

APLICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS SELF-CONTAINED COM FLUIDOS LOW-GWP PARA REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL: UMA OPÇÃO PARA GRANDES INSTALAÇÕES EM CENTROS URBANOS

Heitor Lazzari Tremea – [heitorlt@gmail.com](mailto:heitorlt@gmail.com)

MSc Eng. Bernardo Ronchetti – [bernardo@termoprol.com.br](mailto:bernardo@termoprol.com.br)

Termoprol Zanotti do Brasil LTDA., [www.termoprol.com.br](http://www.termoprol.com.br)

R4 – Aplicações Industriais e Especiais

**Resumo:** Como demonstração de uma nova solução de refrigeração em instalações de grande porte, o presente artigo conceitua a aplicação de monoblocos frigoríficos para média e baixa temperatura, apresentando as suas características e a evolução das tecnologias em fluidos frigoríficos utilizados. Dentre eles, destacam-se os fluidos HFOs, objeto de estudo do presente artigo, os quais são utilizados em regime de operação de baixa e média temperatura e possuem  $GWP < 150$ , atendendo às mais rígidas normas e acordos internacionais de segurança e sustentabilidade.

**Palavras-chave:** baixo GWP, HFO, refrigeração industrial, monobloco frigorífico, TEWI

## 1. INTRODUÇÃO

Historicamente, a refrigeração industrial de grande porte foi atendida por sistemas centrais que utilizavam como fluido refrigerante principal a amônia, contando com equipamentos robustos e mão de obra altamente qualificada para operação e manutenção. Os fluidos naturais, utilizados também em grandes aplicações comerciais, dentre os quais se destacam a amônia, o dióxido de carbono e o propano, apresentam características de GWP (*Global Warming Potential*) e ODP (*Ozone Depletion Potential*) nulos, além de uma boa eficiência energética. Entretanto, tais benefícios são, muitas vezes, questionados devido aos enormes problemas gerados por autorizações ambientais de uso, necessidade de operadores qualificados, altos custos de manutenção e, principalmente, segurança – fluidos tóxicos, inflamáveis ou operando com altas pressões.



Figura 1. Progresso dos fluidos frigoríficos (Calm, 2008)

Foi somente a partir de 1930 que começou a produção em larga escala de novos fluidos sintéticos estáveis e seguros (não tóxicos e/ou inflamáveis), o que fez com que os sistemas de refrigeração pudessem operar com maior segurança, criando uma alternativa aos fluidos naturais que até então eram utilizados. Com o surgimento dos CFCs e HCFCs, foram também descobertos os problemas ambientais que decorriam do vazamento desses fluidos sintéticos para a atmosfera, com poder de destruição da camada de ozônio (ODP) e aumentando o potencial de aquecimento global (GWP).

A evolução da tecnologia dos fluidos frigoríficos nos trouxe, a partir de 2010, a sua 4ª geração, na qual características como baixo GWP, ODP nulo e alta eficiência são buscadas constantemente, não só por fabricantes e projetistas, mas também por clientes que buscam aumentar a sustentabilidade do seu negócio. Tal evolução apresentou ao mercado novos fluidos HFOs (compostos orgânicos insaturados) puros e misturas com HFCs, criando alternativas para alta eficiência e baixo impacto ambiental dos sistemas novos e existentes, criando uma opção à retomada de uso dos fluidos naturais.

Acompanhando isso, os novos fluidos frigoríficos apresentam características peculiares que diferem da utilização dos fluidos utilizados atualmente pelo setor HVAC&R, como: alto *glide* e baixa inflamabilidade. Tais características necessitam de maior conhecimento técnico nas áreas de projeto e, principalmente, operação em campo, criando ainda mais

a necessidade contínua de qualificação profissional da mão de obra para os novos procedimentos de operação e manutenção de sistemas contendo esses fluidos.

Nesse sentido, o presente artigo tem como objetivo apresentar uma revisão conceitual sobre as soluções atuais em aplicações de fluidos frigoríficos, mostrando também um caso de aplicação com novos fluidos que são tendência no mercado mundial de refrigeração industrial para médio e grande porte.

## 2. REVISÃO DE ACORDOS E NORMAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS

O Brasil encontra-se em evolução sobre o controle do uso de fluidos frigoríficos nocivos ao meio ambiente, estando a indústria do setor de HVAC&R consciente e buscando alternativas tecnológicas para suprir a demanda por novos equipamentos e *retrofit* de sistemas existentes. Conforme linha do tempo abaixo, por meio de dados fornecidos pelo Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs, é possível verificar a preocupação internacional no âmbito dos fluidos frigoríficos, bem como a participação do Brasil nesse contexto, mostrando o seu compromisso em atender as premissas estipuladas pelo Protocolo de Montreal:

- **1928:** Cientistas sintetizam os CFCs;
- **1974:** Os vencedores do Prêmio Nobel, Molina e Rowland, descobrem que os CFCs podem destruir o ozônio estratosférico;
- **1985:** A Convenção de Viena para a proteção da Camada de Ozônio é adotada pelas Nações Unidas;
- **1987:** O Protocolo de Montreal sobre substâncias que destroem a Camada de Ozônio é acordada;
- **1990:** Brasil adere à Convenção de Viena e ao Protocolo de Montreal;
- **1996:** Estados partes desenvolvidos eliminam a produção e importação de CFCs e congelam o consumo de HCFCs;
- **1997:** Proibição do uso de CFCs em equipamentos de ar-condicionado automotivos novos no Brasil;
- **1999:** Fim da produção de CFCs;
- **2001:** Proibição da fabricação e importação de refrigeradores domésticos, espuma rígida e semirrígida esterilizantes com CFCs;
- **2004:** Países desenvolvidos partes do Protocolo de Montreal eliminam o uso de HCFCs em 35%;
- **2007:** Ajuste ao Protocolo de Montreal altera o cronograma de eliminação dos HCFCs;
- **2010:** Fim do consumo de CFCs no Brasil. Os países desenvolvidos eliminam 75% do consumo de HCFCs. Todos os países em desenvolvimento partes do Protocolo de Montreal eliminam CFCs, halons e CTC;
- **2013:** Todos os países em desenvolvimento partes do Protocolo de Montreal congelam a produção e o consumo de HCFCs nos níveis de 2009/2010, inclusive o Brasil;
- **2015:** Eliminação de 16,6% de consumo brasileiro de HCFCs. Países em desenvolvimento eliminam em média 10% da produção e consumo de HCFCs, enquanto os países desenvolvidos eliminam 90% do consumo;
- **2016:** Adoção da Emenda de Kigali que inclui o controle sobre o consumo de HFCs ao Protocolo de Montreal.

