



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

REFRIGERANTE COM BAIXO GWP PARA SISTEMAS DE CONDICIONAMENTO DE AR AUTOMOTIVO: R1234yf, REVISÃO DA LITERATURA

Juan J. Garcia, langa_27@hotmail.com¹

Leandro Cristino, leandropereira@deii.cefetmg.br¹

Rémi Revellin, remi.revellin@insa-lyon.fr²

Matheus Porto, matheusporto@demec.ufmg.br¹

Luiz Machado, luizm@demec.ufmg.br¹

¹Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil

²Centre de Thermique de Lyon, Institut national des sciences appliquées, Lyon, França

Resumo: O uso do refrigerante R1234yf tem crescido constantemente na Europa e Estados Unidos. Porém, na América Latina, incluindo o Brasil, este fluido ainda não está no mercado, mas deverá ser usado em breve, tendo em vista as várias vantagens que ele apresenta em comparação a outros refrigerantes. Este trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre as características e feitos deste fluido refrigerante, com o objetivo de contribuir para um melhor entendimento e inclusão do fluido no âmbito científico e industrial no Brasil. A revisão abrange assuntos como o impacto ambiental esperado, o panorama de uso atual, estudos sobre as propriedades termodinâmicas e a compatibilidade com os óleos lubrificantes, pesquisas sobre os coeficientes de transferência de calor, perda de pressão e padrões em escoamento bifásico, estudos comparativos com o R134a sobre a performance em compressores, evaporadores e sistemas de refrigeração em geral.

Palavras-chave: Revisão, R1234yf, novos fluidos, refrigeração automotiva

1. INTRODUÇÃO

Durante os últimos vinte anos, o fluido HFC R134a tem sido útil em muitas aplicações. O R134a é o refrigerante mais comum em sistemas de ar condicionado automotivos (MAC). Ele não agride a camada de ozônio (potencial de destruição da camada de ozônio, ODP, igual a zero), mas tem um potencial de aquecimento global, GWP, de 1430, contribuindo para o efeito estufa (BOC, 2015). Com a aprovação da legislação na União Europeia, exigindo o uso de refrigerantes com um GWP inferior a 150 em todos os novos modelos de carros a partir de 2011, e em todos os veículos novos até 2017, o R134a será eliminado na Europa (EU, 2006). Os principais candidatos a substituir este fluido são refrigerantes naturais como amônia, dióxido de carbono ou misturas de hidrocarbonetos (HC); hidrofluorcarbonetos HFCs com baixo GWP, destacando R32 e R152a; e óleo hidrofluorcarbonetos HFOs, especificamente o R1234yf, desenvolvido pela Honeywell e DuPont (Spatz and Minor, 2008). Entre todas essas opções, o R1234yf tem sido proposto como o principal substituto para o R134a em sistemas de ar condicionado automotivo pelas propriedades termofísicas do R1234yf serem semelhantes ao R134a (Cho and Park, 2016).

O R1234yf ou 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene é um HFO (hidrofluorcarboneto derivado de alquenos), possui ODP zero e GWP de 4 (Nielsen *et al.*, 2007). Em termos de segurança, o R1234yf tem uma baixa toxicidade (Wilson and Koban, 2010), tem um limite inferior de inflamabilidade relativamente elevado, uma alta energia mínima de ignição e uma velocidade muito baixa de queima (Minor *et al.*, 2010a). Além disso, tem uma elevada temperatura de auto-ignição (678.15K) (Honeywell, 2008). Pelo descrito, foi definido com uma inflamabilidade leve, conforme a classificação "A2L" da ASHRAE (Richter *et al.*, 2011).

Atualmente, para o R1234yf, os investigadores e fabricantes focaram seus esforços, principalmente, na caracterização de sua inflamabilidade, toxicidade, impacto ambiental, compatibilidade com outros materiais (por exemplo, compatibilidade com o óleo lubrificante). As investigações também abordaram o desempenho do fluido em sistema de ar condicionado, dados das suas propriedades termofísicas, e ainda o desenvolvimento de equações de estado mais simples. Este artigo apresenta uma revisão detalhada dos progressos em cada um destes assuntos para o R1234yf, priorizando os estudos em escoamento bifásico.

2. ANTECEDENTES

Calm (2008) apresenta um resumo da história do desenvolvimento dos fluidos refrigerantes. A primeira geração de

fluidos de refrigerantes (HCs, amônia) foram inflamáveis, tóxicos ou altamente reativos, de modo que acidentes eram comuns. Veio depois a segunda geração (CFCs), mais seguros e duráveis porém agrediam a camada de ozônio. Em resposta, surgiu a terceira geração (HFCs). Os HFCs tiveram uma resposta muito bem sucedida para deter a destruição do ozônio. Porém estava na contra mão das mudanças climáticas (Brohan *et al.*, 2006). Assim, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) reportou "a maior parte do aumento observado na média global temperaturas desde a metade do século 20 ser muito provavelmente devido ao aumento observado nas concentrações de gases de efeito estufa antropogênicos" e que "influências humanas discerníveis agora se estendem a outros aspectos do clima, incluindo o aquecimento dos oceanos, as temperaturas médias continentais, temperaturas extremas e padrões de vento" (IPCC, 2007). Em resposta, os governos estabeleceram que os critérios que regem para uma nova geração de fluidos que devem incluir alta eficiência e baixo GWP (inicialmente 150 ou menor). Desde 2006 começou a necessidade dos fluidos refrigerantes de quarta geração.

O refrigerante usado atualmente na maioria dos sistemas MAC é o R134a. Sendo um fluido de efeito estufa, com GWP de 1430, o uso e as emissões de R134a têm estado sob crescente escrutínio a nível mundial (Taddonio, 2010). Yan *et al.* (2014) e Zhan *et al.* (2014) fizeram um estudo detalhado sobre as emissões de R134a, concluindo que há necessidade de este ser substituído. Entre as principais opções está o fluido R1234yf.

Dois grandes fabricantes de produtos químicos trabalham em conjunto (DuPont Fluorochemicals e Honeywell) no foco para o uso do R1234yf em sistemas com expansão direta e os principais fabricantes de automóveis já estão utilizando-o (Minor and Spatz, 2007).

Muitos estudos (Bansal *et al.*, 2011; Yang and Wu, 2013; Mclinden *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2015) confirmam o favoritismo do R1234yf como principal substituto do R134a em sistemas MAC, pois este fluido pode oferecer até 5% de melhoria da eficiência com modificações no ciclo simples. Algumas desvantagens são o processo de fabricação complexo de modo que as estimativas iniciais sugerem preços do refrigerante consideravelmente mais alto do que o R134a; é um pouco inflamável; necessidade de reprojetar o sistema para alcançar o desempenho ideal.

3. IMPACTO AMBIENTAL

Antes do uso do R1234yf em larga escala industrial, é necessária uma avaliação do comportamento químico na atmosfera dos novos fluidos refrigerantes HFOs. Para estimar os impactos ambientais dos HFOs, quatro itens precisam ser considerados: contribuição da perda do ozônio estratosférico; influência sobre o clima; formação de produtos nocivos ou tóxicos; impedimento para formação de ozônio troposférico (Wallington *et al.*, 2015).

