

AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM COMPRESSOR OPERANDO COM HIDROCARBONETOS

Walter José Pimenta

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, LaAR – Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração, Campus UnB, Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, Brasil
walter@opengate.com.br

João Manoel Dias Pimenta

pimenta@unb.br

Marcus Vinícius Lima Finotti

mvfinotti@yahoo.com.br

Klaus Itai Haupt

klaus_haupt@yahoo.com.br

Resumo: *O presente artigo descreve uma breve revisão da aplicação de hidrocarbonetos como fluidos refrigerantes, em sistemas de ar condicionado e refrigeração. Enfoque especial é dado à caracterização do impacto ambiental associado ao aquecimento global direto e indireto no uso desses refrigerantes, propondo-se uma correção dos métodos tipicamente empregados, pela introdução da degradação de desempenho ao longo da vida útil de compressores. Uma nova metodologia experimental de ensaio de vida acelerada é proposta para a definição da mudança do desempenho energético dos compressores, ao longo de sua vida operacional.*

Palavras-chave: *refrigeração, refrigerante, hidrocarboneto, vida acelerada, aquecimento global.*

1. INTRODUÇÃO

Os vários problemas causados ao meio ambiente pelos refrigerantes compostos a base de clorofluorcarbonos (CFC), hidroclorofluorcarbonos (HCFC) e os hidrofluorcarbonos (HFC), vêm, desde o Protocolo de Montreal chamando a atenção da comunidade científica mundial, fazendo com que esta se mobilize em busca de soluções que representem um compromisso adequado entre desempenho energético e conservação do meio ambiente.

Com o Protocolo de Montreal (UNEP, 2002) o *phase-out* de substâncias depletoras da camada de ozônio foi iniciado, incluindo os CFC's e HCFC's usados como fluidos refrigerantes em instalações de ar condicionado e refrigeração. Em resposta, alternativas de novos fluidos baseados nos HFC's e seus *blends*, com potencial nulo de depleção da camada de ozônio foram propostos pela indústria, permitindo uma transição para umas novas alternativas de refrigerantes.

Posteriormente, em 1990, o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), propoz a estabilização dos crescentes níveis de dióxido de carbono (CO₂) principal gás de efeito estufa na atmosfera, tendo em vista atenuar os impactos ambientais decorrentes do aquecimento global. Dois anos depois, durante a Rio 92 (*Earth Summit*), discutiu-se a influência de emissões antropogênicas sobre o sistema climático.

Em 1997, durante a Conferência das Nações Unidas em Kyoto, Japão, foi proposto que os países industrializados reduzam suas emissões de gases-estufa (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorcarbonos, perfluorcarbonos e hexafluoreto do enxofre) em pelo menos 5% no período de 2008 e 2012 sendo que cada país possui uma meta diferente tendo como base o ano de 1990.

Como consequência do Protocolo de Kyoto, fluidos refrigerantes baseados nos HFC's começaram a ter seu uso questionado, de tal forma que durante a última década, uma nova geração de fluidos refrigerantes vem sendo desenvolvida.

Estudos mostram que o uso do HFC-134a em substituição ao CFC-12, em refrigeradores domésticos no Reino Unido, incrementará o impacto ambiental indireto devido ao consumo energético dos refrigeradores convertidos, resultando num impacto ambiental substancial do setor mencionado (Ciantar e Hadfield, 2003).

Assim, os esforços têm como objetivo o desenvolvimento do uso de fluidos refrigerantes naturais, por serem compatíveis não apenas com a conservação da camada de ozônio, mas também por não representarem gases de efeito estufa. Atualmente, existe uma forte tendência na aceitação desses refrigerantes naturais como soluções de longo prazo, havendo uma série de aplicações comerciais já implantadas.

