

1 Introdução

A principal importância de um sistema de condicionador de ar automotivo reside no conforto e, indiretamente, na segurança que proporciona aos ocupantes do veículo. Acompanhando a evolução automotiva, o sistema de ar condicionado tem que se tornar mais eficiente e seguro. Novos equipamentos integram opções de resfriamento, aquecimento e controle de umidade, de forma computarizada. Na atualidade, sistemas condicionadores de ar eficientes são considerados primordiais para os consumidores de novos veículos. Uma característica do condicionador de ar automotivo é que opera com uma variação de carga térmica considerável, a qual depende da hora do dia, do regime de utilização e da quantidade de passageiros no veículo, operando, ainda, com a contínua variação de velocidade angular do compressor.

Outro fator importante nesta evolução tecnológica é também a preocupação, tanto dos fabricantes quanto dos consumidores, pela conservação do meio ambiente. Novos refrigerantes têm sido desenvolvidos por empresas como a HONEYWELL INC. para aumentar a eficiência dos sistemas de refrigeração e diminuir seu potencial de destruição da camada de ozônio, assim como a contribuição dos mesmos ao aquecimento global. Novos refrigerantes, como os fluidos H e 1234yf, constituem uma possível alternativa para a substituição do refrigerante HFC-134a, largamente empregado em sistemas de condicionamento de ar automotivos

Tendo em vista a carga de refrigerante em um sistema de condicionamento de ar automotivo e a preocupação com a conservação do meio ambiente, modelos computacionais estão sendo utilizados para testar novos tipos de fluidos alternativos àqueles a base de flúor. Desde a assinatura do Protocolo de Montreal, todas as vinte e três nações signatárias do protocolo se comprometeram com a preservação da camada de ozônio, limitando o uso e a produção de substâncias

que comprometam sua integridade. Dentre essas substâncias estão os clorofluorcarbonetos, os CFCs, compostos de cloro, flúor e carbono. Esses gases foram amplamente usados na indústria por décadas, devido à sua estabilidade química, não-flamabilidade, sua baixa toxicidade e boas características termodinâmicas.

Os refrigerantes hidrofluorcarbonados (HFCs) foram desenvolvidos nos anos 80 e 90 como alternativa aos CFCs (R12) e HCFCs (R22). HFCs como o R134a não contêm cloro e, desta forma, não destroem a camada de ozônio, mas contribuem para o processo de aquecimento global, sendo considerados gases de efeito estufa que fazem parte da "cesta de seis gases" cujas emissões devem ser reduzidas, de acordo com o Protocolo de Kyoto (Japão, 1997). Estes gases são: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nítrico (N_2O), hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorcarbonetos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF_6). Pelo Protocolo de Kyoto as emissões individuais dos gases de efeito estufa serão integradas como emissões equivalentes de CO_2 utilizando seus potenciais de aquecimento global GWP (Global Warming Potential). As tabelas 1.1 e 1.2 mostram a classificação dos refrigerantes de acordo com sua composição e aplicação.

A indústria de refrigeração, a partir da assinatura do protocolo de Montreal, tem procurando substitutos para os refrigerantes CFCs e HCFCs. Uma alternativa é a utilização de hidrocarbonetos (HCs) como refrigerante. Os HCs são compostos químicos constituídos apenas por átomos de carbono e hidrogênio. Os estudos dedicados aos HCs são, em grande parte, devido às pressões exercidas por organizações ambientalistas e por trabalhos de pesquisa e avaliação de alternativas conduzidas por instituições acadêmicas. Uma importante vantagem dos HCs é que eles atendem no requisito de potencial de destruição de ozônio zero e também têm potencial de aquecimento global (GWP) muito baixo, sendo substâncias encontradas abundantemente na natureza o que coopera para sua compatibilidade com o meio ambiente global. A principal desvantagem dos HCs é o fato de serem inflamáveis.

