

Análise comparativa da eficiência energética entre sistemas de climatização VRF e Chiller de água gelada

Carlos Otavio Pereira Carvalho¹
Luis Gustavo Schröder e Braga²

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise comparativa da eficiência energética entre dois sistemas de climatização: o sistema VRF (Fluxo Variável de Refrigerante) e o sistema de Chiller de água gelada, ambos dimensionados para atender uma edificação comercial com carga térmica total de 375 TR. A metodologia envolveu modelagem computacional, aplicação de cálculos termodinâmicos no software EES e avaliação dos indicadores de desempenho COP, EER, consumo energético e custos operacionais. Os resultados indicaram que o sistema Chiller apresentou desempenho superior, com COP de 5,42 e menor consumo anual de energia ($\approx 2,13$ GWh) em comparação ao VRF, cujo COP foi de 3,50 e consumo anual de $\approx 3,30$ GWh. Essa diferença reflete em redução de aproximadamente 55% nos custos operacionais anuais. Conclui-se que, para aplicações de grande porte, o Chiller representa uma solução mais vantajosa sob os pontos de vista energético e econômico. O VRF, embora apresente menor eficiência, mantém relevância em cenários onde a modularidade, a facilidade de instalação e o controle individual de zonas térmicas sejam prioritários.

Palavras-chave: Eficiência energética, Climatização, VRF, Chiller.

ABSTRACT

This study presents a comparative analysis of the energy efficiency of two HVAC systems: the VRF (Variable Refrigerant Flow) system and the Water-Cooled Chiller system, both designed to meet the thermal load of a 375 TR commercial building. The methodology included computational modeling, thermodynamic calculations using the EES software, and the evaluation of performance indicators such as COP, EER, energy consumption, and operating costs. Results showed that the Chiller achieved a superior performance, with a COP of 5.42 and an annual energy consumption of approximately 2.13 GWh, compared to the VRF system with a COP of 3.50 and an annual consumption of about 3.30 GWh. This performance difference results in nearly 55% lower annual operating costs for the Chiller. Therefore, for large-scale applications, the Chiller system proves to be more advantageous from both an energy and economic perspective. On the other hand, the VRF system remains relevant in scenarios where modularity, ease of installation, and individual thermal zone control are key requirements.

Keywords: Energy efficiency, HVAC, VRF, Chiller.

¹ Rede de Ensino Doctum – Unidade Juiz de Fora – otaviopc9@gmail.com – graduando em Engenharia Elétrica

² Rede de Ensino Doctum – Unidade Juiz de Fora – luis.braga@doctum.edu.br

Introdução

De acordo com a ABRAVA (2018) o aumento constante da demanda por sistemas de climatização em ambientes comerciais e industriais cresce também a preocupação com o consumo energético e os custos operacionais. Essa realidade tem levado empresas e profissionais da área a buscarem alternativas que conciliem eficiência energética, redução de gastos e menor impacto ambiental.

Segundo Chua (2013), os sistemas de climatização desempenham um papel essencial no conforto térmico e na preservação de condições ideais para ambientes comerciais, industriais e institucionais. No entanto, diante da crescente preocupação com o consumo de energia elétrica e os impactos ambientais, torna-se fundamental avaliar quais tecnologias oferecem melhor desempenho e custo-benefício.

Entre as opções mais utilizadas atualmente destacam-se os sistemas VRF (Fluxo variável de Refrigerante) e os sistemas de Chiller de água gelada. O sistema VRF é reconhecido por sua flexibilidade e eficiência, operando com uma unidade condensadora capaz de atender diversas unidades evaporadoras, regulando automaticamente a vazão de fluido refrigerante conforme a demanda térmica de cada ambiente. Essa característica reduz o consumo energético e proporciona maior controle térmico, sendo uma solução bastante aplicada em edifícios comerciais e espaços com diferentes zonas de climatização (OLIVEIRA; MARTINS, 2014).

Por outro lado, os sistemas de Chiller de água gelada utilizam a água como meio de troca térmica, sendo uma alternativa tradicional para ambientes de grande porte que exigem uma climatização centralizada. Essa tecnologia é amplamente utilizada em shopping centers, hospitais e indústrias, destacando-se por sua robustez e capacidade de atender grandes demandas térmicas (ASSMANN, 2017).

Diante dessas características, este trabalho tem como objetivo geral comparar a eficiência energética entre um sistema de climatização VRF e um sistema de Chiller de água gelada.

A pesquisa será conduzida por meio de um estudo de caso aplicado a uma edificação comercial de dois andares e 2.500 m² de área construída.

A análise envolverá não apenas o consumo energético de cada sistema, mas também aspectos como custos operacionais e de manutenção, além do impacto ambiental gerado por cada tecnologia. A partir dos resultados obtidos, espera-se identificar qual solução apresenta melhor desempenho técnico e econômico, fornecendo informações que possam auxiliar engenheiros, projetistas e gestores na escolha do sistema de climatização mais adequado para cada cenário.

Com essa abordagem, este trabalho busca contribuir para a adoção de práticas mais eficientes e sustentáveis no setor de climatização, promovendo soluções que otimizem recursos e favoreçam a preservação ambiental. Justifica-se a realização deste trabalho pela necessidade crescente de alternativas que equilibrem eficiência energética e impacto ambiental reduzido, além de fornecer informações que possam auxiliar na tomada de decisões técnicas e econômicas.

Referencial Teórico

Histórico e Evolução dos Sistemas de Refrigeração

A refrigeração acompanha a história como resposta à necessidade de conservação de alimentos, conforto térmico e processos produtivos. Registros mostram que civilizações antigas, como egípcios, persas e chineses, utilizavam gelo natural ou técnicas de evaporação da água para resfriamento (GONÇALVES, 2017).

No século XVIII, William Cullen apresentou um sistema rudimentar baseado na evaporação de éter sob vácuo, e em 1834 Jacob Perkins patenteou o primeiro sistema de compressão de vapor, considerado o precursor dos equipamentos modernos (PEREIRA; ALMEIDA, 2018). Ao longo do século XX, a eletrificação e a industrialização impulsionaram a popularização da refrigeração, inicialmente voltada à conservação de alimentos e, posteriormente, ao condicionamento de ar em residências, edifícios e veículos (ABNT, 2016).

A introdução dos CFCs, na década de 1930, revolucionou o setor pela estabilidade química e baixa toxicidade desses fluidos. Entretanto, os impactos ambientais relacionados à destruição da camada de ozônio levaram à sua substituição progressiva por HCFCs, HFCs e, mais recentemente, por fluidos naturais de menor impacto climático (UNEP, 2019). Atualmente, o foco está no aumento da eficiência energética e no uso de tecnologias mais sustentáveis, como compressores inverter, automação inteligente e integração com fontes renováveis (ASHRAE, 2022).

