

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**A PERDA DE EFICIÊNCIA DE REFRIGERADORES DOMÉSTICOS
DO PARQUE BRASILEIRO E OS IMPACTOS ASSOCIADOS À SUA
DEGRADAÇÃO**

ROBERTO GIULIANI

ORIENTADOR: JOÃO M. D. PIMENTA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

BRASÍLIA, Abril de 2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**A PERDA DE EFICIÊNCIA DE REFRIGERADORES DOMÉSTICOS
DO PARQUE BRASILEIRO E OS IMPACTOS ASSOCIADOS À SUA
DEGRADAÇÃO**

ROBERTO GIULIANI

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

APROVADA POR:

João Manoel Dias Pimenta, Dr. (ENM-UNB)

Taygoara Felamingo de Oliveira, Dr. (ENM-UNB)

Ênio Pedone Bandarra Filho, Dr. (FEMEC-UFU)

Brasília/DF, Abril de 2013

Folha Catalográfica

GIULIANI, Roberto

A perda de eficiência de refrigeradores domésticos do parque brasileiro e os impactos associados à sua degradação, xx, 103 p., 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Engenharia Mecânica, 2013). Dissertação de Mestrado- Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Aquecimento Global

2.Refrigeração Doméstica

3.TEWI

4.Desgaste de Compressor

5.Estudo tribológico

6.Análise de óleo

I.ENM/FT/UNB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GIULIANI, Roberto. (2013). A perda de eficiência de refrigeradores domésticos do parque brasileiro e os impactos associados à sua degradação. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação CDU – ENM.DM-186A/2013. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 103 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR : Roberto Giuliani

TÍTULO : A perda de eficiência de refrigeradores domésticos do parque brasileiro e os impactos associados à sua degradação

GRAU: Mestre

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília, permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização do mesmo.

Roberto Giuliani
SQN 303 bloco I apto 102
70735-090 Brasília – DF – Brasil

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha mãe Marli Lúcia Warrique Giuliani e ao meu pai Giuseppe Roberto Giuliani, que sempre estiveram ao meu lado e nunca pouparam esforços para educar seus filhos, permitindo-me chegar até aqui. Dedico também este trabalho a todos os pesquisadores e estudiosos de todas as áreas do conhecimento, que tanto contribuem para o avanço da humanidade.

Roberto Giuliani

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pela oportunidade de iniciar este trabalho, bem como perseverança para concluí-lo.

Ao Professor Pimenta, pela oportunidade em orientar-me neste trabalho, por sua paciência e dedicação ao longo dos semestres que antecederam a conclusão deste trabalho. Também agradeço o seu empenho como profissional que, cumprindo exemplarmente seu papel de professor, acredita no futuro da educação.

Aos meus pais e irmãos que sempre entenderam os momentos dedicados à elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos que estiveram sempre apoiando este trabalho, sugerindo temas a serem abordados.

Ao amigo Alexandre Araujo Damião, pelas ótimas conversas, sugestões e apoio dado à elaboração deste trabalho.

Em especial à minha namorada Luana Borba Iserhard, de quem vem minha inspiração pelo amor ao estudo e ao crescimento intelectual. Agradeço por me mostrar que é possível mudar o mundo, que é possível realizar seus sonhos. Agradeço por estar ao meu lado, pela atenção, pelo carinho e pela imensa ajuda que recebi durante a elaboração deste trabalho, ao motivar-me e não me deixar desistir. Agradeço a companhia, as conversas, os momentos e o amor dedicado a mim.

“A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro” – Albert Einstein.

RESUMO

A PERDA DE EFICIÊNCIA DE REFRIGERADORES DOMÉSTICOS DO PARQUE BRASILEIRO E OS IMPACTOS ASSOCIADOS À SUA DEGRADAÇÃO

Autor: Roberto Giuliani

Orientador: João Manoel Dias Pimenta

Programa de Pós-graduação em Ciências Mecânicas

Brasília, 29 de Abril de 2013.

Um dos temas de maior destaque atualmente na mídia é a questão da degradação ambiental provocada por atividades antropogênicas, sobretudo no que tange à geração de energia elétrica. A utilização de refrigeradores domésticos, no Brasil, está diretamente relacionada a essa degradação, uma vez que cerca de 10% da produção de energia é utilizada para o funcionamento desses equipamentos. Aliado ao consumo nominal, há desgastes internos que comprometem a eficiência e fazem com que compressores necessitem de mais energia elétrica para funcionarem. Assim, este trabalho realiza um estudo teórico e experimental da perda de eficiência dos compressores utilizados em refrigeração doméstica e estima o impacto que tal degradação representa ao meio ambiente, abordando os diferentes mecanismos que provocam desgastes aos componentes do compressor, através de análises ferrográficas do óleo lubrificante utilizado e através do monitoramento da potência consumida por esses equipamentos. Assim, caracteriza-se o perfil de consumo de energia pelos refrigeradores ao longo de sua vida útil, mostrando, através do equacionamento da quantidade de gás carbônico lançado na atmosfera diariamente em razão desses desgastes, como o impacto de cada um dos equipamentos em operação no Brasil aumenta com o tempo e o custo financeiro que isso representa ao país.

Palavras-chave: compressor, degradação, perda de eficiência, meio ambiente.

ABSTRACT

DOMESTIC REFRIGERATOR'S COMPRESSORS DEGRADATION STUDY AND THE EFFICIENCY LOSS IMPACT IN GLOBAL WARMING

Author: Roberto Giuliani

Advisor: João Manoel Dias Pimenta

Programa de Pós-graduação em Ciências Mecânicas

Brasília, April, 29th 2013.

Environmental degradation and its consequences is one of the most prominent topics on media. It is caused by anthropogenic activities, especially related to power generation. The use of household refrigerators is directly related to this degradation, since, in Brazil, about 10% of the generated energy is used for this purpose. Moreover, there are internal wears that compromise the efficiency and make compressors require more electrical power to operate. This work aims to present an experimental and theoretical study on efficiency loss of compressors used in domestic refrigeration, estimating the impact of this degradation in the environment and discussing the different mechanisms that cause wears, though the lubricant oil iron particle analyses and electrical consumption monitoring of these equipment. Thus, the energy profile of operating equipments is achieved throughout the years, enabling the calculation of the amount of carbon dioxide release into the atmosphere, daily, due these wears, and the financial cost it represents to Brazil.

Key-words: compressor, degradation, efficiency loss, environment.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 O TEMA EM ESTUDO E SUA RELEVÂNCIA	1
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
1.3 OBJETIVOS	10
1.4 METODOLOGIA	11
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	12
2 IMPACTOS DAS APLICAÇÕES DE REFRIGERAÇÃO SOBRE O MEIO AMBIENTE	14
2.1 O CICLO DO CARBONO	14
2.2 EFEITO ESTUFA E O AQUECIMENTO GLOBAL.....	15
2.2.1 O aumento de CO₂ na atmosfera	17
2.2.2 Temperatura média global	18
2.2.3 Efeitos do aumento da temperatura média global	19
2.2.4 Histórico de ações e políticas adotadas	22
2.2.5 O cenário e políticas nacionais	24
2.3 FLUIDOS REFRIGERANTES	26
2.3.1 Indicadores	28
2.3.1.1 Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global)	28
2.3.1.2 Total Equivalent Warming Impact (Impacto Total de Aquecimento Equivalente).....	30
2.3.1.3 Life Cycle Climate Performance	31
3 COMPRESSORES UTILIZADOS EM REFRIGERAÇÃO DOMÉSTICA ...	33
3.1 O CICLO DE COMPRESSÃO A VAPOR	33
3.2 MODELAGEM TEÓRICA DE UM COMPRESSOR.....	36
3.3 MODELAGEM DE UM COMPRESSOR REAL.....	38

3.4 DESGASTES COMUNS QUE AFETAM A EFICIÊNCIA DE COMPRESSORES	40
3.4.1 Retorno de refrigerante líquido	41
3.4.2 Partidas inundadas	42
3.4.3 Golpe de líquido	44
3.4.4 Superaquecimento	45
3.4.5 Lubrificação	46
3.4.6 Outros fenômenos degradantes	48
3.4.7 Degradação nos demais componentes do refrigerador	48
3.5 O PARQUE DE REFRIGERADORES NO BRASIL.....	50
3.6 ENTRADA E SAÍDA DE EQUIPAMENTOS DO MERCADO	53
3.7 IDADE DOS EQUIPAMENTOS RETIRADOS DO MERCADO.....	55
3.8 EVOLUÇÃO DO PERFIL DO MERCADO BRASILEIRO	56
3.9 CARACTERÍSTICAS DO PARQUE DE REFRIGERADORES.....	57
4 DESGASTE DE COMPRESSORES	60
4.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	60
4.1.1 Exame ferrográfico e viscosidade do óleo	60
4.1.1.1 ANÁLISE DOS DADOS FERROGRÁFICOS	65
4.1.2 Medições em equipamentos residenciais	70
4.1.2.1 A SELEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE TESTE	81
4.1.3 Análise dos dados obtidos nas medições diretas dos equipamentos	82
5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE PROJETOS FUTUROS	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores de GWP de algumas substâncias típicas utilizadas em refrigeração.	29
Tabela 3.1 – Estimativa do Parque de refrigeradores no Brasil (Pereira, 2010).	51
Tabela 4.1 – Resumo das principais características do parque de refrigeradores para o ano de 2011, no Brasil	91
Tabela 4.2 – Resumo do impacto dos refrigeradores em 2011, no Brasil e a comparação quando não considerados os efeitos da perda de eficiência dos equipamentos.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática do ciclo do carbono (adaptado de NASA, 2001).....	15
Figura 2.2 – Aumento da concentração de CO ₂ na atmosfera ao longo das últimas décadas – adaptado de NOAA (2011).	18
Figura 2.3 – Variação da temperatura global em relação a média verificada entre 1890 e 2010 – adaptado de NOAA (2011).....	19
Figura 2.4 – Área de gelo presente nos oceanos do planeta ao longo dos últimos anos – adaptado de NOAA (2011).....	20
Figura 2.5 – Medições anuais do nível da água do oceano Atlântico, em Battery Bay, Nova Iorque, ao longo dos anos – adaptado de NOAA (2011).....	21
Figura 2.6 – Percentual de emissões de CO ₂ em relação aos setores econômicos brasileiros no ano de 2004 - adaptado de MMA (2011).....	25
Figura 3.1 – Representação das perdas de potência através do motor e das transmissões - adaptado de ASHRAE Toolkit (1980).	37
Figura 3.2 – Fluxo do fluido refrigerante no compressor (Adaptado de Danfloss, 2010).....	42
Figura 3.3 – Cavidade do cilindro, operando com deficiência de lubrificação – Danfloss (2010).	45
Figura 3.4 - Desgastes sofridos pelas peças móveis do compressor – Danfloss (2010).....	45
Figura 3.5 – Evolução do percentual de domicílios com aparelhos refrigeradores e freezers no Brasil ao longo dos anos - adaptado de IBGE (2010).....	49
Figura 3.6 – Quantidade de equipamentos de refrigeração doméstica ao longo dos anos e projeções futuras.....	51
Figura 3.7 – Quantidade de equipamentos que entraram e saíram do mercado a cada ano no Brasil (Peixoto, 2012).....	52
Figura 3.8 – Quantidade de equipamentos retirados do mercado, em 2011, em função de sua idade (Peixoto, 2012)..	54
Figura 3.9 – Evolução do parque em relação à idade dos equipamentos.	55

Figura 3.10 – Potência média dos equipamentos do mercado brasileiro ao longo dos anos (PROCEL, 2011).....	56
Figura 4.1 – Exemplo de identificação do equipamento e as conclusões do exame realizado.....	60
Figura 4.2 – Exemplo de resultados fornecidos pelo relatório do exame ferrográfico.	60
Figura 4.3 – Exemplo da disposição dos resultados, no laudo, da ferrografia quantitativa do exame realizado.	61
Figura 4.4 – Exemplo de como são mostrados, no laudo, os resultados do exame analítico de contaminantes no óleo.....	61
Figura 4.5 – Concatenação das informações dos laudos dos exames ferrográficos.....	62
Figura 4.6 – Evolução da quantidade de partículas de ferro, de pequeno diâmetro, em suspensão no óleo em função do tempo.	63
Figura 4.7 - Evolução da quantidade de partículas de ferro, de médio diâmetro, em suspensão no óleo em função do tempo.	64
Figura 4.8 – Comportamento da viscosidade do óleo ao longo do tempo.	65
Figura 4.9 – Representação gráfica típica do comportamento da potência consumida ao longo do tempo	70
Figura 4.10 – Exemplo do registro da temperatura ambiente.....	72
Figura 4.11 – Exemplo do registro do consumo do compressor.	73
Figura 4.12 – Exemplo da montagem da primeira aba da planilha de dados dos equipamentos analisados.	74
Figura 4.13 – Exemplo da montagem da segunda aba da planilha de dados dos equipamentos analisados.	74
Figura 4.14 – Exemplo da montagem da terceira aba da planilha de dados dos equipamentos analisados.	76
Figura 4.15 – Exemplo da montagem da segunda parte da terceira aba da planilha de dados dos equipamentos analisados.	77
Figura 4.16 - Exemplo da montagem da quinta aba da planilha de dados dos equipamentos analisados.	78

Figura 4.17 – Aumento de potência relativa dos equipamentos testados em função do tempo, para os dois grupos de teste.	81
Figura 4.18 – Comparação entre os dados obtidos experimentalmente e aqueles fornecidos pelos fabricantes de equipamentos de refrigeração.	81
Figura 4.19 – Evolução do tempo diário de funcionamento de um refrigerador em função de sua idade.....	84

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

Símbolos

a_r	Eficiência radiante devido ao crescimento unitário na abundância atmosférica da substância em questão
AC	<i>Alternated Current</i> (Corrente Alternada)
AN	Ferrografia analítica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i> (Instituto de Padrões Nacionais Americanos)
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado)
a_x	Eficiência radiante devido ao crescimento unitário na abundância atmosférica da substância em questão
C_f	Fator de folga
CFC	Clorofluorcarbono
CI	Circuito Integrado
DR	Ferrografia quantitativa
DEMC	Departamento de Mudanças Climáticas
$E_{CO_2,G}$	Emissão de CO_2 na geração de energia elétrica
ELETRONBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
EMBRACO	Empresa Brasileira de Compressores
FMEA	<i>Failure mode and effects analysis</i> (Análise de causa e efeito de falhas)
$G(t)$	quantidade de CO_2 equivalente lançado na atmosfera em um determinado período de tempo, t
GEE	Gases de efeito estufa
GWh	Gigawatt-hora
GWP	<i>Global Warming Potential</i> (Potencial de Aquecimento Global)
Δh_i	Trabalho de compressão isoentrópica, kJ/kg
h_1	Entalpia do refrigerante no ponto 1
h_4	Entalpia do refrigerante no ponto 4
HCFC	Hidroclorofluorcarbono
HFC	Hidrofluorcarbono

Hz	<i>Hertz</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre a Mudança Climática)
ISO	<i>International Standard Organization</i> (Organização Internacional de Padrões)
ITH	Horizonte de tempo considerado para o cálculo do GWP
kg	Quilograma
kWh	Quilowatt-hora
l	Litro
L	Partículas grandes
LCCP	<i>Life Cycle Climate Performance</i> (Desempenho Climático do Ciclo de Vida)
L_{rate}	Taxa anual de refrigerante emitido (reposições, vazamentos)
m	Fração de espaço nocivo
m^3	metros cúbicos
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
ml	mililitros
MMA	Ministério do Meio Ambiente
M_{ref}	Carga de refrigerante no equipamento
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (Administração da Atmosfera e Oceanos Nacionais – EUA)
ODP	<i>Ozone Depletion Potential</i> (Potencial de Degradação do Ozônio)
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Potência
P(t)	Potência em função do tempo de vida
$P(t)_{24horas}$	Consumo do equipamento durante 24 horas, kWh
PLP	Concentração Total de Partículas
PFC	Perfluorcarbono
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
P_{nom}	Potência nominal do compressor
P_{out}	Pressão de descarga no compressor

PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
ppm	parte por milhão
q	Capacidade de refrigeração
Q(t)	Quantidade de gás carbônico, em kg, lançados indiretamente na atmosfera por equipamento de refrigeração, por dia, em função do tempo decorrido de utilização deste
R(t)	Decaimento transiente na abundância da liberação instantânea de substância, e as quantidades correspondentes para o gás de referência
RH	<i>Relative Humidity</i> (Umidade Relativa)
s	segundo
S	Partículas pequenas
t	Tempo de vida do compressor, em meses
T(t)	Tempo de funcionamento do compressor durante um ciclo de 24 horas
TEWI	<i>Total Equivalent Warming Impact</i> (Impacto Total Equivalente de Aquecimento)
T _{serv}	Número de horas de operação anual
TWh	TeraWatt-hora
UE	União Europeia
UN	<i>United Nations</i>
UNB	Universidade de Brasília
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i> (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente)
\dot{V}	Taxa de Vazão Volumétrica
\dot{V}_s	Taxa de Volume Varrido
V ₁	Volume no ponto 1 do ciclo de refrigeração
V ₂	Volume no ponto 2 do ciclo de refrigeração
V ₃	Volume no ponto 3 do ciclo de refrigeração
V ₄	Volume no ponto 4 do ciclo de refrigeração
V _c	Volume de espaço nocivo
V _{util}	Vida útil econômica do equipamento
X(t)	Decaimento transiente na abundância da liberação instantânea de substância, e as quantidades correspondentes para o gás de referência

W	Watt
\dot{W}	Potência elétrica do compressor hermético
\dot{W}_s	Perda eletromecânica
W_{el}	Potência Elétrica do Equipamento
Wh	Watt-hora
W_{in}	Potência elétrica interna do compressor

Símbolos Gregos

α	Fator de Perda
η	Eficiência volumétrica de espaço nocivo, adimensional
μ	Viscosidade de um fluido, kg/ms
v	Volume específico do vapor

Subscritos

<i>asp</i>	aspiração
<i>C</i>	compressão
<i>D</i>	descarga
<i>El</i>	elétrica
<i>equ</i>	equivalente
<i>F</i>	folga
<i>G</i>	geração
<i>In</i>	entrada
<i>Lo</i>	eletromecânica
<i>rate</i>	taxa
<i>ref</i>	refrigerante
<i>S</i>	varrido
<i>Se</i>	serviço
<i>Out</i>	saída
<i>V_c</i>	volumétrica efeito

1 INTRODUÇÃO

1.1 O TEMA EM ESTUDO E SUA RELEVÂNCIA

Atualmente, encontra-se em operação, no mundo, cerca de 1,2 bilhão de refrigeradores domésticos de diversos tipos, tamanhos e capacidades, consumindo aproximadamente 1 TWh de energia elétrica diariamente (EPA, 2011). O quantitativo de equipamentos deve se elevar, até o ano de 2025, a uma taxa líquida anual de 53 milhões de unidades. Acredita-se que o atual poder aquisitivo das famílias e a facilidade de acesso a equipamentos de refrigeração, farão com a quantidade de refrigeradores domésticos chegue ao patamar de 1,97 bilhões no citado ano, quando deve estabilizar-se e apresentar uma variação em função do crescimento da população mundial (EPA, 2011).

No Brasil, dados do último censo indicam que, no ano de 2009, 93,9% das residências do país possuíam, no mínimo, uma geladeira. Em 1995, o número de domicílios atendidos pelo eletrodoméstico era de 75%. Mantido o crescimento verificado nesse período, em 2016, 99,5% dos domicílios brasileiros terão um equipamento de refrigeração. Além disso, estima-se, atualmente, a presença de cerca de 61 milhões de refrigeradores em operação nas residências brasileiras, chegando, em 2016, ao patamar de aproximadamente 65,5 milhões de unidades (IBGE, 2010).

Cerca de 32% da energia elétrica disponibilizada para as residências é utilizada pelas geladeiras e por *freezers*. Este valor representa 10% da geração nacional, ou seja, um décimo de toda a eletricidade gerada no país é utilizado exclusivamente para a operação de refrigeradores domésticos (ELETROBRAS, 2011).

Um dos temas mais evidentes na atualidade diz respeito à degradação ambiental e como evitá-la. O que se percebeu ao longo das últimas décadas foi o fato de que algumas atividades humanas produziram e ainda produzem efeitos negativos no meio ambiente. Especialistas dizem que se nenhuma medida eficiente for tomada, a nível mundial, até o ano de 2050, esses efeitos serão irreversíveis, colocando em risco a existência de muitas espécies do planeta (IPCC, 2007).

A energia elétrica, indispensável na vida das pessoas, provoca efeitos indesejáveis, no ambiente, quando gerada, uma vez que a há a liberação, na atmosfera, direta ou indiretamente, de gases de efeito estufa, como o gás carbônico, contribuindo, segundo alguns pesquisadores, para a intensificação do efeito estufa e o conseqüente

aumento da temperatura média global. Assim, nesse contexto, verifica-se que a refrigeração doméstica tem um papel fundamental no aquecimento global, uma vez que grande parte da energia elétrica gerada é utilizada neste tipo de aplicação.

Além disso, os sistemas de refrigeração funcionam através da compressão e expansão de fluidos refrigerantes, confinados em um circuito. Dentre os principais compostos utilizados, grande parte tem efeito nocivo ao meio ambiente, contribuindo, assim como o gás carbônico, para o aquecimento global. Assim, os inevitáveis vazamentos que ocorrem naturalmente durante a vida útil do equipamento, devido, sobretudo, ao desgaste dos componentes do sistema de refrigeração, também contribuem para o desequilíbrio do meio ambiente.

O aquecimento global é um problema que até o momento não possui uma solução eficaz e definitiva. Em meados dos anos oitenta, uma série de estudos produzidos por cientistas levou os governos mundiais a reunirem-se para a discussão do tema. Desde então, diversas conferências foram realizadas até a assinatura do Protocolo de Quioto, que entrou em vigor em 2005, que previa, entre outras ações, a redução da emissão de gases de efeito estufa, no período entre 2008 e início de 2012, em pelo menos 5,2% em relação ao nível medido no ano de 1990 (MMA, 2011).

O governo brasileiro criou alguns mecanismos na tentativa de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em atendimento ao Protocolo de Quioto. Entre eles, houve a criação do selo PROCEL, que identifica aos consumidores quais eletrodomésticos consomem menos energia elétrica. As empresas buscam, com isso, aprimorar as tecnologias de seus produtos, aumentando sua eficiência e, conseqüentemente, contribuindo com a redução das emissões de gases. O selo está presente na maioria dos refrigeradores vendidos no Brasil e, embora muitos equipamentos estejam classificados na categoria dos mais econômicos e menos poluidores, os cálculos que originam esta classificação não incluem a parcela da perda de eficiência dos compressores dos equipamentos ao longo do tempo e o conseqüente aumento do consumo de energia. Porém, a implementação deste selo mostrou-se um importante aliado à conservação do meio ambiente. Dados mostram que em 2009, a economia de energia elétrica proporcionada por ações do PROCEL foi de 5,47 milhões de MWh, o que evitou a emissão mais de 350 mil toneladas de CO₂ equivalentes. Além disso, no período compreendido entre 1985, data do lançamento do selo, e 2009, o país economizou 38 mil GWh de energia. (PROCEL, 2009).

Os estudos sobre a degradação e a perda de eficiência são escassos na literatura quando se trata de componentes de refrigeração, sobretudo compressores. Os ensaios padronizados, descritos por normas ANSI/ASHRAE e ISO, que avaliam o desempenho de compressores, não levam em consideração os desgastes mecânicos dos componentes móveis ao longo do tempo. Os cálculos teóricos normalmente incluem essas perdas, porém o fazem de maneira genérica, não caracterizando os componentes individualmente e atribuindo-se coeficientes empíricos que estimam intuitivamente a perda de eficiência destes equipamentos. A real dificuldade em se caracterizar um refrigerador de maneira completa está no fato de que diversos fatores humanos e ambientais influenciam de maneira imprevisível o modo de operação do sistema. Com isso, este tipo de estudo não é largamente explorado na literatura e existem muitas lacunas acerca do desempenho de refrigeradores domésticos e sua degradação ao longo do tempo (UNEP, 2011).

A possibilidade de se caracterizar a degradação dos equipamentos refrigeradores facilita a previsão da vida útil do equipamento e a identificação de futuras falhas, além de possibilitar o melhoramento do desempenho energético e permitir quantificar a agressão direta e indireta destes equipamentos ao meio ambiente e, com isso, nortear políticas públicas que visem à substituição e o aprimoramento de tecnologias empregadas na refrigeração doméstica.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A caracterização e o estudo dos compressores em bancadas experimentais são regulamentados pelas normas ISO 917 – *Testing of Refrigerants Compressors* e ASHRAE 23-2005 – *Methods of Testing for Rating Positive Displacement Refrigerant Compressor and Condensing Units* e, apesar de suas particularidades, ambas mencionam as possíveis montagens que podem ser utilizadas para testar compressores utilizados em refrigeração, as tolerâncias a respeito das incertezas permitidas para alguns transdutores utilizados e as faixas nas quais uma determinada variável deve permanecer confinada durante o ensaio (Polleto, 2006). Além disso, a norma ISO 917 estabelece que os resultados finais de capacidade de refrigeração, potência elétrica consumida, eficiência isentrópica e coeficiente de desempenho devem ser calculados

com base nos dados obtidos quando o compressor trabalha em regime permanente, caracterizado por um período contínuo de pelo menos uma hora de operação (Henklen, 2006). Embora ricas em informações e detalhes, estas normas não se aplicam à avaliação do desgaste mecânico e nem ao desempenho dos equipamentos em função do seu tempo de uso.

Haraz e Erner (1980) consideraram, em um dos primeiros trabalhos sobre testes de vida acelerada em compressores, a teoria de danos cumulativos para caracterizar o desgaste nos componentes internos destes equipamentos. A teoria pressupõe que um ciclo de tensão alternado, acima do limite de resistência, acarreta em um dano permanente mensurável. Assim, os pesquisadores aumentaram a pressão de descarga, afetando a taxa de desgaste do compressor. No entanto, o trabalho não correlaciona o desgaste verificado nos testes em bancada com aquele que ocorre nos compressores em uso nas residências.

Na tentativa de caracterizar a vida útil dos compressores de refrigeração doméstica, Stoupe e Yau (1989) realizaram uma pesquisa com 15.000 unidades e concluíram que a ocorrência de falhas é significativamente maior quando o equipamento ultrapassa 9 anos de operação. Após esse período, a tendência é que a ocorrência de falhas cresça de maneira potencial, seguindo uma curva quadrática, até os 15 anos de operação, tempo em que os pesquisadores consideraram como o final da vida útil dos equipamentos. Todavia, o trabalho não correlaciona as falhas aos desgastes verificados nos equipamentos.

Ciantar (2000) propôs analisar as características superficiais dos componentes críticos do compressor, tais como pistão e válvula, além de recolher amostras do óleo lubrificante, com o intuito de comparar as características e o desempenho dos compressores sob altas pressões antes e após seu uso. Para um mesmo intervalo de tempo, o desgaste verificado apresentou uma relação praticamente linear em função da pressão submetida. Porém, segundo o autor, a linearidade só deve ser assumida para pequenos intervalos de tempo e, apesar de seu trabalho não contemplar resultados para ensaios com longas durações, acredita-se que a relação tende a ser potencial, e não mais linear, quando o tempo for superior a três anos.

Masjuki *et al* (2000) analisaram o consumo de energia elétrica de refrigeradores domésticos em função de seu modo de operação. Os pesquisadores concluíram que a temperatura ambiente, no local onde se encontra instalado o equipamento, é responsável

pelo aumento de 40 Wh no consumo a cada acréscimo de 1°C em relação à temperatura interna padrão desejada. Além disso, verificaram que o consumo aumenta em 10 Wh a cada abertura de porta e que a redução de 1°C na temperatura interna, controlada pelo termostato, resulta em um aumento de 10% no consumo de energia. Outros fatores analisados referem-se aos efeitos da variação de umidade relativa no ambiente e à carga térmica do produto a ser refrigerado. De todos esses fatores analisados, a temperatura ambiente é a mais importante, pois influencia no consumo de energia devido tanto aos efeitos da transmissão de calor por condução através do gabinete do refrigerador e infiltração de ar no mesmo, quanto pela eficiência termodinâmica do ciclo de refrigeração quando sujeito a diferentes temperaturas do ar que troca calor com o condensador do refrigerador.

Ciantar e Hadfield (2003) construíram uma bancada para submeter compressores a testes de desempenho, utilizando diversos fluidos refrigerantes. O objetivo foi realizar um estudo tribológico de durabilidade associado ao impacto ambiental causado pelos refrigeradores domésticos. A potência consumida e suas variações ao longo do período de testes eram monitoradas e estes dados eram posteriormente estudados a fim de relacionar as forças de atrito e o desgaste verificado com as flutuações de potência. O consumo elétrico verificado em cada compressor era monitorado por transdutores de potência, e os compressores eram submetidos a dois testes diferentes que simulavam 15 anos de operação de um refrigerador. As conclusões foram que, em bancada, os compressores perdem até 37% de sua eficiência durante o período citado.

Januzzi *et al* (2003) estimaram os custos financeiros da utilização de energia elétrica pelos refrigeradores e concluíram que o período de 7 anos é o indicado para a realização da troca do equipamento. Após esse período, os custos com manutenção e energia elétrica e a obsolescência da tecnologia empregada sugerem que é mais vantajoso, para o consumidor, realizar a troca dos refrigeradores. Além disso, os pesquisadores propuseram a aplicação de inovações tecnológicas e mudanças físicas no eletrodoméstico, tais como a adoção de compressores mais eficientes, isolamento da linha de sucção e o afastamento do condensador em relação à parte superior do refrigerador e, após a simulação de vários cenários, chegaram à conclusão de que é possível reduzir em até 20,4% o consumo de energia com algumas modificações nos projetos desses eletrodomésticos.

Garland e Hadfield (2004) propuseram um estudo de desgaste baseado na metodologia pino-contra-placa, com o intuito de avaliar os níveis de desgaste sofridos por compressores ao longo de sua vida útil e, após a determinação de alguns coeficientes que caracterizam a operação dos compressores, chegaram à conclusão que, quando operando com o fluido refrigerante R-134a, após 11 anos, a perda de eficiência do compressor, relaciona à capacidade de refrigeração no interior do gabinete, durante um tempo fixo de análise, em função do que era verificado quando o equipamento era novo, é de 40%; após 17 anos a perda chega a 50%; com 23 anos, 80%; e, finalmente, após 24 anos de operação, o compressor chega ao final de sua vida útil, com a perda de eficiência ultrapassando 90%.

Silva (2005) propôs a aplicação de metodologias de análise do custo do ciclo de vida de equipamentos refrigeradores e propôs a utilização de análises estatísticas como ferramentas para determinar padrões de eficiência energética, complementares aos selos já existentes para os refrigeradores de uma porta. Outro ponto estudado pelo autor foi o papel destes selos como meio de fornecer subsídios técnicos para o estabelecimento de níveis máximos de consumo de energia elétrica para estes eletrodomésticos. O trabalho mostra a economia financeira e ambiental que a adoção desses selos significou para o país, além de mostrar a dificuldade em se obter dados, através dos fabricantes, acerca da perda de eficiência, em função do tempo de uso, de seus produtos.

Pimenta *et al* (2006) propuseram uma nova metodologia de avaliação da degradação do desempenho de compressores, em função do tempo de utilização, através de ensaios de vida acelerada. O objetivo era submeter um compressor a um ciclo de vida acelerada onde parâmetros como pressões, tempo de serviço e quantidade de partidas eram controlados. Assim, foi possível realizar uma análise tribológica (conjunto de estudos de desgastes de superfície) antes e após os ensaios, de maneira a comparar os resultados e avaliar o grau de desgaste de cada componente, o estado da mistura de óleo e refrigerante, o desempenho em função do desgaste e o custo energético e ambiental do sistema.