Outra alternativa é a utilização de misturas de refrigerantes. As combinações de refrigerantes oferecem otimização das áreas de troca térmica e conduzem a um maior COP (coefficient of performance) do ciclo de refrigeração. Estas alternativas foram desenvolvidas visando obter um refrigerante cujas pressões e temperaturas fossem bastante próximas às dos refrigerantes usados atualmente. Adicionalmente, as atuais misturas ainda apresentam alto GWP.

Os sistemas condicionadores de ar de veículos, comumente referidos como "mobile air conditioning, MACs", antes de 1995 usavam como refrigerante o CFC-12. Depois do protocolo de Montreal este refrigerante foi substituído pelo HFC-134a. Na atualidade vêm-se desenvolvendo novos refrigerantes que possam competir e substituir o HFC-134a, porém, com menor GWP. Empresas como a HONEYWELL INC., Dupont, Delphi, entre outras, encontram-se desenvolvendo estes refrigerantes. Alguns trabalhos podem ser mencionados para demonstrar o esforço que se tem feito para encontrar fluidos refrigerantes de baixo impacto ambiental, Spatz, M. W. e Ninor (2008), Spatz, M. W. (2006-2007), HONEYWELL INC. Refrigerants Applications Laboratory (2007).

Segundo Lorentzen e Pettersen (1992), o dióxido de carbono CO₂ oferece uma completa solução para os problemas ambientais em várias áreas da refrigeração. Os resultados dos testes experimentais, realizados pelos autores em uma bancada de ar condicionado automotivo, mostraram que o COP do sistema abastecido com CO₂ era igual, ou ligeiramente maior, que o do sistema padrão à base de CFC12.

Ghodbane (1999) avaliou experimentalmente o uso do R152a e os hidrocarbonetos R290, RC270 e R600a como potenciais substitutos para o R134a em condicionamento de ar automotivo. Também avaliou o uso de um segundo circuito no sistema para esses refrigerantes. Os resultados mostram que o R-152a pode fornecer uma solução ambiental e econômica.

Liu et al. (2005) utilizaram o CO₂ em um estudo experimental no condicionamento de ar automotivo. Um protótipo foi projetado e construído. Foram utilizados os seguintes componentes: um evaporador de tubo aletado, um

compressor tipo swash-plate e uma válvula manual de expansão. Foram avaliadas distintas condições de operação e variáveis como vazão mássica de ar e refrigerante, consumo de energia do compressor entre outras.

Modelos matemáticos de simulação de sistemas condicionadores de ar automotivo tornaram-se ferramentas importantes para o acompanhamento das inovações tecnológicas das últimas décadas. Modelos de simulação devem ser capazes de avaliar distintas condições de operação com distintos refrigerantes, reduzindo desta forma custos dos testes e tempo global do projeto.

Tabela 1.1 – Classificação dos fluidos refrigerantes.

Tipo de Fluidos Refrigerantes		
CFC	HCFC	HFC
R-11	R-22	R-23
R-12	R-123	R-134a
R-13	R-124	R-404A
R-113	R-401A	R-407A
R-114	R-401B	R-407B
R-500	R-402A	R-407C
R-502	R-402B	R-410A
R-503	R-403B	R-507
	R-406A	
	R-408A	
	R-409A	

Tabela 1.2 – Substituição de fluidos refrigerantes (CETESB, 2001).

Substância a ser Substituída	Substância alternativa	Aplicação
CFC-11	HCFC-123	Ar condicionado-centrífugas (equipamentos novos e retrofit).
CFC-12	HFC-134a	Ar condicionado automotivo, refrigeradores domésticos e comerciais, centrífugas e outros usos de temperatura de evaporação média.
	R-401A	Retrofit para refrigeração comercial/doméstica. Melhor desempenho para temperaturas de evaporação acima de -23°C .
	R-401B	Retrofit para refrigeração comercial/doméstica. Melhor desempenho para temperaturas de evaporação acima de -23°C .
	R-409A	Retrofit para refrigeração comercial/doméstica. retrofit para transporte refrigerado. Melhor desempenho para temperaturas de evaporação abaixo de -23°C .
R-13/R-503	R-508B	Equipamentos de temperaturas extremamente baixas (VLT), sistemas em cascata (equipamentos novos e retrofit).
CFC-114	HCFC-123	Ar condicionado e centrífugas de navios e outros usos com alta temperatura de condensação.
	HCFC-124	Ar condicionado –chiller centrífugo
R-502	R-402a	Substitui R502 em aplicações onde baixa temperatura de descarga for crítica.
	R-408a	Refrigeração comercial/doméstica. Substitui R-502 em sistemas mais antigos.

