

Avaliação experimental do processo de substituição do R22 por propano, propileno e HFC438A em um sistema de refrigeração comercial

Arthur Heleno Pontes Antunes
Alessandro da Silva
Enio Pedone Bandarra Filho

Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil

Introdução

O refrigerante HCFC22, ou apenas R22, é atualmente o refrigerante mais utilizado nos sistemas de refrigeração dos países em desenvolvimento como o Brasil, China, Índia, entre outros. Desde os protocolos de Montreal (1987) e Kyoto (1997) muitos esforços foram feitos para avaliar candidatos para substituir o R22 em suas diversas aplicações. Muitos motivos foram relatados como barreiras para a busca de um novo substituto, já que o novo candidato deve ser ambientalmente amigável, compatível com óleo mineral e suas propriedades refrigerantes devem ser próximas às características do R22, evitando assim, maiores mudanças nas instalações.

Devido ao último acordo sobre a eliminação do R22, seu preço vem aumentando gradativamente e as indústrias químicas estão oferecendo uma ampla lista de possíveis substitutos, porém muitas dessas opções possuem maiores valores de GWP e rendimentos inferiores ao R22. Pesquisas recentes mostram que os HCFCs e HFCs estão gradualmente sendo substituídos por misturas de HFCs ou por refrigerantes naturais (Mohanraj *et al.*, 2009). Em geral, fluidos naturais como água (R718), amônia (R717) e CO₂ (R744) apresentam valor de ODP zero e reduzido valor de GWP. Além disso, essas substâncias naturais são encontradas em abundância na natureza, entretanto hidrocarbonetos tendem a ser menos disponíveis.

A economia de energia elétrica está diretamente relacionada ao desempenho do sistema de refrigeração. A utilização racional da energia elétrica aliada às técnicas de controle condiciona sistemas de refrigeração automatizados a trabalharem de forma contínua por várias horas de forma inteligente. A utilização de uma válvula de expansão eletrônica (VEE) promove rendimentos superiores aos sistemas (Schmidt, 1999). Bandarra Filho *et al.* (2012) realizou testes experimentais em um sistema de refrigeração de 9 kW, operando em temperaturas de condicionamento de ar. Neste estudo, o sistema automatizado (operando com uma válvula de expansão eletrônica e um inversor de frequência) em comparação ao sistema

operando à frequência nominal e com válvula de expansão termostática, apresentou maiores eficiências. Os resultados experimentais mostraram um COP superior quando o sistema opera com R1270 (propileno).

Durante os últimos anos, alguns estudos comparando o desempenho de refrigerantes sintéticos e naturais foram publicados. Domanski e Yashar (2006) apresentaram um estudo analítico abrangendo os refrigerantes R600a, R290, R134a, R22, R410A e R32 aplicados a um sistema de refrigeração em condições de condicionamento de ar para conforto térmico. A comparação utilizou o sistema com R22 como base e ocorreu sem substituição de qualquer componente do sistema original. Os autores otimizaram os modelos dos trocadores de calor e o sistema operou com os refrigerantes R290 e R32 apresentando os maiores COPs.

O objetivo deste estudo experimental é comparar o desempenho dos refrigerantes R22, R290, R1270 e R438A em uma faixa de temperatura de evaporação comercial de -15°C até -5°C , utilizando uma válvula de expansão eletrônica e um controlador de velocidade variável (CVV) vinculado ao compressor. Testes preliminares com o R22 foram conduzidos com o objetivo de criação de uma base de dados comparativos e, em seguida, apenas o fluido frigorífico foi substituído no sistema. O impacto ambiental foi avaliado com base no TEWI (*Total Equivalent Warming Impact*).

Bancada Experimental

A bancada experimental é composta por um compressor semi-hermético alternativo, dois trocadores de calor de tubos concêntricos (refrigerante/água), uma válvula de expansão eletrônica (VEE) e toda instrumentação apropriada. Os sinais analógicos de temperatura, pressão e vazão foram convertidos em digitais através de um controlador lógico programável (CLP).