Em se tratando de testes de vida acelerada, o ideal é que se consigam os parâmetros de teste desejados no menor tempo possível sem que as condições impostas, normalmente mais severas que aquelas percebidas em condições normais de utilização, interfiram de maneira não controlada e afetem a qualidade da informação a ser obtida. O tempo despendido nos ensaios de desempenho é elevado devido ao longo período de

estabilização do sistema. Assim, Heiken (2006) propôs uma nova metodologia para a realização de ensaios em tempos mais curtos. Através da estruturação e o desenvolvimento de um sistema neural de ensaios, os dados referentes ao transitório, normalmente não armazenados, puderam ser analisados e isso fez com que o tempo de ensaio pudesse ser reduzido, em alguns casos, em até 90%, sem que houvesse perda da qualidade da informação analisada e sem que os parâmetros previstos nas normas ISO 917 e ASHRAE 23-2005 fossem ignorados.

Kim *et al* (2006) desenvolveram modelos matemáticos para analisar o custo-benefício dos refrigeradores existentes nos Estados Unidos. A troca desses equipamentos antigos antes do final de sua vida útil, estimada entre 15 e 20 anos, pode representar uma interessante política de conservação de energia e controle da emissão de gases de efeito estufa. Os cálculos feitos pelos pesquisadores mostram que, do ponto de vista energético, o equipamento na faixa de 2 a 7 anos é o que possui a maior eficiência; já quando se analisa o potencial de aquecimento global, os equipamentos que tem entre 2 e 11 anos são os mais ambientalmente viáveis. O estudo ainda prevê que a vida útil dos compressores de refrigeradores é de 16 anos, em média, e que equipamentos adquiridos a partir de 2004 devem ser trocados se o seu consumo anual superar 1.000 kWh.

Haupt e Finotti (2007) elaboraram uma bancada experimental para avaliar o desgaste mecânico e a perda de desempenho de compressores herméticos. Caracterizando o tempo de funcionamento de um aparelho doméstico, o número de partidas e as diferenças de temperatura ao longo das estações do ano, os pesquisadores chegaram à conclusão que seria possível simular em 5 dias o equivalente a 10 anos de uso de um compressor comum e extrair informações acerca da degradação deste equipamento. Todavia, os autores apenas propuseram a montagem da bancada e não fizeram os testes propostos.

Bassetto (2007), em seu estudo sobre a confiabilidade de compressores semi-herméticos, mostra algumas das falhas mais recorrentes em compressores que acarretam desgastes prematuros e a consequente perda de eficiência. O autor cita o retorno de fluido refrigerante líquido, partida inundada, superaquecimento excessivo e lubrificação inadequada como os responsáveis por mais de 85% dos problemas verificados em compressores. O pesquisador também atenta a um fato estatístico interessante em que as falhas em equipamentos, incluindo compressores, seguem uma tendência característica,

conhecida como “curva da banheira”, cujo comportamento prevê um índice elevado de falhas nos primeiros anos de uso, devido a erros de ajustes, instalação e aplicação, seguidos por um período de estabilidade, onde falhas aleatórias são percebidas, atribuídas, sobretudo, a processos de fadiga e corrosão. Por fim, a curva acentua-se novamente indicando falhas devido aos desgastes naturais até o fim da vida útil do equipamento. Todavia, o autor chama a atenção para o fato de que, atualmente, as empresas evitam que equipamentos potencialmente defeituosos cheguem aos consumidores, fazendo com que a primeira parcela da “curva da banheira” (elevado índice de falhas nos primeiros anos de uso) não seja mais verificada de maneira significativa.

Cardoso e Nogueira (2008) avaliaram o consumo de energia elétrica dos refrigeradores, utilizando uma série de informações econômicas e estatísticas para estimar a quantidade de refrigeradores existentes no país e qual o tempo de uso dos mesmos. Assim, baseando-se em dados, obtidos através de fabricantes, acerca da degradação de compressores, foi possível estimar a representatividade do consumo de energia do parque nacional de refrigeradores em relação ao que é produzido no país. Uma interessante informação obtida pelos pesquisadores é a de que nos primeiros cinco anos de operação do compressor, não há perda de eficiência na operação do mesmo. Após o sexto ano, começam a perder desempenho, que pode chegar a 60% no final de sua vida útil, estimada em 16 anos.

Januzzi e Melo (2008) realizaram um estudo acerca do estoque de refrigeradores no Brasil, tendo em vista a operação de muitos aparelhos antigos com tecnologias obsoletas. Segundo estimativas dos pesquisadores, cerca de 12% dos aparelhos, em 2008, possuíam tempo de uso superior a 15 anos; 30,6% possuíam acima de 10 anos; e 81,2% acima de 5 anos. O trabalho ainda enriquece a literatura mostrando a distribuição da idade dos aparelhos em função da região geográfica e o nível salarial dos consumidores.

Pereira (2010) apresenta uma metodologia para se avaliar o impacto da utilização de sistemas de refrigeração doméstica no meio ambiente, determinando a influência dos refrigeradores sobre o aquecimento global. O modelo matemático-computacional apresentado pelo pesquisador engloba estudos acerca da degradação dos outros componentes do refrigerador, tais como fluido refrigerante, vedação, condensador, evaporador e, através de um cálculo unificado, foi possível determinar a

evolução do impacto ambiental de um refrigerador ao longo de 15 anos de utilização. Os resultados obtidos mostram que os valores para o TEWI, que mede a quantidade direta e indireta de CO₂ lançados na atmosfera, mais do que duplica quando as parcelas de degradação são consideradas.

Uma importante ferramenta utilizada na tentativa de caracterização do comportamento de compressores e seus desgastes são os ensaios de vida acelerada, que, apesar de serem superficialmente tratados na literatura, apresentam uma importante fonte de dados e informações sobre o desgaste mecânico e a vida útil destes equipamentos. Segundo Nelson (1990), um ensaio acelerado consiste de uma variedade de métodos que intencionalmente diminuem a vida útil de um produto ou aceleram a degradação de seu desempenho. Para isso, é preciso a utilização de cargas de estresse, que podem ser aplicadas de forma constante, cíclica, intervalar, progressiva e aleatória.

Brito e Souza (2010) estudaram o método FMEA, utilizado para a previsão de taxas de falha empregando dados de teste de vida acelerada. Através deste método, é possível estimar a vida útil de um equipamento sem que o ensaio ocorra até a falha do equipamento e nem que haja a necessidade de uma amostra grande a ser ensaiada. O estudo mostrou que as adaptações do método às condições de operação do objeto de ensaio previram o desgaste do equipamento e a vida útil com um erro médio de 33%. Apesar de este índice ser grande, os autores consideram os resultados obtidos expressivos, dadas as condições limitantes do método. Os autores sugerem que compressores de pequenas capacidades podem ter sua eficiência degradada em até 65% ao longo de 15 anos de uso.

Com relação aos desgastes naturais sofridos por compressores, Ming (2001) identificou os principais tipos como sendo os causados por adesão, erosão e abrasão. Estes são oriundos de fenômenos físicos resultantes do aquecimento do óleo lubrificante do compressor, do desprendimento de partículas metálicas dos componentes móveis do compressor e pela mudança da acidez e viscosidade do óleo lubrificante que é verificado ao longo do tempo. Segundo o autor, estes desgastes são verificados em todos os compressores, independentemente do modo de operação dos mesmos, seja em condições brandas, normais ou severas.

Garcia (2003) desenvolveu uma metodologia para o estudo de desgaste em tratamentos superficiais de anéis de pistão, por meio de ensaios tribológicos e técnicas de análise para a determinação das características do desgaste. Embora o foco tenha sido

o estudo de motores a diesel, o pesquisador fornece uma série de metodologias para o estudo tribológico das peças em análise e que são úteis na determinação da vida útil em função dos desgastes observados.

Maru (2003) realizou um estudo experimental sobre as respostas de desgaste e de atrito encontradas em um sistema deslizante lubrificado. No trabalho, são analisados os efeitos da presença de contaminantes no óleo; o efeito do carregamento mecânico; e as tendências de desgaste baseado nas leis de Archard para o desgaste. Em seus experimentos, mostrou-se que há uma perda linear de eficiência do sistema em função do aumento de contaminantes no lubrificante, uma vez que estes alteram características importantes do óleo, sobretudo sua viscosidade, que pode ter seu valor aumentado em mais de 500%. Verifica-se, assim, um efeito cascata, onde quanto mais se desgasta o equipamento, maiores as alterações das características do óleo lubrificante e, quanto mais estas se alteram, maiores os desgastes causados no compressor.

Barros e Mello (2006) desenvolveram uma metodologia computacional para caracterizar os mecanismos de desgastes, verificados em alguns materiais típicos, em função da carga aplicada e da rugosidade da superfície desgastada. Com estes parâmetros, é possível prever uma curva de degradação do material em função do tempo. Todavia, a curva não faz referência à variação do desgaste em função do tempo, embora seja útil para a determinação do tipo de desgaste a ser verificado nas condições iniciais de operação do equipamento.

Labiapari *et al* (2007) analisaram a influência do processo de fabricação das partes móveis de compressores com o futuro desgaste sofrido e chegaram à conclusão de que, em média, 20% da vida útil é comprometida devido à falta de controle rigoroso de alguns parâmetros tais como temperatura, pressão aplicada aos metais, vibrações excessivas nas máquinas de corte e laminação, além de erros humanos diversos verificados nos processos metalúrgicos, sendo que a eliminação destes fatores representa um significativo ganho financeiro e ambiental.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal o estudo da perda de eficiência dos refrigeradores domésticos ao longo do tempo e estimar os impactos financeiros e ambientais advindos do parque brasileiro deste equipamento. Para isso, pretende-se:

caracterizar os principais modos de desgastes e falhas ocorridos em compressores utilizados nos refrigeradores através de exames ferrográficos do óleo lubrificante e através de informações disponíveis na literatura; caracterizar o comportamento do consumo de energia elétrica dos refrigeradores ao longo do tempo, através do monitoramento dos equipamentos no momento de sua utilização, em residências e estabelecimentos comerciais, adquirindo dados de consumo, tempo de funcionamento, quantidade de aberturas de portas e temperaturas a que estão expostos; caracterizar o parque brasileiro de refrigeradores em função do quantitativo, da idade e dos principais parâmetros dos equipamentos atualmente utilizados; e avaliar o impacto ambiental e financeiro que a utilização de refrigeradores domésticos provoca no meio ambiente, estimando a quantidade de gás carbônico lançado à atmosfera e o custo que isto representa ao país.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho dividiu-se em três etapas, sendo a primeira focada na pesquisa de informações na literatura; a segunda, na determinação experimental da perda de eficiência dos refrigeradores ao longo de sua vida útil; e a terceira, em avaliar os impactos financeiros e ambientais advindos da utilização de equipamentos refrigeradores.

A primeira etapa foi voltada à aquisição de informações, na literatura, acerca da degradação de compressores e de refrigeradores domésticos e os impactos ambientais e econômicos mundiais devido à produção de energia elétrica para utilizada no funcionamento destes equipamentos. Além disso, buscou-se caracterizar o parque brasileiro de refrigeradores, com a identificação de seus principais parâmetros, tais como quantidade de equipamentos por idade, potência média consumida, capacidade volumétrica média, tipo mais comum de fluido refrigerante utilizado, entre outros. Assim, a primeira parte buscou informações que possibilitaram esboçar o perfil dos refrigeradores utilizados no Brasil.

A segunda etapa consistiu em determinar, experimentalmente, o nível de desgaste em refrigeradores domésticos e correlacioná-lo ao seu tempo de uso. Para isso, selecionaram-se equipamentos cujas características foram observadas na primeira parte do trabalho, buscando-se, assim, refrigeradores compatíveis com o perfil identificado.

Assim, através do monitoramento da potência, da temperatura, do tempo de funcionamento e da quantidade da abertura de portas dos equipamentos durante um tempo determinado, foi possível estimar o desgaste destes refrigeradores e propor uma relação matemática entre a perda de eficiência e o tempo de uso do equipamento.

Por fim, com base nos dados obtidos nas duas etapas, estimaram-se os impactos ambiental e financeiro advindos da utilização dos refrigeradores domésticos, salientando, sobretudo, a influência da perda de eficiência nestes impactos.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em cinco capítulos e um DVD-ROM, em anexo, com os dados, planilhas, fotos e demais arquivos utilizados na elaboração desta dissertação; trabalhos importantes da literatura, disponibilizados gratuitamente por seus autores; e manuais dos instrumentos utilizados na aquisição de dados experimentais..

O primeiro capítulo traz uma revisão bibliográfica acerca do tema em discussão e do sistema de refrigeração doméstica, sobretudo compressores. São citados estudos na área da operação e degradação destes equipamentos, além de estimativas de vida útil e perda de eficiência ao longo do tempo. Nesse capítulo também se evidencia a importância desse estudo em relação aos efeitos, no meio ambiente, do consumo de energia elétrica. Além disso, apresenta os objetivos e metodologias utilizadas neste trabalho.

O segundo capítulo tem como foco o meio ambiente; o efeito estufa e suas implicações; as políticas nacionais adotadas em relação aos problemas advindos deste efeito, além de mostrar os principais indicadores utilizados para avaliar o impacto ambiental das aplicações de refrigeração.

O terceiro capítulo aborda os compressores utilizados em refrigeração doméstica. Neste, são discutidas suas modelagens matemáticas empíricas e reais, além de discutir os principais fenômenos que causam desgastes em compressores e que afetam o seu desempenho, interferindo em sua vida útil. Por fim, são mostrados dados acerca do parque de refrigeradores do Brasil, fornecendo estimativa da quantidade de equipamentos em operação e suas principais características, tais como sua idade e quantidade de entrada e saída de refrigeradores do mercado.

O quarto capítulo fornece os dados da avaliação realizada em refrigeradores domésticos. Neste, são estudados o aumento da potência do equipamento ao longo dos anos e seus tempos de funcionamento efetivo, além de caracterizar a curva de degradação dos equipamentos em função do tempo. Além disso, com base nesses dados, são calculados os impactos do parque de refrigeradores utilizados no Brasil, conforme formulações e dados dos capítulos anteriores, sugerindo um conjunto de equações capazes de estimar a quantidade de gás carbônico liberado na atmosfera em função da utilização desses equipamentos. Para complementar, o capítulo traz resultados da análise de óleo lubrificante utilizados em compressores para avaliação dos modos e intensidade dos diversos tipos de desgastes verificados nesses equipamentos.

O quinto capítulo reúne as conclusões do presente estudo e propõe a sua continuidade, através de trabalhos futuros e complementares a serem desenvolvidos.

2 IMPACTOS DAS APLICAÇÕES DE REFRIGERAÇÃO SOBRE O MEIO AMBIENTE

Conforme abordado nas seções 1.1 e 1.2, a geração de energia elétrica, também utilizada em refrigeradores domésticos, tem fundamental influência nos impactos ambientais que ocorrem no mundo, sobretudo àqueles relacionados ao aquecimento global. Sendo assim, este capítulo aborda as mais recentes pesquisas sobre tais impactos e as ações nacionais e internacionais que visam o combate do avanço da degradação ambiental, evidenciando o papel dos refrigeradores domésticos neste cenário.

2.1 O CICLO DO CARBONO

Os problemas ambientais verificados devido ao aquecimento global acontecem, entre outros, em virtude de desequilíbrios no ciclo do carbono, ou seja, a circulação e a transformação deste elemento, na forma pura ou através de seus compostos, entre os seres vivos (plantas e animais) e o ambiente (rochas, solo, gases).

A quantidade de carbono no solo e na atmosfera é teoricamente fixa, existindo apenas um dinamismo deste elemento, quando se transforma em diferentes compostos ou quando migra entre seres vivos e não vivos. O carbono é liberado na atmosfera através de diversas fontes e é armazenado em plantas, animais, rochas e na água, elementos estes chamados de sumidouros de carbono (Souto, 2009).

O processo do ciclo se inicia através da fotossíntese, quando as plantas capturam o gás carbônico da atmosfera e o transforma em compostos orgânicos que servem de alimento. A seguir, animais se alimentam destas plantas e, através de reações químicas do oxigênio respirado com os componentes orgânicos advindos deste tipo de alimento, exalam gás carbônico de volta a atmosfera. Aquilo que não é consumido por outros animais, se decompõe quando o vegetal morre e o carbono é liberado na atmosfera ou depositado no solo. Além disso, processos diversos na natureza, como atividades vulcânicas, também liberam compostos carbônicos na atmosfera (Souto, 2009).

Antes da era industrial, em 1750, a concentração de CO₂ na atmosfera era praticamente estável e o ciclo do carbono era equilibrado. Porém, após o início das atividades industriais, a concentração subiu em mais de 37%, evidenciando que ações antropogênicas também influenciam o ciclo do carbono (Steinmetz, 1991).

As atividades de queima de combustível fóssil para geração de energia, utilizada nos mais diversos fins, contribuem para este aumento desenfreado da quantidade de carbono na atmosfera, uma vez que a capacidade de reabsorção deste pelos mares, solos e plantas ocorre mais lentamente em relação à sua emissão. As consequências desse aumento estão diretamente ligadas ao efeito estufa.

A figura 2.1 ilustra, de maneira simplificada, como ocorre o ciclo do carbono no meio ambiente. As setas menores indicam interação entre os subsistemas ecológicos e as setas maiores mostram o ciclo no ecossistema.

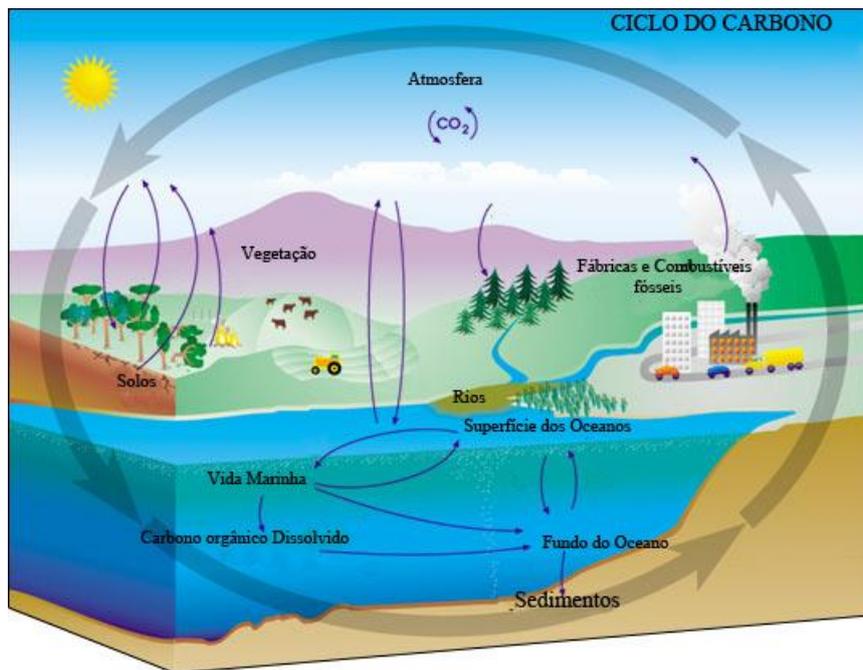


Figura 2.1 – Representação esquemática do ciclo do carbono (adaptado de NASA, 2001).

2.2 EFEITO ESTUFA E O AQUECIMENTO GLOBAL

O efeito estufa está naturalmente presente na natureza e é de vital importância para a existência de vida humana no planeta. Cerca de 70% da energia solar que chega ao planeta é absorvida pela atmosfera, superfície e oceanos, provocando o seu aquecimento (Mendes, 2008). Parte deste calor é então refletido em direção ao espaço, na forma de radiação infravermelha, e, mais uma vez, refletido de volta ao planeta, devido à presença de gases de efeito estufa na atmosfera que bloqueiam a passagem dessa radiação de volta ao espaço. Isso ocorre porque a energia vinda do sol é emitida

em comprimentos de onda pequenos o suficiente para transpor essa barreira de gases, porém a energia irradiada pelo planeta é emitida em ondas de comprimentos maiores, o que dificulta o retorno ao espaço, aumentando, assim, a incidência de reflexões dessas ondas de volta ao planeta, fazendo com que a energia fique retida na forma de calor. Esse efeito, conhecido como estufa, é essencial à vida e sem ele a temperatura média do planeta seria de -19°C (Aprile, 2011).

De fato, é a presença desses gases que garante uma temperatura média global, próximo à superfície, em torno de 14°C (Aprile, 2011). Quando há um balanço da energia solar incidente e a refletida na forma de calor pela superfície, as relações climáticas se mantêm praticamente inalteradas. Porém existem quatro principais fatores que podem influenciar esse balanço: mudanças de órbitas, variação da quantidade de energia emitida pelo sol, variações na quantidade de energia refletida de volta ao espaço e, finalmente, devido às alterações na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, que modifica a intensidade da energia emitida de volta ao espaço (MMA, 2011).

Dentre os fatores citados, apenas o último foi verificado no planeta nas últimas décadas, devido ao aumento das emissões antropogênicas destes tipos de gases, provenientes, sobretudo: das atividades agropecuárias; da utilização de combustíveis fósseis; do desmatamento e degradação das florestas; e das indústrias, através dos processos de produção de insumos (IPCC, 2007), embora alguns cientistas acreditem que o sol vem apresentando atividades anormais, aumentando a quantidade de energia irradiada e, conseqüentemente, contribuindo para o aquecimento terrestre. Este tópico é abordado na seção 2.2.3.

Há quatro principais gases de efeito estufa. O dióxido de carbono (CO_2) é o mais abundante deles e é utilizado como referência para classificar o poder de aquecimento global dos demais gases de efeito estufa. O metano (CH_4) é produzido principalmente pela decomposição da matéria orgânica e possui um poder de aquecimento global 21 vezes maior que o CO_2 . O óxido nitroso (N_2O) proveniente principalmente do tratamento de dejetos animais, do uso de fertilizantes e da queima de combustíveis fósseis, tem um poder de aquecimento 310 vezes superior ao do CO_2 . Por fim, hexafluoreto de enxofre (SF_6), que é utilizado como isolante térmico e condutor de calor, cujo poder de aquecimento equivale a 23.900 vezes o do dióxido de carbono.

Além desses, existem duas famílias de gases que contribuem de maneira significativa com o aquecimento global: os hidrofluorcarbonos (HFCs), utilizados como substituídos dos clorofluorcarbonos (CFCs) em aerossóis e refrigeradores, e cujo potencial de aquecimento global varia entre 140 e 11.700 vezes a do CO₂; e dos perfluorcarbonos (PFCs), utilizados como gases refrigerantes, solventes, propulsores, espumas e aerossóis, cujo potencial de aquecimento varia entre 6.500 e 9.200 em relação ao CO₂.

2.2.1 O aumento de CO₂ na atmosfera

Desde a Revolução Industrial, a humanidade utiliza carvão, gás natural e outros combustíveis fósseis para gerar energia. A cada ano, a utilização desses elementos aumenta de maneira perceptível, ocasionando a liberação de grandes quantidades de dióxido de carbono. Ao longo dos últimos 150 anos, o homem foi responsável por aumentar a concentração de CO₂, na atmosfera, de 280 para mais de 385 ppm – o mais alto verificado nos últimos 800 mil anos (Gross, 2011). A figura 2.2 indica como vem ocorrendo o aumento da quantidade de partículas CO₂ diluídas no ar atmosférico ao longo das últimas cinco décadas, período no qual as emissões tornaram-se mais elevadas.

A maioria dos cientistas está preocupada com as consequências deste grande aumento na concentração de CO₂, uma vez que o nível dos oceanos está aumentando, os padrões de precipitação no mundo estão alterados, as áreas afetadas pela seca estão em expansão e há um crescente número de ondas de calor acima do normal. Além disso, a absorção do CO₂ pelos oceanos está aumentando a acidez da água do mar, afetando as formas mais simples de vida e ameaçando toda a cadeia alimentar marinha.

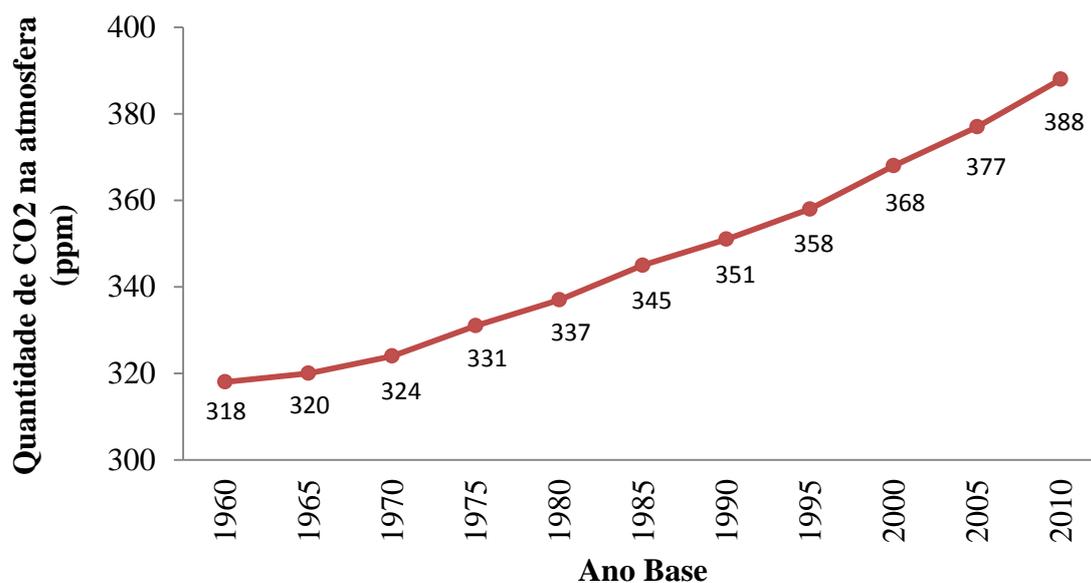


Figura 2.2 – Aumento da concentração de CO₂ na atmosfera ao longo das últimas décadas – adaptado de NOAA (2011).

2.2.2 Temperatura média global

A agência norte-americana de administração da atmosfera e oceanos avalia permanentemente as condições climáticas mundiais, sobretudo as temperaturas das superfícies terrestres e marítimas, e de acordo com dados disponibilizados por seus pesquisadores, há uma tendência de aumento na temperatura média da superfície da Terra para as próximas décadas.

De 1900 a 2009, a temperatura de superfície média global aumentou aproximadamente 0,7 ° C e nos últimos 50 anos, a temperatura global aumentou a uma taxa média de 0,13°C por década, quase duas vezes mais rápido que o aumento de 0,07°C observado ao longo da primeira metade do século anterior. Nos próximos 20 anos, cientistas projetam que a temperatura média global aumentará a uma taxa de 0,2°C por década (NOAA, 2011).

Para o cálculo da temperatura média global, são consideradas medidas realizadas em distintos locais do planeta e que não apresentam especificidades climáticas que podem influenciar a análise dos dados obtidos. Além disso, cálculos de correção destes dados são realizados a fim de minimizar os efeitos das diferenças de temperatura verificadas ao longo das estações do ano e no ciclo dia/noite, garantindo, com isso, um

método consistente e confiável de análise da evolução do comportamento da temperatura média da Terra ao longo do tempo.

A figura 2.3 ilustra a variação da temperatura global, para os anos compreendidos entre 1890 e 2010, em função da temperatura média verificada neste período, representada, no gráfico, pela linha central. Nota-se um expressivo aumento na temperatura nas últimas três décadas.

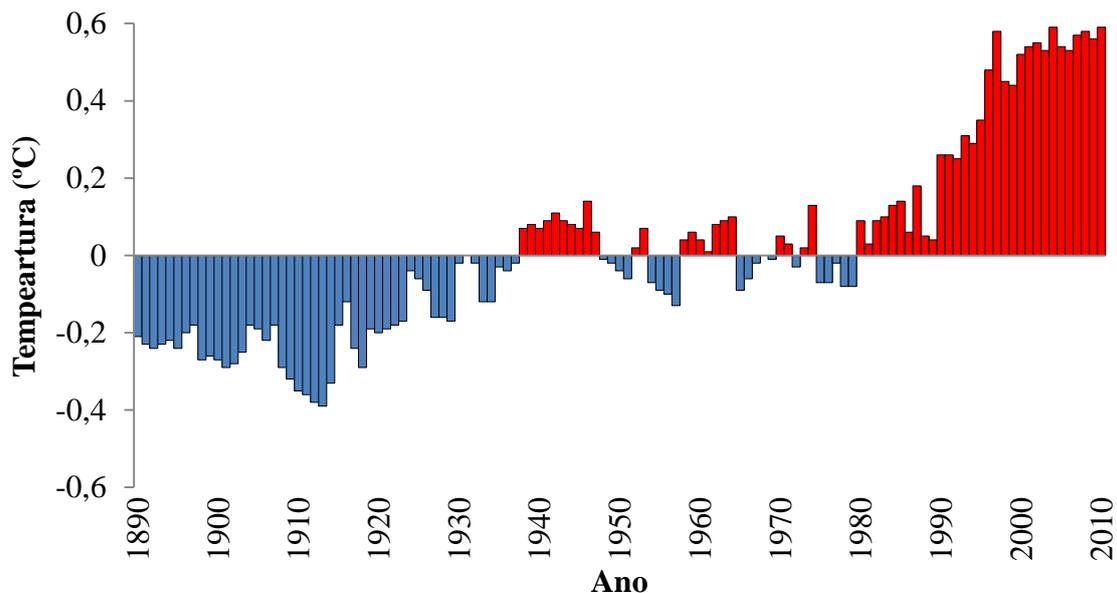


Figura 2.3 – Variação da temperatura global em relação à média verificada entre 1890 e 2010 – adaptado de NOAA (2011).

2.2.3 Efeitos do aumento da temperatura média global

Um dos efeitos negativos associado ao aumento da temperatura do planeta é a diminuição da quantidade de gelo no mar, cuja presença é importante uma vez que sua superfície branca reflete cerca de 80% da luz solar incidente sobre ela, desviando-a de volta ao espaço. Esse fenômeno é fundamental para o controle da temperatura do planeta (Poisson, 2006). Porém, com a presença de menos gelo, a superfície escura da água do oceano absorve a energia solar, aumentando sua temperatura e, conseqüentemente, fazendo que com mais gelo seja derretido. Este processo se torna cíclico e, com cada vez menos gelo, mais energia solar é retida no planeta, contribuindo para o aumento da temperatura global.

A área de gelo marítimo reduziu-se em aproximadamente 45% ao longo dos últimos 30 anos, passando de 8 para pouco mais de 4,5 milhões de quilômetros quadrados. A figura 2.4 ilustra a redução ao longo das últimas três décadas.

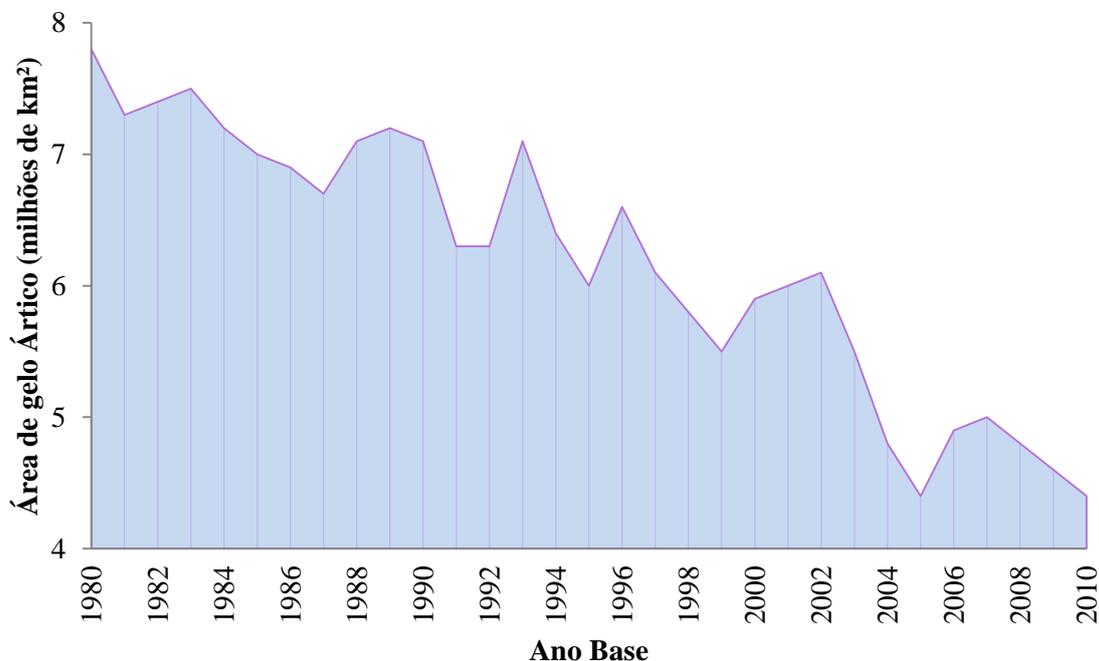


Figura 2.4 – Área de gelo presente nos oceanos do planeta ao longo dos últimos anos – adaptado de NOAA (2011).