Sobre o primeiro item, o R1234y não contém cloro e, por conseguinte, não contribui para a destruição catalítica de cloro com base de ozônio estratosférico ODP=0 (WMO, 2007). Sobre o segundo item, os efeitos do refrigerante são estimados em função do tempo de vida da molécula na atmosfera, Orkin *et al.* (1997) e Tovar *et al.* (2014) estabeleceram este valor para o R1234yf em aproximadamente 10-14 dias. Como resultado do tempo de vida curto, o GWP é pequeno (Papadimitriou *et al.*, 2008). No terceiro item, o R1234yf pode-se decompor por hidrólise em ácido trifluoroacético (CF₃COOH). Lueken *et al.* (2009) e Russell *et al.* (2012) concluíram que os níveis de ácido trifluoroacético, resultante do uso prolongado (50 anos) do R1234yf, não representa um risco para os ecossistemas. No último item, Wallington *et al.* (2010) concluem que os HFOs, incluindo o R1234yf, com um potencial fotoquímico de formação de ozônio (POCP) de 7, não fazem uma contribuição significativa para a formação de ozônio troposférico.

Em resumo, o R1234yf pode ser considerado ambientalmente aceitável. Porém, estudos continuam, recentemente Hiraoka *et al.* (2015) apresentaram um trabalho onde testaram a reatividade do R1234yf, concluindo que ele apresenta uma leve reatividade com alcóxidos.

4. TOXICIDADE

Os dados de toxicidade disponíveis para o R1234yf indicam um baixo potencial de toxicidade. Honeywell (2007) demonstrou que o fluido não gera alterações de ordem clínica e nem efeitos histopatológicos devido a inalação; também avaliou o potencial cancerígeno do R1234yf para o fígado e o rim em ratos machos, e a análise estatística estimou que o R1234yf é não-cancerígenos para estes órgãos. Além disso, R1234yf mostrou ausência de genotoxicidade em células de mamíferos, mas deu uma resposta positiva nos testes de mutagenicidade bacteriana (TNO, 2007). Schuster *et al.* (2008, 2010); Schmidt *et al.* (2012) fizeram estudos sobre a biotransformação do R1234yf em ratos, coelhos machos, coelhos fêmeas prenhas e não prenhas, e não foram observadas letalidade e sinais clínicos de toxicidade em nenhum grupo.

5. INFLAMABILIDADE

O R1234yf é ligeiramente inflamável devido à presença da ligação dupla de carbonos, apesar de ter a mesma proporção flúor-hidrogênio (F/H) que o R134a, que é não inflamável (Minor *et al.*, 2010b). Takizawa *et al.* (2009) estudaram a velocidade de queima, o limite de inflamabilidade e o calor de combustão para R1234yf e o classificaram na A2L da ASHRAE, significando que possui uma velocidade de queima menor que 10 cm/s. Também destacaram que é necessário considerar os efeitos da temperatura e a umidade. Em resposta, Kondo *et al.* (2012, 2014) estudaram a inflamabilidade para a faixa de temperaturas de 5°C a 100°C e a umidade variou de 0 a 90% para 23 °C. Os resultados mostraram que as faixas de inflamabilidade do R1234yf dependem marcadamente da temperatura e a umidade do ar devido à presença de mais átomos de flúor do que hidrogênio.

Takizawa *et al.* (2015) estudaram a energia e comprimentos mínimos de ignição para o fluido R1234yf e formularam correlações para seu cálculo. Mostraram que a energia mínima de ignição é uma ordem de grandeza maior quando comparada com o propano.

Finalmente, alguns estudos abordam a possibilidade de reduzir o grau de inflamabilidade. Por exemplo, Lee *et al.* (2013) mostraram que misturando o R1234yf com o 10% ou mais de R134a, o composto é virtualmente não inflamável, azeotrópico, GWP menor de 150. Esta mistura foi comparada em máquinas projetadas para R134a, e apresentou resultados similares de COP, capacidade de refrigeração e temperatura de descarga do fluido no compressor.

6. PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

A tabela 1 apresenta um resumo sobre os trabalhos feitos, as propriedades estudadas e tipo de trabalho, levantamento de dado experimentais ou formulação de modelos preditivos feitos para o R1234yf. Além disso, foram feitos trabalhos por Brown *et al.* (2009), Brown *et al.* (2010a), Lai *et al.* (2011), relacionados com as equações de estado das propriedades de termodinâmicas e de transporte para o fluido R1234yf.

Tabela 1: Estudos sobre as propriedades termofísicas do R1234yf.

Autor	Propriedade	Tipo de estudo
Minor and Spatz (2008)	Pressão de saturação	Experimental
Di Nicola <i>et al.</i> (2009)	Pressão de saturação	Experimental
Tanaka <i>et al.</i> (2009)	Massa específica de líquido Calor específico de líquido	Experimental
Akasaka <i>et al.</i> (2010)	Pressão de saturação Massa específica de líquido Calor específico de líquido	Modelo
Tanaka and Higashi (2010)	Temperatura crítica Pressão crítica Massa específica crítica Pressão de saturação Tensão superficial	Experimental
	Fator acêntrico Massa específica de líquido e vapor Calor de vaporização	Modelo
Brown <i>et al.</i> (2010b)	Massa específica Viscosidade Temperatura crítica Pressão crítica, Fator acêntrico Calor específico a pressão constante de vapor	Modelo
Fedele <i>et al.</i> (2011a)	Pressão de saturação	Experimental
Fedele <i>et al.</i> (2011b)	Massa específica de líquido	Experimental
Qiu <i>et al.</i> (2013)	Massa específica de líquido	Experimental
Meng <i>et al.</i> (2013)	Viscosidade de líquido	Experimental/modelo
Gao <i>et al.</i> (2014)	Calor específico constante de vapor de líquido	Experimental/modelo
Devocioğlu and Oruç (2015)	Massa específica e viscosidade de líquido	Experimental

7. COMPATIBILIDADE COM ÓLEOS LUBRIFICANTES

A miscibilidade do R1234yf com óleos lubrificantes foram estudadas pela primeira vez por Leck (2009), que mostraram que o fluido tem uma miscibilidade parcial com lubrificantes POE (poliol Ester). Além disso, Spatz (2009) apresentaram um diagrama mostrando a miscibilidade do R1234yf com alguns lubrificantes PAG (polialquilenoglicol) (temperatura crítica como função da fração de massa lubrificante). Bobbo *et al.* (2014) fizeram medições da miscibilidade do R1234yf em dois óleos PAG comerciais entre 258 K e 338 K e observaram que o fluido apresenta comportamentos diferentes do que o R134a.

Gordon *et al.* (2011) investigaram a migração do lubrificante para sistemas MAC com R134a para R1234yf. Eles apontaram que a migração lubrificante com R1234yf ainda está longe para ser compreendida completamente, mas certamente ela é afetada pela miscibilidade do refrigerante no lubrificante. Zilio *et al.* (2011a) mostraram como a miscibilidade do R1234yf em um óleo PAG afeta o desempenho térmico de um condensador multi-minicanais para aplicações automotivas.

