

1. Introdução

O presente trabalho trata do desenvolvimento de modelos matemáticos para a simulação de sistemas de refrigeração em supermercados, utilizando equações fundamentais e relações empíricas, para determinar seu consumo energético e impacto ambiental. Três sistemas de refrigeração em supermercados são estudados: Expansão direta, com fluido secundário e em cascata. Com o modelo matemático foi possível comparar os sistemas entre si, testar novos refrigerantes e avaliar vantagens do ponto de vista ambiental.

1.1. Consumo energético em supermercados

O consumo energético em supermercados tem representado uma importante parcela de consumo de energia no mundo todo, pelo fato da constante necessidade humana de manter os produtos perecíveis abaixo da temperatura ambiente, garantindo, assim, a durabilidade dos mesmos e, podendo armazená-los e transportá-los para outros lugares. Uma grande quantidade da energia é utilizada, majoritariamente, para manter alimentos congelados e resfriados em balcões expositores e nos armazéns frios, além do condicionamento de ar.

O sistema de refrigeração representa um dos maiores gastos de energia em um supermercado, registrando aproximadamente 25% do consumo total, conforme figura 1 (Panesi, 2008). Os compressores e condensadores utilizam entre 60% e 70% da energia total consumida pelo sistema, sendo o restante consumido pelos ventiladores do evaporador, pela iluminação das vitrines, e pelos sistemas de degelo dos evaporadores, também chamados de “defrost” (Baxter et al., 2004)

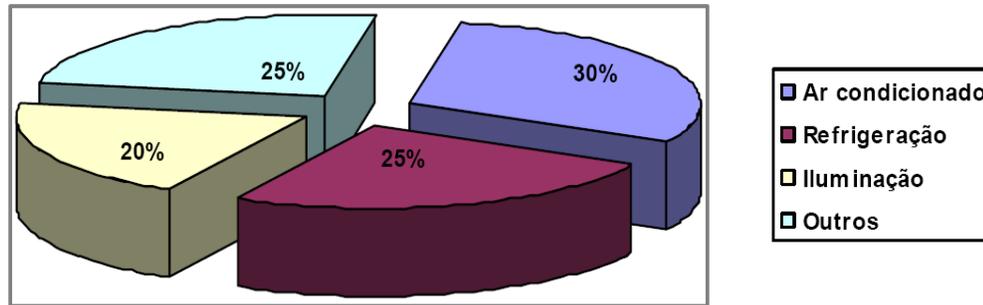


Figura 1 - Percentual de consumo energético da refrigeração respectivo a outros sistemas (Panesi, 2008)

Nos Estados Unidos, o consumo energético dos supermercados de grande porte oscila entre 1,5 e 3 milhões de kWh/ano por loja (Baxter et al., 2004). Acima da metade desta energia é utilizada para a refrigeração de expositores frigoríficos de alimentos e câmaras frigoríficas. Os expositores frigoríficos são utilizados nos supermercados para exibir produtos perecíveis. Estes expositores frigoríficos são mantidos em temperaturas abaixo da temperatura ambiente e operam com temperaturas de evaporação que oscilam na faixa de -25°C até 2°C , dependendo do tipo de produto que vai ser exibido. As características de operação e os requerimentos de energia do sistema de refrigeração estão diretamente relacionados à carga térmica de refrigeração (Baxter et al., 2004).

Muitos estudos têm mostrado experimentalmente que o consumo elétrico dos supermercados de pequeno e médio portes, nos Estados Unidos, oscila entre 1 e 1,5 milhões de kWh/ano por cada loja (A.D.Little, 2002).

1.2.

Principais características dos sistemas de refrigeração em supermercados

Todo supermercado quase sempre é composto por dois sistemas de refrigeração principais: o primeiro é o chamado sistema de baixa temperatura, o qual cumpre a função de atingir temperaturas de evaporação de até -25°C , pois se sabe que a temperatura da vitrine ou expositor é um pouco mais elevada que este valor. Este sistema normalmente é utilizado para manter produtos congelados para armazenamento por longos períodos, tais como, por exemplo, frango ou peru congelados. Em segundo lugar, tem-se o sistema de média temperatura, o qual atinge temperaturas de evaporação de aproximadamente -7°C , e é utilizado

para manter resfriados produtos prontos para o consumo, ou seja, sua função é só manter os produtos frescos e evitar que se estraguem, como no caso de legumes ou de margarinas/manteigas (Fischer, 2003).

No caso de se precisar temperaturas ainda mais baixas, utiliza-se o chamado sistema de cascata. O sistema cascata permite atingir temperaturas de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nos sistemas de refrigeração por cascata têm-se dois sistemas funcionando em seqüência: o sistema de alta temperatura e o sistema de baixa temperatura. Nesta configuração o sistema de alta temperatura retira o calor rejeitado pelo condensador cascata ou trocador de calor intermediário. Por outro lado, o sistema de baixa temperatura realiza um ciclo normal de expansão direta atingindo as temperaturas desejadas (Lee et al, 2006).