Outro efeito indesejado, associado ao aumento da temperatura do planeta, é a ascensão do nível dos mares. Apesar da quantidade total de água na Terra não se alterar, o volume de líquido nos oceanos está aumentando, ocasionando a inundação de terras baixas. Dados coletados ao longo do século XX indicam que o nível dos mares subiu a uma taxa média de 1,7 mm por ano neste período sendo que, entre 1993 e 2003, a taxa média foi de 3,1 mm ao ano (NOAA, 2011), evidenciando que os efeitos do aquecimento global estão cada vez mais intensos.

Em 2007, o IPCC projetou que o nível do mar se elevaria entre 18 e 59 cm até o ano de 2100. Alguns cientistas contestam esses valores dizendo que estão abaixo do esperado porque não levam em conta a aceleração do derretimento das camadas de gelo localizadas em terra firme, o que elevaria esta estimativa em mais de 100% (NOAA, 2011).

A figura 2.5 ilustra o aumento do nível dos oceanos dos últimos 85 anos. A referência adotada foi o nível verificado no ano de 1930 e sua representação indica a média dos valores para cada ano. Nota-se que houve um aumento de cerca de 15 cm na altura dos oceanos nos últimos 70 anos e o gráfico indica uma tendência na continuidade deste aumento.

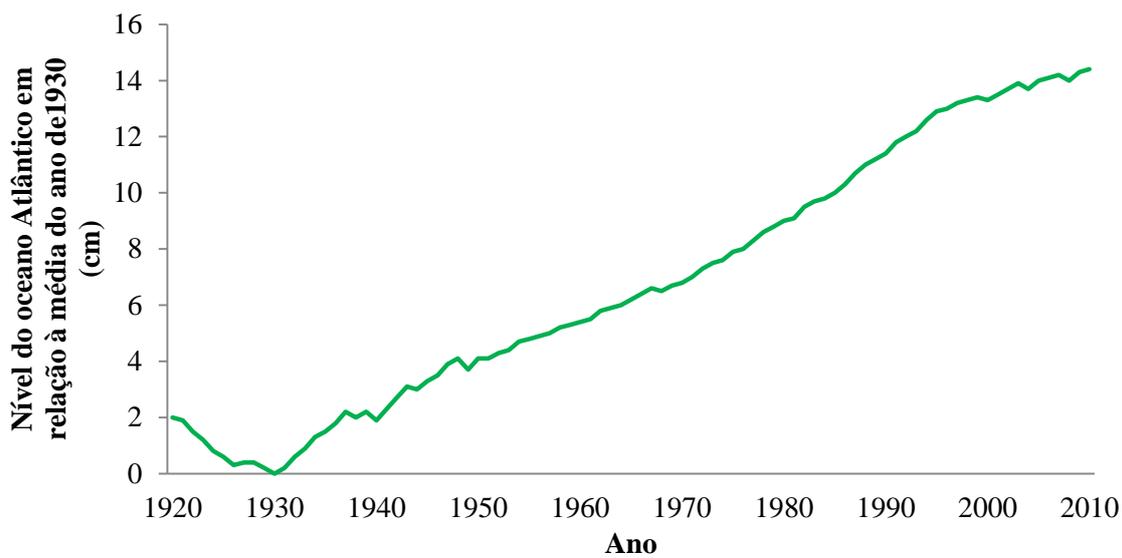


Figura 2.5 – Medições anuais do nível da água do oceano Atlântico, em Battery Bay, Nova Iorque, ao longo dos anos – adaptado de NOAA (2011).

Entretanto, apesar de todas as evidências acerca do aumento desenfreado das emissões de CO₂ e as consequências que o aumento da temperatura causa no planeta, alguns cientistas acreditam que estes fenômenos não estão relacionados a atividades antropomórficas e sim devido a atividades solares.

Lockwood (2010) afirma haver provas crescentes de que a principal causa do aquecimento global é originada por fenômenos naturais e que não existem argumentos válidos para afirmar que o aquecimento global é causado por atividades humanas. Além disso, o autor observa que em 2006, a Agência Espacial Norte Americana (NASA) publicou um relatório revelando uma alteração na temperatura de Júpiter e a ocorrência simultânea de aumentos de temperatura na Terra e em Marte. O autor ainda defende que essas alterações são efeitos de eventos ocorridos no Sol e que, através de sua história, a Terra já vivenciou épocas conhecidas como idades do gelo, quando o clima muda radicalmente e de forma contínua. Por fim, indica que satélites meteorológicos que

medem a temperatura do espaço têm registrado um significativo aumento da temperatura superficial do Sol, mostrando que a radiação proveniente deste astro está aumentando e, possivelmente, afetando a temperatura na Terra.

Em 2011, 60 doutores na área de paleoclimatologia e climatologia da Terra, de diversos institutos de pesquisa, enviaram uma carta aberta ao ministro do meio ambiente e ao ministro de recursos naturais dos Estados Unidos propondo ampliar as discussões acerca da influência da atividade humana no aumento da temperatura global. Embora acreditem que atividades antropogênicas influenciem as alterações climáticas observadas no planeta, os cientistas afirmam que estas são apenas um “ruído” dentro de um processo natural que ocorre atualmente e que a influência humana é insignificante.

Felício (2010) afirma que ambientalistas sustentam que as atividades humanas estão relacionadas ao aumento da temperatura global uma vez que o caos ambiental que vivemos atualmente não pode ser completamente entendido. Assim, “o aquecimento global se tornou o mal para todos os problemas da sociedade”, segundo o autor, que afirma ser inconsistente a teoria de que apenas os gases de efeito estufa estão controlando o clima do planeta já que o Sol e os oceanos são os maiores controladores climáticos naturais que a Terra dispõe. Por fim, o autor afirma que as indústrias, governos e a mídia, com interesses políticos e econômicos, exploram esse assunto por existir uma sociedade leiga e afirmam que a maioria dos cientistas que atuam nesse tema são profissionais que trabalharam durante a Guerra Fria com simulações computacionais e que ficariam desempregados, após a queda do Muro de Berlim, caso não existisse algum tema relevante com o qual pudessem dedicar seus estudos.

2.2.4 Histórico de ações e políticas adotadas

Preocupados com as mudanças climáticas que ocorrem no planeta devido ao aquecimento global, em 1988, governantes e cientistas de várias partes do mundo reuniram-se em Toronto para discutir as informações e dados revelados por cientistas sobre o aumento da temperatura média global e suas consequências. Nesta reunião, foi destacado que “o impacto do aquecimento global só é inferior ao de uma guerra nuclear”, segundo seu relatório final.

Em 1990, ocorreu a primeira reunião do IPCC, onde foi identificada a necessidade de se estabilizar o crescente nível de dióxido de carbono presente na

atmosfera. Para isso, seria necessário, segundo estudos apresentados durante a reunião, reduzir as emissões daquele ano em 60%.

Em 1992 ocorreu, devido às poucas definições que se tinham até o momento, a assinatura da Convenção Marco sobre a Mudança Climática, com a adesão de 161 governos. O principal objetivo era minimizar a interferência humana no sistema climático, salientando-se que isso deveria ser feito o quanto antes. Para isso, uma das metas da Convenção era a de que países industrializados mantivessem seu nível de emissões de gases estufa até o ano 2000.

Os cientistas do IPCC voltaram a se reunir em 1995, chegando à conclusão de que os primeiros sinais da mudança climática estavam evidentes. Através da análise dos dados da intensidade das secas, tempestades, tornados e outras intempéries, ficou claro, para alguns deles, o impacto causado pelo homem ao clima global, apesar do ceticismo de outros, que diziam não haver motivos reais de preocupação.

Em 1997, no Japão, foi assinado o Protocolo de Quioto, um novo componente da Convenção, que contém um acordo vinculante que sujeita os países do norte a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa. Resumidamente, o Protocolo compromete uma série de nações industrializadas a reduzir suas emissões em 5,2% entre os anos de 2008 e 2012 em relação aos níveis detectados em 1990, além de estabelecer mecanismos para permitir o cumprimento dessa exigência de redução fora de seus territórios e instituir o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, onde um Estado com metas definidas de redução pode comprar reduções certificadas de emissões resultantes de atividades ambientais desenvolvidas em qualquer país em desenvolvimento que tenha assinado o Protocolo.

As metas de redução não são iguais para os países, sendo que existem níveis diferenciados de acordo com as emissões de cada país, e as nações em desenvolvimento, como o Brasil, não receberam metas de redução em um primeiro momento. O Protocolo estimula os países a cooperarem entre si, através da reforma dos setores de energia e transporte; da promoção do uso de fontes energéticas renováveis; da limitação das emissões de metano; da proteção de florestas e outros sumidouros de carbono, entre outras medidas e, com isso, a expectativa era de que a temperatura global reduzisse entre 1,4°C e 5,8°C, até o ano de 2100.

Porém, algumas nações, como os Estados Unidos, negaram-se a assiná-lo, alegando que os compromissos firmados interfeririam negativamente na economia do

país. A alegação para a não ratificação foi a inexistência de metas obrigatórias de redução para países em desenvolvimento, que, no entanto, já respondiam por mais de 50% das emissões de CO₂ mundiais (Fletcher, 2006). Segundo a Agência de Avaliação Ambiental da Holanda, em 2006, a China, um país em desenvolvimento, ultrapassou em 8% o volume de gás carbônico emitido pelos Estados Unidos, tornando-se o maior emissor desse gás no mundo, emitindo sozinha quase um quarto do total mundial, e mais que toda a União Europeia (MCT, 2011).

Frente ao rápido crescimento econômico dos países emergentes, cuja matriz energética é dependente da queima de combustíveis fósseis, o aumento das emissões de gás carbônico parece inevitável para as próximas décadas, frustrando as pretensões do Protocolo, que expirou no final de 2012.

Em dezembro de 2011, ocorreu mais uma tentativa de se firmar um acordo para o controle das emissões de carbono no ambiente. Em Durban, 190 países se reuniram e decidiram que o Protocolo seria prorrogado por um prazo ainda indefinido, e os cortes na emissão de gases de efeito estufa, segundo o texto do acordo, devem ser de pelo menos 25 a 40%, dependendo da classificação do país. A estimativa é que a temperatura média global seja reduzida entre 1,5 e 2°C no próximo século se as metas forem cumpridas.

A emenda ao Protocolo foi necessária devido ao não cumprimento das metas estabelecidas. As últimas medições indicam que os níveis de emissões aumentaram em 11% no período de 2008 a 2010 em relação ao verificado em 1990, ao invés de reduzirem em 5,2%, conforme a meta original (MMA, 2011).

China e Estados Unidos, maiores emissores do planeta, concordaram com a adesão ao Protocolo, representando um significativo avanço para a melhoria das condições climáticas do planeta, porém, por motivos financeiros, Canadá se retirou do acordo. Os países em desenvolvimento, como o Brasil, terão metas a ser definidas a partir de 2015, quando o novo relatório do IPCC deverá ser discutido.

2.2.5 O cenário e políticas nacionais

O Brasil conta com o Departamento de Mudanças Climáticas (DEMC), que é a unidade responsável pela formulação, implementação e acompanhamento das políticas

públicas nacionais relacionadas ao sistema climático global e à camada de ozônio. Este departamento foi criado em atendimento ao Protocolo de Quioto.

Como parte relevante da comunicação nacional do Brasil à Convenção sobre Mudança do Clima, o Inventário de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal, emitido pelo DEMC, trouxe ao conhecimento público dados relevantes sobre as emissões brasileiras. Os primeiros inventários dos países em desenvolvimento tomam como base o ano de 1994 e naquele ano, a principal fonte emissora de CO₂ para a atmosfera, no Brasil, foi o setor agrícola, com uma participação de cerca de 80% das emissões. Em seguida, aparecia o setor energético com emissões de CO₂ em torno de 17% do total, diferentemente do restante do mundo, onde as emissões de CO₂ para a produção de energia representavam 80% do total verificado (MMA, 2011). A figura 2.6 ilustra o percentual das emissões de CO₂ equivalente no Brasil em cada um dos setores econômicos para o ano de 2010. A baixa contribuição para as emissões no setor energético se deve a algumas opções feitas pelo país ao longo das últimas décadas, como a utilização de recursos hídricos para a geração de eletricidade e a utilização do etanol no setor de transportes. Em 2010, 71% da oferta interna de eletricidade teve como fonte a hidroeletricidade (MMA, 2011).

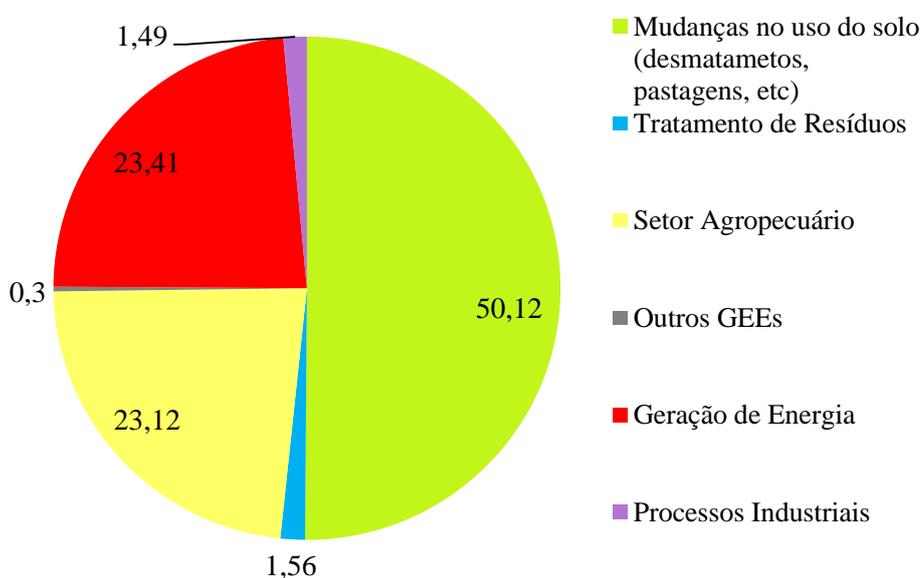


Figura 2.6 – Percentual de emissões de CO₂ em relação aos setores econômicos brasileiros no ano de 2010 - adaptado de MMA (2011).

Em termos da quantidade de gás carbônico equivalente emitido para a atmosfera em função da geração de energia elétrica, devem-se considerar as diversas fontes existentes. Além da geração hidrelétrica, as fontes mais utilizadas no Brasil provêm da queima dos seguintes combustíveis fósseis: óleo diesel, óleo combustível, carvão, gás natural seco e gás de coqueria.

Como cada uma das fontes emite uma quantidade distinta de gás carbônico, para se ter um valor estimado da quantidade de CO₂ emitido por kWh gerado, é necessário ponderar-se o percentual de cada uma destas fontes no sistema energético brasileiro. A emissão média brasileira é de 0,075kg de CO₂ equivalente por kWh utilizado pelo consumidor final (IPCC, 2011).

Uma importante política instituída pelo governo foi a criação do selo PROCEL, em 1985, que tem como objetivo combater o desperdício da produção e do uso de energia elétrica, incentivando os consumidores a adquirirem produtos mais eficientes e estimulando as indústrias a investirem em novas tecnologias com o intuito de diminuir o consumo de seus equipamentos. Assim, o país garante uma redução nos custos dos investimentos em novas instalações do sistema elétrico.

Entre outras políticas ambientais adotadas pelo Brasil nas últimas décadas, a mais importante delas é o Plano Nacional sobre a Mudança do Clima, que entrou em vigor em 2008 e tem como objetivos o incentivo ao desenvolvimento e aprimoramento de ações de mitigação, criando condições internas para lidar com os impactos das mudanças climáticas globais. Entre as principais metas do Plano, incluem-se a redução de 80% no índice de desmatamento anual da Amazônia; o aumento de 11% no consumo interno de etanol; a duplicação da área de florestas plantadas; e, além de outras medidas, a troca de um milhão de geladeiras antigas por ano, até 2018. Esta última é de grande interesse neste trabalho pois se espera que exista uma mudança nas características do parque brasileiro de refrigeradores, conforme abordado na sequência deste trabalho.

2.3 FLUIDOS REFRIGERANTES

Os fluidos de trabalho utilizados em aplicações de refrigeração são denominados refrigerantes. Há uma grande variedade de compostos que podem ser utilizados e sua escolha está condicionada a pelo menos quatro fatores: potencial de aquecimento global; eficácia e eficiência, considerando se as propriedades termodinâmicas do fluido

para o projeto em específico são suficientes para garantir o melhor modo de operação do sistema; custos de projeto e manutenção; e segurança. Poder-se-ia incluir, anos atrás, os efeitos negativos do fluido sobre a camada de ozônio, porém a utilização de substâncias com potenciais de degradação do ozônio está restrita em todos os países que possuem tecnologias e mercado para a produção e venda de equipamentos de refrigeração.

No início da refrigeração mecânica, muitas pesquisas se concentraram na área de refrigerantes. Entre 1830 e 1930, sem tecnologias para a fabricação de fluidos sintéticos, a produção de frio era feita com fluidos naturais, entre eles o gás carbônico, o dióxido de enxofre, a amônia e alguns hidrocarbonetos. A maioria deles apresenta riscos à saúde ou são inflamáveis e, devido ao fato das tecnologias da época não apresentarem padrões de segurança confiáveis, os riscos de acidente eram elevados.

Diante deste cenário, pesquisadores buscaram identificar refrigerantes não tóxicos, não inflamáveis e quimicamente estáveis, e chegaram à família dos hidrocarbonetos halogenados, ou os Clorofluorcarbonos (CFCs). A introdução dos CFCs permitiu a disseminação dos refrigeradores domésticos e a utilização deste tipo de fluido foi massiva entre os anos de 1930 e 1990.

Em meados de 1985, os efeitos negativos dos CFCs na camada de ozônio, e a consequente assinatura do Protocolo de Montreal, fizeram com que a busca e o desenvolvimento de outros fluidos se acentuasse. Assim, no período compreendido entre 1990 e 2010, houve uma substituição do grupo dos CFCs pelo grupo dos HFCs (hidrofluorcarbonos) e dos HCFCs (hidroclorofluorcarbonos), além de, lentamente, aumentar a utilização de hidrocarbonetos e substâncias naturais, como o dióxido de carbono e a amônia. Com a utilização destes novos fluidos, a camada de ozônio foi poupada e aos poucos ela retorna à sua composição original, porém, os HFCs e HCFCs possuem um alto potencial de aquecimento global, fazendo com que sua utilização seja questionável do ponto de vista ambiental.

Com isso, a tendência é que no futuro próximo haja a volta massiva dos fluidos naturais, como amônia, dióxido de carbono e os hidrocarbonetos, como utilizados nos primórdios da refrigeração mecânica. Com o avanço das tecnologias, é possível garantir um ambiente mais seguro e saudável quando comparado com aquele verificado em meados do século XIX.

A escolha do fluido refrigerante não é tarefa fácil, uma vez que praticamente todos possuem aspectos negativos quando considerados os quatro critérios citados

anteriormente. Cientistas trabalham na formulação de um composto artificial que reúna todas as características desejáveis e, embora ainda não tenha havido êxito, grandes avanços foram verificados.

No mercado brasileiro, o fluido refrigerante mais utilizado é o R-134a, que veio em substituição ao R-12. Cerca de 97% dos equipamentos domésticos de refrigeração que entraram em operação nos últimos 20 anos, trabalham com este fluido refrigerante, (EMBRACO, 2011).

2.3.1 Indicadores

Para quantificar o potencial de impacto de algumas substâncias no ambiente, sobretudo àquelas utilizadas em processos de refrigeração, existem cálculos que permitem avaliar quantitativa e qualitativamente os efeitos da presença destas substâncias na atmosfera.

A seguir são apresentados os mais importantes indicadores utilizados nestas estimativas e que são referência nos projetos de equipamentos de refrigeração e dão a dimensão dos efeitos que a escolha de uma substância específica como fluido de trabalho destes equipamentos pode acarretar do ponto de vista ambiental.

2.3.1.1 Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global)

O *Global Warming Potential* (GWP) mede o potencial de aquecimento global de uma dada substância e o impacto dessa em relação ao efeito de uma massa similar de dióxido de carbono durante um intervalo de tempo específico e previamente determinado. O GWP é calculado pela razão entre o efeito radiante temporal integrado da liberação instantânea de 1 kg de uma dada substância em relação à liberação de 1 kg do gás de referência, CO₂, conforme ilustra a equação 2.1

$$GWP(x) = \frac{\int_0^{100} a_x [x(t)] dt}{\int_0^{100} a_r [r(t)] dt} \quad (2.1)$$

em que,

- ITH Horizonte de tempo dentro do qual o cálculo é considerado;
- a_x, a_r Capacidade da substância analisada em absorver radiação infravermelha (propriedades moleculares);
- $x(t), r(t)$ Equação de decaimento da quantidade da substância ao longo do tempo.

O índice GWP de uma substância expressa, portanto, a contribuição integrada (sobre um horizonte de tempo) de uma dada massa de substância, em relação à contribuição integrada da mesma massa de um gás de referência (CO_2) sobre o mesmo horizonte de tempo (Pimenta, 2008). A rigor, quando se diz que o GWP de uma substância é de 1.300, como é o caso do fluido R-134a, significa que um quilograma desta substância liberada no ambiente produz os mesmos efeitos, sobre o aquecimento global, que 1.300 kg de CO_2 . A padronização dos efeitos das substâncias em função de uma única substância padrão facilita as análises e as comparações entre fluidos refrigerantes, sendo este indicador também é essencial para projetistas na decisão de qual substância adotar em seu equipamento de refrigeração.

A tabela 2.1, a seguir, ilustra os valores típicos de GWP para algumas substâncias utilizadas como fluidos refrigerantes em equipamentos de refrigeração:

Tabela 2.1 – Valores de GWP de algumas substâncias típicas utilizadas em refrigeração.

Substância	GWP (horizonte de tempo de 100 anos)
R-134a	1.300
R-22	1.700
R-11	4.000
R-12	2.400
R-407C	1.610
R-410A	1.725
CH_4	25
N_2O	298
HFC-23	11.700
HFC-32	650
CF_4	6.500

R-717 (amônia)	0
R-143a	4.300
R-401a	1.100
CO ₂	1

2.3.1.2 Total Equivalent Warming Impact (Impacto Total de Aquecimento Equivalente)

O conceito de *Total Equivalent Warming Impact* (TEWI), ou impacto total equivalente de aquecimento, foi desenvolvido no início dos anos 90 e é um índice comparativo do impacto de aquecimento global entre aplicações de refrigeração semelhantes e que utilizam diferentes fluidos refrigerantes (Fischer *et al*, 1991). Este indicador combina os efeitos do aquecimento devido ao CO₂ equivalente, liberado na atmosfera devido à geração da energia elétrica a ser consumida ao longo da vida útil de um sistema de refrigeração (efeito indireto), com os efeitos resultantes da emissão direta do fluido refrigerante utilizado por este sistema, também calculado em função de CO₂ equivalente (efeito direto). O TEWI é dado pela soma destes efeitos diretos e indiretos e é representado pela equação 2.2.

$$TEWI = CO_2equ_{DIRETO} + CO_2equ_{INDIRETO} \quad (2.2)$$

Deve-se observar que tanto o componente direto quanto o indireto dependem do sistema em questão, não fazendo sentido apresentar o TEWI para um refrigerante em particular, pois, vazamentos e eficiência do sistema não são propriedades do refrigerante em si (Pimenta, 2008). Além disso, o impacto pode exceder a vida do equipamento, logo se deve escolher uma base de tempo adequada (um horizonte de tempo integrado de 100 anos é com frequência usado). A parcela associada ao impacto direto é dada pela equação 2.3 e a associada ao efeito indireto é calculada pela equação 2.4.

$$CO_2equ_{DIRETO} = M_{ref} L_{rate} V_{util} GWP \quad (2.3)$$

em que,

M_{ref} Carga de refrigerante no equipamento, kg/s;

L_{rate} Taxa anual de refrigerante emitido (reposições, vazamentos) kg/ano;
 V_{util} Vida útil econômica do equipamento, anos.

$$CO_2 equ_{INDIRETO} = \dot{W}_{el} T_{serv} V_{util} E_{CO_2,G} \quad (2.4)$$

em que,

\dot{W}_{el} Potência elétrica do equipamento, Watts;
 T_{serv} Número de horas de operação anual, horas;
 $E_{CO_2,G}$ Emissão de CO₂ na geração de eletricidade, kg.

O índice TEWI é muito útil como forma de comparação do impacto de aquecimento global entre sistemas de refrigeração e diferentes fluidos refrigerantes, porém, devido às considerações utilizadas em sua obtenção, o mesmo não deve ser o único fator a ser observado na escolha da melhor alternativa para uma dada aplicação em refrigeração. Neste caso, devem-se considerar outros fatores tais como: segurança, custos, reciclagem e outros fatores ambientais e energéticos (Sand *et al*, 1999).

Em refrigeração, o uso do TEWI pode ser aplicado à otimização de sistemas, onde o principal objetivo é a mitigação do impacto no aquecimento global causado pelos equipamentos. Neste caso, a redução no impacto ambiental pode se dar por:

- a) uso de fluidos refrigerantes com índices GWP menores;
- b) redução nas emissões de fluidos refrigerantes, melhorando a estanqueidade do sistema e melhorando os processos de fabricação dos equipamentos;
- c) melhoria no desempenho dos equipamentos, de forma a reduzir o consumo de energia elétrica.

2.3.1.3 Life Cycle Climate Performance

Originado do conceito de TEWI, o *Life Cycle Climate Performance* (LCCP) estima o impacto de um equipamento, ao longo da vida útil, devido às emissões diretas e indiretas de gases de efeito estufa, incluindo emissões não intencionais durante o processo de produção das substâncias químicas, energia envolvida na fabricação dos

componentes, energia consumida na operação e emissões quando da disposição final ou reciclagem deste equipamento (Peixoto, 2006).

O conceito de LCCP corrige certos “erros” específicos na aplicação de análises baseadas no TEWI, como:

- a) Não inclusão da energia elétrica utilizada e emissão de gases de efeito estufa associados com a produção de refrigerantes;
- b) Uso inadequado do ITH de 100 anos em conjunção com certos gases de efeito estufa de longa vida (maiores que 100 anos);
- c) Não consideração das perdas/emissões associadas aos fluidos de trabalho no fim de vida do produto (Pimenta, 2008).

Durante a vida útil do equipamento, a parcela da contribuição relacionada a estas emissões não intencionais, percentualmente se reduz, uma vez que o impacto causado pelo de energia elétrica é contínuo e acresce o valor do LCCP enquanto o equipamento estiver em funcionamento.

As emissões não intencionais representam cerca de 0,7%, em média, do total emitido durante dez anos de operação de um equipamento de refrigeração doméstica de médio porte, enquanto a produção de energia representa 90,3%. Os 9% restantes são devidos às perdas de fluido através de vazamentos (IMBERA, 2011). Assim, verifica-se que, para refrigeradores domésticos, o LCCP não é significativo quando se analisa o impacto do equipamento no ambiente. As análises de cálculos ao longo deste trabalho consideram apenas os valores de TEWI para os equipamentos, não incluindo esta última parcela referente às emissões não intencionais.

3 COMPRESSORES UTILIZADOS EM REFRIGERAÇÃO DOMÉSTICA

O escopo deste trabalho é a análise do comportamento da perda de eficiência de refrigeradores domésticos. O compressor é o principal componente do ciclo de refrigeração pois é dele o papel de elevar a pressão do fluido refrigerante através da compressão do mesmo, e garantir, assim, que haja a troca de calor necessária dentro do gabinete da geladeira após a expansão desse fluido refrigerante.

Dentre os componentes de um equipamento residencial de refrigeração, o compressor é o que mais se degrada ao longo do tempo, uma vez que além de estar exposto aos efeitos naturais de desgaste, como aqueles advindos das variações da temperatura ambiente e da umidade ou a processos de corrosão, possui elementos que se movimentam em seu interior em altas frequências. Além disso, o equipamento está sujeito a inúmeros ciclos de liga/desliga durante sua vida útil e, durante o início e o final destes ciclos, são verificados alguns fenômenos físicos que aceleram a degradação do equipamento e diminuem sua vida útil, além de influenciar em sua eficiência.

Este capítulo aborda a modelagem matemática de compressores ideais e reais, além de discutir os principais tipos de desgaste que ocorrem nesses equipamentos ao longo de sua vida útil.

3.1 O CICLO DE COMPRESSÃO A VAPOR

Um refrigerador doméstico opera segundo a teoria do Ciclo Reverso de Carnot, onde o calor passa de uma fonte de baixa para uma de alta temperatura, mediante o fornecimento de uma quantidade de energia na forma de trabalho, conforme mostra Figura 3.1.

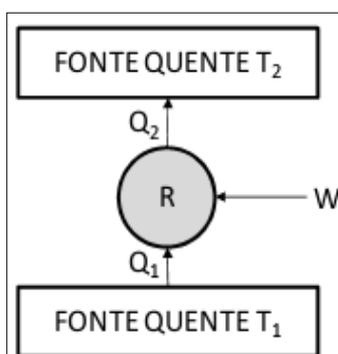


Figura 3.1- Ciclo Inverso de Carnot

Uma forma típica de produção do frio é a da refrigeração por compressão mecânica de vapor, onde se utilizam fluidos refrigerantes, abordados no capítulo 2, que promovem a transferência de calor entre dois ou mais meios, mediante processos de mudança de fase.

O princípio de funcionamento de um sistema de refrigeração por compressão de vapor baseia-se na interação cíclica entre componentes básicos, que são: um compressor, um trocador de calor para a fonte quente, um dispositivo de expansão e um trocador de calor para a fonte fria. Este sistema básico pode ser incrementado com diversos acessórios que têm a função de aperfeiçoar o funcionamento do mesmo, de forma a se obter o máximo rendimento possível com o mínimo de trabalho fornecido.

O trocador de calor que opera na fonte quente é denominado condensador e o que opera na fria é o evaporador. O esquema de funcionamento do ciclo de refrigeração por compressão de vapor aplicado a um refrigerador doméstico é representado na figura 3.2, onde um fluido refrigerante circula internamente pelos componentes do sistema, no sentido crescente dos números assinalados, formando regiões termodinamicamente diferentes e permitindo que o processo se repita constantemente, enquanto o trabalho estiver sendo fornecido ao sistema.

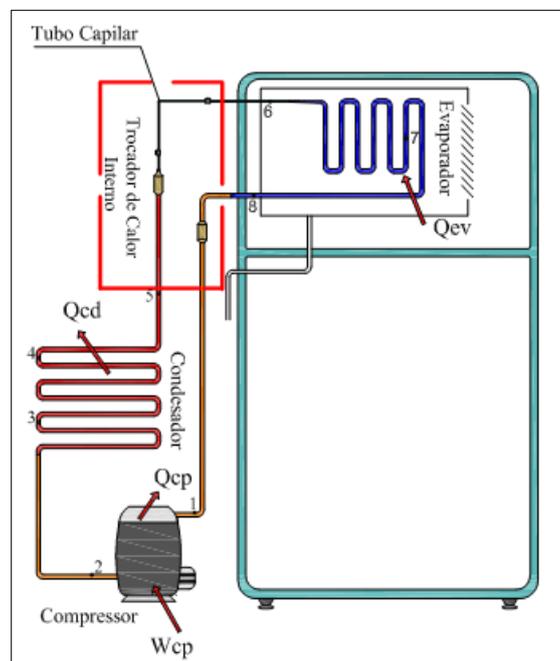


Figura 3.2- Representação esquemática do refrigerador modelado (Adaptado de Pereira, 2010).