Akram *et al.* (2013b,a) apresentaram estudos tribológicos comparativos entre o R134a e o R1234yf sem presença de lubrificante, especificamente para resistência a arranhões, atrito e desgaste. O R1234yf teve melhor desempenho tribológico em comparação com o R134a. Akram *et al.* (2014) estudaram o desempenho tribológico de ferro fundido cinzento (material da maioria dos compressores) com os lubrificantes PAG, POE e óleo mineral, na presença do R1234yf em duas temperaturas de operação (24°C e 110°C). PAG/R1234yf exibiram o melhor desempenho tribológico em comparação com

o de outras misturas.

Neto *et al.* (2014) estudaram as taxas de absorção do R1234yf em óleo lubrificante POE. Comparado com o R134a, o R1234yf mostrou oferecer taxas de absorção inferiores no óleo, o que pode resultar em valores mais elevados para o equilíbrio da pressão em sistemas de refrigeração. Sedrez and Barbosa (2015) compararam a permissividade relativa das misturas POE/R1234yf e POE/R134a, e os resultados mostraram que a permissividade relativa é ligeiramente menor quando o R1234yf é usado. Fortkamp and Barbosa (2015) apresentaram um estudo da dessorção de refrigerante levando à formação de espuma em misturas de refrigerante R134a e R1234yf com óleo POE submetidas a despressurização controlada, e os resultados foram similares para as duas misturas.

Recentemente Akram *et al.* (2016) estudaram novas soluções para diminuir o atrito em compressores com R1234yf. O fluido misturado com um poliéster aromático termo-endurecível (ATSP) e com politetrafluoroetileno (PTFE) como material de revestimento e usado com um óleo PAG. Os resultados mostraram uma redução de 69 % no atrito. Wang *et al.* (2016) pesquisou a solubilidade de R1234yf em pentaeritritol (PEC), que é um novo lubrificante.

8. ESCOAMENTO BIFÁSICO

Atualmente, os estudos do R1234yf associados ao desempenho de transferência de calor, a perda de pressão e padrões em escoamento bifásico (ebulição e condensação) é ainda limitada. A Tab. 2 apresenta, em ordem cronológica, um resumo dos trabalhos mais representativos.

Tabela 2: Estudos sobre escoamento bifásico para o R1234yf.

Autor	Resumo
Del Col <i>et al.</i> (2010)	Foram medidos os coeficientes de transferência de calor (HTC) locais durante a condensação de R1234yf e R134a em um minicanal de diâmetro 0,96 mm, temperatura de saturação de 40 °C, velocidade mássica, que varia entre 200 e 1000 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$. O HTC resulta ser menor em comparação com o R134a.
	A perda de pressão (DP) para condensação de R1234yf e R134a em um tubo circular de diâmetro de 0,76 e 0,96 mm, temperatura de saturação de 40 °C, velocidade mássica de 400, 600 e 800 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$. O fluido R1234yf exibe uma menor perda de pressão de 10 a 12%, em comparação com R134a, nas mesmas condições de operação.
Park and Jung (2010)	O HTC em ebulição nucleada R134a e R1234yf foram medidos em uma superfície plana. Temperatura de 7 °C em uma placa de cobre horizontal (9,53 x 9,53 mm ²), em fluxos de calor de 10 a 200 $kW\ m^{-2}$. Os resultados mostram que os HTCs são muito semelhantes para os dois fluidos. As correlações convencionais sobre ebulição nucleada podem ser utilizados para o R1234yf com uma boa precisão.
Park <i>et al.</i> (2011)	O HTC de condensação externo R134a e R1234yf são medidos para tubo liso, mini aletado e Turbo-C, temperatura de saturação 39 °C com o sub-resfriamento na parede entre 3 e 8 °C. Os dois fluidos apresentaram comportamento muito próximos.
Padilla <i>et al.</i> (2011)	O escoamento bifásico foi observado para R1234yf e R134a em um tubo de vidro de 6,70 mm com uma câmara de alta velocidade. Não foi observada nenhuma diferença principal entre os dois refrigerantes. Os padrões de escoamento do R1234yf foram satisfatoriamente previstos pelo modelo Wojtan <i>et al.</i> (2005).
	A DP em escoamento bifásico para o R1234yf, R134a e R410A em tubos de horizontais são apresentados. O diâmetro do tubo varia de 7,90 a 10,85 mm. A velocidade mássica varia de 187 a 1702 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ e as temperaturas de saturação de 4,8 a 20,7 °C. A DP do R134a é maior do que a DP do R1234yf. A correlação de Müller-Steinhagen and Heck (1986) fornecem valores cerca de 90% dos dados dentro de uma faixa de erro $\pm 30\%$.
Saitoh <i>et al.</i> (2011)	O HTC em ebulição do R1234yf no interior de um tubo horizontal de diâmetro de 2 mm foi estudado experimentalmente. O fluxo de calor entre 6 e 24 $kW\ m^{-2}$, as velocidades mássicas de 100 a 400 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$, temperatura de evaporação de 288,15 K e título de vapor de entrada de 0 a 0.25. O HTC do R1234yf foi quase o mesmo do que para o R-134a. A correlação de Saitoh <i>et al.</i> (2007) teve o menor erro para estimar o HTC.
	A DP foi medida para as mesmas condições acima mencionadas. A correlação de Chisholm (1967) mostrou-se adequada.
Mortada <i>et al.</i> (2012)	O HTC local em ebulição para o R1234yf e R134a para um arranjo de 6 minicanais retangulares com diâmetro hidráulico de 1,1 mm. As condições de teste foram variadas nas seguintes faixas: velocidades mássicas de 20 a 100 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$, fluxo de calor de 2 a 15 $kW\ m^{-2}$ e título de 0 até 1. O HTC local foi maior para o R1234yf. Foi proposta uma correlação com um erro máximo de 15%.

Tabela 2: Continuação.

