas de Processamento de GN**
- # Simulação de Fluxogramas de Processamento de GN**

EMENTA

0. Notação, Símbolos e Convenções

1. Revisão de Termodinâmica

Forma Fundamental em Sistemas Abertos; Sistemas Abertos, Monofásicos, sem Reações Químicas; Funções Auxiliares: Fugacidade e Atividade; Equações de Estado Cúbicas; Modelos de Solução; Cálculo de Propriedades; Equilíbrio de Fases; Equações de Equilíbrio de Fases; Regra das Fases; Equilíbrio Líquido-Vapor (ELV); Equações ELV; Fator de Separação ELV; Resolução de ELV : Pontos de Bolha e de Orvalho; Flash; Volatilidade Relativa.

2. Termodinâmica de Sistemas de GN

Envelopes de Fase ELV. Comportamento de Fase. Resolução de Problemas Simples de Condensação Parcial, Orvalho e Bolha. Uso de Equações de Estado (EOS). Previsão de Formação de Sólidos (Freeze-Out).

EMENTA

3. Equipamentos de Processamento e Condicionamento de Gás Natural

Modelagem de Equipamentos de Processamento/ Condicionamento de GN: Válvula, *Expander*, Compressor, Trocador de Calor, Vaso de Separação, Permeador de Membrana, Contactora de Membranas, Coluna de Absorção com Etanolaminas. Desidratadores. Gasodutos (Pipelines). Sistemas de Refrigeração. Demetanizadora e De-etanizadora.

4. Fluxogramas de Processamento de Gás Natural

Síntese de Fluxogramas de Processamento de GN : Métricas de Desempenho Econômico, Ambiental e de Controlabilidade

5. Simulação de Fluxogramas de Processamento de Gás Natural em HYSYS

Trem de Compressão. Recuperação de Líquidos de GN (GNL). Planta de Liquefação de GN (LNG). Trem de Separação de CO₂ com Membranas. Fracionamento de GN. Linhas de Transporte de GN via Gasodutos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, 5th Ed., Smith-VanNess-Abbott, McGraw-Hill, 1996.**
- 2. Separation Process Principles, 2nd Ed., Henley & Seader, John Wiley, 2006**
- 3. The Gas Processing Industry—Origins & Evolution. Tulsa Gas Processors Suppliers Association - GPSA, Cannon, R.E. 1993.**
- 4. GPSA Engineering Data Book, 12th edition, V. 2, Tulsa, GPSA, 2004.**
- 5. Gas Conditioning & Processing: V.1, The Basic Principles, 8th Ed., 2004**
- 6. Gas Conditioning & Processing: V.2: The Equipment Modules**

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Trabalhos MATLAB - HYSYS : *T1, T2, T3, T4, T5*

Prova: *PV*

Listas de Exercícios : *Para treino, não entregar*

Critério para Grau : *A partir da Média Final (MF)*

$$MF = \frac{\sum_{i=1}^5 T_i + 2 * PV}{7} \Rightarrow$$

$$MF < 4 \Rightarrow D$$

$$4 \leq MF < 6.5 \Rightarrow C$$

$$6.5 \leq MF < 8.5 \Rightarrow B$$

$$8.5 \leq MF \Rightarrow A$$

Metodologia

- **Aulas Expositivas Baseadas em Recursos Microsoft-Office**
- **Material Expositivo Digital Disponibilizado para Acompanhamento Individual pelos Alunos**
- **Exercícios e Trabalhos Práticos em Sala de Aula e/ou Laboratório de Computação Utilizando Ambiente MATLAB R12 (The Mathworks Inc.) for Windows e Simulador HYSYS ou UNISIM DESIGN**
- **Trabalhos em Grupo acerca dos Principais Pontos do Curso**
- **Provas Individuais**

