

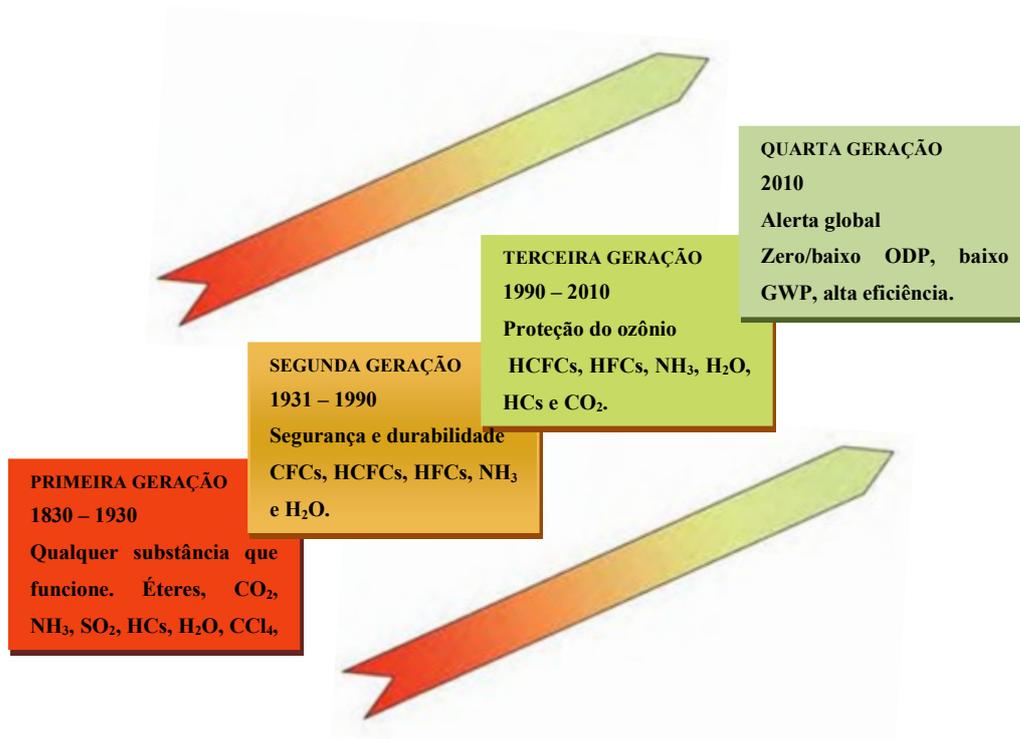
# 1 Introdução

O presente trabalho trata da simulação de trocadores de calor de placas soldadas (BPHE - *Brazed Plate Heat Exchangers*) aplicados a um ciclo de refrigeração comercial em cascata. O modelo adota uma análise local, onde o trocador é dividido em pequenos volumes de controle, para os quais as equações de troca de calor e conservação de massa e de energia são aplicadas. O modelo é aplicado para o condensador, evaporador e trocador intermediário do ciclo em cascata. Para a modelagem foi investigada uma série de correlações empíricas para o cálculo do coeficiente de transferência de calor e fator de atrito do lado do refrigerante. Um programa em FORTRAN foi desenvolvido e os resultados deste modelo matemático foram comparados com dados experimentais existentes na literatura.

## 1.1. A questão ambiental

Na atualidade, a maioria dos refrigerantes usados na indústria não são favoráveis ao meio ambiente. Assim, tem-se, ao longo da história, os clorofluorcarbonos (CFCs), e os hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), que contêm cloro que ocasionam a destruição do ozônio na estratosfera. Para atender a esta questão, os hidrofluorcarbonos (HFCs) substituem os CFCs (como o R12) e HCFCs (R22). O aquecimento global, a segurança de inflamabilidade e a ecotoxicidade são as questões relacionadas aos HFCs. Além disso, do ponto de vista ambiental, é fundamental aliviar e controlar as emissões de HFCs (Tsai e Tien, 2005). O Protocolo de Kyoto (no Japão em 1997) estabeleceu metas para reduzir a produção e emissão de gases de efeito estufa (GHG – *Greenhouse Gas*) até 2010. Também, conforme o Protocolo de Montreal, 1986, uma virtual eliminação de HFCs está programada para o ano 2020 (Berends et al., 1999).