Na figura 2, apresenta-se um esquema de um supermercado onde é mostrada a distribuição de alguns expositores frigoríficos. Os expositores frigoríficos se encontram situados dentro da zona de vendas e são os responsáveis por manter os produtos perecíveis em bom estado, enquanto não são vendidos. Os refrigeradores de transporte, ou “walk-in storage coolers”, são utilizados para o período de tempo entre a recepção dos produtos e o posicionamento deles para a venda nos expositores (Baxter et al., 2004).

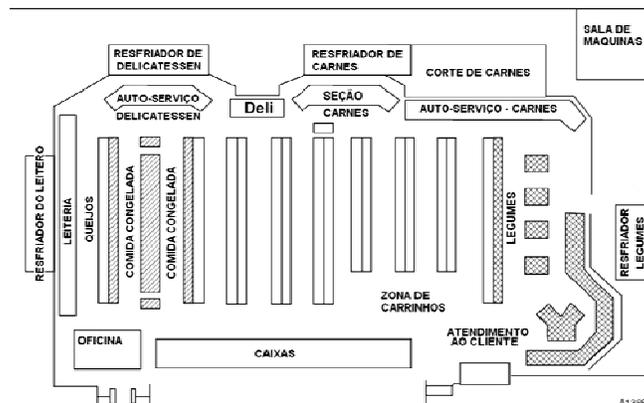


Figura 2 – Planta da disposição de expositores em um supermercado (Baxter et al.,2004)

O resfriamento dos expositores de refrigeração e dos refrigeradores de transporte é feito mediante trocadores refrigerante/ar de expansão direta. As tubulações de refrigerante levam o refrigerante para cada uma das serpentinas

dos evaporadores e, posteriormente, retiram o refrigerante mandando-o para a sucção do compressor (Baxter et al., 2004).

Os compressores estão situados na sala de máquinas, em uma zona remota do supermercado, enquanto que o condensador geralmente se encontra no telhado da sala de máquinas. Os sistemas de refrigeração de supermercados encontram-se arranjados nos chamados “racks” de compressores, com 3 ou 4 compressores trabalhando em paralelo, havendo um distribuidor (manifold) na sucção e na descarga. A capacidade de refrigeração é gerenciada mediante o funcionamento de todos os compressores ou de somente de alguns deles. Utiliza-se um “rack” para baixa temperatura e outro, para temperatura média (Kazachki, 2007).

Os tipos de expositores frigoríficos tais como os mostrados na figura 3, podem ser classificados da seguinte forma (Baxter et al., 2004):

- Ilha: É utilizado para armazenar e mostrar produtos congelados e carnes. Os expositores do tipo Ilha operam numa temperatura quase uniforme, mas têm como desvantagem não poder armazenar um grande volume de alimentos.
- Multi-prateleiras de frente aberta ou “multi-deck”: Este tipo de expositor frigorífico pode armazenar um grande volume de alimentos por unidade de área, por causa do uso de um gabinete vertical e prateleiras. Os requerimentos de refrigeração são muito elevados para este tipo de expositores, incluindo grande quantidade de calor latente pelo fato de se ter entrada de ar externo através da cortina de ar.
- Geladeiras de portas de vidro: Este tipo de expositor é utilizado para armazenar produtos os quais possam ser apreciados de fora através da porta de vidro, necessitando-se abri-la para retirar o produto. É muito utilizado para exibir refrigerantes e cervejas e também para armazenar gelo ou sorvetes. Normalmente utilizam o chamado aquecedor anti-umidade para evitar a nebulização e diminuição da visibilidade do produto na superfície interna.
- Plataforma simples e de serviço: O expositor de plataforma simples é comumente utilizado para exibir carnes frescas. No caso particular do expositor de serviço, ele vem com portas corrediças

de vidro por trás para que o funcionário do supermercado possa acessá-lo, ao mesmo tempo permitindo que o cliente observe os produtos pelo outro lado.

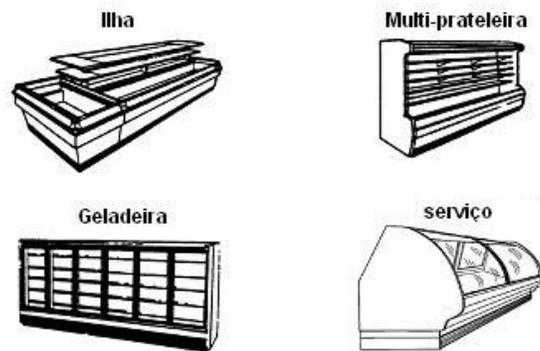


Figura 3 – Tipos de expositores frigoríficos (Baxter et al., 2004)

Os expositores frigoríficos têm sido desenvolvidos para determinados tipos de mercadorias com diferentes requerimentos de temperatura. A tabela 1 apresenta uma idéia dos tipos de mercadorias mais comuns em um supermercado e as condições de temperatura por elas requeridas (Baxter et al., 2004).

