



Escola Brasileira de Escoamento Multifásico
EBEM
23 a 27 de Março de 2015

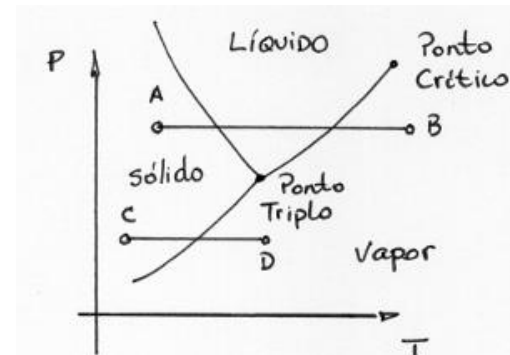
Cálculo de Propriedades Termofísicas de Misturas: Aplicação em Sistemas Óleo-Refrigerante

Jader R. Barbosa Jr | *Universidade Federal de Santa Catarina*

Moisés A. Marcelino Neto | *Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

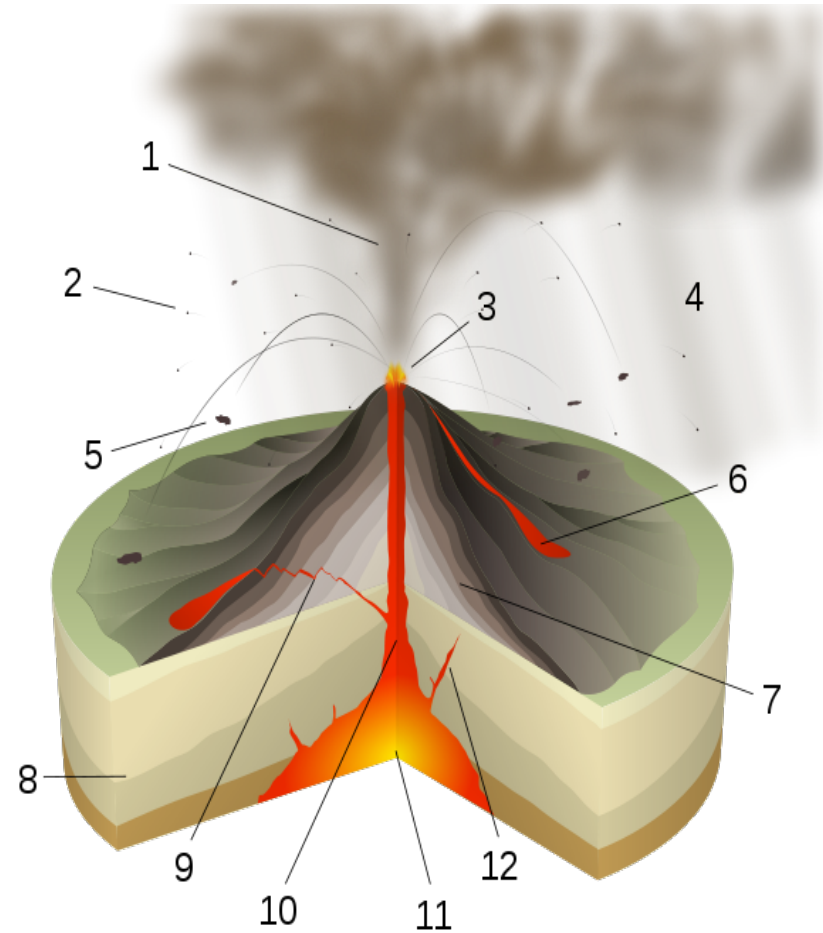
Sumário

- Introdução
- Relações de Misturas (Funções residuais)
- Aplicação: Análise de ciclo com misturas óleo-refrigerante
- Outras propriedades: viscosidade, propriedades de superfície e dielétricas
- Conclusões



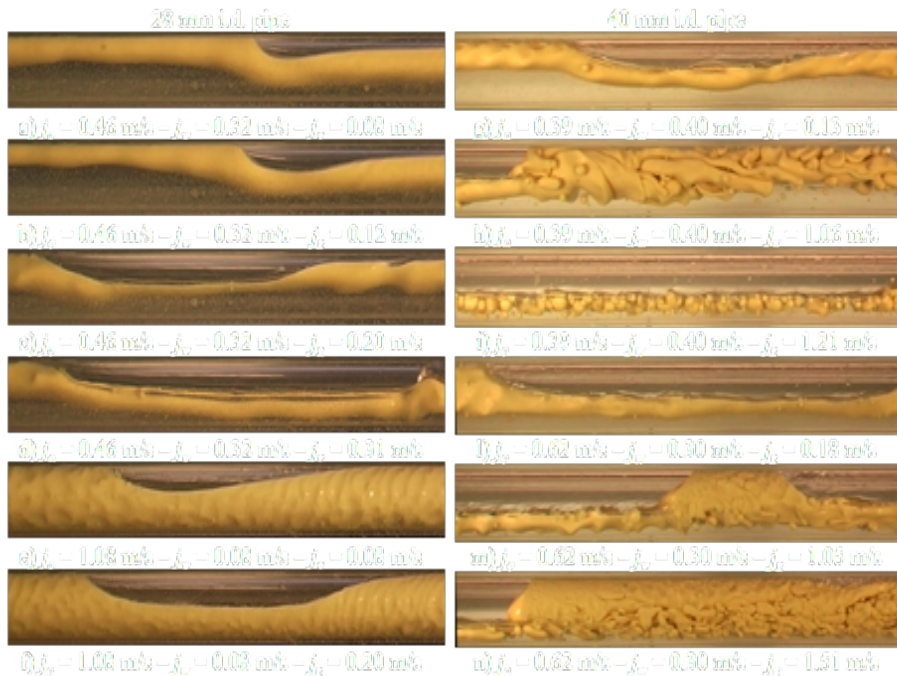
Introdução

Escoamentos multifásicos são encontrados em diversas aplicações (engenharia e fenômenos da natureza)

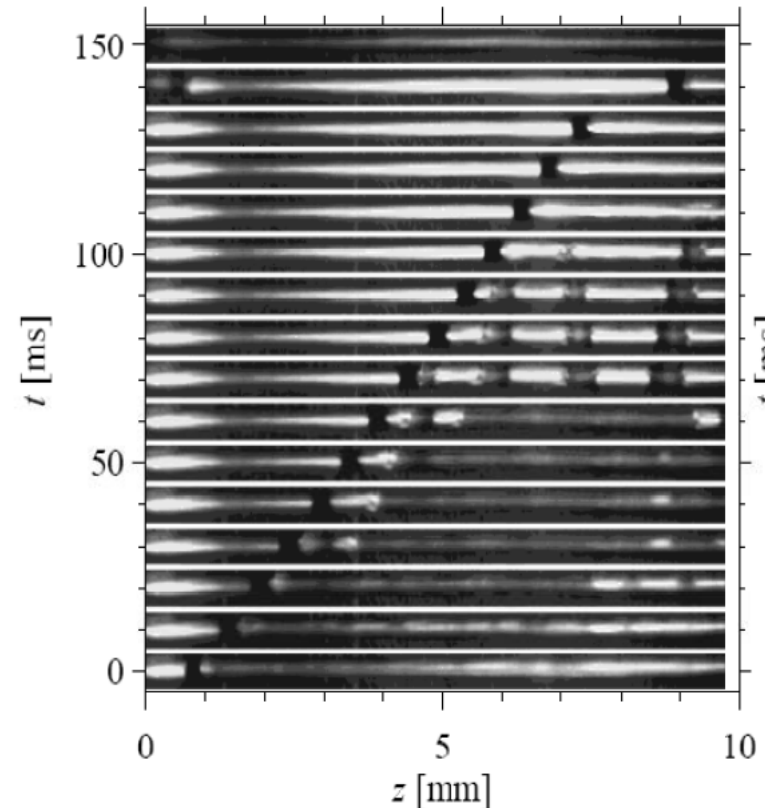


Escoamentos internos

Amplas faixas de comprimentos característicos, PVT, propriedades físicas etc.



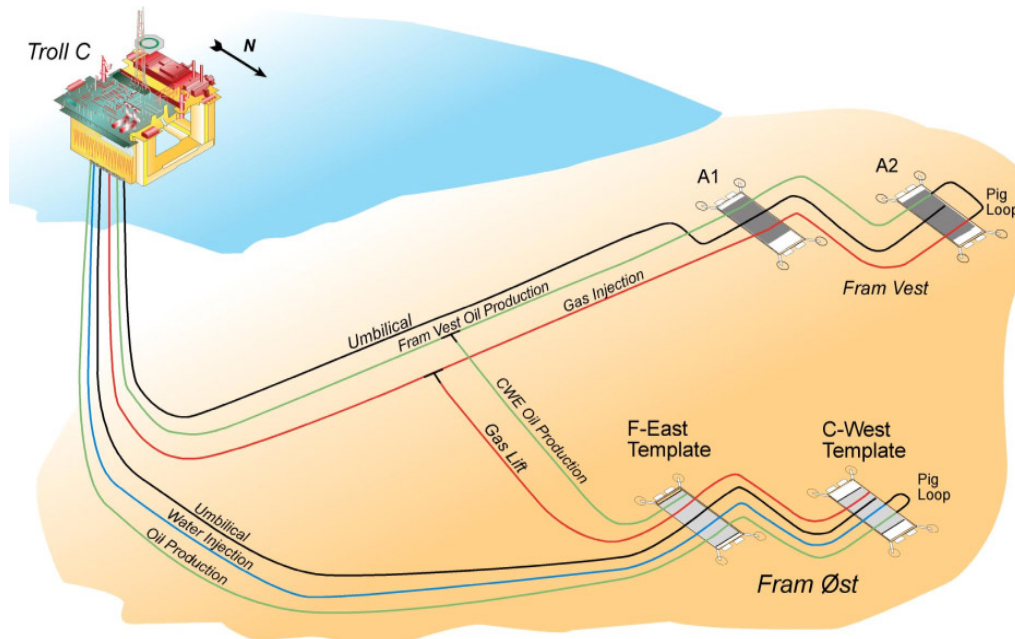
Three-phase flow
(P. Poesio – Brescia – Italy)



μ -channel flow
(J. Thome - Lausanne – Switzerland)

Introdução

Misturas multicomponentes (Oil & Gas)



© Hydro.com

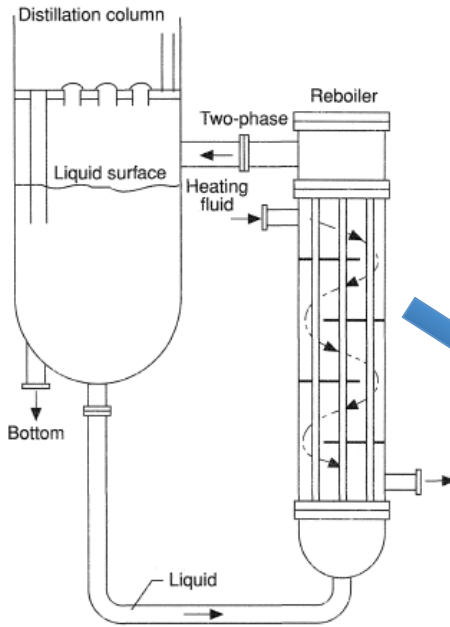


subsea53.rssing.com

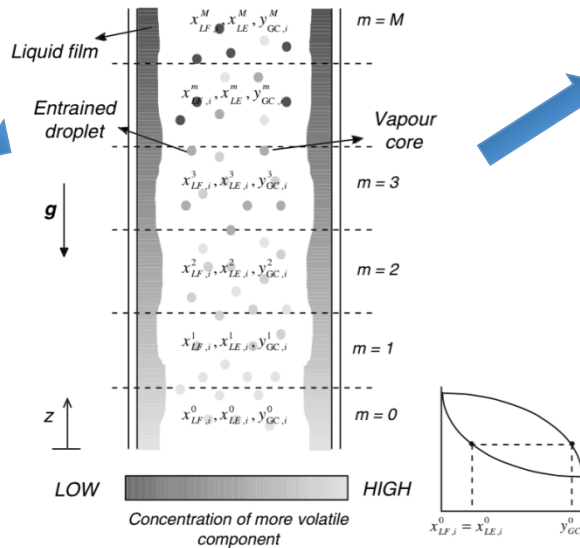


wn.com

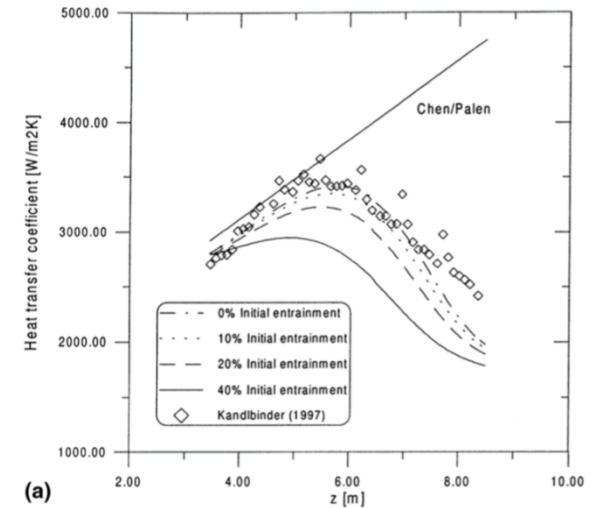
Misturas multicomponentes (Process Heat Transfer)



Thermosyphon reboiler
(Hewitt et al., 1994)



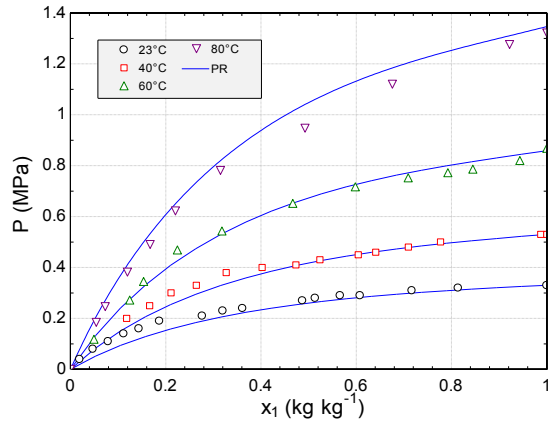
(Barbosa and Hewitt, 2001)



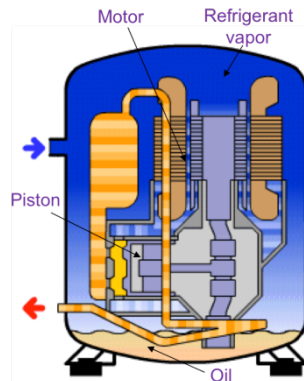
(Barbosa and Hewitt, 2001)

Introdução

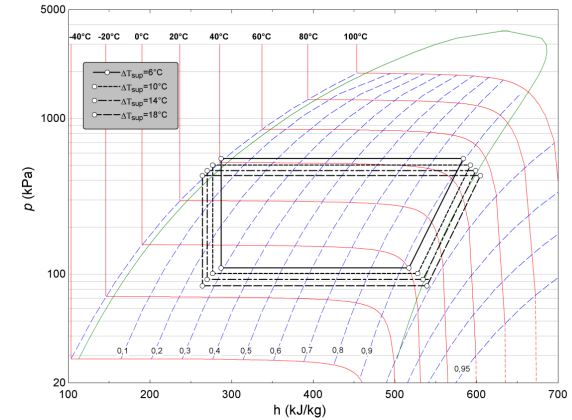
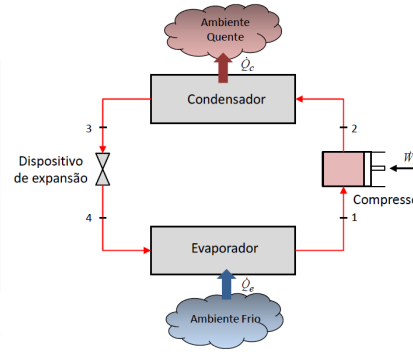
Misturas multicomponentes (HVAC & R)