Observa-se que o movimento mundial de restrições ao consumo e produção de CFCs (por exemplo, o fluido R-12) e HCFCs (por exemplo, o fluido R-22) fizeram com que aumentasse proporcionalmente o consumo de HFCs (por exemplo, os fluidos R-134a, R-404A, R-507A), os quais foram a alternativa direta de substituição até meados de 2010. Para corrigir e controlar esse aumento, considerando os altos GWPs desses fluidos, a Emenda de Kigali iniciou um cronograma para limitação progressiva do seu consumo.

Em paralelo ao Protocolo de Montreal, em 2015, entrou em vigor na Europa o regulamento *F-gas*, o qual limitou o consumo de HFCs de alto GWP para diversas aplicações específicas, dentre as quais destaca-se o segmento de refrigeração estacionária, que tem por objetivo restringir a utilização de fluidos com  $GWP < 2.500$  até 2020. Referido regulamento, um dos mais rigorosos existentes, optou por limitar para a maioria dos sistemas  $GWP < 150$ , fazendo-se necessário a busca por fluidos *low-GWP* em grande escala para os próximos anos.

Por isso, a indústria está se atualizando sobre novas alternativas e tendências de fluidos frigoríficos para as diversas aplicações, reduzindo, assim, o consumo de fluidos sintéticos não ambientais e melhorando o desempenho dos equipamentos com soluções alternativas. Dessa forma, possibilita-se uma continuidade de atendimento ao cronograma estabelecido pelo Protocolo de Montreal.

Para utilização de novos fluidos que não sejam nocivos ao meio ambiente, de maneira correta e segura, instituições internacionais de normatização constantemente atualizam a classificação de fluidos frigoríficos e aspectos mínimos de segurança de operação e manutenção, projeto e manuseio desses sistemas e equipamentos, consideradas as novas propriedades de alta pressão de operação ou inflamabilidade encontradas. Algumas das principais normas nacionais e internacionais são listadas abaixo, a fim de caracterizar a importância e particularidade do tema:

- **ABNT NBR 16069:2018** – Segurança em sistemas frigoríficos;
- **ABNT NBR 16666:2018** – Fluidos frigoríficos – Designação e classificação de segurança;
- **ABNT NBR 13598:2011** – Vasos de pressão para refrigeração;
- **ANSI/ASHRAE 15:2016** – *Safety standard for refrigeration systems*;
- **ANSI/ASHRAE 34:2016** – *Designation and classification of refrigerants*;

- **ISO 5149:2014** – *Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements:*
  - **Part 1:** *Definitions, classification and selection criteria;*
  - **Part 2:** *Design, construction, testing, marking and documentation;*
  - **Part 3:** *Installation site;*
  - **Part 4:** *Operation, maintenance, repair and recovery.*

Em que pese tais normas técnicas não serem equiparadas a leis, é importante que, diante da ética profissional, as empresas busquem empregá-las para garantir a correta aplicação desses novos fluidos, a fim de minimizar os riscos às instalações e seus operadores. É através delas que podem ser encontradas informações pertinentes a cada projeto em específico. Assim, o suporte das instituições governamentais na fiscalização, bem como instituições de ensino que qualifiquem os profissionais, são muito importantes para que o setor, como um todo, possa evoluir e enfrentar os desafios de trazer novas tecnologias para o Brasil.

### 3. PANORAMA DOS FLUIDOS FRIGORÍFICOS NA REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL

Atualmente, existe uma discussão sobre como realizar a melhor seleção de sistemas e fluidos frigoríficos diante de tantas opções disponíveis no mercado. A certeza é de que, cada vez mais, não existe garantia de solução perfeita para todos os casos, principalmente pelas variações das condições de operação, manutenção e investimento inicial, que afetam a tomada de decisão, podendo, assim, não serem optadas por soluções completas e sustentáveis.

Durante o processo de seleção, deve ser analisado um grande número de variáveis, a fim de que sejam atendidos os requerimentos de projeto da instalação e a viabilidade de construção dos equipamentos, almejando a melhor solução possível para cada caso. Com o aumento constante do número de fluidos disponíveis para utilização, devem ser analisados parâmetros como: eficiência do regime de operação, capacidade volumétrica, GWP/ODP, toxicidade, flamabilidade, pressões de operação, temperatura crítica, miscibilidade do óleo, disponibilidade e preço. Em relação ao sistema e tecnologia dos componentes, é válida a análise de outros aspectos, a citar: carga total de fluido refrigerante, necessidade de mão de obra qualificada para operação e manutenção, segurança operacional da instalação, investimento inicial, análise de *benchmarking* por LCCP (*life-cycle climate performance*) ou TEWI (*total equivalent warming impact*), performance conjugada e espaço disponível.

Assim, a fim de que se opte pela melhor solução de aplicação, principalmente em relação aos fluidos frigoríficos, é necessário, primeiramente, ter uma visão geral das características de cada um deles. Nesse sentido, é trazida abaixo a Tabela 1, que demonstra, de maneira simplificada, as principais diferenças existentes entre alguns dos fluidos mais utilizados historicamente e algumas tendências.