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de simulação para um evaporador automotivo tipo placas (Brazeed Laminated Plate), operando em regime permanente. Diferentes condições de entrada do refrigerante e do ar foram testadas, parâmetros como a queda de pressão, tanto para o ar quanto para o refrigerante, transferência de calor com mudança de fase (evaporação), condensação de água referente à umidade do ar na superfície das placas e aletas, dentre outros são considerados. Para isto foi utilizado um programa computacional desenvolvido em FORTRAN, o qual também recorre a sub-rotinas para o cálculo das propriedades dos fluidos, desenvolvidas pela National Institute of Standards and Technology (NIST) e American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) para diferentes tipos de refrigerantes (sustâncias puras e misturas) e para o ar, respectivamente.

Os resultados da simulação numérica foram validados por meio da comparação com dados de operação reais, fornecidos pela HONEYWELL INC.

1.2 Descrição do evaporador automotivo tipo placas

O evaporador é um componente fundamental nos sistemas de ar condicionado automotivo. Este trocador de calor é o responsável pela remoção da carga térmica da cabina do veículo. O fluido refrigerante chega ao evaporador em condições de baixa pressão e temperatura (na forma de uma mistura de líquido e vapor) e o ar escoar em fluxo cruzado atravessando o trocador de calor. Como o fluido refrigerante se encontra a uma temperatura mais baixa que a do ar, o refrigerante absorve calor do ar e muda da fase líquida para vapor, primeiramente, passando depois a vapor superaquecido. O ar, por sua vez, cede calor ao refrigerante e, com isso, caem a temperatura e umidade absoluta do mesmo. As figuras 1.1 e 1.2 mostram a distribuição dos componentes de um sistema de refrigeração automotivo e o ciclo real de compressão de vapor para este tipo de

sistema. Na figura 1.1 o evaporador apresentado é do tipo tradicional, de tubos e aletas planas.

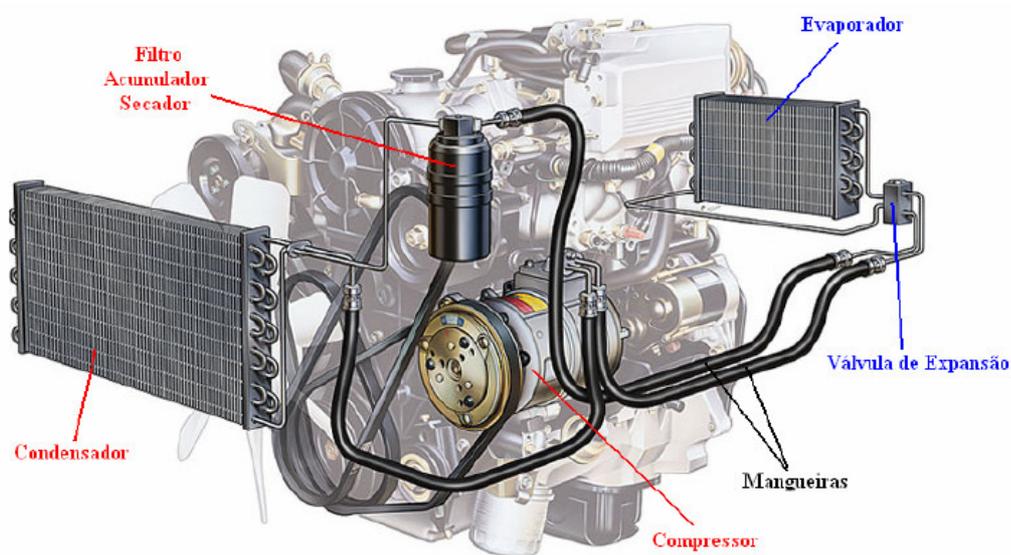


Figura 1.1 – Sistema de condicionador de ar automotivo (Hulsey, 2004).