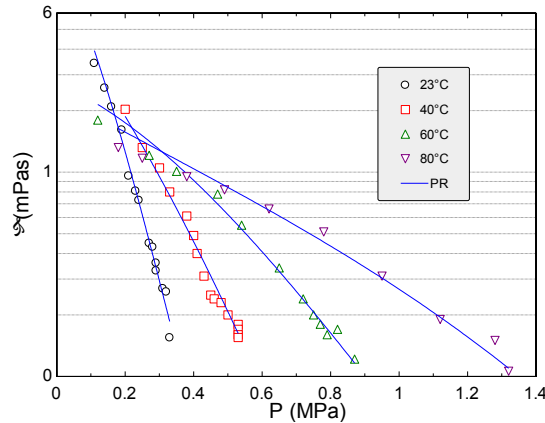
Equilíbrio de fases



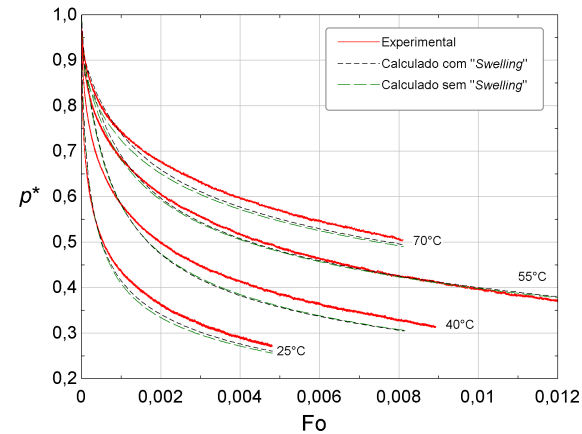
Compressor hermético



Análise de ciclo



Propriedades físicas



Processos



Objetivos

- Apresentar o método das funções residuais (departure functions) para estimar propriedades de estado de estado de misturas binárias
- Demonstrar a aplicação do método na simulação de sistemas de refrigeração considerando misturas de óleo e refrigerante
- Revisar métodos teóricos e experimentais para a determinação de propriedades de transporte e de superfície de misturas de óleo e refrigerante

Propriedades termodinâmicas de misturas (funções residuais)

Funções Residuais

Introdução

- Foco central da abordagem termodinâmica: **habilidade de se expressar mudanças nas propriedades de interesse em termos de variáveis que sejam convenientemente obtidas a partir das relações de Maxwell**
- Papel das Funções de Maxwell

$$dU = TdS - PdV$$

$$dH = TdS + VdP$$

$$dA = -SdT - PdV$$

$$dG = -SdT + VdP$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T = V \quad \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P = -S$$

Funções Residuais

Introdução

- A escolha das variáveis mais convenientes é de fundamental importância
- Experimentalmente, p e T são preferidas
- Costuma-se utilizar T e v
- As equações de estado cúbicas são implícitas em T e v



Relações fundamentais

- A representação p - v - T mais comumente usada em aplicações de engenharia são as equações de estado (EdE)
- As EdEs clássicas expressam funções termodinâmicas em termos de T e v , em vez de p e T
- Inicialmente, expressões para variações de u , h e e em função de T e v a partir de relações fundamentais da termodinâmica, juntamente com as relações de Maxwell

Relações fundamentais

Energia interna (u)

- $u(T, v)$

(1)
$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv$$

- $(\partial u / \partial T)_v = c_v$

- Dividindo a relação fundamental, $du = Tds - p\dot{d}v$ por dv a T constante,

(2)
$$\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = T \left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_T - p$$

Relações fundamentais

Energia interna (u)

- Pela relação de Maxwell, $(\partial s/\partial v)_T = (\partial p/\partial T)_v$,

$$(3) \quad \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v - p$$

- Combinando (1), (2) e (3),

$$(4) \quad du = c_v dT + \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v - p \right] dv$$

Funções Residuais

Relações fundamentais

Entalpia (h) e Entropia (s)

- Realizando o mesmo procedimento, escrevendo dh e ds em função de T e v :

$$(5) \quad dh = c_v dT + \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv + d(pv)$$

$$(6) \quad ds = \frac{c_v}{T} dT - \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv$$

Funções Residuais

Relações fundamentais

Entalpia (h) e Entropia (s)

- Expressando c_v e p em função de T e v e integrando entre dois estados termodinâmicos quaisquer

- EdE

- u , h e s são funções de estado

- Processo tedioso

$$du = c_v dT + \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv$$

$$dh = c_v dT + \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv + d(pv)$$

$$ds = \frac{c_v}{T} dT - \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv$$

Propriedades residuais

- Definição

(6)
$$M^R = M - M^{gi}$$

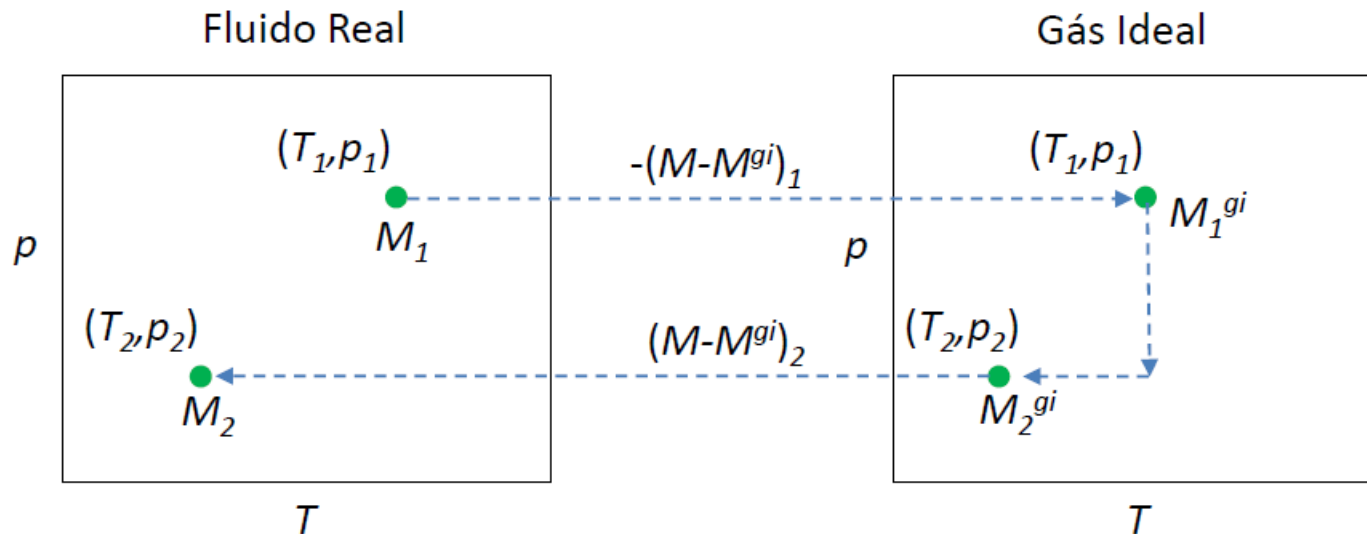
- Uma *função de estado* é uma propriedade que depende somente do do estado, independendo do caminho para alcançar tal estado
- As propriedades em questão são funções de estado
- Processo de *mudança de estado* em três etapas

Funções Residuais

Propriedades residuais

- Processo de *mudança de estado* em três etapas

$$(7) \quad \Delta M = M_2 - M_1 = (M_2 - M_2^{gi}) + (M_2^{gi} - M_1^{gi}) - (M_1 - M_1^{gi})$$



Funções Residuais

Propriedades residuais

- Próximo passo: obter expressões para a energia interna, entalpia e entropia residuais
- Usando a equação (4), calcula-se du isotermicamente

$$(8) \quad du = \left\{ \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv \right\}_T$$

- Energia interna de gás ideal, u^{gi} , como referência e integrando a equação acima, reconhecendo que para o estado de gás ideal $v \rightarrow \infty$ quando $p \rightarrow 0$

$$(9) \quad \frac{u - u^{gi}}{RT} = \frac{1}{RT} \int_{\infty}^v \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv$$

Propriedades residuais

- Em busca da entalpia residual

$$(10) \quad h^{gi} = u^{gi} + RT \quad \text{Entalpia de Gás Ideal}$$

$$(11) \quad h = u + ZRT \quad \text{Entalpia de Gás Ideal}$$

- Combinando e dividindo por RT

$$(12) \quad \frac{h - h^{gi}}{RT} = \frac{u - u^{gi}}{RT} + Z - 1$$

$$(13) \quad \frac{h - h^{gi}}{RT} = \frac{1}{RT} \int_{\infty}^v \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv + Z - 1$$

Propriedades residuais

- Em busca da entropia residual (eq. 6)

$$(14) \quad ds = \left\{ \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv \right\}_T$$

- O caminho de integração para a entropia residual difere daquele usado na energia interna
- A entropia do gás ideal, s^{gi} , é dependente do volume, enquanto u^{gi} não é (Elliot e Lira, 1999)

Propriedades residuais

- Integração da eq. (14) requer uma manipulação matemática,

$$(15) \quad \left(\frac{\partial p}{\partial T} - R/v\right)_v$$

- Resultando

$$(16) \quad \frac{s - s_0^{gi}}{R} + \ln \frac{p}{p_0} = \ln Z + \int_{\infty}^v \left[\frac{1}{R} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - \frac{1}{v} \right] dv$$

Funções Residuais

Propriedades residuais

- Recapitulando,

$$\Delta M = M_2 - M_1 = (M_2 - M_2^{gi}) + (M_2^{gi} - M_1^{gi}) - (M_1 - M_1^{gi}) \Rightarrow \text{Definição}$$

Propriedades Residuais \Rightarrow

$$\frac{u - u^{gi}}{RT} = \frac{1}{RT} \int_{\infty}^v \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv$$

$$\frac{h - h^{gi}}{RT} = \frac{1}{RT} \int_{\infty}^v \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv + Z - 1$$

$$\frac{s - s_0^{gi}}{R} + \ln \frac{p}{p_0} = \ln Z + \int_{\infty}^v \left[\frac{1}{R} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - \frac{1}{v} \right] dv$$

Funções Residuais

Propriedades residuais

- Eqs. (9), (13) e (16) podem ser resolvidas a partir de relações p - v - T fornecidas por meio de EdEs
- Edmister e Lee (1984) apresentam as integrações para diversas EdEs
- Para a EdE de Peng e Robinson (1976),

(17)

$$\frac{u - u^{gi}}{RT} = -\frac{A}{2^{1,5}B} \left[1 - \frac{T}{a} \frac{da}{dT} \right] \ln \left(\frac{Z + (\sqrt{2} + 1) B}{Z - (\sqrt{2} - 1) B} \right)$$

(18)

$$\frac{h - h^{gi}}{RT} = Z - 1 - \frac{A}{2^{1,5}B} \left[1 - \frac{T}{a} \frac{da}{dT} \right] \ln \left(\frac{Z + (\sqrt{2} + 1) B}{Z - (\sqrt{2} - 1) B} \right)$$

Funções Residuais

Propriedades residuais

$$(19) \quad \frac{s - s^{gi}}{R} = \ln(Z - B) - \frac{A}{2^{1,5} B} \left[1 - \frac{T}{a} \frac{da}{dT} \right] \times \ln \left(\frac{Z + (\sqrt{2} + 1) B}{Z - (\sqrt{2} - 1) B} \right)$$

- No cômputo da mudança de estado de uma propriedade, torna-se importante a definição de uma **estado de referência**

$$(20) \quad \Delta h = h_2 - h_1 = (h_2 - h_2^{gi}) + (h_2^{gi} - h_1^{gi}) - (h_1 - h_1^{gi})$$

$$(21) \quad \Delta h = h - h_R = (h - h^{gi})_{T,p} + \int_{T_R}^T c_p dT - (h - h^{gi})_R$$

$$(22) \quad h = (h - h^{gi})_{T,p} + \int_{T_R}^T c_p dT - (h - h^{gi})_R + h_R$$

Propriedades residuais

- Analogamente para energia interna e entropia,

(23)

$$u = (u - u^{gi})_{T,p} + \int_{T_R}^T c_v dT - (u - u^{gi})_R + u_R$$

(24)

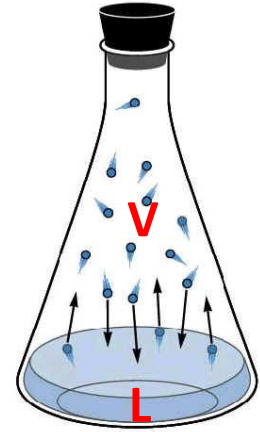
$$s = (s - s^{gi})_{T,p} + \int_{T_R}^T \frac{c_p}{T} dT - R \ln \frac{p}{p_R} - (s - s^{gi})_R + s_R$$

Funções Residuais

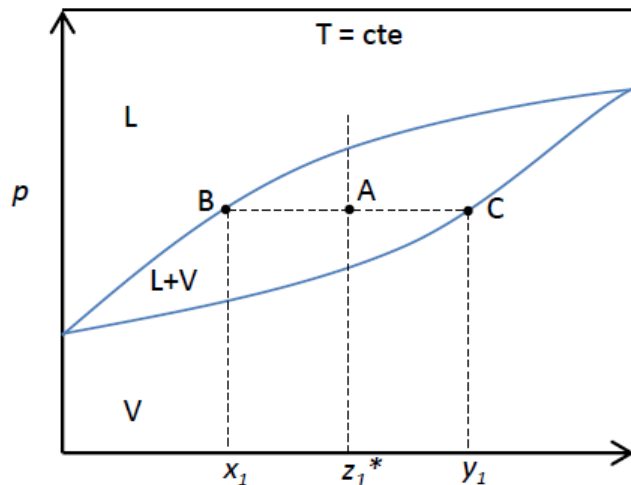
Aplicação: misturas óleo-refrigerante

- Sistema bifásico (líquido+vapor) em equilíbrio:

$$h_t = (1 - X) h_l + X h_v$$



- O título de vapor (X) para uma mistura binária pode ser obtido diretamente de um diagrama ELV



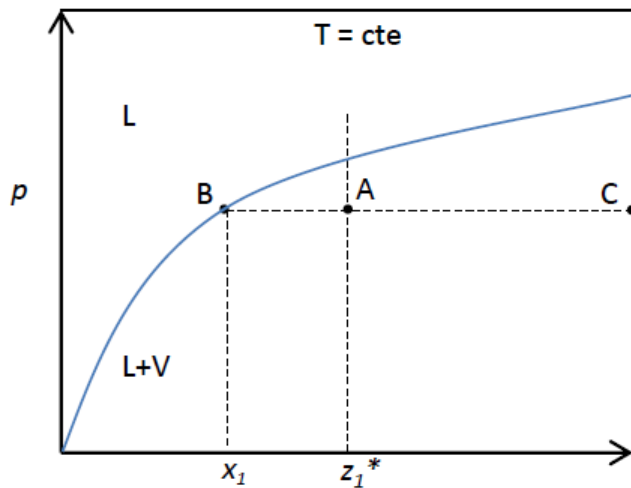
$$X = \frac{AB}{BC} = \frac{z_1^* - x_1}{y_1 - x_1}$$