A Figura 1 apresenta a variação do COP para os refrigerantes naturais R290, R600a, R717, R744, para temperaturas de evaporação entre -5 e 10 °C, com uma temperatura de condensação fixa em 30 °C. Pode-se observar que o ciclo operando com propano (R290) apresentou o menor desempenho, enquanto o isobutano (R600a) se aproxima da amônia (R717), ficando, contudo abaixo do dióxido de carbono (R744) apresentando o COP mais elevado entre os fluidos naturais considerados.

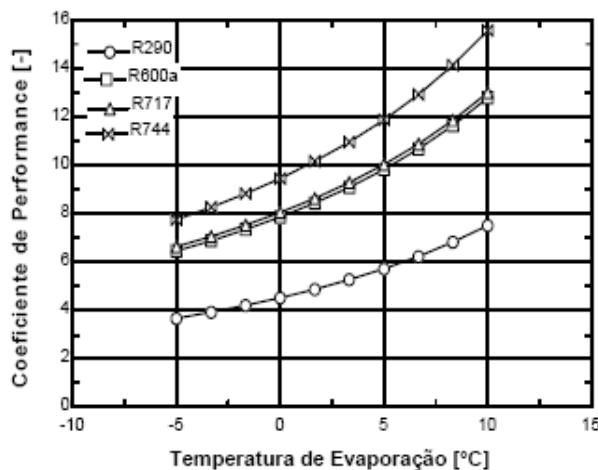


Figura 1: Variação do COP para refrigerantes naturais selecionados (Pimenta e Teixeira, 2004).

Embora os refrigerantes naturais sejam conhecidos e aplicados desde as origens da indústria de refrigeração e ar condicionado, novas aplicações e soluções tecnológicas tem sido recentemente implementadas. Entretanto não se conhece devidamente o impacto desses refrigerantes naturais ao longo da vida útil dos sistemas modernos.

Dessa forma, o presente trabalho propõe uma investigação experimental, tendo em vista a caracterização da degradação do desempenho de compressores de refrigeração, devido ao desgaste ao longo de sua vida útil, como resultado das condições operacionais associadas à interação óleo-refrigerante. Além disso, os resultados desse estudo devem contribuir para uma definição mais precisa do impacto ambiental baseado no índice TEWI (Total Equivalent Warming Impact).

2. HIDROCARBONETOS COMO REFRIGERANTE

A maioria dos sistemas de refrigeração convencionais, são praticamente atendidas por 3 refrigerantes naturais, os quais encontram-se disponíveis de forma abundante: amônia, dióxido de carbono, hidrocarbonetos e suas misturas (Lorentzen, 1995). Dentre estes, os hidrocarbonetos constituem o foco do presente trabalho.

Há, pelo menos quatro décadas, os hidrocarbonetos foram testados pela primeira vez em sistemas de refrigeração convencional de pequeno porte, demonstrando um excelente desempenho termodinâmico e sem apresentar nenhum problema (Lorentzen, 1995).

As características em termos de ciclos termodinâmicos e de transferência de calor, já foram determinadas e citadas para diferentes hidrocarbonetos, mostrando que as possibilidades de seu uso como fluido refrigerante em equipamentos de refrigeração (Granryd, 2001).

Resultados experimentais no desempenho de hidrocarbonetos em refrigeração, como o propano (R290) e GLP foram avaliadas como substitutos ao R22 em aplicações de sistemas de refrigeração e bombas de calor por Purkayastha e Bansal (1998) mostrando que o desempenho dos hidrocarbonetos foi de 18% superior ao R22 para o R290 e de 12% superior ao R22 para o GLP, com temperatura de condensação menores que 35 °C e com temperatura de evaporação de 3 °C.

Outros experimentos relativos ao desempenho do (GLP) como possível substituto do R12 em sistemas de refrigeração doméstica foram apresentados por Akash et al. (2002) mostrando que os valores dos COP's do GLP foram superiores aos do R12, com uma composição do GLP, em massa, de 30% de propano, 55% de normal butano e 15% de isobutano, para cargas de 50, 80, e 100 g.