Autor	Resumo
Padilla <i>et al.</i> (2012)	Os padrões de escoamento bifásico do R1234yf e do R134a em uma curva de 180° horizontal 6,7 mm de diâmetro interno e 25 mm de radio de curvatura são estudados.
	A DP para escoamento bifásico de R1234yf e R134a curvas de retorno horizontal com diâmetros internos de 7,90 a 10,85 mm e raios de curvatura de 3,68 a 4.05.
Li <i>et al.</i> (2012)	O HTC do R1234yf foi medido em um tubo horizontal de diâmetro 2 mm. Velocidades mássicas de 100 a 400 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ e fluxo de calor de 6 a 24 $kW\ m^{-2}$
Wang <i>et al.</i> (2012)	O HTC em condensação do R1234yf foi medido em um tubo horizontal de diâmetro 4 mm. As faixas de operação velocidades mássicas de 100 a 400 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ e diferentes temperaturas de saturação (40, 45, e 50 °C). A correlação Haraguchi (1994)de apresentou 10,8% de erro.
	A DP em escoamento bifásico foi medida para as mesma condições. A correlação Chisholm (1967) mostrou bons resultados.
Moreno <i>et al.</i> (2013)	Estudo da ebulição em vaso do R1234yf e R134a para superfícies lisas e com microporos, em pressões de 0,7 to 1,7 MPa. Confirmação da similaridade dos fluidos.
Wang (2013)	Revisão e análise do HTC em escoamento bifásico para o R1234yf baseado em dados apresentados por Park and Jung (2010); Park <i>et al.</i> (2011); Saitoh <i>et al.</i> (2011); Li <i>et al.</i> (2012); Mortada <i>et al.</i> (2012); Padilla <i>et al.</i> (2011, 2012); Del Col <i>et al.</i> (2010); Wang <i>et al.</i> (2012); Moreno <i>et al.</i> (2013)
Han <i>et al.</i> (2013)	Estudo do HTC em ebulição do R1234yf em um tubo de 7 mm micro-aletado. Velocidades mássicas de 100, 200 e 400 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ e fluxo de calor de 4, 8 e 12 kW/m^2 , as temperaturas de saturação de 5, 15 °C e concentrações de óleo de 0, 1,5, 3,0 e 5,0 %.
Padilla <i>et al.</i> (2013a)	Medição da DP em escoamento bifásico para o R1234yf, R-134a e R-410A em contrações de 49% horizontais . Os testes foram com diferentes diâmetros (10,85, 7,90 e 5,30 mm), temperaturas de saturação a partir de 4,4 a 20,4 °C, velocidade de mássica de 188,71 a 966,14 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$. Foi proposta uma correção que estima 95% dos dados dentro de uma faixa de erro $\pm 30\%$
Padilla <i>et al.</i> (2013b)	Padrões de escoamento bifásico do R1234yf e do R134a em uma curva de 180° vertical, 6,7 mm de diâmetro interno e 25 mm de radio de curvatura são estudados.
	A DP para escoamento bifásico de R1234yf e R134a curvas de retorno vertical com diâmetros internos de 7,90 a 10,85 mm e raios de curvatura de 3,68 a 4.05.
Lu <i>et al.</i> (2013)	O HTC do R1234yf e R134a foi medido em um tubo horizontal liso de diâmetro 3,9 mm. Velocidades mássicas de 200 e 400 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ e fluxo de calor de 5 a 19 $kW\ m^{-2}$. Os resultados mostram que a diferença no HTC entre R1234yf e o R134a é pequena.
	A DP para as mesmas condições foi medida. A DP para o R134a é aproximadamente de 5 a 15% maior do que a de R1234yf, devido à sua velocidade de vapor superficial mais elevada.
Del Col <i>et al.</i> (2013)	O HTC local é medido durante a ebulição de R1234yf e R134a em un tubo de 1 mm diâmetro. A temperatura de saturação é 31 °C. Velocidades mássicas de 300 e 500 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$. Não foi observada uma diferença importantes entre o comportamento para os dois fluidos.
Choi <i>et al.</i> (2014)	Comparação do HTC em evaporação de R744 (CO ₂), R717 (NH ₃), R290 (C ₃ H ₈) e R1234yf em tubo de aço inoxidável horizontal. Fluxo de calor de 5 a 60 $kW\ m^{-2}$, velocidades mássicas de 50 e 600 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$, as temperaturas de saturação de 0 a 10 °C . Diâmetros de 1,5 e 3,0 mm. R744 apresentou o HTC mais alto. Uma nova correlação foi proposta, estima o HTC para o R1234yf com erro máximo de 24%.
Illán-Gómez <i>et al.</i> (2015)	O HTC em condensação para um arranjo de minicanais com R1234yf e R134a. Velocidades mássicas de 350 e 948 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$, as temperaturas de saturação de 30 a 55 °C, fluxo de calor de 0 a 20 $kW\ m^{-2}$. O HTC do R1234yf parece ser menor do que R134a.
	A DP foi medida nas mesmas condições. No caso do R1234yf a DP foi menor do que para R134a.
Botticella <i>et al.</i> (2015)	Apresentação de valores experimentais para o fluxo crítico de calor (CHF) para o R1234yf em um dissipador de calor de alumínio composto por sete mini-canais, cada um deles 2 x 1 mm ² . O comprimento aquecido foi de 25 mm. Temperaturas de saturação 25 até 65 °C, velocidade mássica 0 até 300 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$.
Diani <i>et al.</i> (2015a)	Apresentação de resultados experimentais sobre HTC a ebulição de R1234yf dentro de um tubo mini-Microfin.O tubo tem um diâmetro interno de 3,4 mm, 40 aletas de 0,12 mm de altura. A velocidade da massa foi variada 190 até 940 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$, o fluxo de calor de 10 a 50 $kW\ m^{-2}$ e a temperatura de saturação na entrada 30 °C. Foi proposta uma nova correlação.
	A DP foi medida para as mesmas condições. Foi proposta uma nova correlação.

Tabela 2: Continuação.

Autor	Resumo
Anwar <i>et al.</i> (2015)	O HTC do R1234yf e R134a foi medido em um tubo vertical liso de diâmetro 1,6 mm. Velocidades mássicas de 100 e 500 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ e fluxo de calor de 5 a 130 $kW\ m^{-2}$, Temperaturas de saturação 27 até 32 °C. A melhor correlação foi Gungor and Winterton (1986)
	A DP foi medida para as mesmas condições. A melhor correlação foi Gungor and Winterton (1986); Mishima and Hibiki (1996)
Diani <i>et al.</i> (2015b)	O HTC do R1234yf e R1234ze (E), durante a ebulição sobre uma espuma de cobre de alta porosidade horizontal com 5 poros por polegada (PPI). Velocidades mássicas de 50 e 200 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ e fluxo de calor de 50, 75 e 100 kW/m^2 , a temperatura de saturação é 30 °C.
	A DP foi medida para as mesmas condições.
Mastrullo <i>et al.</i> (2016)	O CHF para R1234yf, R1234ze e R134a para uma seção de teste multi-minicanal de alumínio. O dissipador de calor de alumínio utilizado como seção de teste é composto de sete minicanais, cada um deles com diâmetro hidráulico interno de 1,33 mm. A melhor correlação foi Martín-Callizo <i>et al.</i> (2008).

9. PERFORMANCE EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Estudos sobre desempenho do fluido R1234yf como refrigerante estão orientados principalmente na área de ar condicionado automotivo (MAC). Os primeiros estudos Bang (2008); Meyer (2008); Zilio *et al.* (2009); Petijean and Benouali (2010); Mathur (2010); Zilio *et al.* (2011b); Lee and Jung (2012); Zhao *et al.* (2012) fizeram comparações entre o R134a e o R1234yf em relação ao desempenho global em sistemas MAC. Seybold *et al.* (2010); Qi (2013); Cho *et al.* (2013) estudaram os efeitos do uso de R1234yf nos trocadores de calor de sistemas MAC. Análises de exergia foram feitas por Li *et al.* (2014); Cho and Park (2016) em sistemas MAC. Recentemente, Qi (2015) estudou as modificações que podem ser feitas para elevar a performance em sistemas MAC que trabalham com R1234yf. Dos pouquíssimos trabalhos publicados pelo Brasil, Sotomayor and Parise (2016) fez um modelo de um compressor para sistemas MAC com R1234yf.

Existem trabalhos recentes que apontam para o uso do R1234yf em sistemas térmicos como refrigeradores (Janković *et al.*, 2015; Belman-Flores and Ledesma, 2015) e bombas de calor (Botticella and Viscito, 2015; Abas *et al.*, 2015).