Tabela 1 – Requerimentos de temperaturas para diferentes produtos (Baxter et al., 2004)

Aplicação	Temperatura de descarga (°C)
Leite/ Queijos	-1 até 1
Deli/Pizza	-0,6 até 1
Carnes/Peixes	-2,8 até -1,7
Frutas ou Legumes	-0,6 até 1
Bebidas	2
Comida Congelada	-26 até -18,9
Sorvetes	-31,7 até -24,4

Na figura 4, mostra-se um corte transversal de um expositor frigorífico aberto do tipo multi-prateleiras, onde é possível identificar os principais sistemas presentes.

As paredes do expositor têm normalmente uma camada de fibra de vidro, ou espuma como isolante, reduzindo o ganho de calor por condução e convecção e, também, para prevenir a condensação na parede externa do expositor.

No caso de expositores abertos, o ar sai pela grade de descarga passando pela frente, criando uma cortina de ar e, posteriormente, retorna pela parte inferior da zona aberta, entrando novamente para o expositor. Uma vez que o ar retorna ao expositor, passa pela serpentina de evaporação movido pelo ventilador. No trecho entre a sucção de ar e a grade de descarga existem saídas de ar para resfriar as prateleiras verticais.

No evaporador, o fluido refrigerante passa pela válvula de expansão antes de entrar na serpentina múltipla e, mediante a troca de calor de fluxo cruzado com o ar, atinge a condição de frio desejado. A carga térmica de refrigeração do expositor é a quantidade de calor que precisa ser removida, com o objetivo de manter o produto do expositor na temperatura de armazenamento necessária. As condições de temperatura interna de bulbo seco e a umidade relativa padrão para garantir a carga térmica dos expositores de refrigeração são de 24°C e 55%, respectivamente (Baxter et al., 2004).

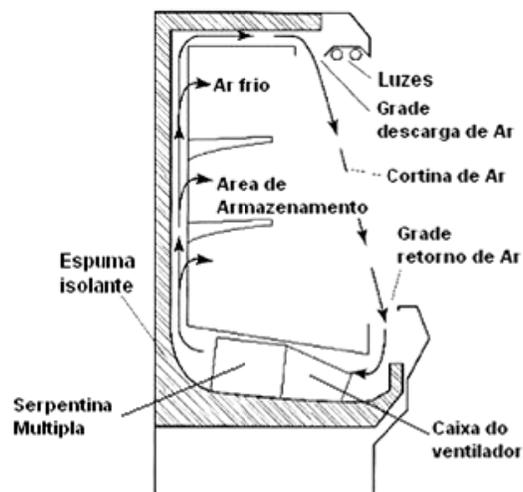


Figura 4 – Corte transversal de um expositor multi-plataforma (Baxter et al., 2004)

O calor responsável pela carga térmica pode ser transferido das seguintes formas (Fischer, 2003):

- **Condução:** Calor do meio ambiente que passa através das paredes do expositor frigorífico e é interceptado pelo ar frio que circula pelo perímetro.
- **Radiação:** Transferência de calor por radiação térmica que ocorre entre o interior do expositor e o ambiente interno do supermercado.
- **Convecção:** Transferência de calor propiciada pela entrada de ar ambiental através da cortina de proteção. Possui dois componentes; latente e sensível. O calor sensível é devido à necessidade de baixar a temperatura ambiental, enquanto que o calor latente é a resultante da sublimação de gelo na superfície do evaporador.
- **Transferências internas:** Há uma quantidade calor que é transferido ao sistema pela utilização de energia elétrica nos componentes do expositor, os quais também rejeitam calor como, por exemplo, (i) a iluminação do expositor, onde se tem uma porcentagem da energia fornecida à lâmpada a qual é rejeitada como calor, (ii) para o motor do ventilador e para os aquecedores anti-condensação ou “anti-sweat heaters”, para manter a temperatura na superfície acima do ponto de orvalho e evitar a formação de gotículas de água nas portas dos expositores.

O impacto de cada um desses elementos na carga térmica é muito dependente do tipo de expositor frigorífico. Por exemplo, o ar infiltrado tem maior significância na carga térmica de refrigeração para os expositores abertos do tipo multi-prateleira, enquanto que a radiação representa a maior parcela de carga térmica nos expositores do tipo ilha. Os aquecedores anti-condensação nas portas apresentam uma maior significância para expositores de comida congelada (Arias, 2003).

