



Novas Tendências da Utilização de Fluidos Secundários em Sistemas de Refrigeração e de Condicionamento de Ar

José Alberto R. Parise

Departamento de Engenharia Mecânica
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Seminário

Difusão do Uso de Refrigerantes Alternativos em Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado
Recife, 28 de maio de 2009



Novas Tendências da Utilização de Fluidos Secundários em Sistemas de Refrigeração e de Condicionamento de Ar

- Utilização de fluidos secundários em refrigeração
- Escolha de fluidos secundários: quesitos
- Soluções aquosas e suas propriedades termofísicas
- Fluidos secundários sintéticos
- Utilização de CO₂ bifásico
- Pasta de gelo
- Conclusões



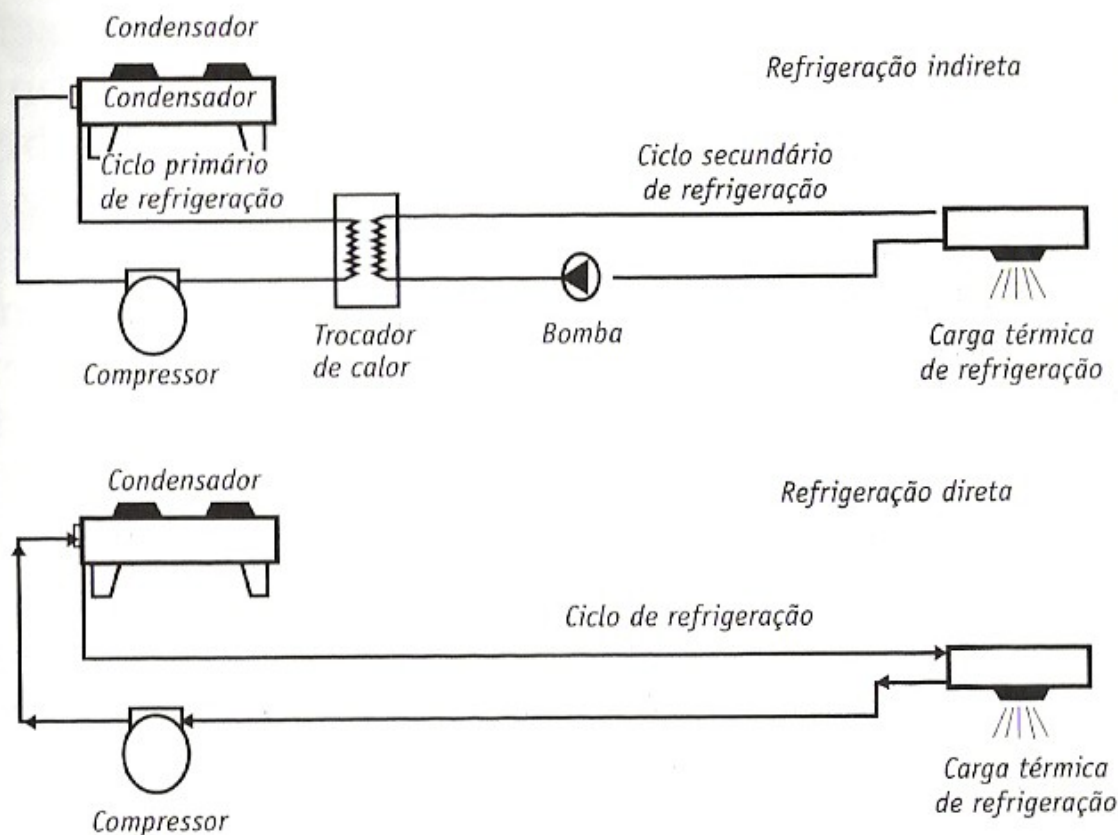
PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Refrigeração com a Utilização de Fluidos Secundários



Refrigeração Direta vs. Refrigeração com Fluido Secundário

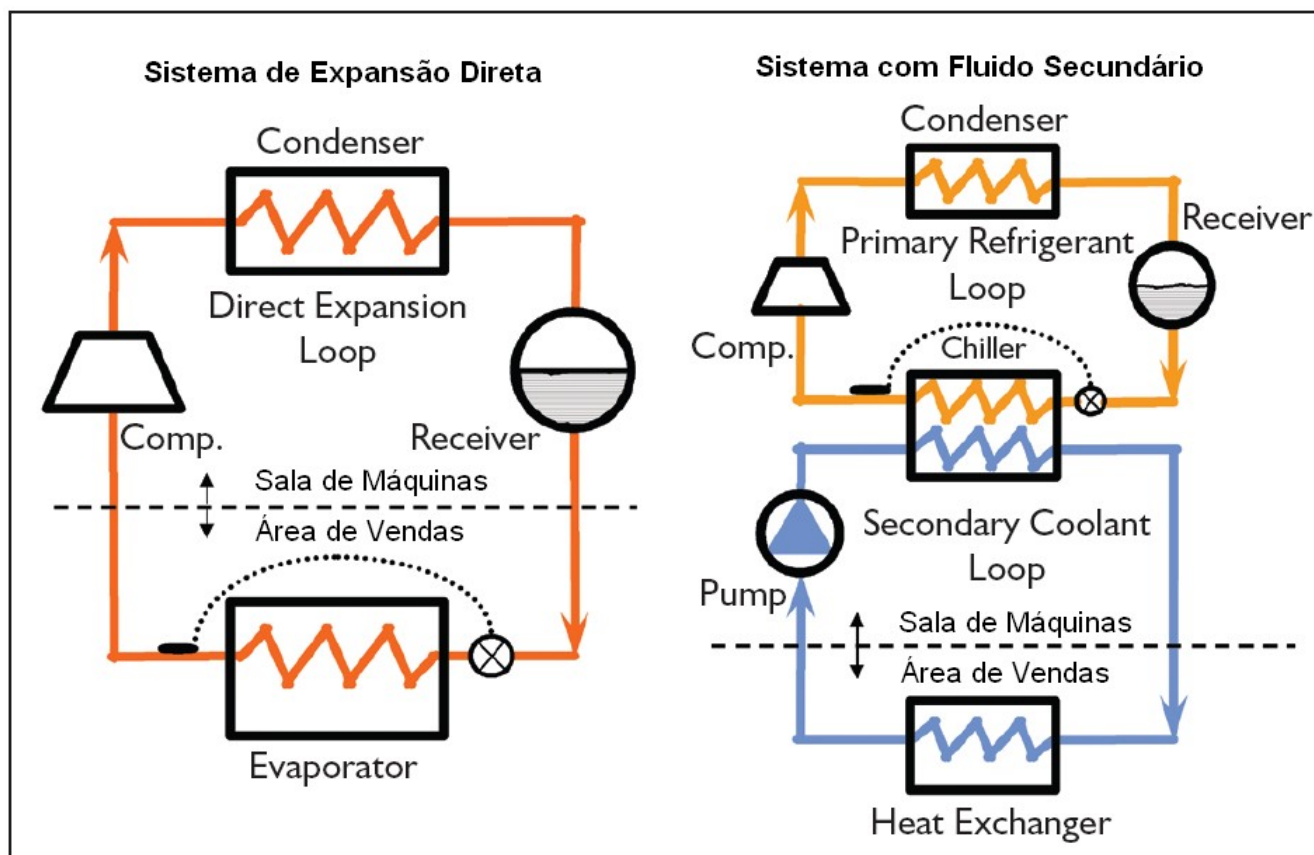
Figura 1 – Refrigeração com fluido secundário em comparação com refrigeração direta



Fonte: Pruzaesky et al., 2008



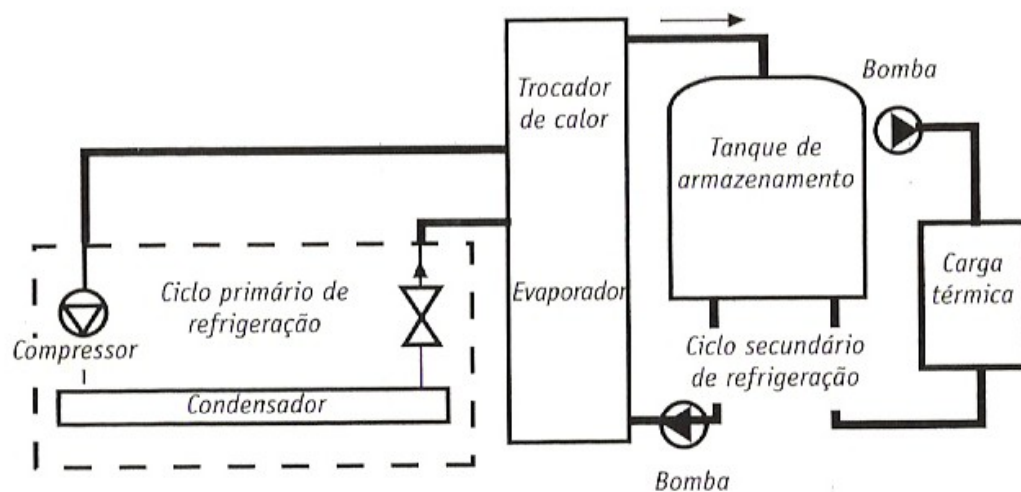
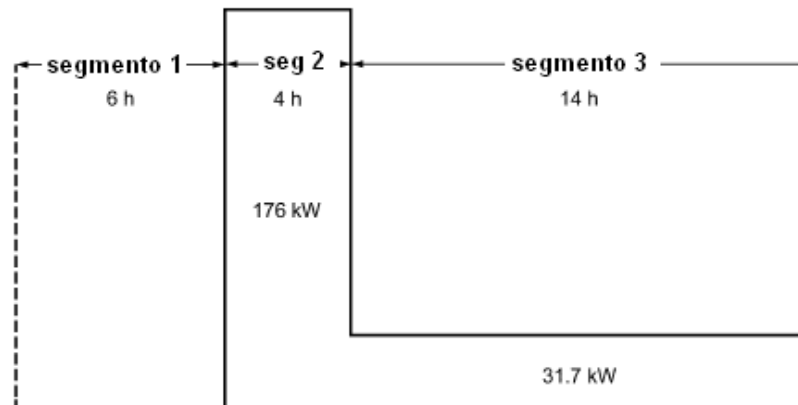
Refrigeração Direta vs. Refrigeração com Fluido Secundário em Supermercados



