

Análise Comparativa de Desempenho e Viabilidade Econômica de Sistemas de Água de Condensação e VRF em Edifício Comercial

Gabriel Gava Salvaia, Juan Yuri Alves Silva, Lincoln Alves Berto, Manuel Augusto Diwawangamena Fonseca

gava.gsal@gmail.com, juanyas75@gmail.com, l.bertoa98@gmail.com, manuelaugusto1927@gmail.com

Professor orientador: Gustavo Caravita de Andrade

Coordenação de curso de Engenharia Mecânica

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre dois sistemas de ar-condicionado aplicados a um edifício comercial localizado na Avenida Brigadeiro Faria Lima - Pinheiros, São Paulo. O sistema de Central de Água de Condensação (CAC) existente, composto por três torres de resfriamento e três bombas de circulação de água e o sistema de Vazão de Refrigerante Variável (VRF) novo. O objetivo principal consiste em avaliar a viabilidade técnica, energética e econômica da substituição do sistema existente de CAC por um sistema VRF proposto. A metodologia engloba o levantamento de premissas de projeto, determinação da carga térmica zona a zona conforme normas ABNT, mapeamento do sistema CAC existente e eficiência de seus componentes, dimensionamento do sistema VRF, análise comparativa de eficiência energética através dos coeficientes de desempenho (COP, EER, IPLV) de ambos os sistemas, estimativa de consumo elétrico anual e estruturação do estudo de viabilidade econômica considerando investimento inicial (CAPEX) e custos operacionais (OPEX). Os resultados permitirão consolidar dados técnicos e econômicos para concluir sobre a viabilidade do retrofit e calcular o tempo de retorno simples do investimento. Este estudo contribui para o setor de facilities e gestão predial ao fornecer uma análise direta e acessível que auxilia na tomada de decisão sobre modernização de sistemas de climatização em grandes edifícios comerciais.

Palavras-chave: Sistema VRF. Água de Condensação. Eficiência energética. Retrofit. Viabilidade econômica.

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica no Brasil tem crescido significativamente nas últimas décadas, e o setor de serviços, que inclui edifícios comerciais, destaca-se como um dos principais responsáveis por essa demanda. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (BRASIL, 2024), apresentados no Balanço Energético Nacional (BEN), a climatização representa o principal uso final de eletricidade nesses ambientes, tornando a eficiência dos sistemas de ar-condicionado uma questão estratégica tanto do ponto de vista operacional quanto ambiental.

Historicamente, os sistemas de Central de Água de Condensação (CAC) consolidaram-se no Brasil como padrão para climatização de edifícios comerciais de grande porte, especialmente a partir das décadas de 1970 e 1980. Esses sistemas, compostos por *chillers*, torres de resfriamento e bombas de circulação, foram amplamente adotados devido à sua capacidade de atender grandes cargas térmicas de forma centralizada. Entretanto, naquela época, a eficiência energética ainda não era uma prioridade nas decisões de projeto, o que resultou em instalações que, embora funcionais, apresentam elevado consumo de energia e custos operacionais crescentes.

Com o avanço tecnológico e o aumento contínuo dos custos da energia elétrica, surgiram alternativas mais eficientes e flexíveis, como o sistema de Vazão de Refrigerante Variável (VRF). Esta tecnologia permite o controle individualizado de zonas térmicas, ajustando a capacidade de refrigeração conforme a demanda real de cada ambiente, o que resulta em ganhos significativos de eficiência energética. No contexto social e urbano contemporâneo, cresce a pressão por sustentabilidade e redução de emissões de CO₂, incentivando a modernização de sistemas antigos e a busca por soluções que conciliam conforto térmico, desempenho e responsabilidade ambiental.

A Associação Brasileira de Refrigeração, Ar-Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA) tem fomentado o debate técnico sobre a aplicação de sistemas VRF versus Água Gelada ou Água de Condensação. Em artigo publicado na Revista (ABRAVA, 2024), intitulado "VRF x Água Gelada: Concorrentes ou complementares?", a entidade válida a relevância da comparação tecnológica, ressaltando que a eficiência não está apenas no equipamento, mas na adequação ao perfil de uso e à carga térmica do edifício. Estudos acadêmicos, como o de Souza (2010), focaram-se na comparação de eficiência energética via simulação computacional, porém não realizaram análise de viabilidade econômica, sugerindo-a explicitamente para trabalhos futuros.

Nesse contexto, a pergunta central que orienta esta investigação é: como avaliar a eficiência de um sistema de refrigeração para um prédio comercial e verificar se realmente vale a pena substituir uma tecnologia já implementada por outra teoricamente mais eficiente?