- 1 aplica-se ao componente mais volátil
- z^* é a composição global
- x fração mássica na fase líquida
- y fração mássica na fase vapor

Funções Residuais

Aplicação: misturas óleo-refrigerante

- Para misturas óleo-refrigerante: linha de ponto de orvalho é desprezada

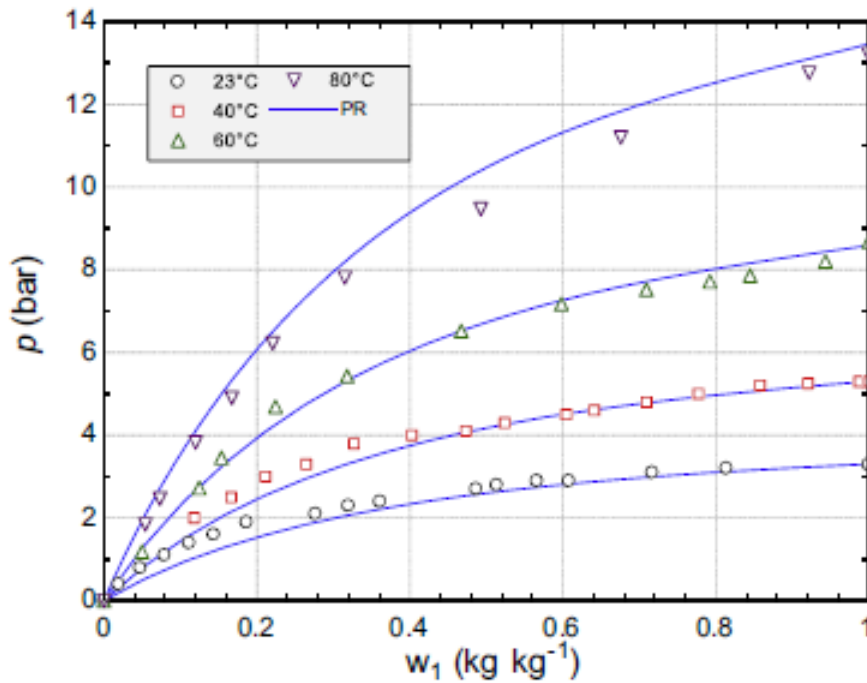


$$X = 1 - \frac{z_2^*}{1 - x_1}$$

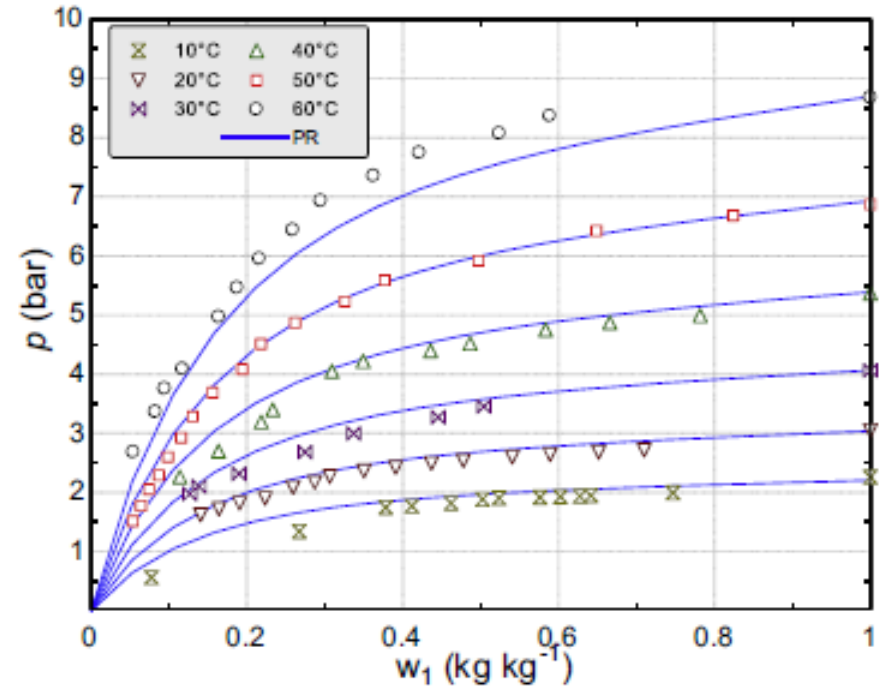
- $z_2^* = 1 - z_1^*$
(composição global do óleo)

Funções Residuais

Aplicação: misturas óleo-refrigerante



■ R-600a/AB ISO 5



■ R-600a/POE ISO 7

M.A. Marcelino Neto, J.R. Barbosa Jr. (2010) *Fluid Phase Equilib.* 292, 7-12.

M.A. Marcelino Neto, J.R. Barbosa Jr. (2008) *Int. J. Refrig.* 31, 34-44.

Funções Residuais

Aplicação: misturas óleo-refrigerante

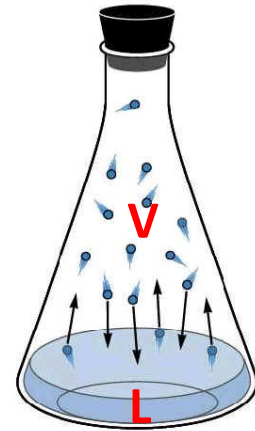
- Semelhante à entalpia, para um sistema bifásico (líquido+vapor) em equilíbrio:

$$u_t = (1 - X) u_l + X u_v$$

$$s_t = (1 - X) s_l + X s_v$$

- onde u_l , u_v , s_l e s_v são as energias internas do líquido e do vapor, e as entropias do líquido e do vapor, respectivamente

$$v_t = (1 - X) v_l + X v_v$$

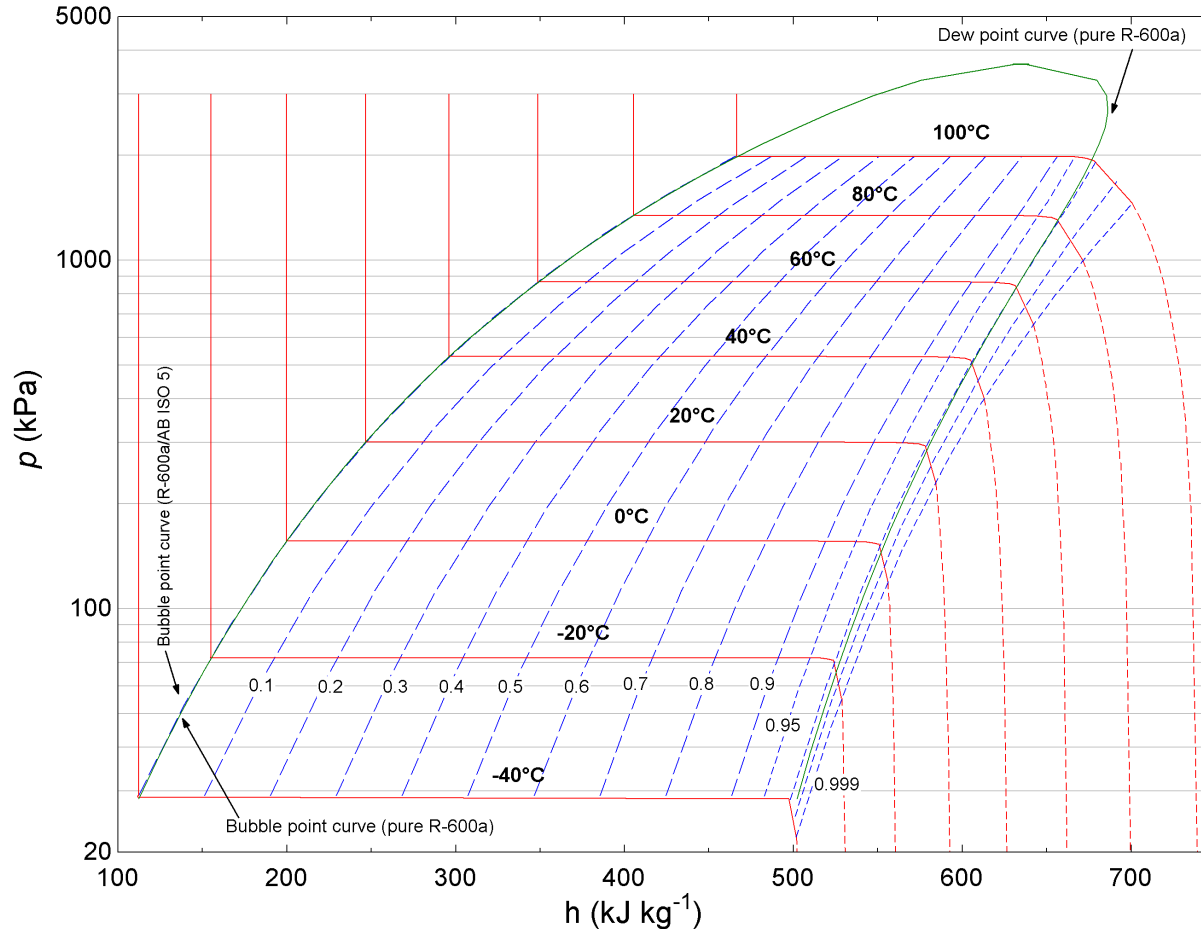


- O v_l é calculado através de Peng-Robinson com translação de volumes

Funções Residuais

Aplicação: misturas óleo-refrigerante

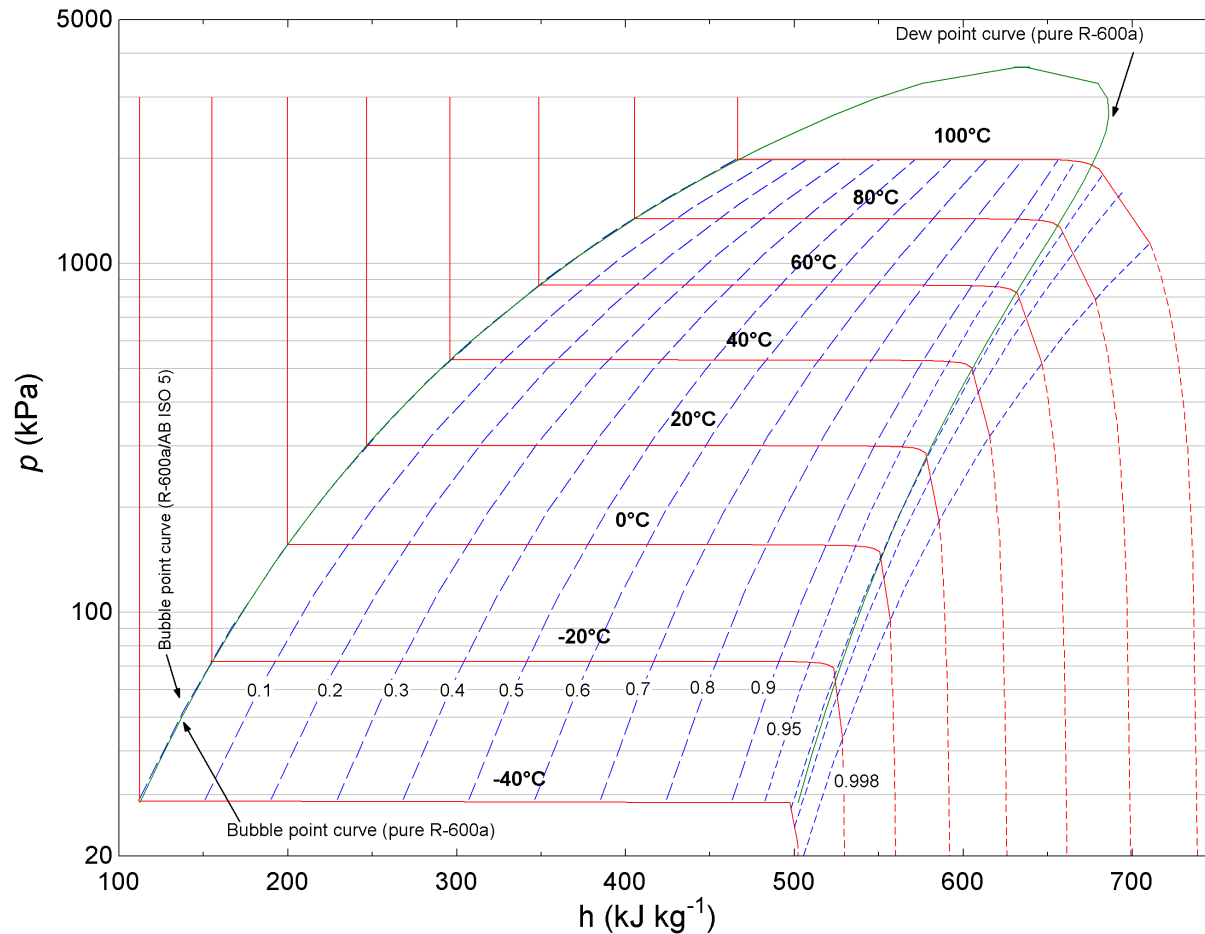
- Diagrama $p-h$, R-600a/AB ISO 5, concentração global de óleo de 0,1%



