

**ESTUDO DA DEGRADAÇÃO DE COMPRESSORES UTILIZADOS EM REFRIGERAÇÃO DOMÉSTICA E
OS IMPACTOS ASSOCIADOS À PERDA DE EFICIÊNCIA**

Roberto Giuliani – robertogiuliani@uol.com.br

João Manoel Dias Pimenta, Dr. – pimenta@unb.br

Universidade Federal de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, www.enm.unb.br

LN – F3

Resumo. *O funcionamento normal de compressores utilizados em refrigeração doméstica produz desgastes que se intensificam ao longo do tempo e são verificados através de folgas, partículas de metal diluídas no óleo lubrificante e, sobretudo, pelo aumento da potência e do tempo de funcionamento do compressor durante o funcionamento. Como consequência, verificam-se impactos financeiros (aumento da demanda de energia elétrica) e impactos ambientais (emissão de gás carbônico equivalente na atmosfera). O Brasil possui cerca de 65 milhões de refrigeradores em operação atualmente, sendo que mais de 50% desse mercado possui mais de 9 anos de uso. No presente trabalho verifica-se que a presença de uma grande quantidade de equipamentos antigos exige uma produção adicional de cerca de 30 TWh por ano, a um custo de mais de 2 bilhões de dólares. Além disso, as emissões de CO₂ equivalente superam 3 milhões de toneladas ao ano. O artigo destaca as principais características do parque brasileiro de refrigeradores, incluindo uma análise da evolução tecnológica dos aparelhos; a distribuição do parque em função de sua idade; estimativas acerca da perda de eficiência dos compressores, utilizados em refrigeradores, ao longo do tempo; além de estimar os impactos financeiros e ambientais advindos da utilização destes equipamentos.*

Palavras-chave: compressor, degradação, eficiência, refrigeradores

1. 1. INTRODUÇÃO

O consumo energético de um refrigerador é estimado, normalmente, ainda na fase de concepção do seu projeto. Os modelos matemáticos levam em consideração as trocas de calor que ocorrem entre o interior do equipamento e o ambiente; o tipo e a carga de fluido refrigerante confinado no circuito; as pressões de entrada e saída do compressor; entre outras variáveis. Todavia, esses modelos não preveem o aumento do consumo, ao longo do tempo, devido ao acúmulo de desgastes, que naturalmente ocorrem em decorrência do funcionamento do equipamento.

O compressor é o componente do refrigerador que mais se desgasta e, embora bem conhecidos os fenômenos físicos que causam sua degradação, tais como partida inundada, retorno de refrigerante líquido, superaquecimento, etc, são quase inexistentes, na literatura, estudos que relacionem esta degradação ao seu tempo de funcionamento e a perda de eficiência que daí decorre. Assim, a utilização dos modelos atuais de simulação, negligenciam a perda de eficiência e, portanto, subestimam o consumo real do equipamento e omitem dados acerca dos impactos financeiro e ambiental provenientes do uso de refrigeradores.

Atualmente, o Brasil possui cerca de 65 milhões de refrigeradores domésticos em operação, sendo que mais de 50% deles possuem mais de 9 anos de funcionamento. Kim *et al* (2006) mostraram que equipamentos na faixa de 2 a 7 anos são os ideais do ponto de vista energético bem como concluíram que um refrigerador doméstico típico deve ser trocado se o seu consumo anual superar 1.000 kWh, sendo esse valor verificado, em média, após 13 anos de uso do equipamento. No Brasil, cerca de 28% dos equipamentos possuem mais deste citado tempo de funcionamento (Giuliani, 2012).

2. O MERCADO BRASILEIRO DE REFRIGERADORES

Para determinar os impactos financeiros e ambientais dos refrigeradores existentes no mercado, é necessário o conhecimento das suas principais características, o seu quantitativo e a sua distribuição em função do seu tempo de uso. Esta seção aborda a evolução do parque brasileiro e são feitas estimativas e projeções de cenários futuros deste.