Fonte: Kazachki e Hinde, ASHRAE Jnl, 2006



Refrigeração com Fluido Secundário e com Termoacumulação



Fontes:
Pruzaesky et al., 2008;
ASHRAE, 2006



PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Ciclos secundários de refrigeração

VANTAGENS

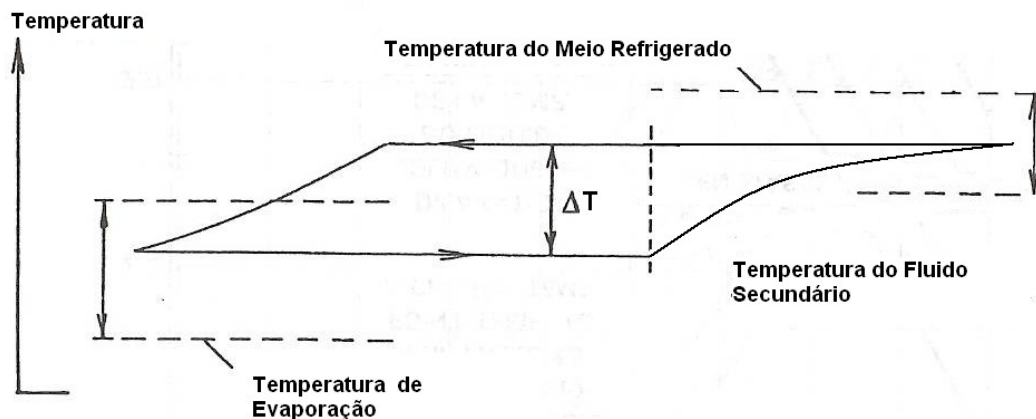
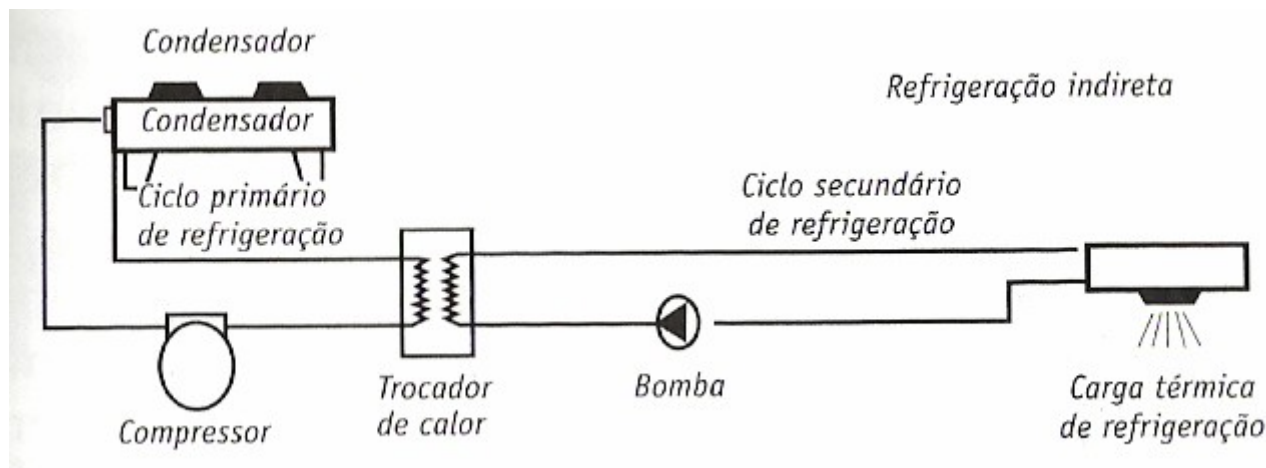
- Considerável redução da carga de refrigerante (até 85%)
- Sistemas de refrigeração muito mais compactos
- Limita o refrigerante à “casa de máquinas”
- Menor impacto ambiental
- Simplifica o circuito do refrigerante
- Temperatura de resfriamento mais estável



PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Refrigeração com Fluido Secundário

Diferença Adicional de Temperatura



Fonte: Pruzaesky et al., 2008



PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Ciclos secundários de refrigeração

DESVANTAGENS

- Custo adicional (bomba e trocador de calor)
- Maior Diferença de Temperatura >> Maior consumo de energia
- Congelamento para baixas temperaturas



PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Escolha do Fluido Secundário: Quesitos

Demandas para o Sistema de Refrigeração operando com Fluido Secundário

- Transporte de grande potência de refrigeração com **fluxo volumétrico reduzido**.
- Operar com **pequenas diferenças de temperatura** em trocadores de calor, isto é, apresentar altos coeficientes de transferência de calor no lado do fluido.
- Baixa potência de bombeamento



PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Escolha do Fluido Secundário

- A temperatura do ponto de solidificação geralmente deve estar abaixo da temperatura de operação do fluido refrigerante secundário.
- Altos valores do calor específico e condutividade térmica são também desejáveis
- A viscosidade não deve ser elevada à temperatura de operação do fluido



Características Desejáveis para o Fluido Secundário

- Baixa viscosidade
- Alto calor específico
- Boa condutividade térmica
- Temperatura de solidificação compatível
- Mecânica e quimicamente estável (separação e degradação)
- Não tóxico
- Não inflamável
- Seguro para alimentos
- Compatível com materiais
- Adequado à regulamentação de segurança e saúde
- Baixo, ou nenhum, impacto ambiental
- Seguro ao manipular
- Disponível a preços razoáveis



Fluidos Secundários

- Água
- Etileno glicol
- Propileno glicol
- Álcool etílico
- Álcool metílico
- Glicerina
- Amônia
- Carbonato de potássio
- CaCl_2 , MgCl_2 , NaCl



PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Propriedades termofísicas relevantes

- Temperatura do ponto de solidificação
- Temperatura de ebulição
- Tensão superficial
- Massa específica
- Viscosidade dinâmica
- Calor específico
- Condutividade térmica
- Coeficiente de expansão térmica

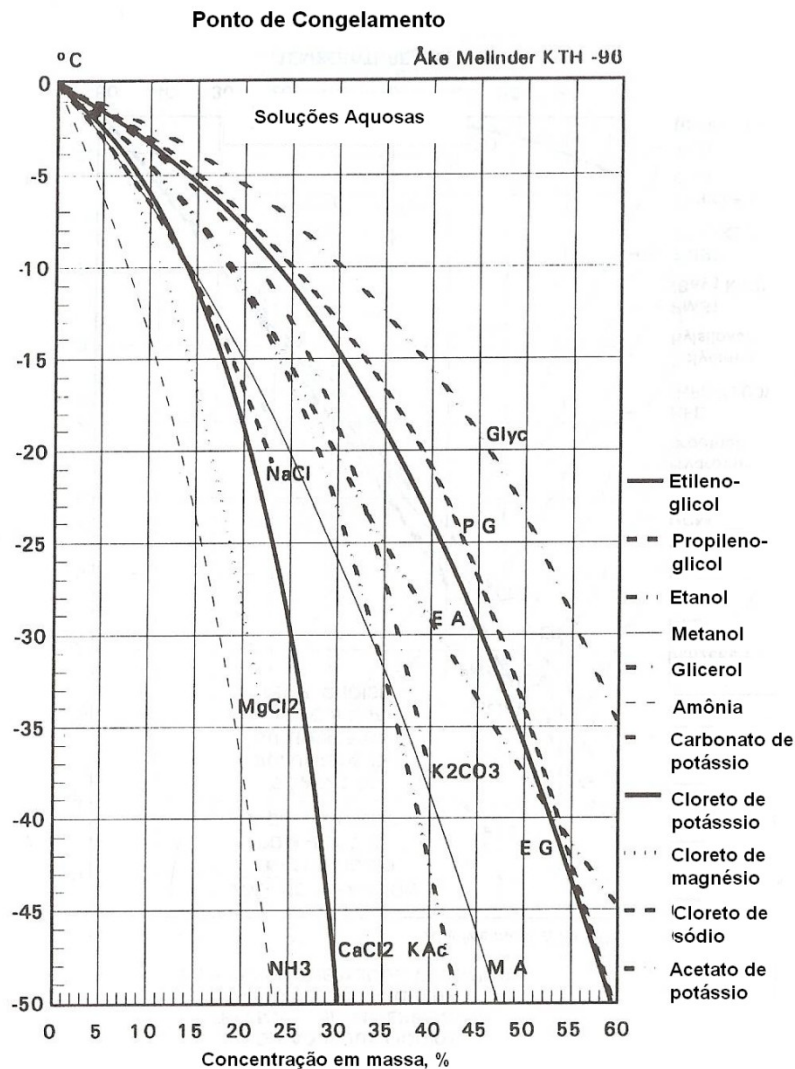


PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Soluções Aquosas e suas Propriedades Termofísicas