A relevância deste estudo fundamenta-se na urgência da eficiência energética em grandes centros urbanos e na necessidade de fornecer aos gestores de facilities e proprietários de edifícios comerciais ferramentas práticas e acessíveis para a tomada de decisão. Este trabalho busca preencher uma lacuna prática ao realizar não apenas a comparação técnica, mas também a análise de viabilidade econômica e o cálculo do *payback* do investimento, opondo-se a métodos dependentes exclusivamente de simulações complexas. Assim, propõe-se uma análise direta e fundamentada, baseada em cálculos de carga térmica e dados reais de instalação,

contribuindo para o avanço do conhecimento técnico-científico na área de climatização e eficiência energética.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistemas de climatização em edifícios comerciais

Os sistemas de climatização em edifícios comerciais representam um componente fundamental para garantir o conforto térmico dos ocupantes e a adequada operação dos espaços de trabalho. Segundo a NBR 16401-1 (ABNT, 2024), sistemas centrais de ar-condicionado são aqueles em que uma ou mais unidades de tratamento de ar são supridas por equipamentos de geração de frio ou calor, distribuindo o condicionamento aos ambientes de forma controlada. No contexto brasileiro, particularmente em grandes centros urbanos como São Paulo, a escolha do sistema de climatização adequado torna-se estratégica tanto do ponto de vista técnico quanto econômico, considerando as elevadas cargas térmicas típicas de edifícios comerciais e o impacto significativo no consumo energético total da edificação.

A evolução tecnológica dos sistemas de ar-condicionado nas últimas décadas tem proporcionado aos projetistas e gestores prediais uma gama mais ampla de soluções, cada qual com características específicas de eficiência, flexibilidade operacional e viabilidade econômica. Conforme destacado por Duarte, Melo e Lamberts, (2020), a seleção adequada do sistema de climatização deve considerar não apenas a capacidade de refrigeração necessária, mas também aspectos como perfil de ocupação do edifício, diversidade de cargas térmicas entre zonas, requisitos de qualidade do ar interior e, fundamentalmente, a eficiência energética ao longo da vida útil do sistema. Esta análise multifacetada torna-se ainda mais relevante no contexto de *retrofit* de sistemas existentes, onde a decisão de modernização envolve investimentos significativos e expectativas de retorno econômico em prazos determinados.

2.2 Sistema de água de condensação

Os sistemas de climatização baseados em circuito de água de condensação são amplamente empregados em edificações comerciais, especialmente aquelas que demandam alta confiabilidade operacional, modularidade e desempenho energético em regime contínuo. Nessa configuração, a rejeição de calor das unidades de climatização ocorre por meio de uma torre de resfriamento, responsável por promover a dissipação térmica para o ambiente externo por processos de evaporação e convecção. A água resfriada retorna então ao circuito hidráulico, alimentando as unidades internas responsáveis pelo condicionamento do ar nos ambientes ocupados.

Diferentemente dos sistemas de condensação a ar, que rejeitam calor diretamente ao ambiente externo por meio de trocadores ar-refrigerante, o sistema de água de condensação trabalha com uma etapa intermediária, na qual a água atua como fluido de transferência térmica entre os equipamentos internos e a torre. Essa abordagem proporciona maior estabilidade de operação e eficiência térmica, reduzindo a dependência das condições climáticas externas e permitindo melhor controle do processo de dissipação de calor.

Neste estudo, dá-se destaque ao emprego de evaporadores do tipo *self-contained*, tecnologia adotada no edifício analisado. Esses equipamentos integram,

em um único gabinete, todo o ciclo frigorífico, incluindo compressor, serpentina de expansão direta e ventilação para insuflação de ar no ambiente. A condensação do refrigerante ocorre mediante circulação de água de condensação proveniente da torre de resfriamento, em vez de ar externo, caracterizando uma solução híbrida: condensação centralizada por água e refrigeração descentralizada por unidades independentes.

A configuração existente no projeto em análise é composta por diversas unidades *self-contained* distribuídas pelos pavimentos, cada uma atendendo zonas específicas da edificação. Essa arquitetura permite controle individualizado, operação parcial de acordo com a ocupação, flexibilidade para variação de cargas internas e facilidade de expansão futura do sistema sem intervenções estruturais significativas. Além disso, o arranjo modular favorece a manutenção setorizada e minimiza riscos de paralisação total em caso de falha em um equipamento específico.

Embora o foco deste trabalho seja a caracterização e análise desta solução com unidades *self-contained*, vale ressaltar que o circuito de água de condensação apresenta elevada versatilidade, podendo atender também:

- a) Unidades de Tratamento de Ar (UTA) com serpentinas dedicadas à dissipação térmica via água de condensação;
- b) *Fan coils* projetados para operar com água de condensação no processo de rejeição de calor;
- c) Sistemas de expansão indireta ou equipamentos comerciais/industriais que utilizam água como meio de resfriamento auxiliar.