O COP do isobutano (R600a) em refrigeradores domésticos, situa-se entre 1,2 e 4,5 para armazenamento de frio e entre 0,8 e 3,5 para aplicação de congelamento. Em condições normais de uso doméstico, os COP's para o isobutano são maiores que 3,5 e 2,5 sendo compatíveis com aqueles encontrados para sistemas que utilizam R12 e R22, respectivamente (Lee e Su, 2001).

Com relação às instalações que utilizam hidrocarbonetos, existem diversas aplicações na Europa. Para sistemas de refrigeração doméstica, por exemplo, tem-se um mercado muito bem estabelecido no continente europeu, sem contudo haver registro de acidentes graves. A aceitação pelo público em países como Áustria, Dinamarca, Finlândia, Alemanha, Holanda, Noruega, Suécia, Reino Unido, Itália e Espanha, é grande, com cerca de 80% dos refrigeradores utilizando o isobutano.

Verifica-se também uma aceitação cada vez maior dos refrigerantes hidrocarbonetos em outros países europeus e do sudeste asiático (Granryd, 2001), e no Brasil o isobutano, já se encontra em cerca de 5% dos refrigeradores domésticos produzidos. É importante ressaltar que seu GWP é inferior a 5 e seu ODP é nulo (as definições de GWP e ODP são apresentadas na próxima seção). No entanto, como aspectos negativos, sua inflamabilidade limita seu uso em aplicações com cargas elevadas, bem como não é possível sua consideração como um *drop-in* para sistemas já existentes. A título de comparação, para uma mesma capacidade de refrigeração, utilizamos menos que 40% da carga necessária para o R134a, em isobutano.

Os refrigerantes R11, R12, R22, R134a foram comparados em relação ao isobutano (R600a) conforme Figura 2. Na mesma faixa de operação descrita na seção anterior, esses refrigerantes se comportaram de maneira bastante similar em termos de desempenho energético, com exceção do R11 que apresentou COP ligeiramente superior.

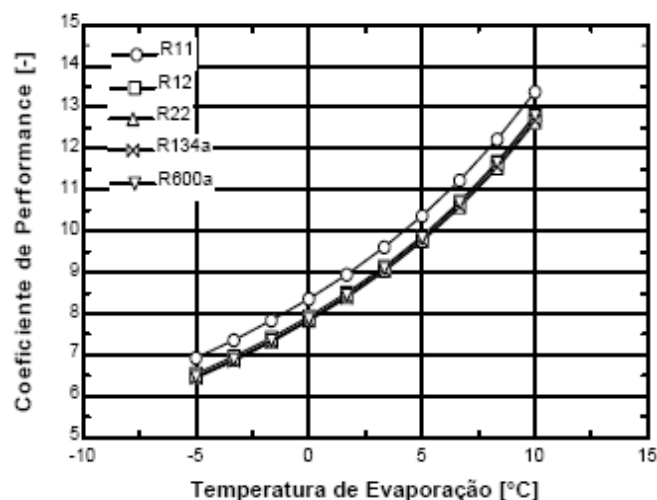


Figura 2: Comparação do COP entre fluidos sintéticos e o R600a (Pimenta e Teixeira-2004).

O coeficiente de performance para o R600a foi ligeiramente mais elevado, como se pode observar na Figura 3. i.e., o R600a mostra-se compatível, do ponto de vista da eficiência energética, ao R134a.