10. CONCLUSÕES

Uma revisão na literatura aberta foi feita sobre inclusão do novo fluido HFO, R1234yf na área da refrigeração e condicionamento de ar. Existe uma limitada quantidade de estudos sobre o tema em geral e há questões ainda sem respostas. O fluido R1234yf é o principal candidato para substituir ao R134a em sistemas MAC. O desempenho do R1234yf é ligeiramente menor do R134a.

Por outro lado, Europa e América do Norte já estão implementando medidas para o uso de refrigerantes com baixo GWP e o Brasil tem contribuído muito pouco com esta iniciativa. Portanto, os estudos sobre refrigerantes como o R1234yf nas universidades do Brasil carecem de maiores incentivos e aprofundamentos.

11. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil

12. REFERÊNCIAS

- Abas, N., Nawaz, R. and Khan, N., 2015. "Parametric quantification of low gwp refrigerant for thermosyphon driven solar water heating system". *Procedia Computer Science*, Vol. 52, pp. 804–811.
- Akasaka, R., Tanaka, K. and Higashi, Y., 2010. "Thermodynamic property modeling for 2, 3, 3, 3-tetrafluoropropene (hfo-1234yf)". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33, No. 1, pp. 52–60.
- Akram, M.W., Meyer, J.L. and Polycarpou, A.A., 2016. "Tribological interactions of advanced polymeric coatings with polyalkylene glycol lubricant and r1234yf refrigerant". *Tribology International*.
- Akram, M.W., Polychronopoulou, K. and Polycarpou, A.A., 2013a. "Lubricity of environmentally friendly hfo-1234yf refrigerant". *Tribology International*, Vol. 57, pp. 92–100.
- Akram, M.W., Polychronopoulou, K. and Polycarpou, A.A., 2014. "Tribological performance comparing different refrigerant–lubricant systems: The case of environmentally friendly hfo-1234yf refrigerant". *Tribology International*, Vol. 78, pp. 176–186.
- Akram, M.W., Polychronopoulou, K., Seeton, C. and Polycarpou, A.A., 2013b. "Tribological performance of environmentally friendly refrigerant hfo-1234 yf under starved lubricated conditions". *Wear*, Vol. 304, No. 1, pp. 191–201.
- Anwar, Z., Palm, B. and Khodabandeh, R., 2015. "Flow boiling heat transfer, pressure drop and dryout characteristics of r1234yf: experimental results and predictions". *Experimental Thermal and fluid Science*, Vol. 66, pp. 137–149.

- Bang, S., 2008. "Evaluation result of hfo-1234yf as an alternative refrigerant for automotive air conditioning". In *Proceedings of the VDA alternative refrigerant winter meeting, Saalfelden, Austria*.
- Bansal, P., Vineyard, E. and Abdelaziz, O., 2011. "Advances in household appliances-a review". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 17, pp. 3748–3760.
- Belman-Flores, J. and Ledesma, S., 2015. "Statistical analysis of the energy performance of a refrigeration system working with r1234yf using artificial neural networks". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 82, pp. 8–17.
- Bobbo, S., Zilio, C., Scattolini, M. and Fedele, L., 2014. "R1234yf as a substitute of r134a in automotive air conditioning. solubility measurements in two commercial pag oils". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 40, pp. 302–308.
- BOC, 2015. "R1234yf opteon® yf. automotive refrigerant with low global warming potential".
- Botticella, F., Imparato, W. and Viscito, L., 2015. "Experimental validation of critical heat flux (chf) predictive methods for a new synthetic fluid with low environmental impact". *Energy Procedia*, Vol. 82, pp. 870–877.
- Botticella, F. and Viscito, L., 2015. "Seasonal performance analysis of a residential heat pump using different fluids with low environmental impact". *Energy Procedia*, Vol. 82, pp. 878–885.
- Brohan, P., Kennedy, J., Harris, I., Tett, S. and Jones, P., 2006. "Improved analyses of changes and uncertainties in marine temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: the hadsst2 dataset". *J Climate*, Vol. 19.
- Brown, J.S., Zilio, C. and Cavallini, A., 2009. "Estimations of the thermodynamic and transport properties of r-1234yf using a cubic equation of state and group contribution methods". In *Proceedings of the 3rd IIR Conference on Thermophysical Properties and*. pp. 23–26.
- Brown, J.S., Zilio, C. and Cavallini, A., 2010a. "Critical review of the latest thermodynamic and transport property data and models, and equations of state for r-1234yf".
- Brown, J.S., Zilio, C. and Cavallini, A., 2010b. "Thermodynamic properties of eight fluorinated olefins". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33, No. 2, pp. 235–241.
- Calm, J.M., 2008. "The next generation of refrigerants—historical review, considerations, and outlook". *international Journal of Refrigeration*, Vol. 31, No. 7, pp. 1123–1133.
- Chisholm, D., 1967. "A theoretical basis for the lockhart-martinelli correlation for two-phase flow". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 10, No. 12, pp. 1767–1778.
- Cho, H., Lee, H. and Park, C., 2013. "Performance characteristics of an automobile air conditioning system with internal heat exchanger using refrigerant r1234yf". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 61, No. 2, pp. 563–569.
- Cho, H. and Park, C., 2016. "Experimental investigation of performance and exergy analysis of automotive air conditioning systems using refrigerant r1234yf at various compressor speeds". *Applied Thermal Engineering*.
- Choi, K.I., Oh, J.T., Saito, K. and Jeong, J.S., 2014. "Comparison of heat transfer coefficient during evaporation of natural refrigerants and r-1234yf in horizontal small tube". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 41, pp. 210–218.
- Del Col, D., Torresin, D. and Cavallini, A., 2010. "Heat transfer and pressure drop during condensation of the low gwp refrigerant r1234yf". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33, No. 7, pp. 1307–1318.
- Del Col, D., Bortolin, S., Torresin, D. and Cavallini, A., 2013. "Flow boiling of r1234yf in a 1 mm diameter channel". *International journal of refrigeration*, Vol. 36, No. 2, pp. 353–362.
- Devecioglu, A.G. and Oruç, V., 2015. "Characteristics of some new generation refrigerants with low gwp". *Energy Procedia*, Vol. 75, pp. 1452–1457.
- Di Nicola, G., Polonara, F. and Santori, G., 2009. "Saturated pressure measurements of 2, 3, 3, 3-tetrafluoroprop-1-ene (hfo-1234yf)". *Journal of Chemical & Engineering Data*, Vol. 55, No. 1, pp. 201–204.
- Diani, A., Mancin, S. and Rossetto, L., 2015a. "Flow boiling heat transfer of r1234yf inside a 3.4 mm id microfin tube". *Experimental Thermal and fluid Science*, Vol. 66, pp. 127–136.
- Diani, A., Mancin, S., Doretti, L. and Rossetto, L., 2015b. "Low-gwp refrigerants flow boiling heat transfer in a 5 ppi copper foam". *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 76, pp. 111–121.
- EU, 2006. "Directive 2006/40/ec of the european parliament and of the council of 17 may 2006 relating to emissions from airconditioning systems in motor vehicles and amending council directive 70/156/ec". *Official J. of the European Union*.
- Fedele, L., Bobbo, S., Groppo, F., Brown, J.S. and Zilio, C., 2011a. "Saturated pressure measurements of 2, 3, 3, 3-tetrafluoroprop-1-ene (r1234yf) for reduced temperatures ranging from 0.67 to 0.93". *Journal of Chemical & Engineering Data*, Vol. 56, No. 5, pp. 2608–2612.
- Fedele, L., Brown, J.S., Colla, L., Ferron, A., Bobbo, S. and Zilio, C., 2011b. "Compressed liquid density measurements for 2, 3, 3, 3-tetrafluoroprop-1-ene (r1234yf)". *Journal of Chemical & Engineering Data*, Vol. 57, No. 2, pp. 482–489.
- Fortkamp, F.P. and Barbosa, J.R., 2015. "Refrigerant desorption and foaming in mixtures of hfc-134a and hfo-1234yf and a polyol ester lubricating oil". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 53, pp. 69–79.
- Gao, N., Jiang, Y., Wu, J., He, Y. and Chen, G., 2014. "Measurements of the isobaric heat capacity of r1234yf in liquid phase at temperatures from 305k to 355k and pressures up to 5mpa". *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 376, pp. 64–68.
- Gordon, T., Eustice, H. and Brooks, W., 2011. "Automotive ac system oil migration hfo-1234yf vs. r134a". Technical report, SAE Technical Paper.
- Gungor, K. and Winterton, R., 1986. "A general correlation for flow boiling in tubes and annuli". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 29, No. 3, pp. 351 – 358. ISSN 0017-9310.
- Han, X., Li, P., Yuan, X., Wang, Q. and Chen, G., 2013. "The boiling heat transfer characteristics of the mixture hfo-1234yf/oil inside a micro-fin tube". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 67, pp. 1122–1130.