Notação

Símbolo	Unidade	Descrição
i, j, k, l		Índices de Componentes ($1, 2, \dots, nc$)
j, m		Índices de Fases ($1, 2, \dots, nf$)
k, l		Índices de Reação Química ($1, 2, \dots, nr$)
n		Contador de Estágios em Separador ($1, 2, \dots, N$)
j		Contador de Seções em Separador ($0, 1, 2, \dots, M$)
nc		Número de Componentes
nf		Número de Fases
nr		Número de Reações Químicas Independentes
nx		Número de Restrições Extras na Regra das Fases
i		Componente Chave Leve em um Corte de Destilação
j		Componente Chave Pesado em um Corte de Destilação

Notação

Símbolo	Unidade	Descrição
M		Número da Última Seção em Coluna de Destilação
N		Número Total de Estágios em Coluna de Destilação
N_j		Estágio que abriga a Emenda j em Separador
N_D		Número de Graus de Liberdade em Processo de Separação
N_E		Número de Equações em Processo de Separação
N_{GL}		Número de Graus de Liberdade em Geral
N_V		Número de Variáveis em Processo de Separação

Notação

Símbolo	Unidade	Descrição
M		Propriedade Extensiva M
M	kg	Massa do Sistema
M		Número de Mach em Escoamento Compressível
MM_i	kg/mol	Massa Molar (Mol) do Comp. i
\overline{M}_i		Propriedade M Parcial Molar (PPM) do Comp. i
$M_V = M / V$		Propriedade M por Unidade de Volume
$\overline{M} = M_N = M / N$		Propriedade M por Unidade de Mol
$M_{N_i} = M / N_i$		Propriedade M por Unidade de Mol do Comp. i
N_i		Número de Mols do Comp. i
$N = \sum_i^{nc} N_i$		Número de Mols Totais

Notação

Símbolo	Unidade	Descrição
P	Pa, bar	Pressão
Q	J, kJ	Calor Recebido pelo Sistema (Entra: >0, Sai: <0)
\dot{Q}	kW	Carga Térmica do Sistema (Entra: >0, Sai: <0)
$R=8.314$ J/mol.K $R=8.314$ Pa.m ³ /mol.K $R=0.08314$ bar.L/mol.K $R=83.14$ bar.cm ³ /mol.K	J/mol.K	Constante dos Gases Ideais
T	K	Temperatura
V	m ³	Volume
V	Mol/s	Vazão de Fase Vapor
V_k	Mol/s	k-ésima Corrente V em um Processo

Notação

Símbolo	Unidade	Descrição
ξ_L		Eficiência de Estágio de Murphree via Fase Líquida
ξ_V		Eficiência de Estágio de Murphree via Fase Vapor
F_j	Mol/s	Carga na Emenda $j/j-1$
U_j	Mol/s	Retirada Lateral de Líquido na Emenda $j/j-1$
W_j	Mol/s	Retirada Lateral de Vapor na Emenda $j/j-1$
W	J, kJ	Trabalho Realizado pelo Sistema (Entra: <0, Sai: >0)
\dot{W}	kW	Potência Realizada pelo Sistema (Entra: <0, Sai: >0)

Notação

Símbolo	Unidade	Descrição
Símbolos de Constantes Críticas e Coordenadas Reduzidas de Espécies		
P_C	Pa, bar	Pressão Crítica
$P_R = P/P_C$		Pressão Reduzida
T_C	K	Temperatura Crítica
$T_R = T/T_C$		Temperatura Reduzida
V_C	cm ³ /mol L/mol m ³ /mol	Volume Molar Crítico
$V_R = V_N / V_C$		Volume Molar Reduzido
Z_C		Fator de Compressibilidade Crítico
ω		Fator Acêntrico de Pitzer

Notação

Símbolo	Unidade	Descrição
---------	---------	-----------

Tipos de Variáveis Termodinâmicas de Sistemas em Equilíbrio

<i>Campos</i> (e.g. T, P, μ_k)	<i>Campos</i> : Uniformes no Equilíbrio
<i>Quantidades</i> (e.g. G, V, A, S, H)	<i>Quantidades</i> : Proporcionais ao Tamanho do Sistema
<i>Densidades</i> (e.g. $A_V, S_N, \rho=M/V$)	<i>Densidades</i> : Razões de Quantidades