Analisando o circuito apresentado na figura 3.2, considerando-se o ciclo e tendo como ponto inicial o compressor, observa-se que após o processo de compressão do fluido refrigerante, que ocorre do ponto 1 ao 2, este é enviado ao condensador onde passará do estado de vapor superaquecido para um estado saturado, entre os pontos 2 e 3. Do ponto 3 ao 4 o fluido sofre uma mudança de fase, passando de vapor para líquido e a partir do ponto 4 até o 5 este líquido é sub-resfriado.

Do dispositivo de expansão o fluido chega ao evaporador, ponto 6, e deste ao ponto 7 recebe calor do ambiente a refrigerar, mudando de um estado saturado para vapor. Do ponto 7 ao 8 o fluido continua recebendo calor do ambiente, de modo a se tornar vapor superaquecido. Após esta etapa, o fluido refrigerante chega ao compressor, representado pelo ponto 1, na forma de vapor superaquecido. Neste ponto, inicia-se novamente o processo de compressão, que se repete enquanto o compressor estiver em funcionamento. A figura 3.3 representa, esquematicamente, o que ocorre com a pressão e a temperatura do fluido refrigerante durante do este ciclo, sendo os números mostrados equivalentes aos pontos mostrados na figura 3.2.

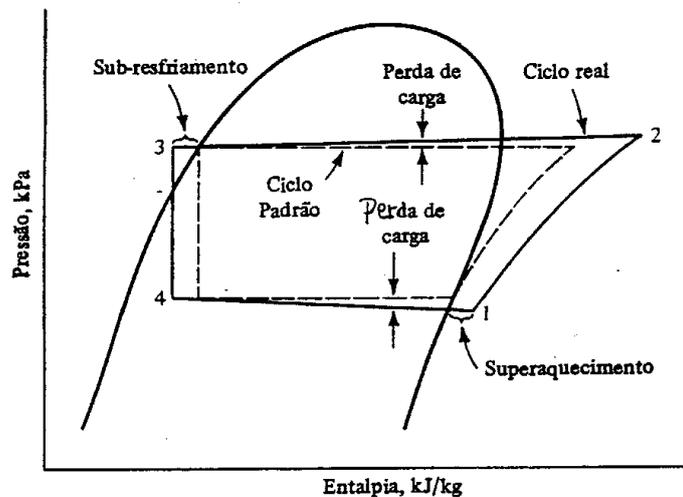


Figura 3.3 – Gráfico Pressão por Entalpia de um ciclo real, como representado no esquema da figura 3.2.

A modelagem matemática de um refrigerador doméstico padrão pode ser feita dividindo-se em seus componentes principais como: compressor, condensador, evaporador, tubo capilar e gabinete. Esta modelagem é baseada nas leis de conservação de massa, momento e energia e nas equações de transferência de calor. Como o intuito

deste trabalho é a análise do compressor, aspectos da modelagem dos outros componentes não são tratados neste trabalho, embora é possível encontrar vasto material na literatura.

3.2 MODELAGEM TEÓRICA DE UM COMPRESSOR

O compressor hermético rotativo alternativo é o tipo mais utilizado em refrigeradores domésticos e sua capacidade de refrigeração varia desde uma fração até centenas de quilowatts. Os compressores modernos são de ação simples, normalmente monocilindros, e sua operação ocorre em uma faixa de 50 a 60 Hz. Entretanto, com o avanço da tecnologia já é possível à concepção de compressores que atua em várias faixas de velocidade, com o intuito de promover economia de energia, chegando a operar em até 75 Hz (EMBRACO, 2011).

As duas mais importantes características de um compressor, em termos de desempenho energético, são a sua capacidade de refrigeração e sua potência, que, para um compressor operando em rotação constante, são controladas principalmente pelas pressões de aspiração e de descarga.

A eficiência volumétrica é um dos parâmetros básicos de desempenho dos compressores alternativos e, de modo geral, consiste em dois tipos: a eficiência efetiva e a eficiência de espaço nocivo. A eficiência volumétrica efetiva é definida através da equação 3.1.

$$\eta_{vc} = 100 \frac{\text{Vazão que entra no compressor, m}^3/\text{s}}{\text{taxa de deslocamento do compressor, m}^3/\text{s}} \quad (3.1)$$

A taxa de deslocamento do compressor é o volume coberto pelos êmbolos durante o tempo de aspiração, por unidade de tempo. Já a eficiência volumétrica de espaço nocivo depende da expansão do gás retido entre a válvula e o interior do cilindro no Ponto Morto Superior. O volume máximo, que ocorre quando o êmbolo passa por um dos pontos extremos é definido como V . O volume mínimo ou volume do espaço nocivo, V_c , ocorre quando o êmbolo passa pelo outro ponto extremo. Assim, a fração de espaço nocivo, m , de um compressor é constante e igual a:

$$m = 100 \frac{V_c}{V - V_c} \quad (3.2)$$

Se a expansão entre V_c e V é admitida como isentrópica, ou seja, a relação entre estes volumes é proporcional à relação entre o volume específico do vapor admitido no compressor, v_{asp} , e o volume específico do vapor após a compressão isentrópica, v_{des} , obtemos que a eficiência volumétrica, η_{vn} , é dada por:

$$\eta_{vn} = 100 - m \left(\frac{v_{asp}}{v_{des}} - 1 \right) \quad (3.3)$$

No compressor ideal, a compressão e a expansão do gás retido no espaço nocivo são consideradas isentrópicas. A expansão do gás retido no espaço nocivo é o único fator que afeta a eficiência volumétrica do compressor ideal.

A vazão em massa tem um efeito mais direto sobre a capacidade e a potência de um compressor que a vazão em volume. A vazão em massa, w (kg/s), verificada pelo compressor, é proporcional a taxa de deslocamento, em l/s e a eficiência volumétrica é inversamente proporcional ao volume específico do gás que adentra o compressor:

$$w = \text{taxa de deslocamento} \frac{\eta_{vn}}{100 v_{asp}} \quad (3.4)$$

A potência exigida por um compressor ideal é o produto da vazão pelo aumento de entalpia na compressão isentrópica:

$$P = \dot{m} \Delta h_i \quad (3.5)$$

em que,

P Potência, kW;

m Vazão, kg/s;

Δh_i Trabalho de compressão isentrópica, kJ/kg.

A capacidade de refrigeração é dada por:

$$q = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (3.6)$$

Na equação 3.6, h_1 e h_4 são as entalpias do refrigerante na saída e entrada do evaporador, respectivamente. O efeito de refrigeração, h_1-h_4 , apresenta um leve crescimento com a pressão de aspiração uma vez que, mantida a entalpia do refrigerante que entra na válvula de expansão, a entalpia do vapor saturado cresce com a temperatura de evaporação.

O ciclo de refrigeração completo contempla, além do compressor, o condensador, o evaporador e o dispositivo de expansão. Para

3.3 MODELAGEM DE UM COMPRESSOR REAL

As tendências de desempenho dos compressores alternativos, desenvolvidas analiticamente, são observadas em compressores reais, de acordo com Stoecker e Jones (1985). O cálculo da eficiência volumétrica, com base na expansão do gás residual do espaço nocivo, é o primeiro passo na estimativa da eficiência volumétrica efetiva. Outros fatores, como perda de carga através das válvulas de aspiração e descarga, fugas pelos anéis dos êmbolos e pelas válvulas, também afetam a eficiência volumétrica e a eficiência do sistema como um todo. O aquecimento do gás aspirado, pelo cilindro, reduz a eficiência volumétrica, uma vez que o gás é aquecido e expandido após adentrar o cilindro, fazendo com que seu volume específico seja aumentado em relação ao valor na entrada do compressor, em função da eficiência volumétrica previamente definida.

Todos os fatores citados contribuem para a diminuição da eficiência do compressor e do ciclo como um todo e algumas de suas causas serão discutidos nos tópicos a seguir, que tratam das falhas verificadas nos compressores devido à incorreta utilização dos mesmos e aos desgastes naturais que sofrem ao longo do tempo.

Além da eficiência volumétrica, pode-se analisar a eficiência de compressão, que é dada por:

$$\eta_c = 100 \frac{\dot{m}\Delta h}{\text{Trabalho real de compressão, kJ/kg}} \quad (3.7)$$

Na equação 3.7, os trabalhos de compressão são referidos às mesmas pressões de aspiração e descarga. O atrito entre as superfícies, devido ao movimento relativo entre as partes móveis e as perdas de cargas, através das válvulas, são fatores que contribuem para a diminuição da eficiência de compressão, afetando diretamente o desempenho do ciclo como um todo.

A caracterização de um compressor em operação real não é tarefa fácil, uma vez que muitas variáveis não dependentes relacionam-se de maneira não tão clara e de difícil determinação. Com isso, a ASHRAE propôs um método para caracterizar as curvas reais dos compressores considerando as possíveis perdas envolvidas no processo de compressão. Entretanto, a formulação leva em conta a obtenção de parâmetros ensaiados em laboratório e não leva em conta o fator de degradação do mesmo ao longo do tempo, também sendo esta uma tarefa do pesquisador em determinar a influência dos desgastes nas previsões e nos modelos de funcionamento dos compressores. Além disso, o modelo proposto ainda leva em consideração a existência de uma perfeita troca de calor na superfície do condensador e o perfeito controle da válvula termostática, além de desconsiderar as transferências de calor que ocorrem entre o sistema e o meio. Assim, a metodologia da ASHRAE propõe que, antes de ser comprimido, o refrigerante é aquecido por perdas eletromecânicas.

Uma relação linear é utilizada para representar a potência de transmissão de um motor:

$$\dot{W} = \dot{W}_{lo} + \alpha \dot{W}_{in} + \dot{W}_{in} \quad (3.8)$$

em que,

- \dot{W} Potência elétrica do compressor hermético;
- \dot{W}_{lo} Perda eletromecânica, constante;
- α Fator de perda;

W_{in} Potência elétrica interna do compressor.

Os parâmetros \dot{W} e α devem ser determinados experimentalmente, o que não contribui para uma rápida e fácil caracterização de compressores. Considera-se que o aquecimento do fluido refrigerante ocorra a pressão constante.

Em relação ao espaço nocivo, a ASHRAE avalia que, devido à reexpansão do volume de gás contido nesse espaço, a vazão de refrigerante é uma função decrescente, relacionada com a relação entre as pressões do sistema, de acordo com a equação a 3.9.

$$\dot{V} = \dot{V}_s \left[1 + C_f - C_f \left(\frac{p_{out}}{p_{in}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right] \quad (3.9)$$

Na equação 3.9, \dot{V} é a taxa de vazão volumétrica, \dot{V}_s é a taxa de volume do volume varrido, C_f é o fator de folga, p_{out} e p_{in} são as pressões de descarga e admissão, respectivamente.

Com a diminuição do fluxo de fluido refrigerante, o sistema passa a ser mais requisitado, fazendo com que o tempo de trabalho do compressor seja maior para se obter um mesmo efeito de refrigeração. Com isso, as peças estão sujeitas a um desgaste maior e uma diminuição de sua vida útil, uma vez que falhas prematuras acabam por ocorrer devido a estes desgastes. Os principais problemas são tratados no tópico a seguir. .

3.4 DESGASTES COMUNS QUE AFETAM A EFICIÊNCIA DE COMPRESSORES

Segundo Placer (2001), os dados industriais mostram claramente que os compressores que foram substituídos em campo apresentam um índice de falhas muito maior que os compressores instalados em sistemas novos. Isso demonstra que a falha que originou o defeito no compressor original permanece no sistema sem ter sido resolvido enquanto não houver atuações no sistema.

Essa afirmação mostra que inúmeras falhas, em diversos graus de intensidade, acontecem nos compressores e levam a uma progressiva perda de eficiência e aumento

do desgaste, de maneira geral, em todas as partes móveis do compressor. Isso se deve ao fato de os compressores continuarem seu funcionamento mesmo com a presença de uma falha e ao fato de ser difícil o diagnóstico de problemas, uma vez que os compressores domésticos são, de modo geral, unidades “seladas” e de difícil acesso.

Outra questão importante é o fato de os consumidores não estarem atentos aos possíveis sinais de desgaste de seus equipamentos de refrigeração, tais como ruídos anormais, aquecimento excessivo na parte traseira do equipamento, aumento do número de partidas do compressor, aumento do tempo em que o equipamento permanece em funcionamento e aumento do consumo de energia. Assim, fatores degradantes fazem com que o desgaste do equipamento se acentue e os problemas continuam a não serem identificados.

Segundo Bassetto (2009), as cinco principais causas de desgastes anormais em compressores, e que representam 95% de todos os problemas verificados, tais como quebra do equipamento e perda de eficiência, são: o retorno de refrigerante líquido; a partida inundada; o sobreaquecimento; a falta de lubrificação adequada; e o golpe de líquido. Os fatores que levam a ocorrência destes fenômenos, abordados a seguir, são inúmeros e normalmente não identificados de maneira fácil.

3.4.1 Retorno de refrigerante líquido

O retorno de refrigerante ocorre durante a operação do compressor e se dá quando um grande volume de fluido refrigerante retorna, de maneira não prevista, para dentro da cavidade de pistão, através da válvula de sucção, vindo da linha de alta pressão do equipamento. Além dos estragos que o líquido em si causa ao compressor, que é projetado para trabalhar apenas com gases, ele se mistura com o óleo lubrificante alterando sua capacidade de lubrificação, deixando o óleo cada vez mais diluído e acarretando problemas devido à lubrificação ineficiente das partes móveis.

O grau de retorno do líquido determinará a intensidade dos danos causados ao compressor e quando há problemas de lubrificação, ocorre um desgaste prematuro que lança pequenas partículas metálicas no sistema, contaminando o óleo e o fluido refrigerante, provocando futuros entupimentos ao longo de todo o circuito.

O retorno de líquido normalmente ocorre durante o período noturno, quando as necessidades de refrigeração são menores, devido, sobretudo, a uma menor quantidade

de aberturas de portas e movimentação de produtos dentro do refrigerador, fazendo com que o equipamento exceda a capacidade necessária para que o sistema atue normalmente.

As principais causas de retorno de líquido refrigerante ao compressor são:

- Baixas cargas de fluido refrigerante no evaporador;
- Equipamento superdimensionado;
- Dificuldades de circulação de ar refrigerado dentro do gabinete, devido à presença de prateleiras e alimentos maiores que interferem no fluxo de ar;
- Problemas no ventilador do evaporador, quando existir;
- Problemas de acúmulo de óleo no evaporador, causando restrições de fluxo;
- Congelamento do evaporador, dificultando a circulação de ar e a transferência de calor;
- Orifício da válvula de expansão superdimensionado, com avarias ou bloqueadas por óleo ou outras partículas;
- Baixos valores de superaquecimento configurados para a operação do compressor.

3.4.2 Partidas inundadas

As partidas inundadas são as maiores causas de desgaste e falha dos compressores (Danfoss, 2009) e ocorrem quando fluido refrigerante migra do sistema e se condensa no óleo do compressor. Esta migração pode ocorrer em todo o sistema, quando a pressão de vapor do refrigerante se torna maior que a pressão de vapor do óleo.

O fenômeno ocorre quando o compressor acaba de se desligar e a temperatura do óleo começa diminuir lentamente. Em situações em que a temperatura ambiente é mais baixa, o vapor de refrigerante começa a migrar para a parte mais fria do sistema. Quando esta parte é o compressor, o vapor condensa dentro dele e, lentamente, o óleo do cárter se dilui com este líquido condensado. Quanto mais tempo o compressor fica inativo, maior a quantidade de fluido refrigerante que migra para o óleo. Isso ocorre porque a mistura de óleo e fluido refrigerante forma uma emulsão, que cria uma camada de separação entre o óleo e o refrigerante puro, deixando o óleo na parte de cima,

“atraindo” cada vez mais fluido refrigerante. A sequência de ilustrações da figura 3.4 mostra como este processo ocorre: em a) verifica-se que o fluido refrigerante começa a migrar para a parte mais fria do sistema, que no caso é o compressor. Em b) o vapor de refrigerante começa a condensar dentro do compressor e se dilui com o óleo, formando uma emulsão. Em c), conforme o óleo se satura, parte do refrigerante se separa e forma uma camada abaixo desta emulsão, fazendo com que apareça uma camada superior de óleo. Isso faz com que mais refrigerante, na forma de vapor, seja misturado ao óleo, fazendo culminando na “explosão” do líquido refrigerante assim que o compressor entra em operação.

Esta explosão danifica os componentes móveis do sistema, podendo causar desde pequenas avarias, afetando futuramente a eficiência do compressor, até a quebra dos componentes, além de contaminar o óleo lubrificante, lançando partículas de metal e ocasionando desgastes prematuros em função da lubrificação ineficiente.

As principais causas de partida inundada são:

- Sobrecarga de refrigerante no sistema;
- Temperatura no cárter do compressor menor que no evaporador;
- Longos períodos com o compressor desligado, durante o ciclo normal de funcionamento do sistema de refrigeração;
- O compressor estar localizado em uma área muito ventilada ou com temperaturas baixas;
- Problemas de potência no motor do compressor, fazendo com que o óleo não consiga ser aquecido até sua temperatura ideal de funcionamento;
- Válvula solenoide com vazamentos

As principais falhas verificadas devido às partidas inundadas são:

- Perda de lubrificação nos rolamentos do motor;
- Desgastes irregulares nas superfícies dos componentes;
- Avarias e quebras dos componentes internos do compressor.

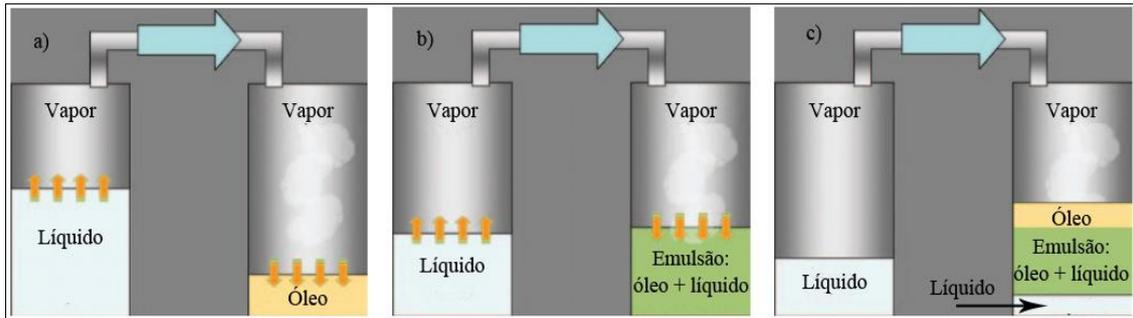


Figura 3.4 – Fluxo do fluido refrigerante no compressor (Adaptado de Danfoss, 2009).

3.4.3 Golpe de líquido

O golpe de líquido ocorre em casos de partida inundada e de retorno de líquido, ocorrendo quando o fluido refrigerante entra no compressor e se mistura com o óleo lubrificante do cárter. A mistura de refrigerante e óleo cria grandes quantidades de gotículas de óleo e uma mistura espumosa (emulsão), que, como mencionado anteriormente, acaba por “explodir” dentro do compressor quando sua atividade é iniciada.

Em alguns casos, esta emulsão é carregada até as válvulas de sucção e o cilindro, causando o fenômeno conhecido como golpe de líquido, quando o compressor tenta comprimir esta emulsão. Dentre as consequências é possível citar a ruptura das palhetas de sucção, palhetas de descarga arrancadas, quebra das juntas de tampa do cabeçote, bielas rompidas e a ruptura do virabrequim. Isso ocorre porque os compressores são projetados para trabalhar com fluidos refrigerantes apenas no estado gasoso e nunca no estado líquido.

As avarias com maior incidência verificadas devido a estes fenômenos são:

- Válvulas de sucção e descarga danificadas;
- Danos no pistão, no cilindro e nos anéis;
- Quebra de virabrequim;
- Deposição de partículas ferrosas no circuito de refrigeração.

3.4.4 Superaquecimento

Os compressores trabalham normalmente aquecidos devido ao calor proveniente do motor, das fricções internas e do ciclo de compressão como um todo, incluindo as trocas de calor inerentes a ele. Se os parâmetros de projeto forem respeitados, a durabilidade dos componentes será a ideal. Porém, quase sempre, situações externas criam cenários em que os parâmetros previamente projetados para a utilização dos compressores não são respeitados e, quando isso ocorre, verificam-se os efeitos de superaquecimento nos compressores.

Quando opera além de seus parâmetros de projeto, o primeiro problema que o compressor experimenta é a elevação da temperatura de descarga, que é logo notada nos cilindros e nas válvulas de descarga. Conforme a temperatura aumenta, a lubrificação dos cilindros e pistões fica comprometida, fazendo com que o contato quase direto de metal-metal gere minúsculas partículas sólidas do material, que se acumulam no óleo, alterando sua capacidade de lubrificação e gerando um desgaste prematuro dos componentes do compressor. Além disso, o óleo acaba se sobreaquecendo e, ao passar pela válvula de descarga, deixa resíduos que, ao longo do tempo, se acumulam e afetam significativamente a estrutura das palhetas, fazendo que parte do gás retorne para a câmara de compressão. Isso fará com que a pressão de sucção aumente e o equipamento perca parte de sua capacidade de refrigeração.

Os problemas de superaquecimento são verificados através da coloração escura do óleo (carbonização). As temperaturas normais de descarga em refrigeradores domésticos estão entre 70 e 80°C. Quando a temperatura atinge 110°C o grau de deterioração é acentuado.

As principais causas dos superaquecimentos são:

- Altas taxas de compressão;
- Baixa pressão de sucção;
- Alta pressão de descarga;
- Altos valores de superaquecimento na sucção;
- Presença de ar ou outros fluidos não condensáveis no condensador;
- Condensador com entupimentos;

As avarias típicas verificadas deste tipo de falha são:

- Marcas nos cilindros e pistões;
- Desgaste excessivo nas partes móveis, devido a problemas de lubrificação;
- Válvulas carbonizadas;
- Válvulas quebradas;
- Partículas de metal ao longo do cárter do compressor;
- Motor queimado;
- Escurecimento da coloração do óleo (marrom ou preto), com alteração em suas propriedades físicas.

3.4.5 Lubrificação

Problemas advindos da lubrificação do sistema são subdivididos em duas categorias principais: lubrificação ineficiente e deficiência na quantidade de óleo.

A ineficiência de lubrificação ocorre quando o óleo não consegue lubrificar os rolamentos e outras partes móveis devido à sua degradação, e consequente perda de capacidade de lubrificação, ou quando o lubrificante não consegue atuar devido a perdas, entupimentos ou bloqueios.

Esta deficiência de lubrificação é decorrente dos outros problemas citados e seu principal efeito é o sobreaquecimento das peças e eventuais rupturas, além dos próprios efeitos do sobreaquecimento. Além disso, quando o óleo está degradado, ele perde a sua capacidade de suportar altas cargas de trabalho e, assim, acaba por ser ineficiente na sua tarefa de lubrificar e resfriar as superfícies em atrito, fazendo com que o problema de deposição de partículas de metal no óleo ocorra.

A falta de quantidade suficiente de óleo ocorre quando este é bombeado para o circuito de refrigeração e não retorna de maneira adequada a satisfazer corretamente as suas funções. Isso é verificado quando o ciclo projetado originalmente não é respeitado, ou seja, ocorre superaquecimento devido a qualquer fator externo que faça com que o óleo fique preso nas linhas de trabalho ou quando há perda de gás refrigerante para o ambiente.

As avarias típicas deste problema são geralmente desgastes prematuros nas partes móveis do sistema e a presença de ranhuras, que podem concentrar tensões e levam a redução da vida útil dos componentes e do compressor como um todo.

Todos os problemas citados anteriormente levam a problemas de lubrificação. As figuras 3.5 e 3.6 são exemplos do que ocorre quando o sistema apresenta problemas no lubrificante, que é um importante indicador da saúde do compressor e do circuito de refrigeração como um todo. Na figura 3.5, verificam-se o desgaste de metal e a formação de carbono, na cavidade do cilindro. Já na figura 3.6, verificam-se o desgaste da superfície do eixo do pistão, com perda de material e depósitos de carbono, em a); e desgaste agressivo, com significativa perda de material e contaminação do óleo, em b).



Figura 3.5 – Cavidade do cilindro, operando com deficiência de lubrificação – Danfoss (2010).



Figura 3.6 - Desgastes sofridos pelas peças móveis do compressor – Danfoss (2010).

3.4.6 Outros fenômenos degradantes

Outros fenômenos indesejados que são verificados em compressores estão relacionados à presença de gases não condensáveis e umidade no sistema, que provocam efeitos danosos a seus componentes, elevando a pressão e a temperatura de descarga, prejudicando o desempenho e aumentando o grau de desgaste do equipamento. A umidade ainda pode afetar o sistema ao congelar-se no dispositivo de expansão, restringindo a passagem do gás refrigerante ou até mesmo bloqueando seu fluxo. Além disso, ela pode reagir com o óleo lubrificante e o refrigerante, formando ácidos que provocam corrosões metálicas e a deterioração da isolação do motor, podendo levar a queima deste componente.

Além da umidade, a contaminação do sistema por ar, cavacos metálicos e outros tipos de sujeira, que podem entrar no sistema durante a fabricação do equipamento, criam condições de condensação mais elevadas que o normal, sobrecarregando as válvulas e fazendo que a superfície dos mancais se desgaste prematuramente. Adicionalmente, pode ocorrer acúmulo de carvão ao redor dos orifícios das válvulas e na área de cilindro, que, juntamente com os cavacos metálicos, podem bloquear pequenos orifícios e causar restrições tanto no fluxo de refrigerante como no fluxo do óleo do cárter do compressor.

Por fim, as falhas elétricas, verificadas principalmente no relé de partida do motor, nos capacitores de partida e de marcha e no protetor térmico, também ocorrem quando o funcionamento não é adequado e as faixas de temperatura e tensão elétrica não são respeitadas. Isso acarreta o superaquecimento do sistema e pode levar à falha dos componentes e a possível queima do motor.

3.4.7 Degradação nos demais componentes do refrigerador

Além dos compressores, é importante notar os outros fatores degradantes existentes nos demais componentes do equipamento de refrigeração e seus efeitos acarretam em perdas na eficiência do ciclo.

A quantidade de fluido refrigerante no sistema é uma das mais importantes variáveis que afetam o desempenho do ciclo. Considerando-se que, com as inovações tecnológicas, é muito improvável que um refrigerador saia de fábrica com uma carga

acima daquela prevista em projeto (carga nominal), os equipamentos tendem a não apresentar as falhas típicas de um refrigerador com sobrecarga no início de sua vida útil. Todavia, é natural que, com o passar o tempo: a carga de refrigerante diminua, devido a pequenos vazamentos; vibrações excessivas desalinhem componentes do circuito; diferenças de pressões e temperaturas se apresentem acima daquelas previstas; acidentes ao transportar o equipamento ocorram; entre outros fatores que acarretam na degradação do refrigerador.

A caracterização das perdas de fluido para o ambiente não é tarefa simples e atualmente existem poucas pesquisas que indicam a quantidade de refrigerante emitido à atmosfera, pelos refrigeradores domésticos, em função do seu tempo de uso. Estima-se que a perda anual esteja entre 2% e 3% da massa total de refrigerante dentro do sistema (IPCC, 2007).

Além do impacto direto que a emissão de fluidos refrigerantes pode ter sobre o ambiente, conforme abordado no capítulo 2, é interessante analisar a influência que a deficiência deles causa no sistema. Grace *et al* (2002) concluíram que com cargas até 25% abaixo da carga nominal, a capacidade de refrigeração sobre uma variação insignificante e abaixo de 75%, a capacidade de refrigeração reduz-se a 50% da capacidade normal e a pressão de sucção tem um acréscimo de até 10%. Além disso, como a vazão mássica de refrigerante no evaporador é menor, com a consequente redução na capacidade de refrigeração, ocorre um natural aumento nas temperaturas de evaporação e na pressão de sucção. Esses fatores causam os problemas de superaquecimento, acelerando a degradação do equipamento e diminuindo sua eficiência, além de aumentar o tempo de trabalho do compressor, reduzindo sua vida útil.

Outro componente que também sofre desgastes naturais e impactam na eficiência do ciclo e, conseqüentemente, no consumo de energia, é o isolamento térmico.

Em sua fabricação, componentes químicos são misturados de maneira a criar uma espuma com baixa condutividade térmica. Para isso, sua estrutura deve ser composta de minúsculas câmaras celulares onde gases ficam retidos. Estes podem ser hidrocarbonetos, gás carbônico, hidrofluorcarbonetos, entre outros, e sua escolha é feita de acordo com as necessidades do projeto.

Com o passar do tempo, a degradação natural da estrutura dessas câmaras acaba por permitir a fuga desses gases, ocorrendo a entrada de vapor d'água em seu lugar, alterando sua capacidade de isolamento, e fazendo com que mais calor seja trocado pelo ambiente e o compartimento a ser refrigerado (Villar, 2008).

A literatura carece de estudos sobre a degradação desses componentes, porém Johnson (2000) concluiu, através de estudos realizados com equipamentos de refrigeração em operação, que o aumento de consumo de energia, devido à degradação do isolamento, cresce de maneira quase linear nos 10 primeiros anos de uso do equipamento, a uma taxa de 2% ao ano. Quando chega próximo dos 20%, a tendência é que este valor se estabilize pelos próximos 15 anos.

O isolamento térmico também tem um papel fundamental na degradação do compressor, uma vez que com trocas de calor cada vez mais intensas, o compressor é obrigado a trabalhar por períodos maiores a fim de que se obtenha o mesmo efeito de refrigeração ao longo do tempo. Com o aumento do tempo de serviço, as peças se desgastam com maior intensidade e o compressor está sujeito aos problemas citados no decorrer deste capítulo.

3.5 O PARQUE DE REFRIGERADORES NO BRASIL

Para alcançar os objetivos deste trabalho, é necessário realizar um levantamento da quantidade de aparelhos refrigeradores em utilização no Brasil e o tempo de uso de cada um deles. Essa informação é importante pois além de caracterizar o parque destes equipamentos, nos mostra o consumo nominal dos aparelhos utilizados na época em que entraram em operação e possuíam tecnologias menos avançadas em relação à que temos hoje. Exemplo disso são informações levantadas junto ao PROCEL que indicam que o consumo mensal de um refrigerador de um mesmo fabricante, com capacidades similares, reduziu 55% entre 2000 e 2010, o que significa um importante avanço do ponto de vista ambiental e econômico para o país.

Os últimos dados do censo nacional, realizado em 2009/2010 pelo IBGE, mostram que quase 94% das residências do país contam com uma geladeira, pelo menos. A evolução ao longo dos anos, entre 1992 e 2009, pode ser vista na figura 3.7. É interessante notar que com o avanço tecnológico das geladeiras e com a economia brasileira estável, não está sendo mais necessária a realização de estoques de comida e a

quantidade de freezers no mercado vem diminuindo ano após ano, conforme apresentado na figura 3.7.

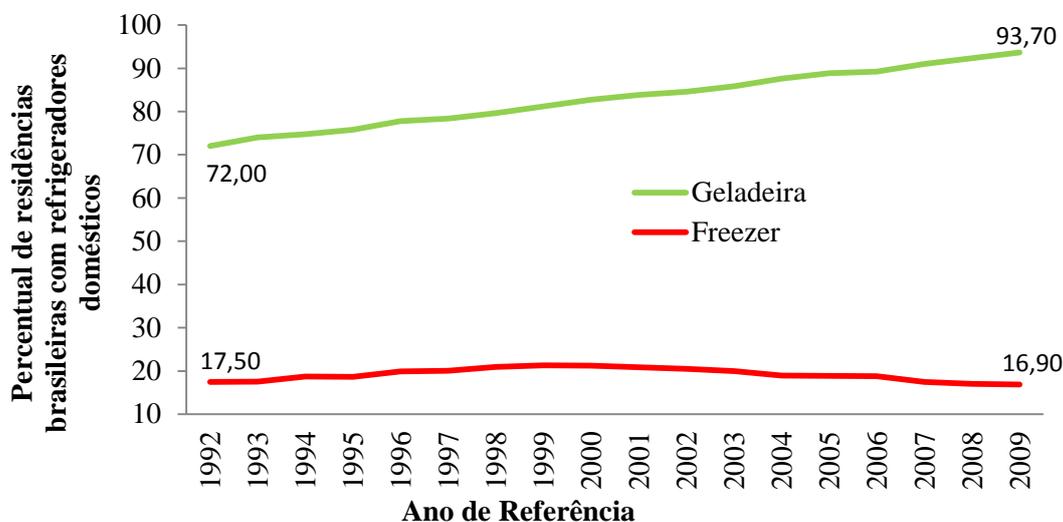


Figura 3.7 – Evolução do percentual de domicílios com aparelhos refrigeradores e freezer no Brasil ao longo dos anos - adaptado de IBGE (2010).