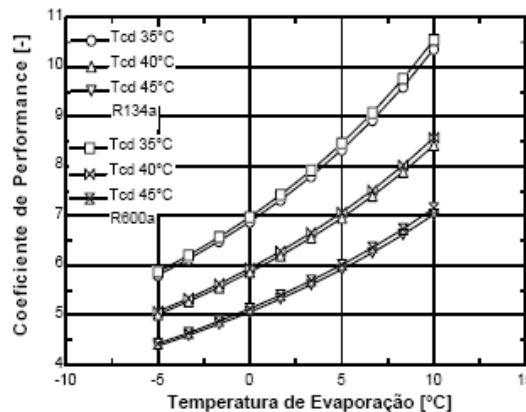


Figura 3: Variação do COP para os refrigerantes R-600a e R-134a, em função das temperaturas de evaporação e condensação (Tcd). (Pimenta e Teixeira, 2004).

Os resultados mostraram ainda que a vazão mássica e temperaturas de descarga do compressor foram significativamente menores para os refrigerantes hidrocarbonetos que com o R22.

Outro aspecto importante é referente à temperatura de descarga do compressor, que foi, em todas as faixas de operação, inferior àquela obtida com o uso do R22.

Para uma mesma temperatura de condensação de 40 °C, e com a temperatura de evaporação variando de -30 °C a 10 °C observa-se uma razão de pressão maior para o butano e isobutano que para o R22, enquanto que o propano apresentou menor valor.

O propano e o R22 possuem um dos maiores valores de efeito de refrigeração volumétrica (capacidade de refrigeração para unidade de volume deslocado pelo compressor).

Observa-se que a mistura propano-isobutano na proporção 50-50% se destaca por estar em um patamar de desempenho entre o R12, R22 e o R134a, podendo desta forma ser um excelente substituto em diversas aplicações.

3. CARACTERIZAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL

A seguir faz-se uma breve descrição dos principais índices de impacto ambiental utilizados para caracterizar o uso de fluidos refrigerantes.

Ozone Depletion Potential (ODP)

Índice que traduz o potencial de uma substância para a depleção da camada de ozônio. O CFC11 é tomado como referência, tendo o maior potencial (ODP = 1).

Embora o ODP de um refrigerante não guarde relação com seu desempenho energético, este é um critério chave na escolha do refrigerante.

Todo refrigerante com ODP não nulo foi ou será completamente banido de uso como requerido pelo Protocolo de Montreal, ou seja, os novos refrigerantes devem apresentar ODP = 0.

O ODP em regime permanente representa o montante relativo de ozônio destruído pela emissão contínua de um gás ao longo da vida atmosférica deste.

Global Warming Potential (GWP)

Mede o impacto de uma substância como gás de efeito estufa, relativo ao efeito de aquecimento global de uma massa similar de dióxido de carbono por um intervalo de tempo específico cujo valor deve ser especificado. O dióxido de carbono é usado como referência por ter o maior impacto líquido sobre o aquecimento global. Refrigerantes halocarbônicos tipicamente possuem maior GWP que o CO₂, mas ocorrem em quantidades muito menores.

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 de um gás de referência – CO₂ (IPCC, 1990).

Total Equivalent Warming Impact (TEWI)

Representa a soma do efeito da descarga direta do refrigerante na atmosfera mais o efeito da emissão de dióxido de carbono devido à energia usada ao longo da vida do equipamento.

A porção de refrigerante é convertida para o montante de CO₂ de efeito equivalente e então adicionada às emissões causadas pela geração (também em CO₂)

O impacto pode exceder a vida do equipamento, logo deve-se escolher uma base de tempo adequada. Um horizonte de tempo integrado ITH (*Integrated Time Horizon*) de 100 anos é com frequência usado.

Como os dois componentes do TEWI dependem do sistema, não é possível obter o TEWI para um refrigerante em particular, pois, vazamentos e eficiência do sistema não são propriedades do refrigerante em si.

Finalmente, é importante ressaltar que a determinação do TEWI, embora considere todo o período de vida do equipamento, não leva em consideração a queda de desempenho do equipamento devido à degradação que este sofre ao longo do tempo. Assim, os resultados normalmente obtidos com uma análise convencional do TEWI, são na verdade otimistas já que em condições reais, o equipamento de refrigeração sofre uma perda de desempenho que necessariamente implica num maior impacto no aquecimento global.

