

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CARLOS EDUARDO GERMINO FILHO

**TECNOLOGIAS APLICADAS NA REFRIGERAÇÃO DOMÉSTICA  
QUE PODEM DIMINUIR O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**

CURITIBA

2021

CARLOS EDUARDO GERMINO FILHO

**TECNOLOGIAS APLICADAS NA REFRIGERAÇÃO DOMÉSTICA  
QUE PODEM DIMINUIR O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**

Projeto apresentado ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis e Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Dr. Christian Scapulatempo Strobel.

CURITIBA  
2021

## RESUMO

Com o desenvolvimento socioeconômico brasileiro nos últimos vinte anos, a população tem maior acesso a bens de consumo fazendo com que a eletricidade consumida apresente crescimento acelerado, resultando na necessidade de altos investimentos em geração e transmissão de energia elétrica. Em contrapartida, as instituições governamentais responsáveis pelo consumo de energia têm tomado ações de baixa representatividade para o aumento da eficiência energética dos eletrodomésticos mais impactantes, o que reduziria a necessidade em investimentos. No Brasil, a energia elétrica necessária ao funcionamento de um refrigerador doméstico representa de 25% a 50% do consumo total de uma residência, dependendo da classe social. A maioria das tecnologias de geração renováveis, consideradas limpas, ainda não atingiram uma eficiência satisfatória, demonstrando assim a necessidade de buscar outros caminhos para solucionar ou amenizar a questão energética. Como uma das principais linhas de pesquisa e desenvolvimento deste novo problema surge a eficiência energética. Apesar de nos últimos 20 anos existir um considerável progresso na eficiência dos refrigeradores no Brasil, grande parte dos equipamentos do estoque são ineficientes e obsoletos e estão em operação consumindo até cinco vezes mais eletricidade quando comparados com modelos eficientes disponíveis no mercado. O presente trabalho identifica as principais tecnologias presentes ao redor do mundo, que podem ser utilizadas para reduzir o consumo dos aparelhos refrigeradores.

Palavras-chave: Eficiência energética, refrigeradores domésticos, consumo de energia.

## **ABSTRACT**

With the Brazilian socioeconomic development in the last twenty years, the population has greater access to consumer goods, causing the electricity consumed to present accelerated growth, resulting in the need for high investments in generation and transmission of electric energy. On the other hand, government institutions responsible for energy consumption have taken low-representative actions to increase the energy efficiency of the most impacting home appliances, which would reduce the need for investments. In Brazil, the electrical energy needed to run a domestic refrigerator represents 25% to 50% of the total consumption of a residence, depending on the social class. Most renewable generation technologies, considered clean, have not yet reached satisfactory efficiency, thus demonstrating the need to seek other ways to solve or alleviate the energy issue. As one of the main lines of research and development of this new problem arises energy efficiency. Although in the last 20 years there has been considerable progress in the efficiency of refrigerators in Brazil, much of the equipment in stock is inefficient and obsolete and is in operation consuming up to five times more electricity when compared to efficient models available on the market. The present work identifies the main technologies present around the world, which can be used to reduce the consumption of refrigerators.

Keywords: Energy efficiency, household refrigerators, energy consumption.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – ICE HOUSES .....	6
FIGURA 2 – CICLO PADRÃO DE COMPRESSÃO A VAPOR .....	8
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DO CICLO PADRÃO DE REFRIGERAÇÃO EM UM DIAGRAMA P-H .....	9
FIGURA 4 - CICLO DE REFRIGERAÇÃO COM TROCADOR DE CALOR TC-LS .....	10
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO COM TROCADOR DE CALOR TC-LS.....	11
FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DOMÉSTICO.....	12
FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DE UM MECANISMO DE COMPRESSOR ALTERNATIVO. .....	13
FIGURA 8 - ILUSTRAÇÃO DA TROCA TÉRMICA EM UM EVAPORADOR.....	14
FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA RESIDENCIAL NO BRASIL.....	19
FIGURA 10 - ETIQUETA DE CLASSIFICAÇÃO ENERGÉTICA (ESQUERDA) E SELO PROCEL (DIREITA) .....	20
FIGURA 11 - SISTEMA DE CIRCULAÇÃO DE AR DE UM REFRIGERADOR FROST-FREE BOTTOM-MOUNT .....	23
FIGURA 12 - EVOLUÇÃO DA EFICIÊNCIA DE COMPRESSORES ALTERNATIVOS.....	24
FIGURA 13 – ILUSTRAÇÃO DO CONSUMO ELÉTRICO EM UM REFRIGERADOR.....	28
FIGURA 14 – ILUSTRAÇÃO DO CONSUMO ELÉTRICO EM UM REFRIGERADOR EQUIPADO COM COMPRESSOR DE VELOCIDADE VARIÁVEL .....	29
FIGURA 15 – ILUSTRAÇÃO DE UM COMPRESSOR LINEAR.....	31
FIGURA 16 – ESQUEMA DE UMA VALVULA DE EXPANSÃO ELETRÔNICA.....	33
FIGURA 17 – ILUSTRAÇÃO DO CICLO DE BRAYTON .....	36

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – REFRIGERADORES COMERCIALIZADOS NO BRASIL.....	32
TABELA 2 – CARACTERISTICAS DOS GASES REFRIGERANTES PARA REFRIGERADORES E FREEZERS.....	34

# CONTEÚDO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
1.1. Contexto Histórico.....	6
1.2. Sistema de compressão mecânica a vapor (CMV).....	7
1.3. Os sistemas de refrigeração por compressão em refrigeradores e freezers.....	11
1.4. Apresentação.....	15
1.4.1. Política Energética Brasileira .....	17
1.4.2. Políticas governamentais e consumo de energia.....	18
1.5. Justificativa .....	20
1.6. Objetivo.....	21
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
2.1. Tecnologias que podem diminuir o consumo de energia elétrica doméstico no brasil.....	26
2.1.1. Novas tecnologias aplicáveis à refrigeração doméstica no Brasil .....	27
2.1.1.1. <i>Os compressores com velocidade de refrigeração variável</i> .....	27
2.1.1.2. <i>Refrigeradores com tecnologia de compressores lineares</i> .....	30
2.1.1.3. <i>Válvulas de expansão eletrônicas</i> .....	32
2.1.1.4. <i>Fluidos refrigerantes aplicados em refrigeradores domésticos no Brasil</i> .....	33
2.1.1.5. <i>Refrigeradores baseados no efeito magnético calórico</i> .....	35
<b>3. CONCLUSÕES .....</b>	<b>38</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>40</b>

## 1. INTRODUÇÃO

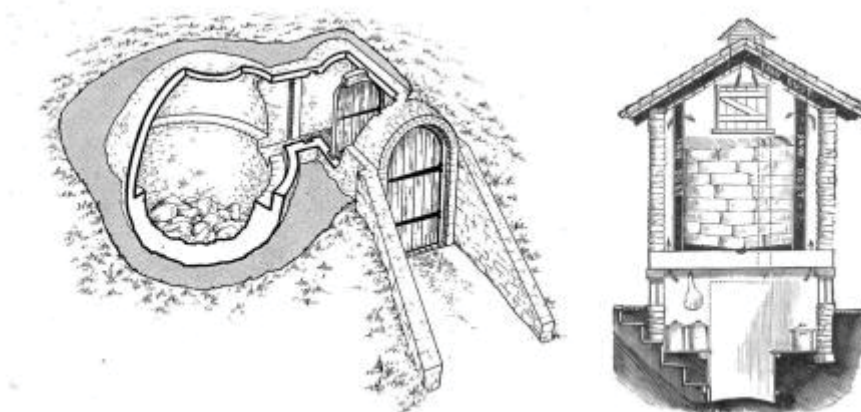
### 1.1. Contexto Histórico

Viver num ambiente termicamente confortável e conservar os alimentos por longos períodos são duas das necessidades básicas da sociedade moderna que podem ser atendidas através da refrigeração. De acordo com Gosney (1982), refrigerar nada mais é que reduzir a temperatura de fluidos ou corpos a valores abaixo daqueles disponíveis num certo ambiente ou local. Isso pode ser feito por meios naturais, com a extração de gelo de lagos, por exemplo, ou por meios artificiais, com a utilização de sistemas de refrigeração.

Na Antiguidade não existia energia elétrica e, portanto, o abaixamento de temperatura tinha que ser feito por meios naturais. Os egípcios e romanos, por exemplo, enterravam comida no solo, onde a temperatura era naturalmente mais baixa. Os gregos utilizavam vasos de cerâmica para armazenar vinho. Outros povos, como os chineses, construíam vasos de terracota e os enterravam na tentativa de manter seus alimentos a temperaturas inferiores à do ambiente externo.

Durante boa parte dos séculos XVIII, XIX e início do século XX, a extração de gelo de regiões mais frias foi predominante. Na época, as chamadas ice houses (casas com paredes espessas e isoladas com serragem) eram construídas para armazenar o gelo (ver Figura 1).

FIGURA 1 – ICE HOUSES



FONTE: À ESQUERDA, NBGW (2019) E À DIREITA, VARNEY (1882)

Paralelamente, tentativas de obter frio artificialmente começaram a surgir com o intuito de contornar algumas das inconveniências associadas à venda de gelo natural,

como a poluição de rios e lagos, a necessidade de temperaturas mais baixas e problemas de logística. Um dos trabalhos pioneiros foi o de William Cullen, que em 1755 conseguiu obter gelo a partir da evaporação do éter. O processo, no entanto, não atraiu atenção, pois exigia a reposição do éter com o tempo. A primeira descrição completa de um ciclo de refrigeração fechado operando ciclicamente veio apenas em 1834, com Jacob Perkins. Tal ciclo estabeleceu a base para os ciclos de refrigeração existentes atualmente.

Foi somente décadas mais tarde que o circuito de Perkins virou realidade. James Harrison, em 1857, foi o responsável por transformar o princípio de compressão mecânica de vapor num equipamento real. Tal equipamento era capaz de produzir blocos de gelo para suprir as geladeiras da época, que consistiam em armários divididos em gavetas, com um grande bloco de gelo posicionado na parte superior. Apesar da revolução causada pelo equipamento de Harrison, que eliminava a necessidade de extração de gelo da natureza, o primeiro refrigerador doméstico, capaz de produzir frio artificialmente, foi concebido somente na metade do século XIX por Karl Von Linden. O conceito estabelecido por Von Linden tornou-se referência, evoluiu e os refrigeradores passaram a ser produzidos em larga escala. O sistema de refrigeração passou a ser hermético e a utilizar tubos capilares como dispositivo de expansão, por exemplo. Com o tempo, a movimentação de ar nos compartimentos deixou de ser feita por convecção natural e passou a ser promovida por um ventilador, e o degelo, que era manual, passou a ser realizado automaticamente com resistências elétricas. Tais modificações levaram ao surgimento dos refrigeradores frost-free (JACOBUS, 1967), amplamente disseminados atualmente.

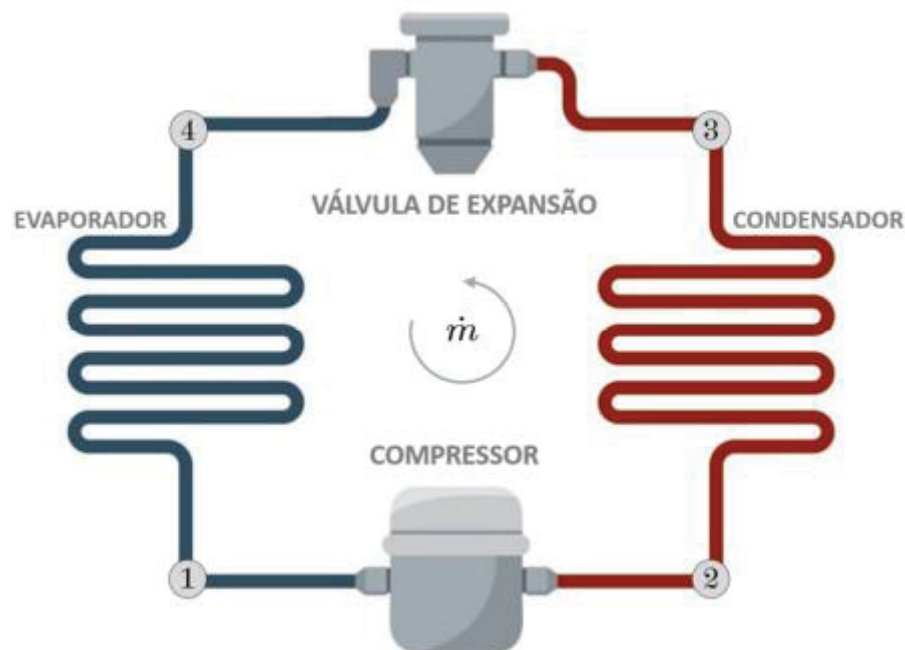
## **1.2. Sistema de compressão mecânica a vapor (CMV)**

Um ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor se baseia na capacidade de determinadas substâncias absorverem ou liberarem grandes quantidades de energia durante processos de mudança de fase (GOSNEY, 1982). A tecnologia tem dominado o mercado justamente por apresentar uma alta eficiência energética quando comparada às demais alternativas de produção de frio.