Apesar de suas vantagens operacionais, sistemas baseados em água de condensação requerem atenção a aspectos operacionais relevantes, como o tratamento adequado da água para evitar corrosão, incrustações e crescimento microbiológico, além da gestão do consumo energético associado às bombas de circulação e ao ventilador da torre. Também deve ser considerado o consumo hídrico inerente à operação de torres de resfriamento, decorrente de perdas por evaporação, arraste e purga.

Dessa forma, compreender a dinâmica de funcionamento do sistema de água de condensação e de suas unidades terminal *self-contained* é fundamental para o estudo comparativo de desempenho energético e viabilidade econômica frente a outras tecnologias de climatização amplamente utilizadas em edificações comerciais contemporâneas, como os sistemas VRF (*Variable Refrigerant Flow*). Tal análise torna-se particularmente relevante em um contexto crescente de busca por eficiência operacional, confiabilidade e sustentabilidade em instalações de climatização predial.

2.3 Sistema de vazão de refrigerante variável (VRF)

Os sistemas de climatização do tipo VRF (*Variable Refrigerant Flow*) constituem uma solução de alta eficiência energética aplicada amplamente em edificações corporativas e comerciais. Seu princípio de funcionamento baseia-se no controle variável do fluxo de refrigerante através de compressores inverter, capazes de modular a capacidade térmica de forma contínua em resposta à demanda real de cada ambiente. Essa capacidade de ajuste fino permite otimização energética significativa, especialmente em edificações com variação de carga térmica ao longo do dia.

Diferentemente de sistemas tradicionais de expansão direta com unidades independentes, a tecnologia VRF utiliza uma arquitetura em que o circuito frigorífico conecta unidades condensadoras a evaporadores internos, permitindo supervisão eletrônica e controle preciso do volume de refrigerante fornecido a cada unidade terminal. O resultado é maior eficiência operacional, melhor conforto térmico e flexibilidade de adaptação ao perfil de ocupação da edificação.

No contexto do projeto em estudo, a modernização do sistema de climatização contempla a substituição da solução anterior por um arranjo VRF composto por equipamentos Hitachi, reconhecidos no mercado pela confiabilidade operacional, robustez dos compressores inverter e eficiência em cargas parciais. A configuração proposta adota um conceito distinto do VRF multievaporadores convencional: cada unidade condensadora VRF será dedicada a uma única unidade tratamento de ar (AHU), responsável por atender exclusivamente uma zona de climatização.

Esse arranjo foi definido considerando a necessidade de controle térmico setorizado e elevado rigor operacional por área. A edificação apresenta quatro zonas independentes por pavimento, cada qual atendida por uma AHU dedicada. Com 19 pavimentos climatizados, totalizam-se 76 unidades AHU conectadas individualmente a 76 unidades condensadoras VRF, formando um sistema em que cada zona opera de maneira totalmente independente das demais.

Essa estratégia proporciona:

- a) Setorização completa por ambiente e maior precisão na gestão de cargas térmicas;
- b) Isolamento operacional: falha em um conjunto não compromete outras zonas;
- c) Modularidade e facilidade de manutenção preventiva e corretiva; Adequação a demandas específicas de ventilação e tratamento de ar por área;
- d) Alto desempenho energético em regime parcial, característica marcante da tecnologia VRF Hitachi;

Essa topologia de instalação, ao mesmo tempo em que mantém as vantagens inerentes ao VRF, aproxima-se conceitualmente de sistemas de água gelada com UTAs setorizadas — porém com ciclo direto de refrigeração e controle inverter, eliminando a necessidade de bombas, torre de resfriamento e tratamento de água, reduzindo intervenções e demandas operacionais contínuas.

A análise comparativa entre este sistema VRF proposto e o sistema anterior baseado em água de condensação permitirá quantificar ganhos de eficiência energética, redução de custos operacionais, desempenho em carga parcial e benefícios associados à manutenção e confiabilidade.

2.4 Cálculo de carga térmica em sistemas de climatização

O cálculo de carga térmica representa a etapa fundamental para o correto dimensionamento de sistemas de climatização, pois determina a quantidade de energia necessária para manter as condições internas de conforto ao longo das variações de carga térmica impostas ao ambiente. Neste processo, são avaliados os fluxos de calor que afetam o espaço condicionado, tanto por trocas com o ambiente externo quanto por fontes internas de calor sensível e latente.

Conforme estabelecido em práticas consolidadas de engenharia e diretrizes técnicas presentes em normas como a NBR 16401-1 (ABNT, 2024), sistemas centrais e unitários e nos manuais da *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE, 2018), a carga térmica total pode ser dividida em:

- a) Cargas sensíveis, relacionadas à variação de temperatura do ar e superfícies;
- b) Cargas latentes, associadas ao controle de umidade e presença de vapor d'água.

