

12º CONGRESSO INTERNACIONAL DE
AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO

ESTADO DA ARTE SOBRE DESEMPENHO E SEGURANÇA DO R-290 COMO SUBSTITUTO DO R-22

Ítalo Franco Guilherme – italoengmec95@gmail.com

David Fernando Marcucci Pico – dmarcucci@ufu.br

Enio Pedone Bandarra Filho – bandarra@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, www.ufu.br

S1 - Sistemas de Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento

Resumo. O presente trabalho trata-se de uma ampla revisão da utilização do R-290 como um substituto direto do R-22, sem realizar alterações no sistema. A revisão aborda as principais alterações nos valores de COP, capacidade frigorífica e de aquecimento, consumo de energia, temperatura de descarga e redução na carga de fluido refrigerante. De modo que, a substituição direta do R-22 por R-290 resulta em incrementos significativos no desempenho com cargas sempre inferiores, e reduz o impacto ao aquecimento global, sendo um substituto favorável ao meio ambiente. Além disso, serão apresentados os principais estudos para redução dos riscos inerentes à utilização de fluidos refrigerantes inflamáveis, destacando as principais informações que auxiliem no aumento da segurança dos sistemas que operam com R-290.

Palavras-chave: R-290, R-22, drop-in, inflamabilidade, segurança

1. INTRODUÇÃO

A preocupação em diminuir os impactos ambientais causados pelos sistemas de refrigeração e aquecimento cresce cada vez mais. Uma das alternativas para reduzir esses impactos é a utilização de fluidos refrigerantes que não agridam a camada de ozônio – zero ODP (*Ozone Depletion Potential*) – e que tenham pequeno potencial de aquecimento global – GWP (*Global Warming Potential*).

Os hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) são compostos químicos utilizados principalmente em equipamentos de ar condicionado e refrigeração. Além de possuírem ODP positivo, podem ser milhares de vezes mais poluentes que o CO₂, contribuindo fortemente para a mudança climática, sendo gases causadores de efeito estufa. Assim, algumas medidas foram tomadas nos últimos anos na tentativa de restringir o uso de refrigerantes que contenham cloro em sua composição, como o Protocolo de Montreal, além da implementação de novas regras que limitam o uso de fluidos de alto GWP.

Em relação às medidas tomadas no Brasil referentes ao uso desses fluidos refrigerantes, existe o Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs – PBH. Esse programa contempla a estratégia de controle, redução e eliminação dessas substâncias. Foi criado a partir da decisão tomada no Protocolo de Montreal (2016) de eliminar a produção e consumo de HCFCs, na qual os Estados Partes do Protocolo de Montreal estabeleceram um novo cronograma que se inicia com o congelamento do consumo em 2013, seguido por uma redução escalonada até a eliminação completa em 2040 (Pinto *et al.*, 2019). O cronograma estabelecido é ilustrado na Fig. 1.

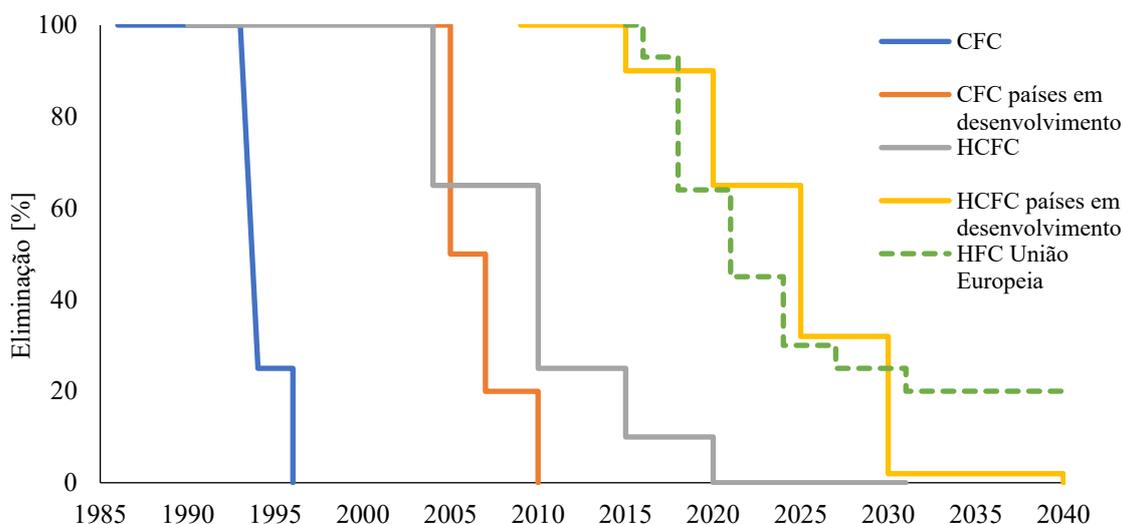


Figura 1. Plano de eliminação dos fluidos refrigerantes halogenados de acordo com o Protocolo de Montreal. Adaptado de: Harby (2017).

Devido ao fato dos hidrofluorcarbonos (HFCs) possuírem alto GWP, o último acordo sobre a eliminação dos HFCs, a partir da aprovação da Emenda de Kigali (2016), incluiu os HFCs na lista de substâncias controladas pelo Protocolo de Montreal (UNEP, 2016). Como consequência, o preço desses fluidos refrigerantes, assim como dos HCFCs, está cada ano mais elevado. Além disso, a legislação da União Europeia (2014) e o Acordo de Paris (2016), também enfatizam fortemente na eliminação progressiva do uso de refrigerantes sintéticos nocivos, a fim de reduzir a destruição da camada de ozônio e reverter os efeitos das mudanças climáticas (Abas *et al.*, 2018).

Dentre os HCFCs mais afetados nesse processo, o R-22 está entre os principais fluidos refrigerantes a serem substituídos, uma vez que possui um GWP de 1760 (IPCC, 2014) e um ODP de 0,05 (IPCC, 2014). No entanto é o fluido refrigerante mais utilizado em sistemas de refrigeração nos países em desenvolvimento. O R-22 é altamente utilizado em aplicações de condicionamento de ar comercial e residencial (Fernando *et al.*, 2004), em sistemas de refrigeração industrial, comercial e de alimentos (Sarbu, 2014), em resfriadores de líquido (*chillers*) (Calm, 2002; Elgendy *et al.*, 2015; Choudhari e Sapali, 2020).