O sistema de refrigeração CMV é composto basicamente por 4 componentes principais, conforme mostrado na Figura 2, utilizando um fluido volátil como refrigerante. O refrigerante é mantido a baixa pressão e temperatura, no evaporador, e

a alta pressão e temperatura, no condensador, devido a ação contínua e simultânea do compressor e do dispositivo de expansão que limitam o ciclo em duas regiões, uma de alta e outra de baixa pressão (GONÇALVES, 2004). Assim, o sistema faz uso da mudança de fase do fluido refrigerante para transferir calor proveniente do ambiente interno, a baixa temperatura e pressão, para o ambiente externo, a alta temperatura e pressão, mediante o aporte de trabalho no compressor.

FIGURA 2 – CICLO PADRÃO DE COMPRESSÃO A VAPOR

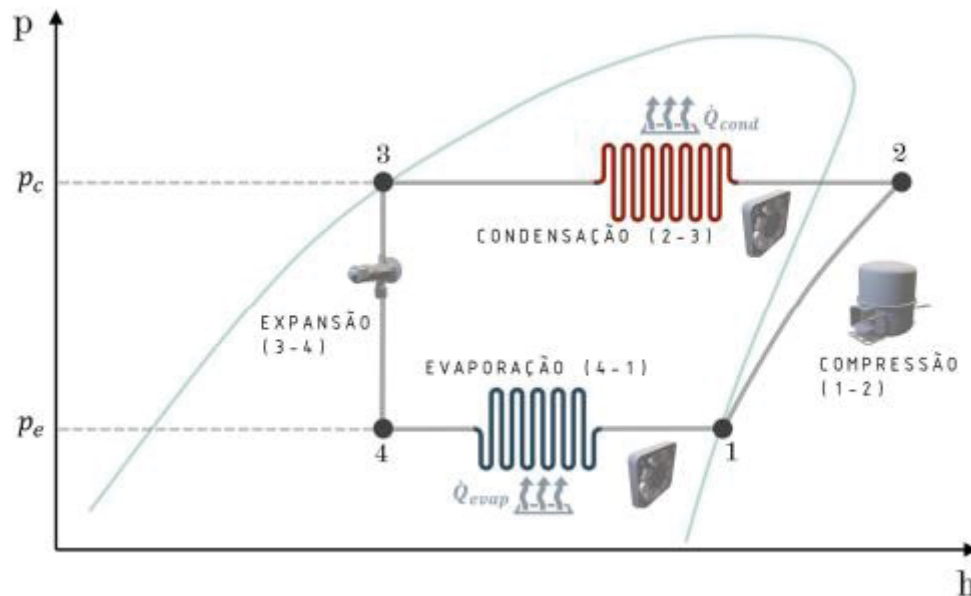


FONTE: O AUTOR (2020)

Na Figura 3, são apresentados os estados termodinâmicos do refrigerante ao longo do ciclo em um diagrama p-h (pressão - entalpia). Tomando o ponto 1 como partida, o compressor é responsável por comprimir o fluido até o ponto 2. Desse ponto em diante o fluido é resfriado e muda de fase, no condensador, até atingir o estado de líquido saturado no ponto 3. A jusante do condensador, o fluido passa pelo dispositivo de expansão, onde sua pressão é reduzida, juntamente com a temperatura, mas mantendo a entalpia constante. Por fim, o refrigerante entra no evaporador, sofrendo um processo de evaporação, mediante a absorção de calor do ambiente interno (entre os pontos 4 e 1) (STOECKER; JONES 1985). É importante perceber que, no ciclo teórico padrão, também conhecido como ciclo de Evans-Perkins, os pontos 1 e 3 situam-se sobre a linha de saturação. Conforme a análise do ciclo vai sendo aprofundada, aproximando-se do ciclo real, esses pontos começam a distar da

saturação, apresentando superaquecimento no evaporador e subresfriamento no condensador. A eficiência do ciclo é medida através da razão entre o calor absorvido no evaporador e o trabalho consumido pelo compressor, sendo denominado como coeficiente de performance, ou COP.

FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DO CICLO PADRÃO DE REFRIGERAÇÃO EM UM DIAGRAMA P-H



FONTE: O AUTOR (2020)

O dispositivo de expansão usualmente utilizado em sistemas de compressão mecânica de vapor de baixa capacidade é o tubo capilar, principalmente devido ao seu baixo custo e alta confiabilidade. Essencialmente, trata-se de um tubo longo, com 2 a 3 metros de comprimento e diâmetro da ordem de décimos de milímetro, conectando o condensador ao evaporador. Juntamente com a ação do compressor, o tubo capilar estabelece e mantém a vazão mássica do sistema, enquanto expande o fluido da pressão de condensação até a pressão de evaporação (MELO et al., 2002).

Uma alternativa amplamente utilizada para prover melhorias no desempenho do sistema é o ciclo com trocador de calor interno, ou trocador de calor tubo capilar-linha de sucção (TC-LS). Este trocador é concebido a partir do contato térmico entre o tubo capilar e a linha de sucção, em um arranjo contracorrente, de forma que calor é transferido do primeiro para o segundo, reduzindo assim o título na entrada do evaporador e aumentando a capacidade de refrigeração (e o COP) em até 20% para os refrigerantes mais utilizados em refrigeração comercial leve e doméstica, como o HC-290 e o HC-600, respectivamente (HERMES, 2013). Por outro lado, a aplicação do

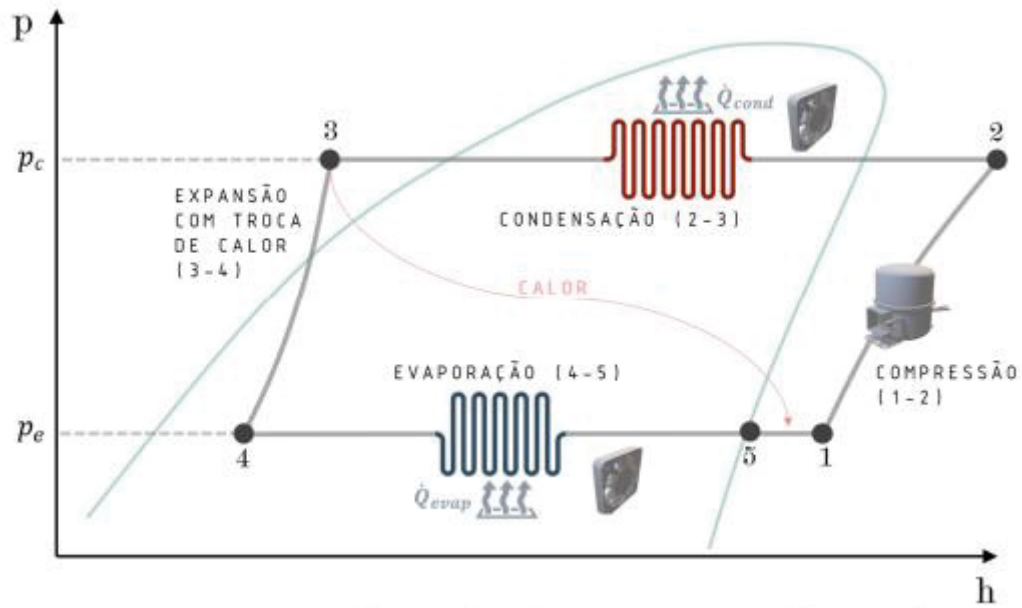
trocador de calor TC-LS no sistema de compressão de vapor afeta termodinamicamente o estado do fluido refrigerante na entrada do compressor, aumentando a temperatura e o volume específico correspondente na sucção, o que acaba por aumentar o trabalho específico de compressão. Assim, o benefício da aplicação deste trocador no sistema deve levar em conta a relação entre o ganho de capacidade de refrigeração e o aumento do trabalho de compressão, o que depende fortemente da combinação das propriedades do fluido e condições de operação (DOMANSKI et al., 1994). As Figuras 4 e 5 ilustram respectivamente o ciclo com trocador de calor tubo capilar-linha de sucção, os componentes envolvidos no ciclo e seus respectivos pontos (estados) em um diagrama p-h.

FIGURA 4 - CICLO DE REFRIGERAÇÃO COM TROCADOR DE CALOR TC-LS



FONTE: O AUTOR (2020)

FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO COM TROCADOR DE CALOR TC-LS



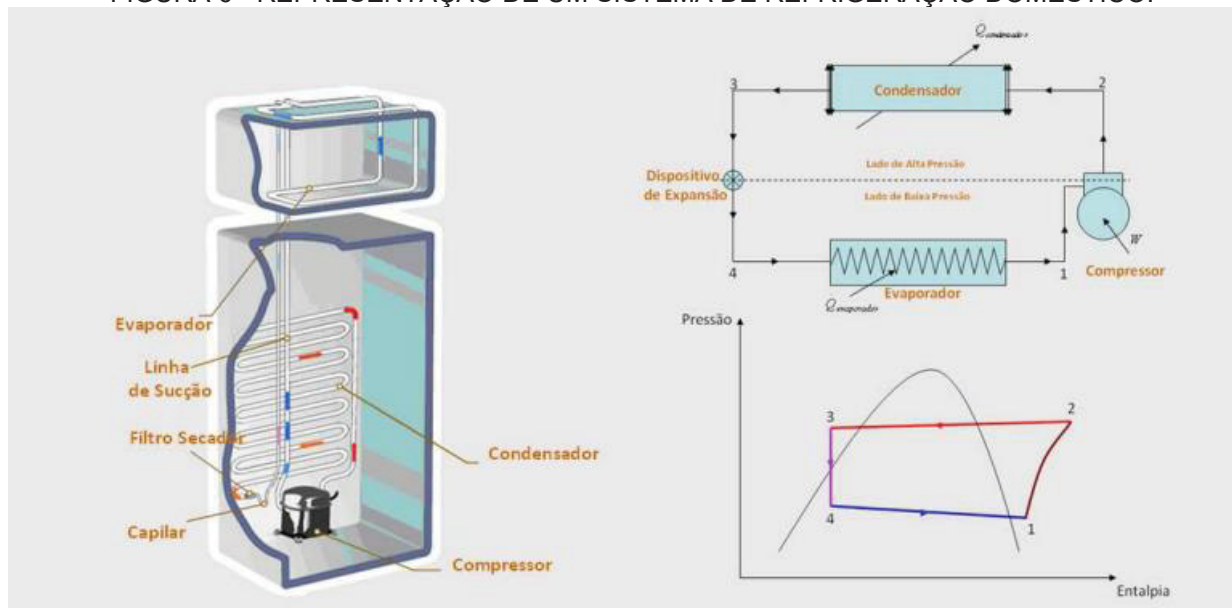
FONTE: O AUTOR (2020)

### 1.3. Os sistemas de refrigeração por compressão em refrigeradores e freezers

Os refrigeradores e freezers encontrados no mercado mundial seguem, em geral, o conceito do Ciclo Padrão de Compressão a Vapor (STOCKER e JABARDO, 2002). Houve melhorias nos componentes e nos produtos atuais, no entanto a concepção termodinâmica desses produtos é bastante similar aos fabricados antigamente.

O fenômeno frigorífico da refrigeração é resultante de transformações físicas sofridas por um fluido refrigerante durante seu percurso em um sistema fechado de refrigeração. Tal sistema é composto basicamente por um compressor, um evaporador e um mecanismo de expansão (no caso dos refrigeradores domésticos, um tubo capilar), conforme exposto pela Figura 6.

FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DOMÉSTICO.



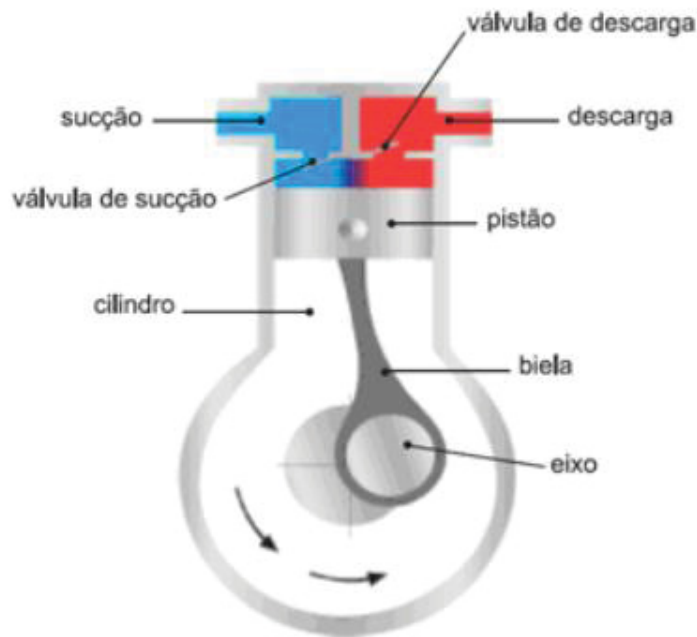
FONTE: O AUTOR (2020)

Observa-se pela Figura 6 que os sistemas de refrigeração são constituídos por cinco elementos principais:

- **Compressor:** O compressor é responsável por succionar o fluido refrigerante que retorna do evaporador e comprimi-lo por meio de uma bomba mecânica. Esse processo faz com que o refrigerante eleve acentuadamente suas pressões e temperaturas, chegando ao estado de vapor superaquecido (DINÇER, 2003). O trabalho ( $W$ ) necessário para o fenômeno de compressão nos refrigeradores domésticos advém de um motor elétrico de indução acoplado à bomba mecânica. A Figura 7 apresenta o mecanismo de compressão de um compressor alternativo

Os compressores alternativos utilizam um sistema biela-manivela-pistão e são os mais utilizados em refrigeradores e freezers por atenderem o nível de capacidade térmica necessários e também por apresentarem menor custo de fabricação (WOO e O'NEIL, 2006).

FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DE UM MECANISMO DE COMPRESSOR ALTERNATIVO.



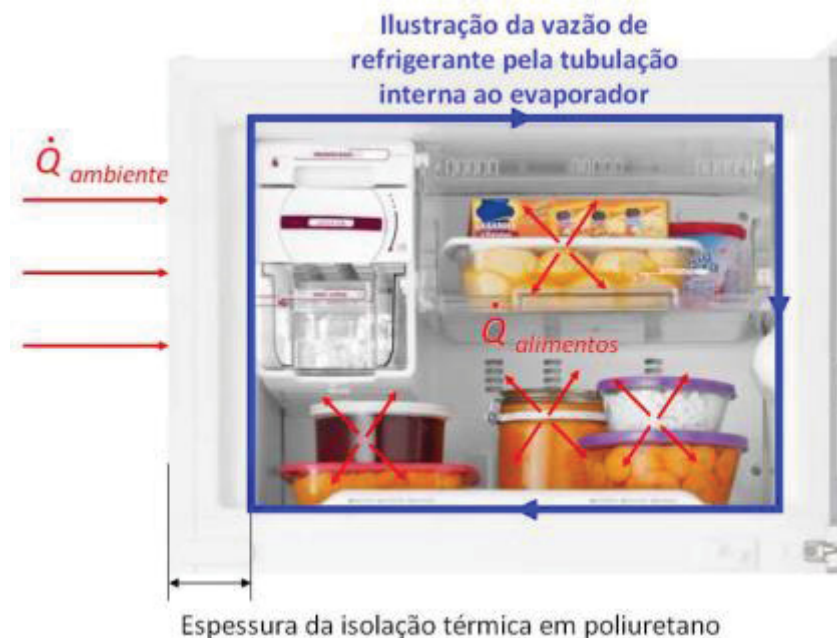
FONTE: O AUTOR (2018)

- Condensador:** O fluido refrigerante em alta pressão e temperatura, proveniente do compressor, realiza trocas térmicas com o meio externo ( $\dot{Q}_{\text{condensador}}$ ), transformando-se gradualmente em líquido; contudo mantém-se em alta pressão e temperatura. Nos refrigeradores domésticos os condensadores são constituídos basicamente de tubos amarrados na coloração preta, o que facilita a troca térmica com a temperatura ambiente.
- Válvula de Expansão ou Capilar:** Os mecanismos de expansão restringem a vazão de fluido refrigerante pelo sistema, fazendo com que sua vazão seja reduzida drasticamente. Esse processo faz com que sua pressão e temperatura também sejam bastante reduzidas. Nos refrigeradores domésticos, por exemplo, apresentam temperatura de evaporação de pôr volta de  $-23,3^{\circ}\text{C}$ .  
 Por apresentarem menor custo, nos refrigeradores domésticos convencionais os dispositivos de expansão normalmente utilizados são chamados de capilares. Trata-se de um tubo de cobre com diâmetro reduzido que recebe o fluido (já na fase líquida) do condensador e promove sua perda de carga, dividindo o sistema de refrigeração em um lado de alta e outro de baixa pressão (DINÇER, 2003);

- **Evaporador:** O evaporador recebe o fluido refrigerante do capilar, ainda na fase líquida, e inicia-se um processo de evaporação; por meio da absorção do calor presente na superfície da tubulação, o refrigerante obtém energia para sua evaporação.

A fonte de calor ( $\dot{Q}_{\text{evaporador}}$ ) nos refrigeradores domésticos são os alimentos e demais tipos de cargas térmicas a serem resfriadas ou congeladas ( $\dot{Q}_{\text{alimentos}}$ ), e também, o próprio calor ambiente ( $\dot{Q}_{\text{ambiente}}$ ), que tende a vencer ao longo tempo o isolamento térmico do refrigerador. A Figura 8 ilustra a troca térmica em um evaporador.

FIGURA 8 - ILUSTRAÇÃO DA TROCA TÉRMICA EM UM EVAPORADOR.



FONTE: O AUTOR (2017)

Ao longo de seu percurso no evaporador o refrigerante passa da fase líquida para o estado de vapor. É importante que, antes de retornar ao compressor, todo o refrigerante já se encontre totalmente em seu estado de vapor saturado, ou até mesmo de vapor superaquecido, onde não há a presença de líquido em sua composição. Por ser incompressível, a chegada de líquido ao compressor pode danificar o sistema e diminuir a concentração de óleo lubrificante na parte mecânica do compressor (STYLIANOU e NIKANPOUR, 1996).

- **Refrigerantes:** Fluidos frigoríficos, fluídos refrigerantes, ou simplesmente refrigerantes, são as substâncias empregadas como veículos térmicos na realização dos ciclos de refrigeração. Além de seu desempenho adequado no sistema de refrigeração a utilização de uma substância para uso em sistemas de refrigeração ultrapassa a sua não toxicidade ou possuir propriedades termodinâmicas adequadas. Rowland e Molina (1975) mostraram que o fluído refrigerante largamente utilizado nos sistemas de refrigeração, o CFC-12 (da família dos cloro-fluor-carbonos), possuía altíssimo índice de depreciação da camada de ozônio, o que fez com que fosse descontinuado na década de 90, embora seus efeitos ainda sejam sentidos (CALM et al, 1999; KANG et al 2011). No Brasil, o fluído mais utilizado em refrigeradores domésticos é o HFC-134a. Apesar de sua contribuição na degradação da camada de ozônio ser bastante pequena, sua contribuição ao efeito aquecimento global é significativa.

#### 1.4. Apresentação

A energia é essencial para a organização econômica e social de todos os países. As formas de produção e o consumo de energia apresentam uma série de impactos sobre o desenvolvimento econômico, social e o meio-ambiente, fazendo com que os recursos energéticos, e sua utilização, ocupem um papel de destaque no âmbito empresarial, governamental ou em áreas de pesquisa (PINTO JUNIOR et al 2007).

Ao longo da história o uso da energia tem contribuído para o desenvolvimento humano, propiciando melhores condições de moradia, saúde, transporte e acesso à informação, estendendo-se como uma das bases para a sociedade moderna, associado ao crescimento econômico e necessário frente ao aumento populacional mundial. Nos últimos 50 anos a demanda energética mundial triplicou e pode triplicar novamente nos próximos trinta anos (DIAS, 2007).

Nesse cenário, reduzir o consumo energético e utilizar fontes de energia mais eficientes, limpas e que diminuam os impactos quanto ao aquecimento global são fatores chave ao desenvolvimento humano e ao futuro do planeta.

O Brasil vive um momento de desenvolvimento onde a demanda por recursos é crescente (JAEGER, 2009; THE WORLD BANK, 2011); apesar da privilegiada presença de recursos naturais, problemas ambientais e racionamento podem ocorrer.

A política energética nacional é alvo de grande discussão: Rodrigues e Costa (2012) afirmam que desde o início do século XXI o estado tem direcionado a expansão energética pelo uso excessivo do petróleo, se distanciando do conceito de sustentabilidade e diversificação da fonte. Sauer (2013) relata que fontes alternativas de menor impacto ambiental, como a eólica e fotovoltaica, devem ter um progresso extraordinário nos próximos anos, entretanto esses meios têm uma participação e importância bastante reduzidas na esfera política brasileira.

No que diz respeito à geração de energia elétrica, o crescimento em sua utilização, altas temperaturas e os períodos de estiagem prolongada no final de 2012 e início de 2013 colocaram em risco o abastecimento nacional, intensificando o uso de termoeletricas para geração adicional de energia elétrica, trazendo à tona discussões sobre um possível racionamento (BOADLE, 2013; GASPAR, 2012).

Para suprir a demanda de energia elétrica elevada pelo crescimento econômico, o plano decenal publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), órgão filiado ao Ministério de Minas e Energia (MME), apresentou que a potência instalada do Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN) deve evoluir de 119,5 GW para 183,1 GW até o ano no período de 2013 a 2022. Essa evolução faz-se necessária para suprir a demanda por energia elétrica nacional anual, que passará de 520.000 GWh para 785.100 GWh de 2013 a 2022. Estima-se que o investimento necessário para esta expansão seja da ordem de R\$ 200 bilhões de reais (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA e EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013).

Embora os investimentos sejam estritamente necessários para o desenvolvimento da infraestrutura energética no país, a redução do consumo é fundamental na busca por sustentabilidade. Hinrichs e Kleinbach (2003) destacam duas maneiras de reduzir a quantidade de energia consumida: pelo ajuste técnico, caracterizado pelo uso de processos e produtos mais eficientes; e pela mudança do estilo de vida, que significa uma utilização mais consciente de um produto ou recurso. Entretanto, melhorar hábitos quanto ao consumo energético não é uma tarefa simples.

Com o crescimento econômico brasileiro nos últimos anos e ascensão social das camadas sociais pobres da população, eletrodomésticos, automóveis e bens de consumo têm seus níveis de produção e uso elevados, fazendo-se necessária a busca por produtos e processos cada vez mais eficientes energeticamente.

### 1.4.1. Política Energética Brasileira

Com as crises do petróleo ocorridas em 1973 e 1979, a percepção mundial voltou-se à necessidade de discutir o planejamento energético por uma óptica multisetorial. No Brasil, os anos seguintes à crise foram marcados por ações para redução da dependência energética externa, como a canalização de investimentos para exploração e extração do petróleo nacional, a criação de programas para substituição de combustíveis, como o Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL), e pelo maior uso de hidroeletricidade (JANUZZI, 2004).

Para promoção de estudos e expansão do sistema elétrico brasileiro, foi criado em 1982 o Grupo Coordenador de Planejamento dos Sistemas Elétricos (GCPS), órgão colegiado integrado por 35 empresas concessionárias, coordenadas pelas Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás). O modelo de expansão utilizado combinava um imposto único sobre a energia elétrica e créditos obtidos por empréstimos no exterior.

Em 1995, com o esgotamento da capacidade de investimentos do setor público para a expansão da infra-estrutura elétrica e a diminuição de acesso a créditos externos, o governo brasileiro promoveu uma ampla reestruturação, iniciando o processo de concessões ao capital privado para geração e transmissão de energia elétrica (SANTOS, 2000).

Com o expressivo aumento da participação do capital privado no país, em 2000, as atribuições do antigo GCPS passaram a ser coordenadas diretamente pelo Ministério de Minas e Energia (MME). No ano de 2004 iniciou-se um processo de reestruturação do planejamento energético no Brasil, definindo-se as principais entidades inseridas ao setor elétrico, bem como suas funções (ZIMMERMANN, 2007):

- Conselho Nacional de Política Energética (CNPE): órgão de assessoramento a presidência da república para homologação da política energética;
- Ministério de Minas e Energia (MME): responsável pela formulação e implantação de políticas para o setor energético;
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL): responsável pela regulação e fiscalização da produção, transmissão e comercialização de energia elétrica;
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE): responsável pela execução dos estudos de planejamento energético;

- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE): responsável pela administração da contratação das instalações de geração e liquidação das diferenças contratuais de todos os agentes do setor elétrico;
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS): responsável pela administração da contratação de instalações de transmissão;
- Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE): responsável pelo monitoramento das condições de suprimento de energia elétrica;
- Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás): exerce a função de holding das empresas estatais federais de energia elétrica; administra e encargos e fundos setoriais; realiza a comercialização de energia elétrica da hidroelétrica Itaipu Binacional e de fontes alternativas de energia – PROINFA.

No que se refere à conservação do consumo de energia, as primeiras ações governamentais datam de 1985, quando foi criado o Programa Nacional de Conservação de Energia (PROCEL), sendo gerido por uma Secretaria-Executiva subordinada a Eletrobrás. O programa teve atuação discreta até os anos de 2001 e 2002, quando ocorreu a crise energética conhecida como “apagão”, iniciando um racionamento imediato de 20% do consumo de energia elétrica nacional (GALL, 2002; SOUZA, RODRIGUES e REIS, 2004). Mediante a crise, o PROCEL promulgou suas atividades em aparelhos eletrodomésticos de maior consumo energético, inserindo-os no Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) e delimitando índices de eficiência energética para que pudessem ser comercializados, o que culminou ao longo dos anos em avanço tecnológico em condicionadores de ar, refrigeradores, freezers entre outros eletrodomésticos (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012).

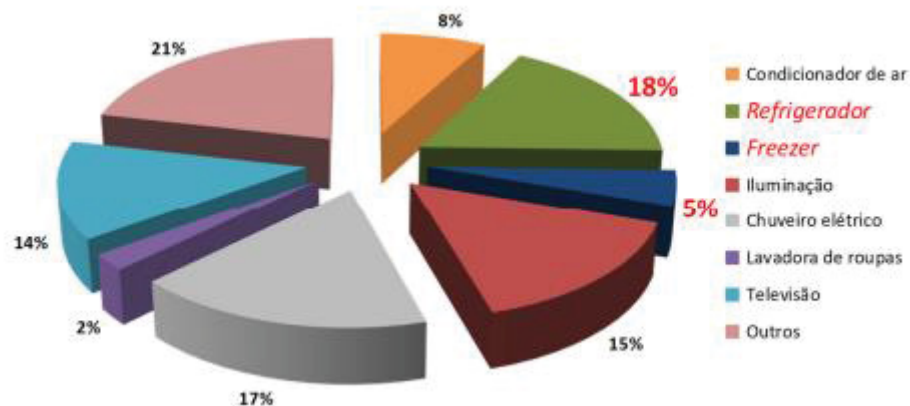
#### 1.4.2. Políticas governamentais e consumo de energia

Sistemas de refrigeração operam de acordo com a segunda lei da termodinâmica e, dessa forma, exigem a realização de trabalho no compressor e, conseqüentemente, consomem energia. As irreversibilidades inerentes ao ciclo somadas à baixa eficiência de seus componentes contribuem para o aumento do consumo de energia. O baixo coeficiente de performance dos refrigeradores e fatores ambientais como aquecimento global e efeito estufa, com o passar do tempo,

aumentaram o nível de preocupação da sociedade com o consumo de energia, que passou então a ter um papel importante no setor de refrigeração.