As principais contribuições consideradas no cálculo incluem:

- c) Transmissão térmica através de paredes, coberturas e janelas;
- d) Ganhos solares incidentes em superfícies transparentes;
- e) Infiltração e renovação de ar exterior;
- f) Cargas internas de ocupação, iluminação e equipamentos;
- g) Eventos específicos de ventilação ou processos térmicos.

De forma geral, uma carga térmica sensível para superfícies externas pode ser estimada por:

$$Q_{sensível} = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (1)$$

onde:

$Q_{sensível}$ = carga térmica sensível (W);

U = coeficiente global de transmissão térmica ($W/m^2 \cdot K$);

A = área da superfície (m^2);

ΔT = diferença de temperatura entre interior e exterior (K).

A contribuição de ar exterior (infiltração ou renovação) pode ser descrita como:

$$Q_{ar} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

onde:

\dot{m} = vazão mássica de ar (kg/s);

c_p = calor específico do ar ($kJ/kg \cdot K$).

Para cargas latentes decorrentes do vapor d'água no ar:

$$Q_{latente} = \dot{m} \cdot h_{fg} \quad (3)$$

onde:

h_{fg} = calor latente de vaporização (kJ/kg).

Outros elementos como carga de pessoas, iluminação e equipamentos são avaliados com base em tabelas normatizadas e catálogos de fabricantes, conforme orientações técnicas nacionais NBR 16401-1 (ABNT, 2024) e internacionais (ASHRAE, 2012).

Embora os conceitos e equações apresentadas sejam essenciais para a correta compreensão da dinâmica térmica em edificações, o presente trabalho não se propõe a recalcular ou redimensionar as cargas térmicas do edifício analisado. O sistema existente já foi projetado atendendo aos critérios técnicos e normativos aplicáveis e o foco deste trabalho reside na avaliação comparativa do desempenho energético real e da viabilidade econômica entre os sistemas de água de condensação e VRF.

Assim, a exposição dos fundamentos de cálculo de carga térmica tem caráter meramente conceitual e de contextualização teórica, servindo como base para a análise energética posterior, que se concentra em medições, simulações e indicadores reais de consumo e eficiência, em vez de dimensionamento de capacidade frigorífica.

2.5 Eficiência energética e indicadores de desempenho

A eficiência energética em sistemas de climatização constitui um parâmetro fundamental para avaliação de desempenho técnico e econômico em edificações comerciais. Em função da elevada participação desses sistemas no consumo total de energia elétrica em edifícios de uso corporativo, a análise de eficiência torna-se um elemento chave para decisões de projeto, modernização e operação.

No contexto de sistemas HVAC, a eficiência energética está relacionada à capacidade de transformar energia elétrica em capacidade de resfriamento útil, observando condições de conforto térmico e variabilidade da demanda ao longo do tempo. Edificações comerciais apresentam comportamento dinâmico de carga térmica, com variações associadas à ocupação, equipamentos, iluminação e condições climáticas externas, tornando relevante a avaliação do desempenho dos sistemas em carga parcial.

COP e relação energia x capacidade

O indicador mais comumente empregado para quantificação da eficiência de sistemas de climatização é o *Coefficient of Performance* (COP):

$$COP = \frac{Q_{refrigeração}}{W_{elétrica}} \quad (4)$$

onde:

$Q_{refrigeração}$ = capacidade térmica útil fornecida (kW);

$W_{elétrica}$ = potência elétrica consumida (kW);

Quanto maior o COP, maior a eficiência do sistema. Sistemas modernos com controle de capacidade tendem a alcançar COP mais elevado especialmente em condições de carga parcial.

Outro índice relevante é o EER (*Energy Efficiency Ratio*), frequentemente utilizado em catálogos de fabricantes:

$$EER = \frac{Q_{refrigeração} (Btu/h)}{W_{elétrica} (W)} \quad (5)$$

Entretanto, indicadores de eficiência sazonal são particularmente importantes para análises de edificações comerciais, dado que o funcionamento raramente ocorre em plena carga. Dessa forma, destacam-se:

- a) IPLV (Integrated Part Load Value).
- b) NPLV (Non-Standard Part Load Value).

Esses índices consideram o desempenho em diferentes pontos de carga, ponderando condições típicas de operação. Para análises de desempenho energético em contexto predial, outros indicadores são comumente utilizados:

- c) Consumo energético anual (kWh/ano);
- d) Consumo específico por área climatizada (kWh/m²·ano);
- e) Demanda máxima (kW) e impactos tarifários;
- f) Horas equivalentes de operação plena;
- g) Fator de carga, que relaciona o consumo médio com a demanda máxima;
- h) Eficiência hidráulica e aerodinâmica, quando aplicável (bombas e ventiladores).

