



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO
SEMI-ÁRIDO PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA (DCT) CURSO
INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Álvaro das Chagas Oliveira

**Análise comparativa entre os gases refrigerantes R32 e R410A quanto a eficiência,
sustentabilidade e segurança em sistemas de refrigeração.**

CARAÚBAS

2025

Álvaro das Chagas Oliveira

Análise comparativa entre os gases refrigerantes R32 e R410A quanto a eficiência, sustentabilidade e segurança em sistemas de refrigeração.

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Me. Rafael Bezerra Azevedo Mendes.

CARAÚBAS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

O48a Oliveira, Álvaro das Chagas .
Análise comparativa entre os gases
refrigerantes R32 e R410A quanto a eficiência,
sustentabilidade e segurança em sistemas de
refrigeração / Álvaro das Chagas Oliveira. - 2025.
55 f. : il.

Orientador: Rafael Bezerra Azevedo Mendes.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de
Ciência e Tecnologia, 2025.

1. Refrigerantes. 2. R410A. 3. R32. 4.
Eficiência Energética. 5. Sustentabilidade. I.
Mendes, Rafael Bezerra Azevedo , orient. II.
Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo) autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra
CRB: 15/1052

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Álvaro das Chagas Oliveira

**Análise comparativa entre os gases refrigerantes R32 e R410A quanto a eficiência,
sustentabilidade e segurança em sistemas de refrigeração.**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 05/ 08/ 2025.

BANCA EXAMINADORA

Rafael Bezerra Azevedo Mendes
Nome do Orientador, Prof. Me. (UFERSA)
Presidente

Carlos Costa de Carvalho
Nome do Examinador Interno, Prof. Me. (UFERSA)
Membro Examinador

Edel Mary Quinn de Oliveira Figueredo
Nome do Examinador Interno, Prof. Me.
(UFERSA)
Membro Examinador

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise comparativa aprofundada entre os fluidos refrigerantes R32 e R410A, abordando seus impactos na eficiência energética, sustentabilidade ambiental, segurança operacional e viabilidade técnica e econômica em sistemas de refrigeração. Diante da crescente demanda por conforto térmico e das rigorosas exigências ambientais, a seleção do fluido refrigerante tornou-se uma decisão estratégica. O R410A, amplamente utilizado, enfrenta desafios devido ao seu elevado Potencial de Aquecimento Global (GWP = 2088), impulsionando a busca por alternativas. Nesse contexto, o R32 surge como uma opção promissora, com GWP de 675 (aproximadamente um terço do R410A) e maior capacidade calorífica volumétrica, o que pode resultar em ganhos de eficiência. Contudo, sua classificação como levemente inflamável (A2L) exige a implementação de protocolos de segurança mais rigorosos e treinamentos específicos para manuseio e instalação. A pesquisa, de natureza bibliográfica e comparativa, baseou-se na análise de publicações especializadas, artigos científicos, normas técnicas e manuais de fabricantes, coletando e organizando dados para uma avaliação crítica. Os resultados indicam que o R32 se posiciona como o refrigerante mais promissor para o futuro da refrigeração, principalmente devido ao seu menor impacto ambiental e potencial de eficiência energética, apesar dos desafios relacionados à segurança e à necessidade de adaptações em sistemas existentes. Conclui-se que a transição para o R32 é um passo fundamental para um setor de refrigeração mais sustentável e eficiente, exigindo pesquisa contínua e colaboração entre os diversos atores da indústria.

Palavras-chave: R32; R410A; Refrigerantes; Eficiência Energética; Sustentabilidade; Segurança Operacional.

ABSTRACT

This study presents an in-depth comparative analysis of the refrigerant fluids R32 and R410A, addressing their impacts on energy efficiency, environmental sustainability, operational safety, and technical-economic feasibility in refrigeration systems. Given the growing demand for thermal comfort and increasingly strict environmental regulations, the selection of a refrigerant has become a strategic decision. R410A, although widely used, faces challenges due to its high Global Warming Potential (GWP ≈ 2088), encouraging the search for alternatives. In this context, R32 emerges as a promising option, with a significantly lower GWP (≈ 675) and greater volumetric heat capacity, which may lead to efficiency gains. However, its classification as mildly flammable (A2L) requires the implementation of stricter safety protocols and specific training for handling and installation. This bibliographic and comparative research is based on the analysis of specialized publications, scientific articles, technical standards, and manufacturers' manuals, collecting and organizing data for a critical evaluation. The results indicate that R32 stands out as the most promising refrigerant for the future of refrigeration, mainly due to its lower environmental impact and potential for improved energy performance, despite challenges related to safety and the need for adaptations in existing systems. It is concluded that the transition to R32 is a key step toward a more sustainable and efficient refrigeration sector, requiring ongoing research and collaboration among various industry stakeholders.

Keywords: R32; R410A; Refrigerants; Energy Efficiency; Sustainability; Operational Safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo básico de refrigeração	17
Figura 2 - Exemplo de Unidade Condensadora de um Ar condicionado do tipo Split	18
Figura 3 - Exemplo de Unidade Evaporadora de um Ar condicionado do tipo split	18
Figura 4 – Esquema dos componentes de um sistema Split e o ciclo de resfriamento	21
Figura 5 - Processo do fluido refrigerante nos equipamentos de refrigeração	25
Figura 6 - Curva de saturação pressão x temperatura típica de um fluido	28
Figura 7 - Diagrama de Mollier	30
Figura 8 - Classificação de Segurança (ASHRAE)	40
Figura 9 - Fluxograma metodológico	47
Figura 10 - Comparação de indicadores de eficiência.	50
Figura 11 - Comparação de GWP entre refrigerantes.	51
Figura 12 - Comparação da classificação de segurança dos gases R32 e R410A.	52
Figura 13 - Propriedades físico-químicas comparativas dos gases R32 e R410A.	53
Figura 14 – Gráfico de desempenho energético e ambiental R32 e R410A.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos fluidos refrigerantes	25
Tabela 2 - Propriedades do R-410A	34
Tabela 3 - Classificação da Serpentina - Comparação R-410A vs R-22	35
Tabela 4 - Propriedades físico-químicas do R32	36
Tabela 5 - Comparação de GWP entre o R32 e outros refrigerantes	37
Tabela 6 - Requisitos do Lado do Ar (Exemplo de Aplicação)	38
Tabela 7 - Propriedades Termodinâmicas do R-32 (Vapor Saturado)	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Formulação do problema.....	12
1.2 Justificativa.....	13
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Geral.....	15
1.3.2 Específicos.....	15
1.4 Estrutura do trabalho.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Sistemas de Refrigeração Tipo Split.....	16
2.1.1 Funcionamento Geral.....	17
2.1.2 Aplicações e benefícios.....	19
2.1.3 Componentes principais e suas funções.....	19
2.1.4 Aplicações e benefícios.....	21
2.1.5 Parâmetros Técnicos Fundamentais.....	22
2.2 Gases refrigerantes.....	23
2.2.1 Histórico e funcionamento dos fluidos refrigerantes.....	23
2.2.2 Características gerais e classificação dos refrigerantes.....	25
2.2.3 Pressão.....	27
2.2.4 Temperatura.....	29
2.2.5 Volume específico.....	29
2.2.6 Massa específico.....	29
2.2.7 Entalpia.....	30
2.2.8 R410A – Características e aplicações.....	33
2.2.8.1 Aplicações e Vantagens Operacionais.....	34
2.2.8.2 Comparação de performance: R-410A vs R-22.....	35
2.2.8.3 Limitações Técnicas e Ambientais.....	35
2.2.9 R32 – Características e Aplicações.....	36

2.2.9.1 Crescimento do Uso e Aplicações Típicas.....	37
2.2.9.2 Aplicações e Vantagens Operacionais.....	37
2.2.9.3 Limitações técnicas.....	39
2.2.10 Propriedades Térmicas e Desempenho Energético dos Gases R32 e R410A.....	41
2.2.10.1 Propriedades Termodinâmicas Relevantes.....	41
2.2.10.2 Avaliação de Desempenho Energético.....	42
2.2.11 Impactos Ambientais dos Refrigerantes.....	42
2.2.11.1 Conceitos Básicos de Impacto Ambiental.....	42
2.2.11.2 Contexto Regulatório e Protocolos Internacionais.....	43
2.2.12 Aspectos de Segurança Operacional.....	43
2.2.12.1 Inflamabilidade e Riscos Associados ao Uso de R32 e R410A.....	43
2.2.12.2 Cuidados Específicos em Projetos e Instalações.....	44
2.2.12.3 Recomendações Normativas Internacionais.....	44
2.2.12.4 Procedimentos e Boas Práticas de Instalação e Manutenção.....	44
2.2.12.5 Treinamento e Capacitação Técnica.....	45
2.2.13 Custos e Viabilidade Técnica da Substituição do R410A pelo R32 (Retrofit).....	45
2.2.13.1 Conceito de Retrofit e Aplicações Possíveis.....	45
2.2.13.2 Adequações Técnicas e Compatibilidade.....	46
2.2.13.3 Custos Envolvidos na Conversão.....	46
2.2.13.4 Análise da Viabilidade Econômica.....	46
3 METODOLOGIA.....	47
3.1 Tipo de Pesquisa.....	47
3.2 Critérios de Comparação.....	48
3.3 Coleta de Dados.....	48
3.4 Análise dos Dados.....	49
4 ANÁLISE DE DADOS.....	49
4.1 Eficiência Energética.....	50
4.2 Sustentabilidade Ambiental.....	51
4.3 Segurança Operacional.....	52

4.4 Viabilidade Técnica e Econômica.....	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	53
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do problema

O crescimento expressivo da demanda por conforto térmico, aliado às necessidades cada vez maiores de conservação de alimentos e eficiência em processos industriais, impulsionou significativamente o avanço das tecnologias empregadas em sistemas de refrigeração. Nesse contexto de constante evolução tecnológica, a seleção adequada do fluido refrigerante passou a ser uma decisão estratégica, pois afeta diretamente o desempenho operacional dos equipamentos, os custos de operação, o atendimento às normas ambientais e a segurança dos usuários (Bastos, 2024).

Durante muitos anos, o R410A consolidou-se como solução padrão no setor, graças à sua estabilidade química e compatibilidade com equipamentos modernos. Nessa linha, Calm (2019, p. 45) afirma que “o R410A permanece amplamente adotado devido ao seu desempenho energético confiável em diferentes aplicações”. Ainda assim, o elevado Potencial de Aquecimento Global (GWP = 2088) tem se revelado um obstáculo diante das exigências ambientais. Nesse cenário, McLinden et al. (2017, p. 103) destacam que as regulamentações cada vez mais rígidas têm pressionado a indústria a encontrar alternativas que causem menos impacto climático.

Nesse viés, em resposta a essa limitação, o difluorometano (R32) surgiu como uma das opções mais promissoras, apresentando GWP de aproximadamente 675. De acordo com Kim et al. (2014, p. 127), “o R32 combina redução de emissões com ganhos de eficiência, favorecido por sua maior capacidade calorífica volumétrica”. Contudo, essa vantagem ambiental vem acompanhada de desafios técnicos: classificado como refrigerante levemente inflamável (A2L), o R32 requer vedações reforçadas e detectores de vazamento mais sensíveis, além de rígidos protocolos de segurança (ASHRAE, 2016).

Outro aspecto relevante refere-se à viabilidade técnica da substituição direta do R410A pelo R32 em sistemas originalmente projetados para operar com o primeiro. Embora os dois gases possuam propriedades termodinâmicas semelhantes, o R32 apresenta diferenças significativas na pressão de operação, velocidade de fluxo e condutividade térmica, o que pode afetar diretamente o desempenho de componentes como compressores, trocadores de calor e até o tipo de lubrificante utilizado no sistema. Nessa linha de pensamento, Calm (2019, p. 52) afirma que, “incompatibilidades entre lubrificantes originais e o R32 podem gerar instabilidades operacionais e custos adicionais de manutenção”. Significando, assim, que ao utilizar o R32 sem os devidos ajustes, o sistema pode apresentar sobreaquecimento,

redução da eficiência térmica, desgaste prematuro de peças móveis e até falhas de funcionamento, comprometendo tanto a performance quanto a durabilidade do equipamento.

Em relação à segurança operacional, o uso do R32 implica em treinamentos específicos para os técnicos de refrigeração, uma vez que sua inflamabilidade aumenta os riscos associados a acidentes em ambientes fechados ou durante eventuais vazamentos. Nesse sentido, o Manual de Boas Práticas de Refrigeração (2020, p. 74) destaca que a capacitação contínua dos profissionais é considerada fundamental para assegurar condições seguras durante a instalação e a manutenção de sistemas que utilizam esse fluido refrigerante.

Outrossim, a viabilidade econômica da troca de refrigerantes deve levar em conta os custos de *retrofit*, ou seja, todos os custos associados à adaptação ou modificação de equipamentos existentes para utilizarem novas tecnologias ou materiais, sem a necessidade de substituir totalmente o sistema, incluindo investimentos em infraestrutura de segurança e atualizações de protocolos de manutenção. Assim, soluções como compressores “*dual-fuel*”, capazes de operar com ambos os gases, vêm sendo estudadas para minimizar custos e manter o desempenho operacional (Zhang et al. 2020, p. 56).

Portanto, o debate sobre a escolha entre os refrigerantes R410A e R32 envolve uma combinação complexa de fatores como eficiência energética, sustentabilidade ambiental, segurança operacional e viabilidade econômica.