Tabela 1. Fluidos frigoríficos e suas respectivas características

Fluido	Composição	Geração	Classe <sup>1</sup>	ODP <sup>2</sup>	GWP <sup>2</sup>	Temp. Crítica	Glide
<b>HC-290</b>	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	1 <sup>a</sup>	A3	0	~3	96,7 °C	-
<b>HC-600a</b>	CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	1 <sup>a</sup>	A3	0	20	134,7 °C	-
<b>R-717</b>	NH <sub>3</sub>	1 <sup>a</sup>	B2L	0	0	132,2 °C	-
<b>R-744</b>	CO <sub>2</sub>	1 <sup>a</sup>	A1	0	1	30,9 °C	-
<b>CFC-12</b>	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	2 <sup>a</sup>	A1	1,0	10.900	112,0 °C	-
<b>HCFC-22</b>	CHClF <sub>2</sub>	2 <sup>a</sup> /3 <sup>a</sup>	A1	0,055	1.810	96,1 °C	-
<b>HFC-32</b>	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	3 <sup>a</sup>	A2L	0	675	78,1 °C	-
<b>HFC-134a</b>	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	3 <sup>a</sup>	A1	0	1.430	101,0 °C	-
<b>R-404A</b>	R-125/143a/134a (44.0/52.0/4.0)	3 <sup>a</sup>	A1	0	3.920	72,0 °C	0,8 K
<b>R-410A</b>	R-32/125 (50.0/50.0)	3 <sup>a</sup>	A1	0	2.090	71,3 °C	0,1 K
<b>R-507A</b>	R-125/143a (50.0/50.0)	3 <sup>a</sup>	A1	0	3.990	70,6 °C	-
<b>HFO-1234yf</b>	CF <sub>3</sub> CF=CH <sub>2</sub>	4 <sup>a</sup>	A2L	0	4	94,7 °C	-
<b>R-454C</b>	R-32/1234yf (21.5/78.5)	4 <sup>a</sup>	A2L	0	148	82,4 °C	~6 K
<b>R-455A</b>	R-1234yf/32/744 (75.5/21.5/3.0)	4 <sup>a</sup>	A2L	0	145	85,6 °C	~12 K

Fonte:

ASHRAE Handbook – Fundamentals (2017)

<sup>1</sup>ASHRAE Standard 34

<sup>2</sup>Calm and Hourahan (2011)

### 3.1. Naturais e hidrocarbonetos (HC)

Calm (2007) descreve que a escolha para utilização de fluidos da primeira geração ocorria basicamente pela disponibilidade e por tudo o que funcionasse. Segundo Calm e Didion (1998), os principais objetivos iniciais eram prover refrigeração e, mais tarde, durabilidade. Para tanto, os autores trazem, em uma tabela, a história do uso de fluidos frigoríficos e o surgimento de alguns fluidos que são amplamente utilizados até então. Foi em meados de 1860 que os fluidos naturais Amônia (R-717) e Dióxido de Carbono (R-744) foram introduzidos pela primeira vez em sistemas de refrigeração, sendo, em 1920, também inseridos os fluidos hidrocarbonetos Isobutano (R-600a) e Propano (R-290).

Mesmo utilizados até hoje como ótimas alternativas de eficiência e apresentando GWP e ODP nulos, ainda são sinônimos de insegurança operacional, razão pela qual normas e legislações limitam o seu uso. Flamabilidade, toxicidade e pressões de operação são temas discutidos até hoje, o que gerou uma demanda por melhores projetos para garantir a segurança desses sistemas, sendo uma das configurações mais viáveis atualmente a redução e o enclausuramento da carga de fluido refrigerante, aliado ao aumento da eficiência global do sistema. Ainda assim, os sistemas dependem das demais características de avaliação antes abordadas, dificultando a aplicação e exigindo maior conhecimento por parte da operação.

**Amônia (R-717).** A amônia é utilizada há mais de 150 anos devido às suas ótimas características termodinâmicas, resultando em ótima eficiência. Por essa característica, é amplamente utilizado na refrigeração industrial em operações de baixa temperatura. Todavia, apresenta características de baixa flamabilidade e alta toxicidade, conforme classificação B2L (Figura 2), também incompatível com cobre e suas ligas.

↑ Aumento de inflamabilidade	<b>Maior inflamabilidade</b>	A3	B3
	<b>Menor inflamabilidade</b>	A2	B2
		A2L <sup>a</sup>	B2L <sup>a</sup>
	<b>Sem propagação de chama</b>	A1	B1
		<b>Menor toxicidade</b>	<b>Maior toxicidade</b>
→ Aumento da toxicidade			
<sup>a</sup> A2L e B2L são fluidos frigoríficos de menor inflamabilidade com velocidade de queima ≤ 10 cm/s.			

Figura 2. Classificação da segurança dos fluidos frigoríficos pela ASHRAE Standard 34, apresentada por tabela na ABNT NBR 16666

Tais características são levadas em consideração nas tomadas de decisões atuais, visto a maior fiscalização do governo sobre questões ambientais e trabalhistas, principalmente próximo de áreas urbanas, e diversas notícias de acontecimentos trágicos relacionadas a incêndio e/ou morte por intoxicação. Isso porque sistemas centrais de expansão direta têm grandes riscos quanto ao vazamento de fluido, especialmente em ambientes de trabalho ocupados. Isso implica em diversos requisitos adicionais de segurança da empresa, não só a nível de sistema frigorífico, mas também de *layout*, sistemas de alarme e treinamento de pessoas quanto à segurança nas instalações. Salas de máquinas com dispositivos de segurança específicos são requisitos mínimos para a operação desses fluidos, a fim de que as normas técnicas sejam atendidas.

**Dióxido de carbono (R-744).** O CO<sub>2</sub>, fluido de classificação A1, não é inflamável e apresenta baixa toxicidade. Entretanto, deve-se ter cuidado para não ocorrerem vazamentos, uma vez que, ultrapassado o limite de concentração de fluido no ambiente, pode ser gerada asfixia dos ocupantes. Conforme ASHRAE (2017) explicita em seu documento de posição sobre a utilização de fluidos frigoríficos, o dióxido de carbono apresenta duas grandes particularidades: a primeira, que diz respeito às altas pressões de operação, as quais, por exemplo, são dez vezes maiores que as da amônia, o que implica tanto nos cuidados de operação, como no dimensionamento do sistema quanto à segurança mecânica. Já a segunda consiste na baixa temperatura crítica do fluido (~31 °C), que faz com que se opere em dois regimes distintos: transcrito ou subcrítico. No caso do regime transcrito, há uma baixa eficiência para altas temperaturas ambientes (caso do Brasil), sendo necessária a utilização de *gas-cooler*, além de alto investimento inicial. Alternativas de sistemas como, por exemplo, sistema cascata, utilizando o dióxido de carbono em regime subcrítico, ainda é uma solução discutível em relação ao resultado de eficiência pela segurança e investimento necessário. Tecnologias de ejetores também estão começando a serem utilizadas pelos fabricantes como recurso para aumento da eficiência energética desses sistemas.

**Propano (R-290) e Isobutano (R-600a).** Tais HCs são classificados como A3, fluidos altamente inflamáveis e não tóxicos, sendo alternativas altamente eficientes. Porém, a característica de alta flamabilidade torna a aplicação restrita e as normas rígidas ao uso desses fluidos. Mesmo assim, são amplamente encontrados atualmente em aplicações de baixa carga (até 150 g) e baixa capacidade frigorífica, como, por exemplo, em refrigeradores domésticos ou plug-ins de balcões frigoríficos. Para refrigeração comercial, há algumas aplicações com expansão indireta, sendo, todavia, a carga de fluido frigorífico por circuito independente normalmente limitada em 10 kg, conforme classificações da ISO 5149.