Pereira (2010), utilizando-se de informações fornecidas pelo PNAD (2008), Cardoso e Nogueira (2008) e Silva Júnior (2005), estimou o parque brasileiro de refrigeradores domésticos entre os anos de 1990 e 2015. A tabela 3.1, construída a partir de informações fornecidas pelo autor, representa a evolução do quantitativo de refrigeradores, em funcionamento, no mercado nacional ao longo dos últimos anos. As estimativas mostram que o número de aparelhos mais que dobrou nos últimos 20 anos e que há uma tendência de aumento para o futuro.

Tabela 3.1 – Estimativa do Parque de refrigeradores no Brasil (Pereira, 2010).

Ano Base	N° de Residências (10⁶)	% de residências com refrigeradores	N° de Refrigeradores (10⁶)
1990	34,74	70,3	24,40
1991	35,35	70,9	25,10
1992	37,3	71,5	26,70
1993	37,88	71,80	27,20
1994	39,00	74,20	28,90
1995	39,65	80,40	31,90
1996	40,25	81,00	32,90
1997	40,80	81,50	32,20

1998	41,43	81,90	35,60
1999	42,05	82,90	37,70
2000	42,70	83,20	38,70
2001	43,34	85,10	40,90
2002	44,00	86,70	43,10
2003	44,65	87,30	44,70
2004	45,40	89,55	47,60
2005	46,05	90,81	49,80
2006	46,70	92,07	52,00
2007	47,33	93,33	54,30
2008	47,97	94,59	56,70
2009	48,60	95,84	59,10
2010	49,21	97,10	61,60
2011	49,81	98,36	62,70
2012	50,41	99,62	63,50
2013	50,98	99,95	65,80
2014	51,56	99,95	67,60
2015	52,12	99,95	69,80

Os dados da tabela 3.1 indicam que no ano de 2010, havia 61,6 milhões de equipamentos para uma população de 194 milhões de pessoas (UN, 2012), ou seja, cerca de 1 unidade para cada 3 indivíduos. Além disso, no mesmo ano, estima-se que 97,1% das residências brasileiras possuíam um refrigerador e que, em 2015, 99,5% delas o possuirão (IBGE, 2010). Isso indica que praticamente toda a população terá acesso a este eletrodoméstico.

Deste modo, espera-se que a relação entre a quantidade de refrigeradores pelo total da população se mantenha constante, embora possa haver movimentos econômicos imprevisíveis que a alterem. Todavia, se esta relação se mantiver, é possível realizar uma projeção futura do mercado de refrigeradores até o ano de 2040, quando a população brasileira deve chegar ao seu auge, com 224 milhões de pessoas (UN, 2012).

A figura 3.8 ilustra a evolução do quantitativo de equipamentos, no Brasil, ao longo das últimas décadas e as projeções futuras, considerando a evolução populacional esperada para o país até 2040. Verifica-se que a curva é suavizada ao se aproximar deste ano (notar que, na figura 3.8, o incremento da variável no eixo x passa de 1 para 5 anos, a partir de 2010), porém, em números absolutos, a quantidade de equipamentos deve aumentar em cerca de 11 milhões de unidades, ou seja, 12% em relação ao verificado

atualmente. Assim, o crescimento esperado nos próximos 27 anos (entre 2013 e 2040) deve ser semelhante ao verificado nos últimos 5 anos (entre 2007 e 2012).

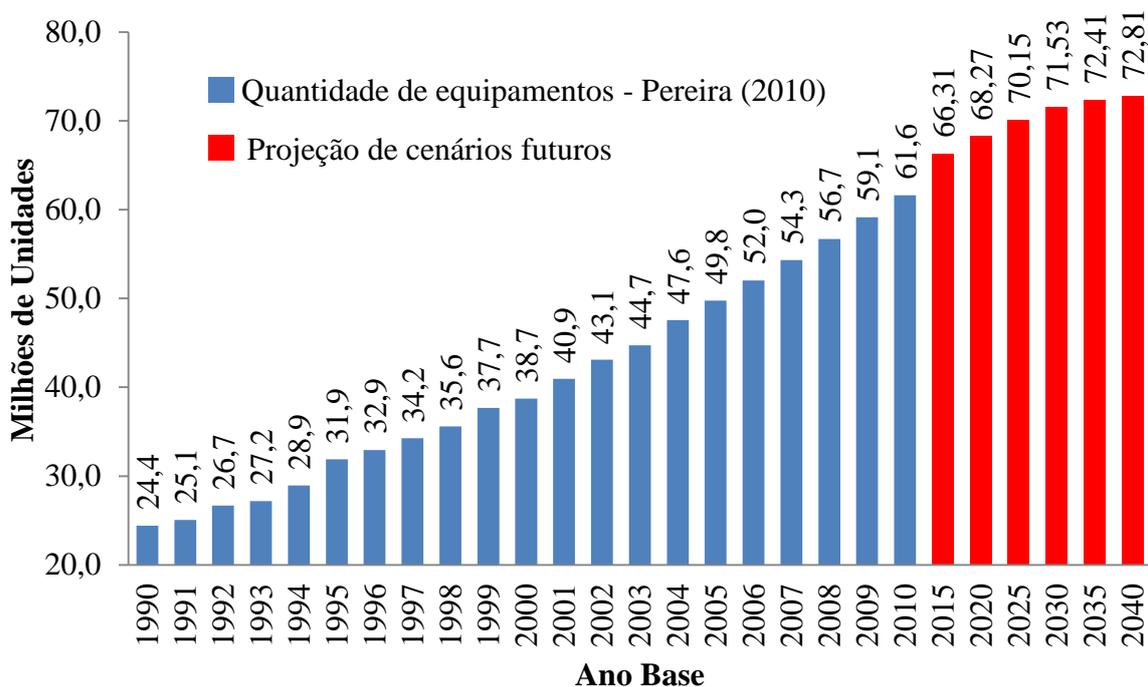


Figura 3.8 – Quantidade de equipamentos de refrigeração doméstica ao longo dos anos e projeções futuras.

3.6 ENTRADA E SAÍDA DE EQUIPAMENTOS DO MERCADO

Os dados da figura 3.6 mostram que o balanço entre os equipamentos que entraram e os que saíram do mercado foi sempre positivo entre um ano e outro. Todavia, para que as estimativas fiquem mais precisas, é necessário o conhecimento da quantidade efetiva de equipamentos que entraram em operação e as idades daqueles que saíram.

Levantamentos realizados pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) quantificaram a saída e a entrada de novos aparelhos no mercado, a cada ano, entre 1991 e 2011. Os dados variam ano a ano sem um padrão específico, uma vez que a aquisição e descarte de novos aparelhos pelos consumidores dependem da situação econômica do país, incentivos governamentais e avanços tecnológicos dos equipamentos. A figura 3.9 representa essa variação do parque brasileiro de refrigeradores no mencionado período.

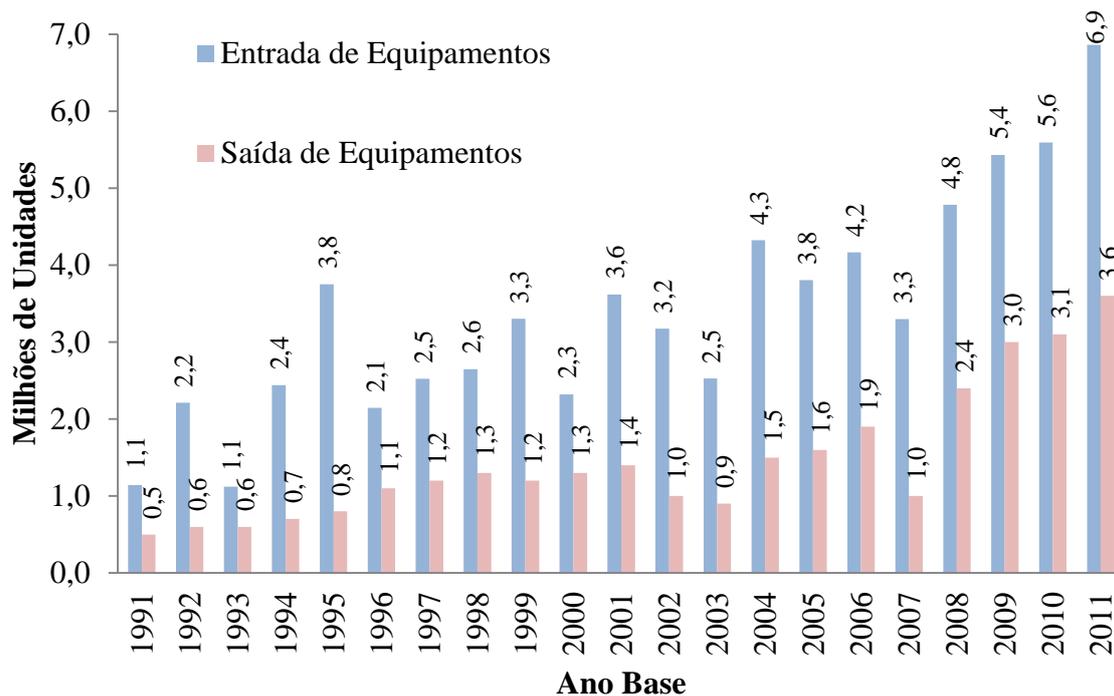


Figura 3.9 – Quantidade de equipamentos que entraram e saíram do mercado, a cada ano, no Brasil (Peixoto, 2012).

Verifica-se que, a partir de 2004, as entradas e saídas são, em média, maiores que as verificadas nos anos anteriores. Isso se deve ao fato de o país ter entrado em um período de estabilidade econômica e ao fato de o poder aquisitivo da população ter aumentado. É interessante notar que entre os anos de 2007 e 2008, o mercado financeiro mundial entrou em crise e houve uma redução nos quantitativos de unidades inseridas e retiradas do mercado neste ano. Todavia, o gráfico da figura 3.9 mostra que houve uma tendência de aumento de aquisições e descartes de refrigeradores ao longo dos anos.

Conforme abordado, a partir de 2015, até o ano de 2040, a taxa de crescimento do parque brasileiro será menor que o verificado até o momento. Isso significa que a quantidade de descartes tende a se aproximar da quantidade de aquisições de novos refrigeradores. As facilidades em se adquirir um equipamento e os avanços tecnológicos, estimularão a renovação do parque, com os descartes sendo realizados cada vez mais precocemente.

3.7 IDADE DOS EQUIPAMENTOS RETIRADOS DO MERCADO

Evidentemente, um equipamento antigo provoca impactos financeiros e ambientais mais intensos quando comparado a um mais novo. Portanto, embora o conhecimento da quantidade absoluta de equipamentos que saíram do mercado seja importante, a classificação destes em relação ao seu tempo de uso torna-se necessária para a estimativa de impactos advindos da utilização destes, uma vez que essa informação interfere em estratégias de renovação do parque de refrigeradores, que pode ser vantajosa para o país.

A retirada de equipamentos do mercado é motivada, principalmente, por dois fatores: a substituição do refrigerador por um modelo mais moderno e que atenda melhor às expectativas do consumidor (embora o antigo esteja funcional e opere de maneira eficaz), e o fim da vida útil, seja ela causada por falhas prematuras irreparáveis ou pela degradação natural em função do tempo. A soma destas duas parcelas fornece os dados mostrados na figura 3.7. É importante notar que estes quantitativos variam a cada ano, sobretudo aqueles relacionados ao primeiro fator (consumidor), uma vez que, conforme já discutido, este é influenciado pela situação econômica do país.

Os dados acerca da distribuição de idades dos equipamentos substituídos em razão do primeiro fator são obtidos através do MMA. Porém, os dados acerca da distribuição de idades em razão do segundo fator não estão disponíveis na literatura. Todavia, Silva Júnior (2005), propôs um modelo matemático de estimativa do quantitativo de equipamentos com falhas irreparáveis em função de sua idade e que resultou na troca deste.

A figura 3.7 mostra a quantidade de equipamentos retirados do mercado, no ano de 2011, em função de sua idade, distinguindo entre as duas categorias de fatores que motivaram a retirada dos refrigeradores. A rigor, a figura 3.8 remete à informação mostrada na figura 3.9 para o ano de 2011, quando 3,6 milhões de equipamentos foram retirados do mercado. Assim, a soma dos valores apresentados na figura 3 é igual ao citado montante. Dessa maneira, foram realizadas as distribuições dos equipamentos, em função de suas idades para todos os anos entre 1991 e 2011, sendo os demais gráficos apresentados no anexo digital deste trabalho.

É interessante notar que nos dois primeiros anos estima-se não haver trocas de equipamentos motivadas por melhorias tecnológicas (Peixoto, 2012). Além disso,

verifica-se, na figura 3.12, que equipamentos com tempo de uso superior a 10 anos são os que mais motivam os consumidores e trocá-los. Conforme abordado anteriormente, a tendência é que haja, nas próximas décadas, a antecipação do descarte dos equipamentos.

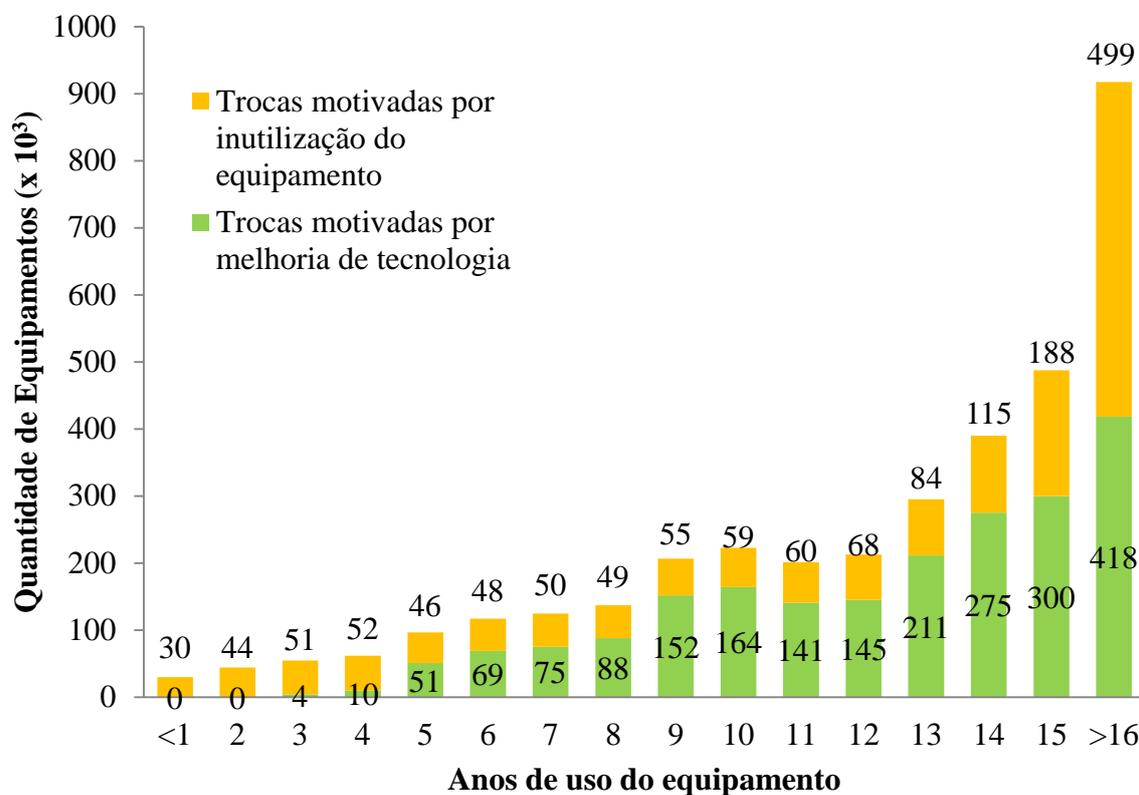


Figura 3.12 – Quantidade de equipamentos retirados do mercado, em 2011, em função de sua idade (Peixoto, 2012).

3.8 EVOLUÇÃO DO PERFIL DO MERCADO BRASILEIRO

A estabilidade econômica do país mudou a distribuição de idade dos equipamentos do parque brasileiro. Os dados fornecidos por Peixoto (2012) aliados às estimativas de Pereira (2010), e de Silva Júnior (2005), permitem avaliar a evolução do mercado brasileiro. A figura 3.11 mostra o percentual de equipamentos, em cada faixa de idade, nos anos de 2000, 2011 e 2040. É possível verificar que o mercado atual prioriza equipamentos mais novos, entre 0 e 10 anos, enquanto, no passado, refrigeradores com mais de 10 anos de uso representavam mais de 50% do parque. A projeção de cenários futuros, feita através da análise da evolução do percentual das faixas de idade dos equipamentos, nos permite inferir que o mercado será composto

predominantemente por refrigeradores com até 10 anos de uso, ou seja, existe uma tendência de evolução para um parque cada vez mais “jovem”, se persistir o quadro econômico dos últimos anos.

Todavia, é importante salientar que a realidade a ser verificada dependerá do comportamento da economia brasileira ao longo dos anos. Uma eventual crise financeira faria com que o mercado “voltasse a envelhecer”. Caso contrário, a tendência é que a maioria dos equipamentos tenha entre 0 e 7 anos em 2040.

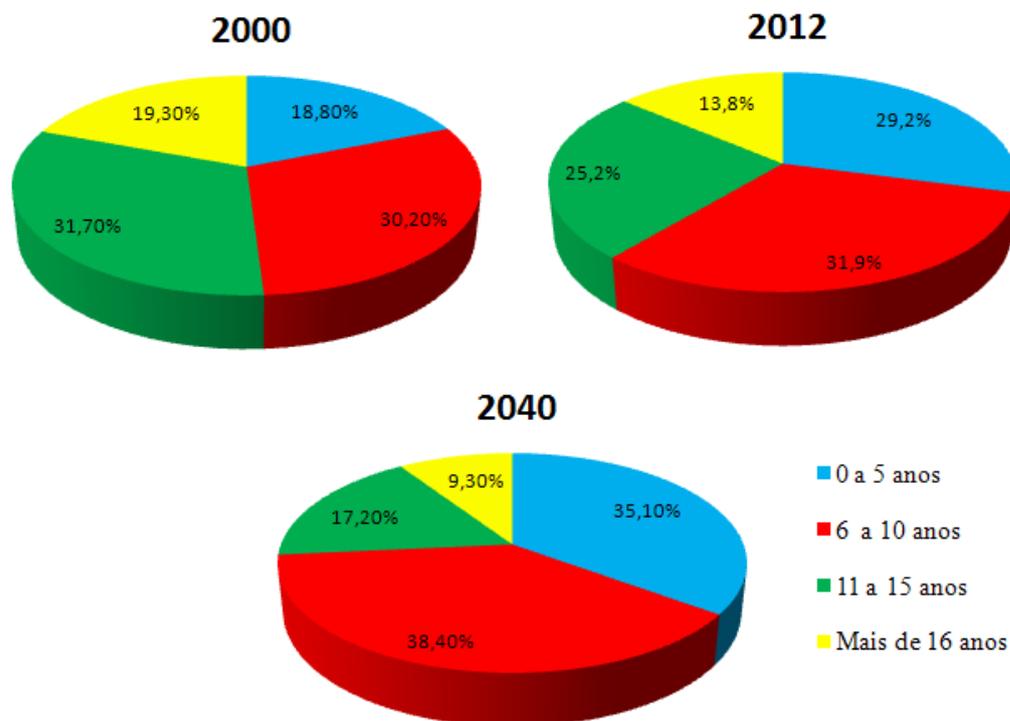


Figura 3.11 – Evolução do parque em relação à idade dos equipamentos.

3.9 CARACTERÍSTICAS DO PARQUE DE REFRIGERADORES

O mercado brasileiro de refrigeradores é composto por uma grande variedade de modelos, possuindo características bem distintas um dos outros. Há equipamentos que possuem uma e duas portas; equipamentos de pequena capacidade volumétrica, tais como frigobares; entre outros. A caracterização do parque levando em conta as características individuais de cada equipamento torna-se difícil devido a essa grande diversidade. Todavia, para a determinação dos impactos inerentes à utilização dos

refrigeradores é necessário o conhecimento, no mínimo, do tipo de fluido refrigerante utilizado e a potência nominal dos equipamentos.

Desde a assinatura do Protocolo de Montreal, a substituição de fluidos refrigerantes que agridem a camada de ozônio foi massiva no Brasil. Atualmente, mais de 97% dos refrigeradores domésticos utilizam como fluido o R-134a. Os demais operam com CFCs, remanescentes no mercado, e *blends*. Além disso, os equipamentos contêm, em média, 0,098 kg de fluido refrigerante (PROCEL, 2010), valor este assumido no presente trabalho para todos os equipamentos do parque.

O conhecimento da potência dos equipamentos permite estimar a quantidade de energia elétrica consumida e atribuir ao refrigerador um impacto financeiro e ambiental em virtude de seu uso. Ao longo deste trabalho foi abordada a perda de eficiência dos compressores ao longo de sua vida útil e o consequente aumento do consumo de energia. Todavia, é necessário o conhecimento da potência nominal dos equipamentos presentes no parque para que as estimativas de impactos sejam realizadas.

Verificou-se que a potência nominal média dos compressores dos refrigeradores vem diminuindo ao longo do tempo devido aos avanços tecnológicos, como mostrado na figura 3.12 entre os anos de 1991 e 2010 (PROCEL, 2010). É importante considerar essa diminuição no que se refere aos impactos analisados, uma vez que a diferença é de cerca de 18% entre os anos citados.

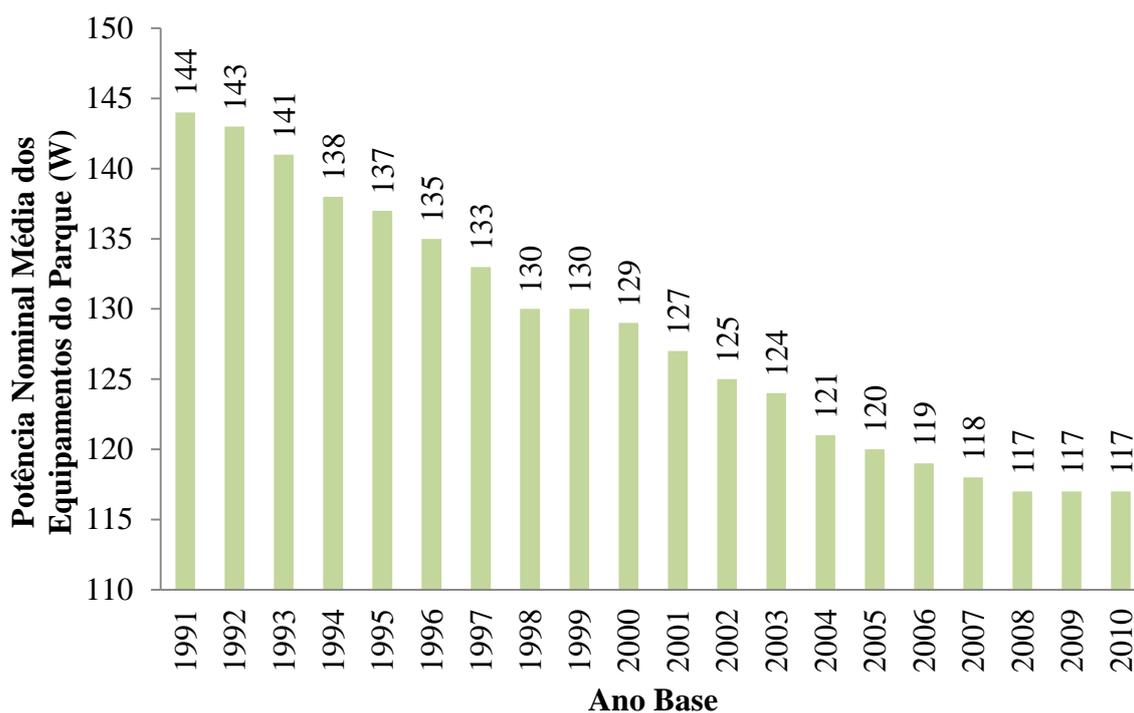


Figura 3.12 – Potência média dos equipamentos do mercado brasileiro ao longo dos anos (PROCEL, 2011).

Conforme abordado, não há dados disponíveis na literatura acerca do quantitativo de equipamentos que entraram e saíram do mercado a cada ano em função de sua potência nominal. Assim, no presente trabalho, são assumidos os valores médios disponibilizados pelo PROCEL.

Além disso, cerca de 83% dos equipamentos de refrigeração no Brasil são de médio porte, com volume interno de 310-410 litros (PROCEL, 2010). Este tipo de refrigerador é suficiente para a família média brasileira, com 4 pessoas por residência e este padrão também é utilizado neste trabalho.

Ao se assumir as hipóteses simplificadoras de que todos os equipamentos do mercado operam com 0,098kg de fluido R-134a; de que a potência nominal de todos os refrigeradores possuem o valor médio informado pelo PROCEL (2010); e que os refrigeradores são de médio porte, há uma perda na qualidade dos resultados obtidos, todavia é a única possibilidade disponível no momento para estimar os impactos desse parque. É importante salientar que todos os valores e quantitativos apresentados nesta seção baseiam-se em estudos estatísticos, informações de fabricantes e pesquisas realizadas por órgãos do governo. Porém, tratam-se de números aproximados e com grau de incerteza indeterminado.

4 DESGASTE DE COMPRESSORES

Conforme abordado na seção 1.3, são escassos os estudos e informações disponibilizados na literatura acerca do desgaste e perda de eficiência sofridos por refrigeradores, sobretudo compressores, ao longo de sua vida útil. No entanto, esta informação é essencial quando se pretende estimar o impacto ambiental de uma aplicação de refrigeração doméstica. Assim, este capítulo descreve a metodologia utilizada neste trabalho para a estimativa da perda de eficiência dos refrigeradores em função do tempo de uso dos mesmos.

4.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para a caracterização do desgaste e perda de eficiência dos refrigeradores, adotaram-se duas metodologias: a primeira consiste na análise ferrográfica de amostras de óleo lubrificante retirados do cárter de compressores, com distintas idades, e buscar um padrão de desgaste no compressor que esteja relacionada com a perda de eficiência do equipamento; e a segunda consiste na aquisição de dados da potência consumida por refrigeradores, incluindo o monitoramento da temperatura e da quantidade abertura de portas, e sua correlação com o tempo de uso do refrigerador.

4.1.1 Exame ferrográfico e viscosidade do óleo

O exame ferrográfico consiste na determinação da severidade, do modo e dos tipos de desgaste sofridos por compressores, através da identificação da morfologia, do acabamento superficial, da coloração, da natureza e do tamanho das partículas encontradas em amostras de óleo lubrificante extraídas do equipamento. A rigor, este exame é capaz de avaliar: a viscosidade do óleo; a quantidade de partículas de ferro, cobre, magnésio, manganês, fósforo, cromo, molibdênio, chumbo, estanho, alumínio, níquel, prata, silício, boro, sódio, cálcio, bário, zinco, vanádio e titânio com diâmetro inferior a 15 μ m; a quantidade de partículas destes mesmos materiais com diâmetros entre 15 e 150 μ m; e o tipo de desgaste sofrido pelo compressor, tais como esfoliação, abrasão, formação de gel/borra, etc.

A contabilização das partículas metálicas é conhecida como ferrografia quantitativa (DR) e os resultados obtidos permitem a análise de tendências de desgaste, além de informações quanto a alterações no modo de desgaste do equipamento. Já o tipo de desgaste é conhecido através da ferrografia analítica (AN) e indica quais providências devem ser tomadas para se evitar a intensificação dos desgastes.

Assim, como parte integrante do estudo da degradação, optou-se por realizar a análise ferrográfica de amostras de óleo extraídas de compressores, com o intuito de comparar o comportamento destas quatro variáveis citadas e estabelecer um paralelo entre a degradação e o tempo de uso dos equipamentos.

A metodologia para coleta das amostras consistiu em selecionar 27 equipamentos de refrigeração, de distintos tempos de funcionamento, com volume interno entre 310 e 410 litros, com compressores com especificações técnicas semelhantes (potência entre 1/6 e ¼ de HP) e cujo descarte tenha ocorrido devido à queima do motor do compressor (de acordo com informações dos técnicos em refrigeração que orientaram e acompanharam a coleta do óleo). Assim, evita-se a análise de um compressor que tenha sido avariado por uma falha específica, descritas no capítulo 3. Assim, busca-se uma avaliação mais precisa do desgaste sofrido pelos equipamentos, sem a interferência de outros fenômenos que poderiam contaminar as amostras.

A coleta é realizada ainda no domicílio do consumidor, antes da retirada do equipamento para manutenção ou descarte e, em seguida, o óleo é submetido à análise laboratorial. Além disso, registram-se os dados do equipamento de onde a amostra foi retirada, sobretudo o tempo em que permaneceu em funcionamento.

A próxima etapa é a seleção e interpretação dos resultados obtidos das amostras. Os laudos estão divididos em quatro partes e as figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam um relatório típico desta análise e a maneira como os dados são apresentados. Os laudos das 27 amostras acompanham o anexo digital deste trabalho.

A figura 4.1 representa a primeira parte do relatório, onde se identifica o equipamento e são apresentadas as conclusões da análise. A segunda parte mostra os resultados obtidos para a ferrografia quantitativa, indicando a quantidade de partículas encontrada para cada um dos elementos químicos citados anteriormente, conforme mostrado na figura 4.2.

RELATÓRIO DE EXAME nr. 1110 - 243		ALERTA
Código Tribolab...	003894.000001.000001	Data da coleta: 19/09/2011
Máquina.....	COMPRESSOR EMBRACO REF.: 03.141.2201	
Ponto de coleta..	CÁRTER DO COMPRESSOR	Recebido: 06/10/2011 Exec.: 17/10/2011
CONCLUSÕES:		[]Normal []Aceitável [X]Alerta [] Crítica
<p>Considerando-se a amostra como representativa, admitimos os resultados como dentro do esperado. Todavia, o desgaste predominante foi por abrasão simples. Se assumirmos que não houve perda de partículas de maior porte nesta coleta então será razoável supor que não houve quebra de filme lubrificante suficiente para danos superficiais importantes. A condição de "alerta" foi naturalmente dada por comparação com regime regular.</p>		
<i>Eng. Tarcísio D'Aquino Baroni</i>		Laboratório da Tribolab - SP / Brasil
<small>Relatório eletrônico, dispensa assinatura conf. normas atuais. Para prova de autenticidade contactar o laboratório com o nr. do relatório.</small>		

Figura 4.1 – Exemplo de identificação do equipamento e as conclusões do exame realizado.

<p>INFORMAÇÕES ENVIADAS PELO CLIENTE / OBSERVAÇÕES REALIZADAS NO EXAME:</p> <p>Metais por espectrometria (<= 15µm): *Fe= 702ppm, Cr= 1ppm, Pb= 1ppm, *Cu= 25ppm, Sn= 0ppm, Al=0ppm, Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 0ppm, B= 1ppm, Na= 3ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 31ppm, Zn= 10ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm. Arredond. conf. norma (Ex: 0,2->0). * Irregular.</p> <p>Espectr. Grandes Partículas(2 a 150µm):Fe= 106ppm, Cr= 2ppm, Pb= 0ppm, Cu= 24ppm, Sn= 0ppm, Al= 0ppm, Ni= 1ppm,Ag= 0ppm,Si= 0ppm,B= 0ppm,Na= 1ppm,Mo= 0ppm,Ti= 0ppm. Dentro do esperado.</p> <p>*Visc. @ 40°C= 53,2 cSt. *Água= 980 ppm. * Irregular.</p> <p>Resultados ferrográficos altos com predominância de esfoliação comum por atrito simples < 12µm. Também foram notados sinais de desgaste severo por arrastamento com até 32µm e traços de óxidos ferrosos, contaminantes e de gel/borra, além da presença de abrasão simples, maior causador de desgaste do componente.</p>

Figura 4.2 – Exemplo de resultados fornecidos pelo relatório do exame ferrográfico.