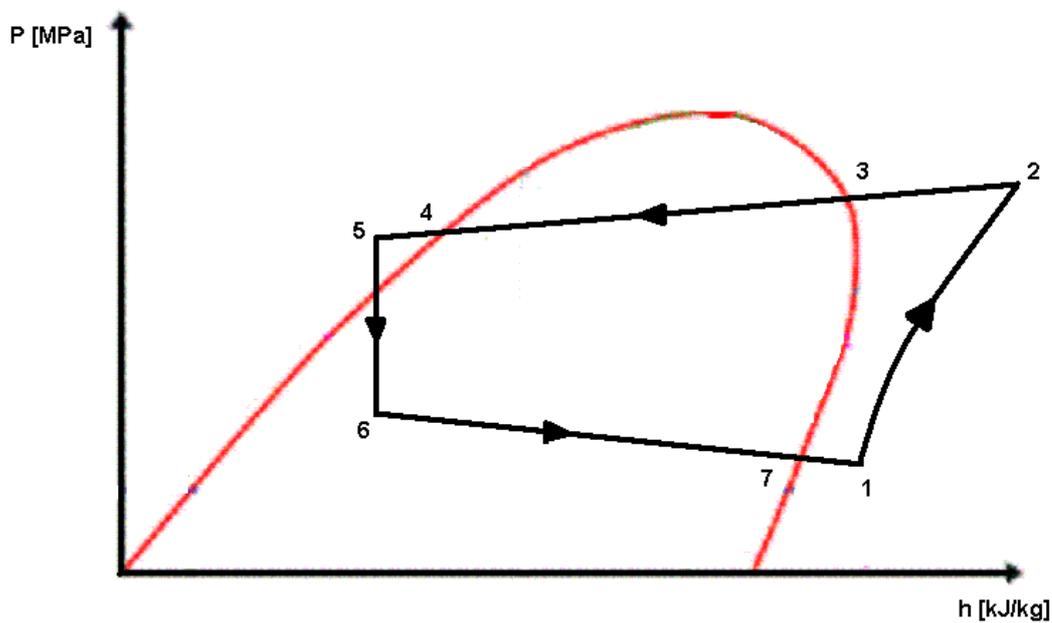


Figura 1.2 – Diagrama Pressão – Entalpia do ciclo real do sistema de refrigeração por compressão de vapor.

O evaporador automotivo tipo placa apresenta um grau complexidade maior, comparado a outros tipos de trocadores de calor, na distribuição do refrigerante e sua geometria. As figuras 1.3, 1.4 e 1.5 mostram os elementos do

evaporador tipo placa. Este tipo de trocador de calor compõe-se dos seguintes elementos:

Distribuidor do refrigerante (Header): este componente tem a função de distribuir o fluido refrigerante pelas placas onde realizar-se-á troca de calor com o meio externo, neste caso o ar.

Placas (Plates): este componente é feito de duas placas de alumínio brasadas, as quais formam canais por onde o refrigerante escoar. Estes canais podem ter ângulos de inclinação com respeito ao fluxo principal de refrigerante. Os diferentes ângulos de inclinação dos canais têm o efeito de gerar turbulência no escoamento de refrigerante e melhorar a transferência de calor entre os fluidos.

Tanque: é composto por um conjunto de placas e aletas.

Aletas: estas aletas, no lado do ar, são do tipo persiana (multi-louver). As aletas deste tipo melhoram a transferência de calor, incrementando a área, e induzindo certo grau de turbulência no fluxo de ar. São altamente eficientes e podem ser fabricadas de forma rápida e a baixo custo.