Como fluidos alternativos para o R-22 tem-se os hidrocarbonetos, sendo o mais comum o R-290. Dentre as vantagens da utilização de hidrocarbonetos está a maior condutividade térmica (Palm, 2008); a menor vazão mássica, aproximadamente 50 % inferior para o R-290 em comparação ao R-22 em um ciclo de compressão de vapor padrão; o menor peso molecular do R-290 comparado ao R-22 que auxilia no incremento da eficiência volumétrica do compressor e a menor taxa de compressão, que diminui o trabalho do compressor (Granryd, 2001). Outra facilidade na substituição de um sistema projetado para R-22 para R-290 é o fato de não ser necessário a alterações significativas na válvula de expansão, sendo necessário apenas um ajuste (Palm, 2007).

Na Europa Ocidental o R-290 está sendo usado em unidades com capacidades reduzidas, pelo fato de ser barato e estar disponível em abundância. Sendo um composto de hidrocarboneto puro que não libera nenhum agente de decomposição tóxico na combustão (Devotta *et al.*, 2005). Diferentemente do R-22, que pode provocar asfixia devido ao fato dos vapores serem mais densos que o ar o que causa na redução do oxigênio disponível para a respiração.

O R-290, quando comparado ao R-22, oferece maior eficiência, melhor transferência de calor nos trocadores de calor, menor quantidade de carga de refrigerante (Corberán *et al.*, 2008b; Padalkar *et al.*, 2014) e temperaturas mais baixas de descarga do compressor (Cheng *et al.*, 2014). Há também outras vantagens quanto ao uso desse fluido refrigerante hidrocarboneto, tais como: baixo custo, alta disponibilidade e alta compatibilidade com óleos minerais e sintéticos. No entanto, a sua característica mais indesejável é a inflamabilidade, gera preocupações em termos de segurança e obriga à utilização de técnicos altamente qualificados que sigam a rigor medidas e precauções adicionais o projeto, substituição do fluido e manutenção do sistema (Zhou e Gan, 2019). Nesse sentido, pode-se concluir que o HC R-290 é um substituto com alto potencial em sistemas de refrigeração, podendo superar o desempenho dos sistemas já existentes que operam com R-22 e sendo bem menos quanto ao efeito estufa, já que além de ter ODP nulo, também possui baixo GWP, de 3 (Lampugnani e Zgliczynski, 1996).

2. ASPECTOS DE SEGURANÇA

Como já comentado, o principal problema da utilização de fluidos refrigerantes HC é a inflamabilidade, classificados como A3 pela norma ISO 817 e a norma americana ASHRAE 34. Sendo necessários cuidados extras com relação a segurança do sistema de refrigeração. Nesse sentido, serão apresentados os riscos presentes na aplicação dos fluidos refrigerantes inflamáveis, assim como as possíveis medidas que podem aprimorar a segurança do sistema, assim como estudos referentes à redução de carga de fluido.

2.1 Avaliação de riscos dos fluidos refrigerantes inflamáveis

Zhang *et al.* (2013) propuseram algumas recomendações para diminuir os riscos inerentes aos sistemas de refrigeração operando com fluidos refrigerantes inflamáveis. (1) Verificar se a unidade interna está instalada longe de qualquer fonte potencial de ignição; (2) adotar um dispositivo detector de vazamentos que possa identificar se há vazamento de refrigerante (ou em qualquer outra parte do sistema); (3) instalar uma válvula de corte na tubulação de refrigerante, que pode fechar imediatamente as tubulações de refrigerante assim que for detectada uma perda de refrigerante; (4) minimizar o uso de materiais combustíveis para a construção da unidade interna; e (5) implementar o uso de uma técnica confiável de união para a conexão entre os tubos de refrigerante que conectam a unidade interna à unidade externa. Ademais, a utilização de sistemas de refrigeração indiretos e trocadores de calor compactos podem auxiliar na redução de carga. Medidas como a implementação de sensores de HC, alarmes e ventilação forçada na unidade externa podem ser aplicadas para reduzir os riscos de operação (Palm, 2008). Foi sugerido também a adição de grades de ventilação na parte inferior do equipamento para melhorar a convecção do ar nesta região e evitar acumulação de gases inflamáveis, aprimorando significativamente a segurança do sistema (Tang *et al.*, 2018).

Colbourne e Espersen (2013) avaliaram o risco de inflamabilidade de fluidos refrigerantes HC em cabines de sorvete do tipo horizontal, através de uma abordagem quantitativa de riscos (QRA), usada para estimar a probabilidade de ignição de refrigerante vazado e a gravidade das consequências. Os riscos foram considerados insignificantes, visto que a frequência de ignição esteve entre 1×10^{-8} e 2×10^{-13} por ano. Além dos valores obtidos para a sobre pressão máxima e a intensidade térmica dentro da sala foram de 3 kPa e 200 s (kWm^{-2})^{4/3}, respectivamente, e 6,5 kPa e 20 s (kWm^{-2})^{4/3} de dentro do compartimento do compressor.

Zhang *et al.* (2016) estudaram os riscos de inflamabilidade e as consequências geradas por uma possível ignição em um sistema de condicionamento de ar carregado com HC R-290. A sobrepressão máxima de explosão para ignição na unidade interna foi de cerca de 820 Pa, não causando danos significativos à unidade interna. Enquanto com relação ao gabinete que abriga o compressor, a pressão máxima de explosão foi de cerca de 2060 Pa, o que não danificou a unidade externa. Além disso, após os testes conduzidos, o sistema conseguiu operar normalmente. Observaram também que de acordo com o volume interno, a quantidade de R-290 que deve ser depositada dentro das unidades interna e externa é de 7 g e 16 g, respectivamente, para formar uma concentração estequiométrica. A sobrepressão de explosão nas unidades interna e externa é suficientemente baixa para não danificar o sistema de ar condicionado. No entanto, se o R-290 for inflamado durante o vazamento, as unidades serão queimadas.

Um novo método de nitrogênio quase-líquido – *Quasi-Liquid Nitrogen Method (QLNM)* – foi proposto para investigar a distribuição e a taxa de vazamento de fluido refrigerante nos condicionadores de ar do tipo split com R-290. Os resultados experimentais da distribuição comprovaram a validação do QLNM e mostraram que uma grande parte do refrigerante é distribuída no condensador, lado de pressão mais elevada do sistema, quando em funcionamento. Enquanto o fluido migra do condensador para o evaporador quando o compressor estiver parado, ou seja, do lado de maior pressão para o de menor. De acordo com os resultados experimentais em uma análise geral de carga de fluido refrigerante no sistema, durante o funcionamento do compressor há entre 50 e 60 % de R-290 no evaporador, porém, com o sistema parado, essa proporção passa para aproximadamente 85 e 90 %. Além disso, a quantidade de R-290 no condensador com o sistema parado é aproximadamente constante e não é afetada pela carga, já que a pressão dentro do sistema varia apenas com a temperatura do ambiente até atingir o equilíbrio. Assim, pode-se especular que, se uma válvula solenoide for instalada próxima ao capilar, a migração de 30 % da carga de refrigerante será cortada quando o sistema for desligado. Com base nisso, a instalação de uma válvula solenoide próxima ao capilar para evitar esse transporte de fluido do lado de alta pressão para o de baixa foi testado e foi provado que a taxa de vazamento é reduzida com essa aplicação, assim, a segurança do sistema carregado com fluidos refrigerantes inflamáveis também é aprimorada (Tang *et al.*, 2017).