Funções Residuais

Aplicação: misturas óleo-refrigerante

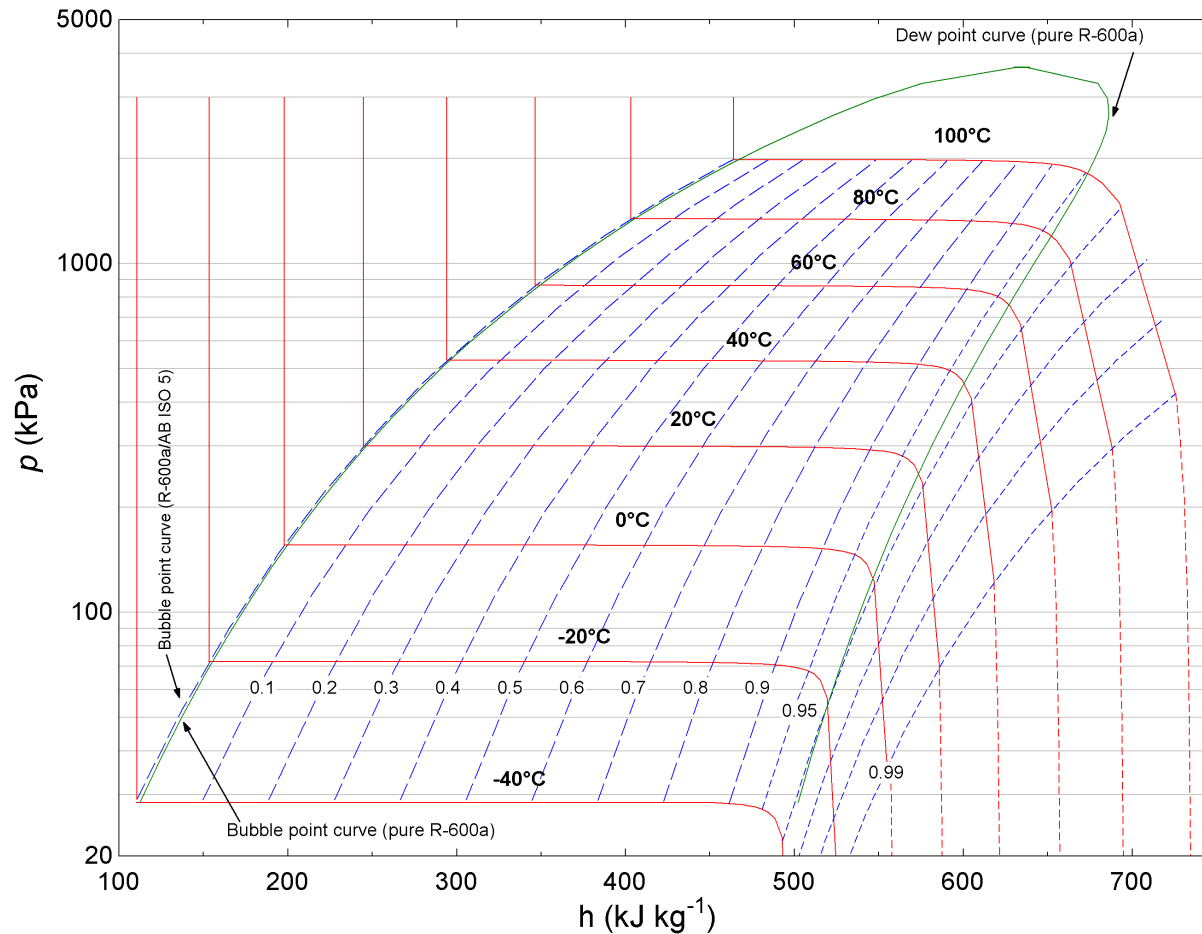
- Diagrama $p-h$, R-600a/AB ISO 5, concentração global de óleo de 0,2%



Funções Residuais

Aplicação: misturas óleo-refrigerante

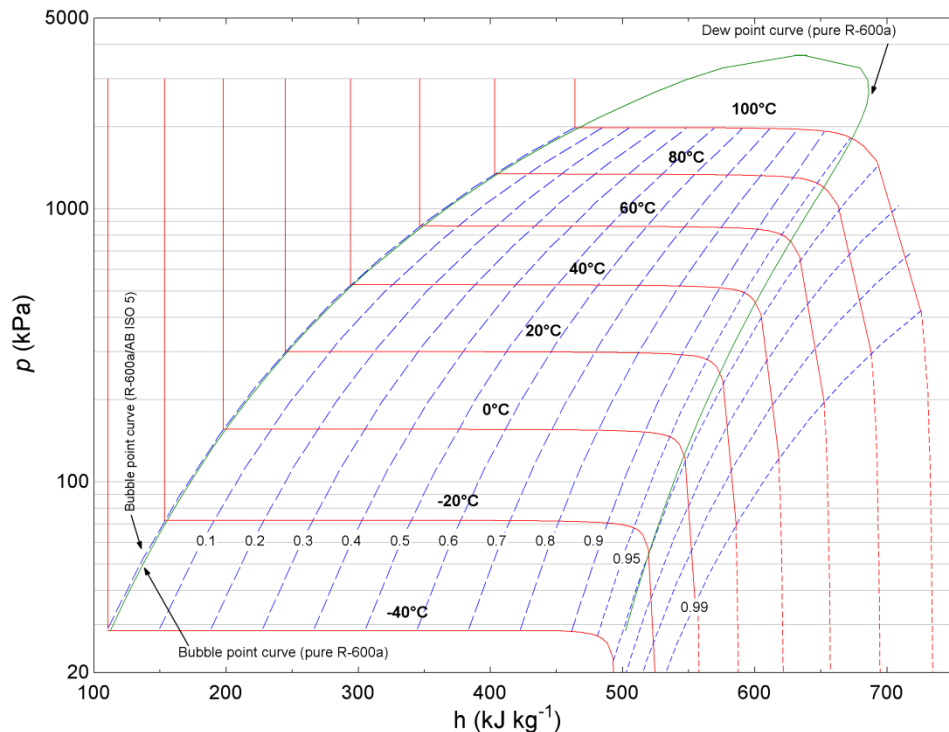
- Diagrama p - h , R-600a/AB ISO 5, concentração global de óleo de 1%



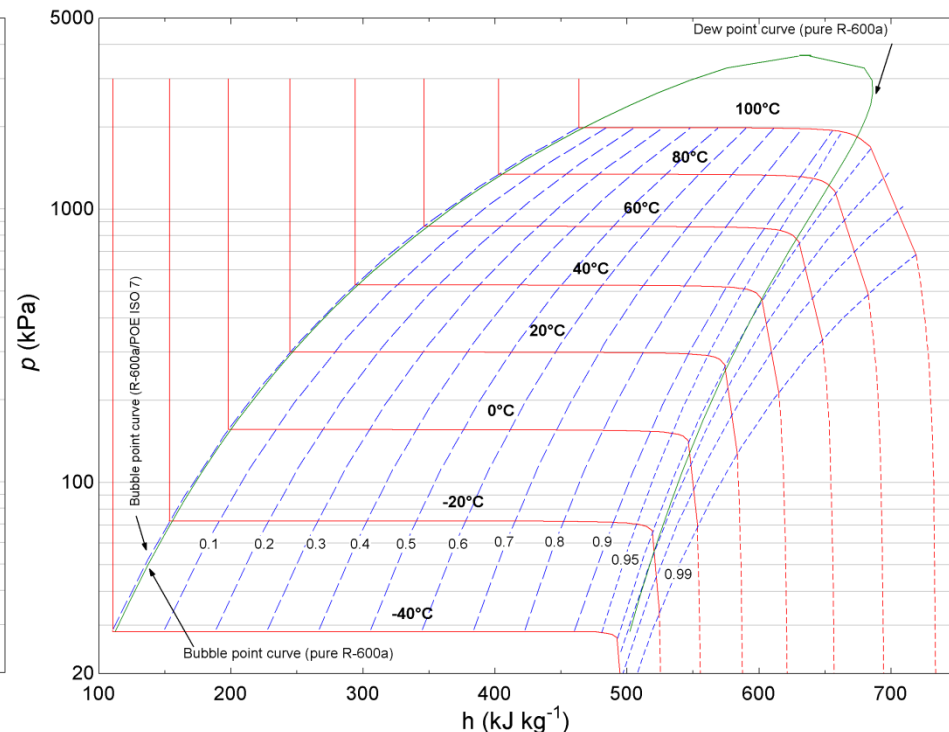
Funções Residuais

Aplicação: misturas óleo-refrigerante

- Diagrama $p-h$, concentração global de óleo de **1,0%**



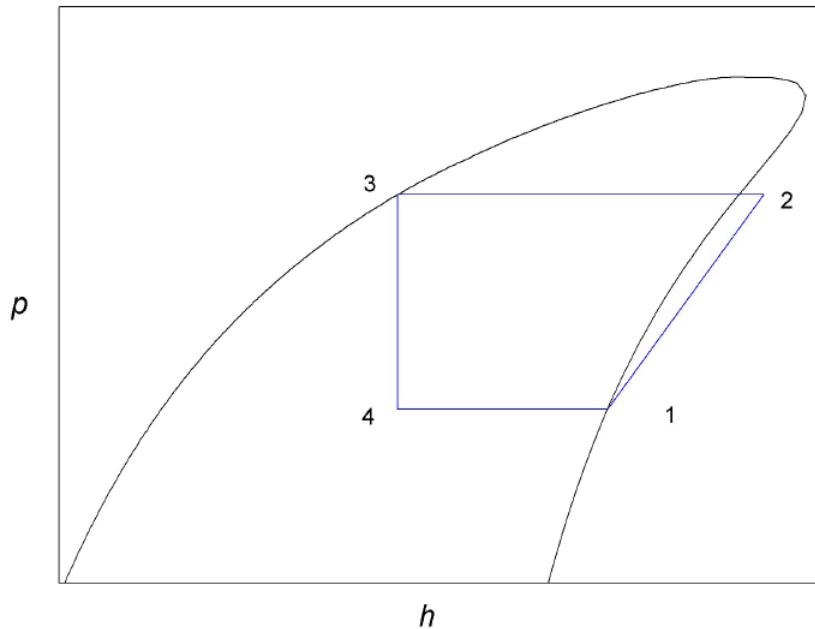
■ R-600a/AB ISO 5



■ R-600a/POE ISO 7

Funções Residuais

Aplicação: misturas óleo-refrigerante



$$\dot{Q}_e = \dot{m}(h_1 - h_3)$$

$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1)_s$$

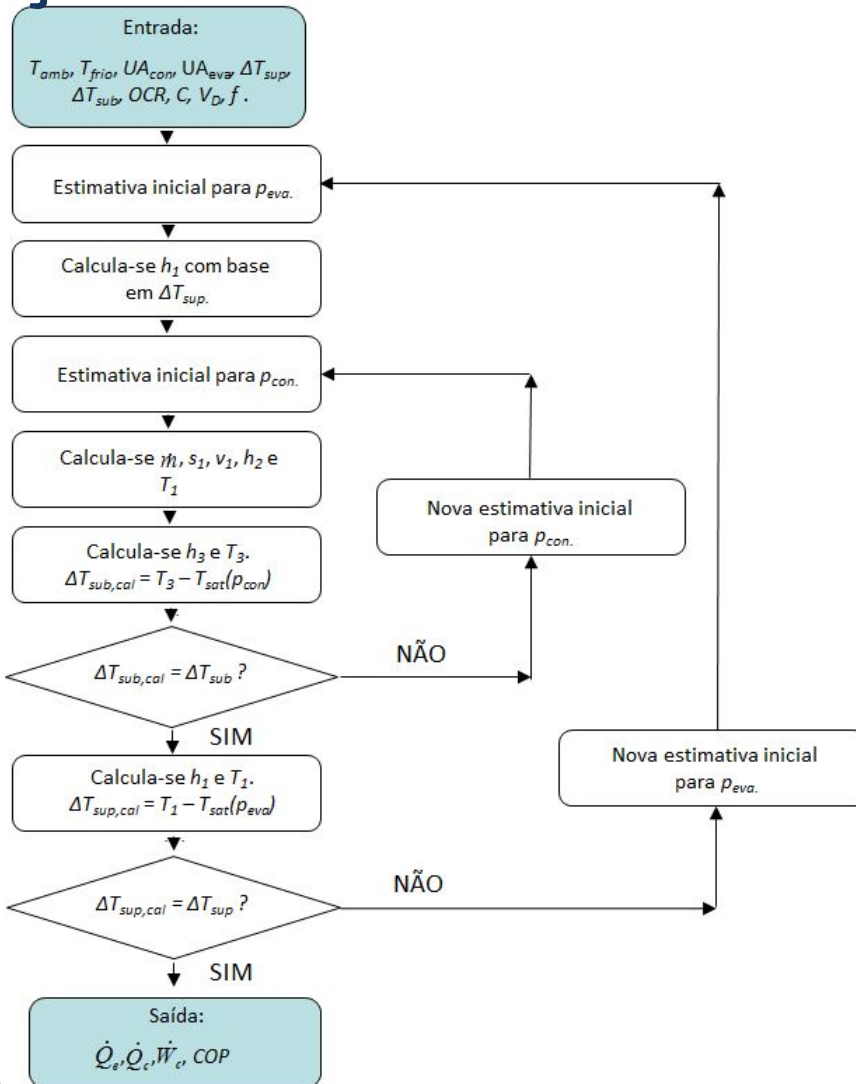
$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_2 - h_3)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_c} = \frac{(h_1 - h_3)}{(h_2 - h_1)_s}$$

O ciclo padrão de refrigeração por compressão mecânica de vapor em um diagrama p-h

Funções Residuais

Aplicação: misturas óleo-refrigerante



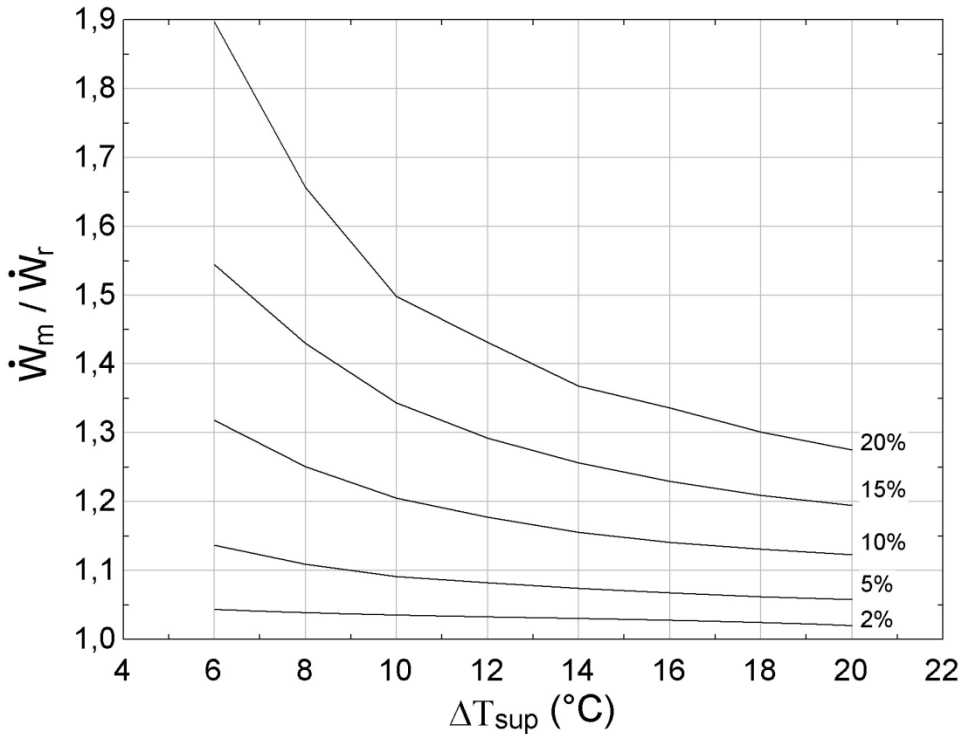
$$x_1 = 1 - \frac{OCR}{1 - X}$$

Dados de entrada para a análise do ciclo de refrigeração idealizado com presença de óleo