Na Figura 1 mostra-se um resumo da evolução dos refrigerantes com os anos e as gerações existentes até 2010, descrevendo as principais preocupações em cada uma delas (Calm, 2008).



**Figura 1 Breve história e evolução dos refrigerantes ao longo dos anos (Calm, 2008).**

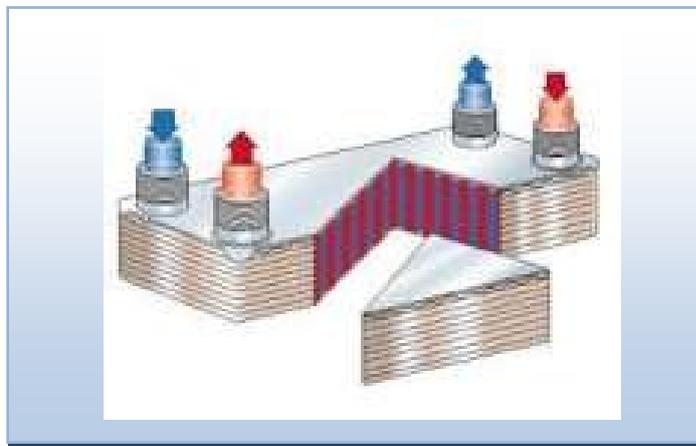
O perigo da destruição da camada de ozônio, o aquecimento global e a possível mudança climática global como consequência das emissões de CO<sub>2</sub> e mais cinco gases de efeito estufa despertou o interesse pela utilização de fluidos refrigerantes naturais e novos refrigerantes sintéticos na indústria de refrigeração e de condicionamento de ar. Tal situação tem atraído a atenção de muitos pesquisadores para o desenvolvimento de novos refrigerantes e sistemas a eles associados que possam competir e substituir os refrigerantes atualmente utilizados, por exemplo, o R134a. Fabricantes, para cumprir com o limite de GWP = 150 como a HONEYWELL INC.(2006); DuPont (2006) e INEOS Fluor (2007), (Calm, 2008; Zhang et. al., 2010), têm desenvolvido estes refrigerantes. Uma alternativa para os refrigerantes CFCs e HCFCs é a utilização de hidrocarbonetos (HCs) como refrigerantes, tendo como vantagem importante que atendem ao requisito de potencial de destruição da camada de ozônio zero e também possuem potencial de aquecimento global (GWP) reduzido. A desvantagem dos HCs é o fato de serem inflamáveis. Também, como alternativa, encontra-se o CO<sub>2</sub> que apresenta diversas vantagens sobre os refrigerantes convencionais nos sistemas de refrigeração como baixa energia de bombeamento, maior eficiência em trocadores de calor (Halder e Sarkar, 2001).

Além disso, possui ODP igual a zero e um GWP reduzido. Por outro lado, como desvantagens tem-se a elevada pressão de trabalho, que implica maiores exigências de segurança no sistema e sua toxicidade em concentrações elevadas.

## 1.2. Trocadores de calor de placas

Os trocadores de calor a placas (PHEs – Plate Heat Exchangers) foram explorados comercialmente a partir do ano 1920, com o Dr. Richard Seligman (APV International, Inglaterra), em uma primeira operação de pasteurização. Uma década mais tarde, Bergedorfer Eisenwerk da Alfa Laval na Suécia desenvolveu um PHE comercial similar para ser utilizado como aquecedor de solução (Wang et al., 2007)