### 3.2. Halocarbonos (CFC, HCFC, HFC)

Os halocarbonos, fluidos frigoríficos de segunda e terceira geração, surgiram em meados de 1930, devido à necessidade de fluidos mais seguros e estáveis para utilização em larga escala, tornando-se, então, a solução por muitos anos (CALM, 2007). Os fluidos R-12 (CFC), R-22 (HCFC), R-134a, R-404A, R-410A e R-507A (HFCs) foram e são os mais utilizados mundialmente nas mais diversas aplicações, cada um com suas particularidades e regimes de operação, embora todos garantam um bom desempenho energético, facilidade e segurança operacional, além da ótima distribuição logística e preços competitivos que facilita a compra destes fluidos.

A restrição ao uso desses fluidos se dá a partir da descoberta dos fatores ambientais, uma vez que o CFC e o HCFC possuem altíssimos coeficientes GWP, além de não possuírem ODP nulos. Assim, surgem os HFCs que, embora ainda mantenham altos coeficientes de GWP, possuem ODP nulo. Isto é um reflexo das iniciativas do Protocolo de Montreal, engajando o mercado a buscar novas e melhores soluções, além de propor limitações à produção e consumo de tais substâncias.

### 3.3. Halocarbonos insaturados (HFO) e misturas

Os fluidos HFOs (hidrofluorolefinas) puros, algumas misturas com HFCs e naturais apresentam características de ótimo desempenho termodinâmico, baixo tempo de vida na atmosfera, ODP nulo e baixo GWP. Por isso, referidos fluidos são tratados como ótimas alternativas para utilização em novos e existentes sistemas de refrigeração, tornando-os de menor impacto ambiental.

As misturas R-454C e R-455A, as quais são destaques deste artigo, possuem também características de não toxicidade e leve inflamabilidade (classe A2L). Nesse sentido, além de atender às normas técnicas para garantir a segurança operacional do produto, é imprescindível o estudo sobre o efeito do *glide* no desempenho dos componentes e também sobre as propriedades termodinâmicas do fluido para demais cálculos do sistema, como seleção de componentes e tubulações. Como estes fluidos são novos no mercado, há pouca bibliografia e dados técnicos sobre eles, o que dificulta para o técnico de campo poder realizar uma boa análise do sistema.

Uma outra dificuldade que o mercado enfrenta é a compra desses fluidos. Como ainda são pouco utilizados no Brasil, as grandes empresas não os comercializam em grande escala e, normalmente, as próprias fabricantes de equipamentos realizam a importação direta, gerando um maior trabalho logístico e um alto custo de aquisição. Com o fomento das novas soluções, é provável que nos próximos anos a disponibilidade dos fluidos nas grandes distribuidoras nacionais esteja maior, possibilitando ainda mais a sua aplicação.

**Misturas zeotrópicas e seu alto glide.** Foi a partir da mistura de HFCs que surgiram alguns dos principais fluidos utilizados no mercado, caracterizados como misturas zeotrópicas (classe 400) e azeotrópicas (classe 500). Misturas contendo HFOs, como por exemplo o R-454C e R-455A, resultam em misturas zeotrópicas. Essas misturas, para uma determinada pressão constante, apresentam diferentes temperaturas de início e fim de ebulição/condensação do fluido. Isto é, devido aos fluidos da mistura apresentarem pontos de saturação diferentes para cada um na mesma pressão, a mistura tem comportamento diferente das misturas azeotrópicas, exibindo quase o mesmo comportamento dos fluidos constituintes, como se fossem substâncias puras, mantendo a temperatura constante durante o processo de ebulição/condensação.

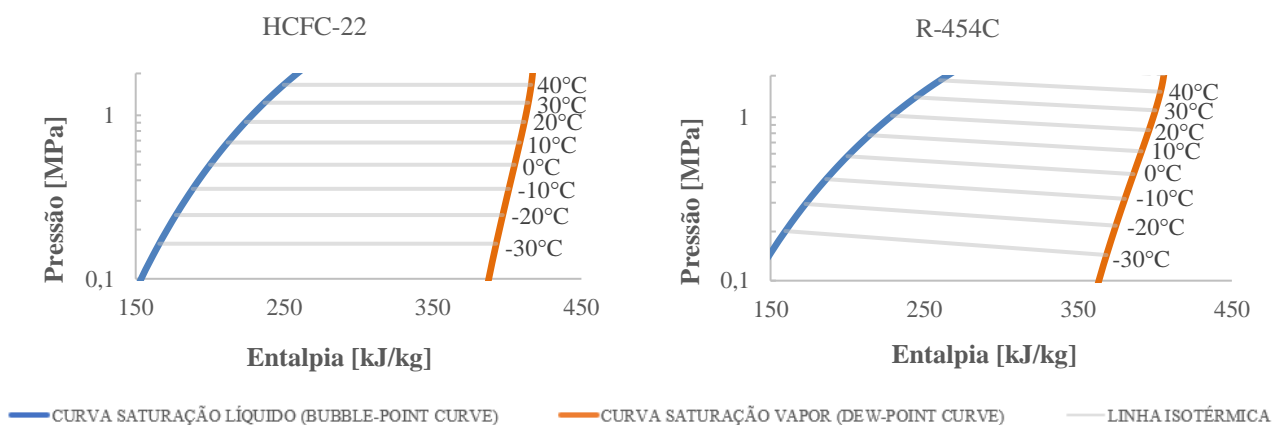


Figura 3. Comparativo de diagramas P<sub>x</sub>H entre fluido puro (HCFC-22) e mistura zeotrópica (R-454C)

Com os gráficos gerados a partir da base de dados de fluidos frigoríficos NIST REFPROP, conforme Figura 3, é possível constatar, de maneira clara, a diferença entre a inclinação das linhas isotérmicas dos fluidos, existindo uma diferença de temperatura entre o início e o fim dos processos de ebulição ou condensação. Essa diferença entre temperaturas para uma pressão constante é chamada de *glide*. Vale ressaltar que, para correta medição de sub-resfriamento, é necessário calcular a diferença absoluta entre a temperatura de *bubble-point* – temperatura de saturação de líquido para a pressão determinada – e a temperatura do líquido (linha de líquido). Também, para correta medição do superaquecimento, é necessário calcular a diferença absoluta entre a temperatura de *dew-point* – temperatura de saturação de vapor para a

pressão determinada – e a temperatura do vapor (linha de sucção). As medições de pressão e temperatura devem, na medida do possível, serem em pontos mais próximos possíveis.