4. DEGRADAÇÃO DE DESEMPENHO vs. AQUECIMENTO GLOBAL

Garland e Hadfield (2004) compararam o HC600a com o HFC134a, estabelecendo mecanismos de desgaste e coeficientes de atrito entre componentes, simulando as condições de operação de um compressor hermético (Figs. 4 e 5) e concluíram que, com o passar dos anos, este compressor opera uma quantidade cada vez maior de minutos, para cada hora (Figura 6).

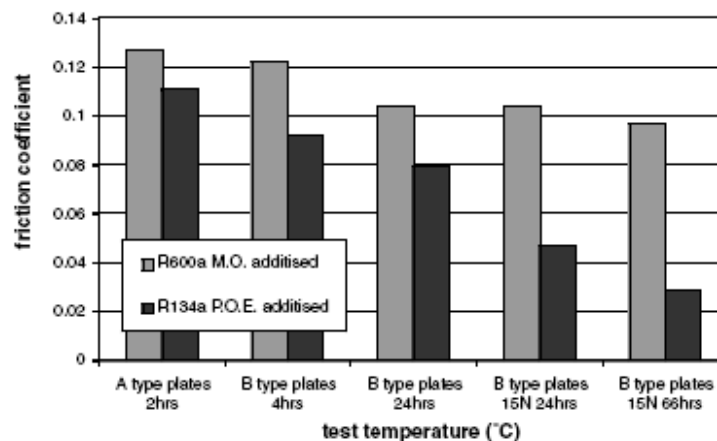


Figura 4: Coeficiente de atrito para operação com R600a e R134a com diferentes combinações de óleo lubrificante e tempo de funcionamento (Garland e Hadfield, 2004).

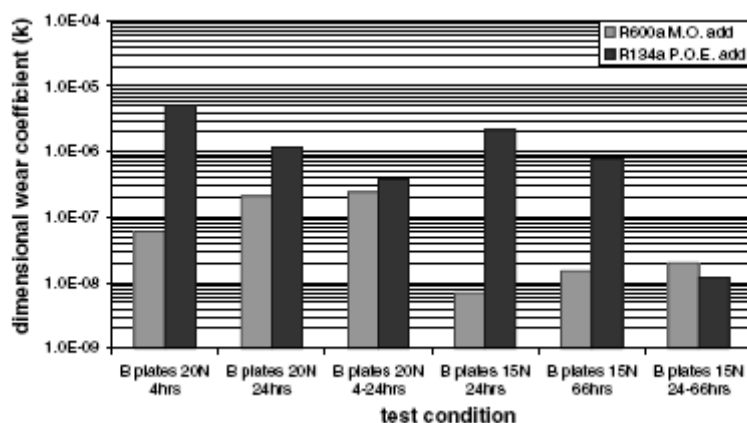


Figura 5: Coeficiente de desgaste linear para operação com R-600a e R-134a com diferentes combinações de óleo lubrificante e tempo de funcionamento (Garland e Hadfield, 2004).

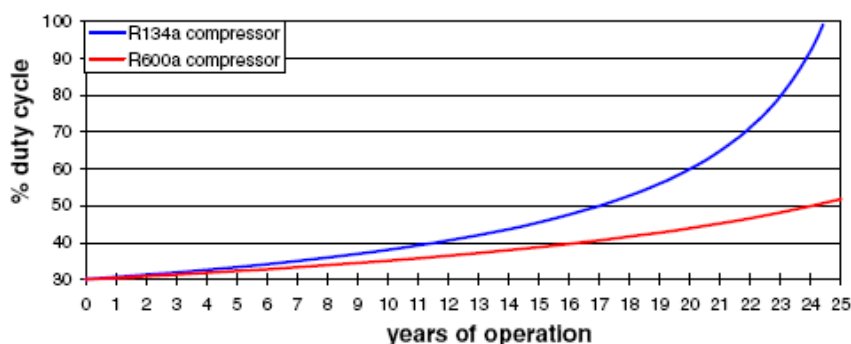


Figura 6: Correspondência de horas de operação efetiva ao longo da vida útil para operação com R-600a e R-134a (Garland e Hadfield, 2004).