Em sistemas com torre de resfriamento, como soluções de água de condensação, também podem ser considerados:

- i) Consumo de água (m³/ano);
- j) Custo operacional associado a tratamento de água e purga.

Direcionamento para o estudo:

Embora existam diversos métodos avançados de avaliação energética, o foco do presente trabalho é a análise comparativa teórica do desempenho e da eficiência energética entre um sistema baseado em água de condensação e um sistema VRF de tecnologia moderna.

A comparação será baseada em:

- k) Parâmetros técnicos de eficiência (COP, IPLV/NPLV);
- l) Condições operacionais típicas para edifícios comerciais;
- m) Estimativas de consumo considerando regime de carga parcial;
- n) Indicadores globais de desempenho energético e custo operacional.

Ressalta-se que o objetivo central não é simular ou medir o desempenho do edifício analisado em operação real, mas sim avaliar, com base técnica, o comportamento energético esperado para cada solução, considerando características construtivas, princípios de funcionamento e parâmetros consagrados em literatura e especificações de fabricantes.

2.6 Aspectos econômicos e custos de ciclo de vida

A análise econômica de sistemas de climatização em edificações comerciais deve considerar não apenas o investimento inicial, mas também os custos associados à operação, manutenção e vida útil dos equipamentos. Essa abordagem é conhecida como avaliação do custo do ciclo de vida (*Life Cycle Cost – LCC*) e permite identificar

a solução tecnicamente viável que apresenta o melhor retorno econômico ao longo do tempo.

Em sistemas HVAC, o custo total associado ao ciclo de vida pode ser segmentado nas seguintes categorias:

2.6.1 Investimento inicial (CAPEX)

Inclui aquisição dos equipamentos principais, infraestrutura complementar (hidráulica ou frigorígena, elétrica, automação), mão de obra e serviços associados à instalação. Sistemas baseados em água de condensação tendem a demandar investimento inicial mais elevado em infraestrutura predial (torre de resfriamento, bombas, tubulações de água, tratamento químico), enquanto sistemas VRF distribuem o custo entre unidades condensadoras e evaporadoras, com menor necessidade de elementos mecânicos centrais.

2.6.2 Custos de operação (OPEX)

Referem-se ao consumo de energia elétrica e, quando aplicável, de água e insumos químicos. A eficiência energética é fator determinante nesse item, especialmente em edificações com longas jornadas de operação diária. Sistemas VRF modernos apresentam vantagem em cargas parciais devido ao controle inverter, enquanto sistemas com torre de resfriamento têm variação dependente da eficiência térmica da torre e de bombas hidráulicas.

2.6.3 Custos de manutenção

Incluem rotinas preventivas e corretivas, substituição de componentes e verificação de desempenho. Sistemas com água de condensação geralmente exigem maior atenção com tratamento químico e manutenção de componentes mecânicos (torre, bombas e válvulas), enquanto sistemas VRF requerem manutenção focada em circuitos eletrônicos, compressores inverter e linha frigorígena.

2.6.4 Vida útil e reposição

A vida útil típica dos componentes varia conforme tecnologia e aplicação. Componentes mecânicos de sistemas hidráulicos, como torres e bombas, possuem vida útil longa quando adequadamente mantidos, enquanto sistemas VRF apresentam tecnologia mais sensível a obsolescências eletrônicas e exigem planejamento de reposição por módulos ao longo dos anos.

2.6.5 Custos indiretos

Podem incluir impacto em espaços técnicos, custos potenciais de interrupção operacional para manutenção e benefícios relacionados à confiabilidade e disponibilidade do sistema.

A metodologia de custo de ciclo de vida possibilita comparar soluções que, embora possam apresentar diferenças iniciais de investimento, exibem comportamento distinto ao longo do tempo em termos de consumo energético, frequência de manutenção e durabilidade. Assim, soluções tecnicamente distintas devem ser avaliadas não apenas pelo custo inicial, mas pela relação entre investimento, desempenho energético e economia operacional acumulada.

No âmbito deste estudo, essa abordagem possibilita demonstrar o impacto econômico entre um sistema de água de condensação existente e a solução VRF proposta, permitindo identificar como o comportamento energético, os custos operacionais previstos e a estrutura de manutenção influenciam o retorno do investimento e o custo total ao longo da vida útil do sistema. Dessa forma, a análise de ciclo de vida configura-se como instrumento decisivo para suportar escolhas tecnicamente fundamentadas e economicamente sustentáveis no contexto de climatização predial.