O alto *glide* de novos fluidos é assunto que já foi discutido amplamente por Withouse (2016) por meio de artigos publicados no ASHRAE Journal, demonstrando que diversos fluidos, além desses apresentados, possuem tal comportamento e que devemos nos atualizar para que os conceitos sejam aplicados de maneira correta. A aplicação de fluidos com alto *glide* deve levar em consideração diversos fatores no momento da seleção de componentes e cálculo de desempenho dos sistemas. Correta seleção de válvula de expansão e correto controle do superaquecimento são dois dos principais fatores. Os efeitos sobre os trocadores de calor são explanados em alguns artigos, como Cho e Domanski (2016), estudando otimização de circuitos e demais características construtivas para melhorar o desempenho para fluidos *low*-GWP. A alteração de desempenho em trocadores de calor é devido à diferença de capacidade volumétrica, densidade e, principalmente, ao *glide* dos fluidos, não havendo mais uma temperatura constante ao longo de todo trocador de calor, como é usual verificarmos nos fluidos sem ou com baixo *glide*.

Ainda assim, essa característica dificulta a utilização de grandes cargas de fluidos frigoríficos em sistemas centrais com grandes tubulações, uma vez que é maior a possibilidade de ocorrerem vazamentos em regiões onde possa existir vapor de fluido para a atmosfera. Tais vazamentos geram desequilíbrio da mistura zeotrópica, alterando suas propriedades termodinâmicas e necessitando, assim, de uma nova carga de fluido total do sistema para correta reparação do dano. Ademais, acarreta longas paradas dos equipamentos e alto investimento para reposição do fluido refrigerante.

#### 4. RELATO DE APLICAÇÃO

O relato de aplicação do presente trabalho é sobre a solução de monobloco frigorífico do tipo *self-contained* para refrigeração industrial, utilizando fluidos HFO/HFC com condensação à água, para baixa e média temperaturas de operação.



Figura 4. Monoblocos frigoríficos de teto com condensação a água Termoprol Zanotti

##### 4.1. Características da instalação

A instalação frigorífica, onde foram aplicados os equipamentos com fluido R-454C, consiste em um centro de distribuição de aproximadamente 600 m<sup>2</sup> de área total refrigerada, localizado no centro-oeste do Brasil. As câmaras frigoríficas são de média e baixa temperaturas para resfriamento, congelamento e estocagem de carnes diversas. Anteriormente, a instalação operava com um sistema central utilizando amônia como fluido frigorífico principal.

Devido a problemas de operação e manutenção, além da burocracia trabalhista e ambiental, o cliente necessitava de uma substituição do sistema para uma nova solução sustentável, a fim de obter uma melhor eficiência energética, mantendo a utilização de fluidos com baixo impacto ambiental. Assim, foi proposta a aplicação de equipamentos monoblocos frigoríficos para atender a todo o projeto, favorecendo também uma rápida instalação de maneira modular, o que minimizou as paradas da operação logística do local durante o *retrofit*.

Seguem abaixo algumas características da instalação utilizando monoblocos frigoríficos:

- Área total refrigerada: 584 m<sup>2</sup>;
- Capacidade frigorífica total: 90 kW;
- Equipamentos com 8,5 e 11 kg de carga de fluido, atendendo classificação da ISO 5149;
- Coeficiente total de 0,6 kg/kW (carga de fluido por capacidade frigorífica instalada).

A instalação está em funcionamento há quatro meses desde a publicação do presente artigo, atingindo os objetivos conforme proposto, ou seja, atendendo ao controle de temperaturas de operação das câmaras frigoríficas e com consumo de energia elétrica reduzido. Esses resultados ocorrem devido à modularidade dos equipamentos e ao controle de capacidade dos compressores, que acompanham a simultaneidade de carga térmica total da instalação.

## 4.2. Monobloco frigorífico

Equipamentos monobloco surgiram como uma ótima solução na aplicação de fluidos HFO/HFC, apresentando TEWI competitivo comparado à utilização de fluidos naturais, atendendo a todos requisitos impostos pelos clientes e garantindo segurança, confiabilidade e performance eficiente. Por serem de montagem do tipo *self-contained*, possuem ótima característica de modularidade e adaptação à instalação do cliente, podendo atender desde pequenas câmaras até grandes centros de distribuição com altas capacidades de estocagem.

Aliado aos benefícios que encontramos em equipamentos do tipo *self-contained*, há inúmeras características e diferenciais que, em conjunto, otimizam a eficiência energética da instalação frigorífica:

- Equipamentos Termoprol Zanotti, linha TM, série W, modelos 500 e 1000;
  - Compressores alternativos semi-herméticos com controle de capacidade por inversor de frequência;
  - Condensação à água;
  - Válvula de expansão eletrônica;
  - Degelo e aquecimento de bandeja por ciclo reverso (gás quente);
  - Sistema supervisor para controle total da instalação;
  - Utilização de fluidos HFO/HFC com baixo GWP (< 150): R-454C e R-455A;
  - Dispositivos de segurança conforme normativas.

Esses equipamentos possibilitam a sua construção completa e realização de verificações ainda em fábrica, garantindo os testes de estanqueidade e correta carga de fluido. Também, por conter curtas linhas de líquido, sucção e descarga, permitem a aplicação de baixa carga de fluido frigorífico, atendendo às mais rígidas normativas internacionais de segurança e sustentabilidade.

Toda unidade condensadora do equipamento (compressor, vasos de pressão e principais tubulações) ficam ao ar livre, podendo-se, assim, classificar o sistema como expansão direta classe II, por estar com a unidade ao ar livre (conforme classificação ISO 5149-1). A classificação serve também para sistemas indiretos, ou seja, independente de ter um fluido secundário em sistema fechado, a classificação para essa instalação seria a mesma, gerando um problema de limitação da quantidade de fluido refrigerante. Isto é, devido à carga térmica concentrada em uma única sala de máquinas, a quantidade de fluido refrigerante seria demasiadamente grande para tal aplicação.