Reduzir a quantidade de carga de R-290 é um método eficaz para melhorar a segurança dos sistemas de refrigeração, já que, assim, o refrigerante não se acumula no evaporador quando o sistema estiver operando com carga insuficiente. Além disso, a taxa de vazamento também é um parâmetro muito importante para avaliar os riscos de caso haja vazamento. Por exemplo, comparando o vazamento de 300 g de R-290 em 4 minutos e o vazamento de 300 g de R-290 em 10 minutos, a concentração de R-290 no ambiente interno será maior para o primeiro caso, já que com um tempo menor de vazamento o fluido refrigerante terá pouco tempo para difundir (Tang *et al.*, 2017).

2.2 Redução da carga de fluido refrigerante

A redução de carga de fluido refrigerante de um sistema de refrigeração é sempre um fator importante a ser considerado, visto que, na prática todo equipamento está sujeito a vazamentos. A redução da carga de fluido refrigerante também pode minimizar os impactos ambientais de um sistema de refrigeração. No caso de fluidos inflamáveis a redução se torna ainda mais importante devido ao fato que quanto menos fluido for carregado no sistema menor serão as taxas de vazamento, caso ocorram, e consequentemente mais seguro será o equipamento. Caso a carga de hidrocarboneto seja de 0,15 kg ou menos, as chances de explosão são insignificantes (Harby, 2017). Assim, em várias normas – como a ISO 5149, a IEC 60.335-2-40 e a IEC 60.335-2-89 em nível internacional e a EN 378 na Europa especificamente – os hidrocarbonetos são carregados sem restrições de até 0,15 kg no caso de sistemas de refrigeração hermeticamente fechados, como os refrigeradores domésticos. Para carga de refrigerante acima desse valor aplicam-se algumas condições especiais, nas quais a quantidade de carga está relacionada ao volume da sala, ocupantes, ventilação necessária, além da existência ou não de fontes de ignição dentro ou na área ocupada da sala (Gupta e Pendyala, 2020).

No estudo em uma bomba de calor água-água, carregada com propano, Corberán *et al.* (2008) analisaram quais componentes retêm mais fluido. A maior parte da carga foi encontrada no condensador (50 %) e uma parte considerável no evaporador (15 %). No entanto, o fluido refrigerante dissolvido no óleo lubrificante do compressor foi considerado substancial neste tipo de equipamento (30 %). O refrigerante restante foi encontrado principalmente na linha de líquido. Qualquer carga extra injetada no sistema foi direcionada ao condensador e armazenada na forma líquida. Logo, foi inferido que para alocar mais líquido no condensador, a parte do condensador dedicada ao sub resfriamento deve aumentar. Implicando na redução da área do condensador disponível para a condensação do fluido refrigerante, ocasionando o aumento da temperatura e da pressão. O aumento no sub resfriamento tem um efeito positivo no COP, enquanto o aumento na pressão de condensação é maléfico. Assim, os autores concluíram que existe uma carga de fluido ideal ao se analisar o desempenho do sistema.

Muitos pesquisadores testaram novas tecnologias nos trocadores de calor para reduzir a carga de fluido refrigerante. Trocadores de calor de ar de mini canal foram desenvolvidos e instalados em um sistema de refrigeração para R-290 com capacidade de refrigeração de 2 kW usando menos de 0,13 kg de fluido (Hoehne e Hrnjak, 2004). Palm (2007) analisou o sistema e seus respectivos componentes no intuito de encontrar as melhores maneiras de reduzir a carga de fluido refrigerante e sugeriu que trocadores de calor mais compactos, de mini ou micro canais, fossem utilizados, já que a maior quantidade de fluido se encontra nesses componentes.

Devido à inflamabilidade dos hidrocarbonetos como o R-290, um dos desafios mais importantes torna-se a minimização da carga de fluido refrigerante, ou seja, para atingir as proporções mais altas possíveis de capacidade específica de refrigeração (kW por kg de carga de refrigerante). Algumas medidas podem ser tomadas nesse sentido, como a utilização de trocadores de calor mais compactos, como trocadores a placa ou de micro canais, redução do volume da tubulação e

dos componentes auxiliares, especialmente no caso do transporte de líquido, já que nesse estado o fluido refrigerante possui maior massa específica, além da eliminação do tanque de líquido na saída do condensador sempre que possível (Martínez-Galván *et al.*, 2011).

Padalkar *et al.* (2014) analisaram o uso do R-290 em um condicionador de ar do tipo split, com capacidade de refrigeração nominal de até 5,1 kW, como uma alternativa ao R-22. Ao realizar o *drop-in* do R-22, os resultados simulados para o R-290 mostraram menor capacidade de resfriamento e maior eficiência energética – *Energy Efficiency Ratio* (EER) – em comparação ao R-22. Os autores sugeriram que o sistema deve ser reprojetoado e otimizado para a carga inferior de R-290 para que a unidade funcione com alta eficiência e de forma segura. O condensador com tubulação de menor tamanho proporcionou melhoria de desempenho em termos de EER e capacidade. Para minimizar a carga e obter uma melhor capacidade de resfriamento, foi concluído que o sistema carregado com R-290 requer um condensador de canal menor e um compressor mais eficiente em termos de energia. O trabalho também apresentou resultados experimentais do teste de *drop-in* com o R-290, onde a carga foi reduzida em cerca de 50 %, nos quais a capacidade de resfriamento foi menor em 6 % e o EER foi maior em 14 % quando comparado com o R-22.