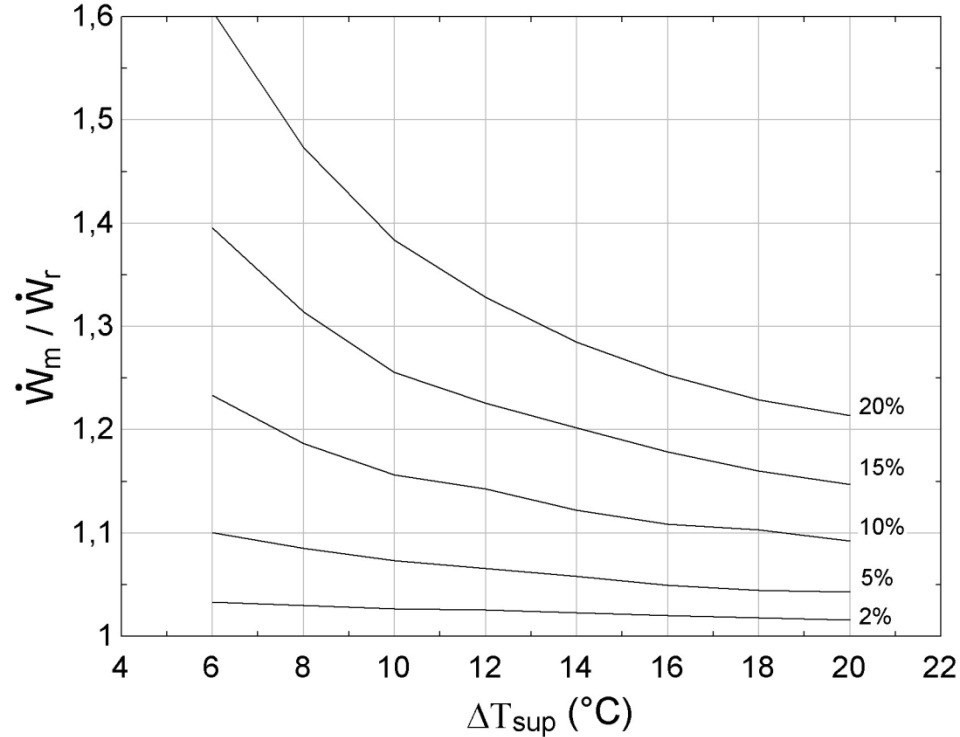
T_{amb} (°C)	T_{frio} (°C)	UA_{con} (W/K)	UA_{eva} (W/K)	ΔT_{sup} (°C)
25	5	8,5	7,1	6-20
ΔT_{sub} (°C)	OCR (%)	C (%)	V_D (cm ³)	f (rpm)
2-10	0-20	2,5	5,19	1600