Estima-se que em 2011 existiam 65 milhões de refrigeradores em utilização no Brasil (IBGE, 2010) e 1,2 bilhões de unidades no mundo (EPA, 2011). Assim, o parque nacional representa aproximadamente 5% do parque internacional deste tipo de equipamento.

Pereira (2010) estimou a quantidade de refrigeradores em operação no Brasil, entre 1990 e 2010. No ano de 2010, havia 61,6 milhões de equipamentos para uma população de 194 milhões de pessoas (UN, 2012), ou seja, cerca de uma unidade para cada 3 pessoas. 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 possam haver movimentos econômicos imprevisíveis que a alterem. Todavia, se esta relação se man-

tiver, 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 Fig. 1 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.

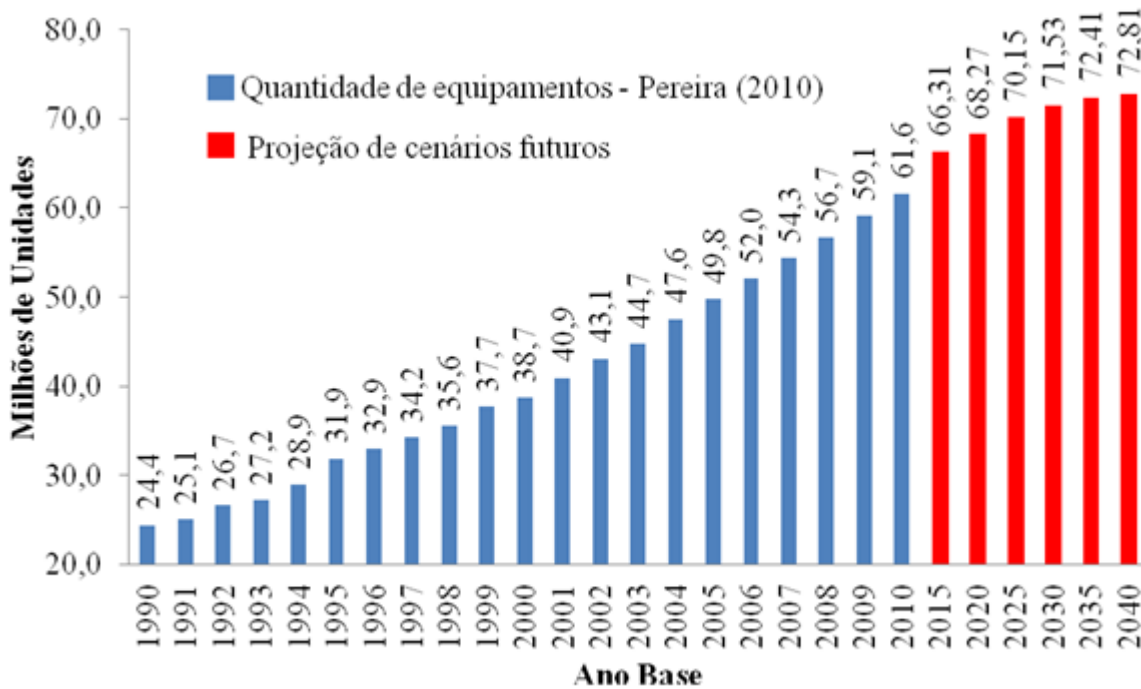


Figura 1. Quantidade de equipamentos de refrigeração doméstica a longo dos anos e projeções futuras.

2.1. Entrada e saída de equipamentos do mercado

Os dados da Fig. 1 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.

Através de um levantamento feito junto ao Ministério do Meio Ambiente do Brasil, foi possível quantificar a entrada e saída de novos aparelhos no mercado, a cada ano, entre 1991 e 2011. Os dados variam de ano a ano e não possuem 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 Fig. 2 representa essa variação do parque brasileiro de refrigeradores no mencionado período.