Assim, o cálculo da energia total consumida em um período de 15 (quinze) anos, para um compressor que utiliza R600a lubrificado com óleo mineral aditivado é de 4.244 kWh e para o R134a, com lubrificante sintético é de 4.541 kWh.

A Tabela 1 mostra uma análise do ciclo de vida realizado para verificar as consequências ambientais para o R134a e o R600a. Tal análise considerou a fabricação, o uso e o descarte de compressor para um ciclo de vida de 15 anos e avaliou o impacto sobre alguns dos principais indicadores ambientais que são: GWP, CO₂, o SO₂, o NO_x e o PM10.

Podemos concluir (Tabela 1) que o impacto da fabricação e a reciclagem do compressor durante o seu ciclo de vida é bem menos significativa que a fase de uso para os refrigerantes mencionados. No entanto, observa-se também que o impacto ambiental causado pelo R600a é inferior àquele causado pelo R134a para todos os índices analisados.

Tabela 1: Emissões LCA para compressores (a-manufaturados, b-reciclados) operando com R600a e R134a (Garland e Hadfield, 2004).

Indicador	R134a			R600a		
	Ma and Rb	Uso	Total	M e R	Uso	Total
GWP (t/CO ₂ eq)	0,28	6,3	6,5	0,06	5,6	5,7
SO ₂ (kg eq)	0,43	24,6	25	0,48	20,8	21,3
NO _x (kg eq)	0,09	17,7	17,8	0,11	15,6	15,7
PM10 (kg eq)	0,38	9,5	9,9	0,49	8,2	8,7

A Tabela 2 nos permite avaliar economicamente o impacto ambiental causado pela quantidade de poluente emitido durante o mesmo ciclo de vida (fabricação/uso/descarte-15 anos), associando àquela quantidade a valores em euros.

Assim, a quantidade de poluente da Tabela 1, equivale aos valores encontrados na Tabela 2 a qual indica que para o R134a, temos um valor de € 81,00 acima que observado para o R600a.

Tabela 2: Avaliação econômica (emissões LCA) para compressor após 15 anos de uso (Garland e Hadfield, 2004).

Indicador	Impacto econômico	Compressor	
		R134a	R600a
GWP	32,6 €/ton	213	186
SO ₂	7,4 €/kg	185	158
NO _x	2,3 €/kg	41	36
PM10	17 €/kg	169	148
Total	----	608	527

5. METODOLOGIA PROPOSTA

5.1 Aparato experimental

O aparato experimental (Figura 7) terá como componentes básicos um compressor hermético, um dispositivo de expansão e dois trocadores de calor bitubulares, além de uma completa instrumentação. Tal aparato permite a realização de ensaios segundo um ciclo termodinâmico ocorrendo apenas na região de vapor superaquecido, viabilizando dessa forma uma menor inércia térmica e, por sua vez, permitindo a realização de ensaios de vida acelerada.