A terceira parte mostra a concentração total de partículas na amostra, incluindo as menores que 15µm (representadas pela letra S) e as maiores que 15µm (representadas pela letra L). Este parâmetro permite avaliar a quantidade de partículas em suspensão no óleo. A figura 4.3 exemplifica como os resultados estão dispostos. Por fim, a quarta parte traz um resumo da ferrografia analítica, em função dos diversos tipos de desgaste sofridos pelo equipamento. A análise é feita separando-se uma amostra de 3 ml de óleo lubrificante e verificando-se a porcentagem deste volume em que os problemas estão presentes. A figura 4.4 exemplifica como este resultado é mostrado no laudo, salientando-se que os valores mostrados estão em escala de 1:1000.

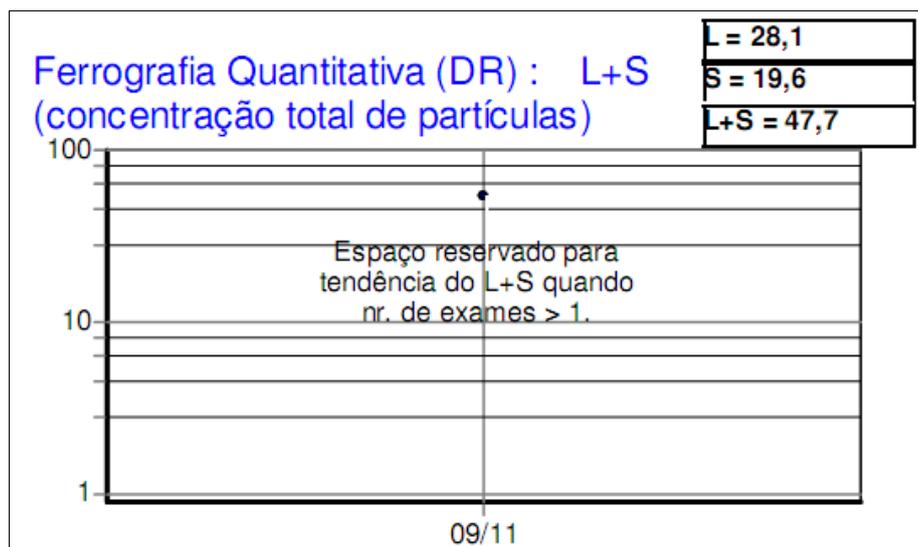


Figura 4.3 – Exemplo da disposição dos resultados, no laudo, da ferrografia quantitativa do exame realizado.

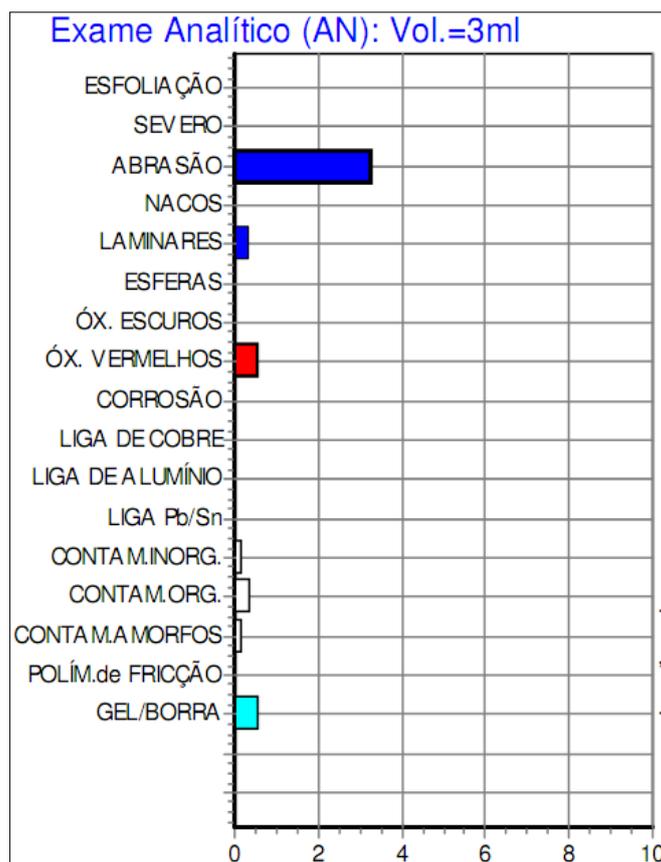


Figura 4.4 – Exemplo de como são mostrados, no laudo, os resultados do exame analítico de contaminantes no óleo.

Os dados da ferrografia analítica foram reunidos em uma planilha, que pode ser consultada no anexo digital deste trabalho, de onde é possível realizar comparações diretas entre as amostras em função de quaisquer parâmetros. Assim, pode-se analisar o comportamento da quantidade de partículas maiores e menores que 15µm, a viscosidade e a concentração total de partículas em função do tempo. A figura 4.5 ilustra, resumidamente, como estão dispostos os dados na planilha, salientando-se que esta não pode ser apresentada de maneira integral devido a limitações de formatação deste trabalho.

Resumo das Principais Características						
Número da Amostra	Tempo de uso do compressor (meses)	Quantidade de Ferro (<= 15µm)	Quantidade de Ferro (2 a 150 µm)	Ferrografia Quantitativa - DR	Ferrografia Quantitativa: PLP	Viscosidade Cinemática Relativa
0	0	0	0	0	0	0,0
1	8	543	99	38	12,1	1,0
2	12	702	106	47,7	17,8	1,0
3	16	801	138	50,6	20,2	1,0
4	18	822	158	51,1	18,6	1,0
5	22	832	168	50,5	23,2	1,0
6	25	830	159	51,6	17,8	1,0
7	30	888	218	54	20,0	1,0
8	40	874	170	48,5	22,9	1,0
9	44	878	163	51,1	13,9	1,0
10	55	901	179	48,9	12,5	1,1
11	60	952	170	49,8	16,1	1,1

Figura 4.5 – Concatenação das informações dos laudos dos exames ferrográficos.

Por fim, os exames determinaram a viscosidade dos óleos lubrificantes. O equipamento utilizado foi o viscosímetro de Ostwald, que combina uma série de equações de Newton, Poiseuille, Stokes e Carrancio com métodos experimentais normalizados que tornam possível a determinação deste parâmetro de qualquer fluido.

A determinação desta variável é importante pois permite avaliar o grau de lubrificação presente no sistema e a qualidade da distribuição do óleo lubrificante por todas as superfícies móveis do equipamento. Conforme o compressor é utilizado,

diversos contaminantes (partículas de metais, carbono, etc.) se misturam ao óleo, alterando sua capacidade de lubrificação e, conseqüentemente, o grau de desgaste do equipamento. Assim, em conjunto com as análises ferrográficas quantitativas e qualitativas, este parâmetro, quanto avaliado ao longo do tempo, permite caracterizar a evolução do desgaste do equipamento.

Os valores obtidos desta última variável foram agrupados em uma coluna da planilha, relacionando seu valor real em função de seu valor nominal. Por exemplo, o lubrificante utilizado na amostra 17 possui viscosidade nominal de 34 cSt. Após certo tempo de utilização, seu valor passou a 50 cSt, ou seja, um aumento de cerca de 40%. Assim, na tabela de registro das variáveis, a viscosidade foi representada pelo número 1,4, indicando este aumento percentual em função de seu valor nominal. Desta maneira, os valores puderam ser normalizados, sendo possível a comparação direta entre as amostras, independentemente de suas especificações técnicas nominais.

É importante salientar que, da mesma maneira como foi abordado no capítulo 3, os dados apresentam algumas incertezas, tais como o tempo exato de uso do compressor. Além disso, o histórico da utilização dos equipamentos durante sua vida útil indica que as condições de operação do equipamento foram normais, de acordo com informações dos proprietários dos equipamentos, porém, é possível que tenha havido circunstâncias anormais pontuais que causaram uma sobrecarga no compressor – situações de excesso de alimentos no refrigerador; disposição de alimentos que dificultaram a circulação de ar no interior do gabinete; níveis anormais de temperatura; etc. – e que acarretaram um desgaste, também pontual, mais acentuado durante o período em que estas circunstâncias ocorriam. Portanto, as informações apresentadas podem ocultar problemas que não foram previamente identificados. Porém, em um primeiro momento, é necessário se realizar este tipo de estudo para que sejam registrados alguns valores de referência, para se iniciar um estudo acerca do desgaste de compressores.

4.1.1.1 ANÁLISE DOS DADOS FERROGRÁFICOS

Conforme abordado na seção 4.1.1, os dados relativos à ferrografia foram agrupados e analisados em conjunto. Primeiramente, verificou-se que, de todos os elementos - ferro, cobre, magnésio, manganês, fósforo, cromo, molibdênio, chumbo,

estanho, alumínio, níquel, prata, silício, boro, sódio, cálcio, bário, zinco, vanádio e titânio - analisados através da ferrografia quantitativa, apenas o ferro possuía valores expressivos. Os demais metais apresentaram concentrações nulas ou muito pequenas em relação ao ferro (menos de 5%), o que torna dispensável a sua análise. Além disso, estes valores não apresentaram um padrão definido, de modo que mesmo em quantidades pequenas fosse interessante fazer uma análise. Por exemplo, o alumínio esteve presente nas amostras de equipamentos com 22, 25, 40, 60, 93, 147 e 170 meses nas concentrações de 06, 01, 12, 04, 09, 02 e 02 ppm, respectivamente. Nos outros 20 meses analisados, sua concentração foi nula. Alguns metais, como o vanádio, titânio, boro, bário e chumbo, tiveram concentração igual a zero em todas as amostras. Assim, o enfoque foi dado apenas sobre as partículas de ferro, que apresentaram variações sensíveis em função do tempo de uso do equipamento. A presença destas outras partículas pode ser explicada pela pureza dos metais utilizados na fabricação do compressor.

Outro ponto importante a ser abordado refere-se aos dados obtidos na ferrografia analítica, que indica o modo de desgaste do equipamento. Assim como na situação anterior, as informações obtidas não apresentaram um padrão que permitissem inferir o comportamento do desgaste em função do tempo. Por exemplo, nas amostras com 12, 17, 22, 75 e 120 meses, ocorreu a formação de gel/borra no sistema, enquanto nos outros meses não houve a presença deste contaminante. Esta falta de um padrão é verificada para todos os 19 itens analisados. Todavia, quando analisados de maneira conjunta, é possível verificar que, de maneira geral, há um aumento da presença destes contaminantes. Este parâmetro é importante ser analisado uma vez que a viscosidade do óleo lubrificante é influenciada pela quantidade deste em suspensão no líquido. Os dados do exame analítico foram organizados em uma planilha, que acompanham este trabalho em seu anexo digital, de onde se permitiu a análise. Verificou-se que, mesmo que um componente de desgaste não esteja presente em uma das amostras, outros tipos de desgaste se apresentam de maneira mais intensa e quando se somam, verifica-se que há uma tendência de aumento.

A explicação para que não tenha havido um paralelo entre os dados reside no fato de que o exame ferrográfico é utilizado para a avaliação de um mesmo equipamento, durante sua vida útil, em intervalos de tempo determinados. Portanto, não faz sentido comparar os níveis de concentração de desgaste entre dois equipamentos

distintos e sim comparar os resultados entre uma sequencia de análises realizadas para um mesmo equipamento em tempos diferentes. Todavia, na tentativa de se buscar um padrão mensurável de degradação dos equipamentos, optou-se por realizar este estudo, embora a maioria dos resultados tenham sido inconclusivos.

Assim, levando-se em conta apenas as partículas de ferro, foi possível estabelecer um padrão de desgaste dos compressores, em relação à quantidade de partículas de pequeno ($<15\mu\text{m}$) e grandes diâmetros (entre 15 e $150\mu\text{m}$), em função do tempo de utilização. As figuras 4.6 e 4.7 mostram graficamente a evolução destes parâmetros. A quantidade de partículas de ferro diluídas no lubrificante, assim que o equipamento entra em operação, é igual ou próximo a zero, segundo informações dos fabricantes, portanto, apesar de não ter havido um teste ferrográfico em uma amostra padrão, esse valor nulo foi assumido. Nos 20 primeiros meses de uso, há um rápido aumento na quantidade de partículas em suspensão no óleo, seguido de um período de estabilidade, até aproximadamente 150 meses de utilização. A partir daí, há uma tendência de maior desgaste do equipamento, verificado por um aumento abrupto das quantidades de partículas em diluídas no óleo. Esta tendência, conforme verificado nas figuras 4.6 e 4.7, é semelhante tanto para as partículas pequenas como para as de grandes diâmetros.

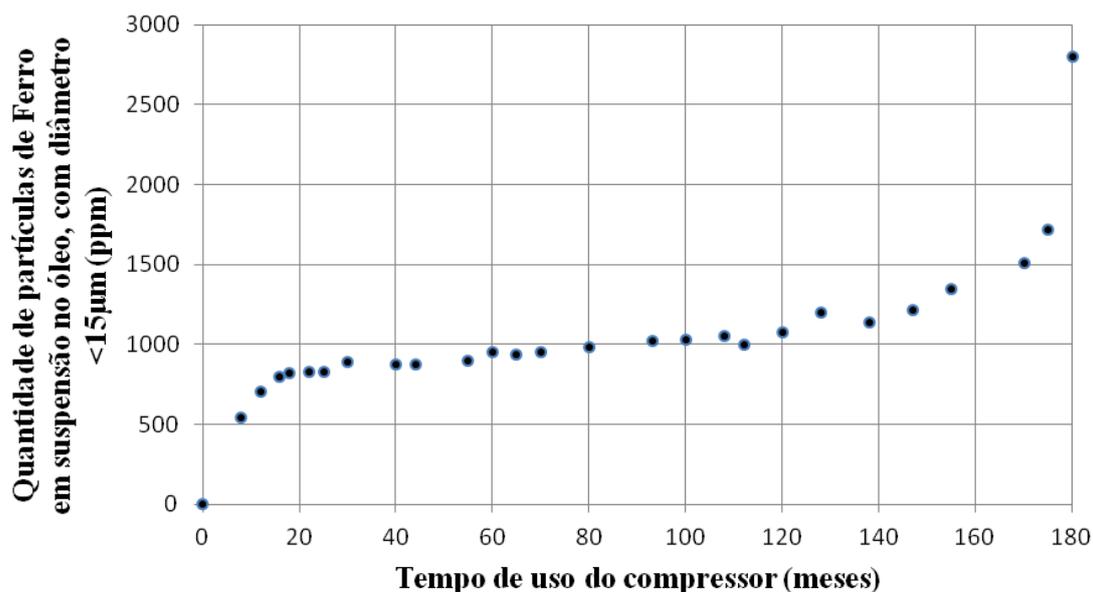


Figura 4.6 – Evolução da quantidade de partículas de ferro, de pequeno diâmetro, em suspensão no óleo em função do tempo.

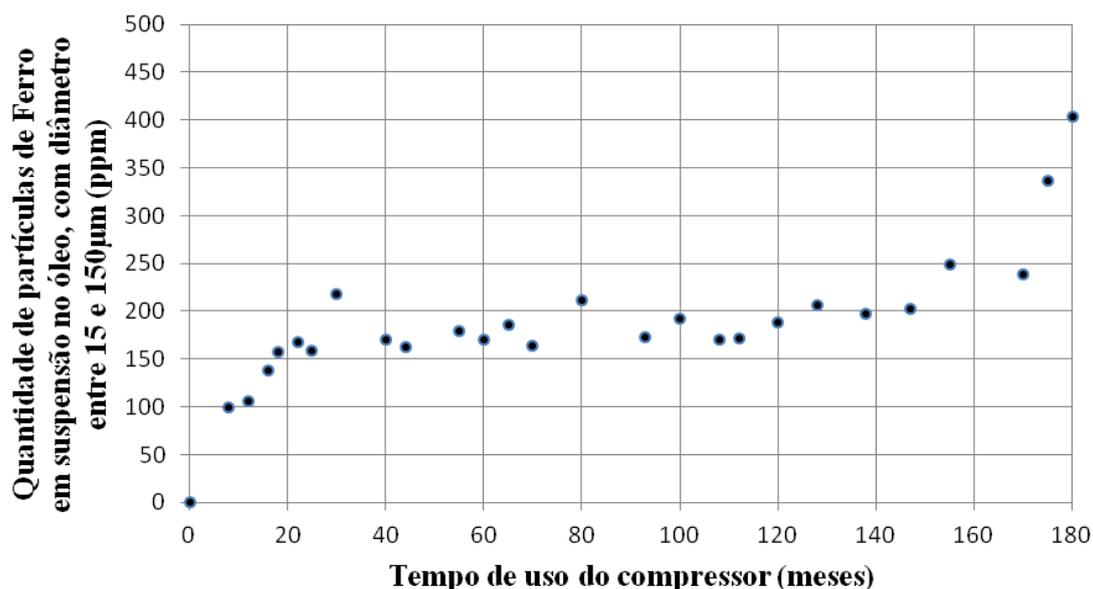


Figura 4.7 - Evolução da quantidade de partículas de ferro, de médio diâmetro, em suspensão no óleo em função do tempo.

Para este grupo de compressores, os dados nos permitem inferir que a quantidade de 1000 partículas de pequeno diâmetro de ferro, a cada milhão de partículas de óleo, é um valor médio padrão que indica que o equipamento está operando em um regime constante, com um nível de desgaste dentro do esperado. Para as partículas de médios diâmetros, o valor padrão de 180 ppm. Quaisquer valores diferentes destes indicam a possibilidade de uma anormalidade na operação do equipamento.

Os primeiros vinte meses de utilização mostram ainda que há um regime transiente de funcionamento no equipamento, sendo que alguns ajustes, folgas e desalinhamentos ocorram constantemente, fazendo que com haja desgaste das peças móveis e a deposição de partículas no lubrificante. Após este período, o equipamento entra em um regime de operação constante com um nível pequeno de desgaste, uma vez que as partículas aumentam de maneira sutil ao longo de aproximadamente 130 meses. Após este período, o equipamento entra em um regime inconstante de funcionamento, apresentando desgastes muito superiores àqueles verificados no período anterior. Isso se deve ao fato de que “vícios” de operação se acumulam no equipamento ao longo do tempo e os reflexos destes começam a ser verificados após o período de 150 meses de funcionamento. É neste período que o equipamento entra na fase final de sua vida útil, podendo apresentar falhas ou grande perda de eficiência.

O presente estudo nos mostra que os equipamentos tendem a apresentar algum tipo funcionamento anormal após 150 meses - 12,5 anos – de uso, indicado pelo alto grau de desgaste verificado. Isto corrobora, conforme abordado na seção 1.3, as análises feitas por alguns pesquisadores, tais como: Stoupe e Yau (1989), que concluíram que a ocorrência de falhas é significativamente maior após 9 anos de operação e que a vida útil dos compressores é de cerca de 15 anos; Januzzi *et al* (2003) que, ao estimarem os custos financeiros da utilização da energia elétrica em equipamentos de refrigeração, concluíram que o período de sete anos é o indicado para a sua troca, sendo que após isto, os custos advindos dos desgastes sofridos não seriam economicamente viáveis; Kim *et al* (2006), que estimaram a vida útil de refrigeradores entre 15 e 20 anos, além de sugerir que o período de maior estabilidade de compressores utilizados em equipamentos de refrigeração doméstica é entre 7 e 11 anos de uso, período em que são verificados os menores índices de falhas; Cardoso e Nogueira (2008), que estudaram a degradação dos refrigeradores, estimando a vida útil de compressores em 16 anos.

Outro parâmetro analisado foi o coeficiente de viscosidade do óleo lubrificante, que, conforme abordado na seção anterior, está representado em função de seu valor nominal. A figura 4.8 mostra, graficamente, o comportamento da viscosidade ao longo do tempo. Percebe-se que desde o início da operação do equipamento, existe a tendência de aumento desta variável, sendo que seu valor começa a apresentar um crescimento regular a partir de 60 meses de utilização do equipamento. Antes deste período, os valores se mantêm em uma faixa de variação abaixo de 10%.

O aumento da viscosidade é explicado por alterações físico-químicas das propriedades do óleo lubrificante. A exposição do equipamento a diversos ciclos diários de liga/desliga faz com que o lubrificante se aqueça e se resfrie por várias vezes. Este fenômeno, aliado à constante deposição de contaminantes neste líquido, fazem com que a viscosidade do óleo seja alterada. Podemos perceber que a tendência do aumento da viscosidade está alinhada ao aumento do desgaste, apresentando valores crescentes ao longo do tempo, chegando a 84% do valor nominal, verificado antes do início da operação do equipamento.

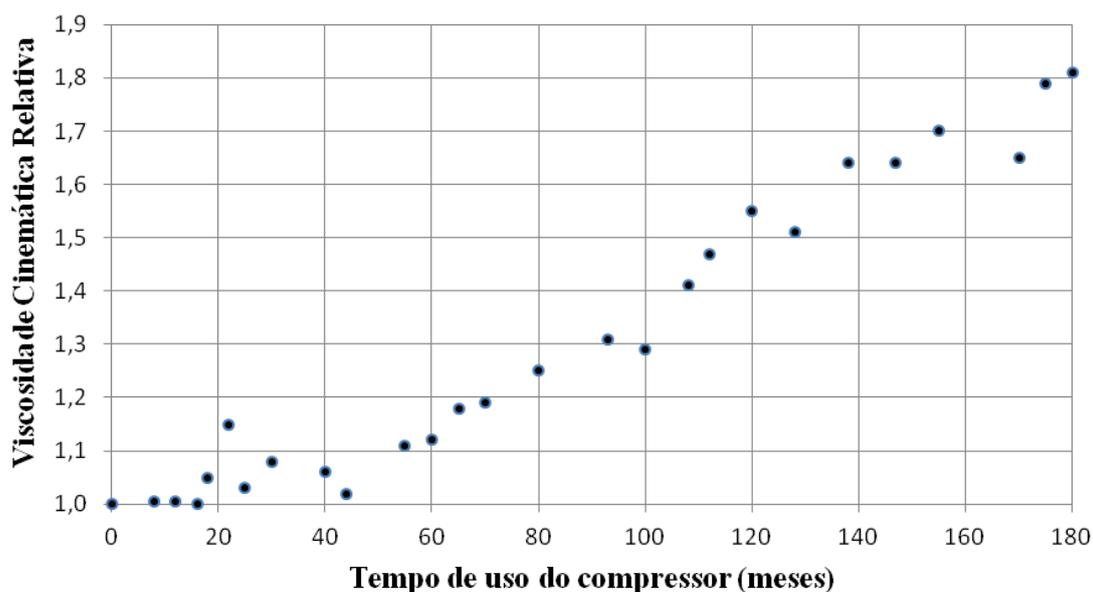


Figura 4.8 – Comportamento da viscosidade do óleo ao longo do tempo.

É importante salientar que a linha de tendência de aumento da viscosidade não deve, necessariamente, acompanhar a tendência da presença de partículas de ferro na amostra, uma vez que ainda há outros contaminantes nas amostras, tais como borra, géis, óxidos, polímeros, contaminantes orgânicos e inorgânicos, entre outros, conforme abordado na seção anterior.

4.1.2 Medições em equipamentos residenciais

A segunda metodologia utilizada para a determinação da perda de eficiência de refrigeradores domésticos foi a realização de medições diretas da potência consumida pelo equipamento, comparando-a com seu valor nominal. Assim, é possível estabelecer um paralelo entre a degradação e o tempo de utilização do refrigerador.

Foram selecionados 93 equipamentos de refrigeração doméstica com capacidade média entre 310 e 410 litros, que, conforme abordado no capítulo anterior, representa cerca de 83% do mercado brasileiro, e, durante 24 horas, o seu consumo energético foi monitorado.

Antes da seleção dos equipamentos e a montagem do aparato experimental, alguns pré-testes foram realizados a fim de se caracterizar o comportamento da potência

consumida ao longo da vida útil do equipamento. Algumas verificações e conclusões nortearam a maneira como os testes seriam realizados e os dados analisados.

Os compressores estão ligados a um circuito integrado (CI) que, por sua vez, está conectado a um termostato, presente no interior do gabinete do refrigerador, que mede a temperatura do ambiente refrigerado. Como os circuitos estão diretamente ligados, sempre que o termostato indica que há um aumento na temperatura no interior do gabinete, o CI envia um sinal ao motor do compressor para que o mesmo entre em operação. Os sinais enviados pelo termostato ao CI ocorrem, de maneira geral, a cada 30 segundos e, quando se percebe que a temperatura retornou ao valor desejado, o CI informa ao motor do compressor que o mesmo deve ser desligado. Enquanto não há atividade do compressor, apenas os circuitos de controle consomem energia elétrica e, na realização dos pré-testes, verificou-se que a potência necessária para a operação destes é da ordem de 1 a 5W, dependendo do modelo e da idade do equipamento.

Ainda na realização dos pré-testes, verificou-se que sempre que há a abertura da porta do gabinete, a potência consumida pelo sistema é da ordem de 15 a 20W. Isto se deve ao fato de que no interior dos refrigeradores há uma lâmpada, de baixa potência, que se acende sempre que a porta é aberta. Por fim, quando o equipamento entra em operação, a potência consumida se eleva para valores entre 90 a 150W, dependendo da capacidade de refrigeração do compressor e da perda de eficiência do mesmo. Assim, é fácil verificar que há quatro momentos distintos na operação do equipamento: quando o mesmo encontra-se com o compressor desligado e a porta fechada (consumo de 1 a 5W); compressor desligado e porta aberta (consumo de 15 a 20W); compressor ligado e porta fechada (consumo de 90 a 150W); e, por fim, compressor ligado e a porta do refrigerador aberta (consumo aumentado entre 15 a 20W, durante um curto intervalo de tempo, em relação ao consumo de 90 a 150W verificado em outros momentos em que a porta encontra-se fechada).

Assim, se durante um período estabelecido monitorarmos a potência do equipamento podemos calcular o tempo em que cada um dos quatro momentos descritos acima ocorre. Portanto, a metodologia consiste em monitorar, a cada segundo, durante um período de 24 horas, o comportamento do equipamento e seus tempos de funcionamento, sendo possível, desta maneira, verificar o tempo em que o compressor permanece em funcionamento e o tempo em que a porta permaneceu aberta. Além disso, é possível calcular a potência média consumida durante estes modos de operação

e comparar os resultados obtidos para os diferentes equipamentos a serem testados e estabelecer um comparativo entre a perda de eficiência e o tempo de utilização do equipamento.

A figura 4.9 ilustra o comportamento típico da potência consumida ao longo do tempo. O gráfico representa uma amostra de 160 segundos indica: em a), a porta do refrigerador foi aberta com o compressor desligado; em b) a porta está fechada e o compressor permanece desligado; em c) o compressor está em plena operação; e, em d), além do compressor em funcionamento, ocorre uma abertura de porta. Quando analisados os dados coletados durante as 24 horas, é possível quantificar as variáveis citadas acima. É importante observar que no instante em que o compressor entra em operação (f), momentaneamente há um elevado pico na potência consumida. Esse valor foi truncado na figura 4.9 com o intuito de não prejudicar a visualização gráfica dos outros dados.

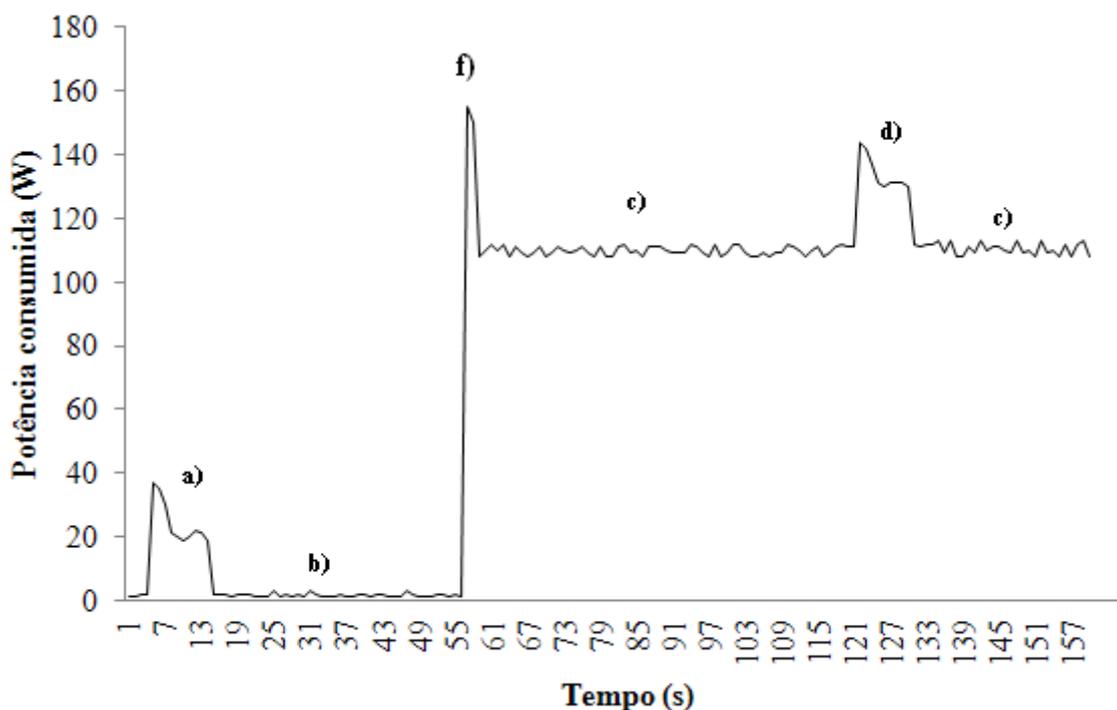


Figura 4.9 – Representação gráfica típica do comportamento da potência consumida por um refrigerador ao longo do tempo.

Além de monitorar a potência e o tempo de funcionamento do equipamento, é interessante realizar o monitoramento da temperatura do ambiente em que o refrigerador

se encontra. Assim é possível analisar a influência deste parâmetro no funcionamento do equipamento e a sua contribuição para a perda de eficiência dos compressores.

Para a coleta dos dados, são utilizados dois equipamentos: um termômetro, previamente calibrado, com resolução instrumental de $0,1^{\circ}\text{C}$, que é instalado em um local próximo ao equipamento a ser monitorado, sem que haja a interferência direta de fontes de calor que podem influenciar a correta análise dos dados; e um alicate multímetro com a função de monitoramento da potência consumida, com resolução instrumental de $0,1\text{W}$, previamente calibrado e memória interna para registro de dados segundo a segundo, que é ligado em paralelo ao circuito elétrico do refrigerador. Assim é possível realizar a medição da diferença de potencial e a corrente elétrica presente no sistema e, desta maneira, calcular a potência consumida. Os catálogos dos instrumentos utilizados estão no anexo digital deste trabalho.

Quando transferidos para um computador, os dados armazenados nas memórias dos medidores utilizados são apresentados através de uma tabela – no caso da temperatura e umidade relativa – e um arquivo de texto – no caso da potência medida. As figuras 4.10 e 4.11 ilustram um modo típico de como os dados são apresentados para cada um dos casos. É importante salientar que os arquivos possuem inúmeras informações e as figuras 4.10 e 4.11 apresentam apenas parte dos dados adquiridos para um equipamento. Além disso, foram gerados 93 arquivos de texto e 93 planilhas de temperaturas, que acompanham o anexo digital deste trabalho.

A tabela das temperaturas nos indica a data e o horário de início e término das medições (*Start Time* e *End Time*, respectivamente), além de informar intervalo entre os registros da temperatura na memória do equipamento (*Sampling rate*). No caso deste estudo, adotou-se o valor de 720 segundos, ou seja, 12 minutos. Além disto, nos fornece a quantidade de dados armazenados durante a aquisição de dados (*Data number*). Por fim, nos informa as temperaturas máximas e mínimas admitidas para que soe um alarme sonoro (*Temp HIGH alarm* e *Temp LOW alarm*). Todavia, esta informação não é utilizada neste trabalho. O restante da tabela é organizado em três colunas, sendo a primeira indicada pela sigla NO, que indica o número do registro na memória. A segunda coluna, indicada pela sigla *Temp*, indica o valor da temperatura, em graus Celsius, registrada no dia e na hora apresentados na terceira coluna, representado pela indicação *TIME*.