1.2 Justificativa

Visto isso, é necessário conduzir estudos comparativos, baseados em simulações computacionais e análises críticas das normas vigentes, visando embasar a melhor decisão quanto ao uso desses refrigerantes em sistemas modernos de refrigeração. Nesse cenário, a escolha do fluido não só interfere diretamente no rendimento dos sistemas, como também impacta questões de segurança, manutenção, custos operacionais e adequação às normas internacionais (Bastos, 2024). Nesse contexto, analisar comparativamente o R32 e o R410A é especialmente relevante para identificar soluções que respondam de modo equilibrado a tais demandas.

Em primeiro lugar, a eficiência energética está no centro das discussões, uma vez que sistemas de climatização e refrigeração representam uma parcela significativa do consumo mundial de eletricidade. Nesse sentido, Calm (2019) salienta que, ao escolher o fluido adequado, é possível otimizar o desempenho termodinâmico, reduzindo o consumo de energia e melhorando a sustentabilidade dos processos. Ao comparar o R32 e R410A, observa-se um

potencial para melhorias, considerando que as propriedades físico-químicas do R32 permitem sistemas mais compactos e eficientes, principalmente sob condições de carga variável (Kim et al., 2014).

Além disso, a segurança operacional merece atenção redobrada, especialmente porque o R32 é classificado como levemente inflamável (A2L), ao contrário do R410A, que não apresenta esse risco. Segundo a ASHRAE (2016), a introdução de fluidos com essas características exige adaptações em componentes, vedações e procedimentos de manutenção, além de capacitação específica para técnicos e operadores. Isso implica uma revisão de rotinas de inspeção, detecção de vazamentos e ventilação dos ambientes, visando mitigar possíveis acidentes.

Outro aspecto essencial refere-se à durabilidade e à manutenção dos equipamentos em caso de substituição dos fluidos. Nesse quesito, mudanças no tipo de refrigerante podem afetar a compatibilidade com compressores, trocadores de calor e lubrificantes, além de provocar instabilidades operacionais. Calm (2019) observa que pequenas variações na carga do fluido ou incompatibilidades com o óleo podem resultar em falhas e aumentar os custos de manutenção, tornando imprescindível o correto planejamento do *retrofit*.

No mesmo plano, a viabilidade econômica da troca de refrigerantes deve ser analisada com cautela, já que envolve custos de adaptação tecnológica, aquisição de componentes específicos e treinamentos adicionais. Zhang et al. (2020) enfatiza que a adoção de compressores “*dual-fuel*” e sistemas desenvolvidos originalmente para R32 podem reduzir gastos de *retrofit* e maximizar a performance, porém essas soluções demandam investimentos iniciais e avaliação detalhada do custo-benefício ao longo do ciclo de vida dos equipamentos.

No tocante à sustentabilidade, o debate sobre o GWP e o impacto ambiental dos gases refrigerantes ganhou relevância global, impulsionado por legislações e acordos internacionais. A UNEP (2017) ressalta que, embora a redução do GWP seja necessária, ela deve vir acompanhada da consideração de outros critérios igualmente relevantes, como o desempenho operacional e a segurança dos sistemas. Por isso, a análise integrada desses parâmetros é fundamental para garantir escolhas mais responsáveis e alinhadas às tendências mundiais.

Na esfera acadêmica e profissional, ainda se nota uma carência de estudos comparativos que articulem desempenho energético, viabilidade operacional, custos de manutenção e segurança de maneira simultânea. Trabalhos dessa natureza são essenciais não só para preencher lacunas na literatura, mas também para subsidiar atualizações em normas técnicas, orientar políticas públicas e apoiar a tomada de decisão por parte de engenheiros, fabricantes e órgãos reguladores.

Diante desse panorama multifacetado, esta pesquisa se justifica ao propor uma análise abrangente dos gases R32 e R410A, aliando simulação computacional, revisão crítica da literatura e discussão das normas vigentes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Realizar uma análise comparativa entre os gases refrigerantes R32 e R410A, investigando aspectos relacionados à eficiência energética, sustentabilidade ambiental e segurança operacional. Busca-se, com isso, identificar qual gás refrigerante é mais adequado para uso nos sistemas de refrigeração atuais, respeitando as exigências técnicas, operacionais e regulatórias vigentes. Além disso, pretende-se avaliar cuidadosamente a viabilidade técnica da substituição direta ou indireta do R410A pelo R32 em sistemas já instalados, considerando especialmente questões de compatibilidade e limitações técnicas envolvidas nessa transição.

1.3.2 Específicos

- Investigar os impactos ambientais de cada refrigerante, dando especial atenção ao Potencial de Aquecimento Global (GWP), e avaliando a conformidade com regulamentações internacionais, como a Emenda de Kigali.
- Realizar uma análise técnica das propriedades térmicas dos gases R32 e R410A, tais como capacidade calorífica, pressão de operação e desempenho em ciclos de refrigeração, para identificar as vantagens e limitações operacionais de cada um dos gases em estudo.
- Avaliar os riscos associados à utilização do gás R32, particularmente em função da sua inflamabilidade, destacando as práticas recomendadas e as medidas necessárias para garantir um manuseio seguro e adequado nos sistemas de refrigeração.
- Analisar os custos envolvidos na substituição do gás R410A pelo R32, abordando tanto os aspectos econômicos para novos projetos quanto os custos adicionais decorrentes das adaptações tecnológicas necessárias em sistemas já existentes.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos principais. No primeiro capítulo, apresenta-se a introdução, contendo a formulação do problema, a justificativa e os

objetivos geral e específicos, estabelecendo o contexto atual acerca dos gases refrigerantes R32 e R410A.

No segundo capítulo é desenvolvida a revisão bibliográfica, abordando tópicos essenciais relacionados à refrigeração, propriedades térmicas e operacionais dos gases refrigerantes estudados, os principais aspectos de segurança operacional, incluindo a inflamabilidade do R32 e os cuidados necessários para seu manuseio seguro, além de questões ambientais, especialmente o Potencial de Aquecimento Global (GWP).

No terceiro capítulo descreve-se a metodologia adotada na pesquisa, detalhando a escolha do sistema de ar-condicionado tipo Split para o desenvolvimento das análises, os parâmetros técnicos utilizados nas simulações realizadas com o auxílio do software CoolPack e os critérios específicos de comparação técnica e operacional entre os refrigerantes selecionados.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos nas simulações, demonstrados por meio de tabelas e gráficos ilustrativos, acompanhados por uma análise à luz da literatura especializada e das normas técnicas aplicáveis.

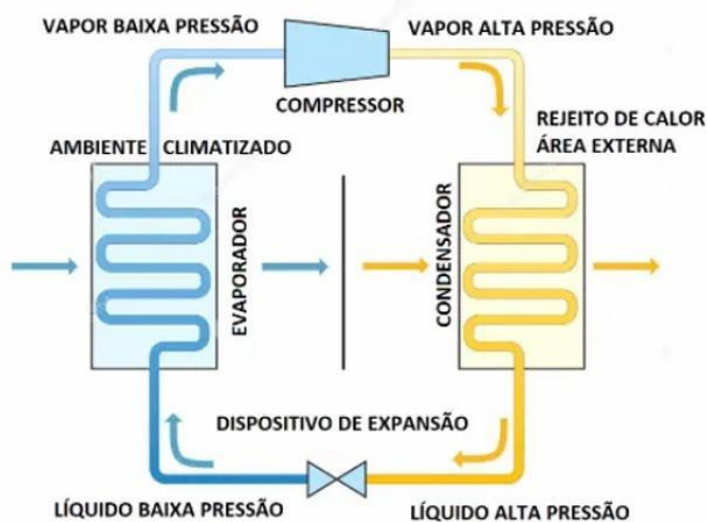
Por fim, o quinto capítulo traz as considerações finais da pesquisa, sintetizando os resultados mais importantes encontrados, respondendo aos objetivos inicialmente definidos e oferecendo recomendações práticas para futuras pesquisas e estudos na área de refrigeração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas de Refrigeração Tipo Split

Falando em climatização de ambientes, os sistemas de refrigeração do tipo split vêm ganhando destaque como uma solução eficiente, versátil e de fácil adaptação a diferentes necessidades do comércio. Direcionando a seu nome, o termo split significa “dividido”, pois, como bem pontua o Manual de Boas práticas de Refrigeração, “esse sistema possui dois módulos separados: a unidade evaporadora, instalada no interior do ambiente, e a unidade condensadora, posicionada na área externa” (SENAI, 2020 p.78). Nesse contexto, sua configuração contribui não só para a redução significativa de ruído no espaço climatizado, mas também para a otimização do desempenho térmico e do conforto do usuário. A figura abaixo retrata o ciclo termodinâmico em sistemas como do tipo split.

Figura 1 - Ciclo básico de refrigeração



Fonte: Adaptado de Vitlain. 2018..

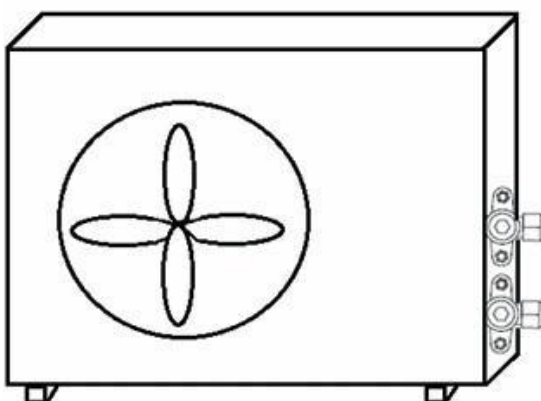
2.1.1 Funcionamento Geral

Trazendo para o contexto de funcionamento, o sistema Split é estruturado a partir do ciclo de compressão de vapor, amplamente aceito pela literatura técnica. É explicado por Calm (2019, p. 112) que o processo do ciclo é composto por quatro etapas fundamentais: compressão, condensação, expansão e evaporação, como mostrado na figura 1. Inicialmente, o fluido refrigerante entra no compressor, localizado na unidade externa onde sofre compressão, elevando sua pressão e temperatura. Em seguida, esse fluido aquecido é conduzido ao condensador, onde troca calor com o ambiente externo, liberando energia térmica e se convertendo em líquido. Após essa fase, o fluido passa por um dispositivo de expansão que reduz drasticamente sua pressão e temperatura. Por fim, já em estado líquido e frio, o refrigerante percorre a serpentina do evaporador (instalado na unidade interna), onde absorve o calor do ar do ambiente e o resfria, completando o ciclo.

Já retratando dos componentes, de acordo com o Manual de Boas Práticas de Refrigeração, a unidade interna contém o evaporador, ventiladores e filtros, sendo a responsável pela absorção do calor do ambiente interno (SENAI, 2020, p. 80). Ainda nesse

contexto, o manual complementa, que já na unidade externa abriga o compressor, o condensador e os ventiladores que facilitam a troca de calor com o meio externo. Desse modo, as unidades são conectadas por tubulações de cobre, geralmente isoladas termicamente, por onde circula o fluido refrigerante entre a unidade evaporadora e a condensadora.

Figura 2 - Exemplo de Unidade Condensadora de um Ar condicionado do tipo Split



Fonte: Adaptado de SENAI. Boas Práticas de Refrigeração, 2020, p. 79.

Figura 3 - Exemplo de Unidade Evaporadora de um Ar condicionado do tipo split



Fonte: Adaptado de SENAI. Boas Práticas de Refrigeração, 2020, p. 79.

Observa-se, em modelos modernos, a incorporação de sensores eletrônicos, válvulas de expansão controladas eletronicamente e sistemas automatizados de proteção, os quais têm como objetivo aumentar a eficiência do ciclo de refrigeração e minimizar o risco de falhas operacionais. De acordo com o Manual de Boas Práticas de Refrigeração, esses recursos tornam o sistema mais seguro e confiável, além de contribuírem para a durabilidade dos

componentes (SENAI, 2020, p. 80). Na mesma linha de pensamento, Calm (2019, p. 118) também destaca que o avanço da automação tem papel crucial na melhoria do desempenho térmico e no atendimento às normas internacionais de eficiência energética.

2.1.2 Aplicações e benefícios

Não menos importante, além de oferecer uma climatização eficiente e silenciosa, o sistema Split proporciona vantagens significativas quanto à manutenção e ao custo de instalação. Nesse quesito, a disposição separada das unidades facilita reparos e ajustes, além de permitir maior flexibilidade na adaptação a projetos arquitetônicos diversos. Conforme destaca o Manual de Boas Práticas, “a separação das unidades facilita intervenções técnicas e permite adaptações em diferentes projetos arquitetônicos” (SENAI, 2020, p. 101). Ainda nesse cenário, Calm (2019, p. 118) acrescenta que a incorporação de inversores de frequência e a adoção de refrigerantes como o R32 têm elevado o padrão de eficiência energética desses sistemas, tornando-os mais sustentáveis e alinhados às exigências atuais do mercado.

2.1.3 Componentes principais e suas funções

O sistema de refrigeração falado é composto por um conjunto de elementos interdependentes, garantindo uma operação adequada do ciclo térmico. São esses, divididos entre unidades interna e externa, desempenhando funções específicas e complementares, sendo fundamentais a eficiência e a estabilidade do sistema. Nesse viés, compreender o papel de cada um desses elementos é essencial tanto para o dimensionamento quanto para a instalação, manutenção e operação segura do equipamento. Dentre esses, temos:

- Unidade evaporadora

Localizada na parte interna do ambiente climatizado, tendo em vista que sua função principal é realizar a troca de calor com o ar do ambiente. Nela, encontra-se o evaporador, um trocador de calor onde circula o fluido refrigerante em baixa temperatura e pressão. Seguindo o ciclo, ao atravessar essa serpentina, o ar é resfriado e devolvido ao ambiente. Além disso, a unidade interna também abriga ventiladores silenciosos, filtros de ar que removem partículas em suspensão e sensores eletrônicos que monitoram a temperatura e controlam o funcionamento do sistema.