**Sistema de degelo.** Os equipamentos possuem válvulas inversoras de quatro vias para degelo por ciclo reverso (gás quente), evitando o uso de resistências elétricas e reduzindo o consumo de energia elétrica e grandes pontos de força na instalação.

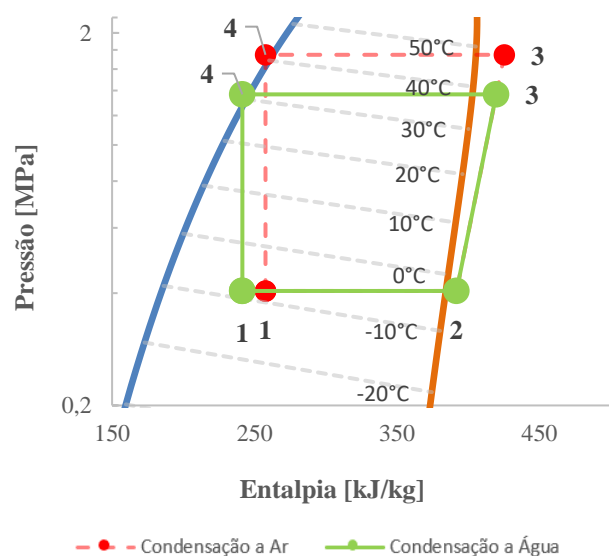
**Condensação à água.** Como uma das medidas de eficiência energética, todos equipamentos atuam com pressão de condensação reduzida devido à condensação indireta. São utilizadas torres de resfriamento e moto-bombas para recirculação da água de condensação, garantindo uma temperatura média de condensação máxima de 35 °C.

Essa configuração permite que, ao invés de operar com temperatura de condensação média de 45 a 50 °C, quando utilizada condensação a ar, o ganho no COP (coeficiente de performance) é de aproximadamente 25%, conforme calculado e apresentado na Tabela 2 e Figura 5.

Tabela 2. Comparativo de COP teórico entre condensação a ar ou água para fluido R-454C

Características	Condensação	
	Água	Ar
Temp. Cond. Média	35	45 °C
Sub-resfriamento	3	3 K
Pressão Cond. Média	1,37	1,75 MPa
Entalpia Descarga (3)	419,8	425,5 kJ/kg
Entalpia Líquido (4) (1)	241,5	257,7 kJ/kg
Temp. Evap. Média	-5	°C
Superaquecimento	10	K
Pressão Evap. Média	0,41	MPa
Entalpia Sucção (2)	391,9	kJ/kg
<b>COP Teórico</b>	<b>100%</b>	<b>74%</b>

Figura 5. Ciclo básico teórico para fluido R-454C, complementar à Tabela 2



### 4.3. TEWI (Total Equivalent Warming Impact)

O TEWI é um dos *benchmarks* mais utilizados como ferramenta de análise comparativa entre novos sistemas de refrigeração, avaliando o impacto equivalente de aquecimento global gerado, mensurado em kg de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>-e). O cálculo soma as emissões de CO<sub>2</sub>-e provenientes da fuga direta de fluido refrigerante do equipamento para a atmosfera (emissão direta) e também as emissões geradas pela fonte energética local, proporcional ao consumo de energia elétrica demandado do sistema (emissão indireta). O fator de emissão indireto para o Brasil, conforme apresentado no relatório *CO<sub>2</sub> Emissions From Fuel Combustion*, IEA (2011), devido à enorme influência da energia produzida por hidrelétricas em nossa matriz energética, é de 75 g CO<sub>2</sub>/kWh. Abaixo, é apresentada a fórmula de cálculo do TEWI, considerando as emissões comentadas:

$$TEWI = [(GWP \cdot m \cdot V_{anual} \cdot n) + (GWP \cdot m \cdot (1 - R_{anual}))] + (C_{anual} \cdot \beta \cdot n) \quad (1)$$

*GWP*: Pontecial de aquecimento global do fluido refrigerante, relativo ao CO<sub>2</sub> (GWP CO<sub>2</sub> = 1)

*V<sub>anual</sub>*: Taxa de vazamento anual, relativo a aplicação

*n*: Anos de operação do sistema

*m*: Carga total de fluido refrigerante no sistema

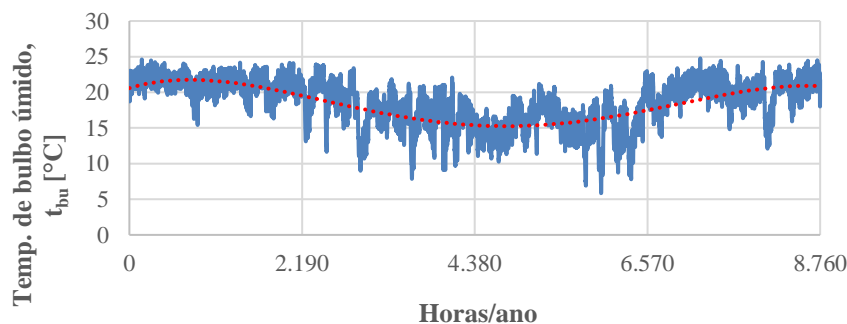
*R<sub>anual</sub>*: Taxa de recuperação de fluido refrigerante

*C<sub>anual</sub>*: Consumo de energia elétrica anual

*β*: Fator de emissão indireta, relativo ao país e sua matriz energética

O cálculo e alguns dos fatores apresentados estão contidos na diretriz de boas práticas para cálculo do TEWI, criado por AIRAH (2012), a qual explana de forma detalhada a metodologia utilizada. Os resultados, apresentados a seguir na Tabela 3, advém de cálculos realizados para até sete fluidos e duas temperaturas de evaporação distintas, podendo serem utilizados de maneira comparativa entre soluções, em razão de ser a base de cálculo ser a mesma. Abaixo, algumas considerações referentes aos cálculos realizados:

- Foram comparados dois tipos de sistema:
  - monobloco frigorífico, utilizando fluidos R-507/404A/134a/455A/454C, no qual consideram-se taxas de vazamento e recuperação de fluido de 2% e 70%, respectivamente. Isso ocorre devido ao sistema ser compacto e com baixa carga de fluido refrigerante, além de garantir maior estanqueidade do sistema;
  - sistema central, utilizando fluido R-717 (amônia), no qual consideram-se taxas de vazamento e recuperação de fluido de 15% a 95%, respectivamente. Mesmo assim, esses fatores não influenciam no resultado do TEWI, pois o GWP da amônia é igual a zero, anulando qualquer emissão direta de CO<sub>2</sub>-e;
- Para cálculo do COP anual dos equipamentos, foram utilizados arquivos climáticos em formato EPW do INMET 2016, fornecidos para download pelo LABEEE da UFSC, os quais proporcionaram calcular a temperatura de bulbo úmido horária anual. Assim, foi possível encontrar a temperatura de entrada da água de condensação no condensador do equipamento, conforme apresentado em seguida na Figura 6. Foi utilizado DTML fixo de 10 K para estimar a pressão de condensação, mantendo a vazão de água constante, além de ter sido estipulado controle de condensação mínima para temperatura média de condensação de 20 °C. Por fim, frisa-se que o cálculo do COP é teórico, considerando eficiência isentrópica de 0,7 para todos os fluidos comparados;
- Foram consideradas, em todos os casos, temperaturas médias de evaporação e condensação, devido ao *glide* de alguns dos fluidos estudados.



Temperatura bulbo úmido [°C]			Horas/ano
30	a	25	0
25	a	20	3.471
20	a	15	3.792
15	a	10	1.390
10	a	5	107
5	a	0	0

Figura 6. Temperatura de bulbo úmido horária anual para o local da instalação

Conforme Tabela 3 apresentada a seguir, é possível constatar que as soluções de monobloco frigorífico com os fluidos R-455A e R-454C, apresentaram TEWI superior somente a 10% se comparados a sistemas centrais utilizando amônia. De acordo com AIRAH (2012), quando a diferença do TEWI for por volta de 10%, devem as soluções serem consideradas de mesmo impacto ambiental, devido às incertezas dos cálculos. Além disso, se comparados aos HFCs relacionados, os fluidos R-455A e R-454C possuem TEWI visivelmente melhores e, inclusive, eficiência energética.



Tabela 3. Cálculo comparativo de TEWI para diferentes fluidos e sistemas

Descrição	Baixa Temp. Evap. (-25 °C)					Média Temp. Evap. (-5 °C)					
	R-507A	R-404A	R-455A	R-454C	R-717	R-507A	R-404A	R-134a	R-455A	R-454C	R-717
Fluido refrigerante	R-507A	R-404A	R-455A	R-454C	R-717	R-507A	R-404A	R-134a	R-455A	R-454C	R-717
<b>Comparativo ao R-454C</b>	<b>+67%</b>	<b>+65%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-11%</b>	<b>+120%</b>	<b>+117%</b>	<b>+41%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-13%</b>
<b>TEWI (kg CO<sub>2</sub>-e)</b>	<b>46.152</b>	<b>45.575</b>	<b>27.480</b>	<b>27.644</b>	<b>24.683</b>	<b>41.330</b>	<b>40.788</b>	<b>26.522</b>	<b>18.790</b>	<b>18.760</b>	<b>16.323</b>
Emissão direta	17.923	17.567	613	629	0	23.195	22.734	9.750	794	814	0
Emissão indireta	28.229	28.008	26.867	27.015	24.683	18.135	18.054	16.772	17.996	17.946	16.323
GWP	3.990	3.920	145	148	0	3.990	3.920	1.430	145	148	0
Carga fluido frig. (kg)	9,0	9,0	8,5	8,5	900,0	11,6	11,6	13,6	11,0	11,0	900,0
COP anual	2,28	2,30	2,40	2,38	2,61	4,46	4,48	4,82	4,49	4,50	4,95
Capacidade frig. (kW)	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3
Taxa vazamento anual	2%	2%	2%	2%	15%	2%	2%	2%	2%	2%	15%
Taxa recuperação de fluido	70%	70%	70%	70%	95%	70%	70%	70%	70%	70%	95%

#### 4.4. Testes dos equipamentos

Os testes dos equipamentos foram realizados na própria empresa, realizando aquisição de dados *real-time* pelo mesmo sistema supervisorio que a instalação utilizará. Foram mais de quinze pontos de medição para análise termodinâmica do sistema.

Para verificar a capacidade do equipamento, foi gerada carga térmica por meio de banco de resistências no interior da câmara frigorífica. Após o equilíbrio do sistema, com temperatura estável de operação, foram obtidas as medições, realizando balanço de energia e massa pelo lado da água de condensação, conforme fórmulas apresentadas abaixo. Para tal, foram necessárias medidas de temperatura de entrada/saída e vazão volumétrica da água de condensação.

Com os dados adquiridos de temperatura e pressão em cinco pontos diferentes do sistema, foram calculadas as respectivas entalpias, utilizando a base de dados de fluidos refrigerantes NIST REFPROP, possibilitando, assim, uma estimativa real da capacidade frigorífica do equipamento.



Figura 7. Monobloco frigorífico em fase de teste

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{\acute{a}gua} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{ref} \cdot \Delta H_{ref} = \dot{m}_{\acute{a}gua} \cdot c_{p\acute{a}gua} \cdot \Delta T_{\acute{a}gua} \quad (3)$$

$$\dot{m}_{ref} = \frac{(\dot{V} \cdot \rho)_{\acute{a}gua} \cdot c_{p\acute{a}gua} \cdot (T_S - T_E)_{\acute{a}gua}}{(H_5 - H_6)_{ref}} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{ref} \cdot (H_2 - H_1)_{ref} \quad (5)$$

Fluido R454C	
<b>1 - ENTRADA EVAPORADOR</b>	<b>4 - DESCARGA COMPRESSOR</b>
Pressão abs. 0,43 MPa	Pressão abs. 1,39 MPa
Título 25%	Temperatura 57,20 °C
Entalpia 242,66 kJ/kg	Entalpia 425,97 kJ/kg
<b>2 - SAÍDA EVAPORADOR</b>	<b>5 - ENTRADA CONDENSADOR</b>
Pressão abs. 0,40 MPa	Pressão abs. 1,39 MPa
Temperatura 6,00 °C	Temperatura 57,20 °C
Entalpia 393,18 kJ/kg	Entalpia 425,97 kJ/kg
<b>3 - SUCCÃO COMPRESSOR</b>	<b>6 - SAÍDA CONDENSADOR</b>
Pressão abs. 0,37 MPa	Pressão abs. 1,39 MPa
Temperatura 8,90 °C	Temperatura 29,00 °C
Entalpia 396,67 kJ/kg	Entalpia 242,66 kJ/kg