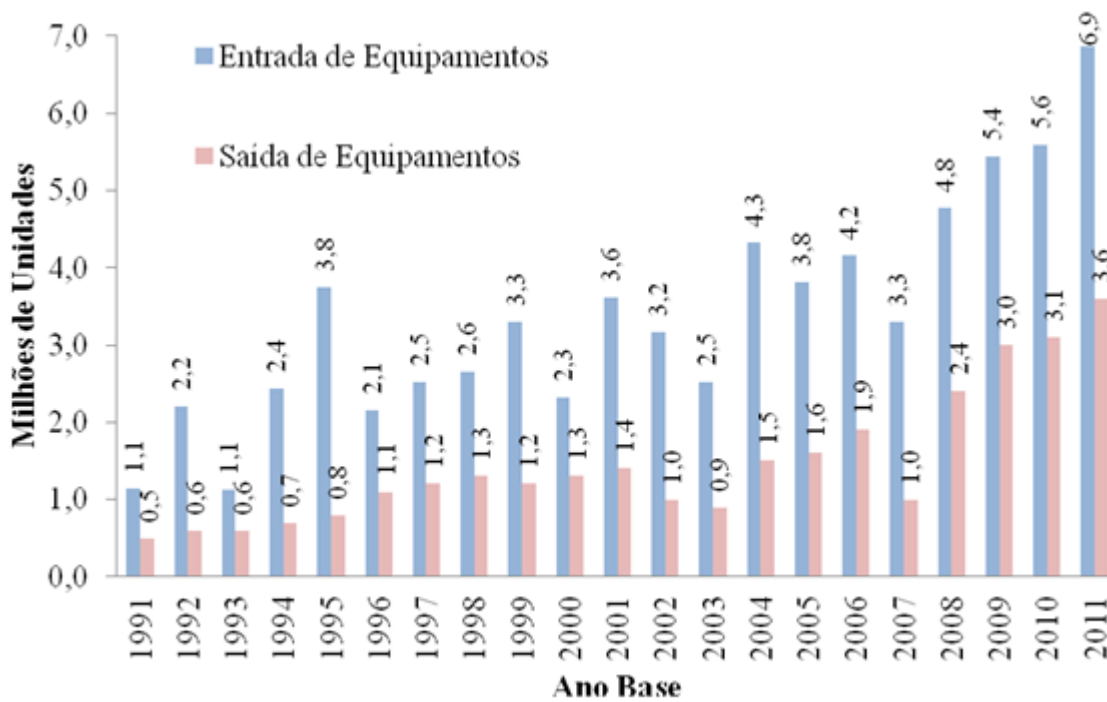


Figura 2. Quantidade de equipamentos que entraram e saíram do mercado, a cada ano, no Brasil.

2.2. 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 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 Fig. 2. É importante notar que estes quantitativos variam a cada ano, sobretudo aqueles relacionados ao primeiro fator (consumidor), uma vez que, conforme já discutido, é influenciado pela situação econômica do país.

Os dados acerca da distribuição de idades dos equipamentos substituídos em razão do primeiro fator abordado foram levantados, porém, os dados acerca da distribuição de idades em razão do segundo fator não está disponível na literatura. Todavia, Júnior (2005), propôs um modelo matemático de estimativa do quantitativo de equipamentos com falhas irreparáveis em função de sua idade e que necessitou a troca de refrigeradores.

A Fig. 3 evidencia 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. Além disso, são apresentados apenas os dados para o ano de 2011, sendo que a distribuição destes dados para os anos anteriores podem ser obtidos de Giuliani (2012).

É interessante notar que nos dois primeiros anos, não há trocas de equipamentos motivadas por melhorias tecnológicas (MMA, 2011). Verifica-se, na Fig. 3, que o período compreendido entre 10 e 14 anos de uso do equipamento é o que mais motiva os consumidores e trocaram seus equipamentos. Conforme abordado anteriormente, a tendência é que haja, nas próximas décadas, a antecipação do descarte dos equipamentos.