No Brasil, por exemplo, pesquisas relacionadas ao panorama energético do Brasil revelaram que em 2014 o consumo de energia elétrica foi de 473,4 bilhões de kWh, sendo que 132 bilhões de kWh corresponderam ao consumo residencial, ou seja, 28% do total (PROCEL, 2015). De acordo com dados de 2014 da Empresa de Pesquisa Energética – EPE, refrigeradores e freezers representam 23% do consumo residencial (ver Figura 9) e 6% da matriz energética do país.

FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA RESIDENCIAL NO BRASIL



FONTE: EPE (2014)

A relevância dada ao consumo de energia de refrigeradores levou ao surgimento de políticas governamentais e programas de etiquetagem e classificação energética. Com o objetivo de auxiliar e fornecer subsídios aos consumidores na hora da compra e estimular a competitividade entre os fabricantes na busca por sistemas mais eficientes, em 1984, foi criado o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). A etiqueta, mostrada na Figura 10, informa entre outros parâmetros o volume interno do refrigerador, a classificação energética e o consumo de energia. Adicionalmente, em 1993, foi criado o chamado Selo Procel de Economia de Energia, de responsabilidade do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), concedido aos equipamentos com classificação A de acordo com os critérios do PBE.

FIGURA 10 - ETIQUETA DE CLASSIFICAÇÃO ENERGÉTICA (ESQUERDA) E SELO PROCEL (DIREITA)



FONTE: O AUTOR (2019)

O governo brasileiro, a exemplo de outros países, estabelece periodicamente novas metas de consumo de energia e novas classificações energéticas para os refrigeradores domésticos. Até 2005, os refrigeradores no Brasil eram classificados, em termos de consumo de energia, de A (mais eficiente) até G (menos eficiente). Em 2006, os níveis mínimos de eficiência energética para cada classe foram reduzidos, incentivando a produção de produtos cada vez mais eficientes. Além disso, a comercialização de refrigeradores classificados como F e G foi proibida (BOENG, 2012).

Já na Europa, novas classes foram introduzidas em 2004 e 2010, como A+, A++ e A+++, que são respectivamente 25, 60 e 150 % mais eficientes que um produto classe A (Directive 2003/66/EC, CECED, 2011).

### 1.5. Justificativa

Embora a implantação do PBE tenha trazido grandes benefícios e reduções no consumo energético brasileiro, a evolução do programa mostra-se tímida frente ao desenvolvimento econômico e social ocorrido no Brasil nos últimos anos e projetado para o futuro. No que diz respeito ao consumo de energia elétrica residencial, tema

central desta tese, a evolução da eficiência energética dos produtos comercializados no país é pouco significativa.

Em 2012, o consumo de energia elétrica no setor residencial brasileiro correspondeu a 23,6% de toda a energia elétrica consumida no país, apenas atrás do setor industrial, que consome 42,3% da energia gerada. Em termos gerais, o consumo energético do país cresce vertiginosamente; no período de 1990 a 2012 o consumo de energia elétrica mais que duplicou (THE WORLD BANK, 2013).

Em 1990, o consumo de energia elétrica no setor residencial foi de 48.666 GWh, já em 2012 o valor consumido foi de 117.646 GWh, representando uma variação relativa de 142% (THE WORLD BANK, 2013). Um aumento substancialmente maior que o crescimento populacional de 34% no mesmo período (UNITED NATIONS, 2012);

Nos Refrigeradores e Freezers, produtos de alta relevância no consumo em uma residência, os índices de eficiência energética foram estabelecidos ainda em 2005.

Sendo assim, neste trabalho, apresenta-se opções de tecnologias utilizadas em refrigeradores, a fim de amenizar o consumo energético, que já são realidade para alguns fabricantes, e outras em fase de estudos pelos mesmos e/ou em universidades.

## **1.6. Objetivo**

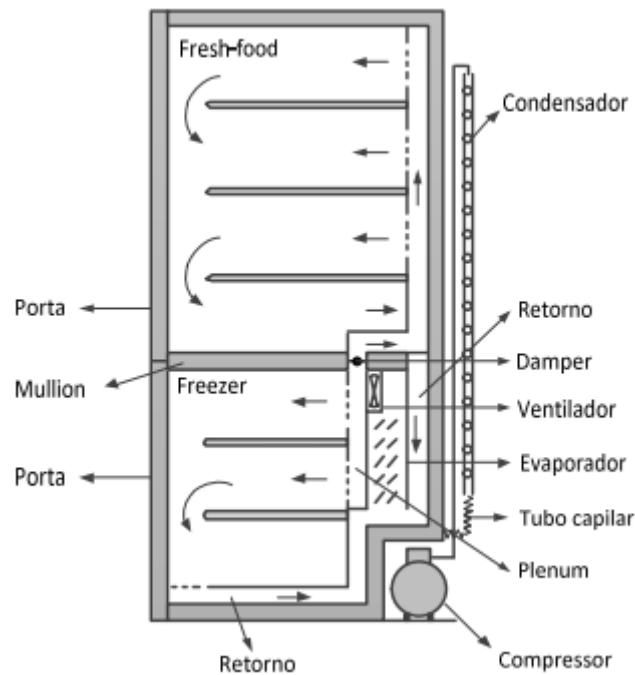
O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar as tecnologias impactantes ao consumo de energia elétrica de refrigeradores e freezers e propor um conjunto de ações que resultem no uso de tecnologias mais eficientes nos próximos anos. O uso de tecnologias mais eficientes deve contribuir para o desenvolvimento econômico e ambiental no país.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As medidas governamentais e a mudança de mentalidade dos consumidores têm pressionado as indústrias do ramo a investir na pesquisa e desenvolvimento de sistemas mais eficientes. Nesse sentido, várias foram as alternativas adotadas ao longo dos anos visando à diminuição do consumo de energia. Todavia, muitas delas estão no limiar do seu potencial ou apresentam um impacto limitado sobre o desempenho do refrigerador. Um primeiro exemplo diz respeito ao circuito interno de ar em refrigeradores frost-free.

A Figura 11 ilustra o gabinete de um refrigerador do tipo bottom-mount de dois compartimentos, freezer e fresh-food. Um ventilador insufla o ar frio em um plenum, de onde é distribuído para cada compartimento. A distribuição da vazão é controlada por um damper, cuja abertura é comandada pela temperatura do fresh-food. O ar retorna ao evaporador por dutos instalados nas paredes traseira e inferior do freezer, fechando o ciclo. Assim, o dimensionamento correto da geometria do circuito de ar tem como objetivo minimizar as perdas ocasionadas por grades, dutos, prateleiras, orifícios e o próprio damper, de forma a favorecer o escoamento e diminuir a potência consumida pelo ventilador. Alguns fabricantes revelam que melhorias no circuito de ar podem reduzir o consumo de energia em até 10% (BOENG, 2015). Porém, em muitos casos o circuito de ar já é bem dimensionado, havendo pouco espaço para aprimoramentos que tenham um impacto relevante sobre o consumo de energia do refrigerador.

FIGURA 11 - SISTEMA DE CIRCULAÇÃO DE AR DE UM REFRIGERADOR FROST-FREE BOTTOM-MOUNT



FONTE: O AUTOR (2020)

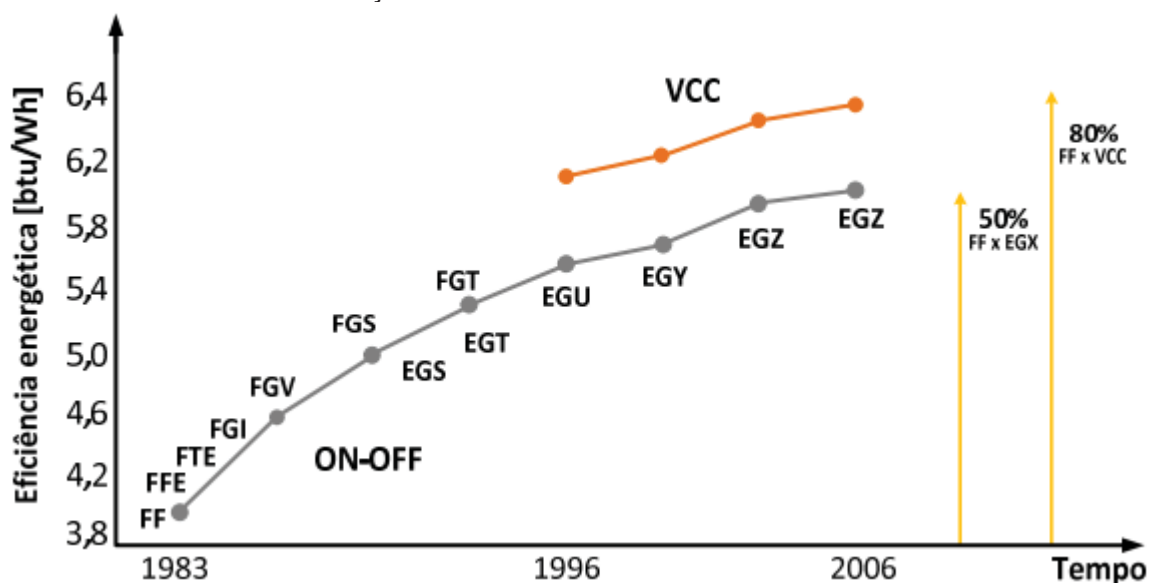
A otimização do circuito de ar também está atrelada à escolha adequada do ventilador, o qual deve ser capaz de suprir de maneira eficiente o diferencial de pressão necessário. Contudo, a gama de ventiladores disponíveis é limitada por questões de custo, impedindo muitas vezes o uso de modelos de alta eficiência ou de rotação variável. Dessa forma, a maioria dos refrigeradores trabalha com ventiladores de baixa performance e de rotação constante, que não permitem a variação da vazão de ar em função das diferentes condições de operação do sistema, restringindo os possíveis ganhos relacionados à otimização do circuito de ar a uma dada condição de projeto.

No que tange os trocadores de calor, a grande maioria dos sistemas domésticos adotam evaporadores do tipo tubo-aleta e condensadores do tipo arame-sobre-tubo (TAGLIAFICO e TANDA, 1997, MELO e HERMES, 2009). No caso do evaporador, o tipo tubo-aleta no-frost é o mais usado e sua geometria já foi extensivamente estudada (KARATAS et al., 1996, LEE et al., 2002, BARBOSA et al., 2009). Porém, por mais que as aletas sejam aperfeiçoadas, os ganhos obtidos no coeficiente externo de transferência de calor podem não representar uma redução significativa no consumo de energia. O mesmo pode ser dito sobre o condensador. No caso do modelo arame-sobre-tubo de convecção natural, a única alternativa é o aumento da área, mas esta é limitada pelo espaço físico disponível. Vários tipos de

condensadores também aramados, mas submetidos à convecção forçada, já foram avaliados (BARNES e BULLARD, 2000, LEE et al., 2001, BARBOSA e SIGWALT, 2012, RAMETTA, 2017). Na maioria dos casos, o seu uso, em substituição aos modelos de convecção natural, acarreta uma redução no consumo de energia. Todavia, em muitos países a preocupação da população com ruído impede o uso de ventiladores no condensador. Além disso, alguns dos refrigeradores mais eficientes já contam com condensadores de convecção forçada, sendo novamente o aumento da área a única alternativa. Mesmo que haja espaço disponível, o aumento da área nem sempre leva a um melhor desempenho, uma vez que o comportamento da taxa de transferência de calor é assintótico em relação à área (HERMES et al., 2009). O mesmo vale para o aumento da vazão de ar.

Assim como os trocadores de calor, o compressor também está no seu limiar de eficiência (MELO e SILVA, 2010). A Figura 12 mostra uma evolução da eficiência de compressores alternativos ao longo dos anos. Melhorias têm sido continuamente feitas nos seus componentes internos (COATES, 1972, JOHNSON, 1974, SCHROEDER, 1976, PERUZZI, 1980, FRY, 1992, POSSAMAI e TODESCAT, 2004 e COLMEK, 2014), tais como válvulas, mancais, cilindro, muffler, bomba de óleo, mas com um ganho de performance percentualmente menor em relação ao obtido anos atrás.

FIGURA 12 - EVOLUÇÃO DA EFICIÊNCIA DE COMPRESSORES ALTERNATIVOS



FONTE: EMBRACO (2009)

Refrigeradores domésticos, em sua maioria, utilizam compressores alternativos de velocidade constante, com controle on-off. Com o intuito de acelerar o transiente de partida do produto, é prática comum instalar compressores com capacidades bem acima da requerida para atingir as temperaturas necessárias. Desse modo, o compressor deve ligar e desligar periodicamente para manter a temperatura desejada, o que acarreta perdas (JANSSEN et al., 1992, BAGARELLA et al., 2013). Compressores superdimensionados, mesmo que eficientes, consomem mais que o necessário. Nesse contexto, compressores de capacidade variável surgiram como uma alternativa promissora, pois permitem a variação automática da rotação e, conseqüentemente, da capacidade de refrigeração. Ganhos de performance da ordem de 30% foram observados por diversos fabricantes. Contudo, a lógica de atuação do inversor de frequência ainda pode ser melhorada (VELÁSQUEZ et al., 2014).