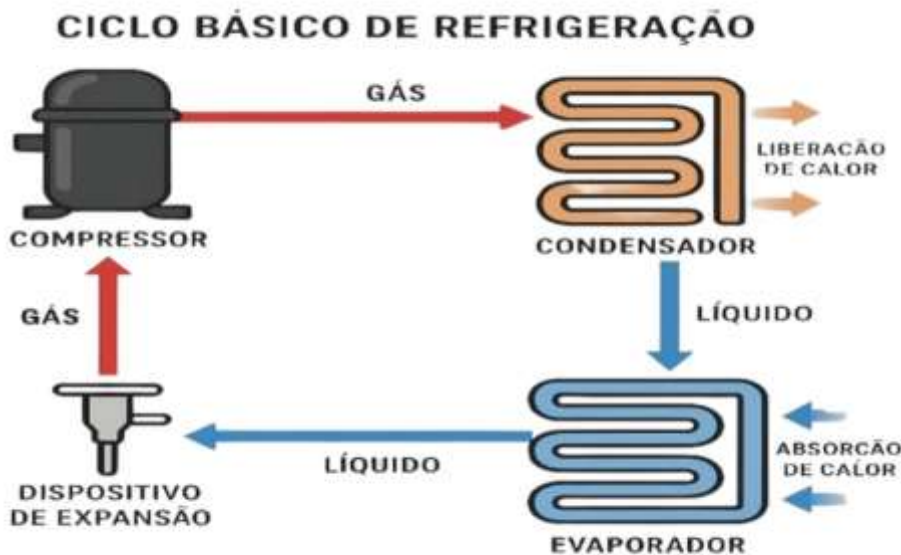
Princípios Básicos da Refrigeração

O processo de refrigeração tem como princípio básico a remoção de calor de um ambiente, com o objetivo de reduzir sua temperatura e proporcionar conforto térmico ou preservar materiais. Além do controle da temperatura, sistemas de climatização modernos também regulam fatores como umidade, movimentação e

qualidade do ar, conforme estabelecido na norma ABNT NBR 16401-1:2008. Essa abordagem amplia a eficiência e o conforto proporcionado pelo sistema.

O ciclo básico de refrigeração é composto por quatro componentes principais: compressor, condensador, dispositivo de expansão e evaporador. Segundo Stoecker (1985), o fluido refrigerante circula continuamente nesses componentes, mudando de estado físico (entre líquido e gasoso) e promovendo a troca de calor de forma eficiente. Na Figura 1, é apresentada uma ilustração quanto ao ciclo de refrigeração.

Figura 1: Ciclo básico de refrigeração



Fonte: O Autor (2025)

O processo tem início no compressor, onde o fluido refrigerante, na forma gasosa, é comprimido, o que eleva sua pressão e temperatura. Esse gás superaquecido é então enviado ao condensador, onde ocorre a liberação de calor para o ambiente externo, geralmente por meio do ar ou da água. Nesse estágio, o refrigerante retorna ao estado líquido. Em seguida, o fluido passa pelo dispositivo de expansão, que reduz bruscamente sua pressão e temperatura, preparando-o para a próxima fase. No evaporador, o refrigerante absorve o calor do ambiente interno, promovendo o resfriamento do local. Durante esse processo, o fluido volta ao estado gasoso e retorna ao compressor, reiniciando o ciclo de refrigeração.

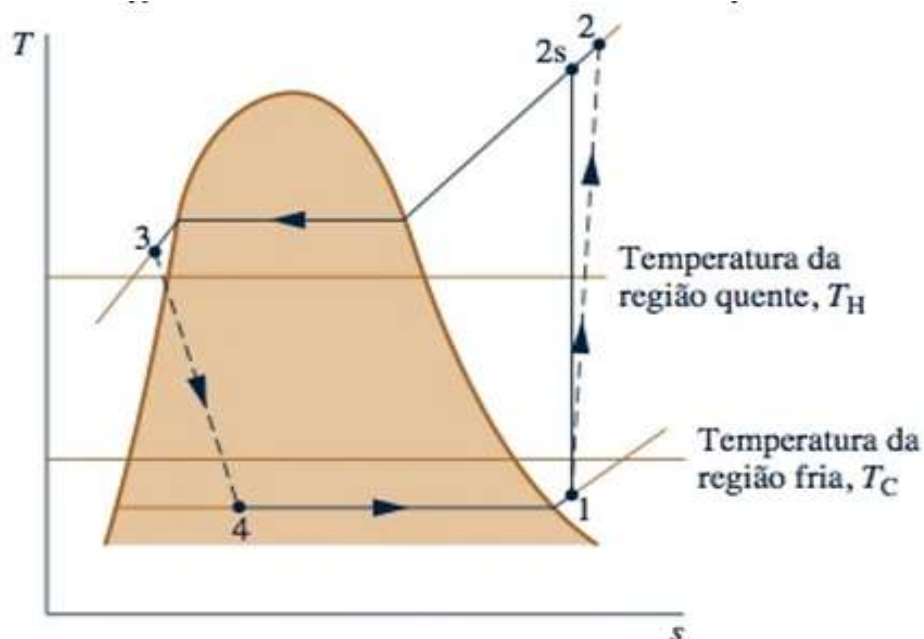
Por outro lado, em um ciclo real de compressão de vapor, ocorrem irreversibilidades nos componentes, o que altera o formato do diagrama, como ilustrado na Figura 2. Nesse tipo de ciclo, o ponto 1 correspondente à saída do

evaporador encontra-se na região de vapor superaquecido. Esse superaquecimento é fundamental para assegurar que o fluido refrigerante entre no compressor totalmente na fase gasosa, evitando a presença de líquido que poderia danificar o equipamento. Da mesma forma, o ponto 3 situa-se na região de líquido comprimido. Esse sub-resfriamento tem como objetivo eliminar a presença de vapor na entrada da válvula de expansão, além de aumentar a capacidade de refrigeração do sistema (ÇENGEL, 2013).

Diferentemente do ciclo ideal, as perdas por irreversibilidades em sistemas reais se devem, principalmente, às quedas de pressão provocadas pelo atrito do fluido ao longo do seu trajeto, como por exemplo entre o evaporador e o compressor, bem como à troca de calor com o ambiente ao redor. Durante a compressão, ao contrário do processo adiabático e reversível assumido no ciclo ideal, há aumento de entropia entre os estados 1 e 2.

Diante disso, com base na Figura 1 e nos estágios apresentados na Figura 2, pode-se afirmar que o ponto 1 representa a transição do evaporador para o compressor. O ponto 2 corresponde ao estágio de condensação, no qual o fluido refrigerante libera calor no condensador. O ponto 3 indica a passagem do condensador para o dispositivo de expansão. Por fim, o ponto 4 representa o estágio em que o fluido passa pelo dispositivo de expansão e retorna ao evaporador, completando o ciclo.

Figura 2: Diagrama T-s de um ciclo real de compressão de vapor.



Fonte: Moran (2018).

Além disso, é comum haver uma queda de pressão na saída do condensador, o que impede o fluido de sair como líquido saturado (como acontece no ciclo ideal entre os pontos 2 e 3, ilustrado na Figura 2). Em vez disso, há um sub-resfriamento no ponto 3, o que é desejável em sistemas reais, pois garante que o fluido esteja completamente condensado antes de entrar na válvula de expansão (transição do ponto 3 para o ponto 4) (ÇENGEL, 2013). Por fim, é importante destacar que o coeficiente de desempenho (COP) do ciclo tende a ser reduzido quando a temperatura média do fluido refrigerante no evaporador diminui ou quando a temperatura média no condensador aumenta.

Funcionamento do Sistema VRF

O sistema VRF funciona por meio de um ciclo de compressão de vapor, no qual o fluxo de refrigerante é ajustado conforme a demanda térmica de cada ambiente. Segundo Stoecker (2001), essa característica proporciona maior eficiência energética, já que o compressor opera de forma modulada, ajustando sua capacidade conforme a necessidade de refrigeração ou aquecimento.