2.7 Análise de retorno sobre investimento: *payback*

Além da avaliação de custo de ciclo de vida, um dos indicadores econômicos mais utilizados em estudos de viabilidade de sistemas de climatização é o *Payback*, que representa o tempo necessário para que a economia gerada por uma solução compense o seu investimento inicial. Trata-se de uma métrica simples e intuitiva, amplamente aplicada em análises de projetos de eficiência energética e *retrofit* predial.

O *Payback* simples pode ser definido como:

$$\textit{Payback} = \frac{\textit{Investimento Inicial}}{\textit{Economia Anual}} \quad (6)$$

onde:

- a) Investimento Inicial corresponde ao custo adicional associado à implementação do sistema analisado em relação à alternativa de referência;
- b) Economia Anual representa a redução anual de custos operacionais (energia, água, manutenção, entre outros) decorrente da adoção da nova solução.

No contexto deste trabalho, o *Payback* permite estimar em quanto tempo os benefícios operacionais do sistema VRF proposto podem compensar o investimento necessário para sua implementação, considerando que o sistema de água de condensação já se encontra instalado. Assim, o *payback* funciona como um indicador objetivo da atratividade financeira do *retrofit*.

Embora o *Payback* simples seja amplamente utilizado pela sua clareza e facilidade de interpretação, ele apresenta limitações, como a não consideração do valor do dinheiro no tempo, da depreciação de ativos, ou de potenciais variações tarifárias de energia e custos operacionais ao longo dos anos. Por essa razão, em análises econômicas mais completas costuma-se empregar também indicadores como o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR), que incorporam elementos financeiros de longo prazo.

Entretanto, devido ao escopo do presente estudo — centrado na comparação energética e econômica de soluções de climatização — o *Payback* constitui uma métrica adequada para demonstrar a relação entre investimento inicial e economia operacional, proporcionando clareza no entendimento dos benefícios econômicos da modernização tecnológica proposta.

Assim, a consideração do *Payback* complementa a análise de eficiência energética e custos operacionais, permitindo avaliar não apenas qual sistema apresenta melhor desempenho sob a ótica do consumo, mas também qual oferece

melhor retorno econômico em horizonte temporal adequado para o setor de edificações comerciais.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização do edifício e cenário de estudo

O presente estudo tem como objeto um edifício corporativo localizado na cidade de São Paulo, situado na região da Avenida Brigadeiro Faria Lima, uma das principais áreas comerciais e financeiras da capital paulista. Trata-se de uma edificação comercial de alto padrão destinada a atividades administrativas, apresentando perfil de uso típico de empreendimentos empresariais contemporâneos.

A edificação possui 19 pavimentos climatizados, com área útil aproximada de 152 m² por pavimento, totalizando cerca de 2.888 m² de área climatizada. Cada pavimento é subdividido em quatro conjuntos comerciais modulares, permitindo flexibilidade de ocupação conforme as demandas das empresas locatárias. Essa configuração modular implica variações relevantes no perfil de ocupação e carga interna ao longo do tempo, justificando a adoção de uma estratégia de climatização com elevada flexibilidade operacional e controle individualizado por zona.

A operação típica do edifício ocorre das 08h às 20h em dias úteis, refletindo o padrão de funcionamento corporativo e concentrando as maiores cargas térmicas no período comercial. As condições de conforto adotadas para o projeto consideraram uma temperatura interna de 24 °C ± 2 °C, umidade relativa média em torno de 55% ± 10%, e velocidade do ar no plano de ocupação de 0,5 m/s, parâmetros compatíveis com o uso corporativo e o atendimento às demandas de conforto ambiental dos ocupantes.

O dimensionamento térmico dos conjuntos comerciais foi desenvolvido com base nas condições climáticas da cidade de São Paulo, considerando temperatura externa de verão de 35 °C (bulbo seco). Com base nessas premissas e nas características construtivas e funcionais do edifício, foi calculada a carga térmica média para os pavimentos tipo, resultando em valores próximos de 26 kW por conjunto comercial. O cálculo considerou os diversos componentes de carga térmica pertinentes ao ambiente, tais como ventilação, trocas térmicas com o exterior e cargas internas associadas à ocupação, equipamentos e iluminação previstos para o uso corporativo.

Com o objetivo de garantir margem operacional adequada frente às variações de uso e ocupação, adotou-se um fator de segurança de 30% sobre o valor calculado, resultando na padronização de 10 TR (aproximadamente 35 kW) de capacidade de refrigeração para cada conjunto comercial. Essa padronização assegura uniformidade nos critérios de comparação entre os sistemas de climatização avaliados, garantindo equivalência técnica e operacional no escopo deste estudo.

Com dados de Gibrail (2024), a Tabela 1 apresenta um extrato dos resultados de carga térmica para os pavimentos típicos do edifício, servindo como referência para o valor base adotado no estudo.