- Unidade condensadora

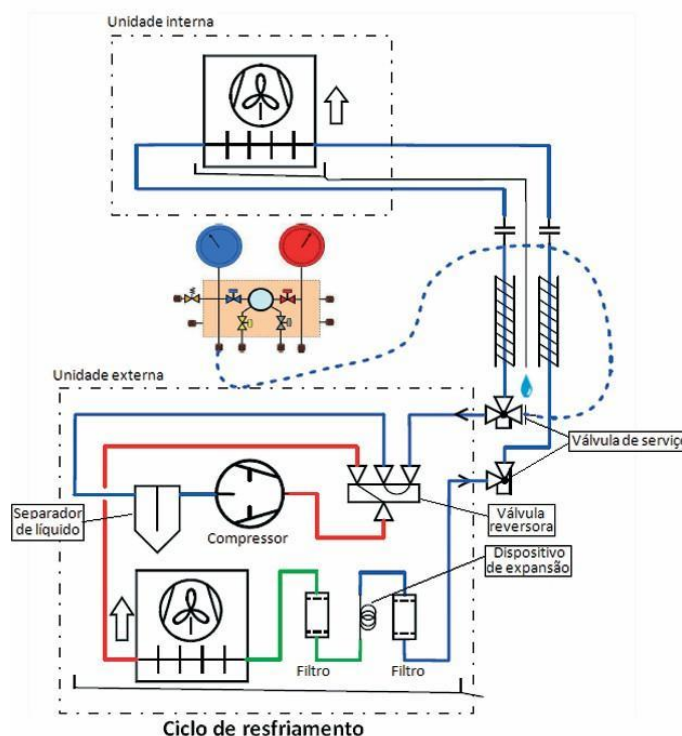
Já a unidade condensadora, posicionada externamente, abriga o compressor, o condensador e os ventiladores responsáveis pela liberação de calor para o ambiente externo. O compressor realiza a compressão do fluido refrigerante que retorna da evaporadora, elevando sua temperatura e pressão. Esse fluido aquecido, percorre o condensador, onde ocorre a dissipação do calor com auxílio de ventiladores, resultando na condensação do gás refrigerante. Nessa linha de pensamento, a literatura técnica destaca que “o fluido refrigerante é comprimido na unidade externa, deslocando-se então para o condensador, onde libera calor e muda do estado gasoso para o líquido” (CALM, 2019, p. 112). Em sistemas modernos, é comum que a unidade externa incorpore proteções térmicas e elétricas, como disjuntores e relés, para garantir maior vida útil e segurança ao equipamento (CALM, 2019, p. 118).

- Dispositivo de expansão

Outro componente essencial do sistema é o dispositivo de expansão, responsável por reduzir a pressão do fluido refrigerante antes de sua entrada no evaporador. Esse processo, permite que o fluido atinja as condições ideais para a evaporação e absorção de calor. Vale ressaltar que existem diferentes tipos de dispositivos, desde tubos capilares até válvulas de expansão termostáticas ou eletrônicas. De acordo com o Manual de Boas Práticas, “o elemento de expansão pode ser um tubo capilar, uma válvula de expansão termostática ou uma válvula de expansão eletrônica, dependendo do projeto” (SENAI, 2020). Assim, a escolha do dispositivo afeta diretamente o desempenho do sistema, sendo necessária uma seleção técnica cuidadosa conforme as condições de carga térmica e o tipo de fluido refrigerante utilizado.

A seguir, apresenta-se um esquema técnico ilustrativo dos principais componentes do sistema Split, com suas respectivas funções e interligações no ciclo frio.

Figura 4 – Esquema dos componentes de um sistema Split e o ciclo de resfriamento



Fonte: Adaptado de SENAI. Boas Práticas de Refrigeração, 2020, p. 81.

2.1.4 Aplicações e benefícios

Diante da crescente busca por soluções eficientes e adaptáveis para climatização de ambientes, os sistemas *Split* vêm se destacando como alternativas tecnicamente vantajosas e comercialmente viáveis. Sua aplicação vai além do uso residencial: clínicas, salas técnicas, ambientes corporativos e comércios de pequeno e médio porte têm adotado amplamente essa tecnologia pela praticidade na adequação aos espaços existentes e pela variedade disponível no mercado (SENAI, 2020, p. 78). Deve-se ressaltar que a versatilidade do projeto, aliada ao desempenho térmico estável, favorece sua utilização em ambientes que exigem controle climático mais preciso e constante.

Do ponto de vista técnico-científico, os sistemas *Split* proporcionam condições padronizadas ideais para estudos de desempenho de fluidos refrigerantes. Como observa Calm (2019, p. 114), trata-se de uma configuração que permite avaliar com exatidão parâmetros como eficiência energética, carga térmica e influência do tipo de fluido sobre o ciclo frigorífico. Essa característica torna o sistema uma excelente plataforma para ensaios,

simulações e validações experimentais, especialmente no contexto da comparação entre refrigerantes com diferentes propriedades físico-químicas e níveis de impacto ambiental.

Outro diferencial relevante é que os modelos mais atuais desses sistemas incorporam tecnologias que os tornam compatíveis com os desafios modernos da sustentabilidade e da eficiência. Desse modo, recursos como controle por inversor de frequência, válvulas de expansão eletrônicas e sensores inteligentes contribuem para maior estabilidade de operação, redução de consumo e adequação às diretrizes internacionais, como as previstas na Emenda de Kigali (UNEP, 2017, p. 32).

2.1.5 Parâmetros Técnicos Fundamentais

Buscando compreender o funcionamento e o desempenho de sistemas de refrigeração do tipo split, é essencial dominar certos parâmetros técnicos que regem o ciclo frigorífico. São eles que definem o comportamento termodinâmico do equipamento, influenciando diretamente sua eficiência energética, segurança operacional e impacto ambiental. Nesse sentido, Venturini e Pirani (2005, p. 22) destacam que as pressões e temperaturas nos pontos de evaporação e condensação, assim como o controle do superaquecimento e subresfriamento, são determinantes no rendimento dos sistemas.

No ciclo por compressão de vapor, dois pontos fundamentais são as pressões de evaporação e de condensação. A primeira ocorre no evaporador, quando o fluido refrigerante absorve calor do ambiente interno e muda do estado líquido para vapor. A segunda acontece no condensador, onde o fluido libera calor para o ambiente externo e retorna ao estado líquido. Calm (2019, p. 52) explica que o R410A trabalha com pressões significativamente mais altas do que o antigo R22, exigindo tubulações reforçadas. Já o R32, segundo Rodrigues (2024, p. 31), opera em níveis de pressão similares ao R410A, o que viabiliza sua adoção em projetos novos ou como substituto, desde que se respeitem as compatibilidades técnicas.

As temperaturas de evaporação e condensação também são cruciais para o desempenho do sistema de refrigeração. Temperaturas de evaporação mais baixas aumentam a capacidade de refrigeração, pois intensificam a troca térmica no evaporador; entretanto, reduzem a pressão de sucção, exigindo maior compressão e, conseqüentemente, aumentando o consumo de energia elétrica. Por outro lado, temperaturas de condensação mais altas elevam a pressão de descarga, forçando o compressor a operar com um diferencial de pressão maior, o que implica em maior esforço mecânico, maior temperatura de trabalho e desgaste acelerado.

dos componentes. Conforme o Manual de Boas Práticas de Refrigeração, o dimensionamento adequado dos trocadores de calor é indispensável para manter esses parâmetros dentro de faixas ideais, garantindo estabilidade térmica e boa eficiência (SENAI, 2020, p. 81).

Outro aspecto relevante está no superaquecimento e no subresfriamento. O primeiro representa o aquecimento do vapor refrigerante acima da sua temperatura de saturação (ponto em que ocorrem as mudanças de fase: evaporação ou condensação, diretamente relacionada à pressão do sistema) na saída do evaporador, o que garante que não haja presença de líquido no compressor, fator de risco para falhas mecânicas. Já o subresfriamento refere-se à redução da temperatura do líquido abaixo da saturação na saída do condensador, assegurando que o fluido chegue puro à válvula de expansão. Como apontam Kim et al. (2014, p. 239), o controle rigoroso desses parâmetros permite otimizar a transferência de calor e prolongar a vida útil do sistema.

Por fim, a eficiência energética pode ser avaliada por dois indicadores principais: o COP (Coeficiente de Performance) e o SEER (Índice Sazonal de Eficiência Energética). O COP representa a razão entre o calor removido e a energia consumida, enquanto o SEER analisa esse desempenho ao longo de uma temporada. Zhang et al. (2020, p. 142) demonstram que o R32 tende a apresentar ambos os índices superiores ao R410A, tanto em testes laboratoriais quanto em simulações computacionais, devido à sua maior capacidade calorífica volumétrica e à possibilidade de operar com menores quantidades de fluido. Essa análise é decisiva para definir qual refrigerante oferece melhor desempenho técnico e ambiental para sistemas split modernos.

2.2 Gases refrigerantes

2.2.1 Histórico e funcionamento dos fluidos refrigerantes

Um fluido refrigerante é a substância utilizada em um sistema de refrigeração para remover calor de um ambiente ou material que se deseja resfriar. Ao evaporar ou trocar calor com o meio, esse fluido absorve a energia térmica, permitindo o resfriamento desejado.

A trajetória dos fluidos refrigerantes é um capítulo essencial na história da refrigeração, marcada por uma série de inovações técnicas e transformações significativas ao longo do tempo. Partindo disso, Stoecker e Jabardo (2018) destacam que, apesar da longa e rica história da refrigeração, quatro eventos se mostram decisivos para o avanço dos fluidos refrigerantes modernos.

O primeiro desses marcos ocorreu por volta da metade do século XIX, quando se introduziu o ciclo de compressão de vapor e os compressores começaram a ser acionados por

motores elétricos, o que ampliou as possibilidades de aplicação dos sistemas frigoríficos (STOECKER; JABARDO, 2018, p. 28). Já no final da década de 1920, a criação de compostos halogenados como fluidos refrigerantes tornou possível a disseminação da refrigeração em ambientes domésticos, o que representou uma mudança de paradigma para a sociedade moderna (STOECKER; JABARDO, 2018, p. 28).

Outro ponto de inflexão foi o Protocolo de Montreal, estabelecido em 1987, com o objetivo de controlar e eliminar gradualmente os CFCs (clorofluorcarbonetos), que, segundo Miller et al. (2014, p. 146), eram prejudiciais à camada de ozônio. Como resultado direto desse acordo, substituições foram feitas inicialmente pelos HCFCs e, posteriormente, pelos HFCs. No entanto, mesmo os HFCs, apesar de não afetarem a camada de ozônio, apresentam elevado potencial de aquecimento global (GWP), o que reacendeu as discussões sobre sustentabilidade e impulsionou a busca por fluidos alternativos com menor impacto ambiental, destaca (STOECKER; JABARDO, 2018, p. 29).

Do ponto de vista funcional, o fluido refrigerante é peça-chave para a transferência de calor em sistemas de refrigeração. Miller et al. (2014, p. 49) explicam que o fluido refrigerante "é qualquer substância que evapore e vaporize a temperaturas relativamente baixas", sendo fundamental para que ocorra a absorção de calor de um ambiente a ser resfriado. Na mesma linha de raciocínio, Martinelli Jr (2003) reforça que a principal função do fluido é absorver calor do meio e transportá-lo, facilitando a troca térmica no ciclo.

A compreensão do funcionamento do ciclo de refrigeração também é indispensável. Nesse viés Vilain (2018, p. 16) descreve que o ciclo se inicia no evaporador, onde o fluido refrigerante entra como uma mistura saturada (líquido e vapor) absorvendo calor do ambiente e evaporando completamente. Em seguida, o vapor é direcionado ao compressor, onde é comprimido, elevando-se a pressão e a temperatura, passando para o estado de vapor superaquecido. No condensador, esse vapor libera calor para o ambiente externo e se condensa, retornando ao estado líquido. Por fim, o fluido refrigerante passa por um dispositivo de expansão, onde ocorre uma queda brusca de pressão e temperatura, retornando ao evaporador para reiniciar o ciclo.

Essa dinâmica contínua do fluido refrigerante nos diversos componentes do sistema evidencia não apenas sua função, mas também a complexidade envolvida na seleção adequada de substâncias e no dimensionamento dos equipamentos, aspectos amplamente discutidos por Stoecker e Jabardo (2018) em sua obra de referência.

O condensador, ao contrário do evaporador e do compressor, tem como principal função promover a condensação do fluido refrigerante, transformando o vapor superaquecido,

proveniente da descarga do compressor, em líquido. Após essa etapa, o fluido segue para o dispositivo de expansão, onde ocorre uma queda significativa de pressão. Essa redução pressórica permite que o fluido retorne ao evaporador em condições adequadas para reiniciar o ciclo frigorífico (VILAIN, 2018). A figura 5 mostra resumidamente o processo do fluido nos equipamentos citados.

Figura 5 - Processo do fluido refrigerante nos equipamentos de refrigeração

Componente	Características da transformação sofrida pelo fluido refrigerante
Evaporador	Vaporização do fluido refrigerante à baixa pressão
Compressor	Compressão do fluido refrigerante
Condensador	Condensação a uma pressão elevada
Dispositivo de Expansão	Expansão do fluido refrigerante

Fonte: Adaptado de Vilain. 2018..