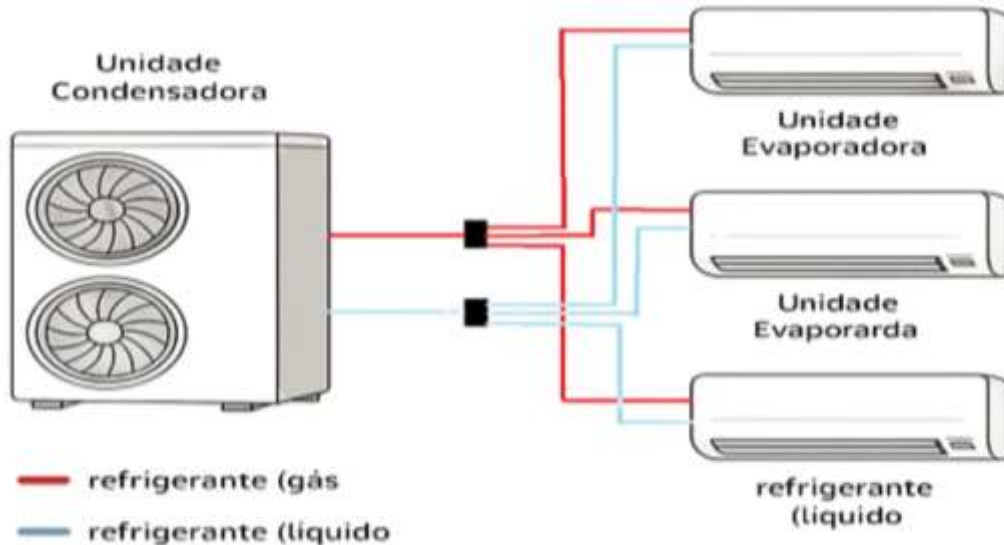
O ciclo de funcionamento do sistema VRF inicia-se na unidade externa, onde está localizado o compressor. Esse componente succiona o refrigerante na forma gasosa e eleva sua pressão e temperatura. Esse gás superaquecido segue para o condensador, onde ocorre a troca de calor com o ambiente externo. Durante esse processo, descrito por Cengel e Boles (2019), o fluido refrigerante libera calor e retorna ao estado líquido como demonstrado na figura 3.

Após a condensação, o refrigerante é conduzido por tubulações até as unidades internas instaladas nos ambientes que serão climatizados. Nessa etapa, o sistema VRF utiliza válvulas de expansão eletrônicas (EEV), responsáveis por controlar com precisão o fluxo de refrigerante que entra em cada unidade interna. Essa tecnologia permite que diferentes ambientes mantenham temperaturas personalizadas, conforme suas respectivas necessidades.

Nas unidades internas, ocorre o processo de evaporação. O refrigerante absorve o calor do ambiente e retorna à unidade externa na forma gasosa para reiniciar o ciclo. Essa evaporação resulta no resfriamento do ar, que é então insuflado no ambiente climatizado. Na Figura 3 apresenta-se o funcionamento de um equipamento de sistema VRF, onde as linhas vermelhas representam o gás em temperatura mais elevada sendo transportado da unidade evaporadora para a

condensadora. Já a linha azul, representa o gás resfriado fazendo o caminho inverso, ou seja, sendo transportado do equipamento condensador para o evaporador.

Figura 3: Funcionamento do sistema VRF

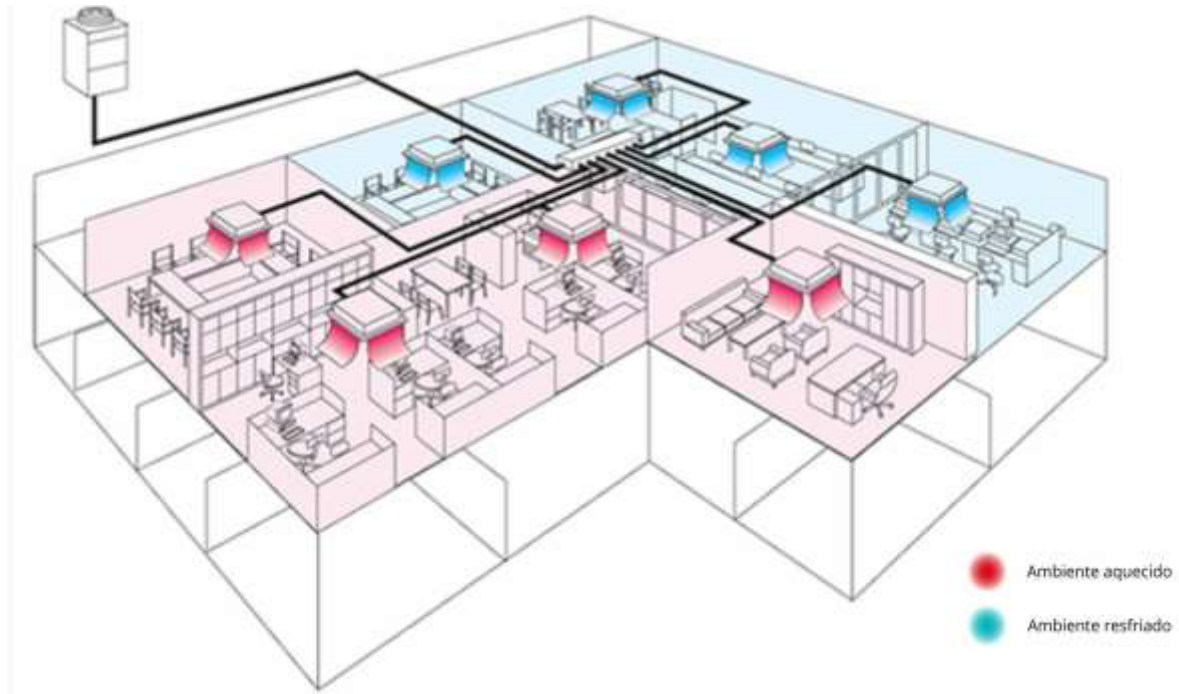


Fonte: O Autor (2025)

Outro diferencial importante do sistema VRF é sua capacidade de operar em modo simultâneo, também conhecido como *Heat Recovery*³. Conforme abordado pela ASHRAE (2020), essa tecnologia permite que algumas unidades internas operem em modo de refrigeração enquanto outras realizam aquecimento, como demonstrado na Figura 4, aproveitando o calor removido de um ambiente para aquecer outro. Esse processo reduz significativamente o consumo energético, tornando o sistema VRF uma solução eficiente para edifícios com diferentes zonas térmicas.

Figura 4: Demonstração de operação independente

³ Heat Recovery é um processo que recupera energia térmica de um fluxo de ar ou líquido quente para um fluxo de ar ou líquido frio



Fonte: Catálogo Climatis (2020)

Funcionamento do Sistema de Refrigeração com Chiller a Água

O Chiller a água é um sistema de refrigeração amplamente utilizado em grandes instalações, como hospitais, indústrias e edifícios comerciais, devido à sua alta eficiência energética e capacidade de climatizar extensas áreas. Esse equipamento utiliza um ciclo de compressão de vapor para resfriar a água, que é então distribuída aos pontos de consumo para controlar a temperatura ambiente.