Os dados foram monitorados e gerenciados através de uma interface criada com o programa LABVIEW. O fluido secundário, água, circula pelo condensador e por uma torre de resfriamento. Por outro lado, o calor transferido ao refrigerante em seu processo de evaporação é gerado propositalmente em um reservatório de armazenamento térmico que simula a carga térmica por meio de uma resistência elétrica, a qual possui a função de manter estável a temperatura desejada na entrada do evaporador.

A Figura 1 ilustra de forma esquemática a bancada experimental desse estudo. A bancada experimental operou originalmente com o R22 em aplicações normais de refrigeração comercial. O efeito incremental de abertura do dispositivo de expansão, a velocidade de operação do compressor, a operação da torre de resfriamento e a carga de refrigerante são parâmetros controláveis na operação do sistema. A carga de R22 utilizada para todos os testes foi 3,2 kg.

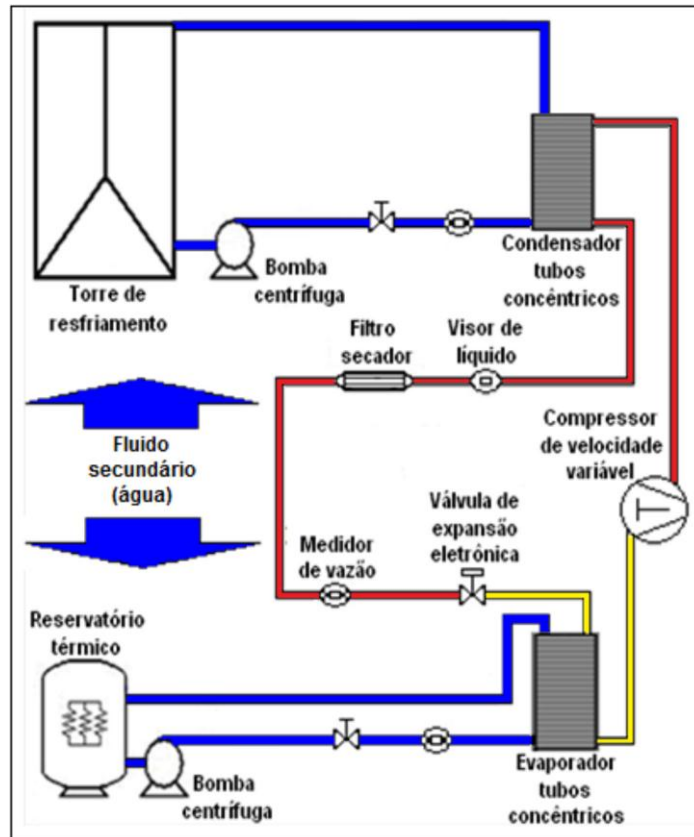


Figura 1. Vista esquemática da bancada experimental.

Muitos testes foram realizados em condição de regime permanente e a comparação foi feita em termos de capacidade de refrigeração, consumo de potência, vazão mássica e COP. Os quatro fluidos refrigerantes permaneceram em três temperaturas de evaporação diferentes, a -15°C , a -10°C e a -5°C . Estas temperaturas foram alcançadas através do controle da pressão à saída do evaporador, modulando a abertura da válvula de expansão eletrônica.

Os três refrigerantes adotados podem substituir o R22 neste sistema, por meio de um processo de *drop-in*, sem alteração de qualquer componente ou óleo lubrificante.

A primeira operação de *drop-in* foi realizada com o hidrocarboneto R290. Apenas 47% da carga adotada para o R22 foi utilizada, 1,5 quilogramas. O segundo *drop-in* do sistema, R1270, utilizou a mesma quantidade do R290. Limitar a quantidade de carga de refrigerante dentro de um circuito refrigerante é uma abordagem para atingir certo nível de segurança. As normas EN 378, IEC 60335- 2-40 e DIS ISO 5149 de 2014 procuram incorporar essa metodologia. No presente trabalho, a norma EN 378-1 (2008) foi utilizada como referência para o cálculo da carga máxima de refrigerante.