Propriedades Termodinâmicas Clássicas

A	J	Energia Livre de Helmholtz
$A_V = A / V$	J/m ³	Energia Livre de Helmholtz por Volume
$A_N = \bar{A} = A / N$	J/mol	Energia Livre de Helmholtz por Mol
$A_M = A / M$	J/kg	Energia Livre de Helmholtz por Unidade de Massa
G	J	Energia Livre de Gibbs
$G_V = G / V$	J/m ³	Energia Livre de Gibbs por Volume
$G_N = \bar{G} = G / N$	J/mol	Energia Livre de Gibbs por Mol
$G_M = G / M$	J/kg	Energia Livre de Gibbs por Unidade de Massa

Notação

Símbolo	Unidade	Descrição
H	J	Entalpia
$H_V = H / V$	J/m ³	Entalpia por Volume
$H_N = \bar{H} = H / N$	J/mol	Entalpia por Mol
$H_M = H / M$	J/kg	Entalpia por Unidade de Massa
S	J/K	Entropia
$S_V = S / V$	J/K.m ³	Entropia por Volume
$S_N = \bar{S} = S / N$	J/K.mol	Entropia por Mol
$S_M = S / M$	J/K.kg	Entropia por Unidade de Massa
U	J	Energia Interna
$U_V = U / V$	J/m ³	Energia Interna por Volume
$U_N = \bar{U} = U / N$	J/mol	Energia Interna por Mol
$U_M = U / M$	J/kg	Energia Interna por Unidade de Massa

Notação

Símbolo	Unidade	Descrição
S_{N_i}, \overline{S}_i	J/K.mol	Entropia Molar i e Entropia Parcial Molar i
$\overline{A}_i, \overline{G}_i, \overline{H}_i, \overline{U}_i$	J/mol	PPMs para A, G, H, U
$A_{N_i}, G_{N_i}, H_{N_i}, U_{N_i}$	J/mol	A, G, H, U por Mol i
V_{N_i}, \overline{V}_i	m ³ /mol	Volume por Mol i e Volume Parcial Molar i
Densidades Diversas e Outros Símbolos Gregos		
$\rho_i = N_i / V$	mol/m ³	Densidade Molar do Comp. i
ρ_i		Densidade Genérica do Comp. i i.e. uma Razão entre Duas Variáveis <i>Quantidades</i> (e.g. $M/V, U/V, G/N, S/V$, etc)
$\underline{\rho} = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \vdots \\ \rho_{nc} \end{bmatrix}$		Vetor $nc \times 1$ de Densidades Relativas aos nc Componentes
$\rho = M / V$	kg/m ³	Densidade (Mássica) da Mistura

Notação

Símbolo	Unidade	Descrição
$\underline{\varepsilon}_T = \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{P, \underline{N}}$	kg/K.m ³	Derivada da Densidade com T (Relacionada à Expansividade Isobárica)
$\underline{\varepsilon}_P = \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_{T, \underline{N}}$	kg/Pa.m ³	Derivada da Densidade com P (Relacionada à Compressibilidade Isotérmica)
ε_k	mol	Grau de Avanço da Reação Química k
$\underline{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_{nr} \end{bmatrix}$	mol	Vetor $nr \times 1$ de Graus de Avanço das nr Reações
δ_{ki}		Delta de Kronecker
$k = i \Rightarrow \delta_{ki} = 1$		
$k \neq i \Rightarrow \delta_{ki} = 0$		