2.2.2 Características gerais e classificação dos refrigerantes.

Os fluidos refrigerantes têm características que possibilitam seu uso em diversas áreas, desempenhando também um papel crucial na seleção do fluido mais adequado. A tabela 1 exhibe as características dos gases frigoríficos, levando em conta suas características e suas respectivas descrições.

Tabela 1 - Características dos fluidos refrigerantes

Características	Descrição
Desempenho Termodinâmico adequado	Preferência por substâncias cujos pontos de fusão e temperaturas críticas não interfiram na faixa operacional típica de sistemas de refrigeração.

Estabilidade química	Evita-se o uso de compostos que, submetidos a variações de temperatura e pressão, possam reagir com os materiais do sistema, comprometendo sua durabilidade.
Baixa toxicidade	Busca-se eliminar substâncias com alta volatilidade que, sob pressão elevada, possam oferecer riscos à saúde humana.
Baixa inflamabilidade	Diante da possibilidade de vazamentos, é essencial que o fluido não apresente facilidade de ignição, prevenindo riscos de incêndios.
Compatibilidade com lubrificante do compressor	O fluido deve atuar sem impedir o retorno do óleo ao compressor, sendo compatível com os sistemas que realizam essa função automaticamente.
Compatibilidade com os materiais do sistema	Os refrigerantes devem ser quimicamente estáveis quando em contato com os componentes do circuito de refrigeração.
Facilidade de detecção	É desejável que o fluido seja facilmente identificável em caso de vazamento, facilitando a manutenção preventiva.
Impacto ambiental reduzido	Deve-se priorizar o uso de substâncias que não causem agressões significativas à camada de ozônio ou ao clima.
Boa disponibilidade e custo acessível	A comercialização do fluido refrigerante deve ser viável economicamente e amplamente disponível no mercado.

Fonte: Adaptado de Stoecker e Jabardo (2018)

Nessa linha, para Miller et al (2014, p. 155), “os fluidos refrigerantes podem ser caracterizados por uma série de propriedades, tais como pressão, temperatura, volume específico, massa específica e entalpia”. A seguir iremos entender o significado de cada uma dessas.

2.2.3 Pressão

Çengel (2013, p. 21) destacou que "pressão é uma força normal por unidade de área". Ele também explica que "pressão é a força por unidade de área, em newtons por metro quadrado (N/m^2) ou pascal (Pa)."

Retratando de fluidos refrigerantes, a pressão é um parâmetro termodinâmico chave. Sua função principal é determinar a resistência do equipamento que contém o fluido refrigerante, que foi comprimido e conduzido através do sistema sob pressão (MILLER et al., 2014).

A pressão crítica é um dos parâmetros termodinâmicos mais relevantes no estudo de fluidos refrigerantes. Ela representa o valor máximo de pressão sob o qual um gás pode ser liquefeito, independentemente do quanto se reduza a temperatura. Acima desse ponto, o fluido entra em estado supercrítico, no qual as fases líquida e gasosa deixam de existir de forma distinta, tornando inviável o funcionamento convencional do ciclo de compressão de vapor (Çengel, 2014).

Nos sistemas de refrigeração, esse limite tem papel determinante na eficiência do ciclo. Quando a temperatura de condensação se aproxima da temperatura crítica, a capacidade de troca térmica do condensador é prejudicada, exigindo um esforço adicional do compressor para manter o ciclo em operação. Isso resulta em menor eficiência energética e aumento do consumo elétrico (Miller, 2014).

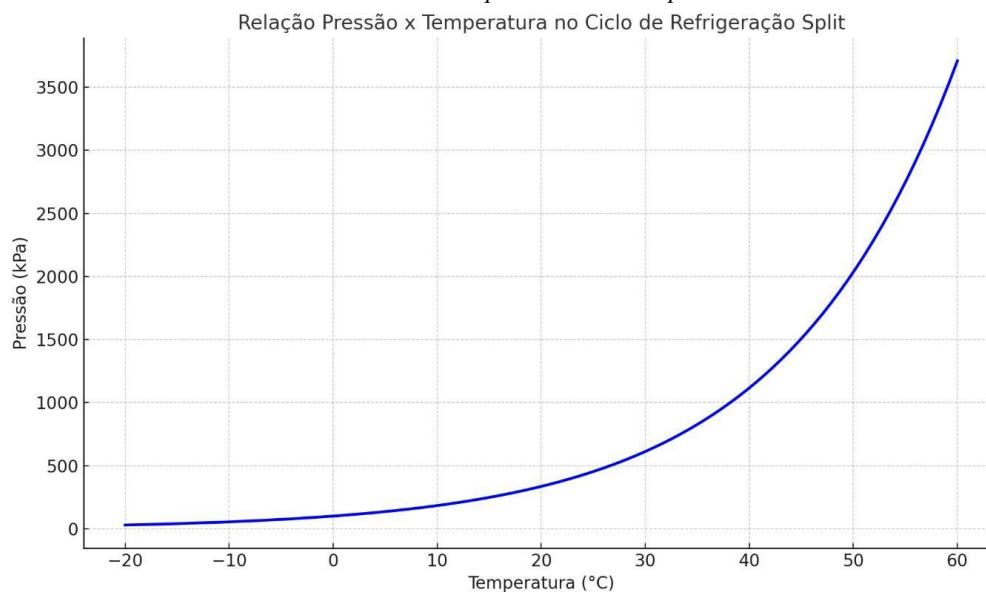
Refrigerantes com temperaturas críticas mais elevadas tendem a ser mais eficientes em climas quentes, pois conseguem operar com maior margem de segurança térmica. É o caso do R32, cuja temperatura crítica é de $78,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, comparada aos $72,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ do R410A. Essa diferença proporciona ao R32 uma maior estabilidade termodinâmica em ambientes de alta temperatura ambiente, permitindo que o fluido continue operando abaixo da zona supercrítica, o que favorece o desempenho global do sistema (Super Radiator Coils, 2019).

Como Miller et al. (2014, p. 155) enfatiza, "a preocupação principal é a de se manter a pressão a mais baixa possível. A pressão ideal do lado de baixa ou pressão de evaporação deve ser tão próxima quanto possível da pressão atmosférica". Ele também explica que a manutenção correta da pressão ideal em um sistema de refrigeração quando está operacional, bem como quando o equipamento está ocioso, é vital para manter os custos operacionais baixos e em cada ponto do sistema ter pressão positiva.

A relação entre pressão e temperatura de saturação é fundamental para o entendimento do comportamento termodinâmico dos fluidos refrigerantes ao longo do ciclo de compressão

de vapor. A Figura 6 ilustra essa correlação, evidenciando como a elevação da temperatura implica em aumento da pressão de saturação.

Figura 6 - Curva de saturação pressão x temperatura típica de um fluido refrigerante no ciclo de compressão de vapor de sistemas split.



Fonte: Adaptado de Super Radiator Coils, (2020)

Uma das equações mais importantes nesse contexto é a Equação de Clausius-Clapeyron, que descreve a taxa de variação da pressão de saturação em função da temperatura durante os processos de mudança de fase. Essa relação é essencial para prever o comportamento do fluido no evaporador e no condensador, onde ocorrem, respectivamente, a evaporação e a condensação.

$$dP/dT = L / (T \cdot \Delta v)$$

Onde:

dP/dT : taxa de variação da pressão com a temperatura

L : calor latente de vaporização (J/kg)

T : temperatura absoluta (K)

Δv : variação de volume específico (entre vapor e líquido)

Utilizada para estimar a variação da pressão de saturação com a temperatura durante as mudanças de fase.

2.2.4 Temperatura

De acordo com Miller et al. (2014), a temperatura do fluido refrigerante é um fator decisivo na hora de definir qual substância será mais adequada para determinado tipo de sistema de refrigeração. Isso porque cada fluido tem um comportamento térmico próprio que influencia diretamente seu desempenho, sendo características como a temperatura de ebulição, a temperatura de saturação e a temperatura crítica determinantes na escolha do refrigerante.

Os autores ainda explicam que o ponto de ebulição é a temperatura em que o líquido começa a se transformar em vapor, processo que ocorre com o fornecimento de calor. Essa temperatura varia de acordo com o tipo de fluido utilizado e também depende da pressão a que ele está submetido no sistema (Miller et al., 2014). A temperatura de saturação, por sua vez, é o valor específico de temperatura em que ocorre essa mudança de fase em uma determinada pressão. Já a temperatura crítica define o ponto máximo acima do qual o fluido não pode mais se liquefazer, mesmo com o aumento da pressão, afetando diretamente a eficiência do ciclo quando se trabalha próximo a esse limite.

2.2.5 Volume específico

Çengel (2013) explica que o volume específico é uma grandeza que representa quanto espaço um determinado fluido ocupa por unidade de massa, sendo normalmente expresso em metros cúbicos por quilograma (m^3/kg): $v = V / m$.

Miller et al. (2014) complementam esse conceito ao apontar que o volume específico de um fluido refrigerante corresponde ao volume de gás gerado quando uma quantidade padrão de 1 kg do fluido é vaporizada. Essa característica é fundamental no projeto dos sistemas de refrigeração, já que influencia diretamente na definição do tamanho de componentes como compressores, evaporadores e tubulações.

2.2.6 Massa específico

Conforme explica Çengel (2013), a massa específica, também chamada de densidade, representa a relação entre a massa de uma substância e o volume que ela ocupa. Em termos

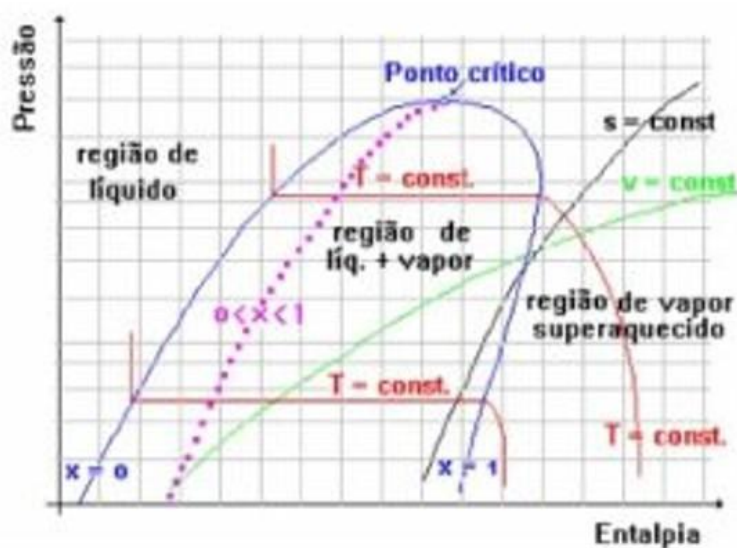
práticos, essa propriedade indica o quanto de matéria existe em determinado espaço, sendo medida geralmente em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3) ou, em alguns sistemas, em libras por pé cúbico (lb/ft^3).

2.2.7 Entalpia

A entalpia é uma propriedade termodinâmica que representa a quantidade total de energia térmica armazenada em uma substância. Segundo Castro (2010), ela varia conforme o fluido absorve ou libera calor: quando o fluido refrigerante ganha energia térmica, sua entalpia aumenta; ao perder calor, essa grandeza diminui proporcionalmente.

Miller et al. (2014) também destacam que a entalpia reúne o calor sensível e o calor latente, sendo o resultado da energia absorvida tanto pela variação de temperatura quanto pela mudança de fase. Ainda de acordo com os autores, o calor latente está diretamente ligado à transição do fluido do estado líquido para o gasoso. Por isso, essa transformação é essencial nos processos de refrigeração, já que é nesse momento que o fluido absorve calor do ambiente ou da superfície que se deseja resfriar. Assim, para um melhor entendimento, segue o gráfico a seguir representando pela figura 7 mostrando as curvas de pressão x entalpia.

Figura 7 - Diagrama de Mollier



Adaptado de Super Radiator Coils, (2020)

Eixos do diagrama:

- Eixo vertical (P): representa a pressão absoluta do refrigerante, geralmente em bar ou kPa.
- Eixo horizontal (h): indica a entalpia específica, em kJ/kg, que corresponde à energia interna mais o trabalho de fluxo por unidade de massa (MILLER; MILLER, 2014, p. 89).

Domínio de saturação (o “domo”)

- Linha de líquido saturado ($x = 0$): curva à esquerda do domo. Todos os pontos sobre ela correspondem ao refrigerante em estado líquido exatamente na temperatura de ebulição para aquela pressão (STOECKER; JABARDO, 2018, p. 45).
- Linha de vapor saturado ($x = 1$): curva à direita do domo. Representa a entalpia de vaporização completa; além dessa linha inicia-se a fase de vapor (ÇENGEL; BOLES, 2013, p. 256).
- Região de líquido + vapor ($0 < x < 1$): interior do domo. A qualidade “x” indica a fração em massa de vapor. Por exemplo, $x = 0,5$ significa metade em vapor e metade em líquido na mistura (ÇENGEL; BOLES, 2013, p. 256).

Regiões externas ao domo

- Líquido sub-resfriado: à esquerda da linha de líquido saturado. Aqui o fluido está totalmente líquido, com temperatura inferior à de saturação para aquela pressão (MILLER; MILLER, 2014, p. 93).
- Vapor superaquecido: à direita da linha de vapor saturado. O refrigerante está em fase gasosa, acima da temperatura de ebulição correspondente àquela pressão, permitindo processos de expansão e superaquecimento (STOECKER; JABARDO, 2018, p. 47).

Ponto crítico

- Localizado no topo do domo, corresponde à pressão e entalpia em que não há mais distinção entre líquido e vapor. Acima dele, o fluido torna-se supercrítico (ÇENGEL; BOLES, 2013, p. 260).