- Haraguchi, H., 1994. "Condensation of refrigerants hfc22, hfc134a and hfc123 in a horizontal smooth tube (2nd report, proposals of empirical expressions for local heat transfer coefficient).". *Trans. JSME,(B)*, Vol. 60, No. 574, pp. 239–244.
- Hiraoka, Y., Kawasaki-Takasuka, T., Morizawa, Y. and Yamazaki, T., 2015. "Synthetic utility of 2, 3, 3, 3-tetrafluoroprop-1-ene (hfo-1234yf)". *Journal of Fluorine Chemistry*, Vol. 179, pp. 71–76.
- Honeywell, 2007. "Toxicogenomic assessment of the carcinogenic potential of 2,3,3,3- tetrafluoropropene".
- Honeywell, 2008. "Material safety data sheet for 2,3,3,3-tetrafluoropropene (hfo-1234yf)".
- Illán-Gómez, F., López-Belchí, A., García-Cascales, J. and Vera-García, F., 2015. "Experimental two-phase heat transfer coefficient and frictional pressure drop inside mini-channels during condensation with r1234yf and r134a". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 51, pp. 12–23.
- IPCC, 2007. "Climate change 2007: The physical science basis - summary for policymakers." Technical report, World Meteorological Organization and United Nations Environment Programme.
- Janković, Z., Atienza, J.S. and Suárez, J.A.M., 2015. "Thermodynamic and heat transfer analyses for r1234yf and r1234ze (e) as drop-in replacements for r134a in a small power refrigerating system". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 80, pp. 42–54.
- Kondo, S., Takizawa, K. and Tokuhashi, K., 2012. "Effects of temperature and humidity on the flammability limits of several 2l refrigerants". *Journal of Fluorine Chemistry*, Vol. 144, pp. 130–136.
- Kondo, S., Takizawa, K. and Tokuhashi, K., 2014. "Effect of high humidity on flammability property of a few non-flammable refrigerants". *Journal of Fluorine Chemistry*, Vol. 161, pp. 29–33.
- Lai, N.A., Vrabec, J., Raabe, G., Fischer, J. and Wendland, M., 2011. "Description of hfo-1234yf with backbone equation of state". *Fluid phase equilibria*, Vol. 305, No. 2, pp. 204–211.
- Leck, T., 2009. "Evaluation of hfo-1234yf as a replacement for r-134a in refrigeration and air conditioning applications". In *Proc. 3rd IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, Boulder, CO, USA (Paper No. 155)*.
- Lee, Y. and Jung, D., 2012. "A brief performance comparison of r1234yf and r134a in a bench tester for automobile applications". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 35, pp. 240–242.
- Lee, Y., Kang, D.g. and Jung, D., 2013. "Performance of virtually non-flammable azeotropic hfo1234yf/hfc134a mixture for hfc134a applications". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 36, No. 4, pp. 1203–1207.
- Li, G., Eisele, M., Lee, H., Hwang, Y. and Radermacher, R., 2014. "Experimental investigation of energy and exergy performance of secondary loop automotive air-conditioning systems using low-gwp (global warming potential) refrigerants". *Energy*, Vol. 68, pp. 819–831.
- Li, M., Dang, C. and Hihara, E., 2012. "Flow boiling heat transfer of hfo1234yf and r32 refrigerant mixtures in a smooth horizontal tube: Part i. experimental investigation". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 13, pp. 3437–3446.
- Lu, M.C., Tong, J.R. and Wang, C.C., 2013. "Investigation of the two-phase convective boiling of hfo-1234yf in a 3.9 mm diameter tube". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 65, pp. 545–551.
- Luecken, D.J., L. Waterland, R., Papasavva, S., Taddonio, K.N., Hutzell, W.T., Rugh, J.P. and Andersen, S.O., 2009. "Ozone and tfa impacts in north america from degradation of 2, 3, 3, 3-tetrafluoropropene (hfo-1234yf), a potential greenhouse gas replacement". *Environmental science & technology*, Vol. 44, No. 1, pp. 343–348.
- Martín-Callizo, C., Ali, R. and Palm, B., 2008. "Dryout incipience and critical heat flux in saturated flow boiling of refrigerants in a vertical uniformly heated microchannel". In *ASME 2008 6th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*. American Society of Mechanical Engineers, pp. 705–712.
- Mastrullo, R., Mauro, A., Thome, J., Vanoli, G. and Viscito, L., 2016. "Critical heat flux: Performance of r1234yf, r1234ze and r134a in an aluminum multi-minichannel heat sink at high saturation temperatures". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 106, pp. 1–17.
- Mathur, G.D., 2010. "Experimental investigation of ac system performance with hfo-1234yf as the working fluid". Technical report, SAE Technical Paper.
- Mclinden, M.O., Kazakov, A.F., Brown, J.S. and Domanski, P.A., 2014. "A thermodynamic analysis of refrigerants: Possibilities and tradeoffs for low-gwp refrigerants". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 38, pp. 80–92.
- Meng, X., Qiu, G., Wu, J. and Abdulagatov, I.M., 2013. "Viscosity measurements for 2, 3, 3, 3-tetrafluoroprop-1-ene (r1234yf) and trans-1, 3, 3, 3-tetrafluoropropene (r1234ze (e))". *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol. 63, pp. 24–30.
- Meyer, J., 2008. "R1234yf system enhancements and comparison to r134a". In *Proceedings of the SAE alternative refrigerant systems symposium, Phoenix, AZ, USA*.
- Minor, B. and Spatz, M., 2008. "Hfo-1234yf low gwp refrigerant update". In *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*.
- Minor, B.H., Herrmann, D. and Gravell, R., 2010a. "Flammability characteristics of hfo-1234yf". *Process Safety Progress*, Vol. 29, No. 2, pp. 150–154.
- Minor, B.H., Herrmann, D. and Gravell, R., 2010b. "Flammability characteristics of hfo-1234yf". *Process Safety Progress*, Vol. 29, No. 2, pp. 150–154. ISSN 1547-5913.
- Minor, B. and Spatz, M., 2007. "Hfo-1234yf – a low gwp refrigerant for macs– honeywell/dupont joint collaboration." In *2nd European Workshop on Mobile Air Conditioning and Auxiliaries*.