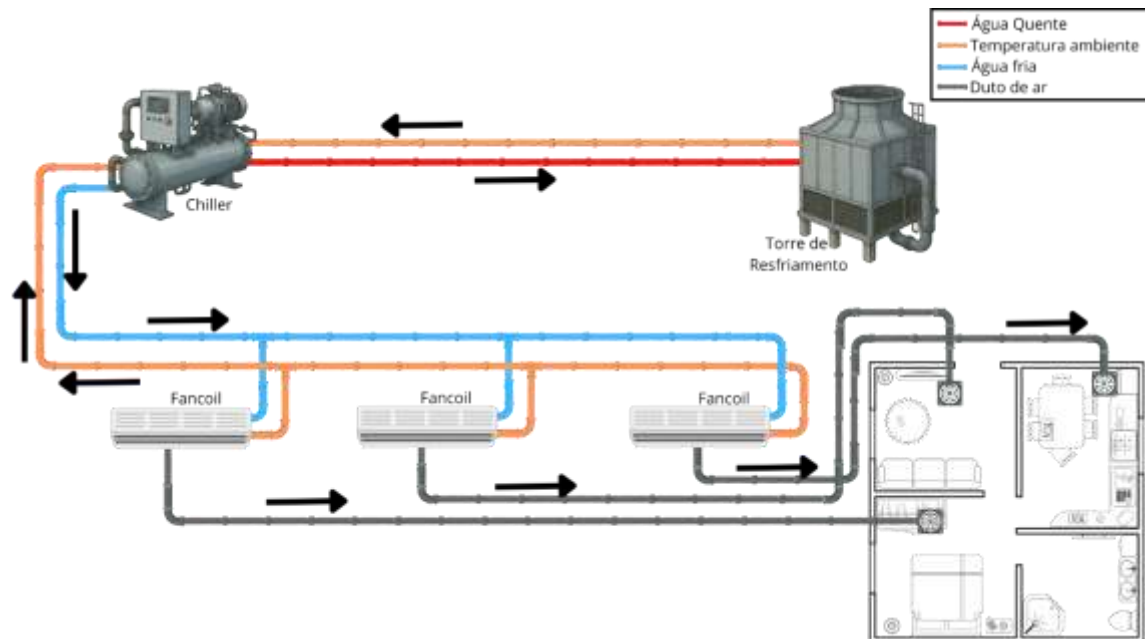
Segundo Çengel e Boles (2019), o ciclo de funcionamento do Chiller a água segue quatro etapas principais: compressão, condensação, expansão e evaporação. Na primeira etapa, o compressor succiona o fluido refrigerante na forma gasosa e eleva sua pressão e temperatura. Esse gás superaquecido segue para o condensador, onde ocorre a troca de calor com a água da torre de resfriamento.

Durante esse processo, descrito por Stoecker (2001), o refrigerante libera calor para a água, que é posteriormente enviada para a torre de resfriamento, onde esse calor é dissipado para o ambiente externo. O refrigerante, por sua vez, condensa-se e retorna ao estado líquido.

Em seguida, esse líquido refrigerante passa por uma válvula de expansão, onde sua pressão e temperatura são reduzidas abruptamente. Essa redução prepara o fluido para a etapa final, a evaporação. No evaporador, o refrigerante absorve o calor da água que circula pelo sistema, resfriando-a. Essa água gelada é então

enviada para os equipamentos de climatização, como unidades de tratamento de ar (UTA) ou fan-coils, que distribuem o ar frio nos ambientes (ASHRAE, 2020). Na Figura 5, é apresentada uma ilustração quanto ao ciclo do sistema relatado.

Figura 5: Ciclo do sistema Chiller a água.



Fonte: O Autor (2025)

O uso do Chiller a água apresenta vantagens significativas em eficiência energética, especialmente quando utilizado em conjunto com torres de resfriamento bem projetadas. Além disso, esse sistema é mais adequado para locais que demandam refrigeração constante e de alto desempenho, como grandes instalações industriais ou centros comerciais (CENGEL e BOLES, 2019). Portanto, o Chiller a água destaca-se por sua capacidade de operar com eficiência superior em comparação aos Chillers a ar, sendo uma solução recomendada para ambientes que exigem controle térmico avançado e economia energética.

Normas Técnicas e Regulamentações

A aplicação correta de sistemas de refrigeração exige o cumprimento de diversas normas técnicas e regulamentações nacionais e internacionais. Essas normas garantem segurança, eficiência operacional e conformidade com exigências legais.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o principal órgão responsável pela padronização de procedimentos técnicos. Entre as normas

relevantes, destaca-se a ABNT NBR 16069:2018, que trata dos requisitos para sistemas de refrigeração, abrangendo desde o projeto até a instalação e manutenção. Outra norma importante é a ABNT NBR ISO 5149:2015, baseada na norma internacional ISO 5149, que trata da segurança de sistemas de refrigeração e bombas de calor, especificando medidas para evitar riscos de explosões, intoxicações e danos a pessoas e bens.

No contexto internacional, a ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) estabelece diretrizes amplamente reconhecidas em projetos ao redor do mundo. A ASHRAE Standard 15 e a Standard 34 definem, respectivamente, requisitos de segurança em sistemas de refrigeração e critérios de classificação de fluidos refrigerantes (ASHRAE, 2022).

Além das normas técnicas, existem regulamentações internacionais que influenciam o setor. O Protocolo de Montreal (1987) estabeleceu a eliminação gradual de substâncias que destroem a camada de ozônio, como os CFCs e HCFCs. Posteriormente, a Emenda de Kigali (2016) foi incorporada ao protocolo, com foco na redução do uso dos HFCs, devido ao seu elevado potencial de aquecimento global (UNEP, 2019).

No Brasil, essas diretrizes internacionais são adotadas através de programas conduzidos pelo Ministério do Meio Ambiente, como o Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs (PBH), que visa a substituição progressiva de substâncias reguladas por alternativas tecnicamente viáveis e regulamentadas (MMA, 2021). Essas normas e regulamentações asseguram que os sistemas de refrigeração operem dentro de padrões técnicos reconhecidos, promovendo a segurança e o controle das substâncias utilizadas no setor.

Manutenção e Diagnóstico de Sistemas de Refrigeração

A manutenção adequada de sistemas de refrigeração é essencial para garantir sua eficiência, prolongar a vida útil dos equipamentos e evitar falhas que possam comprometer o funcionamento do sistema. De acordo com a ABNT NBR 16069:2018, a manutenção deve seguir critérios técnicos e operacionais estabelecidos em projeto, considerando os aspectos de segurança, desempenho e confiabilidade.

Existem três tipos principais de manutenção aplicáveis aos sistemas de refrigeração: manutenção corretiva, preventiva e preditiva. A manutenção corretiva ocorre após a falha do equipamento, sendo geralmente mais cara e arriscada, pois envolve paradas inesperadas do sistema. Já a manutenção preventiva é realizada em intervalos

programados, com inspeções e substituições de componentes desgastados, visando reduzir a ocorrência de falhas (LIMA *et al.*, 2020). A manutenção preditiva, por sua vez, utiliza técnicas de monitoramento e análise de dados para prever falhas antes que ocorram, o que permite ações mais precisas e eficientes (SOUZA; GONÇALVES, 2019).

O diagnóstico de falhas é uma etapa fundamental na manutenção, e envolve a utilização de instrumentos e metodologias específicas. Ferramentas como manômetros, termômetros digitais, analisadores de pressão e vazamento, além de sensores eletrônicos, são amplamente utilizadas para avaliar o desempenho do sistema e identificar possíveis anomalias. Entre os métodos de diagnóstico mais comuns, destacam-se a medição de pressões de sucção e descarga, temperaturas nos pontos-chave do ciclo, e análise de corrente elétrica do compressor, permitindo uma avaliação detalhada do funcionamento do sistema (CAMPOS; FERREIRA, 2018).

Outro aspecto importante é o uso de checklists operacionais, que ajudam a padronizar as inspeções e assegurar que todos os componentes sejam verificados corretamente. A implementação de rotinas de manutenção bem estruturadas contribui não apenas para o bom desempenho do sistema, mas também para a segurança dos usuários e operadores (ASHRAE, 2022).