O último sistema operante, R438A, trabalhou com 94% da carga do sistema original, ou seja, 3,0 quilogramas. É importante mencionar que o HFC438A, uma mistura de R32, R125, R134a, R600 e R601a, tem um componente hidrocarboneto em sua fórmula, logo, é solúvel em óleo mineral. De acordo com IPCC (2007), o GWP para este refrigerante é 2264.

A carga ótima de cada refrigerante foi definida previamente de maneira arbitrária e estas representam condições onde os trocadores de calor estejam corretamente alimentados. Todos os ensaios foram realizados com óleo lubrificante mineral, em uma quantidade de, aproximadamente, 2 litros, respeitando o nível indicado no próprio compressor alternativo.

Durante os testes, os parâmetros responsáveis pela simulação da carga térmica foram mantidos constantes para todos os refrigerantes, ou seja, a temperatura e a vazão mássica da água na entrada do evaporador foram 20°C e 0,35 kg/s.

Resultados e Discussão

O correto funcionamento de qualquer sistema de refrigeração operando de acordo com o ciclo de compressão de vapor exige que alguns parâmetros termodinâmicos sejam monitorados e controlados; entre estes parâmetros estão as temperaturas de evaporação e condensação, o grau de superaquecimento (medido imediatamente após a saída do evaporador) e o grau de subresfriamento.

A potência consumida pelo compressor foi considerada como um parâmetro limite de operação para os quatro refrigerantes testados. O valor deste parâmetro deveria não exceder 3,8 kW, preservando assim, a vida útil do inversor de frequência utilizado no compressor.

Primeiro Estágio de Resultados

O termo *drop-in*, amplamente utilizado no setor de refrigeração, refere-se ao processo de substituição do fluido refrigerante original por outro fluido de diferente composição química.

O objetivo desta primeira análise é detalhar os três processos de *drop-in* aplicados ao sistema original. Esta análise prévia inicia-se com uma condição inicial padrão de funcionamento do sistema com R22, representada na primeira linha da Tabela 1. Nota-se que esta condição refere-se ao funcionamento do compressor à frequência fixa de 60 Hz e a uma abertura fixa de 90% da VEE.

Tabela 1. Resultados experimentais dos processos tipo *drop-in*, à frequência fixa de 60 Hz e a uma abertura fixa de 90% da VEE.

Sistema	T _{EV} [°C]	T _{CD} [°C]	T _{DC} [°C]	T _{SA} [°C]	T _{SR} [°C]	\dot{m} [kg/s]	\dot{W}_{CVV} [kW]	\dot{Q}_{REF} [kW]	COP [-]
R22	-3,1	39,1	66,9	8,5	6,2	0,0665	3,45	11,27±0,26	3,27±0,07
R290	1,1	36,9	54,3	2,8	3,9	0,0407	2,92	11,93±0,44	4,09±0,15
R1270	5,6	35,9	49,0	0,9	5,4	0,0402	2,72	12,30±0,46	4,52±0,17
R438A	-3,1	37,5	74,0	2,1	7,9	0,0654	3,20	9,11±0,19	2,85±0,26

A partir desta condição inicial padrão, parte-se para o emprego dos demais fluidos refrigerantes. A Tabela 1 ilustra os resultados obtidos para os três refrigerantes alternativos ao R22. Todos os testes foram realizados a 60 Hz de frequência no compressor e a uma abertura fixa de 90% no mecanismo de expansão. Nota-se que os valores da capacidade de refrigeração são mais elevados para os hidrocarbonetos.