Um novo condensador de microcanal com carga reduzida foi proposto e investigado experimentalmente por Xu *et al.* (2016) em um sistema doméstico de condicionamento de ar. Os resultados mostram que, em comparação com o condensador de microcanal convencional, a capacidade de resfriamento do novo sistema aumentou 1,6 % e a carga de fluido refrigerante do sistema diminuiu 28,3 %. Nesse sentido, a carga ideal para o R-290 foi reduzida para 190 g, que atendem aos requisitos de segurança do Padrão Nacional da China GB 4706.32-2012. Além disso, a redução do diâmetro interno auxiliou simultaneamente na redução de carga de fluido refrigerante sem alterar a eficiência do sistema.

Em estudo experimental realizado em um condicionador de ar do tipo split carregado com R-290, Ruan *et al.* (2018) propuseram a utilização de um condensador de filme descendente – *falling film* – no intuito de reduzir a carga de fluido refrigerante e, assim, aumentar a segurança do sistema. Os resultados mostraram que a carga necessária de refrigerante foi reduzida em 23,6 % para apenas 290 g. Além disso, comparado aos valores obtidos no sistema original, carregado com R-22, a capacidade de resfriamento e o COP do novo sistema foram 1,97 % e 8,89 % superiores, respectivamente. O condicionador de ar, com R-290 desenvolvido no trabalho atendeu aos requisitos de eficiência energética e segurança da norma IEC60335-2-40. Assim, os autores concluíram que o uso desse tipo de condensador reduz significativamente a carga de refrigerante, possibilitando o uso seguro do fluido refrigerante inflamável, R-290.

Na tentativa de introduzir trocadores de calor de micro tubo como condensador e evaporador em sistema de condicionamento de ar visando a redução de carga de R-290. Zhou e Gan (2019) descobriram que a carga ideal de propano para o sistema projetado foi de 248 ± 5 g, seguindo o regulamento EN378-1: 2016. No entanto, o uso dos trocadores de calor de micro tubo apresentou alguns problemas, como a distribuição desigual de líquido e gás no evaporador e condensador, e a necessidade de se aprimorar o desempenho e a eficiência do ventilador.

A partir dessas medidas de segurança e redução de carga, alguns fluidos refrigerantes inflamáveis foram utilizados em aplicações de refrigeradores domésticos (Jung *et al.*, 2000; Jwo *et al.*, 2009). Além disso, o R-290 foi utilizado em sistemas de ar condicionado (AC) doméstico e comercial, bombas de calor (Castro *et al.*, 2005), e sua aplicação foi avaliada até para congeladores de grande capacidade (He *et al.*, 2014).

3. SUBSTITUIÇÃO DO R-22

Diversos fluidos refrigerantes alternativos já foram testados na literatura como substitutos do R-22, no entanto, as propriedades termodinâmicas de cada fluido influenciam significativamente no desempenho do sistema. Logo, serão apresentados alguns fluidos refrigerantes que já foram analisados alternativos ao R-22, para provar as melhores propriedades do R-290 como substituto. Na sequência, será realizada uma comparação o R-290 e o R-22 utilizando os diagramas de pressão-entalpia, e por fim uma revisão a respeito dos testes de *drop-in* em que o R-290 foi utilizado. Essa revisão permitirá entender melhor os impactos no desempenho dos sistemas de refrigeração operando com R-290 sem realizar alterações no equipamento.

3.1 Diagramas R-22 e R-290

As Fig. 2 (a) e a Fig. 2 (b) apresentam os diagramas pressão-entalpia dos fluidos R-22 e R-290, respectivamente. Os diagramas são apropriados para apresentar a relação entre as propriedades termodinâmicas de ambos os fluidos refrigerantes, possibilitando a visualização dos processos que ocorrem no ciclo termodinâmico de cada um.

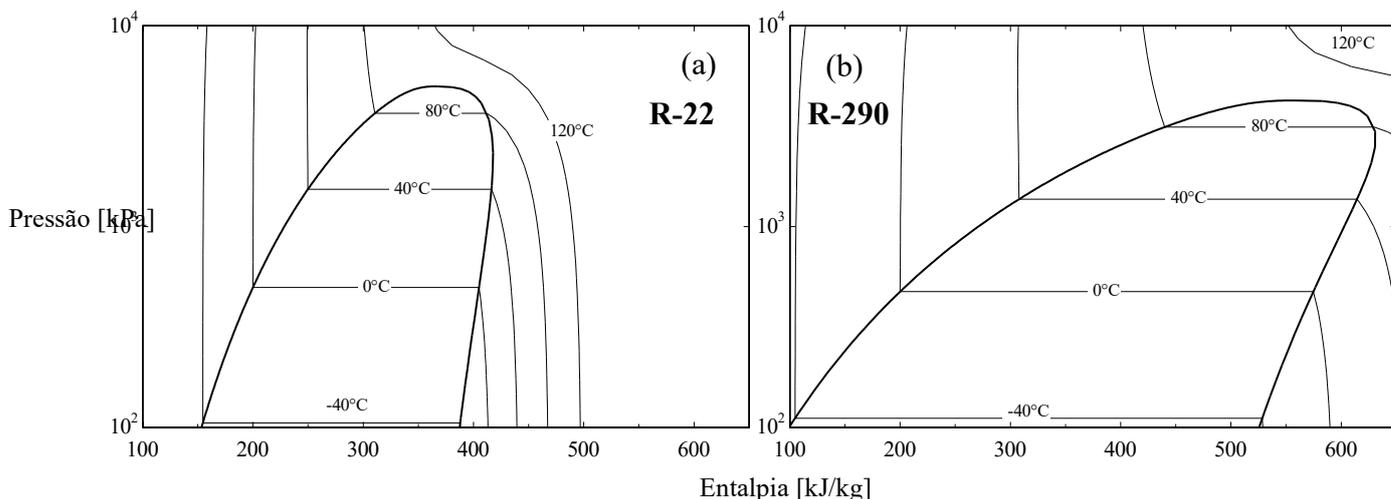


Figura 2. Diagrama pressão-entalpia do R-22 (a) e do R-290 (b).

A partir dos diagramas é possível observar que o R-22 e o R-290 atuam em faixas de pressão e temperatura muito semelhantes. Além disso, é possível observar que as entalpias de vaporização – diferença entre a entalpia do líquido e o vapor saturado – do R-290 é substancialmente maior em relação à do R-22. Isto significa que para uma mesma temperatura de evaporação o R-290 absorve mais calor por unidade de massa do que o HCFC. Por exemplo, para uma temperatura de evaporação de 0 °C, na transformação de líquido saturado para vapor saturado, o R-290 absorve aproximadamente 400 kJ/kg, enquanto que o R-22 absorve aproximadamente 200 kJ/kg. Nesse sentido, ao comparar um sistema de refrigeração operando com a mesma quantidade de R-22 e R-290, o sistema com o hidrocarboneto absorverá mais calor nesse processo. Sendo uma das justificativas para o fato de ser necessário menos carga de fluido refrigerante.