Linhas de isolinhas

- Temperatura constante ($T = \text{const.}$): horizontais que cortam o diagrama. Cada uma indica o processo isoterma a uma dada temperatura de saturação ou superaquecimento (MILLER; MILLER, 2014, p. 115).

- Entropia constante ($s = \text{const.}$): curvas inclinadas, geralmente em preto. São trajetórias isotrópicas, essenciais na análise de compressão e expansão em ciclos de refrigeração (ÇENGEL; BOLES, 2013, p. 302).
- Volume específico constante ($v = \text{const.}$): linhas levemente curvadas, em verde. Indicadoras de processos isocóricos, menos comuns em refrigeração, mas úteis em cálculos termodinâmicos gerais (MILLER; MILLER, 2014, p. 115).

O diagrama de Mollier é a ferramenta gráfica fundamental que busca avaliar ciclos de refrigeração, pois permite acompanhar visualmente variações de energia (entalpia) e trabalho (compressão e expansão) em diferentes estados do refrigerante (STOECKER; JABARDO, 2018, p. 52).

Como foi visto, o desempenho de um sistema de refrigeração está funcionalmente ligado ao meio utilizado para trocar calor entre o fluido de trabalho do sistema e os objetos/ambientes que estão sendo resfriados. Esta decisão é baseada em fatores que incluem estabilidade química, segurança na operação, efeito ambiental e, em particular, desempenho de cada um dos fluidos em relação à troca de calor. De acordo com essa distinção, os refrigerantes se classificam nas seguintes três categorias:

- Fluxo de Transferência de Calor por Mudança de Fase

Pense em uma geladeira doméstica: quando está funcionando, um fluido dentro do sistema evapora. Essa evaporação não é um ato aleatório, é o momento em que o calor é expelido do interior do corpo. Isso é baseado em "fluidos de evaporação", que, como se verifica, funcionam exatamente através da troca de calor latente. Segundo Miller et al. (2014:

O aquecimento das substâncias resfriadas é baseado no fato de que os refrigerantes, que evaporam, retiram calor durante as mudanças de fase como calor latente. Os mais comuns são CFC, HCFC e HFC, que são compostos halogenados usados principalmente em sistemas de expansão direta (Ferraz, 2008).

- Transportadores de Calor sem Mudança de Fase

Existem casos em que a refrigeração deve ser indireta. Nesse contexto, existem alguns líquidos que são usados exclusivamente como transportadores de frio de um local para outro, ou seja, sem mudança de fase. Estes são os chamados fluidos secundários que trabalham na absorção de calor sensível. Conforme Ferraz (2008), "esses líquidos não vaporizam e resfriam-se pela absorção de calor sensível". Soluções salinas, soluções de cloreto de cálcio ou sódio, e até mesmo o ar são geralmente os culpados. Este tipo de sistema é amplamente

utilizado no setor industrial, onde é necessária uma distribuição uniforme de frio, também quando os fluidos primários não podem ser aplicados diretamente (Miller et al., 2014).

- Soluções Absorventes Termicamente Acopladas em Ciclos Térmicos Modificados

Outro tipo de abordagem tecnológica são os sistemas sem compressor. O termo refere-se a sistemas de absorção, que funcionam através de uma relação química, ou emparelhamento, um refrigerante que evapora e um absorvente que captura seu vapor. Um dos mais comuns é a combinação de amônia e água. Neste último modo, o resfriamento é realizado por evaporação, mas o vapor produzido pode ser quimicamente absorvido pela solução líquida, de modo que o reaquecimento pode ocorrer após a regeneração térmica. Esta técnica é aplicada principalmente onde há calor residual disponível e há necessidade de minimizar o uso de eletricidade (Miller et al., 2014).

Em suma, a classificação dos refrigerantes não só os torna a opção apropriada, mas também garante que o sistema térmico esteja funcionando da maneira mais eficaz possível em quaisquer circunstâncias específicas, levando em consideração sua situação técnica e ambiental.

2.2.8 R410A – Características e aplicações

O refrigerante R410A, um hidrofluorcarboneto (HFC), surgiu como uma alternativa amplamente utilizada ao R22 em sistemas de refrigeração e climatização. O seu ingresso no mercado aconteceu graças ao Protocolo de Montreal, um acordo que tinha como objetivo eliminar substâncias que poderiam prejudicar a camada de ozônio, como o R22 (Super Radiator Coils, 2020).

O R410A é um fluido refrigerante do tipo mistura binária, composto por partes iguais de R-32 (difluorometano – CH_2F_2) e R-125 (pentafluoroetano – CHF_2CF_3). Essa combinação resulta em uma mistura quase azeotrópica (blend que se comporta quase como substância pura, apresentando temperatura de ebulição e condensação praticamente constantes), cuja variação de temperatura de ebulição entre os componentes é mínima, o que favorece o desempenho térmico estável e facilita o seu uso prático em diversos sistemas (Super Radiator Coils, 2020).

Do ponto de vista físico-químico, o R410A apresenta densidade líquida de aproximadamente 1.040 kg/m^3 a 30°C , ponto de ebulição de $-48,5^\circ\text{C}$, pressão crítica de cerca de $4,926 \text{ MPa}$ e temperatura crítica de $72,8^\circ\text{C}$. Seu peso molecular médio é de

aproximadamente 72,6 g/mol. Essas características conferem ao R410A uma operação em pressões mais elevadas, exigindo o uso de componentes mais robustos nos sistemas que o utilizam, como compressores, condensadores e tubulações reforçadas (Winsen Sensor, 2023). A tabela 2 mostra as principais propriedades do R-410A:

Tabela 2 - Propriedades do R-410A

Propriedade	Valor
Temperatura de ebulição	-55,3°F (-48,5°C)
Temperatura crítica	163°F (72,8°C)
Pressão Crítica	711 PSI (49 bar)
Potencial de Aquecimento Global	2088
Potencial de Depleção da camada de ozônio	0
Grupo de segurança ASHRAE	A1

Fonte: Adaptado de Super Radiator Coils, (2020)

Do ponto de vista ambiental, destaca-se pelo Potencial de Depleção da Camada de Ozônio (ODP) nulo, o que representa um avanço em relação a refrigerantes como o R-22. Contudo, o seu Potencial de Aquecimento Global (GWP) é de 2.088, valor elevado que motivou sua inclusão em regulamentações internacionais, como a Emenda de Kigali ao Protocolo de Montreal e a norma F-Gas da União Europeia, que visam sua substituição gradual por opções com menor impacto climático (ScienceDirect, 2022).

]

2.2.8.1 Aplicações e Vantagens Operacionais

O R410A é amplamente utilizado em sistemas de climatização do tipo split, VRF (Fluxo de Refrigerante Variável), chillers, bombas de calor e também em aplicações comerciais leves. Desde 2010, passou a ser o padrão adotado em sistemas de HVAC (aquecimento, ventilação e ar-condicionado) , substituindo o R-22 (Super Radiator Coils, 2019).

Entre suas principais vantagens, destacam-se a elevada eficiência energética e capacidade térmica, possibilitando a construção de sistemas com trocadores menores e maior densidade de potência. A operação sob pressões mais altas permite, ainda, a utilização de

tubulações de menor diâmetro, reduzindo espaço físico e, em alguns casos, custos de instalação (Logan Services, s.d.).

2.2.8.2 Comparação de performance: R-410A vs R-22

A transição do R-22 para o R-410A trouxe melhorias significativas em termos de capacidade e eficiência. A tabela 3 demonstra as diferenças de performance entre os dois refrigerantes em condições operacionais similares, com base em dados de classificação de serpentinas:

Tabela 3 - Classificação da Serpentina - Comparação R-410A vs R-22

Métrica	R-410A	R-22
Capacidade da serpentina	182.403 Btu/hr.	174.764 Btu/hr.
Temperatura do ar de saída	106,6°F $\approx$ (41,4 °C)	105,9°F $\approx$ (41,1 °C)
Atrito do ar	0,16 in.H ₂ O/serpentina	0,16 in.H ₂ O/serpentina
Condição da superfície	Seca	Seca
Graus de sub-resfriamento	5°F	5°F
Queda de pressão do refrigerante	2,86 PSI/serpentina	4,610 PSI/serpentina
Fluxo mássico do refrigerante	2.483 lb/hr.	2.325 lb/hr.

Fonte: Adaptado de Super Radiator Coils, (2020)

Como observado na tabela comparativa, o R-410A apresenta uma capacidade de refrigeração superior (182.403 Btu/hr. contra 174.764 Btu/hr. do R-22), representando um ganho de aproximadamente 4,4% na capacidade térmica. Além disso, a queda de pressão do refrigerante é significativamente menor no R-410A (2,86 PSI/serpentina contra 4,610 PSI/serpentina do R-22), o que contribui para uma maior eficiência energética do sistema.

2.2.8.3 Limitações Técnicas e Ambientais

Apesar de sua eficácia técnica, o R410A possui desvantagens consideráveis. Seu elevado GWP é um dos principais entraves à continuidade de seu uso, sendo objeto de proibições regulatórias em diversos países, incluindo a União Europeia e os Estados Unidos

— onde novos equipamentos que utilizam o fluido foram proibidos a partir de 2025 (Bobs Heating, 2025).

Além disso, a elevada pressão de operação inviabiliza sua aplicação em sistemas originalmente projetados para fluidos como o R-22, sendo necessário o redesenho completo dos componentes. Ainda que classificado como A1 (não inflamável), há riscos em caso de vazamento em ambientes confinados, podendo ocorrer combustão sob altas temperaturas ou efeitos adversos à saúde por inalação direta (Innovair, 2024).

Outro ponto técnico importante é a possibilidade de fracionamento da mistura caso o fluido seja carregado na fase gasosa após um vazamento, o que altera sua proporção e compromete o desempenho. Por esse motivo, o R410A deve ser manuseado sempre na forma líquida durante recargas (Arkema, s.d.).

Portanto, embora tenha representado um avanço relevante na transição para fluidos menos agressivos à camada de ozônio, o R410A caminha para sua substituição por alternativas mais sustentáveis, como o R32, que oferecem melhor desempenho ambiental e eficiência energética.

2.2.9 R32 – Características e Aplicações

O fluido refrigerante R32, também chamado de difluorometano (CH_2F_2), é um composto puro da família dos hidrofluorocarbonetos (HFCs). Nos últimos anos, ele tem ganhado espaço como alternativa ao R410A, principalmente em sistemas de climatização residenciais e comerciais. Sua adoção vem sendo impulsionada tanto por seus benefícios técnicos, como maior eficiência energética, quanto pelo menor impacto ambiental, atendendo às exigências de regulamentações internacionais (DAIKIN, [s.d.] a).

Tratando de sua composição química, O R32 é um gás incolor, inodoro e classificado como A2L pela ASHRAE, o que indica baixa toxicidade e inflamabilidade moderada. Sendo um fluido puro (não misto), ele evita problemas de fracionamento em caso de vazamentos, o que simplifica o processo de recarga e manutenção dos sistemas (SUPER RADIATOR COILS, 2020).

A Tabela 4 apresenta, de forma resumida, as principais propriedades físico-químicas do refrigerante R32:

Tabela 4 - Propriedades físico-químicas do R32

Temperatura de ebulição	-51,7°C (-61,1°F)
Temperatura crítica	78,1°C (172,6°F)

Pressão crítica	57,8 bar (838,6 PSI)
GWP	675
ODP	0
Classificação de segurança	A2L

Fonte: Adaptado de Super Radiator Coils, (2020)

2.2.9.1 Crescimento do Uso e Aplicações Típicas

O uso do R32 tem crescido em larga escala devido ao seu melhor desempenho térmico em comparação com outros refrigerantes. Ele é utilizado principalmente em sistemas mini-split, multi-split, VRF (Volume de Refrigerante Variável), chillers de pequeno porte e bombas de calor. Por ser mais eficiente, permite que os sistemas operem com trocadores menores e com menos carga de fluido, o que reduz custos operacionais e ambientais (DAIKIN, [s.d.] b). A comparação de GWP entre o R32 e outros refrigerantes pode ser observada na tabela 5:

Tabela 5 - Comparação de GWP entre o R32 e outros refrigerantes

Refrigerante	GWP (Potencial de Aquecimento Global)
R-32	675
R-22	1810
R-134A	1430
R-407C	1774
R-410A	2088
R-417A	2344

Fonte: Adaptado de Super Radiator Coils, (2020)

2.2.9.2 Aplicações e Vantagens Operacionais

As aplicações típicas do R32 incluem:

- Sistemas de Ar-Condicionado Residenciais: Mini-splits, multi-splits e sistemas centrais de pequeno porte.
- Sistemas de Ar-Condicionado Comerciais Leves: Unidades de telhado, sistemas VRF e chillers de pequena capacidade.

- Bombas de Calor: Devido às suas propriedades termodinâmicas, o R32 é adequado para bombas de calor, oferecendo alta eficiência tanto para aquecimento quanto para resfriamento.

A tabela 6 apresenta requisitos típicos do lado do ar para uma aplicação específica de serpentina, e os valores podem variar significativamente dependendo do projeto e das condições operacionais.