A figura 5 mostra a distribuição dos expositores frigoríficos em um supermercado típico dos Estados Unidos. Nesta figura pode-se perceber que os expositores abertos do tipo multi-prateleira oferecem quase a metade da demanda de carga de refrigeração do supermercado todo. Adicionalmente, cabe mencionar que as cargas de temperatura média representam entre 70 e 75 % da carga total do supermercado e, desta parte, aproximadamente 75 % é devido aos expositores frigoríficos abertos do tipo multi-prateleira (Baxter et al., 2004).

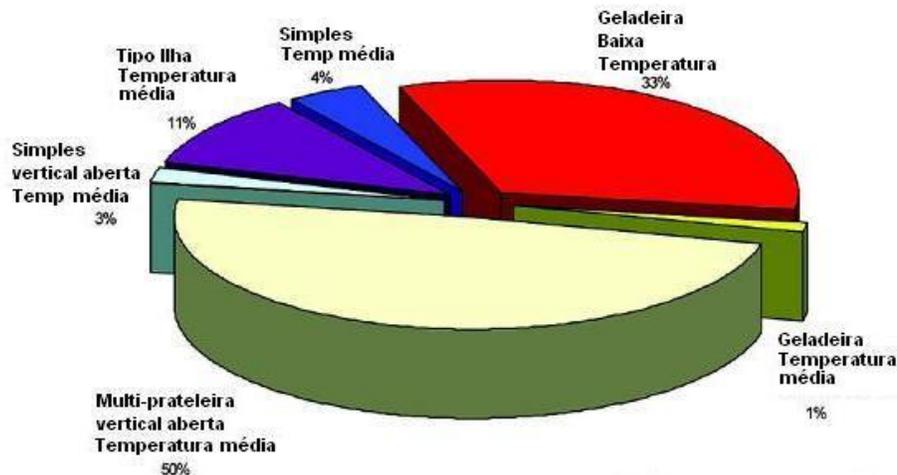


Figura 5 - Percentual de consumo energético da refrigeração em um supermercado
(Baxter et al., 2004)

A formação de gelo na sua superfície do evaporador se distingue como um fator importante na operação, visto que o gelo reduz a troca de calor (resistência térmica adicional) prejudicando o processo de troca de calor e aumentando o consumo energético. Portanto, é importante sua retirada periódica. O gelo formado poderia, eventualmente, até bloquear os canais de fluxo de ar dentro do evaporador, causando uma perda total de capacidade de refrigeração. Existem alguns métodos de degelo utilizados em supermercados e eles são brevemente descritos a seguir (Fischer, 2003):

- Desligamento do expositor: De uso intensivo nos sistemas de média temperatura em supermercados onde não há problemas na qualidade do produto pela mudança de temperatura. O método consiste em desligar o expositor até retirar o gelo formado por equilíbrio termodinâmico.
- Aquecimento elétrico: Aquecedores elétricos são instalados na entrada do evaporador aquecendo que o ar circulante. Este ar passa pelo evaporador fundindo o gelo. Na atualidade, é considerado como um dos métodos mais efetivos de descongelamento, embora tenha o maior consumo de energia, entre todas as opções.
- Circulação de gás quente: Desvia-se um pouco de gás da descarga dos “racks” de compressores e faz-se atravessar essa porção de

gás quente por uma serpentina do evaporador, aquecendo-o. O método circulação de gás quente pode remover o gelo com velocidade maior do que qualquer outro método anteriormente mencionado. Entretanto, é o mais custoso por demandar uma grande quantidade de tubulações e sistemas de controle para gerenciá-lo.

O degelo é um processo crítico, pois acarreta o aumento da temperatura do ar desde a temperatura de operação até uma temperatura fusão do gelo. Se não for feito adequadamente pode resultar em dano dos produtos nele armazenados. A quantidade de ciclos de degelo depende do tipo de expositor. Por exemplo, os expositores do tipo multi-prateleira precisam de muitos ciclos, enquanto que os do tipo ilha ou geladeira com porta precisam somente um degelo por dia (Fischer, 2003).

Segundo Baxter (2004), os motores elétricos padrão utilizados para a recirculação de ar nos expositores estão na ordem de 19 até 25% de eficiência. Existem outros mais eficientes, na ordem de 35 até 45%. A eficiência é aqui definida como a razão entre o calor retirado pelo ar e a potência elétrica consumida. As lâmpadas utilizadas para iluminação são fluorescentes do tipo T-8 e estão situadas na parte superior como se mostrou na figura 4. No caso dos expositores multi-prateleira, há duas fileiras de lâmpadas. Em alguma, situação, há lâmpadas montadas na parte inferior, para dar um efeito especial e melhor exibir os produtos.