O dispositivo de expansão utilizado em praticamente 100% dos refrigeradores é o tubo capilar, que nada mais é que um tubo de diâmetro interno bastante reduzido e comprimento relativamente longo. O dimensionamento de tal dispositivo deve ser feito com base nas pressões de trabalho e na carga térmica imposta ao refrigerador. Como a área transversal é fixa, uma vez dimensionado, o tubo capilar não permite que o sistema de refrigeração se adapte a condições de operação diferentes daquela para a qual ele foi projetado, reduzindo a eficiência energética do refrigerador.

O ideal é que o sistema desenvolva capacidades de refrigeração que se aproximem ao máximo da carga térmica a qual ele é submetido e, dessa forma, não haja as oscilações de temperatura características do padrão on-off de ciclagem e, conseqüentemente, desperdício de energia. Todavia, nem sempre essa adequação entre carga térmica e capacidade de refrigeração é alcançada de maneira eficiente, uma vez que a restrição do tubo capilar é fixa. Isso porque o dispositivo de expansão deve regular o grau de superaquecimento na saída do evaporador de forma a mantê-lo adequadamente preenchido com fluido bifásico, independentemente da rotação de trabalho do compressor ou das temperaturas interna e externa do refrigerador. Um grau de superaquecimento elevado reduz a efetividade do evaporador e conseqüentemente a capacidade de refrigeração (PÖTTKER, 2006). Vê-se, com isso, a necessidade de dispositivos de expansão que tenham ação variável, como válvulas termostáticas ou eletrônicas, por exemplo.

As válvulas de expansão termostáticas (TEVs) são bastante comuns em sistemas de médio porte, onde regulam a vazão mássica de refrigerante numa ampla

faixa de operação por meio do controle do grau de superaquecimento no evaporador. Contudo, para capacidades de refrigeração inferiores às nominais, as TEVs podem apresentar instabilidades no controle do superaquecimento, aumentando o consumo de energia do refrigerador. Tais instabilidades podem ser ainda mais pronunciadas em sistemas com compressores de velocidade variável, onde a variação de capacidade pode ser consideravelmente superior à de sistemas com compressores de velocidade fixa. As válvulas de expansão eletrônicas (EEVs), por sua vez, apesar de similares às termostáticas, têm a abertura do orifício feita eletricamente, e não mecanicamente. Dessa forma, por permitirem um controle eletrônico da abertura de passagem, as EEVs têm um tempo de resposta inferior às termostáticas e promovem um controle mais estável do superaquecimento no evaporador. O uso de válvulas desse tipo ainda é restrito em sistemas de pequeno porte devido à dificuldade de se encontrar modelos que, além de reunirem as características anteriormente citadas, tenham uma faixa de abertura adequada às condições de pressão e vazão mássica tipicamente encontradas na prática.

## **2.1. Tecnologias que podem diminuir o consumo de energia elétrica doméstico no Brasil**

Conforme discutido no capítulo anterior a utilização de refrigeradores e freezers são uns dos maiores impactantes no consumo de energia elétrica residencial no Brasil. Esses produtos atualmente são regulamentados pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), sendo etiquetados conforme sua eficiência junto ao Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), que busca classificar os produtos de maior eficiência energética.

A eficiência de um sistema pode ser definida como sendo a capacidade desse sistema de utilizar, da melhor maneira possível, os recursos disponíveis e de aproveitar, ao máximo, as condições ambientais para obter o desempenho ótimo em alguma dimensão (MARIANO, 2007). Neste trabalho o aumento de eficiência energética está associado a produtos que desempenhem funções semelhantes, porém com menor consumo de energia.

As metas de redução e os limites máximos de consumo de energia são continuamente atualizados, obrigando os fabricantes a melhorar constantemente a eficiência de seus produtos (PÖTTKER, 2006).

No Brasil os rótulos de Eficiência Energética são usados de forma voluntária desde 1989. No ano de 2001, mediante a crise energética, o governo brasileiro introduziu a Lei 10.295 (BRASIL, 2001) e padrões de mínima eficiência passou a ser obrigatória para os equipamentos elétricos adquirirem a Etiqueta de Eficiência Energética (ENCE) ou Selo PROCEL.

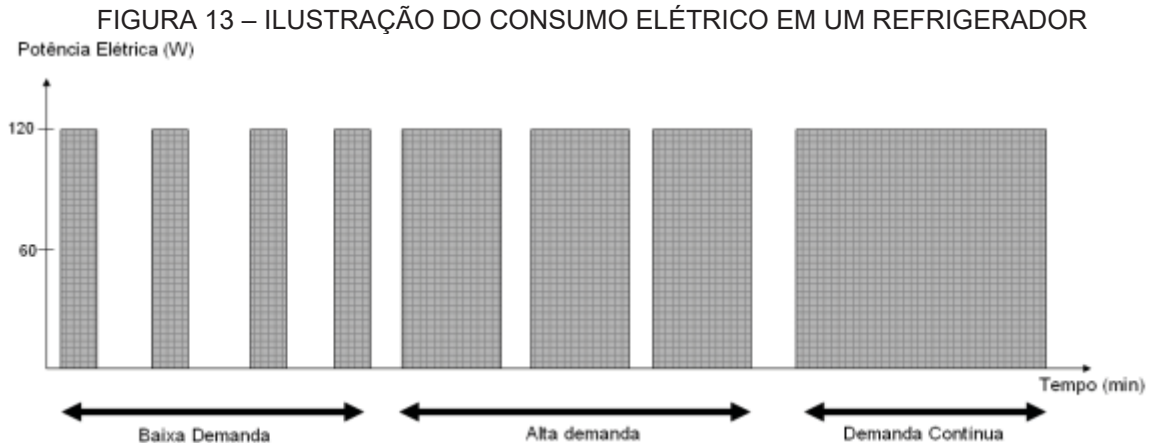
Embora os produtos em discussão sejam etiquetados quanto à sua eficiência, entende-se que ainda há espaço para melhoria: a concepção de tecnologia primária desses produtos permanece a mesma ao longo dos anos, fazendo com que novas tecnologias disponíveis ao redor do mundo possam ser utilizadas. Além disso, as alterações quanto os índices de eficiência para cada produto carecem de atualização.

### 2.1.1. Novas tecnologias aplicáveis à refrigeração doméstica no Brasil

#### 2.1.1.1. *Os compressores com velocidade de refrigeração variável*

Em todo o processo de um sistema de refrigeração doméstico, o compressor é responsável por fornecer trabalho ao fluido refrigerante. Entretanto, seu funcionamento não é contínuo; existe, no interior dos refrigeradores, termostatos ou sensores eletrônicos (ajustáveis) que controlam seu período ligado e desligado em função da temperatura interna no produto (HERMES, 2006).

Muitos são os fatores que afetam o consumo de energia de um refrigerador, entre eles a eficiência do compressor (capacidade de refrigeração em função de seu consumo), o fluido refrigerante utilizado e sua isolamento térmica (à medida que o material é mais isolante, menor é a troca de calor entre o gabinete e o meio externo, fazendo com que o produto fique frio por mais tempo; não sendo necessário o funcionamento do compressor) (DINÇER, 2003). A Figura 13 exemplifica o consumo de energia em um refrigerador.



No período de Baixa Demanda, o refrigerador provavelmente não sofre com muitas aberturas de suas portas para uso, o que propicia menor entrada de calor externo ao seu interior. Assim, o compressor fica em funcionamento por menos tempo, em ciclos espaçados, caracterizando menor consumo de energia.

Já no período de Alta Demanda, quando o refrigerador é utilizado mais vezes ocorre, também, uma maior quantia de carga térmica (alimentos, sucos, refrigerantes, etc.). Observa-se, então, que o sistema necessita maior tempo de funcionamento para suprir a demanda para absorção de calor.

No período de Demanda Contínua entende-se, por exemplo, que uma grande quantidade térmica foi inserida no produto, fazendo com que sistema tenha que funcionar continuamente.

O sistema de refrigeração da Figura 13 ilustra o uso de um compressor alternativo com rotação constante; em países como o Brasil, onde a frequência da energia gerada é 60Hz, os compressores funcionam em uma rotação próxima a 3600 RPM. A cada rotação do compressor, o pistão compressor (Figura 7) emite o refrigerante comprimido para os demais componentes do sistema. Desta maneira, a capacidade do compressor é fixa: ou ele está desligado, ou está ligado em sua rotação nominal.

Desta forma, o sistema acaba sendo projetado para atender a máxima carga térmica necessária, já que o compressor estará ligado (capacidade máxima) ou desligado (não há bombeamento de fluido refrigerante pelo sistema).

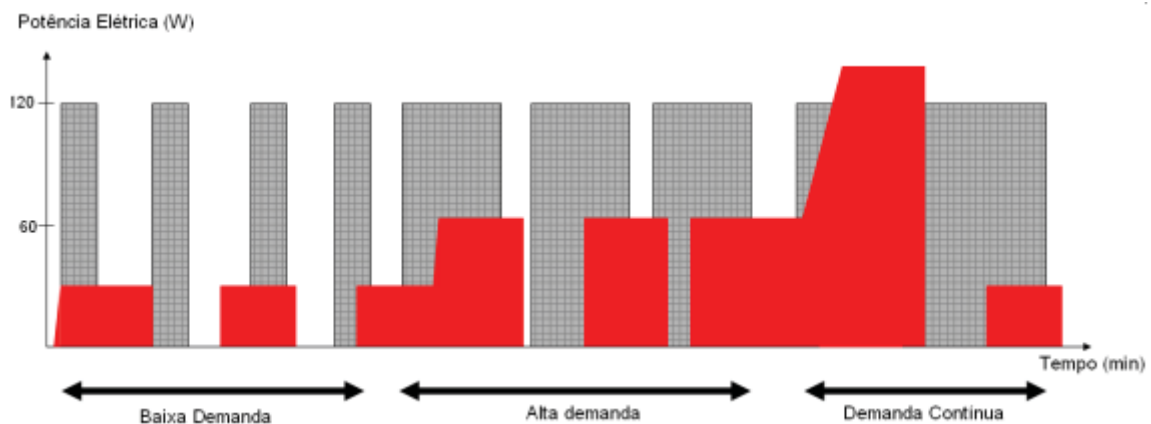
Ao longo dos anos, percebeu-se que o uso de compressores que pudessem variar sua velocidade de rotação em função da carga térmica exigida pelo sistema poderia ser um grande recurso para a economia de energia. O primeiro conceito deste

tipo de equipamento surgiu na Universidade de Purdue nos Estados Unidos; Cohen et al (1974) estimaram que uma economia entre 28% a 35% poderia ser obtida pela utilização de compressores que pudessem variar sua capacidade frigorífica. Lida et al (1982) utilizaram compressores de capacidade variável em bombas de calor, obtendo redução no consumo energético em até 26%, quando comparados a um compressor convencional.

Os resultados positivos fizeram com que este tipo de tecnologia evoluísse ao longo dos anos, fazendo com que a partir da segunda metade da última década este conceito fosse bastante aplicado em refrigeradores e freezers de alta eficiência, principalmente no Japão, Europa, Estados Unidos e Canadá (TASSOU e QUERESCHI, 1996; DONLON et al, 2002; PÖTTKER, 2006; MARCINICHEN et al, 2008).

A Figura 14 ilustra o consumo de energia de um sistema aplicado com um compressor alternativo de velocidade variável frente a um sistema aplicado com compressor comum, fazendo um comparativo com a Figura 10.

FIGURA 14 – ILUSTRAÇÃO DO CONSUMO ELÉTRICO EM UM REFRIGERADOR EQUIPADO COM COMPRESSOR DE VELOCIDADE VARIÁVEL



FONTE: ADAPTAÇÃO DE MAASS (2011)

A rotação do compressor se adequa à necessidade frigorífica do sistema: em períodos de Baixa Demanda, o compressor trabalha em uma velocidade de rotação baixa e, à medida que a demanda por frio se eleva, a velocidade de rotação do compressor aumenta, propiciando maior vazão de fluido refrigerante para o sistema.

Em termos mecânicos, o conceito de um compressor de velocidade variável é similar ao de um compressor comum. Já quanto ao motor elétrico (que movimenta o kit mecânico), existem diferenças consideráveis: os compressores comuns apresentam motores de indução monofásicos que têm alimentação em corrente alternada (AC),

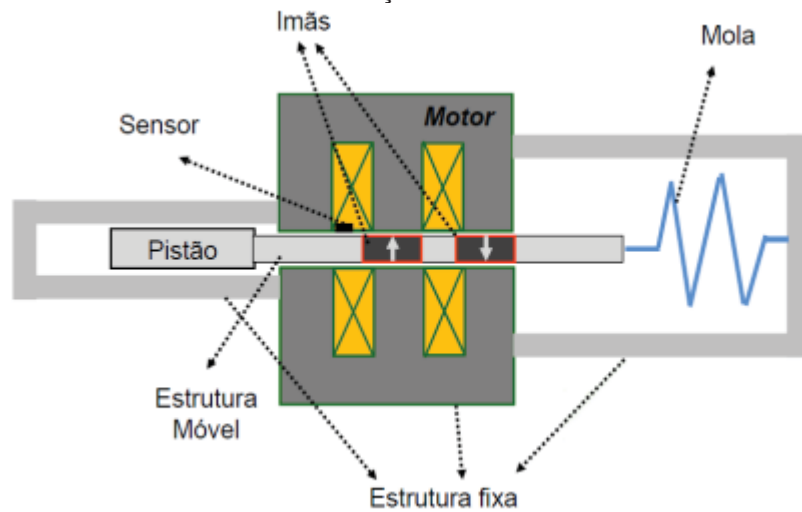
fazendo com que sua rotação seja dependente da frequência da geração da rede elétrica; já os compressores de velocidade variável funcionam em corrente contínua (DC), fazendo com que sua rotação seja associada à variação de frequência solicitada por uma placa eletrônica de controle. Percebe-se que este tipo de equipamento necessita de sinais digitais e recurso eletrônico para o funcionamento. Assim, deve se utilizar na alimentação um inversor de frequência para que seja possível alimentar o produto em AC e operá-lo em DC (TOMASELLI, 2004; HA, 2006).