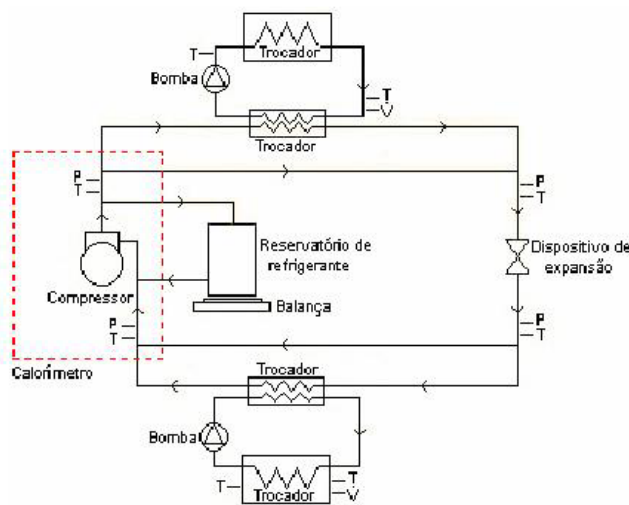


Figura 7: Layout da bancada de testes

Compressor: Os compressores a serem testados, utilizando a metodologia proposta, serão herméticos de pequeno e médio porte, utilizados principalmente em aplicações comerciais como em geladeiras, bebedouros e ar condicionado de janela.

Durante os ensaios o compressor estará operando no interior de uma câmara calorimétrica que permitirá mantê-lo sob temperatura ambiente controlada, determinar a perda de calor a partir da carcaça do compressor para o ambiente, bem como realizar um balanço de energia para a determinação indireta da vazão de refrigerante.

Trocadores de calor: Os trocadores de calor são do tipo bitubular, (ACP Termotécnica) e foram escolhidos para atuarem como desuperaquecedor do refrigerante ficando posicionados a

montante e a jusante do dispositivo de expansão de modo a proporcionar formas distintas de operação para a bancada de testes.

Dispositivo de expansão: O dispositivo de expansão foi selecionado sabendo-se o valor da maior diferença de pressão que o ciclo impõe na utilização do compressor de potência mais elevada, existente no mercado, capaz de atuar nessa faixa de pressão e regular o fluxo mássico de refrigerante.

Calorímetro: Para a análise da perda de calor do compressor para o ambiente um calorímetro com paredes de 10cm de espessura composta por isopor foi construído ao redor do mesmo. No interior do calorímetro a temperatura é mantida constante com o auxílio de um par de trocadores aletados e uma bomba centrífuga.

Carga de gás do sistema: A quantidade de gás refrigerante existente no sistema pode variar. Um controle utilizando válvulas que estarão ligadas através de mangueiras a um reservatório de refrigerante executará essa função. Porém, esse sistema é a única parte da bancada de testes que se encontra inabilitada até o momento do presente trabalho.

Instrumentação: Para o monitoramento do funcionamento da bancada de teste e observação se o compressor esta atuando dentro do esperado, uma série de instrumentos de medição estão posicionados em pontos estratégicos da bancada.

A maneira que foi definida o posicionamento de cada instrumento de medição foi de acordo com a norma ISO 917. As tomadas de pressão e temperatura devem estar posicionadas no mesmo ponto do ciclo de refrigeração. Estes devem ser posicionados num trecho de linha reta da tubulação, a uma distancia de oito vezes o diâmetro do tubo, depois do ponto de entrada e saída de cada componente do ciclo.

A vazão de água que circula entre o trocador bitubular e o trocador aletado foi utilizado um medidor de vazão ultra-sônico que possui um sinal de 4 a 20 mA com precisão de 2% na medida segundo o fabricante. Para a vazão de água que faz o controle de temperatura no interior do calorímetro um rotâmetro medido de vazão instantânea, com precisão de $\pm 2\%$ de fundo de escala. Já a vazão de refrigerante será medida de forma indireta por meio de balanços de energia para o calorímetro.

Para a medição do consumo de potência elétrica do compressor, um transdutor de potência elétrica será conectado no circuito de acionamento dos compressores, juntamente com transformadores de tensão e corrente, permitindo medir a potência elétrica consumida pelo compressor com uma precisão da ordem de 0,25% e com sinal de saída de 0 a 20 mA.

Os sinais analógicos gerados pela instrumentação descrita serão adquiridos via micro-computador através de módulos de aquisição de dados conectado entre si segundo protocolo RS485, transferindo em tempo real ao computador, via porta serial RS232, todos os dados experimentais relevantes.