Os aquecedores anti-umidade estão posicionados nas portas dos expositores do tipo geladeira. Para o caso dos expositores do tipo geladeira, eles consomem perto de 200 W por cada porta (Baxter et al., 2004).

1.3. Aspecto ambiental - Indicadores

Tão importante quanto considerar a eficiência energética e a questão econômica, é o ponto de vista ambiental, visto que a operação dos sistemas de refrigeração em supermercados acarreta uma produção não desprezível de CO₂

equivalente e, portanto, representa uma contribuição ao aumento do efeito estufa.

Ultimamente, os temas ambientais têm sido identificados e tratados mediante o protocolo de Montreal, quando se proibiu a utilização dos refrigerantes CFCs (cloro flúor carbonatos). Posteriormente, com o protocolo de Kyoto, discutiu-se a importância de se reduzir os refrigerantes que contribuam para o aquecimento global.

O crescente impacto dos vazamentos dos refrigerantes que causam o aquecimento global resultou na criação do termo GWP (Global Warming Potential), o qual tenta agrupar num valor numérico o impacto que cada refrigerante tem no aquecimento global. O GWP provém de um cálculo que considera a capacidade de absorção de radiação infravermelha pelo gás e também o tempo de vida do gás na atmosfera. Ele é integrado num horizonte de tempo, relacionado ao período médio de vida do refrigerante na atmosfera (Arthur D. Little, 2002).

O Painel Intergovernamental em Mudanças Climáticas (IPCC) fornece os valores geralmente aceitos para GWP, os quais têm mudado ligeiramente entre os anos 1996 e 2001. Uma definição mais precisa de como o GWP é calculado pode ser encontrada no Terceiro Relatório de Avaliação de 2001 da IPCC (Baxter, 1998). O GWP é definido como a razão entre as forças radiativas integradas no tempo a partir da liberação instantânea a 1 kg de uma substância de traço em relação com 1 kg de um gás de referência. Ver a equação (1.1) (Block et al., 2001).

$$GWP(x) = \frac{\int_0^{TH} a_x \times [x(t)] \times dt}{\int_0^{TH} a_r \times [r(t)] \times dt} \quad (1.1)$$

onde o TH é o horizonte temporal sobre o qual o cálculo foi considerado; a_x é a_r eficiência radiativa devido a um aumento unitário na abundância atmosférica da substância (ou seja, $Wm^{-2} kg^{-1}$) e $x(t)$ é a mudança dependente no tempo, na abundância da substância após uma liberação instantânea em um instante $t=0$. O denominador contém as quantidades correspondentes ao gás de referência (ou seja, CO_2). As eficiências radiativas, a_x e a_r , não são necessariamente constantes ao longo do tempo (Block et al., 2001).

Embora a absorção da radiação infravermelha por muitos gases que promovem o efeito estufa varie linearmente com a sua abundância, alguns menos importantes mostram um comportamento não-linear para as atuais e futuras prováveis abundâncias (por exemplo, o CO₂, CH₄ e N₂O). Para os refrigerantes avaliados, a força radiativa relativa dependerá da abundância e, conseqüentemente, do futuro cenário adotado (ORNL, 1991; Arthur D. Little, 1991).

O valor de GWP depende de como decai a concentração de gás na atmosfera com o tempo. Isso muitas vezes não é conhecido com precisão. Conseqüentemente, os valores não devem ser considerados exatos. Por esta razão, quando um GWP para determinado gás é citado, é importante apresentar uma referência de tempo para o cálculo (Toscano et al., 1981).

Comumente, um horizonte temporal de 100 anos é utilizado pelos reguladores (California Air Resources Board), pois o tempo de residência aproximado do CO₂ na atmosfera é de 100 anos, razão pela qual avaliar um tempo menor não faria muito sentido (Foster e Ramaswamy, 2007).

Por sua vez, o TEWI (Total Equivalent Warming Impact) mede o impacto ambiental das perdas atmosféricas de gases em operação, em serviço e na disposição final da vida do equipamento. Pode ser um índice útil para comparar tecnologias alternativas, mas não deve ser utilizado para a exclusão de fatores importantes, tais como a eficiência energética, segurança do trabalhador e do consumidor, confiabilidade e, custo para o consumidor (ORNL, 1991; Arthur D. Little, 1991).

O cálculo do TEWI está baseado no uso do Potencial de Aquecimento Global (GWP) para gases traço, desenvolvidos pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), os quais utilizam dióxido de carbono como gás de referência (GWP CO₂ = 1) (Block et al., 2001).