Com o avanço tecnológico, tem-se observado o uso crescente de sistemas de monitoramento remoto e sensores inteligentes, permitindo uma manutenção mais eficiente e baseada em dados reais de operação, o que reduz custos e melhora o tempo de resposta a falhas (SILVA *et al.*, 2021).

Conforto térmico

O conforto térmico é uma condição essencial para garantir o bem-estar e a produtividade das pessoas em ambientes internos. Segundo a norma brasileira ABNT NBR 16401-2:2008, que regulamenta as instalações de ar-condicionado no Brasil, a ASHRAE 55 estabelece que um ambiente é considerado termicamente confortável quando pelo menos 80% das pessoas presentes expressam satisfação com as condições térmicas. Essa norma estabelece parâmetros que influenciam diretamente o conforto térmico, como temperatura operativa, velocidade do ar e umidade relativa. Do ponto de vista pessoal, Lopes (2008) define conforto térmico como uma condição mental de satisfação em relação à temperatura ambiente. Já sob a ótica física, essa

condição é atingida quando o organismo não precisa ativar seus mecanismos termorreguladores para manter a temperatura corporal equilibrada.

Koloszuk e Hittle (2006) destacam que o conforto térmico é resultado do equilíbrio entre as trocas térmicas do corpo humano e o ambiente ao redor, sendo influenciado tanto por fatores ambientais quanto pessoais.

A busca pelo conforto térmico tem impacto significativo no consumo de energia elétrica, especialmente devido ao uso crescente de sistemas de climatização. Conforme apontado por Campanhola (2014), os custos relacionados à climatização representam uma parcela considerável do consumo energético nas edificações. Além disso, um estudo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) revelou que o uso de aparelhos de ar-condicionado no Brasil dobrou em um período de 12 anos, evidenciando a crescente demanda por conforto térmico no país. Diante desse cenário, é fundamental que os sistemas de climatização sejam projetados de forma eficiente, considerando as características do ambiente e respeitando parâmetros técnicos e restrições construtivas. Essa abordagem não apenas garante o conforto dos ocupantes, mas também contribui para a redução do consumo energético e dos impactos ambientais associados.

Fluidos refrigerantes

Os fluidos refrigerantes são substâncias fundamentais para o funcionamento dos sistemas de refrigeração, sendo responsáveis por absorver e transferir calor. A escolha do fluido ideal depende de fatores como condições de operação e finalidade do sistema, já que não existe um único refrigerante que reúna todas as características desejáveis. Um bom fluido deve ser estável, não tóxico, seguro, de fácil detecção em caso de vazamentos e não prejudicial à camada de ozônio (FERRAZ, 2008).

Os principais tipos de fluidos refrigerantes incluem clorofluorcarbonos (CFCs), hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), hidrofluorcarbonetos (HFCs), hidrocarbonetos (HCs), amônia (NH₃) e dióxido de carbono (CO₂) (MORAN, 2018). Os CFCs e HCFCs foram gradativamente substituídos por alternativas menos nocivas, como os HFCs, que possuem baixo potencial de destruição da camada de ozônio. No entanto, muitos HFCs ainda apresentam elevado potencial de aquecimento global, impulsionando a busca por soluções mais sustentáveis (BOLAJI; HUAN, 2013).

Entre as alternativas naturais, a amônia destaca-se por sua eficiência energética e excelentes propriedades termodinâmicas, embora sua toxicidade restrinja seu uso ao setor industrial (ÇENGEL, 2013). Os hidrocarbonetos, como

propano e butano, também são opções eficientes e ecologicamente corretas, porém apresentam riscos devido à sua inflamabilidade. O dióxido de carbono, por sua vez, tem se mostrado uma alternativa promissora por ser seguro, não tóxico e não inflamável (BOLAJI; HUAN, 2013).

Embora estudos como o de Wu e Skye (2018) defendam o uso de CO₂ como solução sustentável, pesquisas de Saab *et al.* (2018) apontam que a amônia ainda apresenta o maior COP, seguida por fluidos como R-410a, R-134a e propano. Assim, a busca por alternativas que equilibrem eficiência energética, segurança e menor impacto ambiental segue sendo essencial para o desenvolvimento de sistemas de refrigeração mais sustentáveis.

Eficiência Energética

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética, eficiência energética pode ser definida como a realização de trabalho utilizando menos energia. Para Taube (2017), eficiência energética consiste na obtenção de um serviço a partir de um baixo consumo de energia. Lamberts *et al.* (1997), Apud Bello (2013), afirmam que, quando relacionada ao conceito de conforto térmico, eficiência energética pode ser interpretada como a capacidade de um edifício apresentar condições ambientais agradáveis aos usuários com menor consumo de energia. Logo, um ambiente pode ser considerado mais energeticamente eficiente do que outro quando consome menos energia estando nas mesmas condições climáticas.

A eficiência energética é essencial para reduzir custos operacionais e minimizar os impactos ambientais causados pelo consumo excessivo de energia elétrica. Sistemas modernos, como o VRF, destacam-se por sua capacidade de ajustar automaticamente a vazão de fluido refrigerante conforme a demanda térmica, proporcionando maior controle e evitando desperdício energético. Já os sistemas de Chiller são amplamente reconhecidos por sua robustez e eficiência quando aplicados em ambientes de grande porte, sendo uma alternativa viável para locais com alta demanda térmica.

Além dessas tecnologias, o uso de sistemas de controle automatizado, como sensores de presença e temporizadores, é uma alternativa eficiente para evitar o uso desnecessário de equipamentos de climatização. A automação permite que os sistemas sejam ligados ou desligados conforme a ocupação e demanda do ambiente, otimizando o consumo de energia.

Estudos como o de Chua *et al.* (2013) destacam que o consumo global de energia elétrica em edificações aumentou significativamente nas últimas décadas, evidenciando a necessidade de investir em tecnologias mais eficientes. Iniciativas como o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030) reforçam a importância de medidas que incentivem o uso consciente da energia. Além disso, políticas públicas e incentivos fiscais têm sido fundamentais para estimular a adoção de soluções inovadoras e eficientes.

Campanhola (2014) afirma que dentre os principais custos com energia elétrica nas edificações, encontram-se os custos referentes à climatização dos ambientes, devido à busca por conforto térmico dos ocupantes. Além disso, a Empresa de Pesquisa Energética, uma empresa pública federal prestadora de serviços ao Ministério de Minas e Energia (MME), voltados para realização de estudos relacionados ao planejamento do setor energético, publicou recentemente um estudo que demonstra que o uso de aparelhos de ar-condicionado, no Brasil, dobrou em 12 anos. Portanto, definir um sistema de climatização que funcione de forma eficiente, respeitando o tipo do ambiente, além dos parâmetros e restrições construtivas da edificação, é papel imprescindível para o desempenho eficiente do sistema de refrigeração.

Termodinâmica no Software EES

A termodinâmica aplicada à refrigeração é uma das áreas com grande contribuição para a Engenharia, pois fornece as bases para o entendimento e dimensionamento de sistemas de refrigeração por compressão de vapor, absorção e outros ciclos térmicos. Esses sistemas operam com base no transporte de energia térmica por meio de um fluido refrigerante, e seu desempenho está diretamente relacionado às propriedades termodinâmicas das substâncias envolvidas, bem como à correta aplicação das leis da termodinâmica (ÇENGEL e BOLES, 2019).