Temperatura de solidificação

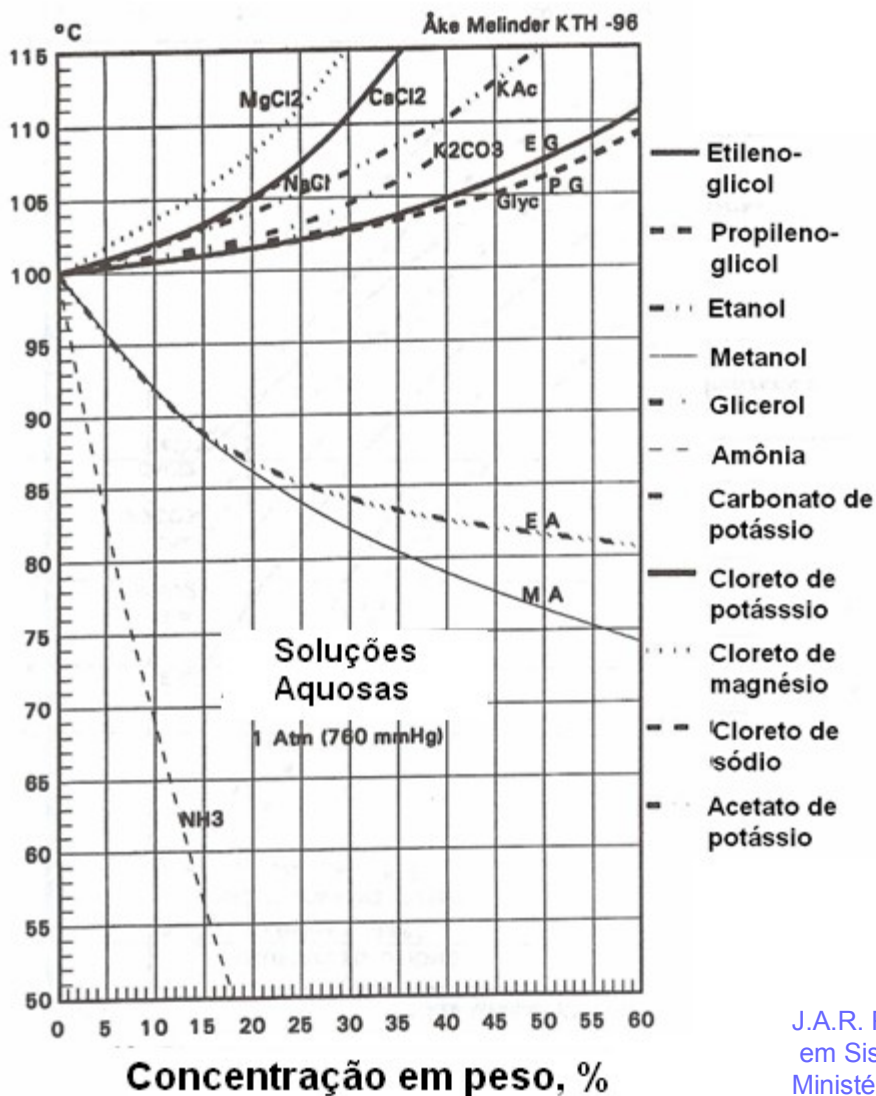


Fonte: Melinder, 1997



Temperatura de ebulição

Temperatura de Ebulição

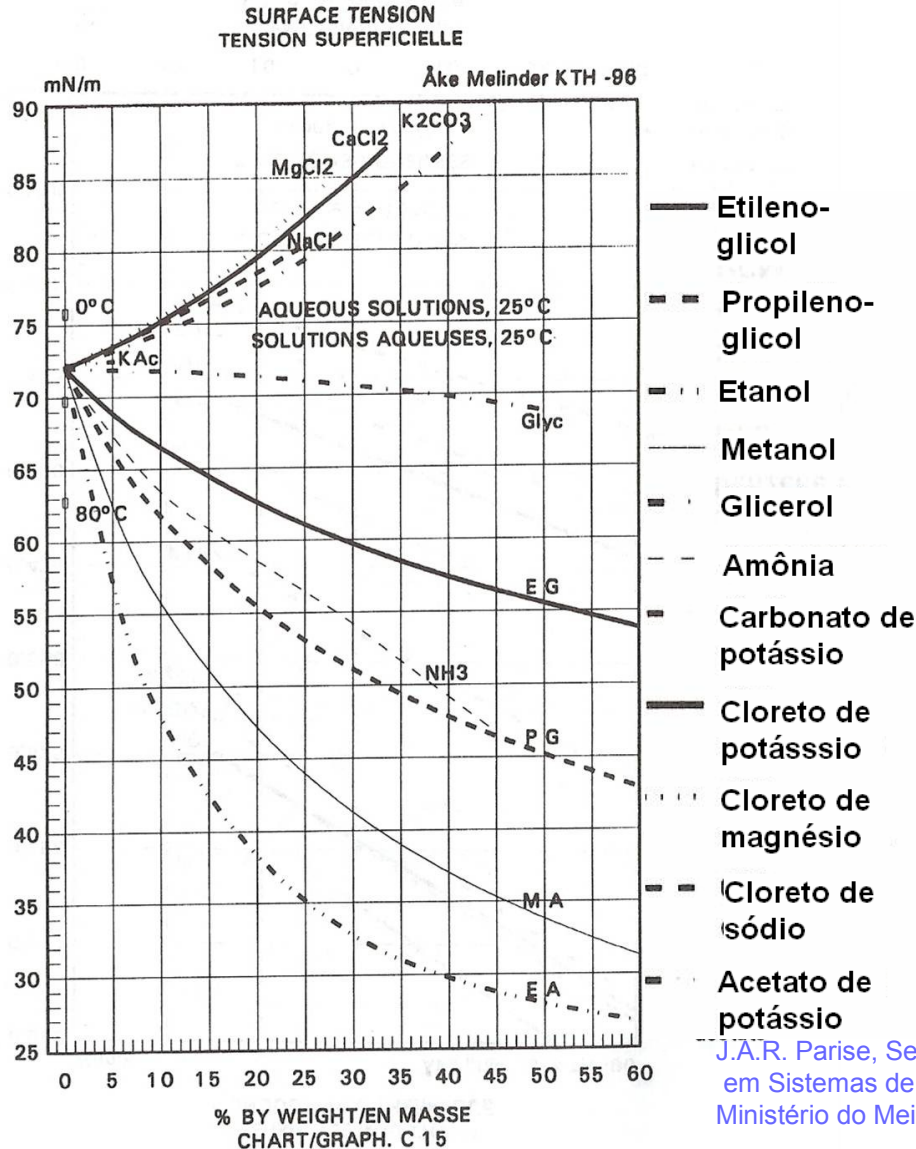


Fonte: Melinder, 1997



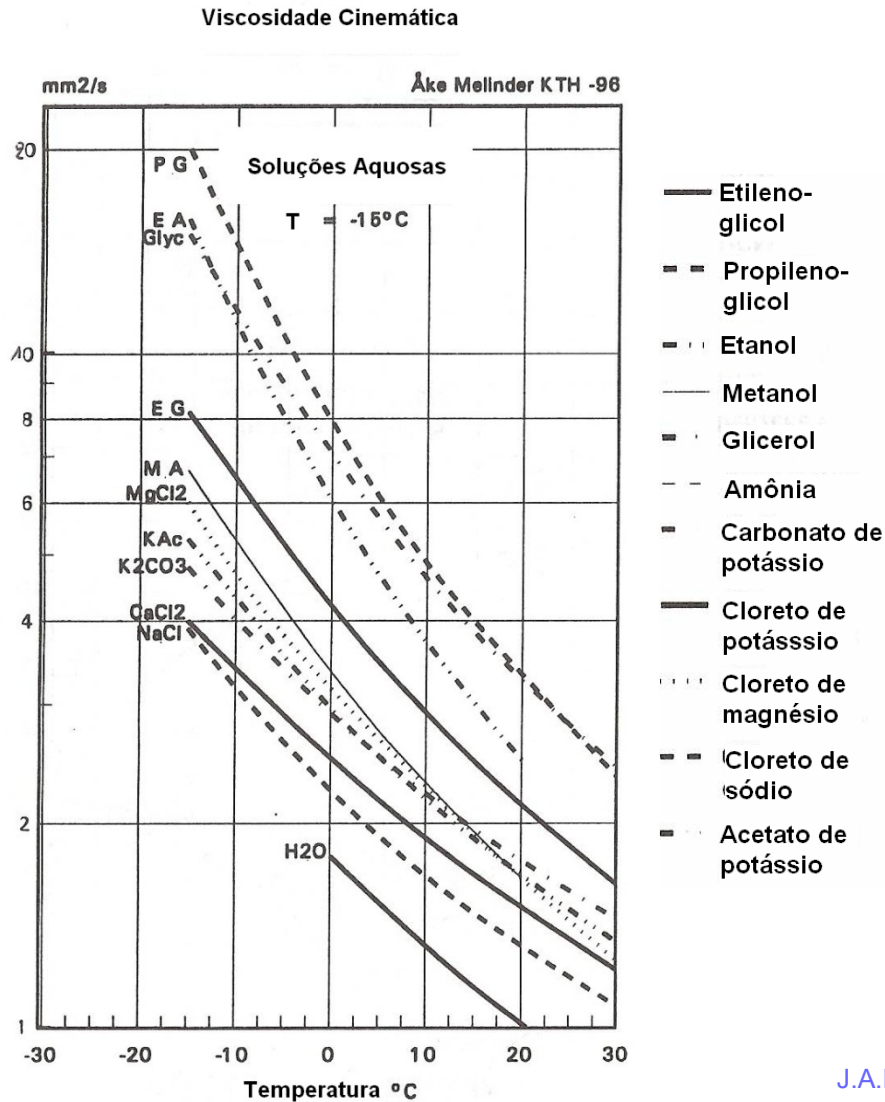
Tensão superficial:

Tendência ao vazamento, cavitação e formação de espuma



Fonte: Melinder, 1997

Viscosidade cinemática: queda de pressão



Problema:

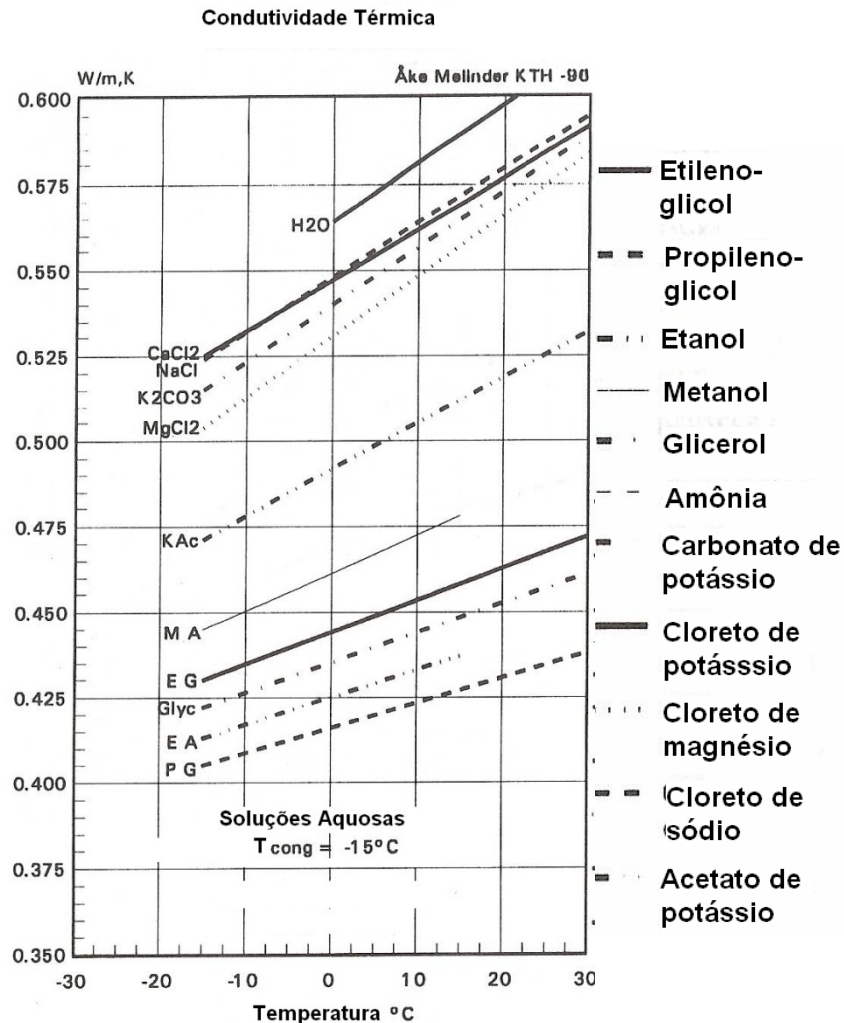
Alta viscosidade a baixas temperaturas

>>

Alta potência de bombeamento

(Fonte: Kruse, 2000)

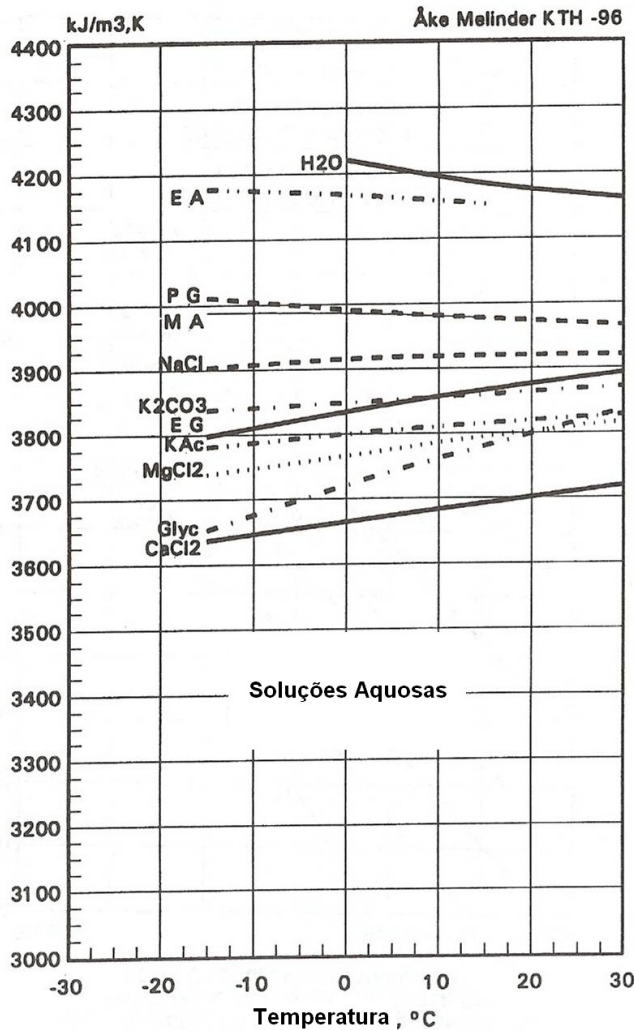
Condutividade térmica: troca de calor



Fonte: Melinder, 1997

Capacidade térmica volumétrica

Capacidade Térmica Volumétrica



- Etileno-glicol
- - - Propileno-glicol
- · - Etanol
- Metanol
- · - Glicerol
- - - Amônia
- · - Carbonato de potássio
- Cloreto de potássio
- · - Cloreto de magnésio
- - - Cloreto de sódio
- · - Acetato de potássio

$$\dot{Q} = (\rho \cdot c_p) \dot{V} \Delta T$$

Fonte: Melinder, 1997

Fator de Transferência de Calor: Escoamento Turbulento

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3}$$

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k}$$

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad Re > 5000$$

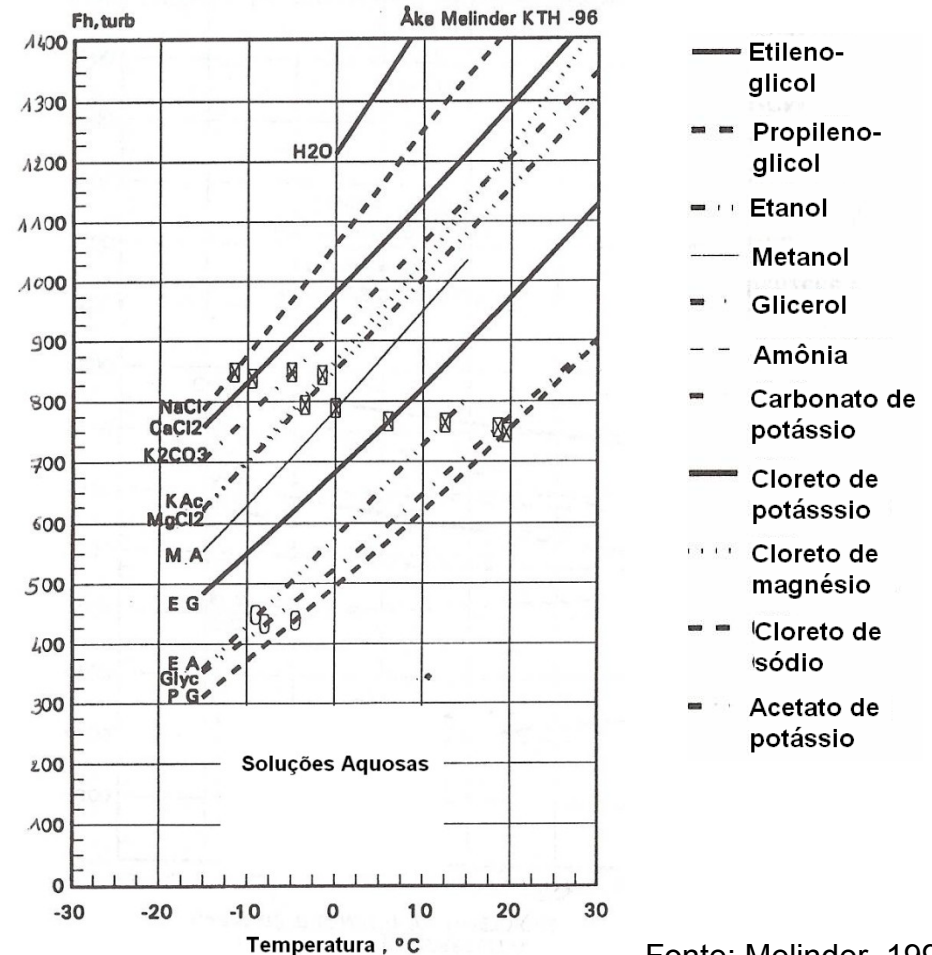
$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k}$$