O arquivo das potências medidas é apresentado por um cabeçalho, contendo os termos *File Name* e *Date*, que não foram preenchidos. A seguir, são apresentadas oito colunas, sendo que, no caso deste estudo, apenas a primeira, segunda, terceira e sétima colunas são preenchidas, uma vez que foi utilizada apenas uma entrada de dados (potência). Caso fossem utilizadas duas variáveis, as demais colunas seriam utilizadas.

A sétima coluna, *Date&Time*, indica a data e o horário em que a medição foi realizada e, para todos os refrigeradores medidos, o intervalo de tempo utilizado foi de 1 segundo. A primeira coluna, *FirstValue*, indica o valor numérico da medição realizada. A segunda coluna, *FirstUnit*, indica a unidade deste valor numérico. No caso de todas as aquisições, os valores numéricos foram registrados multiplicando-se seu valor por 10^{-1} , devido a restrições que o software do equipamento impõe, e a unidade utilizada é o kW. A terceira coluna, *Function1*, indica o tipo de corrente elétrica que o refrigerador está submetido. Neste caso, todos os equipamentos estavam ligados em corrente alternada e, portanto, a representação da terceira coluna é dada por AC. Por fim, a oitava coluna, *Note*, indica qual entrada de dados foi utilizada. Neste caso, utilizou-se a terceira entrada e, assim, todos os valores serão apresentados pela indicação "?3".

Test Report			
>>Start Time:	5/5/2011 14:01	End Time:	5/6/2011 14:13
>>Sampling rate:	720 sec		
>>Data number:	122		
>>Temp HIGH alarm:	70 C	Temp LOW alarm:	0 C

NO	Temp		TIME
1	24,8		5/5/2011 14:01
2	24,8		5/5/2011 14:13
3	24,7		5/5/2011 14:25
4	24,8		5/5/2011 14:37
5	24,8		5/5/2011 14:49
6	24,9		5/5/2011 15:01
7	24,6		5/5/2011 15:13
8	24,6		5/5/2011 15:25
9	24,5		5/5/2011 15:37
10	24,4		5/5/2011 15:49
11	24,4		5/5/2011 16:01
12	24,5		5/5/2011 16:13

Figura 4.10 – Exemplo de registro da temperatura ambiente.

File Name:							
Date:							
FirstValue	FirstUnit	Function1	SecondValue	SecondUnit	Function2	Date&Time	Note
0,0080	kW	AC	0		PF	5/5/2011 14:01:20	?3
0,0030	kW	AC	0		PF	5/5/2011 14:01:21	?3
0,0100	kW	AC	0		PF	5/5/2011 14:01:22	?3
0,0000	kW	AC	0		PF	5/5/2011 14:01:23	?3
0,0030	kW	AC	0		PF	5/5/2011 14:01:24	?3
0,0020	kW	AC	0		PF	5/5/2011 14:01:25	?3
0,0050	kW	AC	0		PF	5/5/2011 14:01:26	?3
0,0090	kW	AC	0		PF	5/5/2011 14:01:27	?3
0,0060	kW	AC	0		PF	5/5/2011 14:01:28	?3
0,0100	kW	AC	0		PF	5/5/2011 14:01:29	?3
0,0050	kW	AC	0		PF	5/5/2011 14:01:30	?3
0,0070	kW	AC	0		PF	5/5/2011 14:01:31	?3
0,0000	kW	AC	0		PF	5/5/2011 14:01:32	?3

Figura 4.11 – Exemplo do registro do consumo de potência pelo compressor.

Os dados puderam, então, ser reunidos em planilhas resumo, onde todos os parâmetros observados acerca do equipamento puderam ser inseridos. Assim, optou-se por organizar uma tabela dividida em cinco abas. A primeira, denominada Folha de Identificação, contém as principais características do equipamento: marca, modelo, série, consumo nominal do equipamento, fluido refrigerante utilizado, massa do fluido refrigerante, volume interno do gabinete, tensão de funcionamento, frequência da tensão elétrica, pressão de alta, pressão de baixa e o tipo de produto. Além disso, são apresentadas informações acerca da aquisição de dados: local da aquisição, dia e horário iniciais e finais e a idade estimada do equipamento. Por fim, uma foto frontal do equipamento completa esta aba. A figura 4.12 ilustra uma apresentação típica de como estes dados estão organizados.

A segunda aba, denominada Fotos do Equipamento, apresenta uma série de fotos internas e externas do equipamento, onde é possível verificar o estado de conservação

dos seus componentes e a disposição dos alimentos dentro do mesmo. Além disso, é possível analisar a formação de gelo no interior de seu congelador e demais problemas que influenciam os resultados obtidos. A figura 4.13, indica como a montagem das fotos é realizada.

Dados do Equipamento		FOTO DO EQUIPAMENTO
Número de Identificação	1	
Marca	Consul	
Modelo	CRB39ABBNA	
Série	JF0146844	
Consumo nominal (W)	106	
Fluido Refrigerante	R134a	
Massa de Fluido (g)	60	
Volume, em litros	342	
Tensão, em V	220	
Frequência, em Hz	60	
Tipo de Produto	Refrigerador	
Capacidade Cong.	-	
Pressão de Alta, em kPa	1500	
Pressão de Baixa, em kPa	500	
Dados da Coleta		
Local	Estação Central	
Horário Inicial	5/5/2011 14:01:20	
Horário Final	6/5/2011 14:01:20	
Pessoas na residência	-	
Tempo de uso, em meses	63	

Figura 4.12 – Exemplo da montagem da primeira aba da planilha de dados dos equipamentos analisados.



Figura 4.13 – Exemplo da montagem da segunda aba da planilha de dados dos equipamentos analisados.

A terceira aba concatena os dados de temperatura e potência obtidos através da instrumentação do equipamento. A aba foi dividida em seis seções distintas de maneira a facilitar a disposição dos dados e sua interpretação. A primeira seção, indicada na figura 4.14 (a), denomina-se Dados Climáticos e apresenta as medições da temperatura ambiente. Os dados da tabela de temperaturas (figura 4.10) são importados para esta seção.

A segunda, denominada Partidas do Compressor, indica a quantidade de partidas do compressor no período analisado, o tempo em que ele permaneceu em funcionamento e os horários de seu ligamento e desligamento. Os dados foram extraídos do arquivo de registro das potências (figura 4.11) e, depois de tratados, foram organizados nesta seção da aba. Conforme explicado no início deste capítulo, foi possível identificar o horário de ligamento e desligamento do compressor através da potência verificada em todas as medições realizadas, permitindo, assim, calcular o tempo em que o equipamento permaneceu em funcionamento efetivo durante o período de testes. A figura 4.14 (b) indica como os dados estão dispostos nesta seção.

A terceira seção, intitulada Consumo médio durante o funcionamento, está intimamente ligada a segunda. Nesta seção, a potência média verificada durante o funcionamento é calculada e registrada. Assim, para cada período de funcionamento, existe uma potência média associada. A figura 4.14 (c) indica como os dados são dispostos nesta seção.

Dados Climáticos		Partidas do Compressor				Consumo Médio Durante o Funcionamento	
Horário	Temperatura Média Ambiente, °C	Número da Partida	Horário da Partida	Horário do Desligamento	Tempo Total	Número da Partida	Potência Média, W
14:00	24,8	1	14:01:20	14:33:32	00:32:12	1	117
14:12	24,8	2	15:00:15	15:29:30	00:29:15	2	118
14:24	24,7	3	15:54:04	16:24:58	00:30:54	3	117
14:36	24,8	4	16:56:10	17:22:22	00:26:12	4	117
14:48	24,8	5	17:54:26	18:21:57	00:27:31	5	118
15:00	24,9	6	18:51:26	19:16:27	00:25:01	6	117
15:12	24,6	7	19:35:07	20:06:15	00:31:08	7	117
15:24	24,6	8	20:35:06	20:59:20	00:24:14	8	118
15:36	24,5	9	21:28:00	21:53:28	00:25:28	9	117
15:48	24,4	10	22:23:36	22:46:48	00:23:12	10	117
16:00	24,4	11	23:18:28	23:39:32	00:21:04	11	117
16:12	24,5	12	00:14:44	00:35:17	00:20:33	12	117
16:24	24,4	13	01:12:00	01:33:00	00:21:00	13	118
16:36	24,5	14	02:08:56	02:29:15	00:20:19	14	118
16:48	24,2	15	03:03:35	03:23:23	00:19:48	15	118
17:00	24	16	03:58:44	04:16:59	00:18:15	16	117
17:12	24,1	17	04:54:11	05:13:19	00:19:08	17	117
17:24	23,9	18	05:48:20	06:06:03	00:17:43	18	118
17:36	24	19	06:38:20	06:57:45	00:19:25	19	119
17:48	23,7	20	07:30:54	07:50:52	00:19:58	20	118
18:00	23,7	21	08:22:07	08:43:55	00:21:48	21	118

a)

b)

c)

Figura 4.14 – Exemplo da montagem da terceira aba da planilha de dados dos equipamentos analisados.

A quarta seção, denominada Abertura de Portas, indica o total de aberturas de portas do equipamento, o horário em que ocorreram e o tempo em que permaneceram abertas. Os dados, também extraídos do arquivo de registro das potências (figura 4.11), foram identificados conforme explicado no início do capítulo e, assim, puderam ser organizados de modo a caracterizar as aberturas de porta no equipamento analisado. A figura 4.15 (a) indica como é feita a representação dos dados na planilha.

A quinta seção, denominada Consumo durante as aberturas, assim como na terceira seção, indica a potência média consumida pelo refrigerador durante as aberturas das portas. A figura 4.15 (b) indica como os dados são apresentados na planilha.

A sexta seção, indica o tempo em que o compressor permaneceu desligado e o seu consumo médio durante sua inoperação. Os horários em que isto aconteceu não estão registrados pois se sabe que estes são complementares àqueles registrados durante o funcionamento do compressor. Assim, os dados extraídos do arquivo de registro das potências (figura 4.11) foram organizados de maneira a indicar o tempo e o consumo

durante este período de não funcionamento do equipamento. A figura 4.15 (c) indica como estes dados estão representados na tabela.

Abertura de Portas				Consumo Durante as Aberturas		Tempo Ocioso	
Número da Abertura	Horário da Abertura	Horário do Fechamento	Tempo de Abertura	Número da Abertura	Potência Média Consumida, W	Tempo Ocioso	Consumo Médio, W
1	14:06:27	14:06:44	0:00:17	1	15	00:26:43	1
2	15:11:45	15:11:53	0:00:08	2	16	00:24:34	1
3	15:21:46	15:22:04	0:00:18	3	15	00:31:12	1
4	18:01:39	18:01:48	0:00:09	4	16	00:32:04	1
5	18:12:33	18:12:48	0:00:15	5	15	00:29:29	1
6	18:23:42	18:23:47	0:00:05	6	15	00:18:40	1
7	18:45:01	18:45:16	0:00:15	7	15	00:28:51	1
8	19:14:22	19:14:34	0:00:12	8	15	00:28:40	1
9	20:20:35	20:21:38	0:01:03	9	16	00:30:08	1
10	20:56:22	20:56:34	0:00:12	10	15	00:31:40	1
11	22:48:17	22:48:33	0:00:16	11	14	00:35:12	1
12	2:04:11	02:04:26	0:00:15	12	15	00:36:43	1
13	6:12:11	06:12:24	0:00:13	13	15	00:35:56	1
14	6:49:50	06:50:04	0:00:14	14	15	00:34:20	1
15	7:30:14	07:30:32	0:00:18	15	15	00:35:21	1
16	8:12:35	08:12:53	0:00:18	16	16	00:37:12	1

a)

b)

c)

Figura 4.15 – Exemplo da montagem da segunda parte da terceira aba da planilha de dados dos equipamentos analisados.

É importante lembrar que em todas as aquisições de dados realizadas, o período considerado foi de exatamente 24 horas, ou seja, mesmo que um equipamento estivesse em funcionamento, a aquisição era interrompida e o tempo considerado apenas dentro deste intervalo. Em alguns casos é possível verificar isto através do último dado registrado de tempo de funcionamento do equipamento (seção 2), onde se verifica períodos de tempo muito inferiores àqueles esperados.

A quarta aba, denominada Gráficos dos dados, apresenta os gráficos de temperatura por horário, tempo de funcionamento por horário, tempo de não funcionamento por horário e quantidade de abertura de portas por horário. Estes gráficos foram obtidos através dos dados disponibilizados na terceira aba.

A quinta e última aba, denominada Síntese dos dados, é a mais importante delas e apresenta o resumo dos dados que são utilizados neste trabalho para determinar alguns parâmetros de degradação. Nela são apresentados o tempo total em que o compressor

permaneceu em funcionamento durante o período de testes; a média desta duração; o maior tempo verificado; o menor tempo verificado; o tempo total em que o equipamento permaneceu desligado; a média desta duração; o maior e o menor tempo; a potência média consumida durante o funcionamento; a potência nominal do equipamento; o aumento percentual verificado, relacionando-se a potência medida e a nominal do equipamento; o número de meses em que o equipamento está em operação; a temperatura média ambiente; as temperaturas máximas e mínimas ambiente; a amplitude dessas temperaturas; a quantidade total de abertura de portas; o tempo total em que permaneceram abertas; o tempo médio em que permaneceram abertas; o consumo médio durante as aberturas; o consumo energético durante a operação do equipamento; o consumo energético durante a não operação; e, por fim, o consumo total de energia durante o período de testes. A figura 4.16 ilustra como os dados foram dispostos nesta aba.

É importante salientar que as planilhas de todas as aquisições encontram-se disponíveis no anexo digital deste trabalho e podem ser consultadas individualmente, não cabendo mostrá-las no corpo deste texto.

DADOS COMPILADOS			
Média de Duração	Maior Tempo Ligado	Menor Tempo Ligado	Tempo Total Ligado
00:23:33	00:32:12	00:10:30	10:35:43
Média do Tempo Desligado	Maior Tempo Desligado	Menor Tempo Desligado	Tempo Total Desligado
00:30:56	00:37:12	00:18:40	13:24:17
Potência Média Consumida, W (Funcionamento)	Potência Nominal, W	Aumento de Potência, %	Número de meses de funcionamento
117,52	106	10,87	63
Temperatura Máxima Ambiente, °C	Temperatura Mínima Ambiente, °C	Temperatura Média Ambiente, °C	Amplitude, °C
24,9	20,9	23,19508197	4
Temperatura Máxima na Cidade, °C (fonte INPE)	Temperatura Mínima na Cidade, °C (fonte INPE)	Temperatura Média na Cidade, °C (fonte INPE)	Amplitude, °C
25,4	14,9	21,9	10,5
Tempo Médio de Abertura de Porta	Tempo Total de Abertura	Total de Abertura de Portas	Média consumo durante inoperação, W
00:00:15	0:07:37	30	1
Consumo na operação, kWh	Consumo na não operação, kWh	Consumo Total	
1,245	0,013	1,259	

Figura 4.16 - Exemplo da montagem da quinta aba da planilha de dados.

Como dito anteriormente, os dados de potência foram coletados por um Wattímetro digital de resolução 0,1W. O equipamento, da marca Instrutemp, ITAW 1000, cujas informações técnicas se encontram no anexo digital deste trabalho, estava previamente calibrado. Durante as medições de potência, verificou-se que os valores obtidos variavam em torno de um valor médio. Além disso, verificou-se que havia uma pequena variação da diferença de potencial (ddp) nos terminais elétricos nos quais os refrigeradores estavam conectados. Isso fez com que a potência medida se alterasse em função da variação da ddp.

Todavia, verificou-se que a diferença, em todos os casos, em relação à média dos valores obtidos, não superou 2% de diferença, para todas as 93 medições realizadas.

Além dos dados da potência, há incertezas quanto à análise dos períodos de funcionamento do equipamento, que são afetados pelo tempo de resposta do equipamento em relação à variação de potência verificada.

O anexo digital contempla, em uma planilha de dados, a análise de erros e incertezas dos dados obtidos, que não são mostradas no texto devido à quantidade de informações.

4.1.2.1 A SELEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE TESTE

Conforme abordado na seção anterior, selecionaram-se 93 equipamentos de refrigeração com capacidade interna variando de 310 a 410 litros, uma vez que estes equipamentos representam mais de 80% do mercado residencial de refrigeradores. Para os testes, os equipamentos foram divididos em dois grupos: o primeiro, composto por 30 unidades, são equipamentos residenciais que estão localizados em distintas residências de Brasília (14), Porto Alegre (4), Santa Cruz do Sul (2), Ribeirão Preto (5) e Recife (5). Os equipamentos possuem diferentes tempos de funcionamento e estão localizados em regiões distintas do Brasil, que apresentam diferenciações climáticas substanciais. O segundo grupo, composto por 63 unidades, estão localizados nas dependências do Metrô/DF. A seleção destes equipamentos justifica-se porque estes foram adquiridos ao mesmo tempo, em uma licitação pública, porém entraram em operação em épocas diferentes. Assim, é interessante analisar o comportamento de vários refrigeradores da mesma marca/modelo mas que entraram em operação com diferenças de tempo superiores a 10 anos. Assim, como o perfil de utilização dos

mesmos é igual, é possível estimar um padrão de degradação destes equipamentos de maneira mais realista e comparar os resultados com aqueles obtidos nas diversas residências nas diferentes regiões do país. Nas seções a seguir, os dados são tratados considerando-se estes dois grupos separadamente e juntos, conforme necessário.

4.1.3 Análise dos dados obtidos nas medições diretas dos equipamentos

A concatenação dos dados das planilhas resumo permitiu a análise de diversos parâmetros relacionados à degradação dos equipamentos de refrigeração, além de fornecer importantes dados que não estão presentes na literatura e contribuem para a evolução dos estudos na área do tema.

Primeiramente, verificou-se que 100% dos equipamentos analisados nunca passaram por manutenções preventivas ou corretivas ou qualquer tipo de intervenção, pois são unidades seladas projetadas para uma vida útil sem a necessidade de reparos. Todavia, isso faz com que haja um acúmulo de fatores degradantes que diminuem a útil do equipamento e aumentam o nível de agressão ao meio ambiente.

Além disso, verificou-se que 73% dos consumidores não alteram regularmente o termostato de seus equipamentos em função das estações do ano. Esta modificação apenas ocorre quando o usuário deseja aumentar ou diminuir momentaneamente a temperatura dos alimentos e bebidas que estão no interior do refrigerador. É importante salientar que, independentemente da temperatura desejada no gabinete, a potência consumida pelo compressor não se altera. Neste caso, se o termostato é alterado, o tempo em que o compressor permanece em funcionamento se altera, mas nunca a potência. Isso se explica pelo fato de que o fluxo de calor é sempre constante. As alterações de potência são verificadas apenas em função do tempo, relacionadas ao desgaste do compressor.

Outra informação interessante obtida das planilhas resumo é que, apesar de a temperatura verificada nos termômetros das cidades apresentar uma amplitude de até 23°C no dia, variando de 10°C, durante a madrugada, a 33°C durante as horas mais quentes do dia, percebe-se que a variação da temperatura no interior do ambiente que está localizado o refrigerador não é tão intensa como se verifica na cidade como um todo. A amplitude média medida é de cerca de 6°C, variando, em média, de 22°C, durante a madrugada, a 28°C durante o período compreendido entre 11h00 e 15h30. A

temperatura nos ambientes sofre menos variação porque, nos casos analisados, não há a incidência direta de raios solares; não há grande circulação de ar e não há elementos facilitadores de aumento da temperatura, como aqueles verificados nas cidades, tais como asfalto, prédios, etc.

Em relação à amplitude de temperatura verificada em função do horário, no período de 11h00 a 15h30, há maior movimentação de pessoas no ambiente e normalmente utiliza-se o fogão, que contribui, através do calor das chamas, para o aquecimento do recinto. Além disso, neste período há, geralmente, uma maior movimentação de alimentos no refrigerador. Assim, através da análise do tempo de funcionamento do compressor nesse horário, verificou-se que há um aumento de cerca de 20% no tempo médio de funcionamento do compressor, por ciclo, para atender essa demanda maior de refrigeração. Este fenômeno é percebido em todos os equipamentos, independentemente da região do país analisada.

Durante o período compreendido entre 22h00 e 06h00, onde se verificam as menores temperaturas ambientes e onde há, de maneira geral, uma menor movimentação de pessoas no recinto, com menor taxa de aberturas de portas, verificou-se que o tempo médio de operação do compressor reduz-se cerca de 25% em relação à média verificada no período compreendido entre 06h00 e 22h00. O intervalo entre os ciclos também aumentou cerca de 38%. É interessante notar que, além do tempo reduzido de funcionamento, o número de ciclos se reduz em cerca de 30%, o que é importante do ponto de vista de vida útil uma vez que há um desgaste maior das peças na partida do compressor, quando o óleo ainda não lubrificou corretamente todas as peças e ainda não se aqueceu a uma temperatura adequada.

Verificou-se, também, que, em média, as aberturas de porta duram 8 segundos. Os dados mostram que 85% das aberturas estão concentradas no horário compreendido entre 10h30 e 13h30 e entre 17h30 e 20h30, além de mostrar que o tempo de funcionamento do compressor aumentou, em média, 8% quando houve pelo menos uma abertura de porta.

Em relação ao consumo dos equipamentos, foi possível estabelecer um paralelo entre o aumento de potência do equipamento e o tempo de utilização deste e comparar os dados obtidos com aqueles fornecidos por fabricantes em relação à degradação de seus refrigeradores. A figura 4.17, graficamente, indica os valores das potências relativas (em relação às potências nominais) dos equipamentos em função do tempo de

utilização. Os dados representados por um círculo indicam aqueles pertencentes ao primeiro grupo, enquanto os dados representados por um triângulo pertencem ao segundo grupo.

Verificou-se que a curva que melhor se ajusta aos dados adquiridos é uma polinomial de 2ª ordem. As curvas dos dados dos dois grupos estão representadas na figura 4.17. A diferença entre elas é muito pequena, permitindo inferir que, para os refrigeradores analisados, o clima não representou um fator expressivo de degradação do equipamento, uma vez que os refrigeradores estavam operando em um ambiente “normal”, ou seja, onde não haja exposição do mesmo a temperaturas extremas, como é normalmente verificado nas residências.

Assim, todos os dados obtidos foram tratados apenas como um único grupo, uma vez que a distinção em dois grupos não alteraria de forma significativa os resultados apresentados na sequência do trabalho.

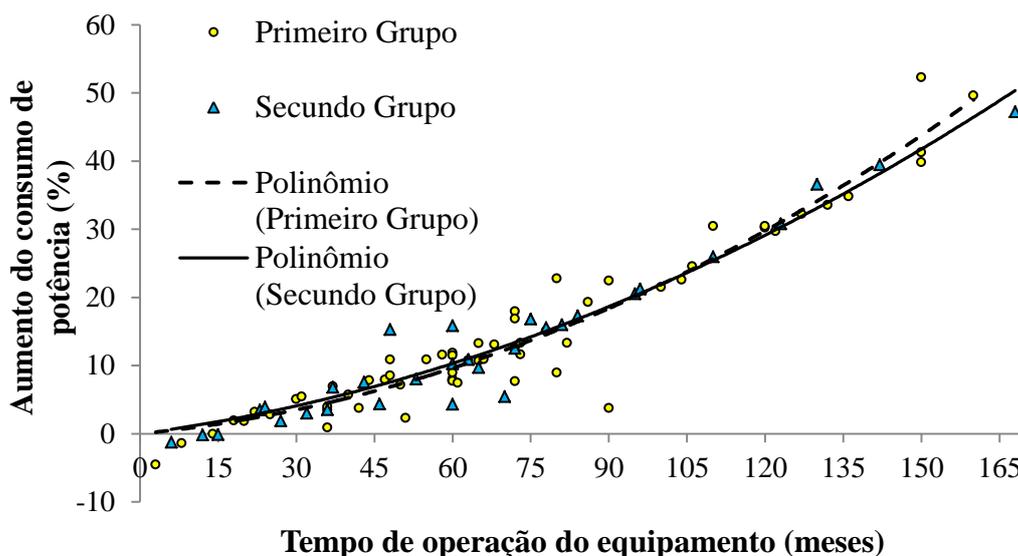


Figura 4.17 – Aumento de potência em função do tempo de uso para os dois grupos.

Como abordado na seção 1.3, Cardoso e Nogueira (2003), apresentaram dados acerca da degradação dos compressores em função do tempo. Estes foram obtidos através de fabricantes e utilizados pelos autores naquele estudo. A Figura 4.18 mostra a comparação entre estes e os valores obtidos no presente trabalho, onde a linha tracejada indica a regressão polinomial de 2ª ordem referente aos valores obtidos neste estudo, considerando-se os dois grupos de refrigeradores, e a linha sólida indica o valor fornecido pelos fabricantes e abordado no trabalho de Cardoso e Nogueira (2003).

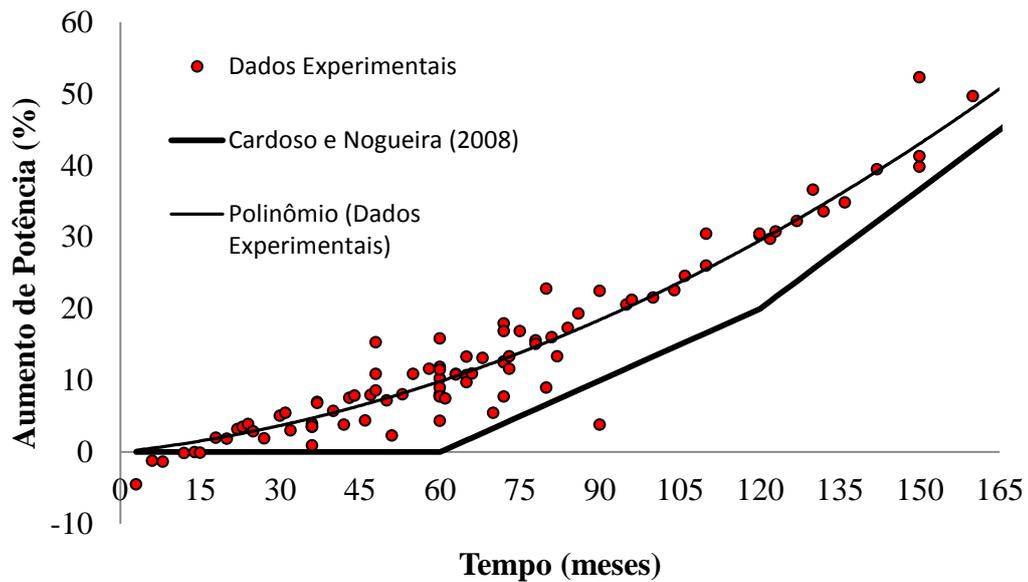


Figura 4.18 – Comparação entre os dados obtidos experimentalmente e aqueles fornecidos pelos fabricantes de equipamentos de refrigeração.

Apesar de não ser tarefa simples identificar os problemas específicos dos compressores que causam desgastes em seus componentes, tampouco identificar falhas em outros dispositivos do circuito de refrigeração que influenciam na degradação do compressor, é possível verificar que os dados adquiridos experimentalmente apresentam uma coerência com aqueles informados pela literatura. Assim, podemos perceber que nos cinco primeiros anos há uma tendência de aumento de consumo de 10%, enquanto entre cinco e dez anos, o aumento chega a 40%, finalizando-se em quinze anos, com uma tendência de 55% de aumento no consumo de potência. A equação matemática que melhor representa o consumo de um compressor de refrigerador, ao longo do tempo, pode ser expressa através da equação 4.1, que representa a regressão polinomial de segunda ordem dos dados adquiridos.

$$P(t) = P_{Nom} \left(1 + \frac{0,0014t^2 + 0,0828t}{100} \right) \quad (4.1)$$

em que,

$P(t)$ Potência, em Watts, consumida pelo compressor após o t -ésimo mês de funcionamento do equipamento;

P_{Nom} Potência nominal do compressor em análise.

Verifica-se que os dados adquiridos experimentalmente não passam pelo ponto zero no início de sua operação, apresentando em alguns casos valores negativos para o aumento de potência nominal, da ordem de 5%, para os primeiros 10 meses de utilização do equipamento. Todavia, são valores próximos ao esperado. Isto ocorre porque se trata de um equipamento em operação real, sendo que apenas na teoria o valor nominal do equipamento é respeitado. Quando o mesmo entra em operação, os valores são ligeiramente diferentes daquilo que foram especificados e, no caso dos refrigeradores, este valor foi abaixo do esperado.

Outro dado importante coletado é o tempo de funcionamento do equipamento durante um período de 24 horas. Alguns fatores como quantidade de aberturas de portas e posicionamento dos refrigeradores no ambiente podem modificar sensivelmente o tempo em que os equipamentos ficam ligados durante o dia, porém, existe uma tendência de aumento que vai desde 30% do tempo de um dia, ou seja, de aproximadamente 7 horas, no início da operação do equipamento, até 75% do dia, ou seja, de aproximadamente 18 horas, no final da sua vida útil, com 180 meses de utilização, conforme verificamos na figura 4.9.

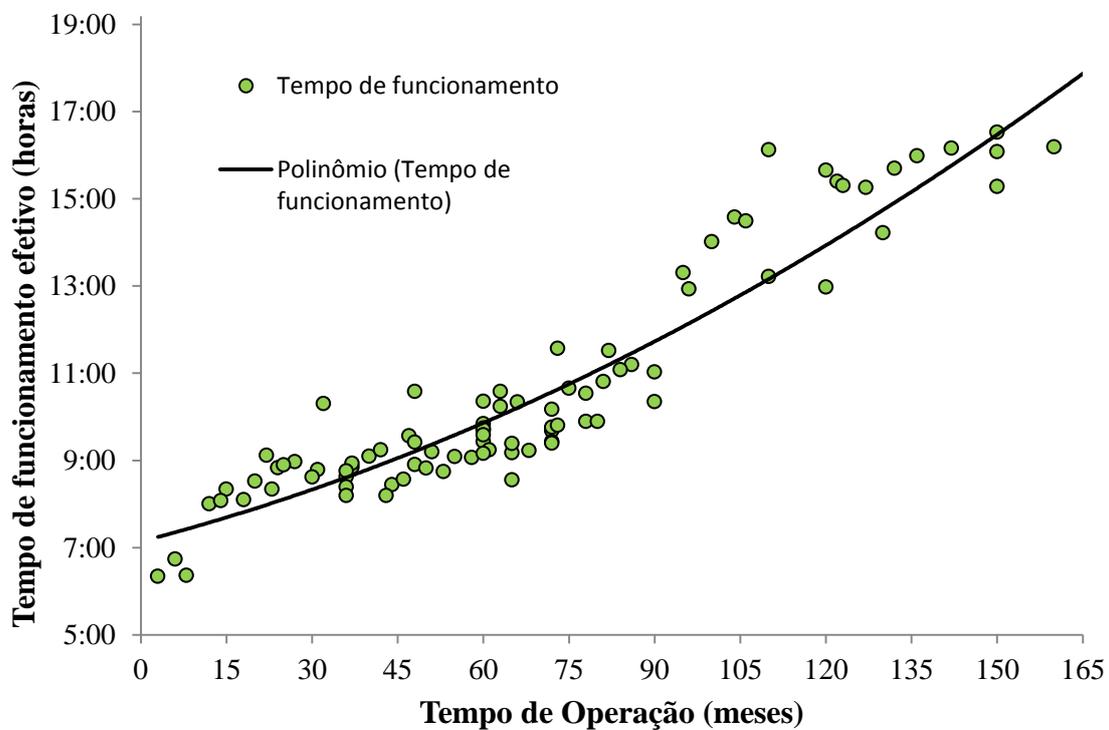


Figura 4.19 – Evolução do tempo diário de funcionamento de um refrigerador em função de sua idade.

A função matemática que melhor representa o tempo de funcionamento de um equipamento, durante o período de 24 horas, ao longo de sua vida útil é dada através da equação 4.2 a seguir:

$$T(t) = 0,0003.t^2 + 0,0221.t + 6,46 \quad (4.2)$$

em que,

$T(t)$ Tempo, em horas, em que o equipamento permanece em pleno funcionamento durante o período de 24 horas;

t Tempo decorrido, em meses, desde que o equipamento entrou em funcionamento.