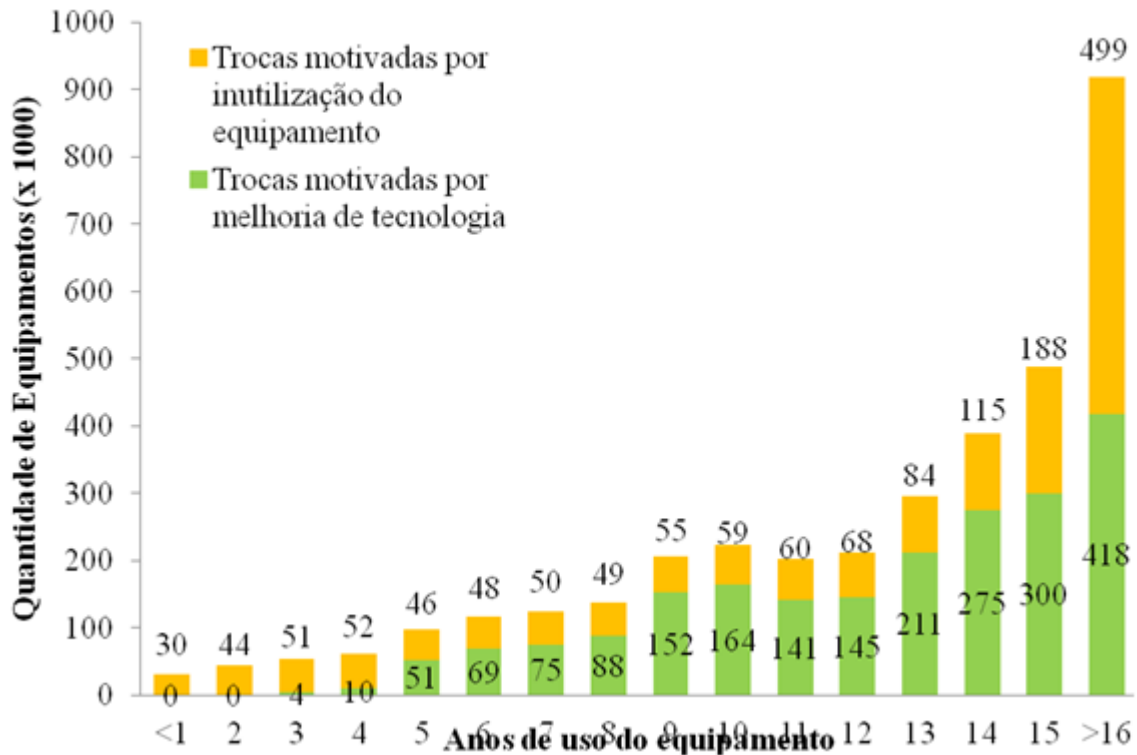


Figura 3. Quantidade de equipamentos retirados do mercado, em 2011, em função de sua idade.

2.3. Características do parque de refrigeradores

O mercado brasileiro é composto por uma grande variedade de modelos, possuindo características bem distintas umas das outras. Há refrigeradores que possuem uma porta, duas e equipamentos de pequena capacidade volumétrica, tais como frigobares. 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 dos equipamentos.

Desde a assinatura do Protocolo de Montreal, a substituição de fluidos refrigerantes que agredem a camada de ozônio foi massiva no Brasil. Atualmente, mais de 97% dos refrigeradores domésticos utilizam como fluido o HFCR134a. 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.

Verificou-se que a potência nominal média dos compressores dos refrigeradores vem diminuindo ao longo do tempo devido aos avanços tecnológicos. 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.