3.2 Fluidos refrigerantes alternativos ao R-22

O método TEWI (*Total Equivalent Warming Impact*) considera os impactos diretos e indiretos dos fluidos refrigerantes no aquecimento global. Em uma análise desse parâmetro para distintos fluidos refrigerantes substitutos do R-22 em sistemas de compressão de vapor convencionais, Sarbu (2014) observou que o efeito direto do TEWI foi de 33 a 60% do valor total para a maioria dos fluidos analisados, sendo que os valores mínimos, cerca de apenas 2 % do total, foram encontrados para os hidrocarbonetos, R-290 e R-600, e para o fluido refrigerante HFC R-152a.

Na Tabela 1 são apresentadas as principais propriedades termodinâmicas do R-22 e dos possíveis substitutos encontrados na literatura. Já a Tabela 2, baseada nos dados obtidos por Pavkovic (2013), apresenta os parâmetros de desempenho de um sistema de refrigeração operando com diferentes fluidos refrigerantes às temperaturas de evaporação e de condensação de -15 °C e 30 °C, respectivamente.

Tabela 1. Propriedades termodinâmicas dos fluidos refrigerantes (Lemmon *et al.*, 2010)

Fluido refrigerante	M_{molar} [g/mol]	$T_{\text{crítica}}$ [°C]	$P_{\text{crítica}}$ [bar]	$T_{\text{ebulição}}$ [°C]
R-22	86,5	96,15	49,9	-40,81
R-407C	86,2	86,03	46,3	-43,63
R-410A	72,6	71,35	49,0	-51,45
R-417A	106,8	87,14	40,4	-39,07
R-422A	113,6	71,73	37,5	-46,50
R-32	52,0	78,11	57,8	-51,65
R-717	17,0	132,25	113,3	-33,33
R-744	44,0	30,98	73,8	-78,46
R-1270	42,1	91,06	45,6	-47,62
R-290	44,1	96,74	42,5	-42,11
R-600a	58,1	134,66	36,3	-11,75

Tabela 2. Parâmetros de desempenho dos fluidos refrigerantes com condição de -15 °C e 30 °C de temperatura de condensação e evaporação, respectivamente (Pavkovic, 2013)

Fluido refrigerante	p_{evap} [bar]	p_{cond} [bar]	p_{cond}/p_{evap}	q_{ov} [kJ/m ³]	COP	$T_{descarga}$ [°C]	Código de segurança
R-22	2,962	11,919	4,024	2096,9	4,66	52,95	A1
R-407C	2,632	13,591	5,164	1802,9	3,91	51,43	A1
R-410A	4800	18,893	3,936	3093,0	4,38	51,23	A1
R-32	4,881	19,275	3,949	3420,0	4,52	68,54	A2L
R-717	2,362	11,672	4,942	2167,6	4,76	99,08	B2L
R-744	22,9	72,1	3,149	7979	2,96	69,5	A1
R-1270	3,630	13,050	3,595	2231,1	4,55	41,85	A3
R-290	2,916	10,790	3,700	1814,5	4,55	36,60	A3
R-600a	0,891	4,047	4,545	663,8	4,71	32,66	A3

Observando ambas as tabelas, é possível inferir que o R-290 é um dos fluidos refrigerantes com temperaturas ebulição e pontos críticos mais semelhantes ao R-22. Além dos parâmetros de desempenho: COP, capacidade frigorífica e pressões de operação serem muito próximas, sendo o único obstáculo a inflamabilidade. Além disso, a menor massa específica do R-290 possibilita a aplicação desse fluido refrigerante com cargas menores se comparado à utilização do R-22.

3.3 Drop-in do R-22 com o R-290

Devotta *et al.* (2005) realizaram experimentos a respeito do desempenho do R-290 em um condicionador de ar do tipo janela, que operava com R-22. Foi observada uma redução na capacidade frigorífica em baixas e altas condições de operação, com decrementos entre 6,6 % a 9,7 %, respectivamente. No entanto, o COP do sistema incrementou para ambas as condições quando comparado com o sistema original, apresentando incrementos de 7,9 % para menor temperatura ambiente e 2,8 % para a condição ambiente mais crítica. Essa queda na performance em condição mais extrema foi devido à diminuição das taxas de transferência de calor no condensador. Além disso, também houveram reduções na faixa de 12,4 – 13,5 % na energia consumida pelo compressor e de 13,7 – 18,2 % na temperatura de descarga para a unidade carregada com R-290.

Ao estudar as propriedades termodinâmicas e a performance dos fluidos refrigerantes HC, R-1270 e R290, e misturas que também compõem em comparação ao R-22, Park e Jung (2007) observaram redução na capacidade de resfriamento do R-290 de 11,5 % comparado ao HCFC puro em um sistema de condicionamento de ar residencial. Porém, como vantagem, foi encontrado um incremento de 1,9 % no COP. Além disso, foram reportadas reduções na temperatura de descarga do compressor e na quantidade de carga do sistema, de 17,3 °C e 55,6 %, respectivamente. Os autores indicaram o R-290, dentre outros fluidos refrigerantes, como uma alternativa de longo prazo para aplicações em sistemas de ar condicionado residências e bombas de calor. Os mesmos HCs foram submetidos a testes de *drop-in* em um sistema de refrigeração projetado para R-22 em estudo realizado por Antunes *et al.* (2015). Foi observado excelente aplicabilidade na faixa de temperatura de evaporação entre -5 e -15 °C, excedendo os valores de COP obtidos com o sistema original. A partir dos resultados foi realizado uma análise do TEWI para o R-22, R-1270 e R-290. Dentre os resultados apresentados foi possível notar que o R-22 tem maior impacto ao aquecimento global comparado aos hidrocarbonetos em qualquer condição de capacidade de resfriamento, e em qualquer uma das três regiões do mundo em que foi considerada a matriz de energia (Brasil, Estados Unidos e União Europeia). Sendo que para a condição fixa de capacidade de resfriamento em 9 kW o TEWI do R-290 para as matrizes do Brasil, EUA e EU foram aproximadamente 50 %, 70 % e 75 % inferiores às do sistema com o R-22.