Fica evidente que existem custos para utilização desta tecnologia; no entanto, os produtos mais recentes com esta funcionalidade fornecem uma economia de energia de cerca de 30% (PÖTTKER, 2006; MAASS, 2011). Em 2012 a empresa Panasonic iniciou a produção de refrigeradores com essa tecnologia no Brasil com foco no mercado high-end, que consiste em produtos de valor agregado a pessoas de alto poder aquisitivo.

#### *2.1.1.2. Refrigeradores com tecnologia de compressores lineares*

Além dos compressores de velocidade variável, nos últimos anos tem se intensificado a pesquisa sobre o uso de compressores lineares. Tais compressores usam o princípio de um motor elétrico mais simples e não tem a necessidade de uma biela para revolucionar o eixo e o pistão (SUH, HEO e KIM, 2006; LEE et al 2008). A Figura 15 ilustra seu conceito.

FIGURA 15 – ILUSTRAÇÃO DE UM COMPRESSOR LINEAR



FONTE: MAASS (2011)

Nos compressores lineares, o mecanismo que propicia a compressão do refrigerante também é um pistão; no entanto, é a potência gerada pelo motor em “H” que faz com que o pistão se desloque contrapondo uma mola de retorno. À medida que o sistema necessita de maior capacidade térmica, a potência gerada no motor elétrico aumenta, vencendo a força da mola e gerando maior deslocamento. Em uma situação em que há necessidade de refrigeração menor, a potência gerada pelo motor também é menor, gerando menor compressão da mola e, conseqüentemente, um curso menor do pistão (BAILEY, DADD e STONE, 2011). Assim este tipo de sistema possui capacidade de refrigeração variável e, além disso, seu conceito mecânico é mais eficiente do que os dos compressores alternativos. Com a tecnologia linear podem ser obtidas reduções no consumo energético em valores superiores a 30% (BROADHURST e ORR, 2010).

A empresa sul-coreana *LG Eletronics* e a empresa neozelandesa *Fisher & Paykel* (em parceria com a empresa *Embraco*) são os primeiros grupos a investirem nesta tecnologia promissora lançando produtos no mercado.

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre produtos comercializados no mercado brasileiro que apresentam as tecnologias apresentadas até então.

TABELA 1 – REFRIGERADORES COMERCIALIZADOS NO BRASIL

<i>Fabricante</i>	<i>Índice de Eficiência Energética (C/Cp)</i>	<i>Varição de Eficiência Energética</i>	<i>Código de Modelo do Produto</i>	<i>Classe no Selo Procel</i>
Electrolux (compressor alternativo comum)	0,840	-	DFW48	A
Whirlpool / Consul (compressor alternativo comum)	0,805	-4,17%	CRM34G	A
Whirlpool / Kitchen Aid* (compressor alternativo comum)	0,780	-7,14%	KRK55	A
Mabe / GE (compressor alternativo comum)	0,971	15,60%	ZICS360	D
Electrolux (compressor alternativo velocidade variável)*	0,694	-17,38%	SSI79	A
Panasonic (compressor alternativo velocidade variável)	0,623	-25,83%	NR-B461YZ-W3	A
LG (compressor linear)*	0,616	-26,67%	GC-L217BSKV	A

FONTES: INMETRO (2012)

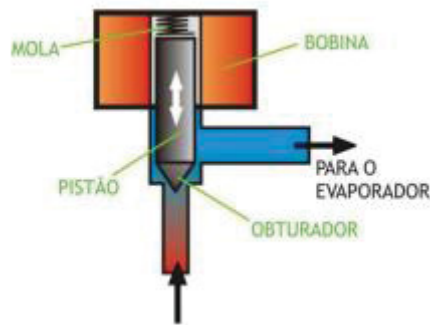
O Índice de Eficiência Energética (C/Cp) é uma medida desenvolvida pelo Procel. Sua composição considera o valor de consumo atual do produto (C) dividido pelo consumo padrão (Cp), que se refere ao valor médio de consumo em produtos equivalentes em 2001, ano em que foi implantada a certificação compulsória de refrigeradores e freezers quanto à eficiência energética. Quanto menor o índice, mais eficiente é o refrigerador.

A terceira coluna da Tabela 1, Variação de Eficiência Energética, apresenta o grau de eficiência dos produtos, tomando como referência o produto DFW48 da Electrolux, um exemplo comum de produto selo A no Brasil. Observa-se que os produtos em velocidade variável superam, em média, 20% a eficiência energética dos refrigeradores comuns (tipo On/Off) selo A.

### 2.1.1.3. Válvulas de expansão eletrônicas

No final da década 90, acompanhando a explosão na tecnologia de computadores, de microchips e de PLCs (Controladores Lógico-Programáveis) as Válvulas de Expansão Eletrônicas foram introduzidas nos produtos de refrigeração (DERN, 2005). Este tipo de equipamento substitui a utilização de capilares, controlando a vazão do sistema antes da entrada do evaporador, fazendo com que as temperaturas sejam atingidas mais rapidamente, o que gera menor consumo energético (CHOI e KIM, 2003). Apesar de propiciar melhoria técnica aos produtos, este tipo de dispositivo não é utilizado no Brasil, já que apresenta maior custo. Segundo Pöttker (2006) a aplicação desses dispositivos, combinada à aplicação de compressores de velocidade variável, implica na redução de 13% do consumo energético em relação aos sistemas com compressores com velocidade variável e capilares. A Figura 16 ilustra o funcionamento de uma Válvula de Expansão Eletrônica.

FIGURA 16 – ESQUEMA DE UMA VALVULA DE EXPANSÃO ELETRÔNICA



FONTE: PÖTTKER (2006)

À medida que há necessidade de frio, o sensor interno do refrigerador (termostato eletrônico) emite sinais eletrônicos para uma placa de controle, que por sua vez aumenta a corrente que passa pela bobina, fazendo com que o pistão suba, permitindo maior vazão de refrigerante ao evaporador. Conforme atingisse a temperatura desejada, a corrente diminui e a mola força o pistão para baixo, restringindo a vazão para o evaporador.

#### 2.1.1.4. Fluidos refrigerantes aplicados em refrigeradores domésticos no Brasil

Com a descoberta dos impactos maléficos causados pelo R12 (CFC-12 ou CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) na camada de ozônio, o uso deste refrigerante foi descontinuado em todo o mundo, conforme acordado pelo Protocolo de Montreal em 1987. Embora os países desenvolvidos tenham eliminado seu uso em 1996, países em desenvolvimento tiveram um programa progressivo de proibição do uso. No caso do Brasil, somente no ano de 2010 a comercialização deste refrigerante foi totalmente proibida. Entretanto, seguindo as resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, desde 1999 os refrigeradores e freezers fabricados já não utilizam mais o R12 (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2000).

Os fabricantes migraram em para o R134a (HFC-134a ou C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>4</sub>), que se trata de uma solução da família dos hidro-fluor-carbonos desenvolvida pela DuPont que se caracteriza principalmente por não agredir a camada de ozônio e apresentar propriedades termodinâmicas bem próximas do R12, o que facilitou a migração (DUPONT, 2012; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO, 2008).

Enquanto a maioria absoluta dos países do continente americano, africano e asiático iniciou a utilização do R134a, os países da Comunidade Européia voltaram-se para o uso de hidrocarbonetos em seus sistemas de refrigeração. Para os refrigeradores domésticos iniciou-se a utilização do isobutano (ou C4H10) (LITTLE Inc., 2002; PIMENTA, 2011).

A Tabela 2 traz um comparativo entre os refrigerantes discutidos. O indicador ODP significa Ozone Depleting Potential e consiste em colocar em escala o quanto um fluido refrigerante é danoso à camada de Ozônio, tomando como valor de referência o R11, que tem um único átomo de Cloro em sua composição. O indicador GWP significa Global Warming Potential e consiste em mensurar o quanto um quilo de refrigerante contribui para o aquecimento global; o valor de referência consiste em um quilo de CO<sub>2</sub>.

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DOS GASES REFRIGERANTES PARA REFRIGERADORES E FREEZERS

Família	Composição Química	Sigla	ODP	GWP	Tempo na atmosfera (anos)
cloro-fluor-carbonos	CCl <sub>3</sub> F	CFC-11 ou R11	1	4000	45
cloro-fluor-carbonos	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	CFC-12 ou R12	1	8500	100
hidro-cloro-fluor-carbonos	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	HFC-134a ou R134a	0	1300	13,6
Hidrocarbonetos	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	isobutano ou R600a	0	3	1
compostos inorgânicos	CO <sub>2</sub>	744	-	1	-

FONTE: UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2012) apud WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2007).

Observa-se que o refrigerante utilizado no mercado europeu (isobutano ou R600a) contribui em uma escala muito menor ao aquecimento global do que o R134a. Quanto às propriedades termodinâmicas, o isobutano apresenta pressões de evaporação e condensação mais baixas que as do R134a, fazendo com que sua aplicação resulte em refrigeradores e freezers de maior eficiência (MACLAINE-CROSS e LEONARDI, 1997). Nenhum dos refrigerantes em discussão é tóxico, no entanto o R600a é inflamável. Apesar de sua carga ser pequena nos refrigeradores e freezers, fazendo com que eventuais vazamentos não apresentem periculosidade, a utilização do R600a na indústria exige equipamentos e condições de segurança adequadas, como tanques especiais e aparato anti-incêndio, exigindo investimentos aos fabricantes de linha branca no Brasil.

No Brasil, o isobutano foi implantado pela empresa de origem alemã B/S/H - Bosch und Siemens Hausgeräte (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO

AMBIENTAL, 2006). Mesmo com a venda desta unidade ao grupo mexicano Mabe em 2009, o isobutano continua sendo o refrigerante utilizado na unidade fabril em questão. No último ano outros dois grandes fabricantes (Whirlpool e Electrolux) lançaram produtos aplicáveis a R600a, porém em volumes de produção bastante reduzidos.

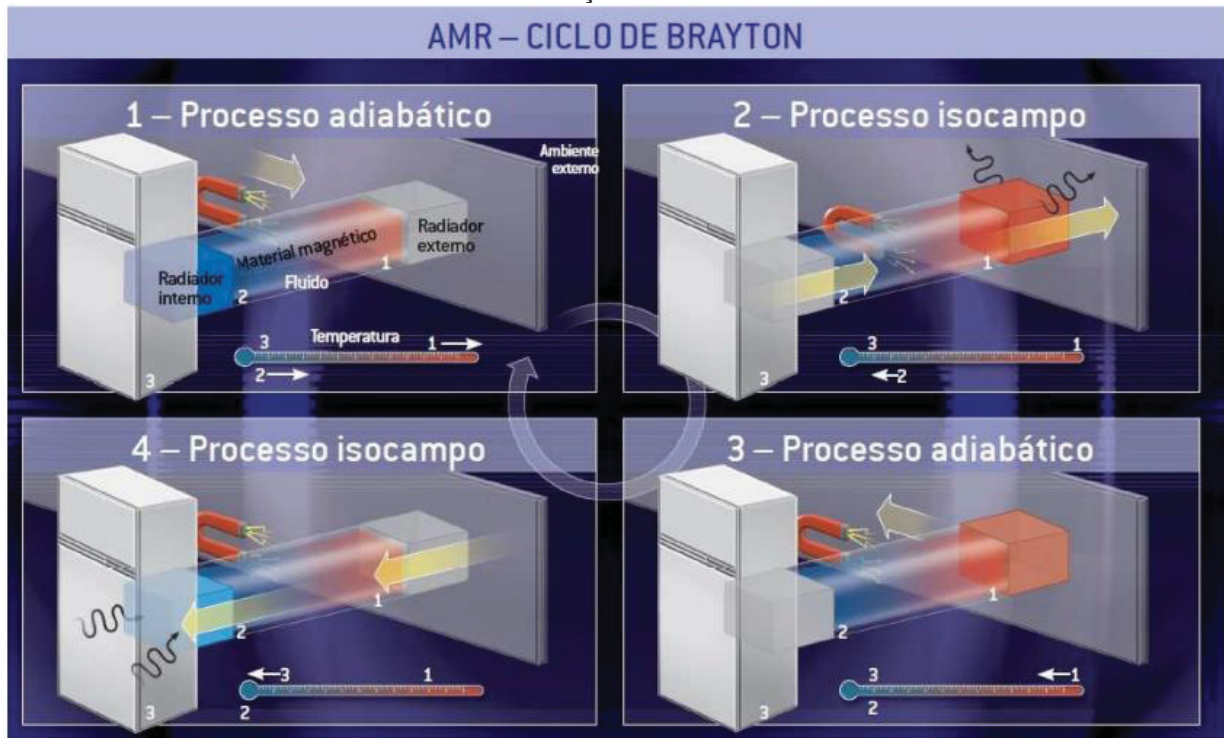
No mundo existem pesquisas referentes à utilização de diferentes tecnologias para fluídos refrigerantes, agentes de expansão e aerossóis que atendam aos requisitos técnicos, de segurança e ambientais de suas aplicações cada vez melhor (LITTLE Inc., 2002) como, por exemplo, o HFO-1234yf, com características semelhantes ao R134a, está sendo introduzido em condicionadores de ar automotivos. Esse refrigerante não atinge a camada de ozônio, apresenta GWP igual a 4 e sua permanência na atmosfera é de apenas 12 dias (TALLEY, 2010; ASAKA et al, 2011).