Tabela 6 - Requisitos do Lado do Ar (Exemplo de Aplicação)

Parâmetro	Valor
Condição da superfície	Seca
Fluxo de ar	10.000 SCFM
Capacidade	165.000 Btu/hr.
Temperatura do ar de entrada	90°F
Temperatura do ar de saída	105°F
Pressão do ar	14.696

Fonte: Adaptado de Super Radiator Coils, (2020)

Tratando-se de seus benefícios, o R32 oferece uma série de resultados positivos técnicos e ambientais que o tornam uma escolha preferencial para sistemas de refrigeração e ar-condicionado modernos:

- Menor Potencial de Aquecimento Global (GWP):

Com um GWP de 675, o R32 possui um impacto significativamente menor no aquecimento global em comparação com o R410A (GWP de 2088) e o R22 (GWP de 1810) (DAIKIN, [s.d.]a). Essa característica é crucial para atender às regulamentações ambientais e reduzir a pegada de carbono dos sistemas de climatização (ARC INDUSTRY SITE, [s.d.] b).

- Alta Eficiência Energética:

O R32 possui excelentes propriedades termodinâmicas, incluindo uma maior capacidade volumétrica e melhor coeficiente de transferência de calor em comparação com o R410A (SUPER RADIATOR COILS, 2020). Isso permite que os sistemas que utilizam R32 operem com maior eficiência energética, resultando em menor consumo de eletricidade e, conseqüentemente, em menores custos operacionais para o usuário final (DAIKIN, [s.d.] a).

- Carga de Refrigerante Reduzida:

Devido à sua maior capacidade volumétrica, os sistemas que utilizam R32 geralmente requerem uma carga de refrigerante menor em comparação com os sistemas de R410A (LG HVAC, [s.d.]). Isso não apenas reduz o custo inicial do refrigerante, mas também minimiza o potencial de vazamento e o impacto ambiental em caso de liberação acidental (ALLEGIANCE HVAC, 2024).

- Refrigerante Puro (Componente Único):

Ao contrário do R410A, que é uma mistura zeotrópica de R32 e R125, o R32 é um refrigerante de componente único (THERMOKEY, [s.d.]). Isso simplifica o manuseio, a recarga e a reciclagem, pois não há preocupação com o fracionamento da mistura em caso de vazamento, o que poderia alterar as propriedades do refrigerante e comprometer o desempenho do sistema (CLIMAMARKET, 2023).

- Zero Potencial de Depleção da Camada de Ozônio (ODP):

Assim como outros HFCs, o R32 não contém cloro em sua composição, o que significa que ele não contribui para a destruição da camada de ozônio, sendo uma alternativa ambientalmente segura nesse aspecto (DAIKIN, [s.d.] a).

2.2.9.3 Limitações técnicas

- Inflamabilidade (Classificação A2L):

De acordo com a ASHRAE (2013), a norma Standard 34 – *Designation and Safety Classification of Refrigerants* adota um sistema de dupla classificação para fluidos refrigerantes, baseado em critérios de toxicidade e inflamabilidade. No que se refere à toxicidade, os refrigerantes são divididos em A (baixo potencial tóxico) e B (alto potencial tóxico), refletindo o risco à saúde humana em caso de vazamentos ou exposições prolongadas. Já a inflamabilidade é categorizada em quatro níveis: 1 (não inflamável), 2L (levemente inflamável, com velocidade de chama limitada), 2 (inflamável) e 3 (altamente inflamável), considerando tanto a faixa de inflamabilidade quanto a velocidade de propagação da chama. A combinação dessas designações gera classes como A1, A2L e A3, permitindo ao projetista avaliar simultaneamente os riscos de toxicidade e incêndio inerentes a cada refrigerante e, assim, selecionar o fluido mais adequado para uso em sistemas de refrigeração industrial ou comercial, garantindo conformidade com as normas internacionais e minimização de riscos à saúde e ao meio ambiente (ASHRAE, 2013).

A figura 8 mostra exemplos de algumas classificações:

Figura 8 - Classificação de Segurança (ASHRAE)
 Combinação de toxicidade (A/B) e inflamabilidade (1/2L/2/3)

Classe	Inflamabilidade	Exemplos
A1	Não inflamável	R-410A, R-134a
A2L	Levemente inflamável	R-32, R-1234yf
A3	Altamente inflamável	R-290 (propano)

Fonte: Adaptado de ASHRAE (2013)

A principal limitação do R32 é sua leve inflamabilidade, classificada como A2L pela ASHRAE (ASHRAE, [s.d.]). Embora seja considerado "difícilmente inflamável" e exija uma fonte de ignição de alta energia para queimar, e a propagação da chama seja lenta, essa característica demanda precauções adicionais durante o manuseio, instalação e manutenção (THE FURNACE OUTLET, 2025a). Normas e regulamentações específicas devem ser seguidas para garantir a segurança, incluindo o uso de ferramentas e equipamentos compatíveis com refrigerantes inflamáveis, ventilação adequada e treinamento especializado para técnicos (ARCTICK, [s.d.] b; NATIONAL REFRIGERANTS, [s.d.]).

- Pressão Elevada:

O R32 opera em pressões mais elevadas do que o R22 e, em alguns casos, até mesmo o R410A (SUPER RADIATOR COILS, 2020). Isso exige que os componentes do sistema (compressores, tubulações, válvulas, trocadores de calor) sejam projetados para suportar essas pressões mais altas, o que pode implicar em custos ligeiramente maiores para o equipamento e a necessidade de materiais mais robustos (SCIENTIFIC REPORTS, 2017). A pressão de trabalho mais alta também requer atenção especial durante a instalação para evitar vazamentos (THE FURNACE OUTLET, 2025b).

- Compatibilidade de Óleo:

O R32 é compatível com óleos de éster de poliol (POE), que são higroscópicos (absorvem umidade) (ARC INDUSTRY SITE, [s.d.] a). Isso significa que o sistema deve ser mantido hermeticamente fechado e a exposição ao ar ambiente minimizada para evitar a contaminação do óleo, o que pode levar à formação de ácidos e à degradação do sistema (CLIMAMARKET, 2023).

Tabela 7 - Propriedades Termodinâmicas do R-32 (Vapor Saturado)

Condição	Temperatura(°C)	Pressão (MPa)	Densidade(kg/m³)
Ambiente	25	0,88	958
Vapor saturado	-40	0,11	5,1
Vapor saturado	-20	0,29	9
Vapor saturado	0	0,69	15,4
Vapor saturado	20	1,43	25,7
Vapor saturado	40	2,74	41,8

Fonte: Adaptado de Super Radiator Coils, (2020)

Em resumo, o R32 representa um avanço significativo na busca por refrigerantes mais sustentáveis e eficientes. Seus benefícios ambientais e de desempenho superam suas limitações, desde que as devidas precauções de segurança e as melhores práticas de instalação e manutenção sejam rigorosamente seguidas. A crescente adoção do R32 em todo o mundo reflete sua posição como um dos principais refrigerantes para o futuro da climatização.

2.2.10 Propriedades Térmicas e Desempenho Energético dos Gases R32 e R410A

A escolha de um fluido refrigerante influencia diretamente no rendimento energético dos sistemas de climatização. Características como condutividade térmica, capacidade calorífica e comportamento sob diferentes faixas de pressão e temperatura são essenciais para avaliar sua eficiência. Esta seção apresenta uma análise comparativa das propriedades térmicas e do desempenho energético dos gases R32 e R410A com base em literatura técnica consolidada.

2.2.10.1 Propriedades Termodinâmicas Relevantes

Os gases refrigerantes possuem propriedades distintas que impactam diretamente o funcionamento de compressores, evaporadores e condensadores. No caso do R32, estudos indicam uma capacidade calorífica específica de aproximadamente 1,53 kJ/kg·K a 25 °C, enquanto o R410A apresenta valores na faixa de 1,71 kJ/kg·K para a fase líquida, nas mesmas condições (SUPER RADIATOR COILS, 2020).

Quanto à condutividade térmica, o R32 mostra melhor desempenho: sua condutividade é cerca de 10% superior à do R410A, o que favorece uma transferência de calor mais eficiente nos trocadores térmicos (DAIKIN, [s.d.] a).

Já em relação às pressões e temperaturas de operação, o R32 trabalha com pressões semelhantes ou ligeiramente superiores às do R410A, mas sua temperatura crítica é mais elevada (78,1 °C contra 72,1 °C do R410A), o que permite maior flexibilidade operacional em sistemas de alta eficiência (WINSEN SENSOR, [s.d.]).

2.2.10.2 Avaliação de Desempenho Energético

A análise do desempenho energético de sistemas de refrigeração envolve o uso de indicadores como o Coeficiente de Performance (COP) e a Eficiência Energética Sazonal (SEER). O COP representa a razão entre a energia térmica útil fornecida e a energia elétrica consumida. Já o SEER considera a eficiência do sistema ao longo de uma estação completa, refletindo condições reais de uso.

Segundo a Daikin ([s.d.]a), equipamentos que utilizam R32 alcançam valores de COP aproximadamente 10% superiores aos sistemas com R410A. Essa diferença também se reflete no SEER, onde sistemas R32 obtêm classificações mais altas, em parte devido à sua melhor condutividade e menor carga de fluido necessária.

Além disso, casos de estudo relatados por fabricantes e em publicações técnicas demonstram que, em condições equivalentes, o R32 possibilita economia de energia elétrica de até 12% em comparação ao R410A, especialmente em sistemas inverter com controle de carga variável (SUPER RADIATOR COILS, 2020).

2.2.11 Impactos Ambientais dos Refrigerantes

O impacto ambiental dos fluidos refrigerantes é uma das principais preocupações na engenharia térmica moderna. Substâncias antes amplamente utilizadas, como o R22 e o R410A, contribuíram ao longo das décadas para o agravamento de fenômenos como o efeito estufa e a destruição da camada de ozônio. Por essa razão, entender os efeitos ambientais associados ao uso de cada fluido tornou-se essencial para a escolha consciente e regulada dos refrigerantes.

2.2.11.1 Conceitos Básicos de Impacto Ambiental

Dois indicadores são comumente utilizados para avaliar o impacto ambiental de um fluido refrigerante: o Potencial de Aquecimento Global (GWP – Global Warming Potential) e o Potencial de Depleção da Camada de Ozônio (ODP – Ozone Depletion Potential).

O GWP expressa a capacidade de uma substância contribuir para o aquecimento global em comparação ao dióxido de carbono (CO₂), que tem valor de referência igual a 1. Já o ODP indica a capacidade de um composto destruir a camada de ozônio estratosférico, tomando como base o CFC-11, cujo ODP é 1.

O R410A, por exemplo, possui GWP de 2088 e ODP igual a zero, enquanto o R32 apresenta GWP de 675 e também ODP igual a zero, tornando-o mais adequado do ponto de vista ambiental (DAIKIN, [s.d.] a); SUPER RADIATOR COILS, 2020).

2.2.11.2 Contexto Regulatório e Protocolos Internacionais

A crescente preocupação global com os impactos ambientais dos gases industriais resultou em importantes acordos internacionais. O Protocolo de Montreal, adotado em 1987, foi o primeiro a propor o controle e a eliminação progressiva de substâncias destruidoras da camada de ozônio, como os CFCs e HCFCs.

Com o passar dos anos, observou-se que, embora os HFCs como o R410A não afetassem diretamente a camada de ozônio, possuíam GWP elevado, o que gerava contribuições significativas ao efeito estufa.

2.2.12 Aspectos de Segurança Operacional

O uso de gases refrigerantes em sistemas de climatização exige não apenas atenção ao desempenho térmico, mas também rigor quanto à segurança operacional. Quando se compara o R32 ao R410A, observa-se que embora ambos apresentem desempenho técnico eficiente, há diferenças significativas quanto à inflamabilidade, riscos ocupacionais e exigências normativas, o que influencia diretamente nas boas práticas de projeto, instalação e manutenção.

2.2.12.1 Inflamabilidade e Riscos Associados ao Uso de R32 e R410A

O R32 é classificado pela ASHRAE como um gás da categoria A2L — ou seja, possui baixa toxicidade e inflamabilidade leve (ASHRAE, 2022). Isso significa que, apesar de sua periculosidade ser controlada, ele pode formar misturas inflamáveis se houver vazamentos em ambientes confinados ou mal ventilados, principalmente em contato com faíscas ou superfícies superaquecidas (PEREIRA; HUEHREN, 2020). Como consequência, é essencial prever ventilação adequada e limitar a carga de fluido em sistemas instalados em locais fechados.

Já o R410A, embora apresente características termodinâmicas semelhantes ao R32, não é inflamável nas condições normais de uso e, por isso, é classificado como A1 (ASHRAE, 2022). Isso o torna mais seguro do ponto de vista da inflamabilidade, facilitando seu uso em edificações residenciais e comerciais sem exigências adicionais quanto ao risco de combustão.

Entretanto, o R410A tem um Potencial de Aquecimento Global (GWP) muito superior ao do R32, o que explica sua retirada progressiva em diversos mercados. Essa diferença

ambiental, somada à questão da inflamabilidade, estabelece um dilema técnico que deve ser gerenciado com responsabilidade: o R410A é mais seguro no uso imediato, mas mais agressivo ao meio ambiente; o R32 exige mais precauções técnicas, mas é ambientalmente mais equilibrado.

2.2.12.2 Cuidados Específicos em Projetos e Instalações

Nos projetos com R32, recomenda-se calcular rigorosamente o volume útil do ambiente, limitar a carga máxima do fluido e utilizar componentes compatíveis com gases A2L, como válvulas, tubulações e sensores de vazamento (PEREIRA; HUEHREN, 2020). Além disso, é essencial realizar brasagens com nitrogênio seco, evitando a formação de resíduos inflamáveis.

Por outro lado, sistemas com R410A não exigem tais restrições quanto à ventilação ou volume do ambiente, justamente por sua não inflamabilidade (FERRAZ, 2008). Ainda assim, boas práticas como evacuação cuidadosa do sistema, uso de ferramentas adequadas e verificação de estanqueidade com nitrogênio também são recomendadas para ambos os fluidos.