Em um estudo experimental realizado em um condicionador de ar do tipo *split*, no intuito de comparar o desempenho do R-22 e do R-290, além de avaliar a influência da variação no diâmetro dos tubos capilares adiabáticos dispostos em espiral, Zhou e Zhang (2010) observaram que os tubos de diferentes diâmetros internos e distintos diâmetros da bobina mostraram capacidade de resfriamento, consumo de energia e eficiência energética (EER) semelhantes. Devido à menor densidade do R-290, a taxa de fluxo de massa e a carga de refrigerante no R-290 foram de apenas 44 % e 47 % comparadas ao R-22. Com relação ao desempenho do sistema, ao carregar o equipamento com o fluido refrigerante hidrocarboneto a capacidade de resfriamento foi aproximadamente 5 % menor e o consumo de energia 12 % inferior em relação ao HCFC. Finalmente, o EER do R-290 foi cerca de 8 % maior que o do R-22. De modo que, como o EER faz relação entre a capacidade de resfriamento e os valores de entrada de energia, seu valor percentual seria o mesmo da avaliação do COP do sistema.

Em outro condicionador de ar, Teng *et al.* (2012) relataram que o COP da unidade com R-290, com 50 % da carga de fluido original, foi maior que o do sistema com R-22. Assim, os resultados mostraram que a melhor faixa de carga de R-290 para substituir o sistema original sem alterações de componentes, foi entre 50 e 55 %. Além disso, o EER do condicionador de ar com R-290 apresentou tendência ascendente à medida que a temperatura do ar externo aumentou, melhorando o EER em aproximadamente 20 % na situação ideal.

Antunes *et al.* (2014) realizaram testes em um sistema de refrigeração projetado para operar com o fluido refrigerante R-22, no intuito de avaliar o desempenho de outros três fluidos R-290, R-32 e R-410A como substitutos diretos. Utilizando o mesmo óleo mineral para os experimentos realizados com R-22 e R-290, foi preciso apenas de 47 % da carga do

sistema base para a operação com R-290, o que equivaliu a 1,5 kg de fluido refrigerante. O uso do hidrocarboneto resultou nos maiores resultados de capacidade de refrigeração. Além disso, a análise do comportamento de todos os sistemas com a mesma capacidade de refrigeração provou que o sistema com R-290 tem o maior COP para toda a faixa de evaporação explorada na pesquisa. No mesmo ano, Padalkar *et al.* (2014) analisaram o uso do R-290 em um condicionador de ar do tipo split, com capacidade de refrigeração nominal de 5,1 kW, como uma alternativa segura e eficiente em termos de energia ao R-22. Sob condições de *drop-in*, os resultados simulados para o R-290 mostraram menor capacidade de resfriamento e maior EER em comparação ao R-22. Ademais, sugeriram que o sistema deve ser reprojetoado e otimizado para a carga inferior de R-290 para que a unidade funcione com eficiência e segurança. O condensador com tubulação de menor tamanho proporcionou melhoria de desempenho em termos de EER e capacidade. Para minimizar a carga e obter uma melhor capacidade de resfriamento, foi concluído que o sistema carregado com R-290 requer um condensador de canal menor e um compressor com maior deslocamento volumétrico. O trabalho também apresentou resultados experimentais, nos quais a capacidade de resfriamento foi menor em 6 % e o EER foi maior em 14 % em comparação ao R-22, no teste de *drop-in* com o R-290, onde a carga foi reduzida em cerca de 50 %.

Em estudo analítico (Choudhari e Sapali, 2017) relacionado ao desempenho do R-290 como possível substituto do R-22 em sistemas de refrigeração, para o estudo foi considerado um ciclo de compressão de vapor com temperatura de evaporação variando entre -25 °C e 10 °C e temperatura de condensação fixa em 45 °C. O ponto de ebulição normal (a 1 atm) de ambos os fluidos refrigerantes são bem próximos, o que indica curvas de pressões e aplicabilidades parecidas. Além disso, no ponto de ebulição normal o R-290 apresentou calor latente de evaporação 80 % maior comparado ao R-22. A menor densidade de líquidos do R-290 reflete em menor carga no sistema, resultando em menor atrito e melhores coeficientes de transferência de calor no evaporador e no condensador, ainda devido a menor densidade a vazão mássica de R-290 foi cerca de 43 % do R-22, o que tem influência na redução da emissão direta de fluido refrigerante, diminuindo os impactos do sistema para o efeito estufa. O R-290 possui menor viscosidade e maior condutividade térmica, o que melhora o desempenho do condensador e do evaporador. O calor específico mais alto do R-290 fornece uma temperatura de descarga mais baixa, que é uma característica importante na seleção de um fluido refrigerante alternativo, já que a temperatura de descarga mais baixa melhora a vida útil do compressor, melhorando a estabilidade do fluido refrigerante e do lubrificante. Outra vantagem da aplicação do R-290 é que ele possibilita uma menor variação de pressão, o que é favorável para as eficiências isentrópicas e volumétricas do sistema. O COP com o R-290 se aproximou do R-22, podendo-se esperar um COP mais alto se o sistema de refrigeração for especialmente projetado de acordo com as propriedades do HC.

Chen *et al.* (2018) estudaram o desempenho dos fluidos refrigerantes, R-427A, R-161 e R-290 em operação de *drop-in* em uma bomba de calor de R-22. A capacidade de aquecimento e o COP do R-290 foram em 38 % e 19 % mais elevados, respectivamente, quando comparados ao R-22, sendo o R-290 o que apresentou o melhor desempenho. A temperatura de descarga foi 30 °C inferior ao valor apresentado pelo R-22. Desta forma, o R-290 foi considerado pelos autores como o melhor substituto do R-22 para condições de alta relação de pressão. Com base no modelo LCCP (*Life Cycle Climate Performance*), utilizado para calcular as emissões climáticas envolvendo toda a cadeia de produção e operação de qualquer que seja o sistema de refrigeração, 11 % da emissão de CO₂ equivalente pode ser reduzida usando o R-161 e o R-290. Além disso, a carga do sistema com R-290 foi a menor (1,8 kg), representando uma diminuição de 55 % em relação à linha de base do R-22 (4 kg), o que auxilia significativamente na redução das emissões diretas.

Também foram realizados experimentos em um resfriador de água operando com R-290, para isso foi utilizado um compressor hermético projetado para R-22. Os resultados de temperatura de descarga do compressor apresentaram valores bem baixos, entre 53 °C e 69 °C variando com a temperatura de condensação (de 38 °C a 48 °C), o que confirmou a compatibilidade do R-290 com o óleo mineral utilizado como lubrificante. Os valores inferiores de temperatura foram relacionados com o maior calor específico do fluido refrigerante R-290, assim como já era esperado através da análise teórica. No geral, foi concluído que o R-290 tem um forte potencial de aplicabilidade em refrigeradores de água, além de elevada eficiência energética e ser um substituto do R-22 favorável ao meio ambiente (Choudhari e Sapali, 2020).