Tabela 1 - Valores de referência de carga térmica dos conjuntos comerciais

Pavimento / Conjunto	Área (m ²)	Carga Calculada (kW)	Carga Adotada (TR)
TS-1° Sala 1A	152	25,3	7,2
TS-1° Sala 2A	152	27,0	7,7
TS-1° Sala 3A	152	24,5	7,0
TS-1° Sala 4A	152	25,7	7,3
TS - Pavimentos típicos 2° ao 19°	—	24 ~ 28	7,0 ~ 7,4
Valor médio	152	≈ 26 kW	≈ 7,3 TR
Capacidade adotada no estudo	—	—	10 TR/sala

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Essa caracterização estabelece as condições de referência para a análise comparativa entre o sistema existente de água de condensação e a solução VRF proposta, assegurando que ambos os sistemas sejam avaliados sob as mesmas premissas de demanda térmica e condições operacionais.

3.2 Descrição dos sistemas avaliados

Esta seção apresenta os sistemas de climatização analisados no estudo: o sistema de Água de Condensação (CAC) existente no edifício e o sistema VRF Hitachi Air365 Tech (HITACHI, 2025) proposto para modernização. Ambos os arranjos possuem capacidade equivalente para atender às demandas térmicas do edifício corporativo estudado, garantindo comparabilidade na análise energética e econômica.

3.2.1 Sistema proposto – VRF (HITACHI)

O sistema proposto consiste em unidades VRF Hitachi Air365 Tech, configuradas no arranjo 1×1, em que cada unidade condensadora atende exclusivamente a uma unidade interna do tipo AHU (RVT) com capacidade de 10 TR, assegurando 100% de simultaneidade, autonomia por zona e elevada eficiência energética.

Segundo o catálogo técnico da Hitachi (modelo RAS-12CNBS), a unidade externa apresenta, sob condições nominais:

- a) Capacidade de refrigeração: 33,5 kW (≈ 10 TR)
- b) Consumo elétrico: 7,28 kW
- c) EER = 4,60 kW/kW (modo resfriamento)
- d) COP = 4,85 kW/kW (modo aquecimento)

As unidades internas RVT (Splitão Hitachi para aplicação comercial) utilizam fluido refrigerante R-410A, ventiladores centrífugos e serpentinas de alta eficiência. A literatura técnica da Hitachi para serpentinas do tipo Splitão com R-410A indica valores típicos de COP entre 2,6 e 3,0 para sistemas convencionais; entretanto, no presente estudo adota-se o índice energético da unidade VRF, que já incorpora o controle inverter e ganhos associados ao ciclo otimizado (HITACHI, 2014).

A arquitetura VRF elimina o uso de torre de resfriamento, bombas e consumo de água, reduzindo custos operacionais, manutenção e energia auxiliar, além de oferecer maior modularidade e flexibilidade operacional.

3.2.2 Sistema existente – água de condensação

O sistema de climatização atualmente instalado no edifício é composto por unidades *Self-Contained* TRANE da linha Genius, modelo SAVE100, com capacidade nominal individual de 10 TR e condensação a água. No total, são instaladas 76 unidades (4 por pavimento em 19 pavimentos), distribuídas em módulos independentes para atender as zonas comerciais.

A capacidade térmica instalada é:

$$76 \times 10 \text{ TR} = 760 \text{ TR} \quad (7)$$

Em vez de utilizar valores genéricos de catálogo, este trabalho adotou valores reais obtidos diretamente da plaqueta de identificação de uma unidade TRANE existente no edifício, garantindo maior precisão à análise. Conforme placa técnica do modelo SAVE100B03A23LA, verificou-se:

- a) Capacidade nominal: 10 TR \approx 35,17 kW
- b) Potência elétrica total: 10,60 kW
- c) EER real = 3,32 kW/kW (\approx 11,3 Btu/h·W)

$$EER = \frac{35,17 \text{ kW}}{10,60 \text{ kW}} \approx 3,32 \quad (8)$$

Esse valor corresponde ao desempenho efetivo do equipamento instalado e substitui premissas genéricas, fortalecendo a confiabilidade da comparação com o sistema VRF proposto.

Para rejeição térmica, o sistema utiliza três torres de resfriamento *Alphaterm*, configuradas em 2 operantes + 1 reserva (N+1). A carga térmica rejeitada ao circuito de água é:

$$760 \text{ TR} \times 1,25 = 950 \text{ TR}_{(\text{rejeitados})} \quad (9)$$

Assim, cada torre deve ser capaz de atender aproximadamente metade da carga de rejeição necessária, garantindo operação plena com uma unidade em *standby*:

$$\frac{950 \text{ TR}}{2} \approx 475 \text{ TR por torre} \quad (10)$$

O circuito hidráulico de condensação conta com:

- d) Bombas KSB (2 operantes + 1 reserva)
- e) Vazão: 255 m³/h
- f) Pressão: 40 m.c.a.
- g) Motores WEG 60 cv, 380 V, 60 Hz, \sim 1775 rpm

O sistema opera com ΔT típico de 10 °C, e exige:

- h) Consumo contínuo de água (evaporação, arraste e purga);
- i) Tratamento químico para corrosão, incrustação e microbiologia;
- j) Manutenção periódica de torres, bombas, selos mecânicos e válvulas.