#### *2.1.1.5. Refrigeradores baseados no efeito magnético calórico*

Uma das tecnologias de refrigeração mais promissoras é a que se baseia no chamado Efeito Magneto Calórico (EMC). Este fenômeno foi descoberto em 1881 pelo físico alemão Emil Warburg, que percebeu que existiam certos tipos de ligas metálicas que, quando colocados sob a presença de campo magnético (no caso um ímã), ganhavam temperatura (REIS, 2005). O efeito de transmitir calor em função de ondas magnéticas tem sido estudado em várias áreas da engenharia, incluindo área da refrigeração. A NASA, por exemplo, utilizou este conceito para refrigeração de sensores infravermelhos atingindo temperaturas próximas ao zero absoluto (0 K ou -273°C) (BENDFORD, 1979).

Dois ciclos de refrigeração têm sido utilizados para aproveitamento do Efeito Magneto Calórico: o ciclo de Refrigeração Magnética Passiva (Passive Magnetic Refrigeration - PMR), ou ciclo de Ericsson, e o ciclo de Refrigeração Magnética Ativa (Active Magnetic Refrigeration - AMR), ou ciclo de Brayton. Por ter sido mais utilizado nas pesquisas mais recentes, o presente trabalho apresentará o ciclo ativo (LI et al 2008; WANG e WU, 2012), conforme exposto na Figura 17.

FIGURA 17 – ILUSTRAÇÃO DO CICLO DE BRAYTON



FONTE: REIS (2005)

Na primeira parte do ciclo ilustrada pela Figura 14, denominada 1-Processo Adiabático, o material magneto calórico é submetido a um campo magnético externo, que aumenta sua temperatura a um valor superior à temperatura ambiente.

Na segunda parte do ciclo, 2-Processo Isocampo, um fluido é direcionado ao material, fazendo com que o mesmo troque calor com o ambiente (radiador externo) enquanto o material magnético é resfriado, já que o fluido que advém do refrigerador está a uma temperatura menor do que o material.

Na terceira parte, 3-Processo Adiabático, o campo magnético até então presente junto ao material magnético é retirado, fazendo com que ele perca temperatura. Desta forma, a extremidade esquerda do material tem sua temperatura diminuída a valores menores do que o radiador interno (ou interior do refrigerador).

No quarto e último estágio do ciclo, 4-Processo Isocampo, o fluido sai do radiador externo (à temperatura ambiente) em direção ao radiador interno (interior do refrigerador). Neste caminho o fluido cede calor ao material magnético, diminuindo sua temperatura a valores mais baixos que o volume a ser refrigerado. Com a entrada do fluido no radiador interno, ocorre troca de calor com a parte interna do refrigerador. O ciclo permanece em execução de modo que o efeito de refrigeração atenda à necessidade de frigorífica do refrigerador ou freezer. Dependendo da temperatura que

se deseja atingir, pode ser necessário utilizar ciclos sobrepostos, para que seja gerado um efeito cascata para troca de calor (EGOLF et al 2007).

O fluido utilizado não é chamado de refrigerante e sim de regenerador, já que o mesmo não passa por compressão e mudança de estado, como os refrigerantes. Nos estudos verificados, tem se utilizado composições entre álcool e água.

Por não ser necessária a compressão de gases para se obter o ciclo de refrigeração, o conceito de produtos que utilizam o Efeito Magneto Calórico é mais eficiente do que os sistemas de refrigeração atuais; entretanto, não há consenso quanto de energia pode-se economizar este conceito. Islam et al (2009) acreditam que produtos com base em Lantânio possam gerar refrigeradores aproximadamente 60% mais eficientes que os atuais. Já Kitanovski et al (2007) e os pesquisadores da empresa Camfridge (INSTITUTE OF PHYSICS, 2006) apresentaram resultados de consumo até 50% inferiores aos produtos atuais de mercado.

As limitações tecnológicas para a aplicação desta tecnologia em larga escala em refrigeradores domésticos não se constituem em problemas de engenharia de refrigeração, mas sim de ciência dos materiais. Ainda não se conhece um composto magnético barato e bom condutor térmico que seja eficiente em uma grande faixa de temperatura ambiente: os compostos utilizados atualmente, como o Gadolínio, são muito caros. Estima-se que seu custo por quilo ultrapasse US\$ 6.500. Materiais de custos mais baixos, como os lantanídeos, oxidam com facilidade, alterando seu potencial magnético (REIS, 2006; FERNANDES, 2007; BHANSALI, 2007).

Em 2010 a empresa inglesa Camfridge e o grupo Whirlpool anunciaram uma parceria no desenvolvimento de refrigeradores baseados no Efeito Magneto Calórico. Conforme informado à imprensa, esperava-se que durante os jogos olímpicos em Londres 2012, seriam apresentados protótipos funcionais desses produtos (PHYS, 2010) o que, no entanto, não se concretizou.

### 3. CONCLUSÕES

A questão energética é fundamental para o desenvolvimento econômico e para o bem estar social, constituindo-se em um assunto que deve ser tratado com grande importância para o Brasil. No que se refere ao consumo de energia elétrica residencial, observa-se alto crescimento da demanda energética em valores muito superiores ao crescimento populacional, principalmente em função do aumento do poder aquisitivo da população nos últimos anos, gerando assim a necessidade de investimentos na geração de energia. Em contraponto à necessidade de expansão, a política brasileira referente à eficiência energética dos eletrodomésticos mostra-se pouco atuante, havendo condições para melhoria tecnológica dos conceitos atualmente utilizados.

No mundo todo é possível observar a preocupação para a evolução e criação de novas tecnologias de maior eficiência energética para eletrodomésticos em geral, sobretudo àqueles relacionados à refrigeração, de maior impacto no consumo de energia elétrica. Dado este contexto, uma das primeiras preocupações deste trabalho foi realizar uma discussão técnica a respeito de produtos e conceitos que possam melhorar a eficiência energética dos refrigeradores em curto e médio prazo.

No atual contexto brasileiro existem refrigeradores no mercado com altos padrões de eficiência (com selo A do PROCEL). No entanto, os equipamentos do estoque em uso continuam tendo grande participação no consumo residencial de eletricidade. Isto é explicado pela alta participação de equipamentos velhos e ineficientes, o que é piorado devido à precariedade das instalações elétricas residenciais.

Os consumidores encontram, no mercado nacional, opções que não apresentam vantagens na hora da substituição do equipamento antigo. A relação custo-benefício dos equipamentos é alta e praticamente não existe diferenciação das opções eficientes e ineficientes.

As atuais taxas de desconto praticadas pelo varejo são altas e possuem um grande efeito na redução dos benefícios gerados pela economia de energia com a opção eficiente.

Fora raros programas locais e pontuais de algumas concessionárias não existem incentivos diretos para promover a substituição dos equipamentos ineficientes. Isto em um contexto de desvantagem para as substituições reflete em uma tendência

de permanência no curto e médio prazo de um estoque ineficiente de refrigeradores. Os subsídios nas tarifas tendem a piorar a situação.

A aceleração da substituição de equipamentos velhos existentes no mercado brasileiro requer sem dúvida nenhuma mecanismos de incentivo. O simples limite das taxas de desconto aplicadas na compra de equipamentos eficientes vem a ser um mecanismo muito eficiente. Estes podem significar até mesmo o pagamento total do equipamento somente com as economias geradas nas contas de eletricidade.

A inserção em larga escala de tecnologias, produtos e serviços eficientes demanda a integração de todos os elos da cadeia. Os tomadores de decisão e os profissionais que elaboram os mecanismos devem estar conscientes das barreiras existentes em cada elo. Por exemplo, acréscimo dos custos marginais de produção dos fabricantes em relação à implementação de tecnologias ou medidas que acrescem a eficiência dos equipamentos, falta de escala de demanda por esses equipamentos, falta de investimento em P&D e inovações etc. Neste contexto, a comunicação e cooperação entre os vários elos dos setores privado e público são fundamentais. Isto pode permitir a captura de eficiências econômicas às vezes sem demandar a criação de mecanismos específicos. No entanto, dentro dos vários contextos locais existem diferentes mecanismos que possuem maiores ou menores potenciais de promover a sustentabilidade de transformação do mercado.

No caso dos programas de substituição de refrigeradores, a integração também é fundamental para maximizar os ganhos. As várias concessionárias e os fabricantes podem particionar experiências e negociar custos. Os comerciantes que representam o elo de integração com o consumidor final também devem participar da elaboração dos programas e se preparar para tratar de modo diferenciado os refrigeradores eficientes, conscientizando os consumidores, os quais também podem ser alcançados através da mídia. A integração de mecanismos e programas que considerem outros equipamentos domiciliares também deve ser avaliada. Por exemplo, a inserção de aquecedores solares pode ter sua atratividade acrescida caso os benefícios de outros programas sejam deslocados para esses equipamentos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO. **Protocolo de Montreal. 20 anos de resultados positivos**. Caderno Especial, 2008.

BAGARELLA, G., LAZZARIN, R.N., LAMANNA, B., 2013. Cycling losses in refrigeration equipment: An experimental evaluation. **International Journal of Refrigeration**, v. 36(8), p. 2111-2118.

BAILEY, P.; DADD, M.; STONE, R. **Cool and straight: linear compressors for refrigeration**. The Institute of Refrigeration. London, 2011.

BARBOSA, J.R, MELO, C., HERMES, C.J.L., WALTRICH, P., 2009. **A study of the air-side heat transfer and pressure drop characteristics of tube-fin 'no-frost' evaporators**. **Applied Energy**, v. 86(9), p. 1484-1491.

BARBOSA, J.R, SIGWALT, R.A., 2012. Air-side heat transfer and pressure drop in spiral wire-on-tube condensers. **International Journal of Refrigeration**, v. 34(4), p. 939-951.

BARNES, P.R., BULLARD, C.W., 2000. **Optimization of Sawtooth and Multi-Slab Wire-on-Tube Condensers**. Internal Report, ACRC – Air Conditioning and Refrigeration Center, Urbana, IL, USA.

BHANSALI, S.; RAHMAN, M.; KIM, S.; GHIRLANDA, S.; HERNANDEZ, C.; ADAMS, C.; BETHALA, B; ROSARIO, L; SAMBANDAM, S. **Prototype and simulation model for a magnetocaloric refrigerator**. Research Period: September 2002 to September 2007. University of South Florida, 2007.

BOADLE, A. **Brazil's hot, dry summer may lead to energy rationing**. Brasília: Reuters, 2013. Disponível em <<https://www.reuters.com/article/2013/01/07/us-brazil-energy-rationing-idUSBRE9060TL20130107>>. Acesso em outubro de 2021.

BOENG, J., 2015. **Comunicação pessoal, Whirlpool S.A.**, Joinville, SC, Brasil.

BOENG, J., MELO, C., 2012. **A capillary tube-refrigerant charge design methodology for household refrigerators-Part II: Equivalent diameter and test procedure**. In Proceedings of the 14th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, IN, USA.

BRASIL. Lei nº 10.295 de 17 de outubro de 2001. **Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17, out, 2001.

BROADHURST, S.; ORR, M. **FPA Stock Exchange Release ASX/NZX 16 September 2010**. Fisher & Paykel Appliances Holdings Limited, 2010.

CALM, J.M.; WUEBBLES, D. J.; JAIN, A.K. **Impacts on global ozone and climate from use and emission of 2,2-dichloro-1,1,1-trifluoroethane (HCFC-123)**. Climatic Change 42: 439–474. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999.

CHOI, J.M.; KIM, Y.C. **Capacity modulation of an inverter-driven multi-air conditioner using electronic expansion valve**. Energy, Vol. 28: 141-155, 2003.

COATES, D.A., 1972. **Performance improvement and dimensional communization with a compressor simulation**. In Proceedings of the 1st International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, IN, USA.

COHEN, R.; HAMILTON, J. F.; EARSON, J. T. **Possible Energy Conservation Through Use of Variable Capacity Compressors**. International Compressor Engineering Conference. Paper 97, 1974.

COLMEK, S., 2014. **Compressor efficiency improvement by reducing heat transfer**. In Proceedings of the 22th International Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette, IN, USA.

COMMISSION DIRECTIVE 2003/66/EC, 2011. **Amending Directive 94/2/EC implementing Council Directive 92/75/EEC with regard to energy labeling of household electric refrigerators, freezers and their combinations**. Official Journal of the European Union.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Substituição de gás refrigerante R-134a na produção de freezers e refrigeradores. Produção mais limpa**. Casos de Sucesso, nº37. Janeiro, 2006.

DERN, C. D. **Electronic expansion valves**. ASHRAE Journal, pp 88-90, March, 2005.  
DIAS, R. **Gestão ambiental: responsabilidade social e sustentabilidade**. 2 ed. São Paulo: Atlas, 2007.