$$h_{turb} = 0.023 \cdot k^{2/3} (\rho \cdot c_p)^{1/3} \nu^{(1/3-0.8)} \frac{w^{0.8}}{d^{0.2}}$$

$$Fh_{turb} = 0.023 \cdot k^{2/3} (\rho \cdot c_p)^{1/3} \nu^{(1/3-0.8)}$$

$$h_{turb} = Fh_{turb} \frac{w^{0.8}}{d^{0.2}}$$

Fator de Transferência de Calor
Escoamento Turbulento



Fator de Queda de Pressão: Escoamento Turbulento

$$\Delta P_f = f1 \cdot \rho \cdot w^2 \cdot \frac{L}{d}$$

$$f1 \cong \frac{0.092}{Re^{0.2}}$$

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

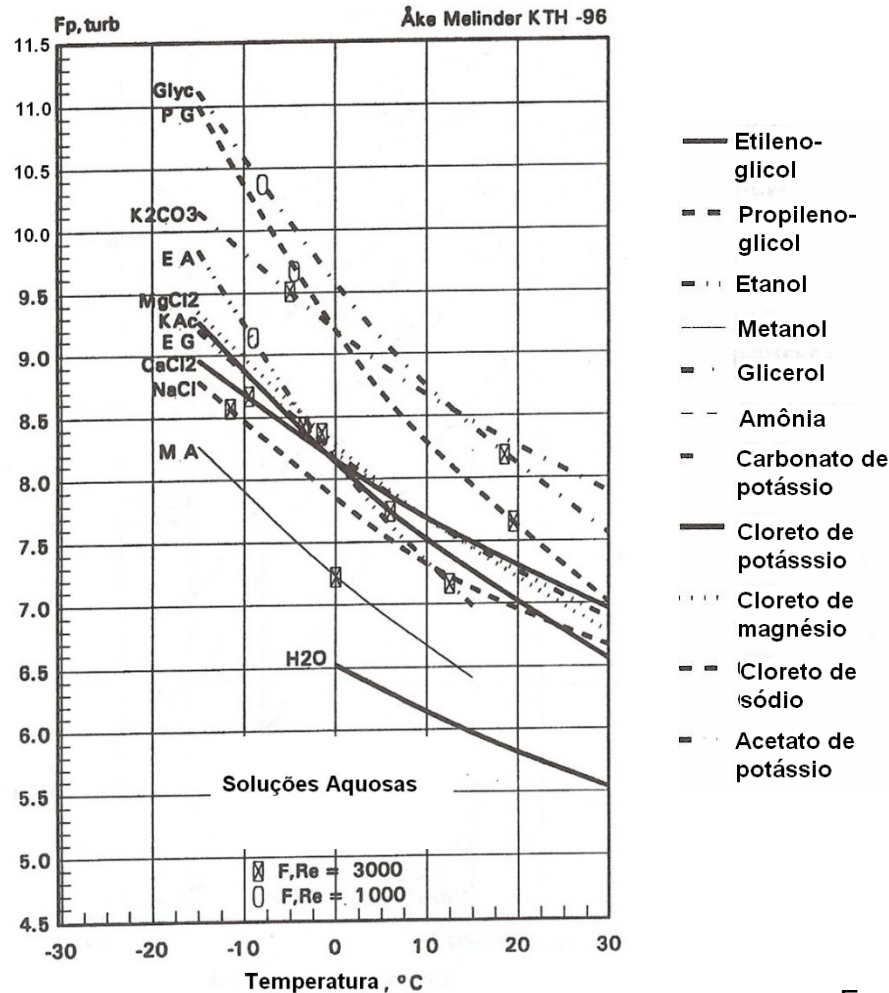
$$\Delta p_f = 0.092 \rho \cdot \nu^2 \cdot \frac{w^{1.8} \cdot L}{d^{1/2}}$$

$$Fp_{turb} = 0.092 \rho \cdot \nu^2$$

$$\Delta p_f = Fp_{turb} \frac{w^{1.8} \cdot L}{d^{1/2}}$$

J.A.R. Parise, Seminário Difusão do Uso de Refrigerantes Alternativos em Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado, Ministério do Meio Ambiente, Recife, 28/5/2009

Fator de Queda de Presão,
Escoamento Turbulento



Soluções Aquosas:

Características gerais

- **“Nenhum fluido secundário é ideal para TODAS as aplicações”**
- **Água:** congela a 0°C; corrosiva
- **Glicóis:** corrosivo; tóxico (EG)
- **Glicerol:** baixo impacto ambiental; não tóxico
- **Álcoois:** inflamável, corrosivo, tóxico (metanol)
- **Amônia:** tóxica, inflamável, corrosiva
- **Cloretos:** corrosivo, não tóxico, causa irritação
- **Sais de Potássio:**
 - **inorgânico (K₂CO₃):** corrosivo, causa danos à visão
 - **orgânicos:** baixo impacto ambiental,

Fonte: (Melinder, 2008)



PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Soluções Aquosas: Conclusão

- Para temperaturas acima de 0°C, água é a melhor solução
- Sistemas de média-temperatura, nos EUA: predominância do propileno glicol (fonte: Hinde et al., 2009)
- Sistemas de baixa-temperatura, nos EUA: fluidos à base de potássio apresentam desempenho térmico superior, porém com problemas de vazamento seguido de corrosão (fonte: Hinde et al., 2009)



PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

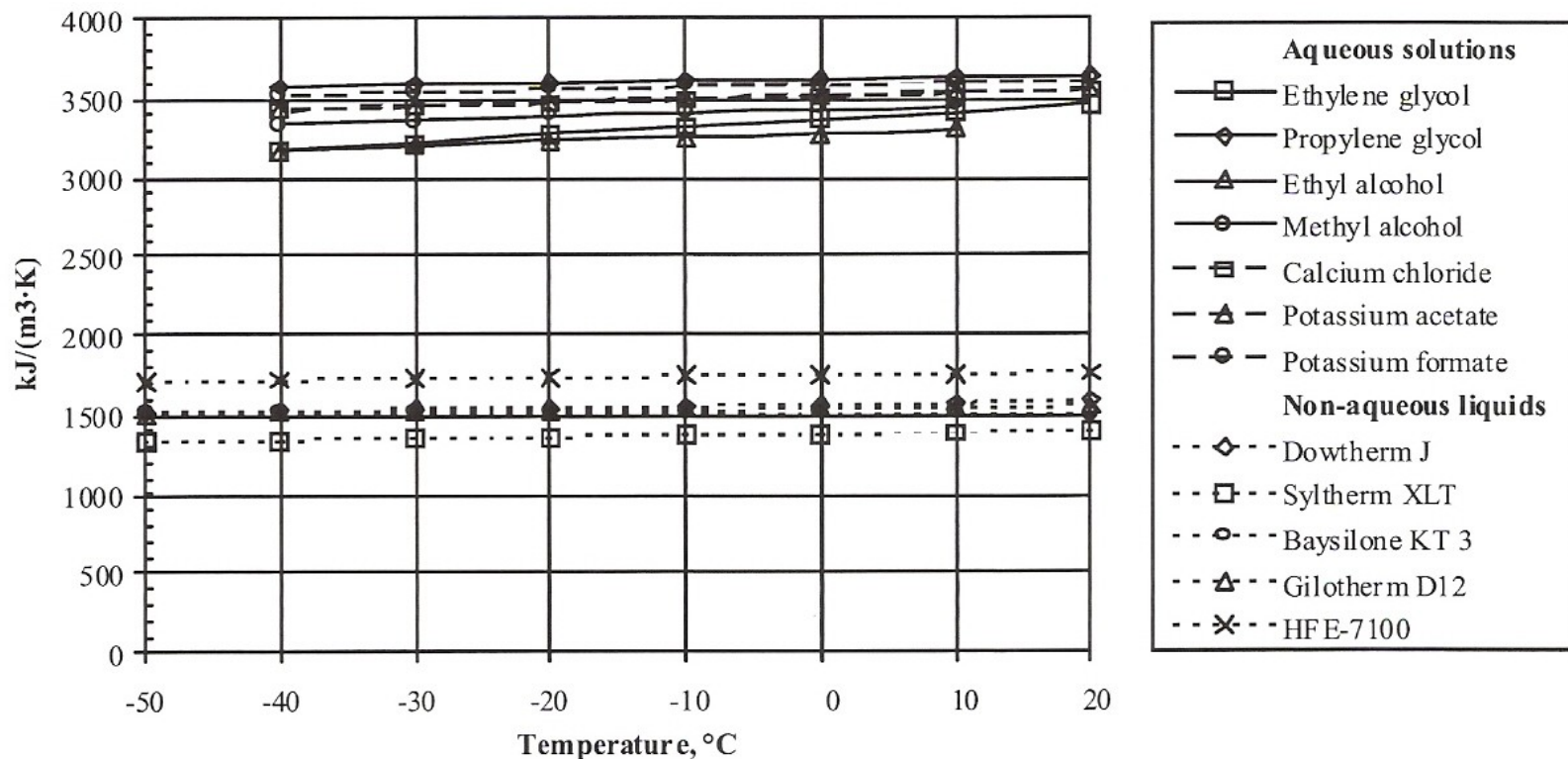
Fluidos Secundários Sintéticos

Fluidos Secundários: Soluções Aquosas vs. Sintéticos

Capacidade Térmica Volumétrica X Temperatura

Fonte: Melinder, 1999

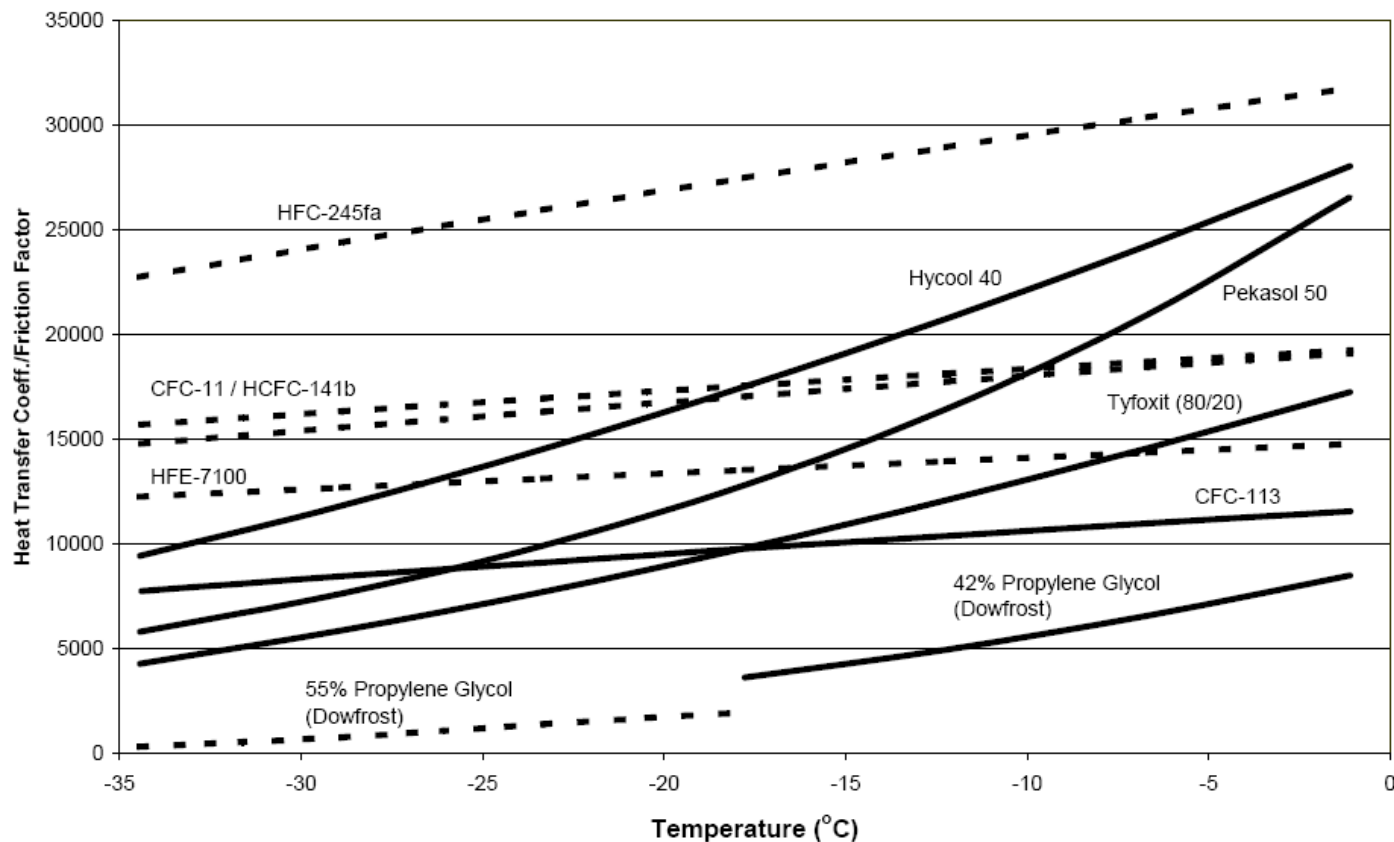
$$\dot{Q} = (\rho \cdot c_p) \dot{V} \Delta T$$





PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Fluidos Secundários Sintéticos: HFC-245fa



Fonte: Honeywell Inc., Zyhowski et al, 2002



PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Utilização do Dióxido de Carbono como Fluido Secundário



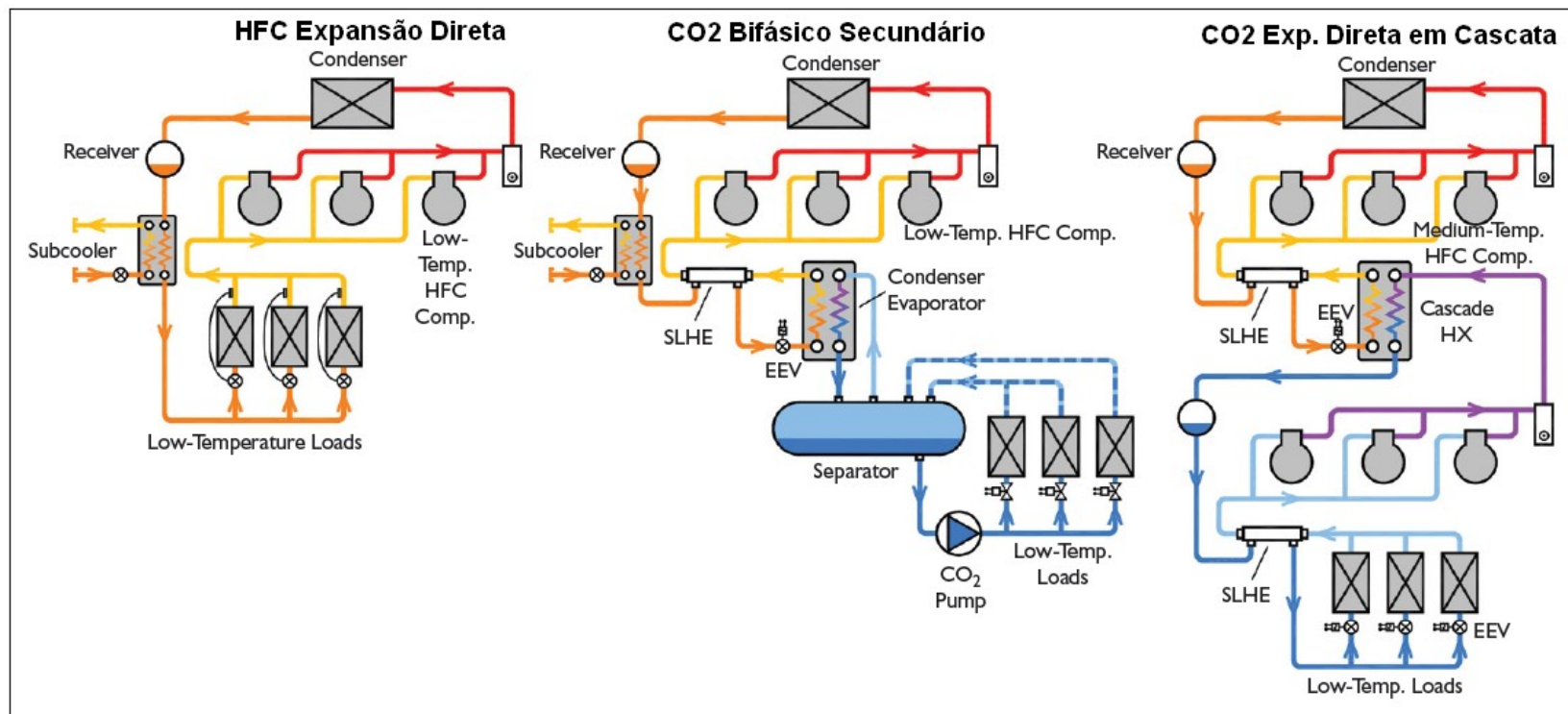
Uso de Fluido Secundário com Mudança de Fase