Os dados coletados mostram que o comportamento de alguns compressores não seguem a tendência média dos outros equipamentos que possuem a mesma idade, uma vez que há significativas diferenças no modo de utilização dos equipamentos. Todavia, o comportamento individual não se desviou de maneira significativa da média verificada para os dados coletados. No caso da potência, o desvio-padrão da amostra é de 12,36%, enquanto no caso do tempo de funcionamento, este valor é de 1,33 horas.

Todavia, há um ponto fora da curva que merece destaque por apresentar um comportamento fora do esperado. Na figura 4.18, que trata do aumento da potência nominal do equipamento, há um compressor que apresentou cerca de 5% de desgaste, enquanto seu valor esperado para o período é de 20% (80 meses). Ao analisar a planilha resumo deste equipamento, verificou-se que se trata de um equipamento do segundo grupo (refrigeradores do Metrô/DF), em cujo interior havia apenas duas garrafas de água. Além disso, durante o período de testes, houve apenas uma abertura de porta com o tempo de 9 segundos. O equipamento está instalado em um local de pouca movimentação e assim, é possível inferir que o seu desvio em relação aos outros valores se deve em função de pouquíssima utilização do equipamento, o que mantém a integridade de seus componentes por mais tempo. No entanto, o seu tempo de funcionamento total não apresentou um valor fora do padrão esperado.

4.2 CÁLCULO DO TEWI DO PONTO DE VISTA DA DEGRADAÇÃO DO EQUIPAMENTO AO LONGO DE SUA VIDA ÚTIL

Esta seção tem o intuito de avaliar a quantidade de gás carbônico equivalente lançado na atmosfera considerando-se os efeitos da degradação. Assim, é importante estimar a degradação dos aparelhos ao longo dos anos para que haja um cálculo mais realista da quantidade de CO₂ liberado anualmente pelos equipamentos de refrigeração.

Para o cálculo de TEWI, de acordo com a equação 2.4, é necessário o conhecimento da potência do equipamento, o total de horas em que o mesmo opera durante o ano e a quantidade de CO₂ emitido na geração da energia elétrica consumida pelo compressor. Além disso, para estimar o TEWI de todos os equipamentos em operação no Brasil, é necessário o conhecimento do parque brasileiro de refrigeradores. Todas essas variáveis foram estimadas ao longo deste trabalho e permitem calcular a quantidade de CO₂ lançado na atmosfera exclusivamente por equipamentos de refrigeração doméstica. Além disso, é possível avaliar o progresso do aumento desse gás na atmosfera, dado que movimentos econômicos e mudanças no estilo de vida das pessoas influenciaram a quantidade de refrigeradores em operação no país.

É importante notar que os dados da potência consumida e o tempo de funcionamento dos equipamentos, considerados para este cálculo, levam em conta a degradação verificada nos 93 compressores avaliados e que foram considerados como uma média do comportamento de todos os equipamentos existentes. Além disto, somente os dados dos equipamentos de médio porte foram considerados, por representarem 83% do mercado brasileiro, sendo os demais analisados considerados como de médio porte. Não foram encontradas informações na literatura acerca da quantidade de equipamentos de pequeno e grande porte, porém assume-se que, por representarem uma fatia menor do mercado, as estimativas realizadas não são influenciadas de maneira significativa.

Para o cálculo do TEWI, é conveniente a formulação de um equipamento e aplicar os cálculos para todos os outros refrigeradores do parque brasileiro. Assim, tendo como base as equações 4.1 e 4.2, podemos calcular o consumo total de um aparelho, durante o período de 24 horas, em função de sua idade, através da equação 4.3.

$$P(t)_{24horas} = \frac{P_{nom}}{1000} (4,2 \cdot 10^{-7} t^4 + 5,57 \cdot 10^{-5} t^3 + 1,1 \cdot 10^{-2} t^2 + 5,57 \cdot 10^{-1} t + 6,46) \quad (4.3)$$

em que,

- $P(t)_{24horas}$ Consumo de um equipamento, em kWh, durante o período de 24 horas;
 P_{nom} Potência nominal de um equipamento, em Watts;
 t Tempo decorrido, em meses, do funcionamento do equipamento.

Como abordado na seção 2.2.5, o Brasil emite, na atmosfera, 0,075kg de gás carbônico por kWh consumido. Assim, é possível estimar a quantidade de CO₂ emitido diariamente na atmosfera, aplicando-se a relação a seguir:

$$Q(t) = 0,075 P(t)_{24horas} \quad (4.4)$$

em que,

- $Q(t)$ Quantidade de gás carbônico, em kg, lançados indiretamente na atmosfera por em equipamento de refrigeração, por dia, em função do tempo decorrido de utilização deste;
 t Tempo decorrido, em meses, do funcionamento do equipamento.

O cálculo do TEWI leva em consideração as emissões diretas e as indiretas de CO₂ para a atmosfera. Assim, faz-se necessário o cálculo do impacto das emissões diretas de fluido refrigerante no ambiente. Conforme discutido no capítulo 2, estima-se que haja a perda de 2 a 3% da massa do fluido refrigerante, contido no circuito, por ano. Assim, é possível estimar o impacto das perdas indiretas de um refrigerador através da equação 4.5. Além disso, conforme abordado no capítulo 3, 97% dos refrigeradores operam, atualmente, com uma média de 0,098kg do fluido HFC134a. Ao considerarmos que todos os equipamentos possuem tais características, é possível estimar o impacto ambiental direto que os gases, quando vazam, causam no ambiente. Assumir esta hipótese não prejudica, em termos médios, a avaliação dos impactos, uma vez que a quase totalidade dos equipamentos operam com o mesmo fluido refrigerante. Além disso, os impactos indiretos são mais expressivos que os diretos.

$$G(t) = [GWP(-0,0208t + 1,0099)]m \quad (4.5)$$

em que,

- $G(t)$ Quantidade de CO₂ equivalente lançado na atmosfera em um determinado período;
- t Tempo, em meses, de operação do equipamento, $t > 12$;
- GWP Potencial de aquecimento do fluido refrigerante utilizado no sistema, em CO₂ equivalente/kg;
- m Massa de fluido refrigerante confinado no circuito

Além do TEWI global de cada equipamento, é interessante aplicar os dados individuais no conjunto de equipamentos do parque brasileiro de refrigeradores domésticos. Assim, como discutido na seção 3.7, é possível estimar a quantidade de equipamentos de refrigeração introduzidos e retirados do mercado a cada ano, desde 1990 e, de posse destes dados, é possível estimar a quantidade de gás carbônico lançado no ambiente, em decorrência da utilização dos equipamentos de refrigeração, através da equação 4.6 a seguir.

$$E = \sum_0^t N_{equip}(t).365.P(t)_{24horas}, t = 0, 12, 24, 36 \quad (4.6)$$

em que,

- $P(t)_{24horas}$ Consumo diário de um equipamento, em kWh;
- E Energia total consumida diariamente pelo parque brasileiro de refrigeradores
- $N_{equip}(t)$ Número de equipamentos remanescente no mercado com t-anos de uso.
- $P(t)_{24horas}$ Consumo diário de um equipamento, em kWh;

O capítulo 3 abordou o quantitativo de equipamentos no mercado e o modelo matemático de entrada e saída destes no parque brasileiro. A partir destas informações, é possível estimar a quantidade de refrigeradores existentes no mercado e suas idades

($N_{equip}(t)$). Além disso, a seção abordou a evolução das potências nominais médias verificadas nos equipamentos ao longo dos anos. Se considerarmos, como hipótese simplificadora, que todos os equipamentos do mercado possuem a potência nominal mencionada na referida seção, é possível estimar a quantidade de energia consumida pelo parque brasileiro.

A tabela 4.1 reúne as características do parque nacional para o ano de 2011. Cabe ressaltar que não foi possível caracterizar os equipamentos fabricados antes de 1990 e que ainda estão em operação, sendo estes reunidos em um único grupo, independentemente de suas idades, cuja representação é dada por “20+”.

Tabela 4.1 – Resumo das principais características do parque de refrigeradores para o ano de 2011, no Brasil.

Idade (anos)	Quantidade de equipamentos (10^6)	Potência Nominal (W)	Potência Estimada (W)	Consumo Energético em 2011 (TWh)
20+	0,98	144	294	1,4
20	1,02	143	280	1,4
19	1,42	141	264	1,9
18	1,52	138	248	2,0
17	1,92	137	236	2,5
16	2,05	135	223	2,7
15	2,37	133	211	3,0
14	3,68	130	198	4,2
13	3,65	130	190	3,7
12	3,59	128	180	3,3
11	2,96	126	170	2,5
10	2,85	124	161	2,2
9	3,54	123	154	2,1
8	3,52	120	145	2,0

7	3,81	118	138	1,8
6	3,93	117	133	1,2
5	2,76	117	129	1,2
4	3,15	117	125	1,7
3	4,72	117	122	1,8
2	5,16	117	120	1,8
1	6,01	117	117	2,1
TOTAL				47,2

Estima-se, assim, que foram consumidos 47 TWh apenas com equipamentos de refrigeração residencial. Se os equipamentos não sofressem desgaste ao longo do tempo, ou seja, se a potência nominal e o tempo de funcionamento do equipamento verificado em um período de 24 horas se mantivessem iguais desde o início de sua operação, mantendo-se as relações de entrada e saída de equipamentos do mercado, o consumo do total seria de 19,8 TWh, ou 54% a menos que estimado. Nesse sentido, é possível dizer que esse percentual refere-se apenas à energia necessária para suprir a perda de eficiência dos equipamentos. Esses valores são importantes pois representam um significativo percentual da energia gerada no país, já que a produção nacional, para abastecimento residencial é de aproximadamente 1.000 TWh/ano (EPE, 2012).

A geração de energia produz impactos no ambiente, sobretudo através da emissão de gás carbônico na atmosfera. No Brasil, considerando-se a diversidade de fontes de energia, estima-se que sejam emitidos 0,075 kg de gás carbônico por kWh de energia gerado (IPCC, 2011). Assim, podemos estimar a quantidade de gás carbônico equivalente que as aplicações de refrigeração lançam indiretamente na atmosfera. Além disso, os refrigeradores utilizam fluidos refrigerantes que também produzem efeitos negativos no ambiente caso lançados na atmosfera e seu impacto é avaliado através do índice conhecido como *GWP (Global Warming Potential)*, conforme equação 4.6.

As somar-se as parcelas direta e indireta, verifica-se que, no ano de 2011, os refrigeradores emitiram, juntos, 3,64 milhões de toneladas de CO₂ equivalente no ambiente. Esse valor representa emissão de uma frota de 1,2 milhões de veículos percorrendo uma média de 50km por dia durante um ano (IBRAM, 2012).

A tabela 4.2 reúne as informações das quantidades de energia consumida e CO₂ equivalente lançados na atmosfera em função da idade do equipamento. Além disso, é

feita uma comparação dessas variáveis quando não considerado os efeitos da perda de eficiência do equipamento. Como exemplo, podemos citar um equipamento que entrou em operação em 1996 e que funcionou por 15 anos, terá, em média, consumido pouco mais de 10 mil kWh neste período, emitindo 887kg de dióxido de carbono na atmosfera, considerando-se os efeitos do desgaste. Se não houvesse degradação do equipamento, o consumo neste período seria de aproximadamente 4.800kWh, com emissões de 354kg de CO₂. A quantidade de equipamentos com mais de 15 anos de operação é estimado em mais de 11 milhões de unidades e estas foram responsáveis pela emissão direta e indireta de mais de 1,1 milhões de toneladas de gás carbônico na atmosfera.

Tabela 4.2 – Resumo do impacto dos refrigeradores em 2011, no Brasil e a comparação quando não considerados os efeitos da perda de eficiência dos equipamentos.

Idade (anos)	Consumo total acumulado (kWh)	CO₂ equivalente acumulado (kg)	Consumo total acumulado sem a presença de desgastes (kWh)	CO₂ equivalente acumulado sem a presença de desgaste (kg)
21+	18.849	1.414	6.532	490
20	17.083	1.281	6.396	480
19	15.598	1.170	6.048	454
18	14.031	1.052	5.664	425
17	13.625	1.022	5.210	391
16	12.228	917	4.884	366
15	10.685	801	4.493	337
14	9.129	685	4.082	306
13	8.984	674	3.750	281
12	7.870	590	3.482	261
11	6.803	510	3.188	239
10	5.905	443	2.922	219
9	5.073	380	2.657	199
8	4.172	313	2.333	175
7	3.517	264	2.091	157

6	2.886	216	1.814	136
5	2.356	177	1.555	117
4	1.853	139	1.274	96
3	1.437	108	1.020	76
2	1.056	79	765	57
1	697	52	510	38
0	345	26	345	26

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE PROJETOS FUTUROS

O trabalho centrou-se no estudo da degradação dos compressores utilizados em refrigeração doméstica e o seu impacto no meio ambiente, verificado, sobretudo, através do aquecimento global. A dificuldade em se encontrar estudos acerca do assunto na literatura motivou este trabalho e importantes dados foram obtidos. O estudo prévio de alguns indicadores, tais como o *GWP* e o *TEWI*, permitiram estimar o impacto que o consumo de energia elétrica utilizada exclusivamente em sistemas doméstico de refrigeração causa no ambiente. Verificou-se que, de toda a matriz energética, cerca de 10% da eletricidade gerada é utilizada neste tipo de equipamento. Além disso, considerando-se a diversidade de fontes geradores de energia, estudos mostram que, no Brasil, 0,075kg de CO₂ são produzidos, direta ou indiretamente, para cada quilowatt-hora de energia consumido. Com uma produção anual de mais de 38 mil gigawatt-hora, verifica-se que é importante estudar o comportamento da degradação dos compressores, a fim de nortear políticas públicas que promovam a substituição de equipamentos antigos.

O estudo mostrou que um equipamento médio de refrigeração doméstica, no ano de 1990, era responsável pela emissão de aproximadamente 0,076kg de CO₂ na atmosfera diariamente quando novo. Já em 2010, a emissão passou a ser de aproximadamente 0,062kg, ou seja, uma redução de 18,5%. Um equipamento que entrou em operação em 1990 e que funcionou por 15 anos, terá, em média, consumido pouco mais de 10 mil kWh neste período, emitindo 800kg de dióxido de carbono na atmosfera, considerando-se os reais efeitos do desgaste. Se não houvesse degradação do equipamento, o consumo neste período seria de aproximadamente 4.500 kWh, com emissões de 337kg de CO₂. A quantidade de equipamentos com mais de 15 anos de

operação é estimado em 12,5 milhões de unidades e estas foram responsáveis pela emissão direta e indireta de mais de 22,8 milhões de toneladas de gás carbônico na atmosfera. A quantidade de equipamentos que entrou em operação no mercado e a quantidade que saiu foi explorada ao longo do capítulo 3 e, atualmente, são cerca de 65 milhões de unidades em funcionamento, emitindo, juntos, cerca de 30 bilhões de kg de CO₂ equivalente na atmosfera, anualmente. Para se ter uma ideia, este valor representa a quantidade de gás carbônico emitida anualmente por uma frota composta de 12 milhões de veículos, percorrendo em média 50 quilômetros por dia (IBRAM, 2012).

As empresas vem se adequando à padrões internacionais e normas internas de consumo consciente de energia, por isso a eficiência dos equipamentos vem aumentando gradativamente. No ano de 1990, a potência média de um compressor era de 144W e, no ano de 2007, foi reduzida a 117W, ou seja, uma redução de 18,75%.

O desgaste médio dos compressores segue uma tendência não encontrada na literatura, cuja expressão foi inicialmente estimada, conforme equação 4.1. Apesar da necessidade de realização de mais experimentos de campo, esta equação é útil na estimativa de desgaste destes equipamentos, pois até então, o que se tinha eram informações disponibilizadas pelas empresas fabricantes de compressores, que apresentam uma curva de degradação estimada, com várias aproximações e simplificações, conforme podemos perceber na figura 4.18. A curva nos mostra que a degradação ao longo de 160 meses chega a 50%, sendo praticamente uma relação linear entre a degradação e o tempo de uso.

Outra importante verificação realizada foi em relação ao tempo de funcionamento do equipamento. Com o tempo de uso, a degradação natural de todo o sistema faz com que o compressor trabalhe por mais tempo para atingir a mesma capacidade de refrigeração. Assim, verificou-se que os efeitos da degradação do compressor são potencializados com um maior tempo de funcionamento do mesmo, conforme figura 4.19, onde verifica-se que um equipamento novo permanece em funcionamento por cerca de 6 horas por dia, enquanto um equipamento com 160 meses chega a 16 horas de operação diária. Isso faz com que haja um ciclo vicioso, onde quanto mais o compressor se degrada, mais tempo ele passa funcionando e, conseqüentemente, mais ele se degrada. Cabe lembrar que durante o funcionamento do equipamento, apesar de haver algumas flutuações, a potência do equipamento não muda, ou seja, ela se mantém constante durante seu ciclo. O que muda e faz com que o

equipamento consuma mais energia é o tempo em que ele permanece ligado a mais associado ao aumento da potência nominal, verificado ao longo dos anos.

As estimativas sugerem que, atualmente, o consumo total de potência de todos os equipamentos operantes no Brasil é de aproximadamente 47 TWh por ano. Considerando-se todo o espectro das idades destes equipamentos, verifica-se que o desgaste é responsável por um aumento de 32% do que seria consumido se o desgaste não existisse.

Para complementar o estudo da degradação, foram realizadas análises do óleo lubrificante dos compressores. Os resultados mostram que no início da vida útil do equipamento há uma tendência de um elevado aumento do desgaste, fazendo com que partículas de metais se depositem no óleo, dando início ao processo de degradação do equipamento. Nos primeiros 18 meses, a quantidade de partículas aumenta consideravelmente e se estabiliza em um patamar médio até, aproximadamente 150 meses, quando o número volta a crescer de maneira potencial, indicando que o equipamento está prestes a colapsar, chegando ao final de sua vida útil. Nos meses iniciais, há uma rápida elevação da quantidade de partículas porque há alguns ajustes internos que são feitos durante a operação do equipamento, tais como folgas, desalinhamentos, entre outros. A seguir, o valor estabiliza-se em um período de pleno desempenho do equipamento. Ao final de sua vida, os ajustes já não são mais os ideais, as folgas aumentam, há vazamentos e diversos outros problemas que fazem com que a degradação seja potencializada, conforme é verificado nas figuras 4.6 e 4.7. O mesmo ocorre com a viscosidade do lubrificante que, afetado pela quantidade de partículas em suspensão, pode ter seu valor aumentado em mais de 80%, conforme é verificado na figura 4.8.

O estudo se mostra importante pois caracteriza os compressores mais utilizados na refrigeração doméstica e aplica a eles valores números e equações relacionados à degradação. A união destas equações permite calcular a quantidade de dióxido de carbono emitido por um equipamento que está desde um até vinte anos em operação. Para isso, considera-se a potência nominal do equipamento, o tempo de funcionamento do equipamento, já aumentando em função de sua idade e a degradação da potência do mesmo.

Contudo, propõe-se a ampliação destes estudos com através de análises laboratoriais, utilizando técnicas de ensaios de vida acelerada, a fim de corroborar os

dados apresentados neste trabalho e incluí-lo como parte da formulação de compressores apresentada no capítulo 2. Apesar de o presente estudo estimar a degradação do equipamento como um todo, os componentes, individualmente, não foram considerados. Assim, algumas lacunas podem ser preenchidas. Por exemplo, a equação 3.1 relaciona a eficiência volumétrica de um compressor em função da vazão de massa que entra no mesmo. Conforme discutido neste trabalho, é sabido que a presença de contaminantes no óleo obstrui as válvulas e tubos em que passa o fluido refrigerante e, com uma vazão menor, a eficiência do equipamento é reduzida. As equações 3.3 e 3.4, referentes à eficiência de espaço nocivo e a potência do compressor, respectivamente, estão em função dos volumes específicos de valor do fluido e, conforme abordado nas seções anteriores, este valor é alterado com o tempo de funcionamento do equipamento, uma vez que vazamentos internos fazem com que fluido a diferentes temperaturas se misturem, alterando as características físicas do mesmo. O mesmo ocorre com a capacidade de refrigeração do equipamento, representado pela equação 3.6, que é função do fluxo de massa e das entalpias de entrada e saída do compressor. Mais uma vez, observamos que entupimentos e vazamentos alteram essas variáveis de projeto e modificam o modo de operação dos compressores.

Neste sentido, como proposta de projeto futuro, sugere-se o estudo de como estas variáveis são alteradas ao longo do tempo; o nível de desgaste sofrido por pistões e válvulas; o aumento da intensidade de vazamentos internos e obstruções que interferem o funcionamento do equipamento. Em outras palavras, podem-se realizar estudos aprofundados internamente ao equipamento, diferentemente do presente estudo que analisou o compressor como um todo, uma unidade selada, sem buscar a fundo a influência de cada uma dessas variáveis citadas na composição do desgaste dos compressores.

Além disso, propõe-se um estudo em uma bancada de vida acelerada. Os dados fornecidos neste trabalho podem servir de base para a calibração da mesma. Os níveis de desgaste a ser verificados na bancada podem ter como base o gráfico apresentado na figura 4.18.

As análises de campo podem ser aprimoradas e levadas a outras regiões do país, de modo a avaliar com mais precisão a influência de fatores ambientais na degradação dos compressores e, com a ampliação do número de unidades testadas, evitar que alguns

casos particulares de funcionamento anormal do equipamento afetem a qualidade dos dados obtidos.

Por fim, outra proposta futura é estudo das características do óleo, buscando correlacioná-las ao desgaste sofrido pelos compressores e às falhas que os mesmo estão expostos através da análise dos desgastes verificados no mesmo, e abordado superficialmente neste trabalho, tais como óxidos, ferrugens, contaminantes orgânicos, esferas, nacos, etc. Em um caso de teste de vida acelerada, amostras de óleo podem ser obtidas e a evolução destes parâmetros podem ser acompanhadas a fim de buscar uma correlação entre os valores obtidos e a vida útil do equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APRILE, M., Emissão de gases de efeito estufa no ambiente, Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2011.
- ASHRAE, A toolkit for primary HVAC system energy calculation, Laboratoire de Thermodynamique, Université de Liège, Campus du SART TILMAN, 1999.
- BARROS, M.B; MELLO, J.D.B, Análise quantitativa do mecanismo de desgaste predominante em ensaios de desgaste abrasivo, Universidade Federal de Uberlândia, Laboratório de Tribologia e Materiais, 2009.
- BASSETO, I.F.F; NETO, A.H.; Souza G.F.M., Estudo de confiabilidade de compressores alternativos semi-herméticos de sistemas de refrigeração, Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, 2007.
- BRITO, A.L.; SOUZA, R.T, Método para a previsão de taxas de falha empregando dados de teste de vida acelerada, Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
- CARDOSO, R. B. ; Nogueira, L. A. H., Estimativa do consumo de energia elétrica em refrigeradores no setor residencial brasileiro, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, 2006.
- CARDOSO, R. B. ; Nogueira, L. A. H., Impacto da idade e temperatura ambiente no consumo de energia elétrica em refrigeradores no setor residencial In: V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, v. 1. p. 1-8, Salvador, 2008.
- CARDOSO, R. B., Avaliação da Economia de Energia atribuída ao Programa Selo PROCEL em Freezers e Refrigeradores, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, MG, 2008.
- CIANTAR, C. and Hadfield, M., "A Study of Tribological Durability With Associated Environmental Impacts of a Domestic Refrigerator, 2003.
- CIANTAR, C., The influence of lubricant viscosity on the wear of hermetic compressor components in HFC-134a environments, 2000.
- DANFOSS, Why Compressors Fail, Dinamarca, 2009.
- DEDINI, F.G, KOZLOWSKI, A.L., Ensaios acelerados e modelos de vida, Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP, 2002.
- ELETROBRAS, O Consumo de energia no Brasil, 2011.
- EPA, Energy Star Overview of 2010 Achievements, Energy Star, Estados Unidos, 2011.
- EPE, Balanço Energético Nacional, 2012. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/>. Acesso em 15/11/2012.

FELÍCIO, R.A., O clima mundial. Jô Soares, Rio de Janeiro, Rede Globo, 02 de maio de 2012. Programa de TV.

FISCHER, S.K., Sand, J.R., Baxter, V.D., Energy and Global Warming Impacts of HFC Refrigerants and Emerging Technologies Oak Ridge National Laboratory, 1997.

FISCHER, S.K., Hughes, P.J e Fairchild, P.D., Energy and Global Warming Impacts of CFC Alternatives Technologies. Oak Ridge National Laboratory, December, 1991.

FLETCHER, S.R., The Global Climate Change: Kyoto Protocol, CRS Report for Congress, 2005.

GARCIA, M.B., Características do desgaste de anéis de pistão com diferentes tecnologias de tratamentos superficiais, Universidade de São Paulo, 2003.

GARLAND, N.P. E HADFIELD, M., Environmental implications of hydrocarbon refrigerants applied to the hermetic compressor, 2005.

GRACE et al, Impacts of Climate Change on the Tree Line, Oxford Journals, Volume 90, Issue 4, pages 537-544, England, 2002.

GROSS, U. L., Carbon Dioxide levels over the years, University of California, 2008.

HARAZ, A.; ERMER, D.S, Accelerated Life Test for Refrigerator Components – Proceedings of the annual reliability and maintainability symposium, 1980.

HAUPT, L.M. e FINOTTI, J.F., Avaliação de Desgaste Mecânico e Perda de Desempenho Em Compressores Herméticos Via Teste de Vida Acelerada, 2007.

HOGMARK, S., Wear Mechanisms of HSS, Uppsala University, The Ångström Laboratory, Sweden, 2002.

HOPPE, L., Geração de Energia Limpa e Diversificação da Matriz Energética Brasileira, III Mostra de pesquisa de pós-graduação da PUC-RS, 2008.

IBGE, Dados demográficos e socioeconômicos da população brasileira, 2010.

IBRAM, Os impactos da liberação de CO₂ na atmosfera, 2012.

IMBERA, Custo Total de Propriedade, 2011. Disponível em http://imberacooling.com/portugues/costo_total_propiedad.html. Acesso em 15/03/2011.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System, 2007.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Special Report on Emission Scenarios, Cap.6 Summary Discussions and Recommendations, 2011.

ISO, 1987, ISO 917:1989 Testing of refrigerant compressors, International Standards for Business, Government and Society, Genebra, Suíça.

JANNUZZI, G.M., Análise de custo-benefício de programa de substituição de refrigeradores domésticos para domicílios de baixa renda no Brasil, USAID, 2007.

KIM, N.H., Youn, B., Webb, R.L., Air-side heat transfer and friction correlations for plain fin-and-tube heat exchangers with staggered tube arrangements, Transactions of the ASME, 1999.

KNABBEN, F.T., Hermes C.J.L., Melo C., Gonçalves J.M., Um Modelo Simplificado para Prever o Consumo de Energia de Refrigeradores Domésticos, CONEM, Salvador, 2008.

LABIAPARI, W.M., Fenômenos que alteram o desgaste de equipamentos e partes móveis, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

LOCKWOOD, M., The great global warming swindle, World Radiation Center, Rutherford-Appleton laboratory, United Kingdom, 2010.

MARU, M.M., Estudo do desgaste e atrito de um par metálico sob deslizamento lubrificado, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2003.

MASJUKI, H.H., Saidur, R., Choudhury, I.A., Mahlia T.M.I., Ghani, A.K., Maleque, M.A., The Applicability of ISO Household Refrigerator-Freezer Energy Test Specifications in Malaysia, Department of Mechanical Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia, 2001.

MASJUKI, H.H., Saidur, R., Choudhury, I.A., Mahlia, T.M.I., “Factors effecting energy consumption of household refrigerator-freezers”, TENCON, Proceedings Volume 2, pp:92 – 96, 2000.

MCT, Protocolo de Quioto – a convenção sobre mudança do clima – O Brasil e a Convenção – Quadro das Nações Unidas, 2006.

MMA, Programa Brasileiro de eliminação dos HCFCs, 2011.

MMA, O aquecimento global e políticas nacionais de colaboração internacional, 2011.

MENDES, A.A.P., Uso de energia solar para a geração de energia elétrica e aquecimento de água, Tese de pós graduação em fontes alternativas de energia, Faculdade Federal de Lavras, MG, 2007.

NASCIMENTO, C.A.M., Pereira, R.A., Pimenta, W.J., Haupt, K.I., Finotti, M.V.L., Santos, B., Pimenta, J.M.D., Caracterização da Perda de Desempenho de Compressores de Refrigeração Via Testes de Vida Acelerada, MERCOFRIO, Curitiba-PR, 2008.

NOAA, National Oceanic And Atmospheric Administration 2011 Release, 2011. Disponível em www.noaa.gov. Acesso em 13/04/2011.

OLIVEIRA, V.R.B, COLOSIMO, E.A., Comparison of Methods to Estimate the Time-to-failure Distribution in Degradation Tests, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

PAPA, M.C.O., Uma investigação de métodos para o estudo da incerteza em dados experimentais de vida acelerada, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.

PEIXOTO, R.A., Giacomo, D., Avaliação da Emissão de Fluidos Refrigerantes em Instalações de Refrigeração de Supermercados, CONBRAVA, São Paulo, 2007.

PEIXOTO, Q. A, Distribuição do parque brasileiro de refrigeradores em função de suas idades; informações acerca da retirada de equipamentos do mercado ao longo dos anos, Ministério do Meio Ambiente, 2011 (Comunicação oral).

PEREIRA, L.G., Simulação semi-empírica de refrigeradores domésticos, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2009.

PEREIRA, R.A., Uma nova metodologia para o cálculo do impacto das aplicações de refrigeração residenciais sobre o aquecimento global, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2010.

PIMENTA, J.M.D., Uso de Hidrocarbonetos Refrigerantes em Aplicações Residenciais, Mercofrio 2008, Curitiba-PR, 2008.

PIMENTA, W., Pimenta, J.M.D., Haupt,K., Finotti,M., Avaliação da Degradação do Desempenho de um Compressor Operando com Hidrocarbonetos, 16º POSMEC FEMEC/UFU, Uberlândia-MG, 2006.

PINTO, J.M.A., Modelagem de testes acelerados com esforço aplicado em níveis em um estudo de fadiga mecânica, Tese de Doutorado em Energia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, USP, 2004.

PNAD 2008, Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios, IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

POISSON, O.K., Static sea Level over 120,000 years, Science Journal, 115th edition, December 2006.

POLETTO, E.L., Aprimoramento de uma bancada de ensaios de desempenho de compressores herméticos visando reduzir incertezas de medição, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

PROCEL, Avaliação dos Resultados do PROCEL 2010, Eletrobras, DPS/DPST, 2011.

SILVA, A., Cinemática e dinâmica do processo de absorção de gás refrigerante em óleo lubrificante, Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2007.

SILVA JÚNIOR, H. X., Aplicação das Metodologias de Análise Estatística e de Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) para o Estabelecimento de Padrões de Eficiência

Energética: Refrigeradores Brasileiros, Dissertação de Mestrado, Unicamp, São Paulo, 2005.

SILVERMAN, M., Summary of HALT and HASS results at an accelerated reliability test center, Reliability and Maintainability Symposium, 1998. Proceedings., Annual, 1998.

STEINMETZ, L. K., Efeitos do excesso de gás carbônico no planeta, Revista Meio Ambiente, edição 54, maio de 2008.

STOECKER, W.F. e JONES, J.W.; Refrigeração e ar condicionado. Ed. McGraw Hill, 1985.

STOUPPE, D.E. e YAU, T. Y. S., “Air conditioning and Refrigeration equipment Failures, National Engineer”, 1989.

TABAKOFF, W.; HAMED, A.; SINGH D., Modeling of Compressor Performance Deterioration Due to Erosion, Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics, University of Cincinnati, 1997.

TEIXEIRA, P.S.; Pimenta, J.M.D., Hidrocarbonetos Como Fluidos Refrigerantes: Estado da arte; Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Refrigeração e Ar Condicionado, CONEM, 2004.

UNEP, The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, Secretariat for The Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer, 2011.

UN, World Population Prospects, 2012. Disponível em <http://www.un.org/esa/population/>. Acesso em 25/06/2012, às 20:30.

YAMAMOTO, S., AVOLIO, E., Análise do consumo de energia em refrigeradores domésticos através de um modelo matemático simplificado, XI SIMPEP, Bauru, novembro de 2004.