2.2.12.3 Recomendações Normativas Internacionais

As principais normas aplicáveis incluem:

- ASHRAE 34 / ISO 817 – que classifica a toxicidade e inflamabilidade dos gases;
- ISO 5149-1:2016 – que estabelece limites máximos de carga e condições de segurança para sistemas com gases inflamáveis;
- Boas práticas de refrigeração – que oferece recomendações práticas específicas para o R32, como controle de riscos em ambientes confinados e manuseio adequado do fluido (PEREIRA; HUEHREN, 2020).

Essas normativas são fundamentais para o dimensionamento adequado e seguro dos sistemas, principalmente em projetos comerciais de maior porte.

2.2.12.4 Procedimentos e Boas Práticas de Instalação e Manutenção

Para o R32, o manuseio deve seguir rigorosamente protocolos de segurança específicos. É obrigatório o uso de ferramentas certificadas para gases A2L, incluindo bombas de vácuo, detectores de vazamento sensíveis a fluidos inflamáveis e cilindros de recolhimento apropriados (PEREIRA; HUEHREN, 2020). Além disso, as operações devem ser realizadas com o uso de EPIs adequados, como luvas térmicas, óculos de proteção e vestimenta antiestática.

O R410A, por sua vez, permite uma abordagem operacional mais simples, mas não menos técnica. Os mesmos cuidados com estanqueidade, controle de pressão e recuperação adequada do gás devem ser observados, a fim de evitar emissões e perdas de carga, contribuindo também com a preservação ambiental (MILLER, 2014).

2.2.12.5 Treinamento e Capacitação Técnica

A capacitação profissional é imprescindível em ambos os casos. No entanto, o uso do R32 exige formação específica em refrigerantes inflamáveis, com foco no entendimento da classificação A2L, das zonas de risco, das medidas de ventilação e das ações em caso de emergência (PEREIRA; HUEHREN, 2020). Técnicos que operam com esse gás devem conhecer os riscos físicos e químicos associados e estar aptos a atuar conforme as exigências das normas ISO e NR-20.

No caso do R410A, embora não inflamável, o treinamento deve contemplar boas práticas de manuseio de gases pressurizados, controle ambiental e descarte responsável do fluido.

2.2.13 Custos e Viabilidade Técnica da Substituição do R410A pelo R32 (Retrofit)

Com a crescente preocupação ambiental e o avanço das políticas globais que restringem o uso de substâncias com alto GWP, o R32 tem se mostrado uma alternativa promissora para substituir o R410A em sistemas já instalados. No entanto, essa substituição exige uma análise técnica e econômica detalhada. Esta seção apresenta os principais aspectos relacionados ao retrofit, abordando desde o conceito até os custos e a viabilidade do processo.

2.2.13.1 Conceito de Retrofit e Aplicações Possíveis

Retrofit, na área de refrigeração, refere-se ao processo de adaptação de um equipamento existente para utilizar um fluido diferente daquele originalmente especificado. Não se trata de uma simples troca de fluido, mas de uma modificação estrutural que exige avaliação técnica minuciosa. No caso da substituição do R410A pelo R32, o processo é complexo, mesmo que o R32 esteja presente na composição do R410A. Isso porque o R32 possui propriedades diferentes, como maior inflamabilidade (A2L) e pressões mais elevadas, o que demanda ajustes técnicos específicos (DAIKIN, 2019).

Em sistemas que utilizam R410A, o retrofit só é viável se houver compatibilidade com as novas condições impostas pelo R32. Ainda que seja possível manter parte da infraestrutura, como tubulações, a substituição de compressores e outros componentes críticos geralmente é necessária. O retrofit costuma ser considerado em contextos de modernização de

equipamentos antigos, redução de consumo energético ou atendimento a legislações ambientais.

2.2.13.2 Adequações Técnicas e Compatibilidade

Mudar o fluido de R410A para R32 exige cuidados com todos os componentes envolvidos. O compressor deve ser compatível com as pressões e temperaturas de descarga do R32. Caso contrário, o desgaste precoce e falhas podem comprometer o sistema. Fabricantes como a Copeland já oferecem compressores específicos para o R32.

Com relação aos lubrificantes, ambos os fluidos utilizam óleo POE, mas a natureza higroscópica desse óleo requer vedação eficiente e limpeza rigorosa das tubulações para evitar contaminações por umidade. As tubulações, se estiverem em boas condições, podem ser aproveitadas, mas é necessário verificar sua capacidade de suportar as pressões mais altas do R32.

Outro ponto importante são as válvulas de expansão e os controladores de fluxo, que muitas vezes precisam ser substituídos ou ajustados. Ferramentas como bombas de vácuo e manifolds devem ser compatíveis com refrigerantes A2L, em função da inflamabilidade do R32 (ARCTICK, [s.d.] b).

2.2.13.3 Custos Envolvidos na Conversão

O custo do retrofit envolve tanto despesas diretas quanto indiretas. Entre os custos diretos estão a compra de novos componentes, mão de obra especializada e ferramentas específicas para A2L. Já os custos indiretos envolvem o tempo de parada do sistema, possíveis perdas de produtividade e a necessidade de treinamentos para as equipes técnicas.

Esses fatores tornam o planejamento econômico essencial. Ignorar os custos indiretos pode levar a decisões equivocadas e prejuízos no longo prazo.

2.2.13.4 Análise da Viabilidade Econômica

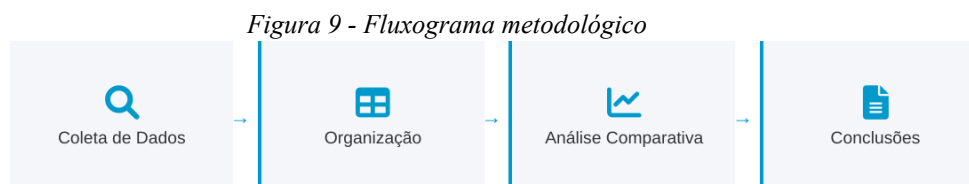
A viabilidade de um retrofit depende do equilíbrio entre os custos iniciais e os ganhos futuros. O R32 apresenta maior eficiência energética em muitos casos, o que reduz o consumo de eletricidade e o custo operacional do sistema (DAIKIN, [s.d.] a). No entanto, a melhoria no desempenho depende da qualidade do projeto e da execução do retrofit.

O retorno sobre o investimento (ROI) deve considerar a economia de energia, a adequação às legislações ambientais e a durabilidade do novo sistema. Estudos mostram que, em alguns casos, há redução inicial do COP após o retrofit, exigindo ajustes técnicos para alcançar o desempenho ideal (ATLANTIS PRESS, 2020). Por outro lado, há também registros de ganhos importantes em eficiência e sustentabilidade (SCIENCE DIRECT, 2025).

Fatores como o custo local do R32, a disponibilidade de peças compatíveis, incentivos governamentais e mão de obra treinada influenciam diretamente a decisão. Por isso, a literatura recomenda avaliar cada caso individualmente e com base em critérios técnicos, econômicos e ambientais integrados.

3 METODOLOGIA

Este trabalho se caracteriza como uma pesquisa bibliográfica de natureza comparativa, fundamentada na análise aprofundada de publicações especializadas, artigos científicos, normas técnicas, manuais de fabricantes e documentos regulatórios. O objetivo central desta metodologia é estabelecer um rigoroso processo de coleta, organização e análise de dados para comparar tecnicamente os fluidos refrigerantes R32 e R410A, buscando identificar qual deles apresenta o melhor desempenho em termos de eficiência, sustentabilidade e segurança em sistemas de refrigeração. Desse modo, foi feita uma coleta de dados, organizadas em critérios de comparação, seguindo de uma análise teórica e, por fim, conclui-se com as considerações finais e perspectivas futuras. A figura 9 mostra um fluxograma dessa metodologia.



Fonte: Elaboração própria (2025)

3.1 Tipo de Pesquisa

A pesquisa adotada é de caráter bibliográfico, conforme a classificação de Gil (2019), que a define como aquela desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos. A abordagem comparativa é empregada para analisar as semelhanças e diferenças entre os dois refrigerantes, permitindo uma avaliação crítica de suas propriedades e aplicações. Este tipo de pesquisa é adequado para o tema, uma vez que não envolve experimentação prática ou coleta de dados primários, baseando-se integralmente em informações já publicadas e consolidadas na literatura técnica e científica.

3.2 Critérios de Comparação

A comparação entre o R32 e o R410A será conduzida com base nos seguintes critérios, considerados essenciais para uma avaliação abrangente no campo da engenharia de refrigeração:

- **Propriedades Termodinâmicas:** Análise de parâmetros como pressão de operação, temperatura crítica, entalpia, densidade, calor específico e condutividade térmica. Esses dados são cruciais para entender o comportamento dos fluidos em diferentes condições de operação e sua influência no ciclo de refrigeração.
- **Eficiência Energética:** Avaliação do Coeficiente de Performance (COP) e do *Seasonal Energy Efficiency Ratio* (SEER) em sistemas que utilizam cada um dos refrigerantes. Serão considerados estudos que demonstrem o consumo de energia e o rendimento dos equipamentos sob diversas cargas e condições climáticas.
- **Impacto Ambiental:** Comparação do Potencial de Aquecimento Global (GWP) e do Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (ODP). Serão analisadas as implicações de cada fluido em relação às metas de redução de emissões de gases de efeito estufa e à conformidade com acordos internacionais, como o Protocolo de Montreal e a Emenda de Kigali.
- **Segurança Operacional:** Exame da classificação de inflamabilidade (conforme ASHRAE), toxicidade e compatibilidade com materiais (lubrificantes, elastômeros, metais). Serão investigados os requisitos de segurança para manuseio, instalação e manutenção, incluindo a necessidade de treinamentos específicos e sistemas de detecção de vazamentos.
- **Viabilidade Técnica e Econômica:** Análise da possibilidade de substituição (retrofit) do R410A pelo R32 em sistemas existentes, considerando as adaptações necessárias em componentes (compressores, trocadores de calor) e os custos associados. Serão avaliados também os custos de aquisição, manutenção e descarte de cada fluido ao longo do ciclo de vida do equipamento.

3.3 Coleta de Dados

A seleção do material bibliográfico será realizada a partir de fontes reconhecidas e de alta credibilidade no campo da refrigeração e climatização. As principais fontes incluem:

- **Bases de Dados Científicas:** *ScienceDirect*, *Scielo*, *Google Scholar*, *IEEE Xplore*, buscando artigos de periódicos revisados por pares e anais de congressos.

- Normas Técnicas e Regulamentações: Documentos da ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), ISO (*International Organization for Standardization*), EPA (*Environmental Protection Agency*) e órgãos reguladores brasileiros (ABNT, CONAMA).
- Manuais e Relatórios de Fabricantes: Documentos técnicos de empresas líderes no setor, como Daikin, Trane, Carrier, Embraco, que fornecem dados específicos sobre o desempenho e as características de seus equipamentos com diferentes refrigerantes.
- Livros e Teses/Dissertações: Obras de referência e estudos acadêmicos que abordam os princípios da refrigeração, termodinâmica e o impacto ambiental dos fluidos refrigerantes.

Será dada prioridade a publicações recentes (últimos 10 anos), embora obras clássicas e fundamentais para a compreensão dos conceitos também sejam consideradas. A busca será realizada utilizando palavras-chave como "R32", "R410A", "refrigerantes", "eficiência energética", "GWP", "segurança em refrigeração", "*retrofit*", "comparação de fluidos refrigerantes".

3.4 Análise dos Dados

Após a coleta, as informações serão organizadas e categorizadas de acordo com os critérios de comparação: Propriedades termodinâmicas, eficiência energética, impacto ambiental, segurança operacional e viabilidade técnica e econômica, estabelecidos na seção 3.2. A análise será conduzida de forma descritiva e analítica. Este processo analítico permitirá não apenas apresentar as características de cada gás, mas também discutir as implicações de sua escolha para o setor de refrigeração, fornecendo subsídios para a tomada de decisão por parte de profissionais e pesquisadores. A interpretação dos dados será sempre embasada nas referências bibliográficas, visando garantir a validade e a confiabilidade das conclusões.

4 ANÁLISE DE DADOS

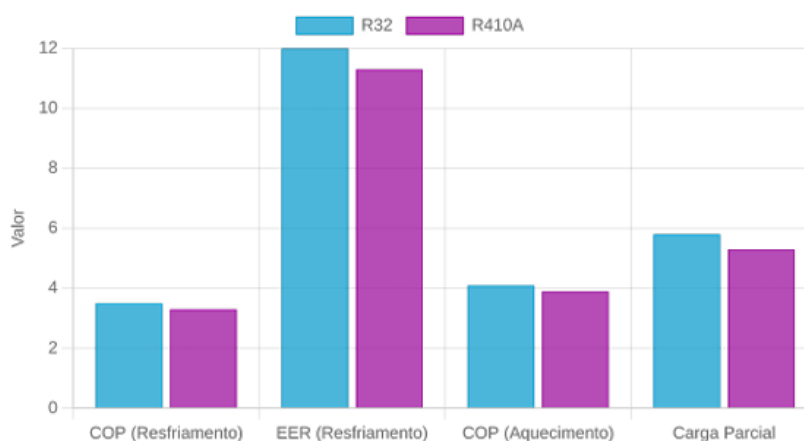
Este trabalho teve como objetivo principal realizar uma análise comparativa aprofundada entre os fluidos refrigerantes R32 e R410A, com foco em seus atributos de eficiência energética, sustentabilidade ambiental, segurança operacional e viabilidade técnica e econômica. Através de uma pesquisa bibliográfica, buscou-se sintetizar o conhecimento existente e as tendências do setor para fornecer uma base sólida para a tomada de decisão na escolha do refrigerante mais adequado para sistemas de refrigeração modernos. A ausência de experimentação prática neste estudo, inerente à natureza da pesquisa bibliográfica, direcionou

a análise para a interpretação crítica e a consolidação de dados secundários provenientes de fontes acadêmicas, normativas e industriais.