A operação de drop-in realizada com o R438A foi aquela em que o refrigerante alternativo retornou as mesmas temperaturas de saturação nos trocadores de calor. Apesar das temperaturas de condensação semelhantes nos cinco sistemas, nenhuma outra comparação concreta pôde ser realizada, uma vez que os valores da temperatura de evaporação foram bem distintos de $-3,1^{\circ}\text{C}$. Sendo assim, o R438A é o substituto imediato para a aplicação original, ou seja, este pode ser considerado o "near drop-in" ao R22.

Segundo Estágio de Resultados

Uma segunda análise de resultados, a qual retrata uma operação do tipo *drop-in/retrofit* tornou-se necessária para estabelecerem-se as bases comparativas e os limites e potencialidades de cada refrigerante alternativo ao HCFC.

Neste sentido, os quatro fluidos refrigerantes operaram sob diferentes condições de evaporação. Nota-se na Tabela 2 que os valores de capacidade de refrigeração a -15°C estabilizaram-se a 6,2 kW para todos os refrigerantes; quando o sistema operou a -10°C esta capacidade aumentou para 7,5 kW. Finalmente, a capacidade de refrigeração alcançou 9,0 kW para uma temperatura de evaporação de -5°C .

Tabela 2. Resultados experimentais dos processos tipo *drop-in/retrofit*.

Sistema	F_{CVV} [Hz]	T_{EV} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{CD} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{DC} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{SA} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{SR} [$^{\circ}\text{C}$]	\dot{m} [kg/s]	\dot{W}_{CVV} [kW]	\dot{Q}_{REF} [kW]	COP [-]
R22	55	-15,0	32,7	95,1	30,8	6,5	0,0328	2,35	6,17±0,28	2,62±0,12
R290	55		34,7	82,6	34,1	9,7	0,0174	2,10	6,08±0,53	2,89±0,25
R1270	45		32,1	96,0	31,1	6,5	0,0179	1,96	6,20±0,52	3,16±0,26
R438A	65		31,8	89,8	35,3	8,8	0,0365	2,48	6,23±0,26	2,51±0,10
R22	55	-10,0	34,0	88,8	24,8	7,3	0,0405	2,57	7,53±0,28	2,92±0,10
R290	55		37,8	76,8	27,8	10,9	0,0220	2,33	7,48±0,52	3,21±0,22
R1270	45		33,9	92,0	25,1	7,9	0,0219	2,12	7,48±0,51	3,52±0,24
R438A	65		34,7	80,8	23,4	9,9	0,0465	2,84	7,49±0,24	2,63±0,08
R22	55	-5,0	36,7	75,6	13,5	7,7	0,0510	2,90	9,04±0,27	3,11±0,09
R290	55		39,5	73,0	20,7	11,5	0,0270	2,50	8,95±0,50	3,58±0,20
R1270	45		35,9	81,0	17,9	9,4	0,0269	2,32	8,99±0,50	3,87±0,21
R438A	65		37,2	76,4	13,0	10,6	0,0587	3,25	8,95±0,23	2,753±0,070

Os valores estimados para a temperatura de condensação apresentam grande similaridade para os sistemas contendo R22, R1270 e R438A; note que as condições de temperatura de evaporação e capacidade de refrigeração são fixas. A temperatura de condensação ao utilizar-se o R290 apresenta valores superiores

aos demais fluidos, porém esta diferença não é maior que 5°C. De forma geral, o controle realizado nos trocadores de calor por meio do par VEE/CVV possibilitou a realização de uma comparação termodinâmica acerca dos quatro refrigerantes operando praticamente entre os mesmos reservatórios térmicos.

Os experimentos com R438A foram realizados a 65Hz (1900 RPM). Esta condição resulta na máxima capacidade de refrigeração para este fluido operando no sistema. Os refrigerantes R22 e R290 operaram a 55 Hz, sendo esta condição suficiente para atingirem-se os mesmos limites de capacidade do R438A. Por fim, o propileno trabalhou com 45Hz e satisfaz as condições comparativas desta metodologia. A propagação de incertezas devido à precisão dos sensores foi estimada e acompanha os resultados referentes à capacidade de refrigeração e ao COP.