Conforme abordado, não há dados disponíveis na literatura acerca do quantitativo de equipamentos que entram 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. Apesar de haver uma perda na qualidade da informação, ao assumir-se essa hipótese simplificadora, do ponto de vista de estimativa, é conveniente assumir estes valores por não haver outra fonte de dados.

3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE REFRIGERADORES EM CONDIÇÕES DE USO

O consumo de energia elétrica de um compressor pode ser dividido em duas parcelas: aquela associada à potência nominal desenvolvida durante a realização do efeito de refrigeração, em condições definidas; e a referente à perda de eficiência do equipamento, que representa a potência extra necessária para que o efeito de refrigeração continue a ser verificado.

3.1. Seleção dos equipamentos para teste

A potência nominal do compressor tem seu valor determinado pelo fabricante para condições padronizadas de operação. Por sua vez, a determinação da segunda parcela não é tarefa simples, pois diversos fatores influenciam no desgaste do equipamento, tais como o posicionamento do refrigerador no ambiente; a quantidade de aberturas de porta durante

o dia; o posicionamento dos alimentos na geladeira, interferindo no fluxo de ar dentro do gabinete; entre outros, que acabam por influenciar os cinco principais fenômenos que afetam sua vida útil de compressor: superaquecimento; falta ou ineficiência de lubrificação; golpe de líquido; retorno de refrigerante líquido ao compressor; e partidas inundadas. Estes fenômenos causam, entre outros, folgas em válvulas, entupimentos e alteração na viscosidade do óleo, que acarretam um acréscimo de consumo de energia.

Com o intuito de se avaliar a perda de eficiência em função do tempo de uso, foram selecionados 93 refrigeradores, em operação, cujas características se assemelhassem àquelas consideradas como padrão no mercado brasileiro para a realização de testes, em campo, do consumo deste equipamento e, após análise dos dados, correlacionar o aumento de potência verificado em função do tempo.

3.2. Monitoramento do consumo de energia

O monitoramento consistiu em avaliar, durante um período de 24 horas, o comportamento da potência consumida pelo refrigerador a cada segundo. Os dados adquiridos foram organizados em planilhas, de maneira a tornar possível quantificar: o consumo médio do equipamento quando o compressor estava ligado ou desligado; com a porta do gabinete aberta ou fechada; o tempo de efetivo funcionamento durante as 24 horas de testes; o consumo total do equipamento; e o aumento de potência em relação à nominal.

4. CARACTERIZAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

A separação dos dados permitiu determinar o consumo médio do compressor durante o ciclo de refrigeração. Quando comparado ao seu consumo nominal, informado pelo fabricante, foi possível determinar o aumento percentual da potência, em relação à nominal, e associar este aumento ao tempo de uso do equipamento. O valor absoluto do aumento em relação ao valor nominal pode ser questionado, porém, o crescimento desse aumento ao longo do tempo tem significado válido.

É importante notar que há diversos fatores que, quando verificados a longo prazo, contribuem para o desgaste do compressor e o aumento no seu consumo. Dentre eles, destacam-se: a temperatura do ambiente em que se encontra o refrigerador; a quantidade diária de abertura de portas; a disposição dos alimentos no interior do gabinete; e a temperatura interna desejada. Além disso, há algumas condições de operação que afetam o funcionamento do ciclo de refrigeração, como por exemplo, a distância do condensador à parede, que, em casos de muita proximidade, dificulta a troca de calor entre o fluido refrigerante e o ambiente, alterando o funcionamento normal do equipamento.

Assim, ao associarmos a perda de eficiência do equipamento ao tempo, no presente trabalho, estamos somando todos os fatores degradantes, uma vez que os mesmos não foram determinados nesse estudo. Todavia, o objetivo foi o de estimar os impactos advindos da utilização de equipamentos de refrigeração incluindo a parcela de perda de eficiência verificada ao longo do tempo, e não o de determinar a influência de cada condição de operação na degradação do equipamento como um todo.