A Primeira Lei da Termodinâmica, também chamada de lei da conservação de energia, afirma que a variação da energia dentro de um sistema depende da quantidade de calor recebida e da energia gasta em forma de esforço mecânico, como quando um equipamento realiza movimento ou compressão. Nos sistemas de refrigeração, essa lei é usada para entender como a energia circula nas etapas de compressão, condensação, expansão e evaporação (ÇENGEL e BOLES, 2019). Já a Segunda Lei da Termodinâmica fornece os limites de eficiência para os sistemas térmicos, sendo essencial para o cálculo do coeficiente de desempenho de

refrigeradores e bombas de calor, além da análise de irreversibilidades e eficiência exergética (BEJAN, 2016).

Para fazer esses estudos, é necessário calcular propriedades dos fluidos usados no processo, como a quantidade de energia, a desorganização das partículas e as temperaturas em que ocorrem mudanças de estado. Esses dados podem ser encontrados em tabelas ou gráficos, como os diagramas p-h e T-s, mostrados na figura 2. No entanto, esses métodos manuais podem ser trabalhosos e propensos a erros. É nesse contexto que se destaca o uso do software EES (Engineering Equation Solver), uma ferramenta computacional que integra equações algébricas com bancos de dados termodinâmicos completos para mais de 200 substâncias, incluindo refrigerantes como R134a, R22, R600a, R290, entre outros (KLEIN e ALVARADO, 2021).

O EES permite ao engenheiro modelar sistemas de refrigeração completos por meio da entrada de equações simultâneas que descrevem os processos de compressão isotrópica, condensação a pressão constante, expansão isentálpica e evaporação. O programa fornece automaticamente as propriedades necessárias por meio de interpolação precisa e realiza os cálculos com alta confiabilidade. Além disso, sua interface gráfica permite gerar gráficos de desempenho, como curvas de COP em função da temperatura de evaporação e condensação, facilitando análises paramétricas e de otimização de projetos (KLEIN e ALVARADO, 2021).

Ao permitir uma análise mais robusta e precisa, o uso do EES proporciona vantagens significativas em estudos comparativos de diferentes fluidos refrigerantes, viabilizando a seleção de alternativas mais sustentáveis, com menor impacto ambiental e maior eficiência energética com aspecto essencial em projetos de refrigeração sustentável (ASHRAE, 2020).

Metodologia

Para o dimensionamento e a análise comparativa dos sistemas de climatização, foram consideradas duas tecnologias distintas: o sistema Chiller e o sistema VRF, ambos projetados para fornecer uma carga térmica total de 375 TR (Toneladas de

Refrigeração). Esse valor foi mensurado a partir da necessidade de carga térmica global do edifício em estudo, considerando as condições de ocupação, os equipamentos instalados e a função de cada ambiente. Essa carga corresponde a aproximadamente 1.318,875 kW de potência frigorífica, valor utilizado como base para todos os cálculos posteriores.

A primeira etapa metodológica consistiu na conversão das unidades de capacidade de refrigeração. A potência nominal em TR foi convertida para BTU/h, unidade amplamente utilizada em catálogos técnicos e dimensionamentos de equipamentos de climatização. A conversão resultou em 4.500.189 BTU/h, valor aplicado de forma equivalente aos dois sistemas.

Em seguida, foram aplicados os cálculos termodinâmicos utilizando o software EES. Esse recurso possibilitou a manipulação de variáveis como capacidade frigorífica, potência elétrica consumida, eficiência energética e parâmetros de desempenho (COP e EER). As equações empregadas permitiram determinar o consumo estimado de energia elétrica e a eficiência de cada tecnologia. Os cálculos foram estruturados da seguinte maneira:

- Cálculo do COP: obtido pela razão entre a capacidade frigorífica do sistema e a potência elétrica consumida conforme apresentado na equação 1. Esse índice reflete o quão eficiente é o equipamento em converter energia elétrica em refrigeração útil.

$$COP = \frac{Q_{evap}}{W_{el}} \quad (1)$$

Onde:

- COP é o coeficiente de desempenho.
 - Q_{evap} é a capacidade frigorífica útil do sistema, em kW ou TR.
 - W_{el} é a potência elétrica consumida pelo compressor e demais componentes do ciclo de refrigeração, em kW.
- Cálculo do EER: obtido pela conversão do COP para a unidade Btu/Wh, permitindo comparações com índices padronizados pela indústria, sendo sua expressão matemática apresentada na equação 2.

$$EER = COP \times 3,412 \quad (2)$$

Onde:

- EER é o índice de eficiência energética utilizado em catálogos comerciais, medido em Btu/Wh.
 - COP é o valor obtido na equação (1).
 - 3,412 é fator de conversão entre kW e Btu/h.
- Consumo energético: estimado a partir da potência elétrica consumida e projetado para diferentes períodos (hora, dia, mês e ano), cuja formulação matemática é apresentada na equação 3, considerando funcionamento contínuo (24h/dia).

$$E_h = W_{el} \times t_h \quad (3)$$

Onde:

- E_h é a energia consumida no período de análise (hora, dia, mês ou ano), em kWh.
 - W_{el} é potência elétrica consumida pelo sistema, em kW.
 - t_h é tempo de funcionamento do sistema no período considerado (em horas).
- Análise de eficiência exergética: além da análise energética tradicional, foi realizada a avaliação da eficiência exergética, que considera não apenas a quantidade de energia consumida, mas também a qualidade dessa energia e o grau de irreversibilidade dos processos. A formulação utilizada para este cálculo, fundamentada na segunda lei da termodinâmica, é apresentada na equação 4, tendo sido aplicada através de simulações no software EES.

$$\eta_{ex} = \frac{COP_{real}}{COP_{rev}} \quad (4)$$

Onde:

- η_{ex} é a eficiência exergética do sistema, expressa em %.
- COP_{real} é o coeficiente de desempenho obtido na prática.
- COP_{rev} é o coeficiente de desempenho ideal (reversível).

A modelagem do edifício foi realizada em software 3D, possibilitando uma visualização clara da distribuição térmica. Foram produzidos dois modelos distintos, onde apresentado na figura 6 o modelo 3D geral do edifício, representando sua configuração arquitetônica.