A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados referentes ao desempenho do R-290 em comparação ao R-22 nos testes de *drop-in* encontrados na literatura. São apresentados como parâmetros de comparação os valores do COP, capacidade de refrigeração ou de aquecimento, consumo de energia, temperatura de descarga do compressor e redução da carga de fluido refrigerante ao ser efetuado o *drop-in* no sistema.

Tabela 3. Desempenho do R-290 em comparação ao R-22 em testes de drop-in encontrados na literatura

Autor	Aparelho	COP (%)	Cap-resf/req (%)	Cons. Energia (%)	T _{des} (%)	Redução de carga (%)
(Devotta et al., 2005)	Ar cond.	2,8–7,9	(-)6,6–8,7	(-)12,4–13,5	(-)13,7–18,2	-
(Park et al., 2007)	Ar cond.	1,9	(-)11,5	-	(-)21,5	55,6
(Zhou e Zhang, 2010)	Ar cond.	8	(-)5	(-)12	-	53
(Teng et al., 2012)	Ar cond.	10	(-)2	(-)12	-	45
(Antunes et al., 2014)	Sist. ref.	-	-	-	-	53
(Padalkar et al., 2014)	Ar cond.	14	(-) 6	-	-	50
(Choudhari e Sapali, 2017)	Sist. ref. (analítico)	(-)0,3	-	-	(-)16	-
(Chen et al., 2018)	Bomba de calor	19	38	-	(-)20–30	55

4. CONCLUSÕES

O R-290 é considerado como um ótimo substituto do R-22, devido às suas excelentes propriedades termodinâmicas, o baixo impacto ambiental e o elevado desempenho apresentado nos trabalhos encontrados na literatura. No entanto, a substituição direta, sem a troca de nenhum componente do sistema de refrigeração deve ser analisada com detalhe para cada caso, uma vez que, devido aos rigorosos aspectos de segurança, o limite de carga de R-290 varia para cada aplicação. De modo que, para uma carga reduzida de HC, a alteração de alguns componentes incrementa o desempenho do sistema, como a utilização de trocadores de calor de micro canais. Além do fato de que, pelo R-290 ser um fluido inflamável, pode ser importante a aplicação de uma unidade externa, sensores de hidrocarbonetos e alarmes somados à ventilação forçada para diminuir os riscos de operação do sistema de refrigeração.

Pode-se concluir que a substituição do R-22 pelo R-290 é vantajosa para o incremento da capacidade de refrigeração do sistema e decremento do consumo de energia. Como consequência, pode ser atingido um valor superior de COP com uma reduzida carga de fluido refrigerante hidrocarboneto, além de temperaturas de descarga do compressor inferiores. Além disso, a utilização de R-290 reduz significativamente o impacto ao aquecimento global, sendo um substituto do R-22 favorável ao meio ambiente. A desvantagem da substituição direta é o aumento das precauções relacionadas à segurança do sistema, porém, com a utilização dos componentes e cargas de fluido corretos os riscos são controlados.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo suporte.

5. REFERÊNCIAS

- Abas, N., Kalair, A.R., Khan, N., Haider, A., Saleem, Z., Saleem, M.S., 2018. Natural and synthetic refrigerants, global warming: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 90, 557–569.
- Antunes, A.H.P., P, Bandarra Filho E. P., Mendonza, O.S.H., Souza, L.M.P., Bertoni, M.A.R., 2014. Experimental Evaluation of Refrigerants R290, R32 and R410a in a Refrigeration System Originally Designed for R22. *10th Int. Conf. Heat Transf. Fluid Mech. Thermodyn.* 564–570.
- Antunes, A.H.P., Silva, A., Bandarra Filho E. P. 2015. Experimental Evaluation of Propane, Propylene and HFC438A as Drop-in Replacements for an R22 System. *IAR Industrial Refrigeration Conference & Exhibition, San Diego, CA* 1–28.
- Calm, J.M., 2002. Options and outlook for chiller refrigerants. *International Journal of Refrigeration.* 25, 705–715.
- Castro, J.B., Urchueguía, J.F., Corberán, J.M., González, J., 2005. Optimized design of a heat exchanger for an air-to-water reversible heat pump working with propane (R290) as refrigerant: Modelling analysis and experimental observations. *Appl. Therm. Eng.* 25, 2450–2462.