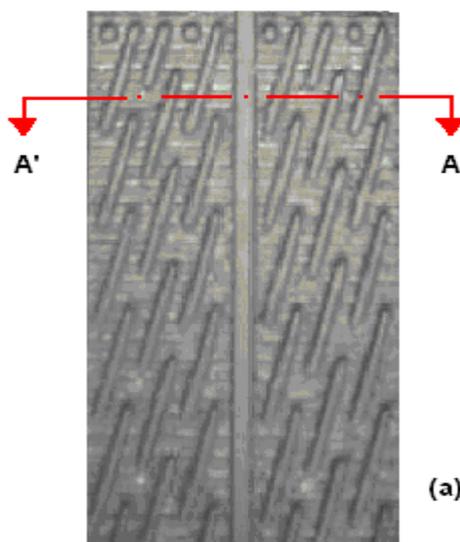
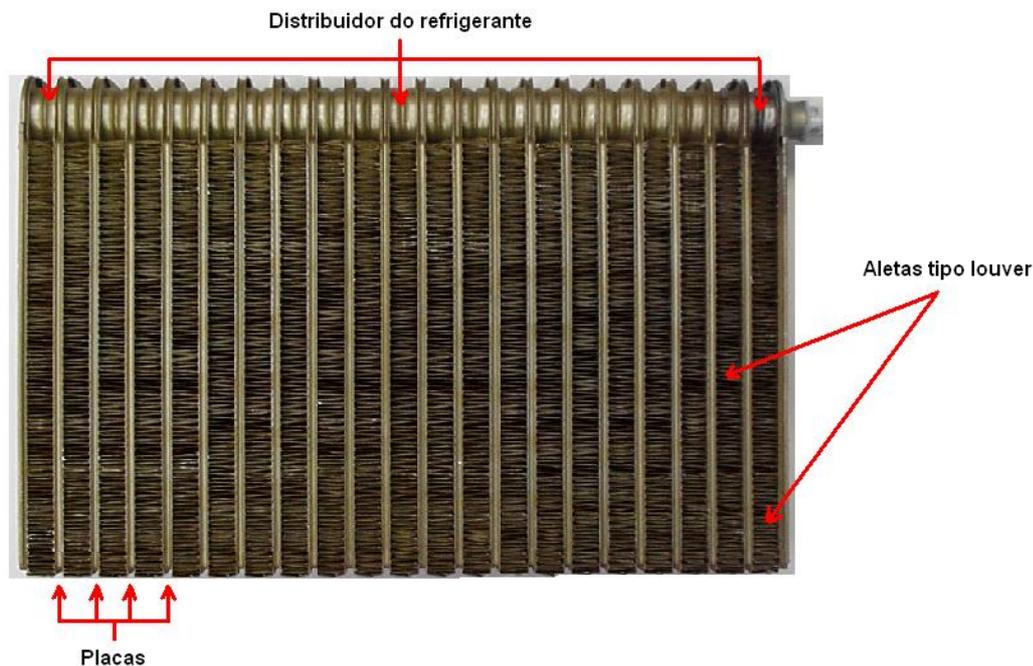


Figura 1.3 – (a) Vista de uma placa do evaporador e sua seção transversal com os canais. (b) Corte A'-A'



Figuras 1.4 – Componentes do evaporador automotivo tipo placas (Brazed Laminated Plate - HONEYWELL INC. 2008).