- Mishima, K. and Hibiki, T., 1996. "Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes". *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 22, No. 4, pp. 703 – 712. ISSN 0301-9322.
- Moreno, G., Narumanchi, S. and King, C., 2013. "Pool boiling heat transfer characteristics of hfo-1234yf on plain and microporous-enhanced surfaces". *Journal of Heat Transfer*, Vol. 135, No. 11, p. 111014.
- Mortada, S., Zoughaib, A., Arzano-Daurelle, C. and Clodic, D., 2012. "Boiling heat transfer and pressure drop of r-134a and r-1234yf in minichannels for low mass fluxes". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, No. 4, pp. 962–973.
- Müller-Steinhagen, H. and Heck, K., 1986. "A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes". *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 20, No. 6, pp. 297–308.
- Neto, M.A.M., França, R.M. and Barbosa, J.R., 2014. "Convection-driven absorption of r-1234yf in lubricating oil". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 44, pp. 151–160.
- Nielsen, O., Javadi, M.S., Andersen, M.S., Hurley, M.D., Wallington, T.J. and Singh, R., 2007. "Atmospheric chemistry of cf₃cfch₂: Kinetics and mechanisms of gas-phase reactions with cl atoms, oh radicals, and o³". *Chemical Physics Letters*, Vol. 439, No. 1, pp. 18–22.
- Orkin, V.L., Huie, R.E. and Kurylo, M.J., 1997. "Rate constants for the reactions of oh with hfc-245cb (ch₃cf₂cf₃) and some fluoroalkenes (ch₂chcf₃, ch₂cfcf₃, cf₂cfcf₃, and cf₂cf₂)". *The Journal of Physical Chemistry A*, Vol. 101, No. 48, pp. 9118–9124.
- Padilla, M., Revellin, R. and Bonjour, J., 2012. "Two-phase flow visualization and pressure drop measurements of hfo-1234yf and r-134a refrigerants in horizontal return bends". *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 39, pp. 98–111.
- Padilla, M., Revellin, R. and Bonjour, J., 2013a. "Two-phase flow of hfo-1234yf, r-134a and r-410a in sudden contractions: Visualization, pressure drop measurements and new prediction method". *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 47, pp. 186–205.
- Padilla, M., Revellin, R., Haberschill, P., Bensafi, A. and Bonjour, J., 2011. "Flow regimes and two-phase pressure gradient in horizontal straight tubes: Experimental results for hfo-1234yf, r-134a and r-410a". *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, No. 6, pp. 1113–1126.
- Padilla, M., Revellin, R., Wallet, J. and Bonjour, J., 2013b. "Flow regime visualization and pressure drops of hfo-1234yf, r-134a and r-410a during downward two-phase flow in vertical return bends". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 40, pp. 116–134.
- Papadimitriou, V., Talukdar, R., Portmann, R., Ravishankara, A. and Burkholder, J., 2008. "Cf₃cf=ch₂ and (z)-cf₃cf=chf: temperature dependent oh rate coefficients and global warming potentials". *Physical Chemistry Cambridge*, Vol. 10, No. 6, p. 808.
- Park, C., Lee, H., Hwang, Y. and Radermacher, R., 2015. "Recent advances in vapor compression cycle technologies". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 60, pp. 118–134.
- Park, K.J. and Jung, D., 2010. "Nucleate boiling heat transfer coefficients of r1234yf on plain and low fin surfaces". *International Journal of refrigeration*, Vol. 33, No. 3, pp. 553–557.
- Park, K.J., Kang, D.G. and Jung, D., 2011. "Condensation heat transfer coefficients of r1234yf on plain, low fin, and turbo-c tubes". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 34, No. 1, pp. 317–321.
- Petijean, S. and Benouali, J., 2010. "R-1234yf validation & a/c system energy efficiency improvements". In *SAE Alternate Refrigerant Symposium. Scottsdale, (AZ): AARS*.
- Qi, Z., 2013. "Experimental study on evaporator performance in mobile air conditioning system using hfo-1234yf as working fluid". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 53, No. 1, pp. 124–130.
- Qi, Z., 2015. "Performance improvement potentials of r1234yf mobile air conditioning system". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 58, pp. 35–40.
- Qiu, G., Meng, X. and Wu, J., 2013. "Density measurements for 2, 3, 3, 3-tetrafluoroprop-1-ene (r1234yf) and trans-1, 3, 3, 3-tetrafluoropropene (r1234ze (e))". *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol. 60, pp. 150–158.
- Richter, M., McLinden, M.O. and Lemmon, E.W., 2011. "Thermodynamic properties of 2, 3, 3, 3-tetrafluoroprop-1-ene (r1234yf): Vapor pressure and p–ρ–t measurements and an equation of state". *Journal of Chemical & Engineering Data*, Vol. 56, No. 7, pp. 3254–3264.
- Russell, M.H., Hoogeweg, G., Webster, E.M., Ellis, D.A., Waterland, R.L. and Hoke, R.A., 2012. "Tfa from hfo-1234yf: Accumulation and aquatic risk in terminal water bodies". *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 31, No. 9, pp. 1957–1965.
- Saitoh, S., Daiguji, H. and Hihara, E., 2007. "Correlation for boiling heat transfer of r-134a in horizontal tubes including effect of tube diameter". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 25, pp. 5215–5225.
- Saitoh, S., Dang, C., Nakamura, Y. and Hihara, E., 2011. "Boiling heat transfer of hfo-1234yf flowing in a smooth small-diameter horizontal tube". *international journal of refrigeration*, Vol. 34, No. 8, pp. 1846–1853.
- Schmidt, T., Bertermann, R., Rusch, G.M., Hoffman, G.M. and Dekant, W., 2012. "Biotransformation of 2, 3, 3, 3-tetrafluoropropene (hfo-1234yf) in male, pregnant and non-pregnant female rabbits after single high dose inhalation exposure". *Toxicology and applied pharmacology*, Vol. 263, No. 1, pp. 32–38.
- Schuster, P., Bertermann, R., Rusch, G.M. and Dekant, W., 2010. "Biotransformation of 2, 3, 3, 3-tetrafluoropropene (hfo-1234yf) in rabbits". *Toxicology and applied pharmacology*, Vol. 244, No. 3, pp. 247–253.
- Schuster, P., Bertermann, R., Snow, T.A., Han, X., Rusch, G.M., Jepson, G.W. and Dekant, W., 2008. "Biotransformation