O TEWI é composto por dois efeitos: o direto e o indireto. O efeito direto é devido ao vazamento do refrigerante na atmosfera, o qual tem efeito imediato sobre ela, pois possui uma equivalência com o CO₂ (Arias, 2005).

O efeito indireto é devido às emissões de CO₂ das centrais termelétricas ou usinas geradoras, necessárias para gerar a energia elétrica que foi utilizada pelos equipamentos de refrigeração. Considera o consumo anual e o período de vida do equipamento, em anos.

Para o cálculo do TEWI aplica-se a seguinte equação, (Arias, 2005):

$$TEWI = \underbrace{(\emptyset \times m_{REF} \times TV \times GWP_{REF})}_{\text{Direto}} + \underbrace{(CR \times TV \times E)}_{\text{Indireto}} \quad (1.2)$$

onde:

\emptyset = Fração de perda de refrigerante em um ano [%]

m_{REF} = Massa de gás refrigerante [kg/ano]

TV = Tempo de vida do equipamento [Anos]

GWP_{REF} = Potencial de Aquecimento Global do refrigerante [kg CO₂/kg refrigerante]

CR = Fator de conversão regional [kg CO₂/ kWh]

E = Consumo anual de energia [kWh/Ano]

Da mesma forma que o TEWI, o LCCP (Life Cycle Climate Performance) é outro indicador do impacto ambiental causado pelo funcionamento de um aparelho ao longo de sua vida útil. A diferença em relação aos outros indicadores é que o LCCP é tido como um melhor indicador pelo fato de considerar outros fatores importantes além dos descritos no TEWI. São eles: a emissão de CO₂ nos processos de fabricação do refrigerante, de manuseio do refrigerante, da fabricação dos equipamentos e de seu descarte ao final de sua vida útil. Por este motivo, o LCCP é considerado a forma mais rigorosa de se avaliar o impacto ambiental. Ele também considera tanto um efeito direto quanto outro indireto. O efeito direto é devido aos vazamentos ou emissões de refrigerante ao longo da vida útil do equipamento. Por outro lado, o efeito indireto é devido à geração de CO₂ pelas usinas termelétricas ou outras geradoras para produzir a energia que será utilizada nos equipamentos, na fabricação dos refrigerantes e no descarte dos mesmos (Kazachki, 2007).

1.4. Objetivo do trabalho

A finalidade do presente trabalho é descrever o comportamento energético e ambiental do sistema de refrigeração de um supermercado operando com: (i) um sistema de expansão direta, (ii) fluido secundário e (iii) em cascata, mediante o desenvolvimento de um modelo matemático e a utilização de um programa computacional com interface direcionada ao usuário, em Visual Basic 6 ®. Utiliza-se esta ferramenta para avaliar novos refrigerantes, os quais poderão ser misturas de substâncias puras, quantificando, assim, se efetivamente reduzem o consumo de energia e impacto ambiental, tomando-se em consideração dois indicadores ambientais: TEWI e LCCP.

1.5. Justificativa

Atualmente, existem diversos trabalhos descritos na literatura relacionados à refrigeração em supermercados, os quais disponibilizam opções para aperfeiçoar o sistema, possibilitando, assim, a redução do consumo energético. No Brasil há alguns trabalhos relacionados ao setor supermercadista (Marchioro, 2004 e Panesi, 2008). Sabe-se que aproximadamente 11% do consumo energético brasileiro é destinado para refrigeração (BEN, 2003). Segundo as projeções do Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica (PDEE 2006-2015) do Ministério de Minas e Energia, o consumo total de energia elétrica no país pode saltar dos atuais 373,5 TWh para 617,7 TWh em 2015 (Panesi, 2008). Assim, medidas de redução são plenamente justificáveis.

O cálculo da carga térmica de refrigeração envolve a modelagem de diversos mecanismos de fornecimento de calor. Existem por exemplo, os aquecedores do condensado, que cai do evaporador, para evitar a sua solidificação (“condensate heaters”) e, também os aquecedores nas portas das vitrines de exibição utilizados para prevenir a formação de condensado nas portas das unidades de refrigeração (anti-sweat heaters). Os sistemas de refrigeração também rejeitam calor, o qual poder ser recuperado e utilizado por bombas de calor ou outros equipamentos para fornecer aquecimento de água para qualquer requerimento da planta. Há, também, a possibilidade de degelo mediante a circulação de gás quente, proveniente dos compressores ou algum outro método (Baxter et al., 2004).

Em virtude do acima exposto, surge a idéia de se modelar um supermercado de modo mais abrangente que o habitualmente feito na literatura, para assim se ter uma melhor idéia de quais são as fontes de maior gasto energético e também de se testar outras configurações dos sistemas, possibilitando, desta forma, comparar sua sensibilidade ante uma mudança de refrigerante ou de fluido secundário. Igualmente, resulta também importante, na avaliação de novos refrigerantes, a redução do impacto ambiental, sem sacrificar a eficiência energética do sistema.