- Chen, X., Liu, C., Yang, J., Chen, J., 2018. Experimental study on R-22, R-427A, R-161 and R-290 in air-source heat pump for space heating at low ambient temperatures. *International Journal of Refrigeration*. 96, 147–154.
- Cheng, S., Wang, S., Liu, Z., 2014. Cycle performance of alternative refrigerants for domestic air-conditioning system based on a small finned tube heat exchanger. *Appl. Therm. Eng.* 64, 83–92.
- Choudhari, C., Sapali, S.N., 2020. Experimental Study of Hydrocarbon R290 in Water Cooler Refrigeration System. *J. Therm. Eng.* 6, 43–49.
- Choudhari, C.S., Sapali, S.N., 2017. Performance Investigation of Natural Refrigerant R290 as a Substitute to R22 in Refrigeration Systems. *Energy Procedia* 109, 346–352.
- Colbourne, D., Espersen, L., 2013. Quantitative risk assessment of R290 in ice cream cabinets. *International Journal of Refrigeration*. 36, 1208–1219.
- Corberán, J.M., Martínez, I.O., González, J., 2008a. Charge optimisation study of a reversible water-to-water propane heat pump. *International Journal of Refrigeration*. 31, 716–726.
- Corberán, J.M., Segurado, J., Colbourne, D., González, J., 2008b. Review of standards for the use of hydrocarbon refrigerants in A/C, heat pump and refrigeration equipment. *International Journal of Refrigeration*. 31, 748–756.
- Devotta, S., Padalkar, A.S., Sane, N.K., 2005. Performance assessment of HC-290 as a drop-in substitute to HCFC-22 in a window air conditioner. *International Journal of Refrigeration*. 28, 594–604.
- Elgendy, E., Hassanain, M., Fatouh, M., 2015. Assessment of R-438A as a retrofit refrigerant for R-22 in direct expansion water chiller. *International Journal of Refrigeration*. 50, 127–136.
- Fernando, P., Palm, B., Lundqvist, P., Granryd, E., 2004. Propane heat pump with low refrigerant charge: Design and laboratory tests. *International Journal of Refrigeration*. 27, 761–773.
- Granryd, E., 2001. Hydrocarbons as refrigerants - an overview. *International Journal of Refrigeration*. 24, 15–24.
- Gupta, S., Pandyala, S., 2020. Flammability issue of hydrocarbons in air conditioning industry. *Materials Today: Proceedings*. 2–5.
- Harby, K., 2017. Hydrocarbons and their mixtures as alternatives to environmental unfriendly halogenated refrigerants: An updated overview. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 73, 1247–1264.
- He, M.G., Song, X.Z., Liu, H., Zhang, Y., 2014. Application of natural refrigerant propane and propane/isobutane in large capacity chest freezer. *Appl. Therm. Eng.* 70, 732–736.
- Hoehne, M.R., Hrnjak, P.S., 2004. Charge Minimization in Systems and Components Using Hydrocarbons as a Refrigerant. *Air Conditioning & Refrigeration Center*. 7–24.
- IPCC, 2014. Foreword, Preface, Dedication and In Memoriam. *Clim. Chang. 2014 Mitig. Clim. Chang. Contrib. Work. Gr. III to Fifth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Chang.* 1454.
- Jung, D., Kim, C.B., Song, K., Park, B., 2000. Testing of propane/isobutane mixture in domestic refrigerators. *International Journal of Refrigeration*. 23, 517–527.
- Jwo, C.S., Ting, C.C., Wang, W.R., 2009. Efficiency analysis of home refrigerators by replacing hydrocarbon refrigerants. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 42, 697–701.
- Lampugnani, G., Zgliczynski, M., 1996. R290 as a Substitute of R502 and R22 in Commercial Refrigeration and Air Conditioning. *Int. Compress. Eng. Conf.* 1–7.
- Lemmon, E.W., Huber, M.L., McLinden, M.O., 2010. NIST Standard Reference Database 23, Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties (REFPROP), version 9.0, National Institute of Standards and Technology.
- Martínez-Galván, I., González-Maciá, J., Corberán, J.M., Royo-Pastor, R., 2011. Oil type influence on the optimal charge and performance of a propane chiller. *International Journal of Refrigeration*. 34, 1000–1007.
- Padalkar, A.S., Mali, K. V., Devotta, S., 2014. Simulated and experimental performance of split packaged air conditioner using refrigerant HC-290 as a substitute for HCFC-22. *Appl. Therm. Eng.* 62, 277–284.
- Palm, B., 2008. Hydrocarbons as refrigerants in small heat pump and refrigeration systems - A review. *International Journal of Refrigeration*. 31, 552–563.
- Palm, B., 2007. Refrigeration systems with minimum charge of refrigerant. *Appl. Therm. Eng.* 27, 1693–1701.
- Park, K.J., Jung, D., 2007. Thermodynamic performance of HCFC22 alternative refrigerants for residential air-conditioning applications. *Energy Build.* 39, 675–680.
- Park, K.J., Seo, T., Jung, D., 2007. Performance of alternative refrigerants for residential air-conditioning applications. *Appl. Energy* 84, 985–991.
- Pavkovic, B., 2013. Refrigerants - Part 1: Properties and Air-Conditioning Applications. *REHVA J.* 7–11.
- Pinto, E.S., Bandarra Filho, E.P., Marcucci Pico, D.F., 2019. Fluidos frigoríficos alternativos para equipamentos de refrigeração comercial (R-290).
- Ruan, J., Liu, J., Xu, X., Chen, J., Li, G., 2018. Experimental study of an R290 split-type air conditioner using a falling film condenser. *Appl. Therm. Eng.* 140, 325–333.
- Sarbu, I., 2014. A review on substitution strategy of non-ecological refrigerants from vapour compression-based refrigeration, air-conditioning and heat pump systems. *International Journal of Refrigeration*. 46, 123–141.
- Tang, W., He, G., Cai, D., Zhu, Y., Zhang, A., Tian, Q., 2017. The experimental investigation of refrigerant distribution and leaking characteristics of R290 in split type household air conditioner. *Appl. Therm. Eng.* 115, 72–80.
- Tang, W., He, G., Zhou, S., Sun, W., Cai, D., Mei, K., 2018. The performance and risk assessment of R290 in a 13 kW air source heat pump. *Appl. Therm. Eng.* 144, 392–402.
- Teng, T.P., Mo, H.E., Lin, H., Tseng, Y.H., Liu, R.H., Long, Y.F., 2012. Retrofit assessment of window air conditioner.

Appl. Therm. Eng. 32, 100–107.

- Xu, B., Wang, Y., Chen, J., Li, F., Li, D., Pan, X., 2016. Investigation of domestic air conditioner with a novel low charge microchannel condenser suitable for hydrocarbon refrigerant. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 90, 338–348.
- Zhang, W., Yang, Z., Li, J., Ren, C.X., Lv, D., Wang, J., Zhang, X., Wu, W., 2013. Research on the flammability hazards of an air conditioner using refrigerant R-290. *International Journal of Refrigeration.* 36, 1483–1494.
- Zhang, W., Yang, Z., Zhang, X., Lv, D., Jiang, N., 2016. Experimental research on the explosion characteristics in the indoor and outdoor units of a split air conditioner using the R290 refrigerant. *International Journal of Refrigeration.* 67, 408–417.
- Zhou, G., Zhang, Y., 2010. Performance of a split-type air conditioner matched with coiled adiabatic capillary tubes using HCFC22 and HC290. *Appl. Energy* 87, 1522–1528.
- Zhou, W., Gan, Z., 2019. A potential approach for reducing the R290 charge in air conditioners and heat pumps. *International Journal of Refrigeration.* 101, 47–55.

STATE-OF-THE-ART ABOUT PERFORMANCE AND SAFETY OF R-290 AS A SUBSTITUTE FOR R-22

Abstract. *This work is a comprehensive review of the R-290's performance as a drop-in replacement for the R-22, without performing any change in the components of the system. Thus, changes in COP values, cooling and heating capacity, energy consumption, compressor discharge temperature and reduction in refrigerant charge will be presented, so that it is possible to have a sense of the feasibility of replacing the R-22 with R-290 in various HVAC&R equipment. The direct replacement results in significant increases in performance with always lower refrigerant charges, also reduces the impact on global warming, being a favorable substitute for the environment. In addition, the main studies and recommendations to reduce the risks inherent to refrigeration systems operating with flammable refrigerants will be presented, summarizing the main information that will assist in increasing the safety of systems that operate with R-290.*

Keywords: *R-290, R-22, drop-in, flammability, safety*