DINÇER, I. **Refrigeration systems and applications**. John Wiley & Sons, Ltd., The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex. England, 2003.

DOMANSKI, P. A. e DIDION, D. A. Evaluation of suction-line/liquid -line heat exchange in the refrigeration cycle. **International Journal of Refrigeration**, v. 17, n. 7, p. 487–493, 1994.

DONLON, J.; ACHHAMMER, J.; IWAMOTO, H.; IWASAKI, M. Power modules for appliance motor control. **Industry Applications Magazine**, Vol. 8, No. 4, July/Aug., 2002, pp. 26-34.

DUPONT. **Linha Suva de Fluidos Refrigerantes. Para aplicações em Refrigeração e Ar Condicionado**. Catálogo Técnico, 2012.

EGOLF, P.W.; KITANOVSKI, A.; VUARNOZ, D.; DIEBOLD, M.; BESSON, C. **An introduction to magnetic refrigeration**. Proceeding of the 22th International Congress of Refrigeration, ICR 07-B1-1612, August 21-26. Beijing, 2007.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2014. **Nota Técnica DEA 10/14 Consumo de Energia no Brasil: Análises Setoriais**. Rio de Janeiro, Brasil.

FERNANDES, N.A.D. **Aplicações do efeito magnetocalórico: design e automatização de dispositivos**. Dissertação (mestrado). Universidade de Aveiro. Portugal, 2007.

FRY, E.D., 1992. **The advantages of a high pressure housing in a hermetic compressor**. In Proceedings of the 11th International Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette, IN, USA.

GALL, N. **Apagão na política energética**. Instituto Fernand Braudel de Economia Mundial. Fundação Armando Álvares Penteado, São Paulo-SP. Vol. 32, 2002.

GASPAR, M. **Brasil caminha para o racionamento de energia**. Economia. Veja. São Paulo, 2012. Disponível em <<https://veja.abril.com.br/economia/brasil-caminha-para-o-acionamento-de-energia/>>. Acesso em outubro de 2021.

GONÇALVES, J.M., 2004. **Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para a análise térmica de refrigeradores domésticos**. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

GOSNEY, W.B., 1982. **Principles of refrigeration**. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

HA, S. **Intelligent HVAC system for better environment**. 18th International Compressor Engineering Conference. 11th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, July, 2006.

HERMES, C. J. L. Alternative evaluation of liquid-to-suction heat exchange in the refrigeration cycle. **International Journal of Refrigeration**, v. 36, n. 8, p. 2119– 2127, 2013.

HERMES, C.J.L. **Uma metodologia para a simulação transiente de refrigeradores domésticos**. Tese de doutorado em engenharia mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

HERMES, C.J.L., MELO, C., KNABBEN, F.T., GONÇALVES, J.M., 2009. **Prediction of the energy consumption of household refrigerators and freezers via steadystate simulation**. Applied Energy, v. 86(7-8), p. 1311-1319.

HINRICHS, R.A.; KLEINBACH, M. **Energia e meio ambiente**. Tradução da 3 ed. norte-americana. São Paulo: Thomson Learning, 2003.

INSTITUTE OF PHYSICS. **Towards the magnetic fridge**. Disponível em <<https://phys.org/news/2006-04-magnetic-fridge.html>>

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE. **Programa brasileiro de etiquetagem. Eficiência energética**. Disponível em <<https://www.gov.br/inmetro/pt-br>> Acesso em abril de 2019.

ISLAM, M.S.; HANH, D.T.; KHAN, F.A.; HAKIM, M.A.; MINH, D.L.; HOANG, N.N.; HAI, N.H, CHAU, N. Giant magneto-caloric effect around room temperature at moderate low

field variation in  $\text{La}_{0.7}(\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x)_{0.3}\text{MnO}_3$  perovskites. **Physica B** 404 p. 2495–2498. Elsevier, 2009.

JACOBUS, D.W., 1967. **Household refrigerator including defrost control means**. United States Patent Office, USA, US Patent Number 3309887.

JAEGER, M. **Brazil 2020: economic & political scenarios - update**. **International topics**. Deutsche Bank Research. Frankfurt, 2009.

JANSSEN, M.J.P., DE WIT, J.A., KUIJPERS, L.J.M., 1992. Cycling losses in domestic appliances: an experimental and theoretical analysis. **International Journal of Refrigeration**, v. 15(3), p. 152-158.

JANUZZI, G.M. **A conservação e o uso eficiente da energia**. ComCiencia, Ed.61. São Paulo, 2004.

JOHNSON, J.H., 1974. **High efficiency single phase motors**. In Proceedings of the 2nd International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, IN, USA.

KARATAS, H., DIRIK, E., DERBENTIL, T., 1996. **An experimental study of air-side heat transfer and friction factor correlations on domestic refrigerator finnedtube evaporator coils**. In Proceedings of the 6th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, IN, USA.

KITANOVSKI, A.; VUARNOZ, D.; DIEBOLD, M.; GONIN, G.; EGOLF, P.W. **Application of magnetic refrigeration and its assessment**. Annual report, 2007. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK. Bundesamt für Energie BFE. Suisse, 2007.

LEE, H; KI, S.; JUNG, S.; RHEE, W. **The innovative green technology for refrigerators development of innovative linear compressor**. International Compressor Engineering Conference. Paper 1867, 2008

LEE, T.H., LEE, J.S., OH, S.Y., LEE, M.Y., LEE, K.S., 2002. **Comparison of air-side heat transfer coefficients of several types of evaporators of household freezer/refrigerators**. In Proceedings of the 9th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, IN, USA.

LEE, T.H., YUN, J.Y., LEE., J.S., PARK, J.J., LEE., K.S., 2001. Determination of airside heat transfer coefficient on wire-on-tube type heat exchangers. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 44(9), p. 1767-1776.

LI, J.; NUMAZAWA, T. MATSUMOTO, K.; NAKAGOME, H. **Numerical modeling on reciprocating active magnetic refrigeration regenerator at room temperature**. International Cryocooler Conference, May 17-20, 2008. Atlanta, 2008.

LIDA, K.; YAMAMOTO, T.; KURODA, T.; HIBI, H. Development of energy saving oriented variable capacity system heat pump. **ASHRAE Trans**, Vol. 88, pp. 441-449, 1982.

LITTLE Inc., A.D. **Global comparative analysis of HFC and alternative Technologies for air conditioning, foam, solvent, aerosol propellant and fire protection applications**. Final Report to Alliance for Responsible Atmospheric Policy, 2002.

MAASS, G.J. **Uso da eletrônica em compressores de capacidade variável**. SEPOC – Seminário de Eletrônica de Potência e Controle 2011. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

MACLAINE-CROSS, I.L.; LEONARDI, E. Why hydrocarbons save energy. **AIRAH Journal**, vol. 51, no. 6, June, pp. 33-38, 1997.

MARCINICHEN, J. B.; SCHURT, L.C.; MELO, C.; VIEIRA, L.A.T. **Performance evaluation of a plug-in refrigeration system running under the simultaneous control of compressor speed and expansion valve opening**. International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 921, 2008.

MARIANO, B.E. **Conceitos Básicos de Análise de Eficiência produtiva**. Simpósio Brasileiro de Engenharia de Produção – SIMPEP 2007.

MELO, C., HERMES, C.J.L., 2009. A heat transfer correlation for natural draft wireand-tube condensers. **International Journal of Refrigeration**, v. 32(3), p. 546-555.

MELO, C., SILVA, L.W., 2010. **A perspective on energy savings in household refrigerators**. In Proceedings of the Sustainable Refrigeration and Heat Pump Technology Conference, Stockholm, Sweden.

MELO, C.; TORQUATO VIEIRA, L. A.; PEREIRA, R. H. Non-adiabatic capillary tube flow with isobutane. **Applied Thermal Engineering**, v. 22, n. 14, p. 1661–1672, 2002.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano decenal de expansão de energia 2022**. Brasília, 2013.

NBGW, 2019. **National Botanical Garden of Wales**. Disponível em. Acesso em: 22 out. 2021.

PERUZZI, F., 1980. **EER improvement on a reciprocating hermetic compressor**. In Proceedings of the 4th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, IN, USA.

PHYS. **Scientists find metallic magnet with largest yet atomic displacement during thermal expansion**, 2010. Disponível em < <https://phys.org/news/2010-07-scientists-metallic-magnet-largest-atomic.html> >

PIMENTA, J. **Uso de hidrocarbonetos em sistemas de refrigeração e ar-condicionado**. Difusão do uso de fluídos alternativos em sistemas de refrigeração e ar-condicionado (Seminário). Brasília, 2011.

PINTO JUNIOR, H. Q.; ALMEIDA, E. F.; BONTEMPO, J.V.; IOOTTY, M.; BICALHO, R. G. Economia da energia: fundamentos econômicos, evolução histórica e organização industrial. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

POSSAMAI, F.C., TODESCAT, M.L., 2004. **A review of household compressor energy performance**. In Proceedings of the 17th International Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette, IN, USA.

POTTKER, G., 2006. **Análise do efeito combinado de compressores e expansores de ação variável sobre o desempenho de sistemas de refrigeração**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

PROCEL INFO. **Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética**. Disponível em < <http://www.procelinfo.com.br/main.asp>>. Acesso em maio 2015.

RAMETTA, R.S., 2017. **Avaliação teórica e experimental da utilização de condensadores de microcanais em refrigeradores domésticos**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

REIS, M. **Troca de calor pelo efeito magneto calórico é a base dos refrigeradores do futuro, mais ecológicos e econômicos**. Scientific American Brasil, Vol. 44. São Paulo, 2005.

RODRIGUES, M. G.; COSTA, F. J. P. Energia e sustentabilidade no século XXI: o caso do Brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aquidabã, v.3, n.1, p. 60-79, 2012.

ROWLAND, F. S.; MOLINA, M. J. Chlorofluoromethanes in the environment. **Rev. Geophys.**, 13(1), 1–35, 1975.

SAUER, I. **Política Energética. Estudos Avançados**. 2012, vol.27, n.78, p. 238-264.

SCHROEDER, G.H., 1976. **Improved efficiency compressors for household refrigerators and freezers**. In Proceedings of the 3rd International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, IN, USA.

SOUZA, D. L. O.; RODRIGUES, M.; REIS, D. R. **Crise energética 2001: providencial e reflexiva**. Revista Educação & Tecnologia, 2004. N. 8. ISSN: 2179-6122.

STOECKER, W.F., JONES, J.W., 1985. **Refrigeração e Ar-Condicionado**. 2ª Edição, Editora McGraw-Hill, São Paulo, Brasil.

STOECKER, W.F.; JABARDO J.M.S. **Refrigeração industrial**, 2ª ed. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 2002.

STYLIANOU, M.; NIKANPOUR, D. Performance Monitoring, Fault Detection and Diagnosis of Reciprocating Chillers. **ASHRAE Transactions** 102(2): pp. 615-627, 1996.

SUH, K.; HEO, D.; AND KIM, H. **CAE/CFD Application for Linear Compressor**. **International Compressor Engineering Conference**. Paper 1726, 2006.

TAGLIAFICO L., TANDA, D.W., 1997. Radiation and natural convection heat transfer from wire-and-tube heat exchangers in refrigeration appliances. **International Journal of Refrigeration**, v. 20(7), p. 461-469.

TALLEY, E. R1234yf **Refrigerant. Presentations**. Paper 19, 2010. Disponível em <[https://opensiuc.lib.siu.edu/auto\\_pres/19/](https://opensiuc.lib.siu.edu/auto_pres/19/)>

TASSOU, S. A.; QURESHI, T. Q. Review Paper - Variable-speed capacity control in refrigeration systems. **Applied Thermal Engineering**, vol. 16(2): 103-113, 1996.

THE WORLD BANK. **Data**. Disponível em <<https://data.worldbank.org/>> Acesso em junho de 2019.

THE WORLD BANK. **World development indicators database**. New York, 2011.

TOMASELLI, L.C. **Estudo de acionamentos à velocidade variável para motores de indução monofásicos com capacitor permanente para aplicações em ventiladores**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **The Montreal Protocol on substances that deplete the ozone layer**. Kenya, 2000.

UNITED NATIONS. **Department of economic and social affairs**. Population division World population prospects: the 2012 revision. UNdata.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Ozone Layer Protection – Science**. Acesso em junho de 2018.

VARNEY, A. C., 1882. **Our Homes and Their Adornments**. J. C. Chilton & Co., USA.

VELÁSQUEZ, P.C.A., VELÁSQUEZ, H.J.C., BOTERO, M.A.G., 2014. Identification and digital control of a household refrigeration system with a variable speed compressor. **International Journal of Refrigeration**, v. 48, p. 178-187.

WANG, H.; WU, G. Optimization of the performance characteristics in an irreversible regeneration magnetic Brayton refrigeration cycle. *Science China. Physics, Mechanics & Astronomy*. February 2012 Vol. 55 No. 2: 187–194.

WOO, S.; O'NEAL, D.L., **Reliability Design of the Newly Designed Reciprocating Compressor for a Refrigerator**. International Compressor Engineering Conference. Paper 1818, 2006. Disponível em <<https://docs.lib.purdue.edu/icec/1818/>>

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006**. Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 50, 572 pp., Geneva, Switzerland, 2007.

ZIMMERMAN, M.P. **Aspectos técnicos e legais associados ao planejamento da expansão de energia elétrica no novo contexto regulatório brasileiro**. 2007. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2007.