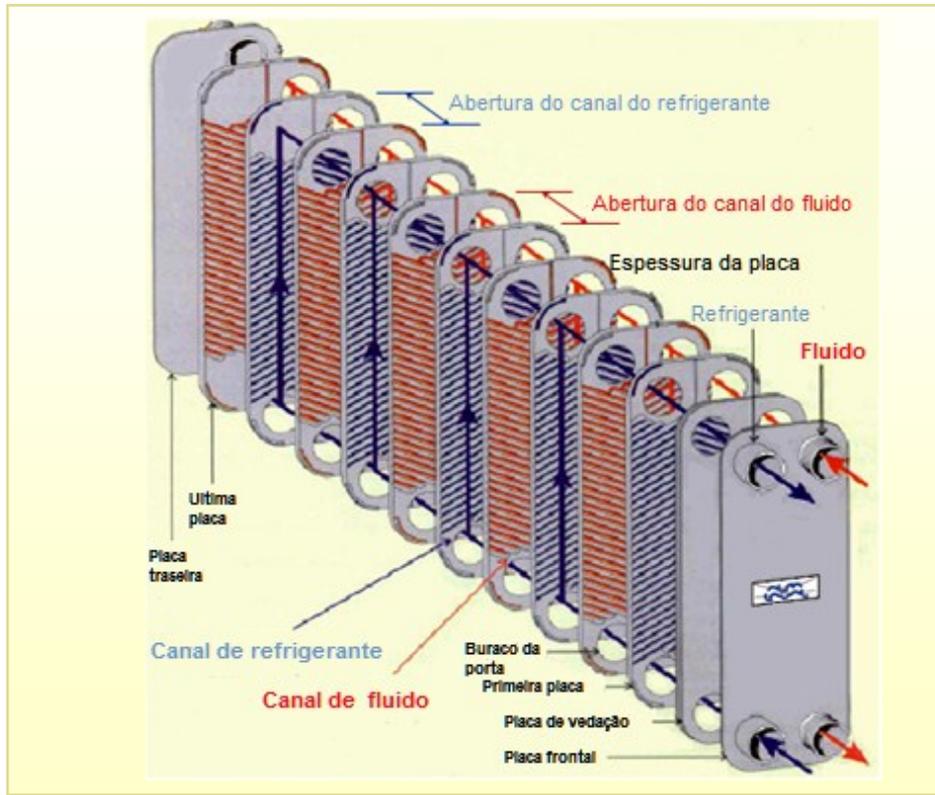
Na Figura 2 mostra esquematicamente o típico trocador de calor a placas soldadas (BPHEs). Foram introduzidos na década de 1970 oferecendo um novo processo de fabricação de soldar as placas juntas ao invés de usar juntas, parafusos e carregamento de barras. Esta nova tecnologia abriu as possibilidades de se utilizar refrigerantes que requerem altas pressões de operação.



**Figura 2** Típico trocador de calor de placas brazadas (Wang et al. 2007)

A Figura 3 apresenta os parâmetros físicos de um típico BPHE. Estes parâmetros são: os canais para ambos os fluidos, abertura o espaço médio do canal ( $b_{plate}$ ), as tampas do trocador (frontal e traseira), espessura da placa ( $t_{plate}$ ), diâmetro da porta ( $D_{porta}$ ) e a placa de vedação. Pode-se também observar o princípio de funcionamento que consta de dois circuitos de

refrigerantes quente e frio, que escoam em canais alternados entre as placas onduladas. Assim, a transferência de calor ocorre a partir do fluido quente, através da placa de separação, para o fluido frio em um arranjo em contracorrente.



**Figura 3 Parâmetros físicos e princípio de funcionamento de um BPHE (Stenhede, 2001)**

Os trocadores de calor de placas são amplamente utilizados em uma variedade de aplicações industriais. Por causa de várias das suas características são mais adequados que outros tipos de trocadores de calor. Geralmente, eles são caracterizados por possuir maiores coeficientes de transferência de calor que os convencionais trocadores de calor de casco e tubos, isto devido às ondulações da superfície da placa que promovem a troca de calor incrementado por meio de vários mecanismos, em particular o turbilhonamento dos escoamentos. Os PHEs possuem um tamanho muito menor devido ao alto coeficiente de troca de calor. Para a mesma área efetiva de troca de calor, o peso e o volume são apenas cerca de 30% e 20%, respectivamente, do trocador de calor de casco e tubos. Outras particularidades como, por exemplo, o fato de serem mais leves, permitem flexibilidade no desenho, apresentarem eficiência

térmica elevada, portanto, adequados para economizar energia e espaço (Wang et al., 2007; Kakaç e Liu, 2002). Menor volume significa menor carga de refrigerante e, conseqüentemente, menor impacto ambiental direto.