Notação

Símbolo	Unidade	Descrição
Frações Molares e Normalização		
$X_i = N_i / N$		Fração Molar i em Fase Líquida
$Y_i = N_i / N$		Fração Molar i em Fase Vapor
$\underline{X} = \begin{bmatrix} X_l \\ \vdots \\ X_{nc} \end{bmatrix} \Rightarrow \underline{I}^t \underline{X} = \underline{I}$		Vetores $nc \times 1$ de Frações Molares e suas Condições de Normalização
$\underline{Y} = \begin{bmatrix} Y_l \\ \vdots \\ Y_{nc} \end{bmatrix} \Rightarrow \underline{I}^t \underline{Y} = \underline{I}$		
$\underline{X}_n, \underline{Y}_n$		Vetores de Frações Mol Líquido e Vapor do Estágio n
\underline{Z}		Vetor de Frações Molares de Carga de Flash ou de Coluna

Notação

Símbolo	Descrição
Siglas Especiais para Sistemas, Transformações e Leis da Termodinâmica	
<i>EE</i>	Estado de Equilíbrio em um Sistema. Em um <i>EE</i> Propriedades são Definidas.
<i>EOS</i>	Equação de Estado
<i>ER</i>	Estado de Referência
<i>ID, GI</i>	Solução Ideal e Gás Ideal
<i>MV</i>	Mudança de Variável

Notação

Símbolo	Descrição
Siglas Especiais 1 para Processos de Separação	
<i>BE</i>	Balanço de Energia em <i>RE</i>
<i>BMC</i>	Balanço de Massa de Componentes em <i>RE</i>
<i>BMG</i>	Balanço de Massa Global em <i>RE</i>
<i>EF</i>	Equilíbrio de Fases
<i>ELV</i>	Equilíbrio Líquido-Vapor
<i>MESH</i>	Equações de <i>BMC</i> , <i>EF</i> , <i>SS</i> , <i>BE</i> em Estágio de Equilíbrio
<i>MESH-MT</i>	Equações de <i>BMC</i> , <i>EF</i> , <i>SS</i> , <i>BE</i> em um Estágio de Equilíbrio com Aproximação McCabe-Thiele
<i>RE</i>	Regime Estacionário de Operação
<i>SS</i>	Equações de Normalização de Frações Molares
<i>SX</i> , <i>SY</i>	Normalização de Fr. Molares de Líquido e Vapor
<i>IG</i>	Equações de Igualdade entre Variáveis (p.e. <i>T&P</i> de <i>ELV</i>)

Notação

Símbolo	Descrição
Siglas Especiais 2 para Processos de Separação	
<i>AMT</i>	Aproximação McCabe-Thiele
<i>BP</i>	Método Bubble-Point (Wang-Henke)
<i>DB</i>	Destilação em Batelada
<i>ELV</i>	Equilíbrio Líquido-Vapor
<i>ELL</i>	Equilíbrio Líquido-Líquido
<i>FUG</i>	Fenske-Underwood-Gilliland
<i>MMT</i>	Método McCabe-Thiele
<i>MPA</i>	Método de Projeto Ascendente
<i>MPD</i>	Método de Projeto Descendente
<i>MPS</i>	Método Ponchon-Savarit
<i>PC</i>	Par de Cruzamento : Duas Correntes, <i>L</i> e <i>V</i> , opostas em Cruzamento no mesmo Inter-Estágio

Notação

Símbolo	Descrição
Siglas Especiais 3 para Processos de Separação	
<i>RELV</i>	Relação de Equilíbrio Líquido-Vapor
<i>RR</i>	Razão de Refluxo de Topo
<i>S</i>	Razão de Refluxo de Fundo (<i>Stripping</i>)
<i>SC</i>	Método de Correções Simultâneas (<i>Simultaneous Corrections</i>)
<i>SR</i>	Método <i>Sum of Rates</i>