A análise dos dados permitiu identificar a variação da temperatura ambiente ao longo da obtenção dos dados bem como quantificar o número de aberturas de porta do equipamento. Com relação à temperatura, verificou-se que, embora os equipamentos tenham sido testados em regiões com grandes diferenças de temperatura, os ambientes em que se localizavam os refrigeradores não apresentaram grandes amplitudes de temperatura, mantendo-se mais estabilizadas. Isso indica que, no Brasil, a degradação, advinda da temperatura ambiente, não é significativamente afetada em função da região em que se encontra o equipamento. Com relação ao número de abertura de portas, a correlação destas com o aumento da potência foram inconclusivas, uma vez que existiram equipamentos com um número maior de aberturas apresentando um consumo menor de energia em comparação a outros equipamentos da mesma idade com um número menor de abertura de portas. Isso mostra que os outros fenômenos degradantes afetam estes equipamento de maneira mais significativa que as aberturas de portas, nesse caso.

Assim, considerando-se o somatório de fenômenos degradantes como um todo, foi possível estabelecer, para os equipamentos analisados, uma relação entre o aumento percentual de potência e o tempo de funcionamento dos equipamentos.

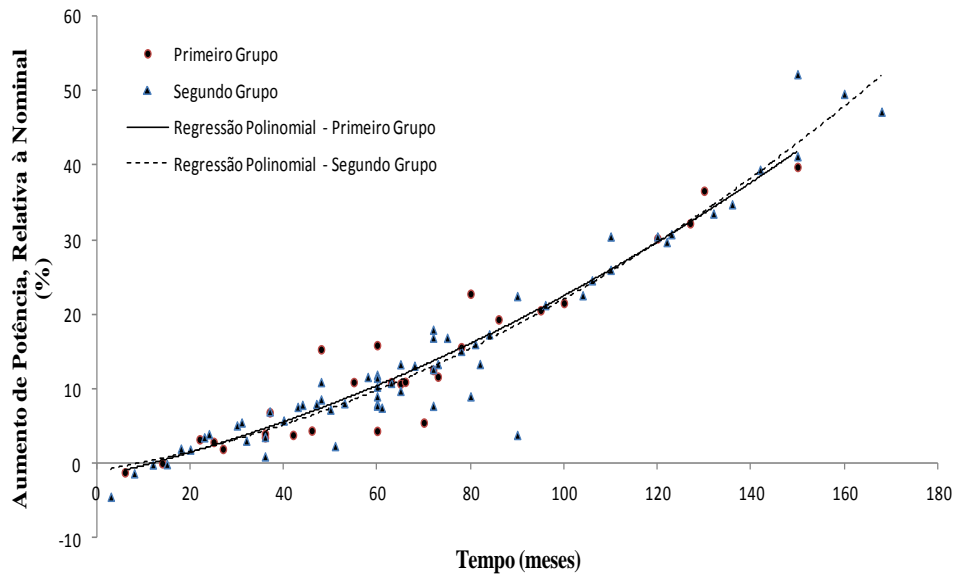


Figura 5. Aumento de potência relativa ao longo dos meses de operação.

4.1. Aumento do tempo de funcionamento

Além do aumento da potência, foi possível caracterizar o tempo efetivo de funcionamento do compressor. Assim como na análise da potência, é importante notar que esse tempo pode variar em função de diversos fatores externos, tais como a temperatura ambiente, a quantidade de abertura de portas, os níveis de degradação da espuma isolante do gabinete e da borracha de vedação da porta. Assim analisou-se apenas o tempo total de funcionamento do equipamento, independentemente da influência de cada fator de degradação individualmente..

A Fig. 6 mostra o tempo de funcionamento do compressor em um período de 24 horas em função de sua idade. É possível perceber que a nuvem de pontos apresenta uma nítida tendência de crescimento, indicando que um equipamento pode ter seu tempo de funcionamento aumentado em até 150% ao longo de sua vida útil.