1.6. Estado da arte

Os estudos sobre simulação de consumo de energia em supermercados têm sido levados a cabo com a intenção de reduzir o consumo energético dos mesmos, pois representam uma grande porcentagem do total do consumo de energia dos países. Com a intenção de reduzir o consumo energético devido à refrigeração nos supermercados no Brasil, Presotto Jr. e Süffert (2001a) compararam diferentes opções de configuração como expansão direta, fluido secundário e em cascata com diferentes refrigerantes para as condições climáticas de Porto Alegre. Deste estudo, Presotto Jr. e Süffert (2001b) concluíram que a simples substituição do fluido refrigerante R-22 pelo R-507a para os sistemas de expansão direta, prática muito comum em países europeus, acarretaria um consumo adicional de energia superior a 14%. Por outro lado, também, analisando o desenvolvimento de instalações futuras, especialmente no que se refere à eliminação total de fluídos HCFCs do mercado, observa-se que os melhores resultados foram obtidos utilizando-se sistemas com fluídos secundários do tipo “sem gelo”, isto é somente calor sensível, que apresentaram o menor consumo de energia, utilizando R507a como fluido primário, reduzindo cerca de 13% no consumo anual de energia. Marchioro (2004) levou em conta o bombeamento de líquido refrigerante na saída de evaporadores inundados e o pré-resfriamento evaporativo instalado em conjunto ao sistema de condensação, para a redução do consumo elétrico em supermercados nos sistemas de expansão direta. Esta foi uma configuração muito adaptável à realidade climática brasileira.

Alguns estudos iniciais podem ser encontrados na literatura, onde foram estudadas opções com mais antecedência. Pode-se citar o trabalho de Toscano et al. (1981), que avaliaram a inclusão de um microprocessador para a redução do consumo de energia dos “racks” de compressores, mediante o projeto de um algoritmo de controle, o qual encontra a combinação ótima para cada condição de operação ao longo do ano. Sugeriram este procedimento para fazer coincidir a capacidade de refrigeração com a carga térmica, com a intenção de reduzir o tamanho da faixa de variação de pressão de sucção nos “racks” de compressores. Entretanto, demonstraram que os “racks” de compressores desiguais (vários compressores de diferentes capacidades) representam um menor consumo de energia em comparação aos “racks” de compressores iguais (vários compressores de mesma capacidade). Posteriormente, Walker e Baxter (2003) avaliaram a utilização de controles eletrônicos para o condensador dos sistemas de expansão direta, os quais permitem a operação do sistema de refrigeração com a carga de refrigerante próxima do nível crítico e também permitem a operação a baixas alturas de pressão. Concluíram que, se os controles estiverem bem instalados e calibrados, é possível reduzir o consumo em até 11.9%.

No que diz respeito à simulação de sistemas de refrigeração para supermercados, tanto por expansão direta como por fluido secundário, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos onde se busca avaliar o rendimento destes sistemas operando com certos refrigerantes e determinados compressores comerciais. Determina-se, assim, dependendo das condições climáticas locais, qual das opções é a melhor. Podem-se mencionar os estudos de McDowell et al. (1995), Horton e Eckard (2001), Fischer (2003), Arias (2005) e, finalmente, Kazachki (2007). Foram utilizados, em todos estes modelos, valores do COP extraídos dos catálogos dos compressores, os quais somente são válidos para algumas condições de trabalho. Geralmente, os catálogos mostram eficiências e potências dos compressores considerando necessariamente os seguintes parâmetros: (i) temperatura na linha de vapor na pressão de sucção, (ii) temperatura na linha de vapor na pressão de descarga, (iii) uma temperatura do retorno do líquido refrigerante, (iii) normalmente sub-resfriamento de 0 °C e (iv) uma temperatura ambiental fixa.

Alguns poucos estudos foram realizados com ciclos em cascata, onde enfatizou-se a utilização do CO₂ como fluido de baixa temperatura, por possuir

boas características, segundo Klein (2009), como uma baixa tensão superficial, boa condutividade térmica e baixa viscosidade cinemática entre outras. Por outro lado, por ser um refrigerante natural, não causa efeitos indesejáveis ao ambiente (GWP=1) no caso de vazamento (Dopazo et al., 2004; Getu e Bansal, 2007). Por sua vez, Lee et al. (2006) também utilizaram o CO₂ no lugar da amônia para os sistemas de baixa temperatura, devido ao fato de a amônia não poder trabalhar a temperaturas abaixo de -35 °C, visto que, nessas condições, a pressão do fluido fica abaixo da pressão atmosférica causando a entrada de ar para o evaporador, além de ser inflamável e tóxica. Porém, utilizaram a amônia para o sistema de alta temperatura, pois não entra em contato com o evaporador e é outro refrigerante considerado “natural” e, portanto, não agressivo ao meio ambiente. Lee et al. (2006) também determinaram uma temperatura ótima do condensador cascata ótimo para o funcionamento do ciclo em cascata Amônia - CO₂.