Notação

Símbolo	Descrição
Símbolos Especiais 4 para Processos de Separação	
$\alpha_{ij}=K_i / K_j$	Volatilidade Relativa do composto i com respeito a j
β	Fração Molar de Vaporização em Flash, Carga ou similar
$\Phi(\phi)$	Primeira Função de Underwood para Refluxo Mínimo
$\Psi(\psi)$	Segunda Função de Underwood para Refluxo Mínimo
$\Xi(\eta)$	Terceira Função de Underwood para Refluxo Mínimo
K_i	Fator de Separação de ELV para Composto i
L_j, V_j	Vazões Molares de Líquido e de Vapor da Seção j em Coluna McCabe-Thiele
$\{ j \}, \{ \bar{j} \}$	Colchetes da Seção j pelos métodos de projeto MPD e MPA
X_{oj}, Y_{oj}	Abscissa e Ordenada da Emenda $j-1/j$ no Método McCabe-thiele

Notação

Símbolo	Descrição
Símbolos Especiais 5 para Processos de Separação	
Δ_j	Corrente de Diferenças da Seção j no Método Ponchon-Savarit em destilação Binária
$Z_{\Delta j}$	Fração Molar “1” da Corrente de Diferenças da Seção j
$H_{\Delta j}$	Entalpia Molar “1” da Corrente de Diferenças da Seção j
η_j	Corrente Equivalente da Emenda $j-1/j$ no Método Ponchon-Savarit
$Z_{\eta j}$	Fração Molar “1” da Corrente Equiv. da Emenda $j-1/j$
$H_{\eta j}$	Entalpia Molar “1” da Corrente Equiv. da Emenda $j-1/j$
F_j, U_j, W_j	Efeitos Externos na Emenda $j-1/j$, sendo, respectivamente Carga, Retirada Lateral de Líquido e Retirada Lateral de Vapor
z_j, s_j, t_j	Frações Molares “1” das correntes acima F_j, U_j, W_j

Notação

Símbolo	Descrição
Siglas Especiais para Sistemas, Transformações e Leis da Termodinâmica	
<i>PPM</i>	Propriedade Parcial Molar
<i>Operador PPM</i>	Operador Gerador de Propriedade Parcial Molar
<i>PR</i>	<i>EOS</i> Peng-Robinson
<i>RK</i>	<i>EOS</i> Redlich-Kwong
<i>SA, SF, SI</i>	Sistema Aberto, Sistema Fechado, Sistema Isolado
<i>SRK</i>	<i>EOS</i> Soave-Redlich-Kwong
<i>TI, TR</i>	Transformação Irreversível e Transformação Reversível
<i>TQE</i>	Transformação Quase-Estática
<i>VDW</i>	<i>EOS</i> Van der Waals
<i>1ºLTD</i>	Primeira Lei da Termodinâmica
<i>2ºLTD</i>	Segunda Lei da Termodinâmica

Notação

Símbolo	Descrição
Siglas Especiais para Sistemas Auxiliares Reservatórios	
RC	Reservatório de Calor SF, EE Interno, Infinito, Rígido, Parede Diatérmica Parâmetro Intensivo Constante T
RE_1	Reservatório de Espécie 1 SA, EE Interno, Infinito, Rígido, Parede Permeável a 1 Parâmetros Intensivos Constantes T, μ_1
RE_k ($k=1, 2, \dots, nc$)	Reservatório de Espécie k SA, EE Interno, Infinito, Rígido, Parede Permeável a k Parâmetros Intensivos Constantes T, μ_k
RV	Reservatório de Volume SF, EE Interno, Infinito, Parede Móvel p/ Troca de Volume Parâmetro Intensivo Constante P

Notação

Símbolo	Descrição
Sobrescritos, Subscritos e Marcadores	
$'$	Referente a Gás Ideal
M'	Propriedade M de Gás Ideal
$*$	Estado de Gás Ideal Puro i , em Temperatura T e 1 bar
$M^*(T)$	Propriedade M no Estado $*$
o	ER de Puro i na T e P do Sistema de Interesse
$M^o(T,P)$	Propriedade M no Estado o
E	Referente a Excesso
M^E	Propriedade M de Excesso
R	Referente a Residual
M^R	Propriedade M Residual
ID	Referente à Solução Ideal
M^{ID}	Propriedade M de Solução Ideal