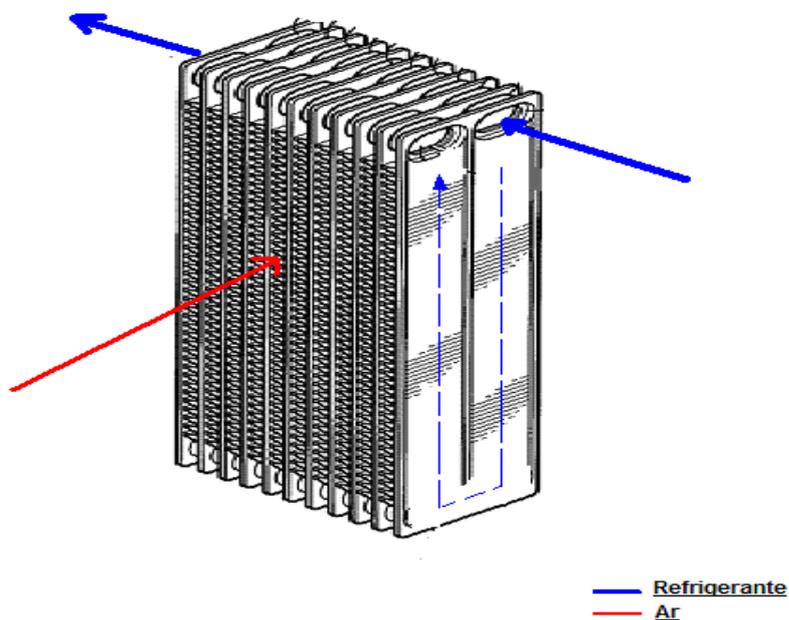


Figura 1.5 – Um tanque com um conjunto de placas do evaporador.

A figura 1.5 mostra os trajetos principais percorridos pelo refrigerante e pelo ar. As figuras 1.6 e 1.7 mostram fotos frontais, superior e inferior do evaporador e a figura 1.8, detalhe da passagem interna do refrigerante no distribuidor.

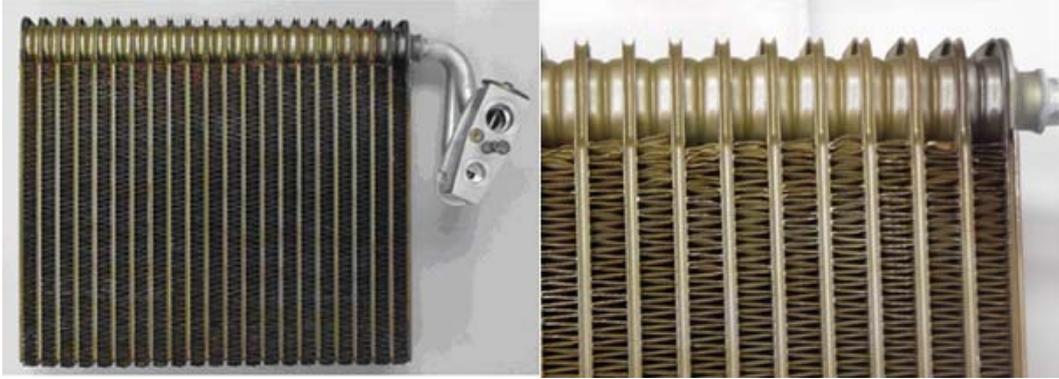


Figura 1.6 – Vista frontal do evaporador tipo placa (Brazed Laminate Plate).

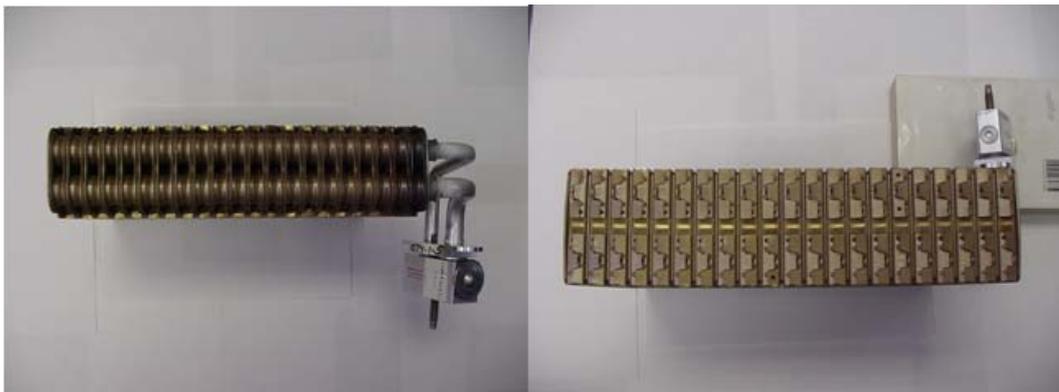


Figura 1.7 – Vista superior e inferior do evaporador tipo placa (Brazed Laminate Plate).