Também, tem sido considerado o efeito estufa ocasionado pelas atuais opções dos refrigerantes, do tipo HFC (R125A, R134A, R143A, R404A, entre outros), e tem sido medido mediante a determinação do GWP nos trabalhos de Fischer et al. (1997) e de Baxter et al. (1998). Estes valores de GWP têm sido utilizados para determinar o indicador TEWI, mostrando que precisam ser encontradas novas alternativas para os refrigerantes atuais.

A empresa Arthur D. Little (2002) realizou um estudo bem detalhado para supermercados, por encargo da DOE (Departamento de Energia do Governo dos Estados Unidos da América), onde determina o consumo energético de supermercados funcionando com sistemas de expansão direta e com fluido secundário, porém utilizando unicamente como refrigerante R404A e alguns poucos fluidos secundários. Não fizeram estudo de um sistema em cascata. Esta empresa também analisou o indicador LCCP do supermercado para cada uma das opções previamente descritas, todavia considerando a massa do refrigerante somente em função da área construída do supermercado. Na realidade, este valor depende muito do refrigerante que esteja sendo utilizado, como será observado mais adiante no presente trabalho.

Vrinat et al. (2000) e Poggi et al.(2008) realizaram estudos detalhados do cálculo da massa do refrigerante em um supermercado, determinando uma massa expressa em função da carga térmica dos expositores frigoríficos.

Também foi feita uma análise detalhada da massa do refrigerante dentro de diferentes equipamentos do sistema de refrigeração de um supermercado, que são: (i) o compressor, (ii) o condensador, (iii) o evaporador e (iv) o tanque Reservatório.

Em virtude do acima exposto, o presente projeto complementarizará a abordagem de outros trabalhos, conduzindo uma análise detalhada da carga de refrigerante nas tubulações e nos equipamentos do sistema de refrigeração, o que permitirá obter um valor mais realista do LCCP. Igualmente, trabalhar-se-á com qualquer mistura de refrigerantes, azeotrópica ou não azeotrópica. Por outro lado, o presente trabalho utilizará um ciclo termodinâmico para definir o COP da mistura escolhida, para então determinar o consumo energético de um supermercado em uma locação geográfica qualquer trabalhando com os sistemas multiplex, fluido secundário ou em cascata. Tal procedimento permitirá realizar uma comparação entre estas diferentes configurações. Também será feita uma análise LCCP e TEWI para as opções, permitindo determinar seu impacto ambiental.

1.7. Contribuição do presente trabalho

O presente trabalho propõe estudar, mediante modelos energéticos termodinâmicos melhorados (incluindo eficiência isentrópica e eficiência volumétrica do compressor), o comportamento do consumo de energia e o impacto ambiental de um sistema de refrigeração em supermercados operando com três possíveis tipos de sistemas: expansão direta, fluido secundário e cascata. O modelo aqui desenvolvido também permite trabalhar com diferentes misturas, azeotrópicas ou não-azeotrópicas, formadas a partir de substâncias puras, possibilitando testar refrigerantes novos ou em fase de desenvolvimento. Por outro lado, os modelos elaborados no presente estudo consideram um sub-resfriamento mecânico na saída do evaporador do sistema de baixa temperatura, para garantir que a capacidade de refrigeração seja a mais próxima à carga térmica de projeto.

Finalmente, destaca-se mencionar a simulação do sistema em cascata para sistemas de refrigeração em supermercados, para o qual procedeu-se a

uma avaliação do consumo energético, TEWI e o LCCP. Comparou-se estes indicadores com os outros sistemas de refrigeração em supermercados, já anteriormente descritos (Multiplex e fluido secundário).

Não foi encontrada na literatura consultada, até o presente momento, referência a nenhum estudo o qual incluía todos os fatores acima descritos.

1.8. Conteúdo do Trabalho

No segundo capítulo são apresentados os modelos matemáticos para a caracterização do sistema proposto.

No terceiro capítulo demonstra-se a solução numérica dos modelos propostos mediante a utilização do software Visual Basic 6, com aplicações para Excel®.

No quarto capítulo, valida-se o modelo desenvolvido com os resultados de outros autores, disponíveis na literatura.

No capítulo quinto, apresentam-se estudos de caso mostrando aplicações do modelo desenvolvido, com resultados.

O presente trabalho encerra-se com as conclusões e sugestões para estudos futuros, dispostas no capítulo 6.