4.1 Eficiência Energética

Conforme ilustrado no gráfico da figura 10, são comparados os desempenhos termoenergéticos dos refrigerantes R32 e R-410A em quatro indicadores-chave: COP de resfriamento, EER de resfriamento, COP de aquecimento e carga parcial. Observa-se na literatura que o R32 apresenta valores ligeiramente superiores em todos os parâmetros, com destaque para o EER de resfriamento, que atinge aproximadamente 12,0 contra 11,3 do R-410A, evidenciando maior eficiência na remoção de calor. Essa mesma tendência se repete nos COPs de resfriamento (3,5 vs. 3,3) e aquecimento (4,1 vs. 3,9), bem como na carga parcial (5,8 vs. 5,3), indicando o potencial do R32 para reduzir o consumo energético em ciclos de refrigeração (SUPER RADIATOR COILS, 2020).

Figura 10 - Comparação de indicadores de eficiência.



Fonte: Adaptado de Super Radiator Coils, (2020)

A análise da literatura revelou que o R32 apresenta um potencial significativo para ganhos de eficiência energética em comparação com o R410A. Sua maior capacidade calorífica volumétrica permite que sistemas que o utilizam operem com cargas menores de refrigerante para atingir a mesma capacidade de refrigeração, resultando em equipamentos mais compactos e eficientes [Kim et al., 2014, p. 127]. Essa característica se traduz em um

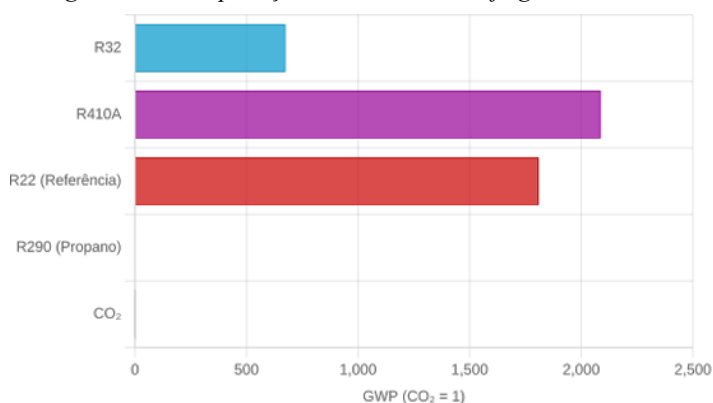
Coeficiente de Performance (COP) e um Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER) potencialmente superiores, especialmente em condições de carga variável, onde a otimização do desempenho termodinâmico é crucial para a redução do consumo de energia elétrica [Calm, 2019]. A transição para o R32, portanto, alinha-se diretamente com as crescentes exigências globais por sistemas de refrigeração mais sustentáveis e economicamente viáveis, uma vez que a eficiência energética impacta diretamente os custos operacionais a longo prazo.

4.2 Sustentabilidade Ambiental

No que tange à sustentabilidade ambiental, o R32 emerge como uma alternativa superior ao R410A. O principal diferencial reside no seu Potencial de Aquecimento Global (GWP), que é de aproximadamente 675, significativamente menor que o GWP de 2088 do R410A. Essa redução de GWP é um fator determinante diante das regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas e dos acordos internacionais, como a Emenda de Kigali ao Protocolo de Montreal, que visam a eliminação progressiva de refrigerantes com alto potencial de aquecimento global [McLinden et al., 2017, p. 103].

Embora ambos os gases não apresentem Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (ODP) – o que já os coloca em vantagem em relação a refrigerantes mais antigos, a diferença no GWP posiciona o R32 como uma escolha mais responsável do ponto de vista climático. A adoção do R32 contribui diretamente para a mitigação das mudanças climáticas, um imperativo global para a indústria de refrigeração. A tabela retratada pela figura 11 mostra em escala a diferença de GWP dos gases R32, R410A e R22.

Figura 11 - Comparação de GWP entre refrigerantes.



Fonte: Adaptado de Super Radiator Coils, (2020)

4.3 Segurança Operacional

A segurança operacional é um dos pontos mais críticos na comparação entre o R32 e o R410A. Na Figura 12, apresenta-se o comparativo entre os refrigerantes R32 e R-410A, contemplando sua classificação de segurança, inflamabilidade, toxicidade e limites de carga.

Figura 12 - Comparação da classificação de segurança dos gases R32 e R410A.

Parâmetro	R32	R410A
Classificação	A2L	A1
Inflamabilidade	Levemente inflamável	Não inflamável
Toxicidade	Baixa	Baixa
Limites de carga	Restritos	Menos restritos

Fonte: Adaptado de ASHRAE (2013)

Enquanto o R410A é classificado como não inflamável, o R32 é categorizado como levemente inflamável (classe A2L pela ASHRAE). Essa característica exige a implementação de protocolos de segurança mais rigorosos, incluindo a necessidade de vedações reforçadas, sistemas de ventilação adequados e detectores de vazamento mais sensíveis em equipamentos e instalações [ASHRAE, 2016]. Além disso, a capacitação e o treinamento contínuo dos técnicos de refrigeração são essenciais para garantir o manuseio seguro do R32, minimizando os riscos associados a eventuais vazamentos ou acidentes em ambientes confinados [Manual de Boas Práticas de Refrigeração, 2020, p. 74]. Embora a inflamabilidade do R32 represente um desafio, a indústria tem desenvolvido soluções e diretrizes para mitigar esses riscos, tornando sua utilização segura quando as normas e procedimentos são estritamente seguidos.

4.4 Viabilidade Técnica e Econômica

A viabilidade técnica e econômica da substituição do R410A pelo R32 é um aspecto complexo que demanda uma análise cuidadosa. Embora o R32 possua propriedades

termodinâmicas semelhantes ao R410A, existem diferenças significativas na pressão de operação, velocidade de fluxo e condutividade térmica que podem afetar o desempenho de componentes como compressores e trocadores de calor [Calm, 2019, p. 52]. A substituição direta (retrofit) em sistemas projetados para R410A pode gerar instabilidades operacionais, sobreaquecimento, redução da eficiência e desgaste prematuro de peças, caso não sejam feitos os ajustes e adaptações necessários. A incompatibilidade com lubrificantes originais é outro fator a ser considerado, podendo acarretar custos adicionais de manutenção. No entanto, a indústria tem respondido a esses desafios com o desenvolvimento de tecnologias como compressores "dual-fuel" e sistemas otimizados para R32, que visam minimizar os custos de retrofit e maximizar a performance [Zhang et al., 2020, p. 56]. A longo prazo, os benefícios de eficiência energética e a conformidade com as regulamentações ambientais podem compensar os investimentos iniciais em adaptação, tornando a transição economicamente vantajosa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

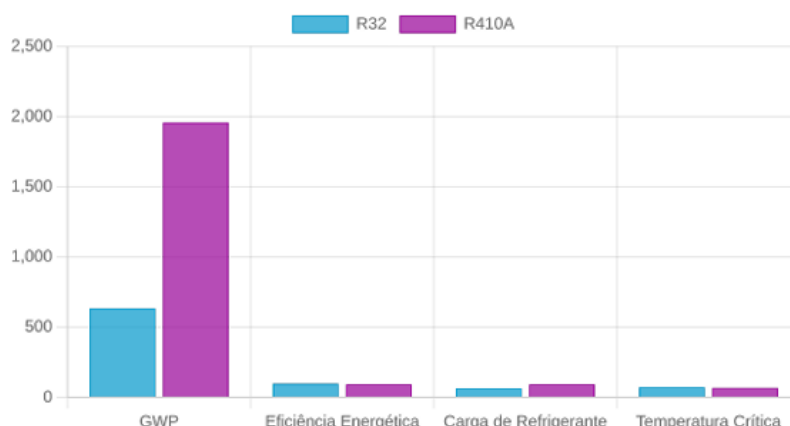
Na Tabela ilustrada pela figura 13, são sintetizadas, de modo comparativo, as propriedades físico-químicas e de segurança dos refrigerantes R32 e R410A, oferecendo uma visão imediata de parâmetros como fórmula química, temperatura e pressão críticas, capacidade volumétrica e classificação A2L/A1. Em seguida, a Figura 14 ilustra graficamente os seguintes aspectos: potencial de aquecimento global (GWP), eficiência energética, carga de refrigerante e temperatura crítica, permitindo identificar de forma rápida as vantagens e restrições de cada fluido.

Figura 13 - Propriedades físico-químicas comparativas dos gases R32 e R410A.

Propriedade	R32	R410A
Fórmula Química	CH_2F_2	$\text{CH}_2\text{F}_2 + \text{CHF}_2\text{CF}_3$
Temperatura Crítica (°C)	78,1	72,8
Pressão Crítica (MPa)	5,78	4,95
Capacidade Volumétrica	+10%	Referência
Temperatura de Descarga	Mais alta	Mais baixa
Classificação de Segurança	A2L	A1

Fonte: Adaptado de Super Radiator Coils, (2020)

Figura 14 – Gráfico de desempenho energético e ambiental R32 e R410A.



Fonte: Adaptado de Super Radiator Coils, (2020)

Conforme evidenciado na figura 13 (Propriedades físico-químicas comparativas) e na Figura 14 (Gráfico de desempenho energético e ambiental), o refrigerante R32 sobressai em diversos critérios-chave quando confrontado com o R-410A. Em termos de potencial de aquecimento global (GWP), o R32 reduz em cerca de 70 % esse indicador (675 versus 2 088), contribuindo de forma significativa para a mitigação do efeito estufa. Do ponto de vista da eficiência energética, os resultados mostram ganhos de até 8 % no coeficiente de desempenho (COP) e no índice de eficiência energética (EER), refletindo-se em menores consumos de energia elétrica nos ciclos de refrigeração e aquecimento.

Embora o R32 apresente descarga térmica mais elevada e requeira limites de carga mais restritos, em função de sua classificação de inflamabilidade A2L, estes aspectos podem ser contornados por meio de projetos adequados e treinamentos específicos. Dessa forma, os benefícios operacionais e ambientais do R32 superam seus desafios técnicos, posicionando-o como escolha preferencial para projetos que visem a sustentabilidade e a eficiência de sistemas de climatização.

Por fim, ressalta-se a importância de prosseguir com pesquisas voltadas a refrigerantes de GWP ainda mais baixo e com menor inflamabilidade, além de consolidar protocolos e normas internacionais que assegurem manuseio seguro e correto dimensionamento de carga. A consolidação do R32 como padrão industrial dependerá, portanto, da sinergia entre

inovação tecnológica, regulamentação e capacitação profissional, alicerçando um futuro mais verde e eficiente para o setor.

REFERÊNCIAS

AUSTRALIAN REFRIGERATION COUNCIL; DEPARTMENT OF AGRICULTURE, WATER AND THE ENVIRONMENT. **R32 Refrigerant Information Guide: for technicians**. [S.l.]: ARC, 2020.

ASHRAE. **ASHRAE refrigerant designations**. [S.l.]: ASHRAE, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/ashrae-refrigerant-designations>>. Acesso em: 25 jul. 2025.

DAIKIN. **R-32: The most balanced refrigerant**. [S.l.]: Daikin, [s.d.]. Disponível em: <https://www.daikin.com/air/daikin_techknowledge/benefits/r-32>. Acesso em: 25 jul. 2025.

DAIKIN. **R32 refrigerant** [2025 Guide]. [S.l.]: Daikin, [s.d.]. Disponível em: <https://www.daikinmea.com/en_us/knowledge-center/r32-refrigerant.html>. Acesso em: 25 jul. 2025.

FERRAZ, E. **Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado**. São Paulo: Érica, 2008.

KIM, J.; KIM, M. S.; KIM, Y. **Performance evaluation of R32 and R410A in a heat pump system**. International Journal of Refrigeration, v. 38, p. 109–116, 2014.

LOGAN SERVICES. **HVAC System Efficiency and Refrigerant Overview**. 2023. Disponível em: <<https://www.logan-inc.com>>. Acesso em: 25 jul. 2025.

MARTINELLI JR., L. C. **Refrigeração: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Manole, 2003.

MILLER, R.; MILLER, M. **Ar condicionado e refrigeração**. São Paulo: Pearson, 2014.

PEREIRA, G. S.; HUEHREN, R. **Boas práticas de refrigeração**. Coord. Frank Amorim; Stefanie von Heinemann. [S.l.]: [s.n.], 2020.

SCIENCEDIRECT. **Artigos sobre regulamentações e impactos ambientais do R410A**. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 25 jul. 2025.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. S. **Refrigeração e ar condicionado**. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill Education, 2018.

SUPER RADIATOR COILS. **R-32: Pros, cons, & comparisons to other refrigerants**. 2020. Disponível em: <<https://www.superradiatorcoils.com/blog/refrigerant-focus-r-32-difluoromethane>>. Acesso em: 25 jul. 2025.

SUPER RADIATOR COILS. **Refrigerant R-410A Properties and Applications**. 2019. Disponível em: <<https://www.superradiatorcoils.com/blog/r-410a-properties>>. Acesso em: 25 jul. 2025.

TRANE. **Learn About R-32 Refrigerant.** [S.l.]: Trane, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.trane.com/residential/en/resources/glossary/what-is-r32/>>. Acesso em: 25 jul. 2025.