Funções Residuais

Aplicação: misturas óleo-refrigerante



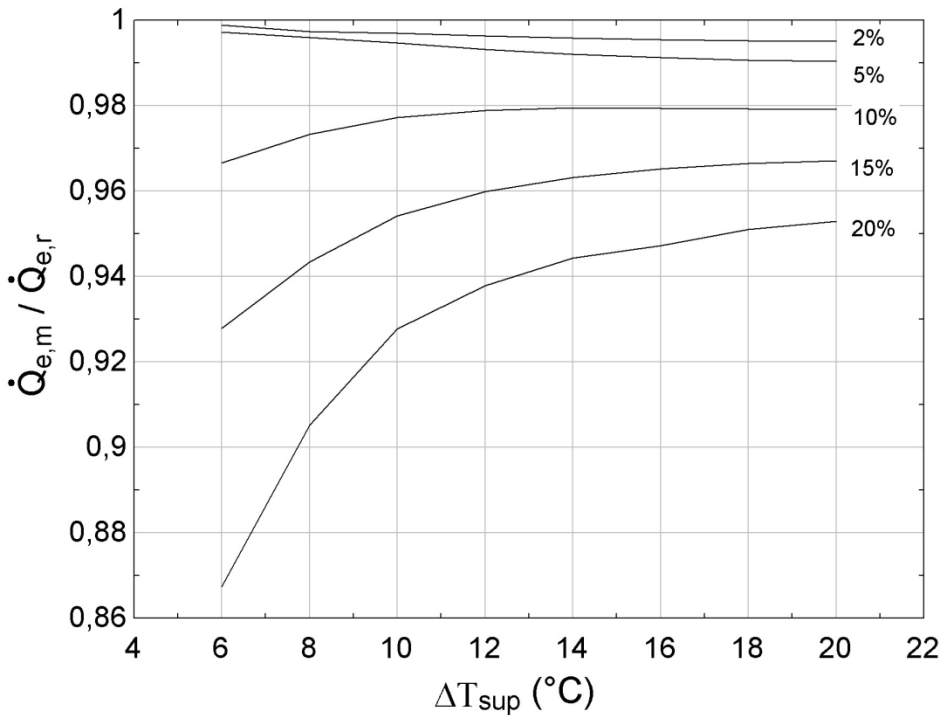
■ R-600a/AB ISO 5



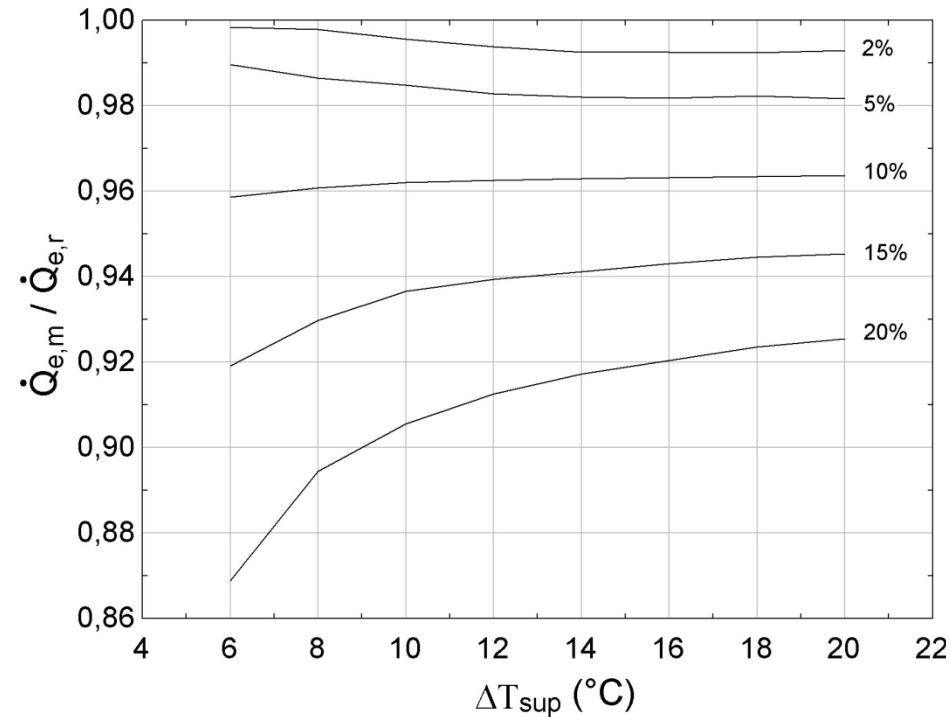
■ R-600a/POE ISO 7

Funções Residuais

Aplicação: misturas óleo-refrigerante



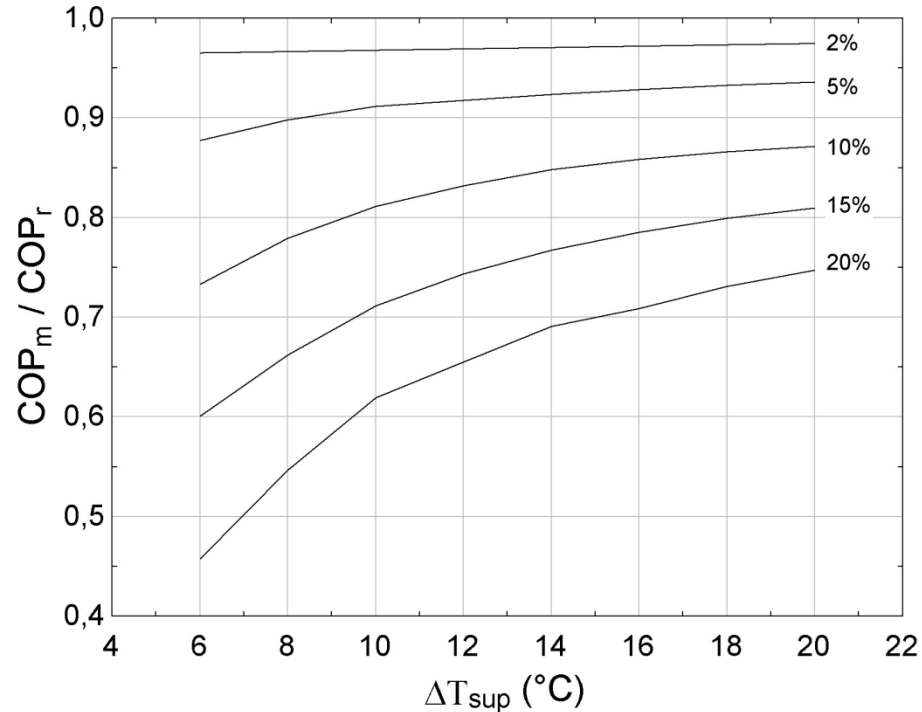
■ R-600a/AB ISO 5



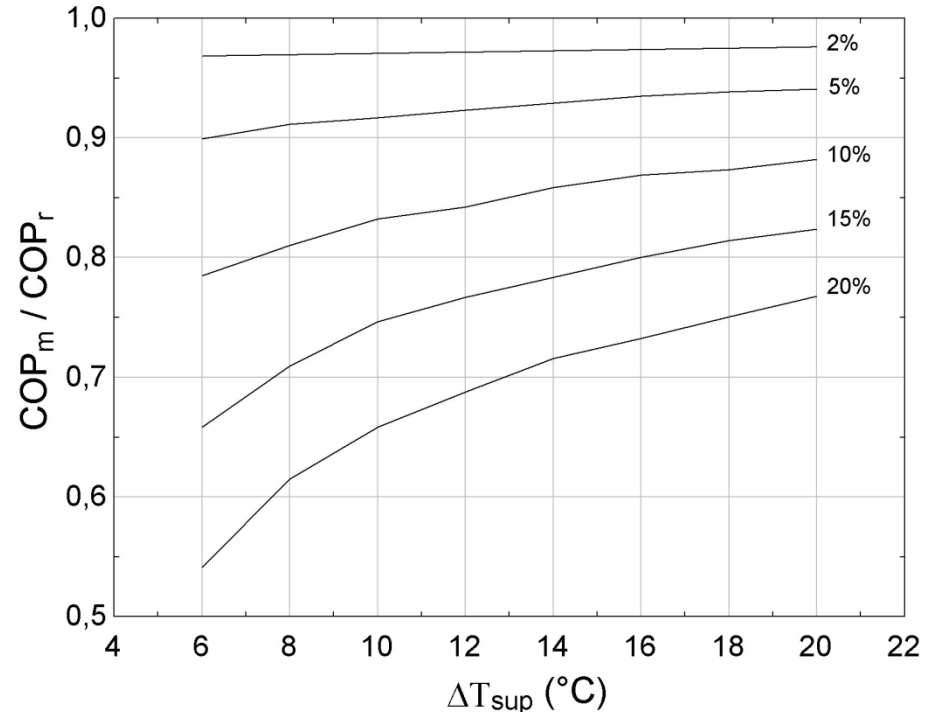
■ R-600a/POE ISO 7

Funções Residuais

Aplicação: misturas óleo-refrigerante



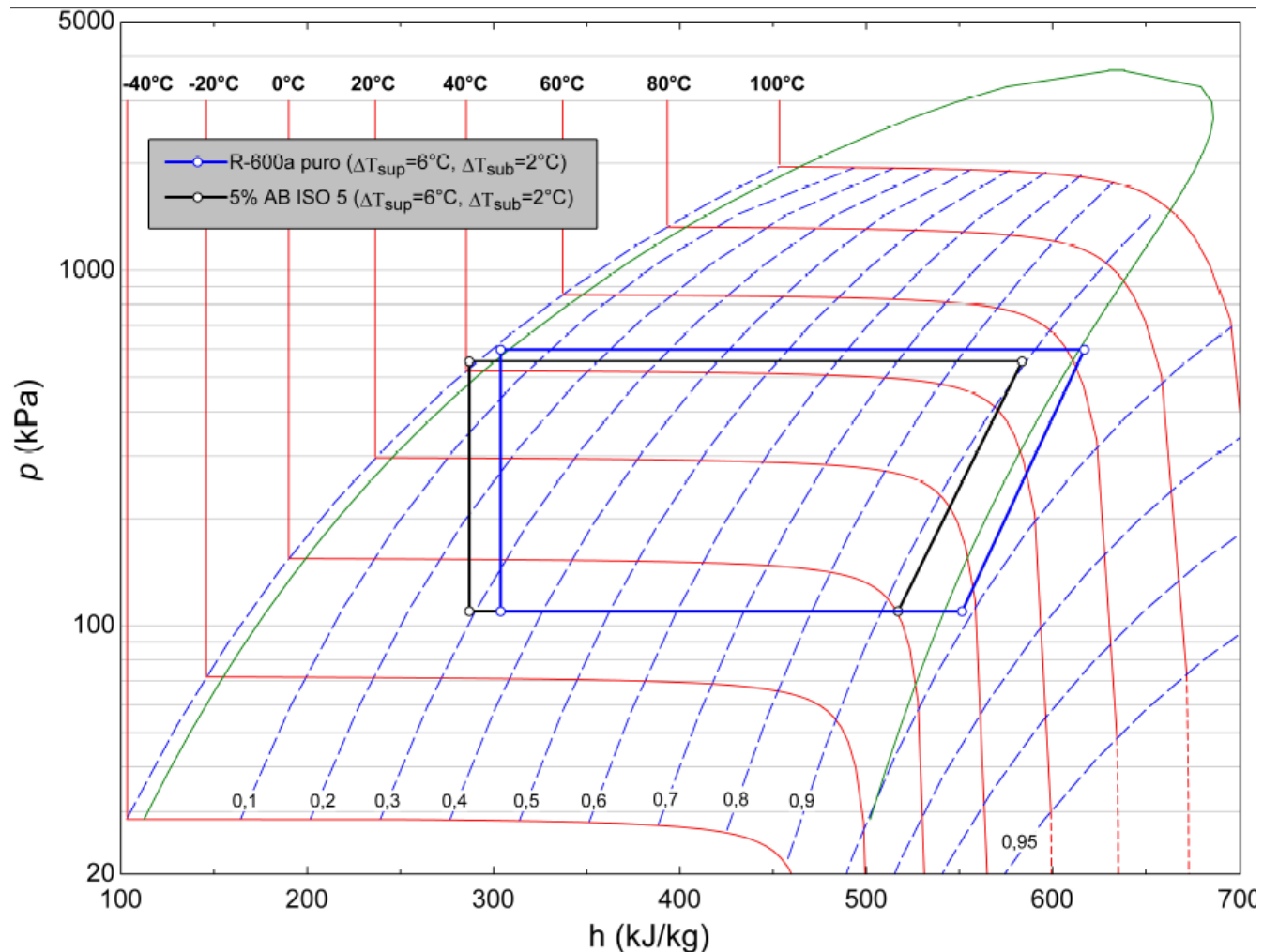
■ R-600a/AB ISO 5



■ R-600a/POE ISO 7

Funções Residuais

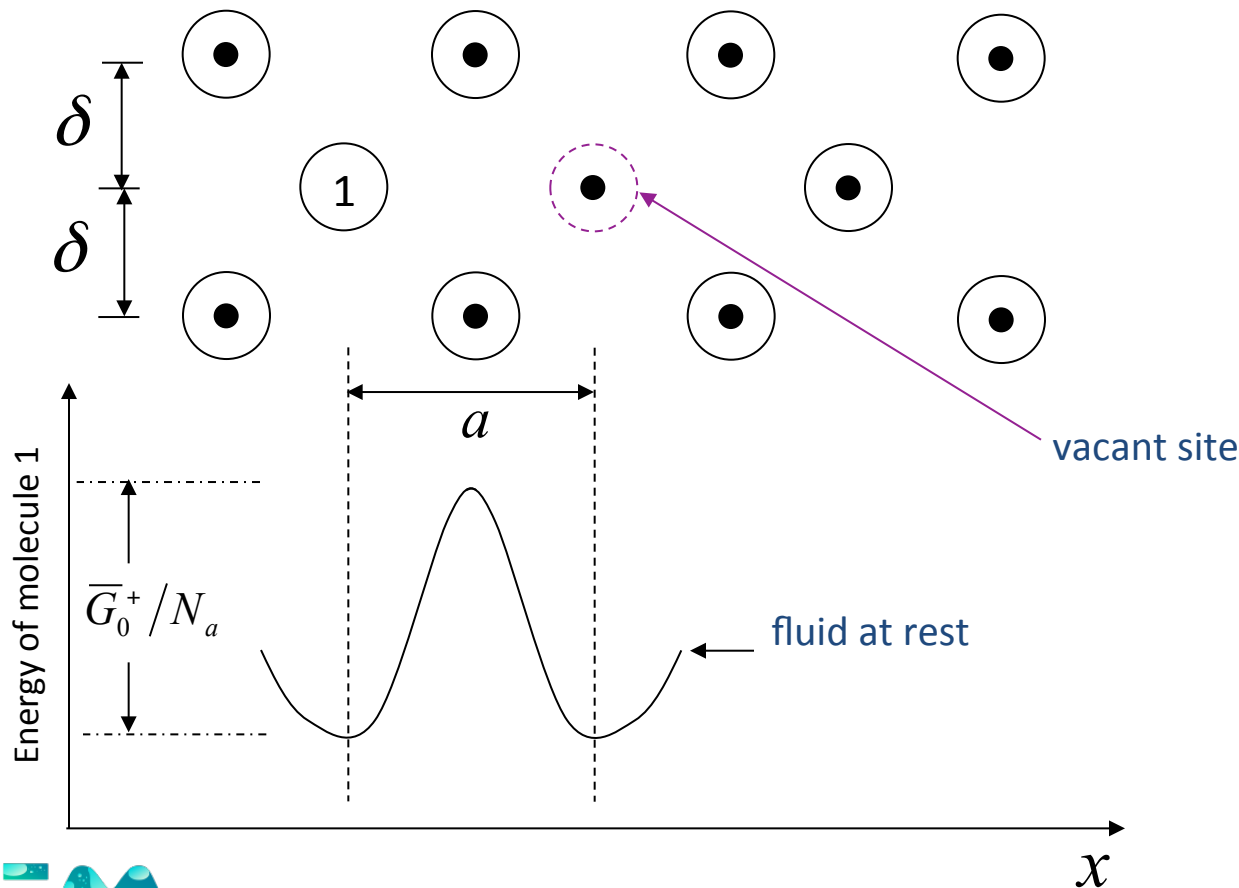
Aplicação: misturas óleo-refrigerante



Outras propriedades de misturas

Viscosidade dinâmica: Eyring model

Fluido puro em repouso (macroscopicamente)

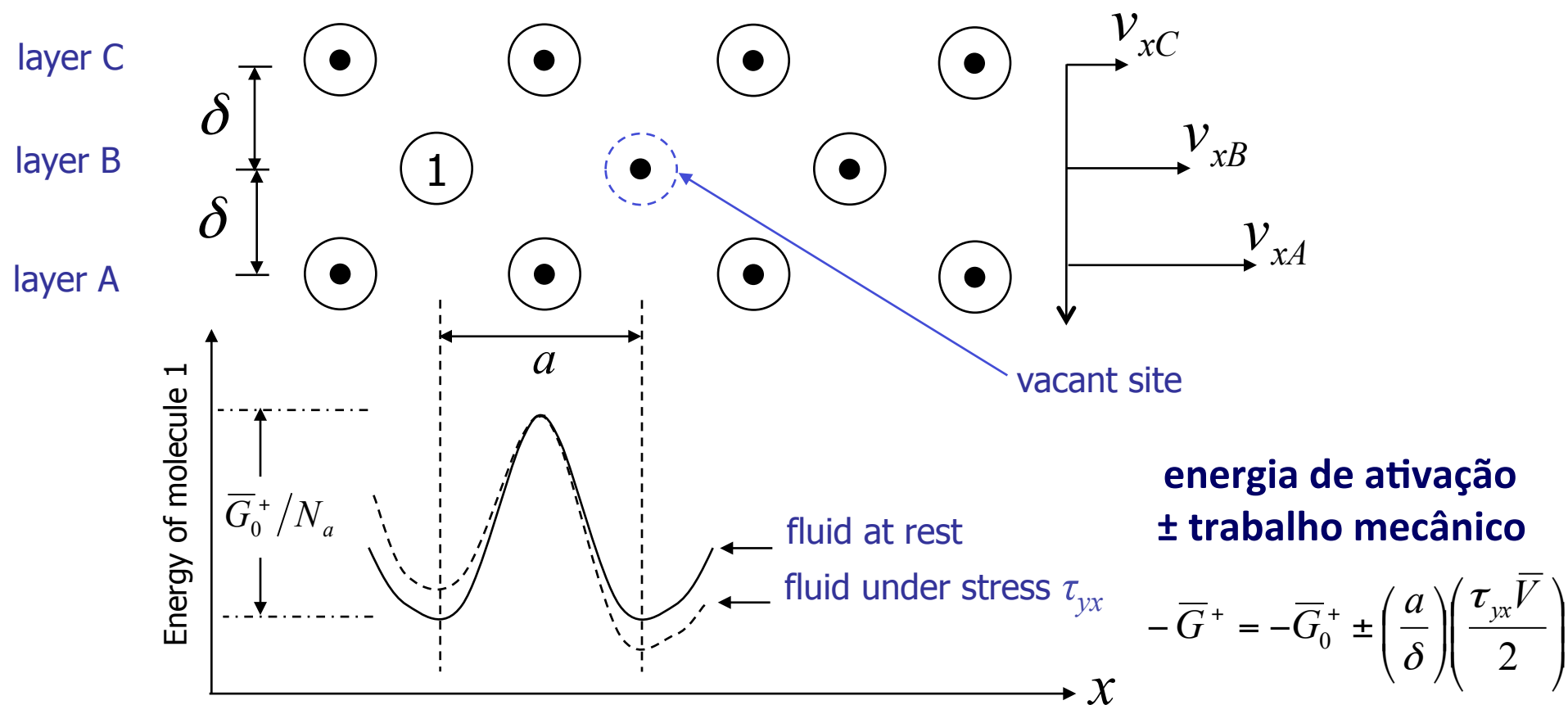


Frequência
(por molécula):

$$f = \frac{k_B T}{h} \exp\left(-\frac{\bar{G}_0^+}{\Re T}\right)$$

Viscosidade dinâmica: Eyring model

Fluido puro em escoamento paralelo



Viscosidade dinâmica: Eyring model

Fluido puro em escoamento paralelo

Gradiente de velocidades

$$\frac{dv_x}{dy} = \frac{v_{xA} - v_{xB}}{\delta} = \frac{a}{\delta} (f_+ - f_-)$$

Frequência líquida de saltos à frente

$$\begin{aligned} (f_+ - f_-) &= \frac{k_B T}{h} \exp\left(-\frac{\bar{G}_0^+}{\mathfrak{R}T}\right) \left[\exp\left(\frac{+\tau_{yx} \bar{V}}{2\mathfrak{R}T} \frac{a}{\delta}\right) - \exp\left(\frac{-\tau_{yx} \bar{V}}{2\mathfrak{R}T} \frac{a}{\delta}\right) \right] \\ &= 2 \frac{k_B T}{h} \exp\left(-\frac{\bar{G}_0^+}{\mathfrak{R}T}\right) \sinh\left(\frac{\tau_{yx} \bar{V}}{2\mathfrak{R}T} \frac{a}{\delta}\right) \longrightarrow \ll 1: \sinh(x) \sim x \end{aligned}$$

Relação tensão-taxa de deformação

$$\frac{dv_x}{dy} = \left(\frac{a}{\delta}\right)^2 \frac{\bar{V}}{N_a h} \exp\left(-\frac{\bar{G}_0^+}{\mathfrak{R}T}\right) \tau_{yx} \longrightarrow \eta = \left(\frac{\delta}{a}\right)^2 \frac{N_a h}{\bar{V}} \exp\left(\frac{\bar{G}_0^+}{\mathfrak{R}T}\right)$$

Viscosidade dinâmica: Eyring model

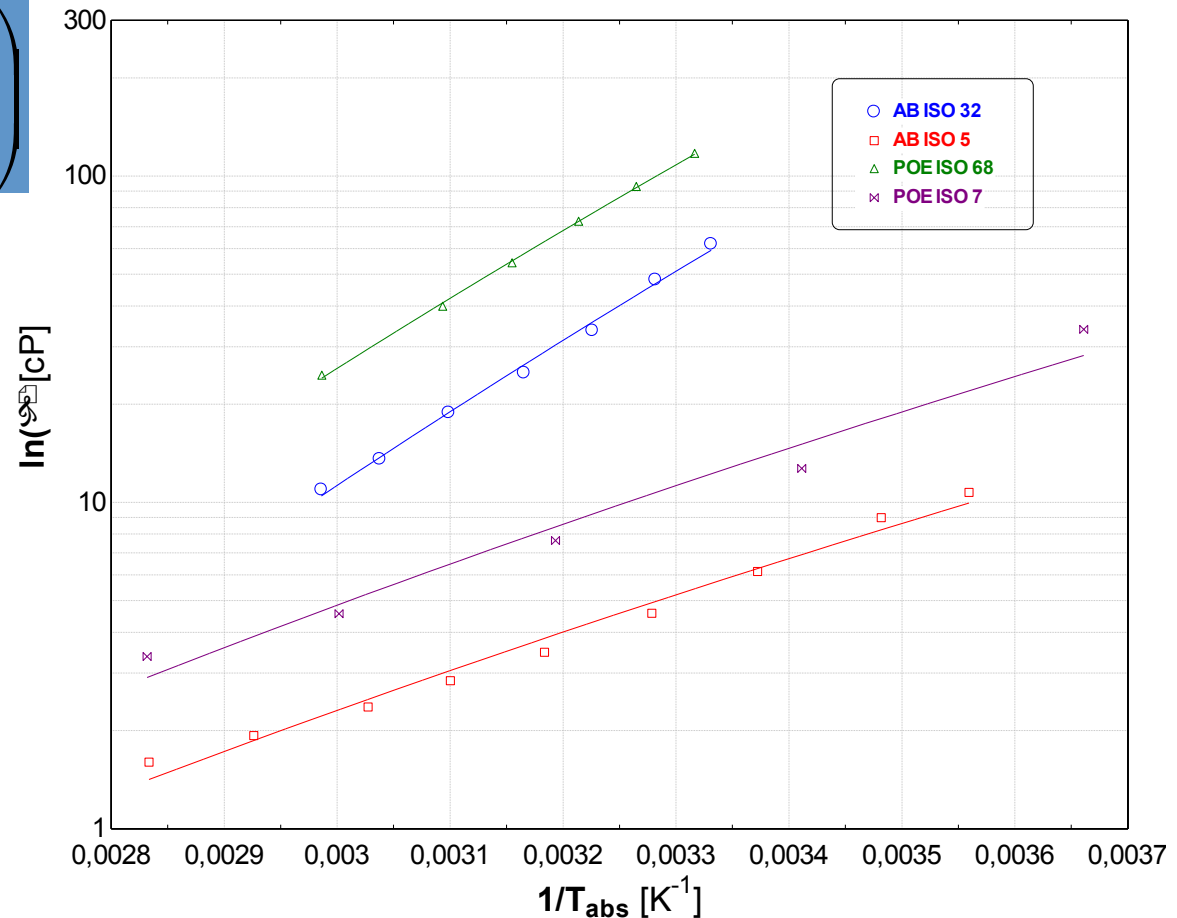
Fluido puro em escoamento paralelo

$$\eta = \left(\frac{\delta}{a}\right)^2 \frac{N_a \hbar}{\bar{V}} \exp\left(\frac{\bar{G}_0^+}{\mathcal{R}T}\right)$$

~ 1

$$\eta = A \exp\left(\frac{\bar{G}_0^+}{\mathcal{R}T}\right)$$

$$\ln \eta = \ln A + \frac{\bar{G}_0^+}{\mathcal{R}} \frac{1}{T}$$



Viscosidade dinâmica: Eyring model

Viscosidade de uma mistura binária

$$\eta \bar{V} = N_a \hbar \exp \left[\frac{1}{\mathfrak{R}T} \left(\bar{x}_1 \bar{G}_1^+ + \bar{x}_2 \bar{G}_2^+ + \bar{G}^{E+} \right) \right]$$

$$\ln \left(\frac{\eta \bar{V}}{N_a \hbar} \right) = \bar{x}_1 \frac{\bar{G}_1^+}{\mathfrak{R}T} + \bar{x}_2 \frac{\bar{G}_2^+}{\mathfrak{R}T} + \frac{\bar{G}^{E+}}{\mathfrak{R}T}$$

$$= \bar{x}_1 \ln \left(\frac{\eta_1 \bar{V}_1}{N_a \hbar} \right) + \bar{x}_2 \ln \left(\frac{\eta_2 \bar{V}_2}{N_a \hbar} \right) + \frac{\bar{G}^{E+}}{\mathfrak{R}T}$$

Excess activation
energy of viscous flow
[J/mol]

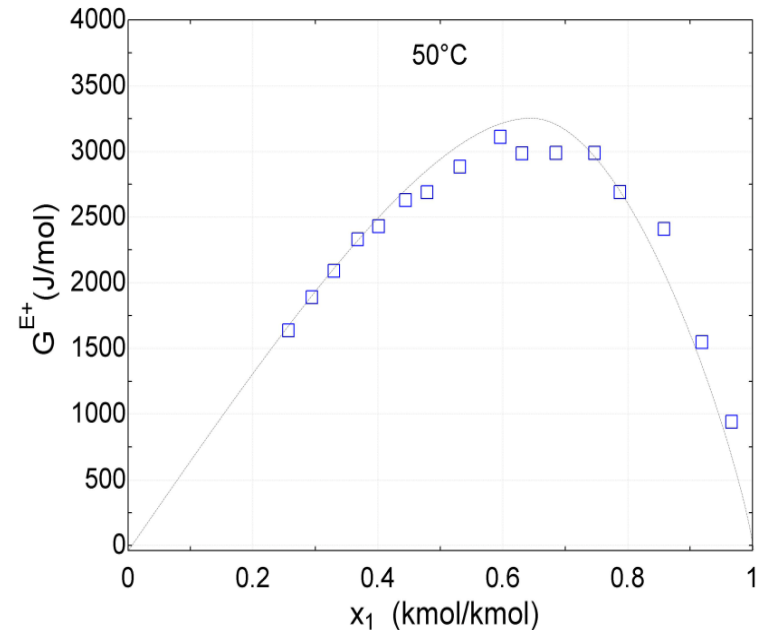
$$\ln(\eta \bar{V}) = \bar{x}_1 \ln(\eta_1 \bar{V}_1) + \bar{x}_2 \ln(\eta_2 \bar{V}_2) + \frac{\bar{G}^{E+}}{\mathfrak{R}T}$$