Notação

Símbolo	Descrição
Sobrescritos, Subscritos e Marcadores	
∞	(Por exemplo D^∞ , B^∞ , etc) Valor associado à condição de <i>Pinch</i> ou equivalente em Problemas de Separação
$*$	(Por exemplo D^* , B^* , etc) Valor associado à condição de Refluxo Total ou equivalente em Problemas de Separação
v	Propriedade de Fase Vapor
l	Propriedade de Fase Líquida
$M^M \equiv M(T, P, \underline{N}) - M^o(T, P, \underline{N})$	Propriedade M de Mistura
o	ER de Puro i na T e P do Sistema de Interesse
$M^o(T, P)$	Propriedade M no Estado o

Notação

Símbolo	Descrição
Símbolos de Propriedades em Termodinâmica de Soluções	
\wedge	Indica em Mistura
\hat{a}_k	Atividade de Espécie k em Mistura a (T, P, \underline{N})
\hat{a}_k^{ID}	Atividade de Espécie k em Solução Ideal a (T, P, \underline{N})
\hat{f}_k, \hat{f}'_k	Fugacidade de Espécie k em Mistura a (T, P, \underline{N}) e como GI
f_k, f'_k	Fugacidade de Espécie k Pura em (T, P) e como GI
$\hat{\phi}_k = \frac{\hat{f}_k}{\hat{f}'_k}$	Coeficiente de Fugacidade de Espécie k em Mistura a (T, P, \underline{N})
$\phi_k = \frac{f_k}{f'_k}$	Coeficiente de Fugacidade de Espécie k Pura a (T, P, \underline{N})
$\hat{\gamma}_k = \frac{\hat{a}_k}{\hat{a}_k^{ID}}$	Coeficiente de Atividade de Espécie k em Mistura a (T, P, \underline{N})

Notação

Símbolo

Descrição

Gradientes Colunares e Geração de PPMs

$$\underline{\nabla}_N M = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial M}{\partial N_l} \right)_{T,P,N_{j \neq l}} \\ \vdots \\ \left(\frac{\partial M}{\partial N_{nc}} \right)_{T,P,N_{j \neq nc}} \end{bmatrix}$$

Opera no Contexto $M(T, P, \underline{N})$

$$M(T, P, \underline{N}) \Rightarrow \bar{M}_k = \left(\frac{\partial M}{\partial N_k} \right)_{T,P,N_{j \neq k}}$$

Formato Tradicional para Gerar PPM

$$\underline{\bar{M}} = \begin{bmatrix} \bar{M}_l \\ \vdots \\ \bar{M}_{nc} \end{bmatrix} = \underline{\nabla}_N M$$

Vetor $nc \times l$ de PPMs

Notação

Símbolo

Descrição

$$\underline{\nabla}_X M_N = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial M_N}{\partial X_1} \right)_{T,P,X_{j \neq 1}} \\ \vdots \\ \left(\frac{\partial M_N}{\partial X_{nc}} \right)_{T,P,X_{j \neq nc}} \end{bmatrix}$$

Opera no Contexto $M_N(T, P, \underline{X})$

$$M_N(T, P, \underline{X}) \Rightarrow \bar{M}_i = M_N - \sum_{k=1}^{nc} X_k \left(\frac{\partial M_N}{\partial X_k} \right)_{T,P,X_{j \neq k}} + \left(\frac{\partial M_N}{\partial X_i} \right)_{T,P,X_{j \neq i}}$$

Formato Alternativo
para Gerar PPM

$$\bar{\underline{M}} = \begin{bmatrix} \bar{M}_1 \\ \vdots \\ \bar{M}_{nc} \end{bmatrix} = (M_N - \underline{X}^T \underline{\nabla}_X M_N) \underline{1} + \underline{\nabla}_X M_N$$

Vetor $nc \times 1$ de PPMs