O comportamento do COP estimado e da potência consumida (medida) pelo compressor evidenciam que os sistemas contendo HCs possuem uma excelente aplicabilidade na faixa de temperaturas de evaporação analisadas, excedendo assim os valores do COP alcançados no sistema original. Referente à pior condição de potência consumida, uma tendência observada indica que o sistema contendo R438A opera de forma mais eficiente em menores temperaturas de evaporação, ou seja, os valores de COP do sistema com a mistura de HFCs afastam-se dos valores de COP referente ao sistema com R22, conforme se incrementa a capacidade e a temperatura de evaporação.

É importante observar que os valores de superaquecimento e subresfriamento são distintos para todos os sistemas. Os experimentos não seguiram uma norma técnica específica de testes de refrigerantes e/ou componentes. A metodologia adotada nesta pesquisa baseia-se na obtenção das mesmas condições de evaporação e condensação para, a partir daí, comparar o sistema operando com diferentes fluidos refrigerantes.

Claramente, níveis superiores de superaquecimento são consequências das condições de evaporação mais baixas, condições estas em que a modulação da VEE encontrava-se com a abertura do orifício reduzida. Observando-se, ainda, a Tabela 2, a vazão mássica na condição de -15,0°C de evaporação apresenta-se reduzida se comparada à condição de saturação de -5,0°C.

O comportamento da vazão mássica para o sistema com R22 é similar ao comportamento no sistema com R438A. Os sistemas com R1270 e R290 também apresentaram um aumento nos valores da vazão mássica com o incremento de 5°C na temperatura de evaporação.

A temperatura do fluido na saída do compressor mostrou-se mais elevada para o sistema contendo R290 em todas as faixas de evaporação.

Especificamente para a condição de capacidade de refrigeração de 6,2 kW à uma temperatura de evaporação de -15°C, pode-se destacar as mais elevadas temperaturas de descarga, independente do tipo de refrigerante. Isso se deve ao aumento da razão de pressão conforme se reduz a temperatura de evaporação. Apesar do consumo de potência elétrica pelo compressor ser reduzido, o COP do sistema é mínimo se comparado às demais condições de evaporação.

Análise do TEWI

O impacto causado ao ambiente foi calculado com base no TEWI. Este método considera os impactos diretos e indiretos associados ao uso de fluidos refrigerantes em aplicações no setor de HVACR. A equação abaixo representa a metodologia utilizada neste cálculo.

$$\text{TEWI} = \text{CO}_2\text{equ}_{\text{DIRETO}} + \text{CO}_2\text{equ}_{\text{INDIRETO}}$$

A parcela associada com o efeito direto pode ser calculada por:

$$\text{CO}_2\text{equ}_{\text{DIRETO}} = M_{\text{REF}}L_{\text{RATE}}L_{\text{TIME}}\text{GWP} + M_{\text{REF}}(1 - \alpha)\text{GWP}$$

Onde:

M_{REF} = Massa de refrigerante no sistema, [kg];

L_{RATE} = Taxa anual de refrigerante emitido (substituição e vazamento), [%];

L_{TIME} = Tempo de vida útil do equipamento, [anos];

GWP = Índice específico do refrigerante, [-];

α = Recuperação/reciclagem ao final da vida útil do equipamento, [%].

Para realização dos cálculos, adotou-se uma vida útil de 10 anos para todos os distintos fluidos refrigerantes. De acordo com o método de cálculo do TEWI (*Methods of Calculating Total Equivalent Warming Impact*, 2012), os vazamentos anuais (operações normais, perdas catastróficas e serviços de manutenção) adotados foi de 12,5% para um sistema centralizado. Utilizou-se a porcentagem 70% para as taxas de recuperação dos fluidos refrigerantes (α). Este valor representa um sistema com carga de refrigerante menor do que 100kg.