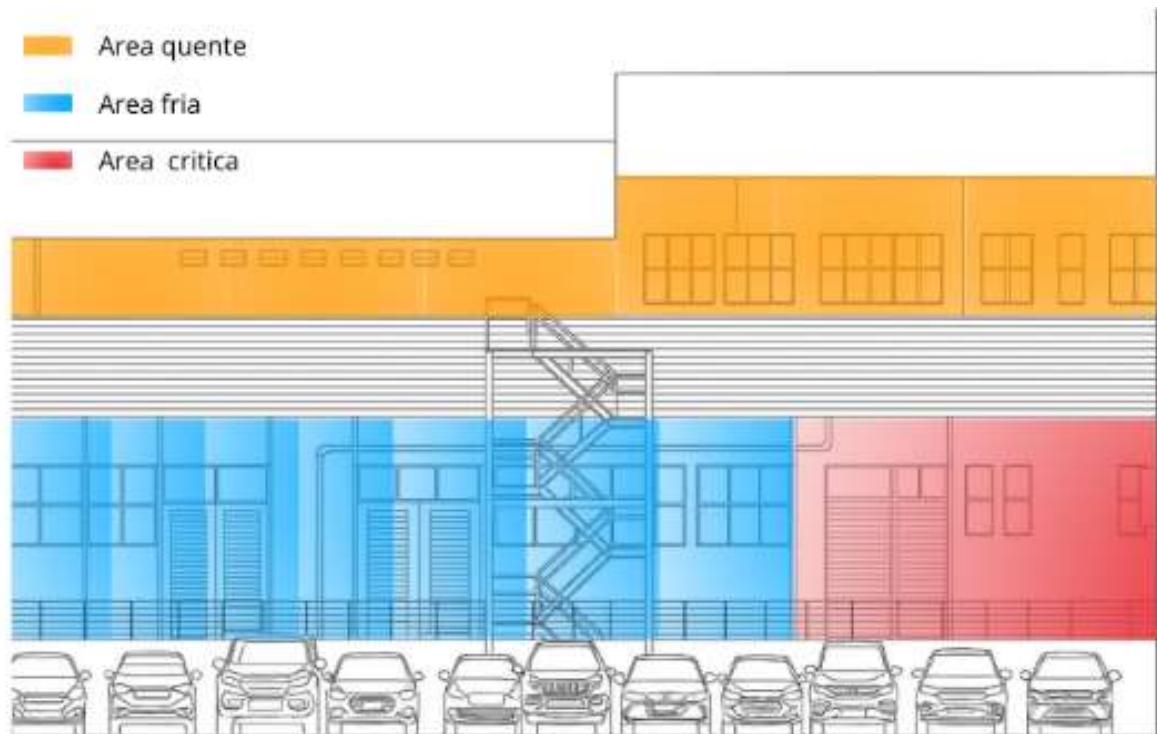
Figura 6: Edifício em modelo 3D



Fonte: O Autor (2025)

Já na figura 7 o edifício com indicação dos pontos críticos de calor, identificando regiões com maior concentração de cargas térmicas, como áreas de maior densidade de equipamentos eletrônicos ou presença de insolação direta.

Figura 7: Indicação dos pontos críticos de calor



Fonte: O Autor (2025)

Essas representações visuais foram fundamentais para direcionar a análise da carga térmica e validar a necessidade da capacidade de 375 TR. As imagens servem como ferramenta de apoio, demonstrando de forma prática as áreas que demandam maior atenção no projeto de climatização.

A metodologia adotada permitiu, portanto, a comparação justa entre as duas tecnologias (Chiller e VRF), uma vez que ambas foram analisadas sob a mesma base de carga térmica e em condições equivalentes de operação. Dessa forma, os resultados obtidos refletem a performance real de cada sistema quando aplicados ao mesmo cenário.

Resultados

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre o sistema Chiller e o sistema VRF, ambos dimensionados para a mesma capacidade total de 375 TR. Foram analisados parâmetros de desempenho energético e econômico, como o COP, o EER, a potência elétrica demandada, além do consumo e dos custos estimados de operação em diferentes períodos. O objetivo é evidenciar as diferenças de eficiência entre as duas tecnologias e seu impacto direto nos gastos com energia elétrica.

Tabela 1: Comparativo entre Chiller e VRF

Parâmetro	Chiller 06NW (30HX)	VRF 375 TR
Capacidade total	375 TR (1318,875 kW)	375 TR (1318,875 kW)
Capacidade (BTU/h)	≈ 4.500.189	≈ 4.500.189
COP	5,42	3,50
EER (Btu/Wh)	18,49	11,94
kW/TR	0,649	1,005
kW_el/kW_frio	0,1846	0,2857
Potência elétrica	243,401 kW	376,821 kW
Consumo diário	5.841,62 kWh	9.043,71 kWh
Consumo mensal	175.248,72 kWh	271.311,43 kWh
Consumo anual	2.132.192,76 kWh	3.300.955,71 kWh
Custo diário	R\$ 4.673,30	R\$ 7.234,97
Custo mensal	R\$ 140.198,98	R\$ 217.049,14
Custo anual	R\$ 1.705.754,21	R\$ 2.640.764,57

Fonte: O Autor (2025)

Na comparação entre os dois sistemas, observa-se que o Chiller apresenta um COP 54,9% maior que o do sistema VRF (5,42 contra 3,50), evidenciando sua maior eficiência na conversão de energia elétrica em refrigeração útil. Da mesma forma, o índice de eficiência energética EER do Chiller é 54,8% superior ao do VRF (18,49 Btu/Wh frente a 11,94 Btu/Wh), confirmando o melhor desempenho energético do primeiro.

Esse ganho de eficiência reflete diretamente no impacto financeiro: enquanto o VRF apresenta um custo mensal estimado de R\$ 217.049,14, o Chiller, devido à sua menor demanda de energia, representa uma economia de aproximadamente 55% em relação ao VRF. Assim, fica evidente que o Chiller não apenas oferece maior eficiência energética, mas também uma redução expressiva nos custos operacionais.

Consideração Final

A análise comparativa entre os sistemas de climatização dimensionados para 375 TR permitiu identificar diferenças significativas em termos de eficiência energética, exergética e econômica. O sistema Chiller apresentou desempenho superior, com COP de 5,42, consumo elétrico de 243,4 kW e menor custo operacional anual (≈ R\$ 1,7 milhão). Além disso, sua eficiência exergética de 37% demonstra um

melhor aproveitamento da energia sob a ótica da segunda lei da termodinâmica. Já o sistema VRF, embora amplamente utilizado em edificações comerciais pela flexibilidade e facilidade de instalação, mostrou-se menos eficiente neste caso. Seu COP reduzido (3,5) resultou em um consumo anual aproximadamente 55% maior que o do Chiller, alcançando custos superiores a R\$ 2,6 milhões.

Essa diferença de desempenho pode ser explicada pelas características intrínsecas de cada tecnologia. O VRF se destaca pela modularidade e pelo controle individual de zonas térmicas, mas seu uso intensivo de compressores e válvulas eletrônicas implica em maior consumo em aplicações de grande porte. Já o Chiller, por operar de forma centralizada e utilizar a água como fluido secundário de transporte térmico, apresenta menores perdas e, conseqüentemente, maior eficiência.

Contudo, é importante ponderar aspectos que não foram incluídos nesta análise. O estudo não considerou os custos de aquisição e instalação, nos quais o VRF tende a ser mais competitivo, podendo representar a melhor alternativa em projetos de médio porte ou com restrições de capital inicial. Além disso, o Chiller exige infraestrutura adicional (torres de resfriamento, sistemas hidráulicos) e manutenção especializada, o que pode elevar custos indiretos. O VRF, por sua vez, apresenta manutenção mais simples e rápida, além da vantagem de permitir expansões modulares conforme a necessidade da edificação.

Outro ponto a considerar é a influência do clima local e do perfil de ocupação. Em edificações com operação contínua, como hospitais e data centers, o Chiller tende a manter sua superioridade. Já em locais com variação de carga térmica ou em projetos que demandam maior flexibilidade operacional, o VRF pode apresentar maior competitividade.

Portanto, conclui-se que o Chiller representa a alternativa mais vantajosa sob os aspectos energético, exergético e econômico quando se trata de aplicações de grande porte. O VRF, por outro lado, mantém relevância em cenários de menor demanda térmica, onde modularidade e facilidade de expansão sejam fatores determinantes.

Essa análise reforça a importância de considerar não apenas indicadores de eficiência energética, mas também a eficiência exergética, os custos de longo prazo e as particularidades de cada projeto na escolha de sistemas de climatização. Além disso, evidencia a necessidade de estudos complementares que incluam custos iniciais, impactos ambientais e análise de ciclo de vida completo dos sistemas,

fornecendo subsídios ainda mais sólidos para a tomada de decisão em projetos futuros.