### 1.3. Sistemas de refrigeração em cascata

Sistemas em cascata são sistemas de refrigeração combinados utilizados em instalações de resfriamento industriais em aplicações que requerem temperaturas muito baixas ou em aplicações de resfriamento rápido. Sistemas de refrigeração em cascata são obtidos com a operação combinada de dois circuitos interligados, ou seja, o evaporador do circuito de alta temperatura serve como meio de condensação do circuito de baixa temperatura (Dossat, 1961)

Em um sistema de refrigeração em cascata, o circuito de baixa temperatura pode utilizar um refrigerante de alta pressão fornecendo uma refrigeração a baixa temperatura com uma moderada pressão de evaporação. Por outro lado o circuito de alta temperatura pode utilizar um refrigerante a baixa pressão que rejeita calor a uma temperatura alta de condensação. Neste tipo de sistema de refrigeração as temperaturas de operação variam entre  $-70^{\circ}\text{C}$  e  $100^{\circ}\text{C}$  (Dincer, 2003).

Na Figura 4 observa-se o esquema um sistema de refrigeração em cascata termodinâmico. O circuito de alta temperatura rejeita o calor ao ambiente e utiliza o trocador de calor em cascata como o evaporador do sistema. O circuito de baixa temperatura produz o resfriamento a baixa temperatura no evaporador e utiliza o trocador em cascata como condensador.

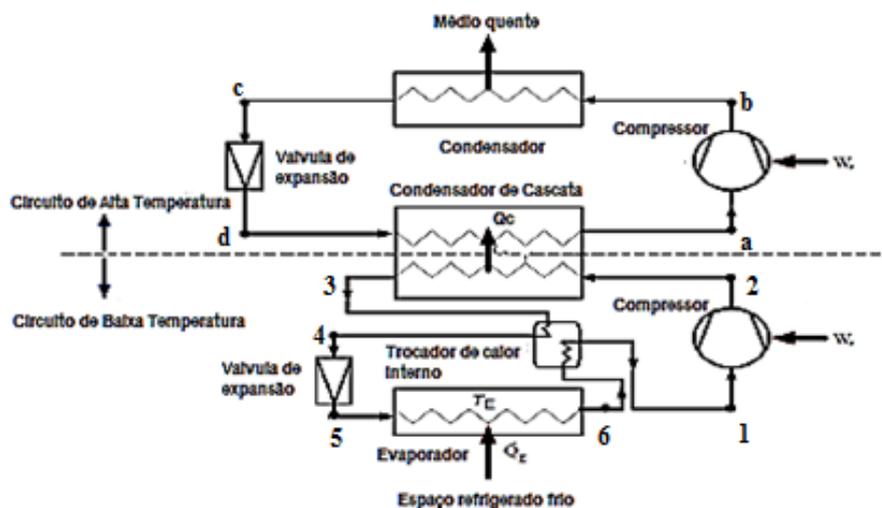
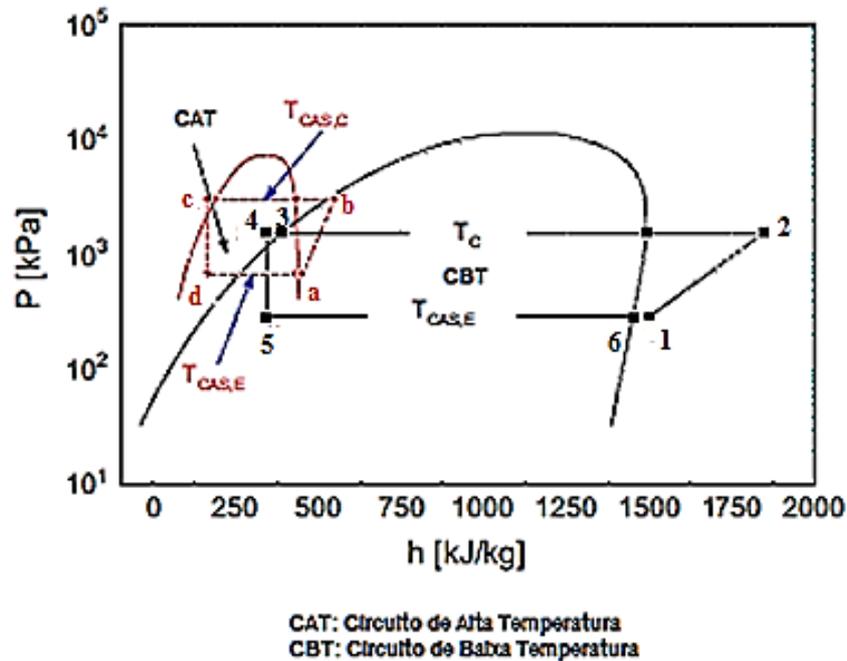


Figura 4 Esquema do sistema de refrigeração em cascata. (Bayrakci, 2010)

A Figura 5. Mostra-se a representação no diagrama P – h do sistema em cascata.