- Refrigerantes sintéticos? Alto GWP
- Refrigerantes naturais? Segurança local
- Exceção: CO₂
 - ✓ Viscosidade duas ordens de grandeza abaixo dos outros fluidos
 - ✓ Baixa vazão mássica
 - ✓ Alta pressão de operação

fonte: Kruse, 2000



Sistema com Dióxido de Carbono Bifásico como Fluido Secundário



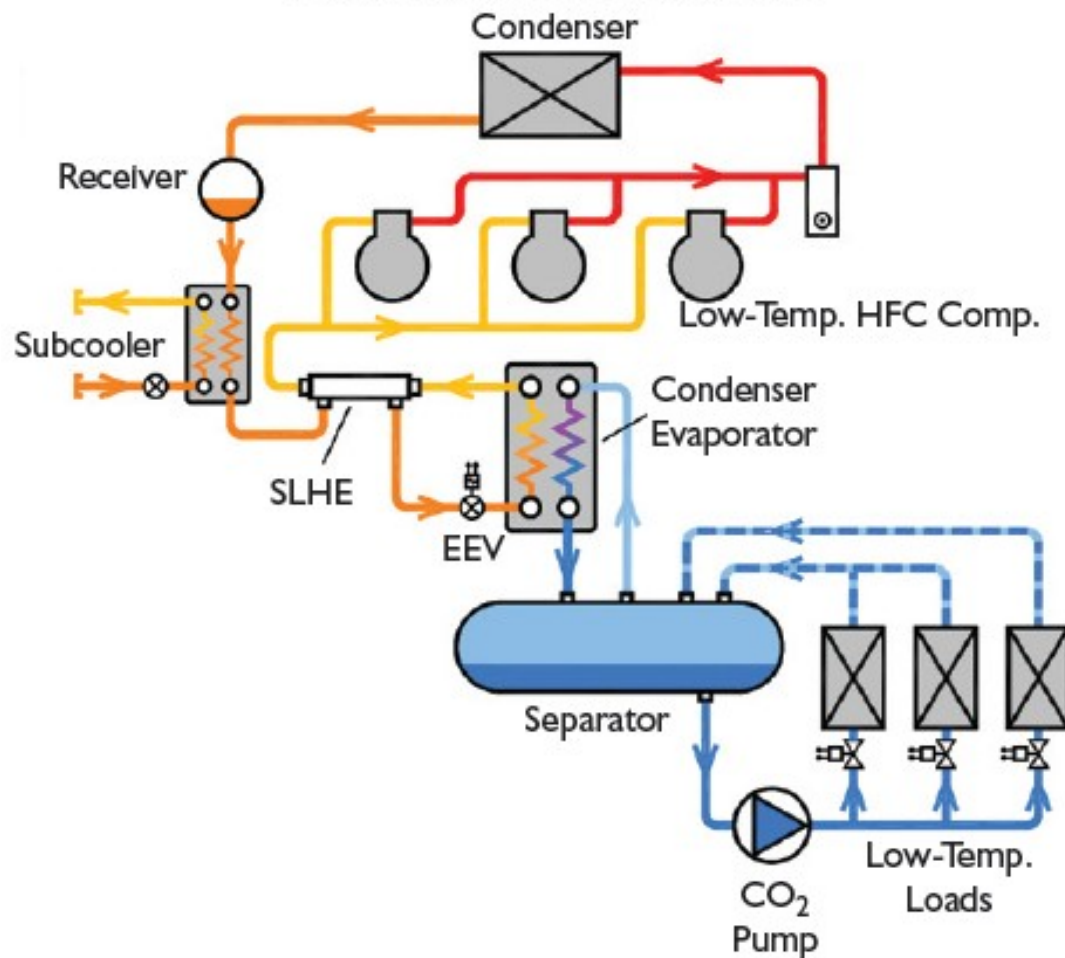
fonte: Hinde et al., 2009



PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Sistema com Dióxido de Carbono Bifásico como Fluido Secundário

CO₂ Bifásico Secundário

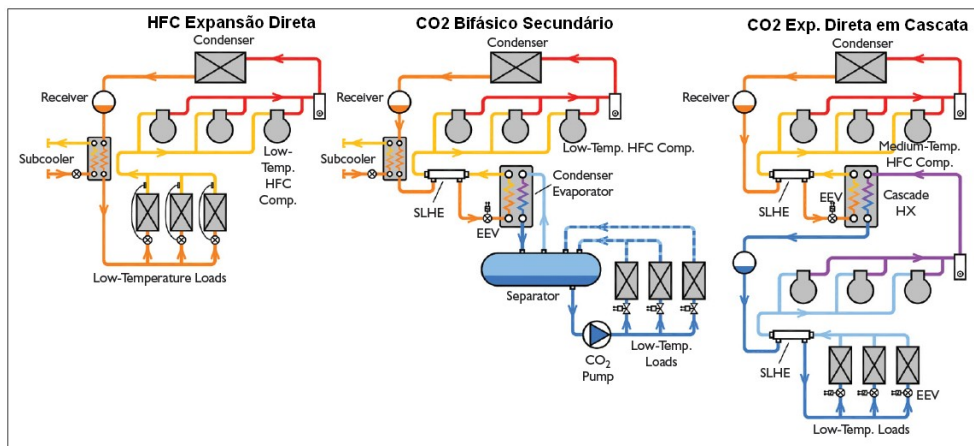


fonte: Hinde et al., 2009



PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Sistema com Dióxido de Carbono Bifásico como Fluido Secundário



fonte: Hinde et al.,
ASHRAE Journal, Feb 2009

Obs.: dados para a cidade de Atlanta, EUA

Tipo de Sistema	Carga de HFC	Emissão ton CO ₂ eq	Cons. Energia ton CO ₂ eq	TEWI
HFC Expansão Direta	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.
CO ₂ Fluido Secundário	-60%	-92%	-3,4%	-69%
Cascata HFC- CO ₂	-60%	-92%	-7,7%	-70%

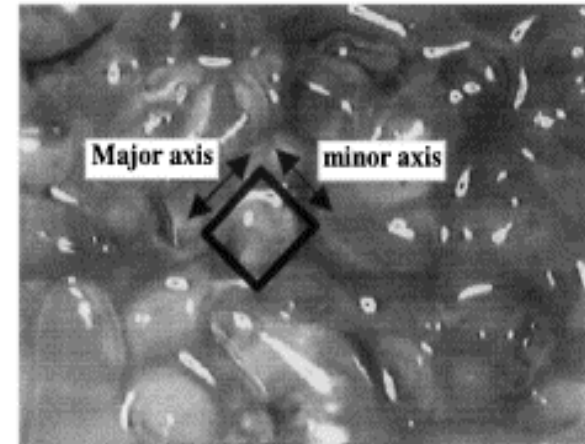


PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Pasta de Gelo como Fluido Secundário

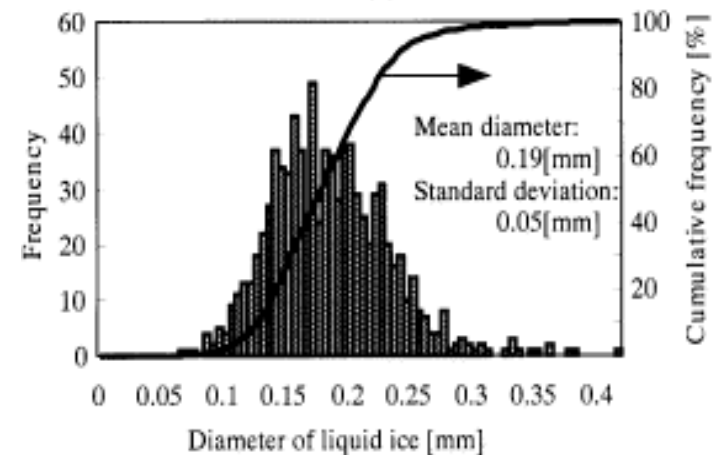
Definição de pasta de gelo

Pasta cristalina fina de gelo, consiste de uma pasta de gelo na qual as partículas de gelo possuem um diâmetro característico médio igual ou menor que 1 mm.



(a)

P. W. Egolf and M. Kauffeld. From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications. *International Journal of Refrigeration*, 28:4–12, January 2005.



(b)