Referencias

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 16069:2018 – Refrigeração – Instalação, manutenção, assistência técnica e inspeção – Requisitos*. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 16401-1:2008 – Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projeto das instalações*. Rio de Janeiro, 2008.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR ISO 5149:2015 – Sistemas de refrigeração e bombas de calor – Requisitos de segurança e ambientais*. Rio de Janeiro, 2016.
- ASHRAE Handbook – Refrigeration*. Atlanta: ASHRAE, 2020.
- Standard 15 – Safety Standard for Refrigeration Systems*. Atlanta: ASHRAE, 2022.
- Standard 34 – Designation and Safety Classification of Refrigerants*. Atlanta: ASHRAE, 2022.
- BEJAN, A. *Advanced Engineering Thermodynamics*. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2016. <https://doi.org/10.1002/9781119245964>
- BOLAJI, B. O.; HUAN, Z. Development of low GWP refrigerants for residential air-conditioning systems. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, v. 21, n. 1, p. 1–10, 2013.
- CAMPANHOLA, C. Consumo energético em edificações comerciais. *Revista Brasileira de Climatização e Refrigeração*, v. 5, n. 1, p. 22–29, 2014.
- CAMPOS, J. R.; FERREIRA, D. C. Diagnóstico e manutenção em sistemas de climatização. *Revista Engenharia e Tecnologia Aplicada*, v. 8, n. 1, p. 50–58, 2018.
- ÇENGEL, Y. A. *Fundamentos da Termodinâmica*. 7. ed. São Paulo: AMGH, 2013.
- FERRAZ, C. A. *Refrigeração e condicionamento de ar*. 2. ed. São Paulo: Érica, 2008.
- GONÇALVES, J. S. *História da Refrigeração: das cavernas ao ar-condicionado*. São Paulo: SENAI, 2017.
- KLEIN, S. A.; ALVARADO, F. L. *Engineering Equation Solver – EES Software Manual*. F-Chart Software, 2021. Disponível em: <https://fchartsoftware.com/ees/>. Acesso em: 10 maio 2025.
- KOLOSZUK, J.; HITTLE, D. *HVAC Systems: Operation, Maintenance and Optimization*. 3. ed. New York: Prentice Hall, 2006.

- LIMA, J. F. et al. Manutenção preventiva e preditiva em sistemas de climatização. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 7, n. 9, p. 225–234, 2020.
- LOPES, R. S. Fundamentos do conforto térmico. *Revista Conforto Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 45–54, 2008.
- MMA – Ministério do meio ambiente. *Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs – PBH: Fase II*. Brasília: MMA, 2021.
- OLIVEIRA, R.; MARTINS, G. Aplicações e eficiência dos sistemas VRF em edificações comerciais. *Revista Técnica do CREA*, v. 15, n. 2, p. 33–41, 2014.
- PEREIRA, F. R.; ALMEIDA, R. F. Evolução histórica da refrigeração. *Revista de Engenharia Mecânica Aplicada*, v. 3, n. 1, p. 12–17, 2018.
- PEREIRA, R. A.; SANTOS, C. A.; OLIVEIRA, F. C. Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial com controle por inversores de frequência. *Revista Brasileira de Engenharia Mecânica*, v. 39, n. 2, p. 130–138, 2017.
- PINTO, L. S.; RODRIGUES, M. A.; COSTA, E. L. Avaliação energética e exergética de sistemas de climatização com diferentes estratégias de controle. *Revista IEEE América Latina*, v. 20, n. 5, p. 843–850, 2022.
- SAAB, S. et al. Comparação entre diferentes fluidos refrigerantes para aplicações comerciais. *Revista de Refrigeração e Climatização*, v. 13, n. 4, p. 78–84, 2018.
- SILVA, E. M. et al. Tecnologias inteligentes na manutenção de sistemas HVAC. *Revista Engenharia e Inovação*, v. 11, n. 2, p. 66–74, 2021.
- SOUZA, H. G.; GONÇALVES, M. L. Manutenção preditiva aplicada em climatização industrial. *Revista Engenharia e Tecnologia Aplicada*, v. 6, n. 3, p. 89–96, 2019.
- STOECKER, W. F. *Design of Thermal Systems*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- WU, X.; SKYE, H. Comparison of CO₂ and NH₃ as refrigerants in commercial systems. *Applied Thermal Engineering*, v. 145, p. 679–687, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.086>
- ABREU, C. A. M. Refrigeração sustentável: perspectivas e desafios. *Revista Brasileira de Climatização e Refrigeração*, v. 10, n. 2, p. 34–40, 2020.
- ALMEIDA, M. P. Eficiência energética em sistemas de refrigeração. *Revista Eletrotécnica*, v. 5, n. 1, p. 22–30, 2019.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Plano de eliminação dos HCFCs do Brasil – Fase I*. Brasília: MMA, 2017.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *BEN – Balanço Energético Nacional 2023: ano base 2022*. Brasília: MME/EPE, 2023. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-BEN>. Acesso em: 10 maio 2025.

CAVALCANTI, C. F. Sustentabilidade e desenvolvimento: desafios do século XXI. *Caderno CRH*, v. 18, n. 45, p. 51–63, jan./abr. 2005.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. *Programa Brasileiro de Etiquetagem – Ar Condicionado*. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/programas-da-qualidade/pbe/consulta-de-tabelas/ar-condicionado>. Acesso em: 10 maio 2025.

MARTINS, R. M.; FERREIRA, R. T. Sustentabilidade em sistemas de climatização: uma análise de viabilidade técnica e econômica. *Revista de Engenharia Sustentável*, v. 4, n. 2, p. 58–66, 2022.

OLIVEIRA, J. C. et al. Análise comparativa de fluidos refrigerantes naturais e sintéticos em sistemas de refrigeração. In: Congresso brasileiro de engenharia mecânica – COBEM, 2021, Uberlândia. *Anais....* Uberlândia: [s.n.], 2021.

PIRES, A. A. et al. Eficiência energética e impacto ambiental em sistemas de climatização com R-410A e R-32. *Revista Engenharia e Tecnologia Aplicada*, v. 9, n. 3, p. 110–118, 2021.

SANTOS, D. L.; LIMA, T. R. Gases refrigerantes e meio ambiente: alternativas sustentáveis. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 7, n. 6, p. 147–162, 2022.

ABRAVA – Associação brasileira de refrigeração, ar condicionado, ventilação e aquecimento. *Eficiência energética em sistemas de climatização*. São Paulo, 2018. Disponível em: <http://abrava.com.br>. Acesso em: 2 set. 2025.

ASSMANN, D. *Sistemas de climatização: princípios e aplicações*. Porto Alegre: Bookman, 2017.

ASHRAE – American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers. *ashrae Handbook: HVAC Systems and Equipment*. Atlanta, 2022.

CHUA, K. J.; CHOU, S. K.; YANG, W. M.; YAN, J. Achieving better energy-efficient air conditioning – a review of technologies and strategies. *Applied Energy*, v. 104, p. 87–104, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.037>.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. *Thermodynamics: an engineering approach*. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2015.

EPE – Empresa de pesquisa energética. *Balanco energético nacional 2023*. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 2 set. 2025.

INMETRO – Instituto nacional de metrologia, qualidade e tecnologia. Programa brasileiro de etiquetagem: relatório técnico. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro>. Acesso em: 2 set. 2025.

IPCC – Intergovernmental panel on climate change. Climate change 2021: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B. Fundamentals of engineering thermodynamics. 9. ed. Hoboken: Wiley, 2018.

STOECKER, W. F. Refrigeração e ar condicionado. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2001.

UNEP – United nations environment programme. district energy in cities: unlocking the potential of energy efficiency and renewable energy. Nairobi, 2016. Disponível em: <https://www.unep.org>. Acesso em: 2 set. 2025.

UNEP – United nations environment programme. emissions gap report 2019. Nairobi, 2019. Disponível em: <https://www.unep.org>. Acesso em: 2 set. 2025.