**Figura 5 Diagrama P – h para um sistema de refrigeração em cascata teórico. (Lee et al. 2006)**

#### 1.4. Justificativa

Atualmente já existem trabalhos na literatura relacionados a sistemas de refrigeração em cascata, os quais disponibilizam opções para a otimização do sistema. Por outro lado, são poucos os trabalhos que se preocupam pelo consumo e a eficiência energética do sistema visando as novas arquiteturas, novos equipamentos e o impacto direto e indireto dos refrigerantes (Pioggi, 2009).

Na refrigeração comercial as novas arquiteturas de sistemas como o sistema com fluido secundário e o sistema em cascata requerem menores quantidades de carga de refrigerante, assim, como os equipamentos compactos reduzem consideravelmente a carga específica do refrigerante (Pioggi, 2009). As características de compacidade, menor área, e coeficientes de troca de calor mais elevados, são encontrados nos trocadores de calor de placas em escala muito maior que o tradicional trocador de casco e tubos.

Quanto ao impacto ambiental dos atuais e futuros refrigerantes, a emissão dos CFCs está praticamente resolvida. No entanto, há a questão do CO<sub>2</sub> e

outros cinco gases que causam o efeito estufa (metano, óxido nitroso, hexafluoreto de enxofre, HFCs e perfluorocarbonatos), responsáveis pela possível mudança climática global. Soma-se a isto a preocupação dos fabricantes de refrigerantes em oferecer novos fluidos de trabalho com baixos valores de ODP e GWP. Com o objetivo de manter e cumprir as exigências dos protocolos de Montreal e Kyoto surge como resposta o uso de refrigerantes alternativos que possam ser utilizados e ter um menor impacto ambiental, entre os quais se podem citar: os naturais, HCs e CO<sub>2</sub>, e os sintéticos, os novos refrigerantes hidrofluoro - oleofinas tais como o HFO-1234yf e o HFO – 1234ze. (Calm, 2008).

Pelo acima exposto, surge a ideia de se modelar trocadores de calor de placas empregados em um sistema de refrigeração em cascata (condensador, condensador de cascata e evaporador) como um primeiro e importante estágio da simulação do ciclo como um todo. Resulta também importante, a avaliação de novos refrigerantes visando à redução do impacto ambiental, e sua influência no desempenho do componente.

### **1.5. Objetivo do trabalho**

A finalidade do presente trabalho é desenvolver modelos de simulação da operação em regime permanente de trocadores de calor a placas brazadas (BPHE), associados a um sistema de refrigeração por compressão de vapor em cascata (condensador, condensador de cascata e evaporador), utilizando diferentes refrigerantes, incluindo os alternativos. Os modelos elaborados no presente estudo adotaram método de análise local para a determinação dos coeficientes de transferência de calor e fator de atrito

Os modelos serão validados por meio da comparação com dados experimentais existentes na literatura.

## **1.6. Conteúdo do trabalho**

No segundo capítulo é apresentada, entre trabalhos numéricos e experimentais, extensa revisão bibliográfica para trocadores de calor do tipo placas.

No terceiro capítulo apresentam-se os modelos matemáticos para a caracterização dos trocadores de calor, assim como as correlações para a determinação dos valores locais de coeficiente de troca de calor e fator de atrito.

No quarto capítulo apresenta-se a solução numérica do modelo proposto, mediante a utilização da plataforma computacional FORTRAN. O algoritmo do programa também é apresentado.

No quinto capítulo, apresenta-se a validação dos modelos, com a comparação dos resultados obtidos pelo programa com os dados experimentais fornecidos pela NIST.

O presente trabalho encerra-se com as conclusões e expectativas quanto aos resultados, assim como com as sugestões para trabalhos futuros, dispostas no sexto capítulo.