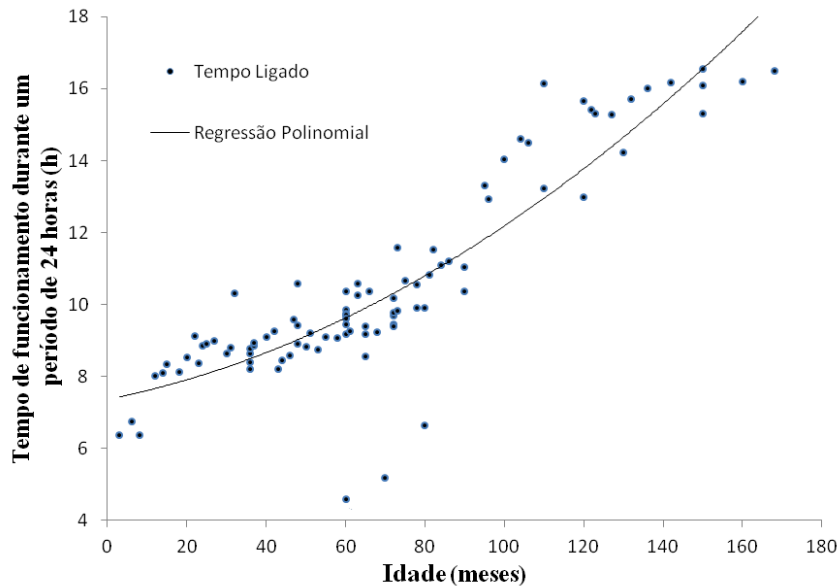


Figura 6. Aumento do período de funcionamento diário em função do tempo de uso do refrigerador.

5. IMPACTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

A energia utilizada por um equipamento de refrigeração pode ser estimada para os compressores analisados neste trabalho.

A seção 2 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. Além disso, a seção abordou a evolução das potências nominais médias verificadas nos equipamentos ao longo dos anos.

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 de um compressor.

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).

Estima-se que vazamentos da ordem de 2% da massa de refrigerante confinada no sistema de refrigeração ocorrem anualmente para equipamentos residenciais de refrigeração (IPCC, 2007). Conforme abordado na seção 2, 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 escapam, 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.

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.

6. REFERÊNCIAS

EPA, Energy Star Overview of 2010 Achievements, Energy Star, Estados Unidos, 2011

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

GIULIANI, R., Estudo da degradação dos compressores utilizados em refrigeração doméstica e o impacto da perda de eficiência no aquecimento global, 2012.

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

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

JÚNIOR, H. X. S., 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.

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.

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.

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

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho”.

STUDY OF DOMESTIC REFRIGERATORS' COMPRESSORS DEGRADATION AND ENVIRONMENTAL AND FINANCIAL IMPACTS DUE TO ITS EFFICIENCY LOSS OVER TIME

Abstract. *The normal operation of domestic refrigerator's compressors induce wear, which are intensified by time and are verified by gaps, metal particles diluted in lubricant oil and, mostly, due power consumption and operation time increases. As result, financial (electric power demand increase) and environmental (emission of equivalent carbon dioxide in atmosphere) impacts are observed. Actually, Brazil has about 65 million domestic refrigerators in operation, and more than 50% of this market has over 9 years of use. This paper shows that the presence of a large amount of old equipment requires an additional electric power production of 30 TWh per year, in the country, at an over 2 billion dol-*

lars additional cost. Furthermore, equivalent CO2 emissions overcome 3 million tons per year. The article presents the Brazilian's refrigerator market main characteristics, including its technological evolution; the distribution in operation time function, of the equipment in this market; domestic refrigerators compressors efficiency loss estimation, over time; and the financial and environmental impacts estimative, due to these equipment uses.

Key words: compressor, degradation, efficiency, refrigerator