Viscosidade dinâmica: Eyring model

Energia de ativação em excesso

$$\ln(\eta \bar{V}) = \underbrace{\bar{x}_R \ln(\eta_R \bar{V}_R) + \bar{x}_O \ln(\eta_O \bar{V}_O)}_{\text{ideal}} + \underbrace{\frac{\bar{G}^{E+}}{\mathcal{R}T}}_{\text{excess}}$$

R-600a + POE ISO 7



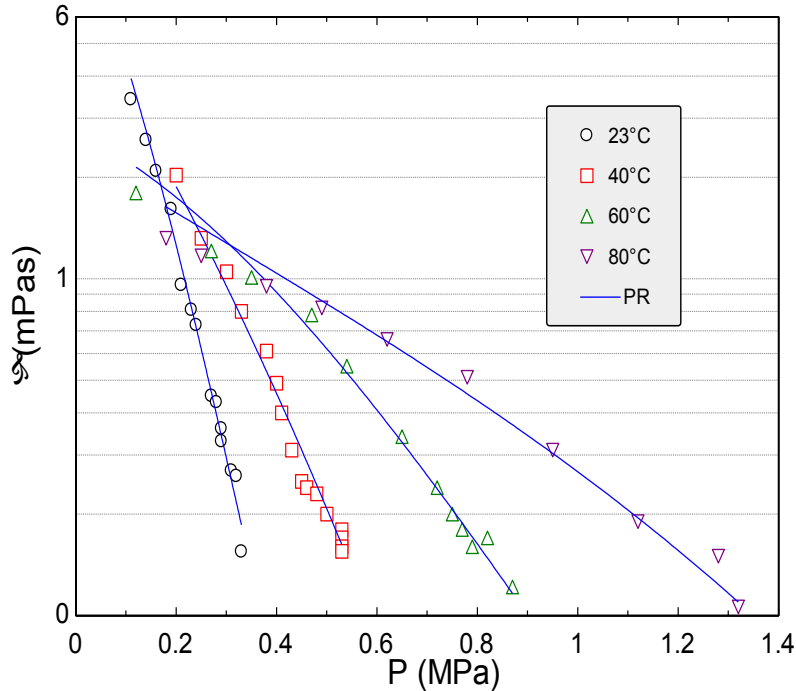
Variações significativas com relação ao comportamento ideal

M.A. Marcelino Neto, J.R. Barbosa Jr. (2008) *Int. J. Refrig.* 31, 34-44.

Viscosidade dinâmica: Eyring model

Modelos teóricos

R-600a + LAB ISO 5



$$\frac{\bar{G}^{E+}}{\mathcal{R}T} = \bar{x}_1 (\ln \hat{\phi}_1 - \ln \phi_1) + \bar{x}_2 (\ln \hat{\phi}_2 - \ln \phi_2)$$

(Macías-Salinas et al., 2003)

**Coeficientes de fugacidade calculados com a EdE de P-R
(sem parâmetros de ajuste!)**

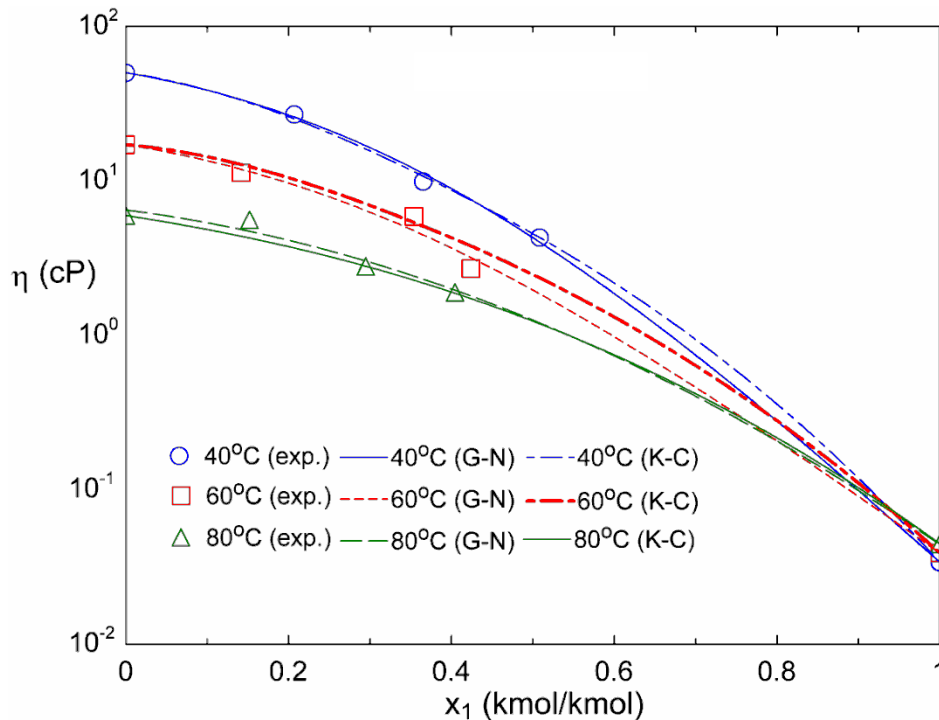
M.A. Marcelino Neto, J.R. Barbosa Jr. (2010) *Fluid Phase Equil.*, 292, 7-12.

Unicamp, March 23-27, 2015

Viscosidade dinâmica: Eyring model

Modelo empírico

R-744 + MO ISO 50



$$\frac{\bar{G}^{E+}}{\mathcal{R}T} = K \frac{\bar{x}_1 \bar{x}_2}{\mathcal{R}T}$$

(Katti and Chaudry, 1964)

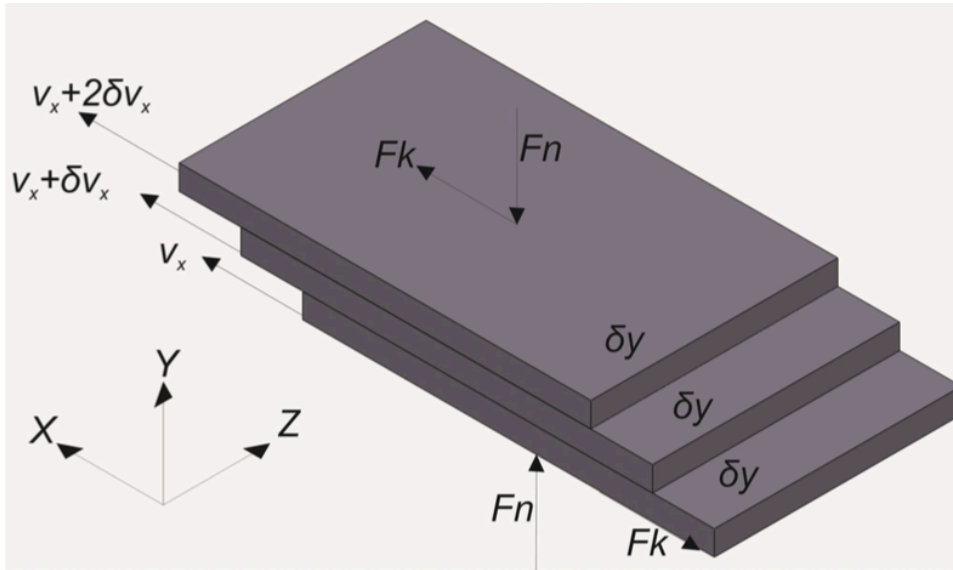
**Variações positivas significativas com relação ao comportamento ideal
(K-C apresentou melhores resultados para composição desconhecida)**

M.A. Marcelino Neto, J.R. Barbosa Jr. (2010) JBSMSE, 32, 454-459.

Unicamp, March 23-27, 2015

Viscosidade dinâmica: F-theory

Modelos teóricos



Quinones-Cisneros et al. (2000)

Analogia com camadas sólidas cisalhantes

$$\eta = \eta_0 + \eta_f$$

Gás diluído (Chung et al., 1998)

Residual (PC-SAFT: repulsivo-atrativo)

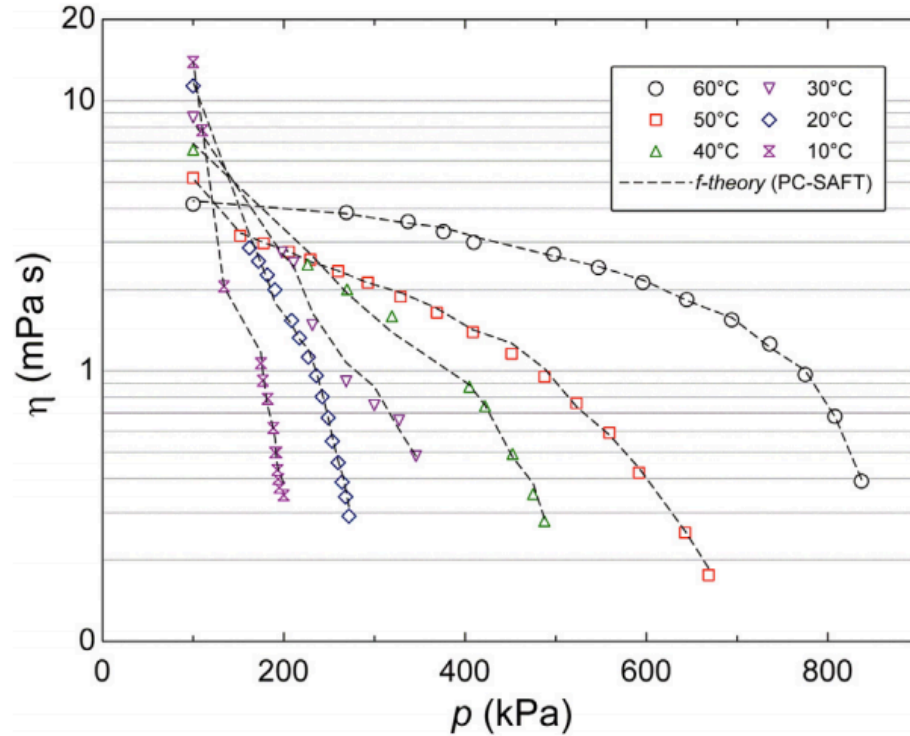
$$\eta_f = \kappa_a p_a + \kappa_{aa} p_a^2 + \kappa_r p_r + \kappa_{rr} p_r^2$$

$$\kappa_a = \eta_a \frac{\tilde{\kappa}_a}{p_c} \quad \kappa_{aa} = \eta_a \frac{\tilde{\kappa}_{aa}}{p_c^2}$$

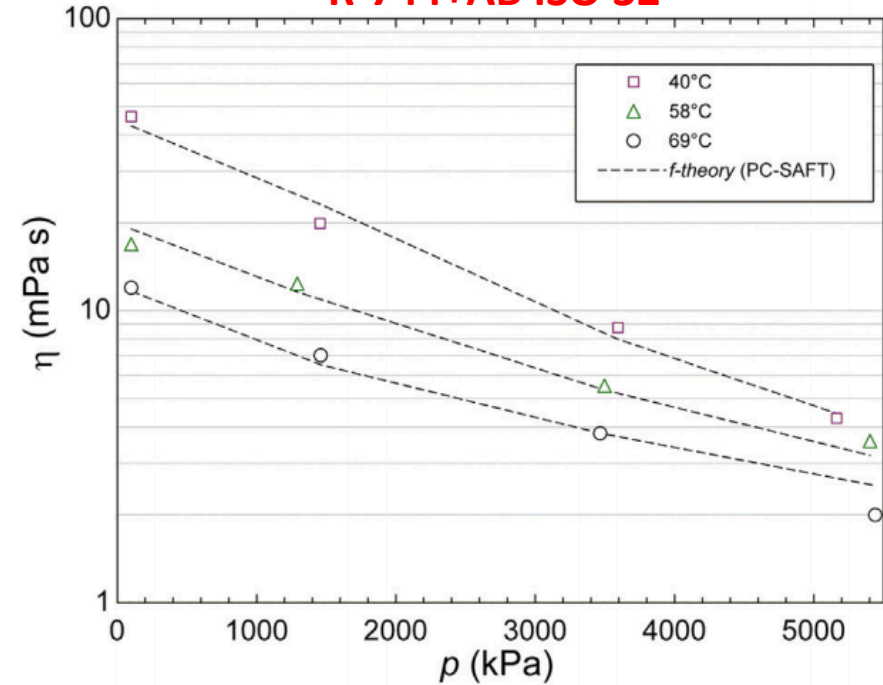
$$\kappa_r = \eta_r \frac{\tilde{\kappa}_r}{p_c} \quad \kappa_{rr} = \eta_r \frac{\tilde{\kappa}_{rr}}{p_c^2}$$

Viscosidade dinâmica: F-theory

R-600a+ POE ISO 7



R-744+AB ISO 32

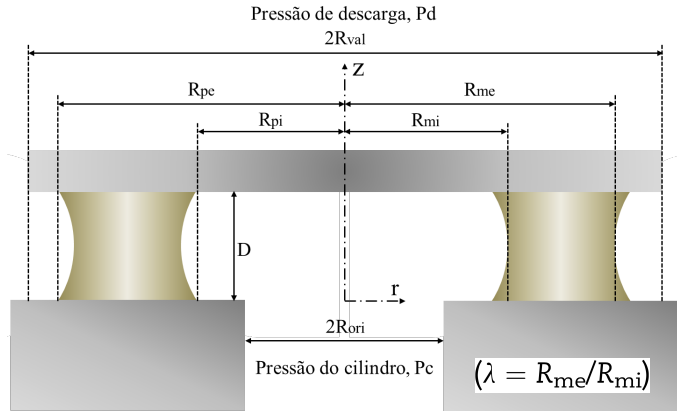


M.A. Marcelino Neto, J.R. Barbosa Jr. (2014) IJR, 45, 92-99.