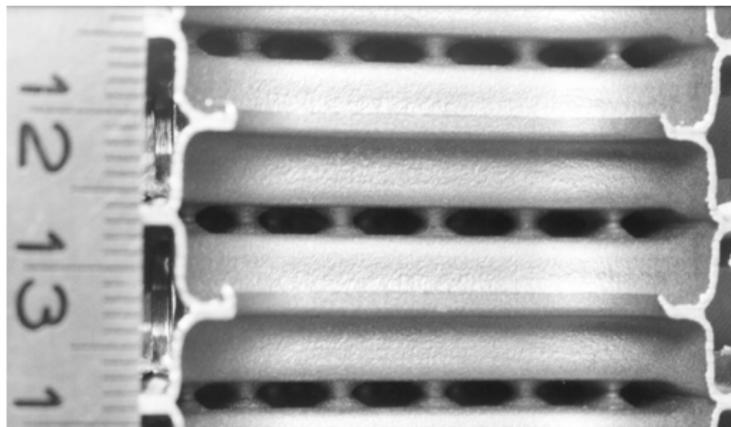


Figura 1.8 – Geometria da passagem interna do refrigerante no distribuidor.

1.3

Revisão Bibliográfica

A simulação de um evaporador pode ser dividida em três categorias, dependendo dos volumes de controle utilizados para a descrição do trocador de calor, a saber:

- **Modelo de parâmetros concentrados:** o balanço de energia e as equações de transferência de calor são aplicados a um único volume de controle. Descrições de modelos simplificados podem ser encontradas, por exemplo, do Braun (2004) ou Parise (2007).

- **Métodos de multi-zona:** o método leva em conta as diferentes características das zonas do evaporador, que são: superaquecimento e bifásica, no lado do refrigerante e, para o lado do ar, as condições de superfície seca e molhada (Braun,2004).

- **Modelo de análise local ou nodal:** o trocador de calor é dividido em um número de elementos formando uma matriz onde cada elemento é analisado como um trocador de calor básico. Alguns modelos locais para evaporadores a ar foram desenvolvidos nas últimas três décadas. Pode-se mencionar: Domanski e Didion (1983), Bensafi et al (1997), Liang et al (2001), Bansal e Chin (2003), Domanski (2003), Jiang (2003) e Shen et al (2006).

Na literatura disponível existe um número limitado de trabalhos referidos à simulação do evaporador automotivo de placas. Observa-se, também, certa discordância na denominação destes evaporadores. Alguns autores desenvolveram estudos considerando-o como um evaporador de micro canais, aplicando para isto as correlações que descrevem este tipo de evaporadores, Webb (2002) e Lee (1999). No presente trabalho o evaporador é estudado considerando-o um trocador de calor de tipo placas e as correlações de troca de calor e queda de pressão são específicas para canais formados por estas placas.

Lee, K. e Jong-Pil (1999) desenvolveram uma simulação do evaporador automotivo tipo placas com refrigerante R134a. Apresentam uma descrição detalhada da geometria do evaporador utilizando o conceito de tanques e placas. É considerada a mudança de fase do refrigerante, utilizando para tal a correlação de Gungor e Winterton (1987) para o coeficiente de transferência de calor. A queda de pressão total considera os termos devido ao atrito, variação de momentum e gravidade. No lado do ar utilizam as correlações empíricas de Myers (1967) e de Hiller (1979) (ar úmido) para o cálculo do coeficiente de transferência de calor. O programa de simulação é capaz de prever a capacidade térmica, temperatura do ar na saída do evaporador e a queda de pressão nos lados do refrigerante e do ar.