Pasta de gelo



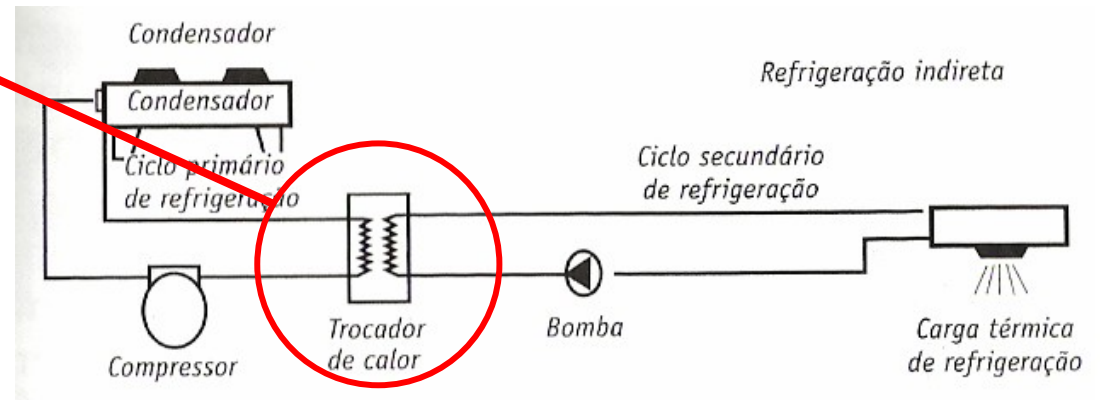
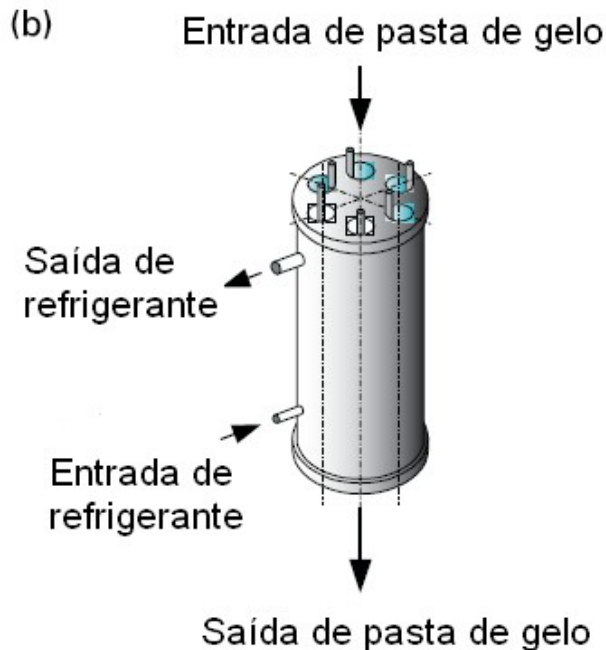
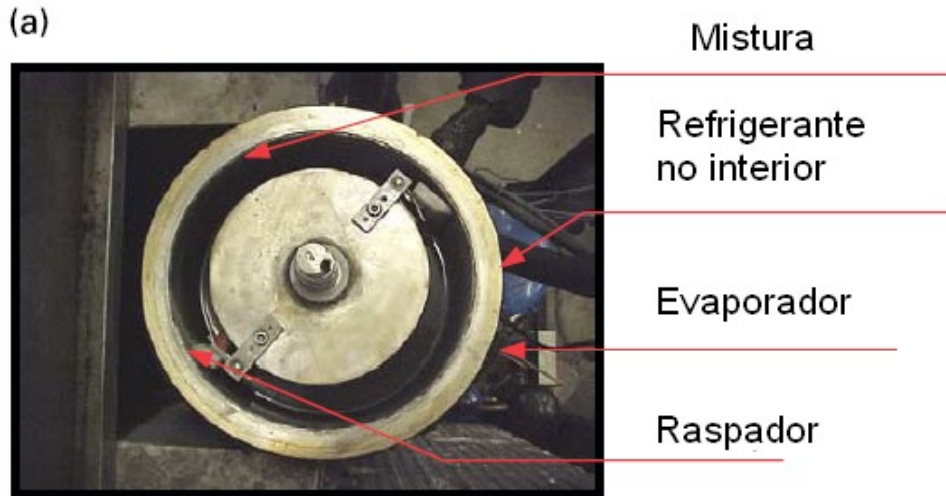
Ice slurry (pasta de gelo)

Aplicações

- Engenharia de Alimentos e Processos



Gerador de Pasta de Gelo

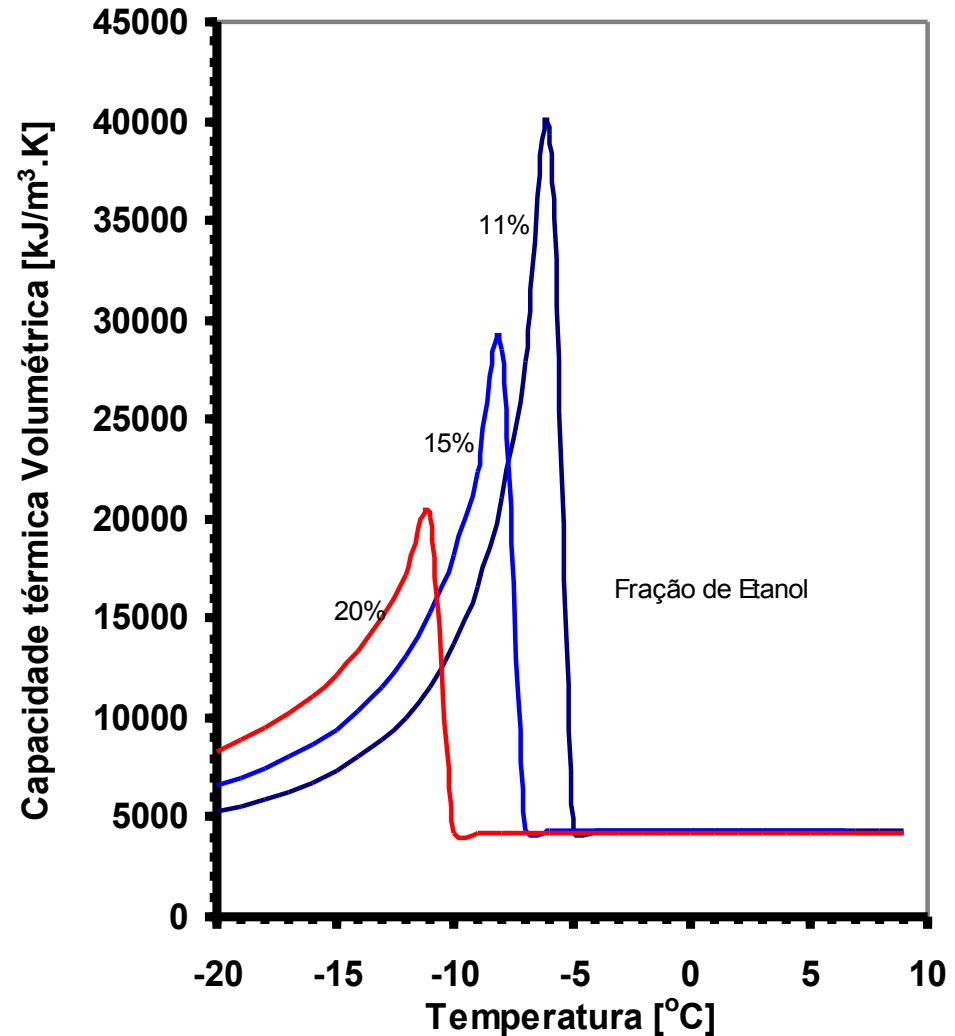


Fontes: Egolf e Kauffeld, 2005
Ticona, 2007



Capacidade Térmica Volumétrica

$$\dot{Q} = (\rho \cdot c_p) \dot{V} \Delta T$$



Pasta de Gelo X Fluido Monofásico Secundário

Característica	Fluido Secundário Monofásico Tradicional	Pasta de Gelo
Capacidade Térmica Volumétrica	1	8
Diâmetro da Tubulação	1	0,5
Consumo da bomba de circulação	1	1/8
Coefficiente de película nos trocadores de calor	1	1,5 - 2

Fonte: Egolf e Kauffeld, 2005



PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Conclusão

Comparação de Custos

Fonte: Ballot-Miguet et al (França), 2008

A: menor custo; D: maior custo

Tipo de Planta	Custo de Investimento	Custo Operacional
R-22 Expansão Direta	A	A
Pasta de Gelo como Fluido Secundário (-35°C)	D	B
Fluido Secundário Monofásico	B	A
CO₂ Bifásico como Fluido Secundário	C	A

FLUIDOS SECUNDÁRIOS - Conclusões

- Diminuição da carga de refrigerante
 - Menor impacto ambiental
 - Maior segurança para o uso de refrigerantes naturais inflamáveis
- Maior consumo de energia (30%↓)
- Maior custo inicial (30%)
- Há um grande potencial de desenvolvimento

Fontes:
Kruse, 2000
Kazachki e Hinde, 2006



PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Bibliografia

Bibliografia

- Pruzaesky, F.C., Ticona, E.M., Braga, S.L., Parise, J.A.R., Pasta de gelo e nanofluidos em sistemas de refrigeração, *Climatização e Refrigeração*, pp. 47-60, agosto 2008.
- ASHRAE, ASHRAE Handbook – Refrigeration, 2006.
- Melinder, Å., Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants, Tables and diagrams for the refrigeration industry, International Institute of Refrigeration, Paris, 1997.
- Hinde, D., Zha, S., Lan, L., Carbon dioxide in North American supermarkets, *ASHRAE Journal*, pp. 18-26, February 2009.
- Ticona, E.M., Determinação experimental das características de transferência de calor de um gerador de pasta de gelo, Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2007.
- Egolf, P.W., Kaufeld, M., From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications, *International Journal of Refrigeration*, vol 28, pp. 4-12, Jan 2005.
- Kruse, H., Refrigerant use in Europe, *ASHRAE Journal*, pp. 16-24, September 2000.
- Zyhowski, G.J., Spatz, M.W., Yana Motta, S.F., An Overview of the properties and applications of HFC-245fa, International Purdue Refrigeration Conference, Purdue University, West Lafayette, EUA, paper R7-1, July 2002.
- Melinder, Å, General properties and characteristics of aqueous solutions used in indirect systems, 8th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Copenhagen, Dinamarca, 2008.
- Ballot-Miguet, B., Lafargue, A., Rached, W., Ice slurry at -35°C :Energy efficiency and comparison with other refrigerating systems, 8th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Copenhagen, Dinamarca, 2008
- Melinder, Å, Choice of liquid secondary refrigerant as we enter the 3rd millenium, 20th International Congress of refrigeration, IIR/IIF, Sydney, Australia, 1999.



PONTIFÍCIA
UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Obrigado

parise@puc-rio.br