De acordo com o IPCC (2007), Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Fourth assessment report*), 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 especificado. A parcela do impacto indireto no aquecimento global pode ser calculada pela equação abaixo.

$$\text{CO}_2\text{equ}_{\text{INDIRETO}} = \beta E_{\text{ANNUAL}}L_{\text{TIME}}$$

Onde:

E_{ANNUAL} = Energia elétrica consumida pelo equipamento, [kWh/ano];

β = Emissão de CO_2 para geração de eletricidade, [kg CO_2 /kWh].

A potência elétrica do equipamento foi medida e apresentada na Tabela 2. O total de horas em operação foi admitido como sendo a mesma para todos os sistemas. A emissão de CO₂ por kWh de energia elétrica gerada é um valor extraído do documento (*CO₂ Emissions from fuel combustion, International Energy Agency, 2011*). Na Figura 2 é apresentada a análise do impacto de aquecimento global equivalente para cada configuração da bancada experimental.

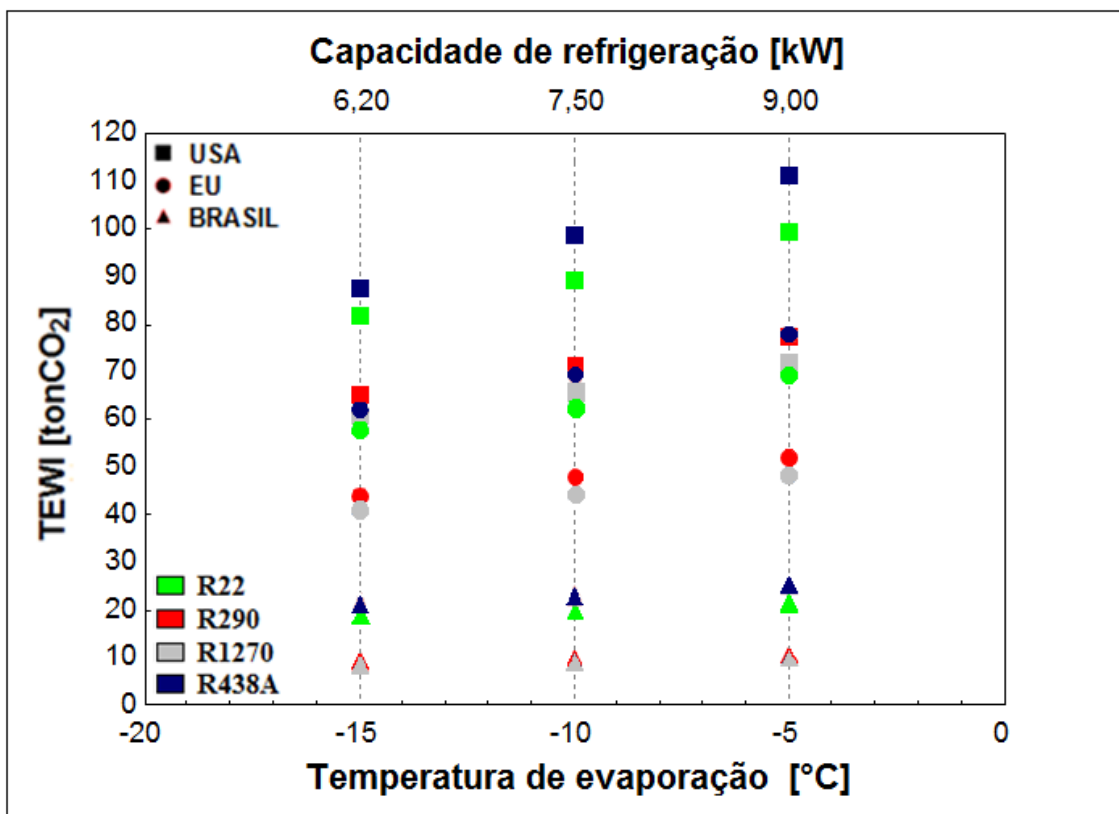


Figura 2. Análises comparativas do TEWI para os sistemas com diferentes condições de operação e localidades.