Lee e Yoo (2000) apresentam uma simulação de um sistema de ar condicionado automotivo. Eles simulam cada um dos componentes i.e., condensador, compressor, válvula de expansão e evaporador do tipo placas. Neste último componente apresentam um esquema matemático muito geral, o qual não descreve em detalhe o processo de troca de calor.

Gursaran (2000) executou um estudo térmico e hidrodinâmico do evaporador tipo placa com o refrigerante R134a. Utilizou correlações da literatura para prever a transferência de calor para a fase de vapor (Sieder and Tate, 1936) e bifásica (Rohsenow and Harnett, 1973). No que diz respeito à queda de pressão, o autor considera as perdas de pressão causadas pelo atrito, variação de momentum e gravidade. Foi desenvolvido um programa de simulação que prevê a capacidade térmica, a temperatura do refrigerante na saída do evaporador e a queda de pressão do refrigerante. O conceito usado no estudo do evaporador foi o de análise local, dividindo-o em pequenos elementos de troca de calor e considerando cada elemento como um trocador de calor independente e interligado.

O estudo de Corberán et al (2002), que também trata de simulação de evaporadores tipo placas, não é muito detalhado. Os autores apresentam um modelo geral de sua solução e mostram resultados comparando os valores medidos e calculados da capacidade do evaporador e das temperaturas de saída do refrigerante.

Webb (2002) mostra um estudo relativamente completo da simulação de um evaporador tipo placas, descrevendo todo o processo de cálculo dos coeficientes de troca de calor do lado do ar e do refrigerante e da queda de pressão dos fluidos. Utiliza, também, o conceito de superfície molhada e seca para o estudo da troca de calor do lado do ar. A completa descrição da geometria é apresentada neste trabalho, mas a metodologia utilizada é, na realidade, para um evaporador do tipo micro canais.

No presente trabalho é apresentado um modelo de simulação numérica do evaporador tipo placas em regime permanente, com análise local como em Gursaran (2000). O modelo considera zonas de evaporação e de superaquecimento no refrigerante e as condições de superfície seca e molhada no lado do ar, para a determinação dos coeficientes de troca de calor e de atrito. O modelo considera, também, a queda de pressão do lado do ar e do refrigerante. O método aqui empregado também permitiu, por sua natureza, a análise da circuitagem do refrigerante, simulando duas possibilidades para o caminho percorrido pelo refrigerante, válido para qualquer condição de entrada do refrigerante. Esta versatilidade não foi encontrada nos modelos acima descritos. Finalmente, o programa aqui apresentado testou dois novos refrigerantes, desenvolvidos pela HONEYWELL, o fluido H e o refrigerante 1234yf, este último em conjunto com a DuPont, Spatz, M. W. e Ninor, B (2008), comparando os resultados obtidos da simulação com dados reais de operação.

1.4

Conteúdo do Trabalho

No segundo capítulo é apresentado o modelo matemático e a definição do elemento ou volume de controle básico utilizado na simulação.

No terceiro capítulo são apresentadas as equações de conservação de energia e de massa do elemento, assim como a respectiva equação de troca de calor. As correlações para a determinação dos valores locais de coeficiente de troca de calor, do coeficiente global de troca de calor e queda de pressão, para o ar e para o refrigerante são também apresentadas. No lado do ar são definidas as

condições de troca de calor para superfície molhada ou seca. (i.e., com ou sem condensação da umidade do ar na superfície do trocador).

No quarto capítulo é apresentado o método de solução do modelo matemático da simulação, do elemento e do trocador de calor como um todo, incluindo o algoritmo do programa.

Os resultados da simulação para diferentes condições de operação e refrigerantes R134a, H, 1234yf, são descritos no quinto capítulo, sendo comparados aos resultados experimentais equivalentes.

Finalmente, o sexto capítulo são apresentadas as conclusões e expectativas quanto ao trabalho, assim como as sugestões para trabalhos futuros.