\*dados 15/02/2018 16:06:00

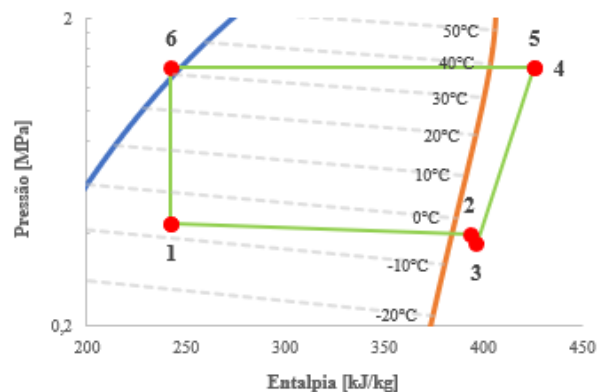


Figura 8. Visão geral de alguns dos dados adquiridos e calculados do monobloco testado em 15/02/2018

Para realização de todos os cálculos, foram realizadas algumas simplificações, tais como: processo de expansão isentálpico, mesmas condições de pressão e temperatura para a descarga do compressor e entrada do condensador (devido à curta distância de linha), entalpias e título calculados pelos dados de temperatura e pressão respectivos.

## 5. CONCLUSÃO

A utilização de fluidos mais sustentáveis, conforme visto, já é realidade na refrigeração comercial e industrial. Nesse sentido, o presente artigo apresentou a viabilidade da utilização de fluidos HFO/HFC, como o R-454C e o R-455A, demonstrando que esses fluidos possuem um ótimo desempenho termodinâmico, principalmente se comparados aos HFCs antes utilizados, além de acatar a todas as normativas nacionais e internacionais sobre segurança de operação.

A viabilidade é demonstrada a partir do sucesso da aplicação relatada, juntamente com a análise de *benchmarking* TEWI, comparando diferentes soluções e demonstrando, de maneira clara e objetiva, que a aplicação de tais monoblocos frigoríficos com fluidos HFO/HFC tem o mesmo impacto de aquecimento global em comparação à utilização de fluidos naturais. Ou seja, aplicando de maneira correta, podem ser comparados às melhores soluções sustentáveis em refrigeração comercial e industrial.

Dessa forma, conforme apresentado ao longo do presente artigo, pode-se concluir que soluções de refrigeração industrial em grandes instalações, principalmente em grandes centros urbanos, por meio da utilização de fluidos sintéticos de baixo GWP, não tóxicos e em baixa concentração, apresentam inúmeras vantagens à instalação e já se tornaram realidade. Outros artigos serão realizados no futuro para apresentar, com mais detalhes, as aplicações com fluido R-455A, também em refrigeração industrial.

## 6. REFERÊNCIAS

- ABNT. 2018. Fluidos frigoríficos – Designação e classificação de segurança. ABNT NBR 16666-2018.
- ABNT. 2018. Segurança em sistemas frigoríficos. ABNT NBR 16069-2018.
- AIRAH. 2012. Methods of calculating Total Equivalent Warming Impact (TEWI). The Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Heating, 2012.
- ASHRAE. 2010. ASHRAE position document: ammonia as a refrigerant. Atlanta: ASHRAE.
- ASHRAE. 2016. Designation and classification of refrigerants. ANSI/ASHRAE Standard 34-2016.
- ASHRAE. 2016. Safety standard for refrigeration systems. ANSI/ASHRAE Standard 15-2016.
- ASHRAE. 2017. ASHRAE Handbook – Fundamentals. Atlanta: ASHRAE.
- ASHRAE. 2017. ASHRAE position document on refrigerants and their responsible use. Atlanta: ASHRAE.
- ASHRAE. 2018. ASHRAE Handbook – Refrigeration. Atlanta: ASHRAE.
- Calm, J. M., and Didion, D. A. 1998. Trade-offs in refrigerant selections: past, present, and future. Int J. Refrig. Vol. 21, No. 4, pp. 308-321, 1998.
- Calm, J. M. 2008. The next generation of refrigerants – Historical review, considerations, and outlook. Int.J. Refrigeration 31: 1123-33.
- Cho, H., Domanski, P. A. 2016. Optimized air-to-refrigerant heat exchanger with low-gwp refrigerants. 12th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Edinburgh, UK, August 21-24, 2016
- IEA. 2011. CO2 Emissions from fuel combustion. International Energy Agency, 2011.
- ISO. 2014. Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements – Part 1, 2, 3 and 4. ISO 5149-2014.
- Kujak, S. 2017. Flammability and new refrigerant options. ASHRAE Journal, May 2017.
- Laboratório de Eficiência Energética em Edificações UFSC. 2018. Arquivos climáticos INMET 2016. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>. Acesso em: julho de 2018.
- McGowan, M. 2018. Adopting alternative refrigerants: conversion challenges and applications. ASHRAE Journal, February 2018.
- NIST. 2013. NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties – REFPROP – Version 9.1 – DLL version 9.1104.
- Pottker, G., Motta, S. Y., Spatz, M., Becerra, E., Smith, G. 2014. Refrigerants with low environmental impact for refrigeration applications. 15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 14-17, 2014.
- Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs. 2018. Linha do tempo. Disponível em: <http://www.protocolode-montreal.org.br>. Acesso em: julho de 2018.
- Withouse, J. 2016. High-glide refrigerant blends & system retrofits – Part 1. ASHRAE Journal, November 2016.
- Withouse, J. 2016. High-glide refrigerant blends & system retrofits – Part 2. ASHRAE Journal, December 2016.
- Withouse, J. 2017. High-glide refrigerant blends & system retrofits – Part 3. ASHRAE Journal, January 2017.

### APPLICATION OF SELF-CONTAINED EQUIPMENTS WITH LOW-GWP REFRIGERANTS FOR INDUSTRIAL REFRIGERATION: AN OPTION FOR LARGE INSTALLATIONS IN URBAN CENTERS

**Abstract:** *As a demonstration of a new refrigeration solution in large installations, this article considers the application of refrigeration monoblocks for medium and low temperature, presenting their characteristics and the evolution of technologies in refrigerants used. Among them, the HFO refrigerants studied in the present article stand out, which are used in low- and medium-temperature operation and have GWP <150, in compliance with the most stringent international norms and agreements on safety and sustainability.*

**Keywords:** *low GWP, HFO, industrial refrigeration, self-contained, TEWI*