A economia de energia é importante para reduzir o impacto indireto e, conseqüentemente, o TEWI. Este fato pode ser observado pelos menores valores de TEWI dos sistemas com R290 e R1270 comparados ao sistema com R22. É muito importante observar o parâmetro das emissões de CO₂ para geração de energia elétrica. Alguns países, como os EUA (0,531 kgCO₂/kWh), têm valores elevados para emissões por consequência de sua matriz energética. O uso de um fluido refrigerante com baixo GWP reduz os danos ao meio ambiente (impacto direto); esse fato é observado quando se compara o valor de TEWI para o sistema com R438A (GWP = 2264) para o sistema com R1270 (GWP = 1,8). Os valores da matriz energética para a União Europeia e Brasil utilizados na Figura 2 são, respectivamente, 0,356 kgCO₂/ kWh e 0,075 kgCO₂/kWh.

Conclusões

Quando comparadas as propriedades termodinâmicas do R22 aos fluidos alternativos propostos, pouco pode ser concluído a respeito da operacionalidade de um *drop-in* imediato. Alguns modelos matemáticos contribuem positivamente para a previsão da melhor opção de substituição do mesmo.

A análise prévia dos resultados mostrou os limites reais da operação tipo *drop-in*. O R438A é o substituto imediato para a aplicação original, porém, é interessante observar que os valores de capacidade de refrigeração e de COP obtidos para o HFC apresenta valores inferiores ao R22.

As ferramentas desenvolvidas na segunda etapa de resultados possibilitaram aplicar fluidos com propriedades termo-físicas distintas das condições de projeto (capacidade, evaporação e condensação) adotadas na concepção do sistema original. Estes resultados, alcançados por meio da metodologia *drop-in/retrofit*, constataram que o uso do R1270 e do R290 resultou nos maiores valores no COP.

O comportamento dos refrigerantes (com a mesma capacidade de refrigeração) mostrou que o sistema com R1270 apresentou o COP superior para toda a faixa de evaporação explorada na presente pesquisa, ou seja, -15°C , -10°C e -5°C . As vantagens adicionais observadas para o uso dos HCs incluem: Redução no consumo de energia elétrica; Redução da carga de refrigerante; Custo reduzido dos HCs; Índices GWP consideravelmente menores e reduções nas taxas de carbono.

A comparação do TEWI mostrou que desempenho superior e processos amigáveis ao meio-ambiente podem ser aplicados simultaneamente, a fim de reduzir efeitos diretos e indiretos ao aquecimento global. A utilização de um refrigerante com valor reduzido de GWP reduz os impactos diretos ao meio ambiente. Este fato pode ser observado pelos sistemas com R290 e R1270 comparados ao sistema com R22.

O parâmetro das emissões de CO_2 para geração de energia elétrica, em alguns países, como os EUA ($0,531 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$), têm valores elevados por consequência de sua matriz energética. Esta condição proporciona elevados valores da parcela indireta dos impactos, os quais podem ser reduzidos ao elevar-se a eficiência dos sistemas de refrigeração. Neste cenário, o uso do refrigerante com baixo GWP, pouco contribui para a redução do impacto total. Em contrapartida no cenário brasileiro, em que as emissões de CO_2 por kWh são inferiores, as parcelas diretas e indiretas apresentam pesos semelhantes no valor final do TEWI.

Como maior contribuição técnica aos sistemas de refrigeração, o presente trabalho comprovou que, independentemente da carga de refrigerante ou capacidade da instalação, a funcionalidade do par VEE/CVV é uma ferramenta essencial para a adaptação de um fluido refrigerante alternativo ao ciclo de compressão de vapor original.