- of 2, 3, 3, 3-tetrafluoropropene (hfo-1234yf)". *Toxicology and applied pharmacology*, Vol. 233, No. 2, pp. 323–332.
- Sedrez, P.C. and Barbosa, J.R., 2015. "Relative permittivity of mixtures of r-134a and r-1234yf and a polyol ester lubricating oil". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 49, pp. 141–150.
- Seybold, L., Hill, W. and Zimmer, C., 2010. "Internal heat exchanger design performance criteria for r134a and hfo-1234yf". Technical report, SAE Technical Paper.
- Sotomayor, P.O. and Parise, J.A.R., 2016. "Characterization and simulation of an open piston compressor for application on automotive air-conditioning systems operating with r134a, r1234yf and r290". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 61, pp. 100–116.
- Spatz, M., 2009. "Hfo-1234yf technology update—part ii". In *VDA Alternative Refrigerant Winter Meeting, Saalfelden, Australia*.
- Spatz, M. and Minor, B., 2008. "Hfo-1234yf: A low gwp refrigerant for mac". In *VDA Alternative Refrigerant Winter Meeting*. pp. 13–14.
- Taddonio, K.N., 2010. "Immediate opportunity for large greenhouse gas emissions reductions with new mobile air conditioning refrigerants". *Journal of Integrative Environmental Sciences*, Vol. 7, No. S1, pp. 175–186.
- Takizawa, K., Igarashi, N., Takagi, S., Tokuhashi, K. and Kondo, S., 2015. "Quenching distance measurement of highly to mildly flammable compounds". *Fire Safety Journal*, Vol. 71, pp. 58–68.
- Takizawa, K., Tokuhashi, K. and Kondo, S., 2009. "Flammability assessment of ch 2 cfcf 3: comparison with fluoroalkenes and fluoroalkanes". *Journal of hazardous materials*, Vol. 172, No. 2, pp. 1329–1338.
- Tanaka, K. and Higashi, Y., 2010. "Thermodynamic properties of hfo-1234yf (2, 3, 3, 3-tetrafluoropropene)". *International journal of refrigeration*, Vol. 33, No. 3, pp. 474–479.
- Tanaka, K., Higashi, Y. and Akasaka, R., 2009. "Measurements of the isobaric specific heat capacity and density for hfo-1234yf in the liquid state". *Journal of Chemical & Engineering Data*, Vol. 55, No. 2, pp. 901–903.
- TNO, 2007. "Bacterial reverse mutation test with hfo-1234yf. tno study 6202/09".
- Tovar, C.M., Blanco, M.B., Barnes, I., Wiesen, P. and Teruel, M.A., 2014. "Gas-phase reactivity study of a series of hydrofluoroolefins (hfos) toward oh radicals and cl atoms at atmospheric pressure and 298 k". *Atmospheric Environment*, Vol. 88, pp. 107–114.
- Wallington, T., Andersen, M.S. and Nielsen, O.J., 2010. "Estimated photochemical ozone creation potentials (pocps) of cf 3 cf ch 2 (hfo-1234yf) and related hydrofluoroolefins (hfos)". *Atmospheric Environment*, Vol. 44, No. 11, pp. 1478–1481.
- Wallington, T., Andersen, M.S. and Nielsen, O.J., 2015. "Atmospheric chemistry of short-chain haloolefins: Photochemical ozone creation potentials (pocps), global warming potentials (gwps), and ozone depletion potentials (odps)". *Chemosphere*, Vol. 129, pp. 135–141.
- Wang, C.C., 2013. "An overview for the heat transfer performance of hfo-1234yf". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 19, pp. 444–453.
- Wang, L., Dang, C. and Hihara, E., 2012. "Experimental study on condensation heat transfer and pressure drop of low gwp refrigerant hfo1234yf in a horizontal tube". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, No. 5, pp. 1418–1429.
- Wang, X., Sun, Y. and Gong, N., 2016. "Experimental investigations for the phase equilibrium of r1234yf and r1234ze (e) with two linear chained pentaerythritol esters". *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol. 92, pp. 66–71.
- Wilson, D. and Koban, M., 2010. "Hfo-1234yf industry update".
- WMO, 2007. "Scientific assessment of ozone depletion: 2006, global ozone, research and monitoring project".
- Wojtan, L., Ursenbacher, T. and Thome, J.R., 2005. "Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part i—a new diabatic two-phase flow pattern map". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 14, pp. 2955–2969.
- Yan, H., Guo, H. and Ou, J., 2014. "Emissions of halocarbons from mobile vehicle air conditioning system in hong kong". *Journal of hazardous materials*, Vol. 278, pp. 401–408.
- Yang, Z. and Wu, X., 2013. "Retrofits and options for the alternatives to hfc-22". *Energy*, Vol. 59, pp. 1–21.
- Zhan, T., Potts, W., Collins, J.F. and Austin, J., 2014. "Inventory and mitigation opportunities for hfc-134a emissions from nonprofessional automotive service". *Atmospheric Environment*, Vol. 99, pp. 17–23.
- Zhao, Y., CHEN, J., XU, B. and HE, B., 2012. "Performance of r-1234yf in mobile air conditioning system under different heat load conditions". *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol. 20, No. 03, p. 1250016.
- Zilio, C., Brignoli, R. and Brown, J., 2011a. "Experimental analysis of a minichannel air cooled condenser operating with r1234yf". In *The 23rd IIR International Congress of Refrigeration. Prague, Czech Republic*.
- Zilio, C., Brown, J.S. and Cavallini, A., 2009. "Simulation of r-1234yf performance in a typical automotive system". In *Proceedings of the 3rd Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigeration, Boulder, CO, USA, Paper*. 128.
- Zilio, C., Brown, J.S., Schiöchet, G. and Cavallini, A., 2011b. "The refrigerant r1234yf in air conditioning systems". *Energy*, Vol. 36, No. 10, pp. 6110–6120.

13. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

LOW-GWP REFRIGERANT FOR MOBILE AIR CONDITIONING SYSTEMS: R1234yf, LITERATURE REVIEW

Juan J. Garcia, jjgp.ufmg@gmail.com¹

Leandro Cristino, leandropereira@deii.cefetmg.br¹

Rémi Revellin, remi.revellin@insa-lyon.fr²

Matheus Porto, matheusporto@demec.ufmg.br¹

Luiz Machado, luizm@demec.ufmg.br¹

¹Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brazil

²Centre de Thermique de Lyon, Institut national des sciences appliquées, Lyon, France

Resumo: *The use of R1234yf refrigerant has grown steadily in Europe and the United States. But in Latin America, including Brazil, this fluid is not on the market yet, but should soon be used in view of the various advantages it offers compared to other refrigerants. This paper presents a literature review of the features and made this refrigerant, in order to contribute to the understanding and inclusion of the fluid in the scientific and industrial sector in Brazil. The review covers issues such as the expected environmental impact, current panorama of use, studies on the thermodynamic properties and compatibility with lubricating oils, research on the heat transfer coefficient, pressure loss and standards in two-phase flow, comparative studies with R134a on the performance of compressors, evaporators and cooling systems in general.*

Palavras-chave: *Review, R1234yf, New refrigerants, Automotive refrigeration*