3.2 Metodologia de Testes

O objetivo destes testes é de se mensurar o grau de degradação de um compressor submetido a um ciclo de vida acelerado operando com hidrocarboneto como fluido de refrigeração, bem como avaliar seu desempenho e o impacto ambiental causado ao final de sua vida útil.

Para isso, os compressores, antes de serem submetidos aos testes na bancada já descrita, terão todos os seus componentes caracterizados.

A idéia inicial é que os testes ocorram na região superaquecida do refrigerante, visando submeter o compressor a um regime de ciclo de vida acelerado, sem a inércia térmica existente com a mudança de fase do refrigerante, durante a mudança de regime.

Após os testes, os compressores terão novamente todos os seus componentes caracterizados, e estes parâmetros serão comparados com os inicialmente obtidos, de modo a termos condições de: avaliar o grau de degradação de cada componente, o estado da mistura óleo e refrigerante, o desempenho, o custo energético e ambiental do sistema.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho relata proposta de pesquisa em fase inicial de desenvolvimento junto ao Programa de Pós-graduação em Ciências Mecânicas da Universidade de Brasília, tendo em vista a caracterização da degradação de desempenho, ao longo da vida útil, de compressores operando com hidrocarbonetos e seu respectivo impacto ambiental.

Tal tema, como apresentado neste artigo, tem sido objeto de recentes pesquisas e propicia a oportunidade para a geração de conhecimento no que se refere ao campo dos refrigerantes naturais.

Como elemento original da presente proposta, considera-se a realização de ensaios de vida acelerada de compressores reais, ao contrário do praticado por outros autores que limitaram o estudo a análise de componentes mecânicos isolados.

Os resultados a serem obtidos relacionados à degradação de desempenho virão a permitir uma avaliação mais precisa e realista do impacto para o aquecimento global indireto, bem como permitirão a simulação de compressores de refrigeração levando em conta a perda de desempenho ao longo de sua vida operacional.

7. REFERÊNCIAS

- Revista do Frio, “Hidrocarbonetos saíram na frente”, Mary Promoções e Empreendimentos Ltda Edição 08/2006, http://www.revistadofrio.com.br/revista_materia_ler.php?codigo=334 acesso em 26/10/2006.
- Pimenta, J.M.D. e Teixeira, P.S., 2004, “Estudo da Aplicação de Hidrocarbonetos como Fluidos Refrigerantes”.
- Garland, N.P. and Hadfield, M., 2004, “Environmental Implications of Hydrocarbon Refrigerants Applied to the Hermetic Compressor.
- Ciantar, C. and Hadfield, M., 2003, “A Study of Tribological Durability With Associated Environmental Impacts of a Domestic Refrigerator”.
- Lee, Y.S. and Su, C.C., 2001, “Experimental studies of Isobutane (R600a) as the Refrigerant in Domestic Refrigeration System”.

PERFORMANCE DEGRADATION OF REFRIGERATION COMPRESSORS WORKING WITH HIDROCARBONS

Walter José Pimenta

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, LaAR – Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração, Campus UnB, Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, Brasil
walter@opengate.com.br

João Manoel Dias Pimenta

pimenta@unb.br

Marcus Vinícius Lima Finotti

mvfinotti@yahoo.com.br

Klaus Itai Haupt

klaus_haupt@yahoo.com.br

Abstract: *The paper presents a preliminary literature revision of the hydrocarbons application as refrigerants in air conditioning and refrigeration systems. Special attention is given to the characterization of the environmental impact associated to the direct and indirect global warming using these applications. A correction of the methods typically used is proposed by introducing the concept of performance degradation during the useful life of refrigeration compressors. A new experimental methodology based in accelerated life tests, is proposed for charactering the change in energy performance of compressors, through its operational life.*

Keywords: *Refrigeration, Refrigerant, Hydrocarbon, Accelerated life, Global Warming.*