Entre os três refrigerantes alternativos estudados, o R1270 pode ser considerado o melhor substituto do R22, para operar em um sistema de refrigeração comercial automatizado. Em instalações que utilizam carga de refrigerante elevada, os custos relacionados à segurança, podem inviabilizar o uso dos HCs, sendo assim, o R438a seria a opção.

Por fim, o setor como um todo, deve escolher entre, pelo menos, duas condutas:

- Manter a postura atual e adequar-se ao protocolo de Montreal, por meio do uso de HFCs de elevado GWP, uma solução de longo termo;
- Adequar-se, de uma só vez, aos protocolos de Montreal e Kyoto. Sendo, para tanto, necessária a utilização de refrigerantes naturais, ou mesmo, aqueles que apresentam valores de GWP reduzidos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte à pesquisa concedido pela CAPES, CNPq, FAPEMIG e também ao suporte técnico provido pelo Professor Oscar Saul Hernandez Mendonza.

Referências

Allgood, C. C., Lawson, C. C., 2010, "Performance of R-438A in R-22 refrigeration and air conditioning systems", International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, USA.

ASHRAE Standard 34: Designation and Safety Classification of Refrigerants, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2010.

Bandarra Filho, E. P., Antunes, A. H. P., Souza, L. M. P., Mendonza, O. S. H., A. Da Silva, A., "Experimental analysis of a commercial refrigeration system operating with R22 and the hydrocarbon R1270", Proceedings of the 10th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, Delft, The Netherlands, 2012.

EN 378, 2008, Refrigerating Systems and Heat Pumps—Safety and Environmental Requirements, BSI, London.

CO₂ Emissions from fuel combustion, International Energy Agency; 2011.

Colbourne, D. e Suen, K. O., 2000, Assessment of performance of hydrocarbon refrigerants, Proceedings of the IIR Gustav Lorentzen fourth conference on natural working fluids, Purdue, USA.

Corberán, M. J., Insured, J., Colbourne, D., González, J., 2008, Review of standards for the use of hydrocarbon refrigerants in A/C, heat pump and refrigeration equipment, International Journal of Refrigeration, Vol. 31 , n. 1, pp. 748-756.

Domanski, P. A. e Yashar, D., 2006, Comparable Performance Evaluation of HC and HFC Refrigerants in an Optimized System. IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, 7th. Proceedings. May 28-31, Tondheim, Norway, 2006.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

ISO 5149 parts 1 to 4, under the general title Refrigerating systems and heat pumps — Safety and environmental requirements; 2014.

Lommers, C. A., 2003, Air conditioning and refrigeration industry refrigerant selection guide – 2003. ISBN 0-949436-41-0, The Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Heating Inc (AIRAH), Seventh Edition, Australia.

Methods of calculating Total Equivalent Warming Impact (TEWI) 2012, The Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Heating, 2012.

Mohanraj, M., Jayaraj, S. e Muraleedharan, C., 2009, Environment friendly alternatives to halogenated refrigerants—a review, International Journal of Greenhouse Gas Control 3, pp. 108–119.

Palm, B., 2008, Hydrocarbons as refrigerants in small heat pump and refrigeration systems—a review, International Journal of Refrigeration 31, pp. 552–563.

Park, K. J., Jung, D., 2007, “Performance of alternative refrigerants for residential air-conditioning applications”, Applied Energy, Vol. 84, pp. 985-991.

Preparing for HCFC phase-out: Fundamentals of uses, alternatives, implications and funding for Article 5 countries. UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION, Vienna, 2009.

Schmidt, F. Optimal control of electronic expansion valves in modern low charge evaporator systems requires fast reacting expansion valves and new controller design. In: THE 20TH INTERNATIONAL CONGRESS OF REFRIGERATION, IIR/IIF, Sydney, 1999.