Unicamp, March 23-27, 2015

Propriedades de superfície

Fenômenos de adesão em válvulas



$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_{\text{ext}} - F_{\text{visc}} - F_{\text{cap}} - F_{\gamma_{\text{LG}}} - F_{\text{spr}}$$

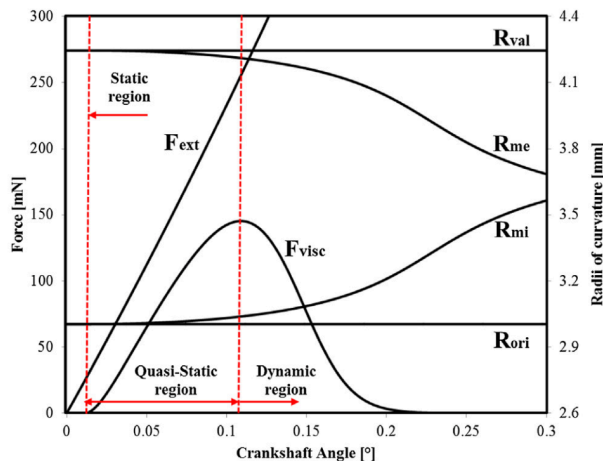
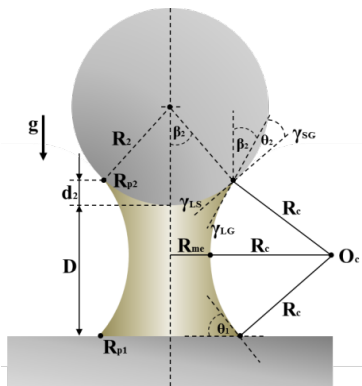
$$F_{\text{ext}} = \pi R_{\text{mi}}^2 (P_c - P_d) \left(\frac{\lambda^2 - 1}{2 \ln \lambda} \right)$$

$$F_{\text{visc}} = \frac{3\pi\mu R_{\text{mi}}^4}{2x^3} \frac{dx}{dt} \left(\lambda^4 - 1 + \frac{2\lambda^2 - \lambda^4 - 1}{\ln \lambda} \right)$$

$$F_{\text{cap}} = \frac{2\pi\gamma_{\text{LG}} R_{\text{mi}}^2 \cos \theta}{x} (\lambda^2 - 1)$$

$$F_{\gamma_{\text{LG}}} = 2\pi R_{\text{mi}} \gamma_{\text{LG}} \sin \theta (\lambda - 1)$$

$$F_{\text{spr}} = kx$$

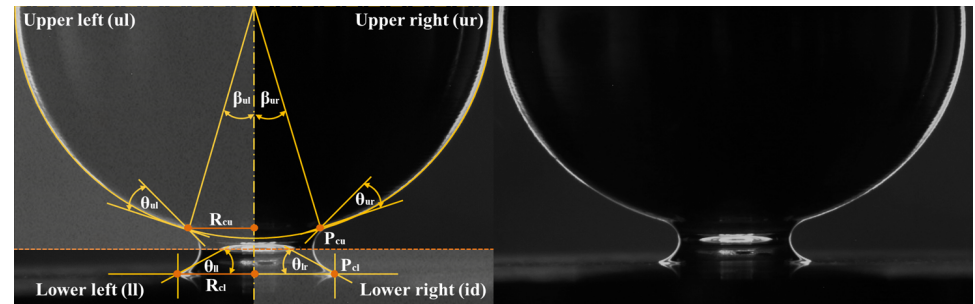
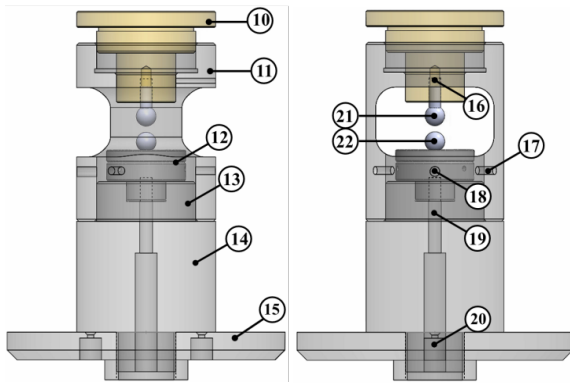
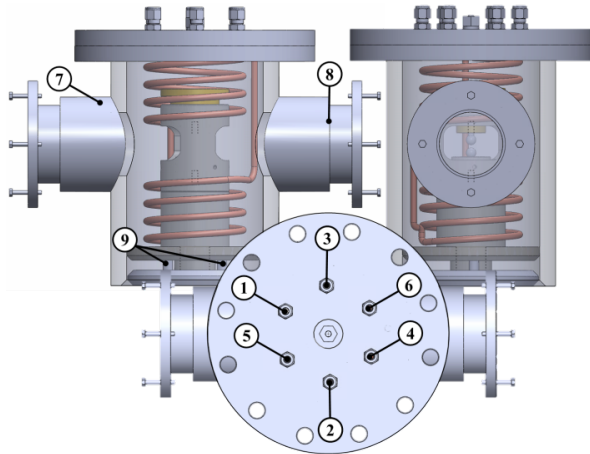


$$\theta, \gamma_{\text{LG}} = ?$$

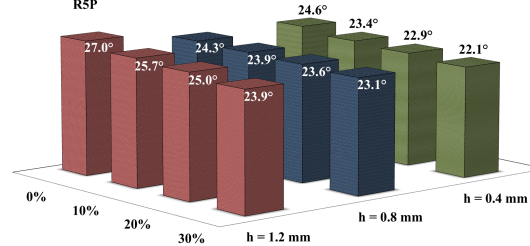
Pizarro-Recabarren, Barbosa, Deschamps (2013) IJR 36, 1916-1924

Propriedades de superfície

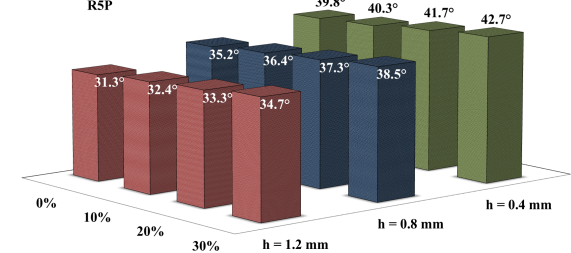
Ângulos de contato e espalhamento



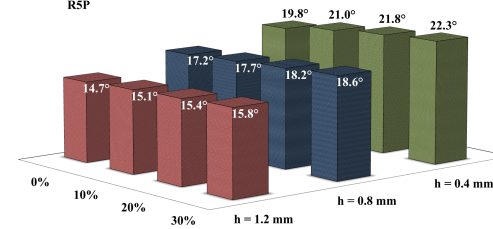
Upper contact angle (θ_u) for RSP



Lower contact angle (θ_l) for RSP



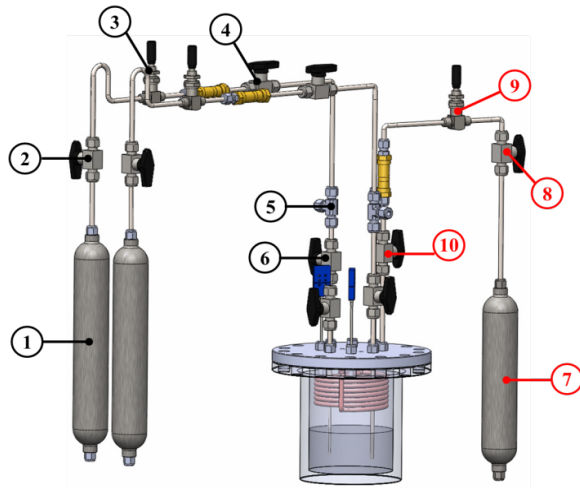
Half-filling angle (β) for RSP



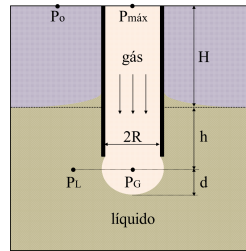
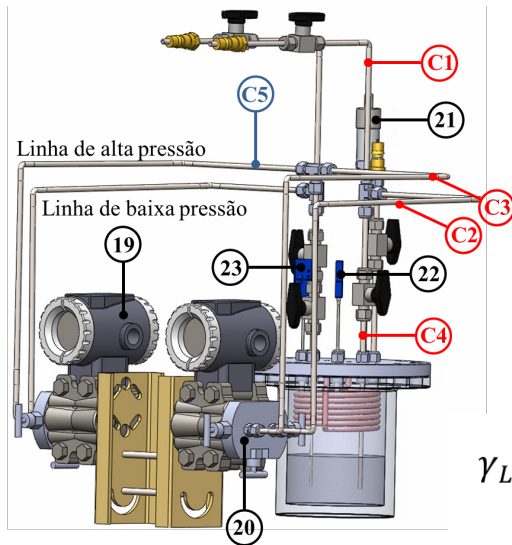
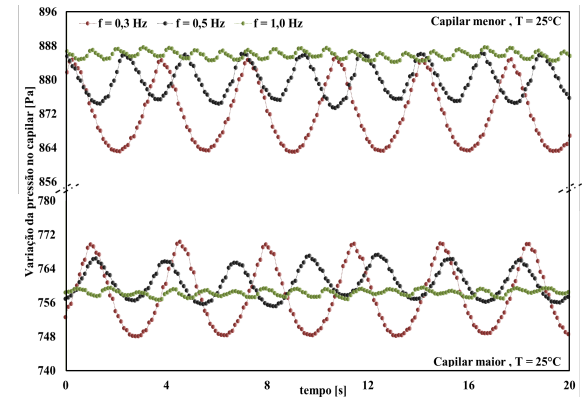
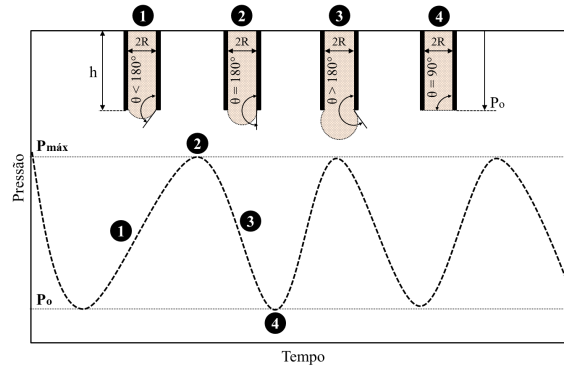
Pizarro-Recabarren, Ebel, Barbosa, Deschamps (2015) ICR Yokohama, in review.

Unicamp, March 23-27, 2015

Propriedades de superfície

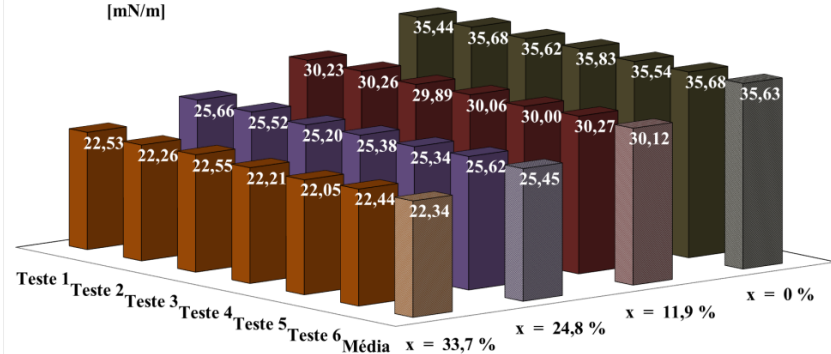


Tensão interfacial



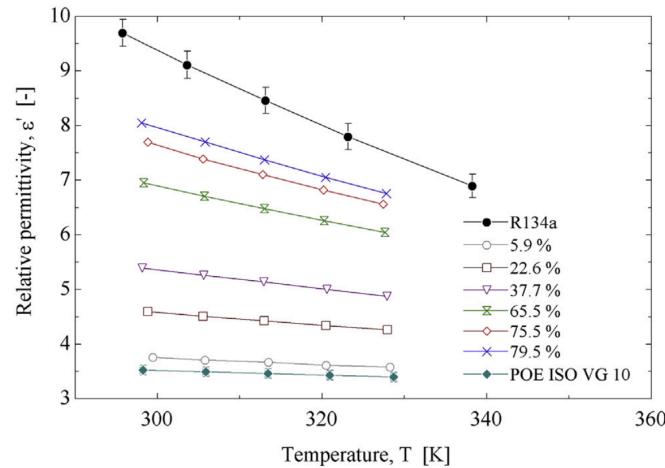
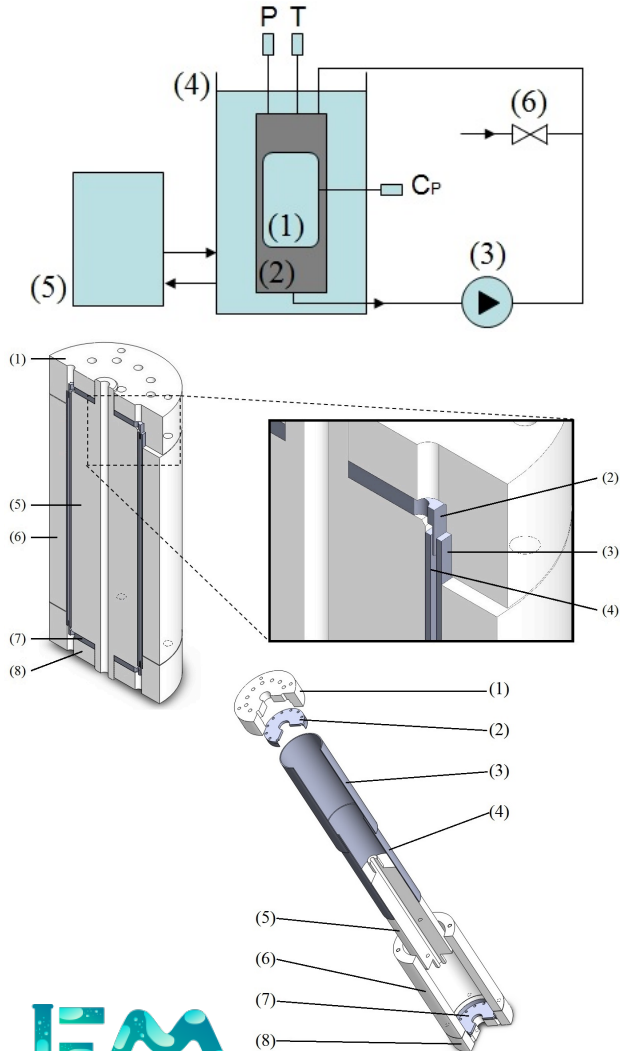
$$\gamma_{LG} = \frac{P_{m\acute{a}x1} - P_{m\acute{a}x2}}{2 \left(\frac{1}{R_{c1}} - \frac{1}{R_{c2}} \right)}$$

Tensão Interfacial da mistura
POE ISO 10 e R-134a
[mN/m]



Propriedades dielétricas

Permissividade relativa e fator de dissipação



Böttcher (1945)

$$\epsilon' = \phi_1 \epsilon'_1 + \phi_2 \epsilon'_2$$

$$\phi_i = \frac{x_i / \rho_i}{\sum_{i=1}^n x_i / \rho_i}$$

Oster (1946)

$$p_m = \frac{\tilde{x}_1 \tilde{v}_1 p_1 + \tilde{x}_2 \tilde{v}_2 p_2}{\tilde{x}_1 \tilde{v}_1 + \tilde{x}_2 \tilde{v}_2}$$

$$p_i = \frac{(\epsilon'_i - 1)(2\epsilon'_i + 1)}{9\epsilon'_i}$$

Table 6 – Statistical analysis of the relative permittivity mixing rules.

	R-134a/POE ISO 10			R-1234yf/POE ISO 10		
	AAD [%]	RMS [%]	Bias [%]	AAD [%]	RMS [%]	Bias [%]
Böttcher (1945)	0.01	0.20	-0.57	0.19	0.79	-4.04
Kraszewski (1977)	0.17	0.76	-3.89	0.38	1.13	-5.96
Landau and Lifshitz (1960)	0.28	0.97	-4.99	0.46	1.24	-6.60
Lichtenecker and Rother (1931)	0.58	1.39	-7.15	0.65	1.48	-7.86
Bruggeman (1935)	0.22	0.86	-4.38	0.43	1.20	-6.35
Clausius–Mossotti (Shin et al., 1989)	1.14	1.95	-10.0	0.94	1.77	-9.41
Wiener (1912)	1.48	2.22	-11.4	1.13	1.94	-10.3
Kubo–Nakamura (Shin et al., 1989)	3.59	3.46	17.0	1.17	1.98	8.58
Oster (1946)	0.10	0.57	2.51	0.18	0.76	-3.60

Sedrez, Barbosa (2015) IJR 49, 141-150

- Metodologias de cálculo de propriedades termofísicas aplicadas a sistemas óleo-refrigerante
- Redução do caráter empírico dos métodos e modelos
- Validação/comprovação experimental