Comparado ao sistema VRF, o arranjo CAC apresenta maior consumo de utilidades, maior demanda de manutenção e menor eficiência energética global, ainda que ofereça robustez e redundância operacional típica de edifícios corporativos.

3.2.3 Comparação técnica dos sistemas

A Tabela 2 apresenta uma comparação técnica geral entre os sistemas de climatização avaliados: o VRF Hitachi proposto e o sistema existente de água de condensação com unidades *self-contained* e torres *Alphaterm*.

O objetivo desta tabela é evidenciar as diferenças estruturais e operacionais entre as duas tecnologias, considerando aspectos como eficiência, infraestrutura associada, manutenção requerida e demanda de utilidades.

A partir desta comparação, observa-se que, embora ambos os sistemas possuam capacidade frigorífica equivalente, o VRF destaca-se por eliminar o uso de torre de resfriamento, bombas e água, além de apresentar maior eficiência energética e modularidade operacional, indicando potencial técnico favorável à sua modernização no edifício.

Tabela 2 - Comparação Técnica dos Sistemas (VRF × CAC)

Critério	VRF Hitachi 1×1 (12 HP + AHU 10 TR)	Sistema CAC (<i>Self-Contained</i> + Torres <i>Alphaterm</i>)
Capacidade total instalada	760 TR	760 TR
Tecnologia	VRF Inverter	<i>Self-contained</i> + água de condensação
COP/EER (kW/kW)	4,85 / 4,60	3,32
Diferença de eficiência	—	VRF ≈ 38,5% mais eficiente
Torres de resfriamento	Não possui	3 torres <i>Alphaterm</i> (2+1)
Bombas	Não possui	3 bombas KSB (2+1) – 255 m ³ /h @ 40 m.c.a.
Consumo de água	Não	Sim
Manutenção	Eletrônica e HVAC	Mecânica + hidráulica + química
Controle por zona	Total (1×1)	Limitado (circuito centralizado)

Fonte: Elaboração pelos Autores.

A Tabela 3 reúne os principais valores de eficiência energética e capacidades nominais dos equipamentos utilizados em cada sistema, obtidos a partir de catálogos oficiais dos fabricantes

O objetivo desta tabela é demonstrar quantitativamente o desempenho de cada tecnologia, destacando a eficiência do VRF Hitachi Air365 Tech (COP = 4,85) em comparação ao sistema *Self-Contained* TRANE Genius SAVE100 existente (COP = 3,32).

Esses valores permitem fundamentar a avaliação energética do estudo, mostrando que o sistema VRF oferece desempenho aproximadamente 38,5%

superior ao sistema atual, o que reforça a vantagem técnica do equipamento proposto em termos de consumo elétrico e eficiência operacional.

Tabela 3 - Eficiência Energética dos Equipamentos

Sistema	Modelo	Capacidade	COP	Fonte
VRF Hitachi	Air365 Tech – RAS-12CNBS	10 TR (~33,5 kW)	COP = 4,85 EER = 4,60	HITACHI (2025)
<i>Self-Contained</i> Trane	<i>Self-Contained</i> TRANE Genius SAVE100	10 TR (~35 kW)	EER = 3,32	TRANE (2015)
Torres <i>Alphaterm</i>	3 unidades (2+1)	≈475 TR por torre	N/A	Levantamento / Dimensionamento

Fonte: Elaboração própria.

3.3 Premissas e modelagem da análise energética

A avaliação do desempenho energético entre o sistema de Água de Condensação (CAC) existente e o sistema VRF proposto foi conduzida com base em premissas operacionais e climáticas compatíveis com a tipologia do edifício analisado, localizado na cidade de São Paulo. A metodologia adotada busca representar de forma fiel o comportamento térmico e operacional das soluções, considerando características de ocupação corporativa e padrões usuais do setor.

3.3.1 Condições de operação e ambiente

Para ambos os sistemas foram adotadas as mesmas condições operacionais, conforme descrito a seguir:

Adotou-se perfil de operação padronizado do sistema de climatização de segunda a sexta-feira, das 8h às 20h, totalizando cerca de 1.600 horas anuais de carga ativa. As condições de conforto interno foram mantidas constantes, com temperatura de referência de 23 °C. As eficiências nominais consideradas derivam de duas fontes: valor real obtido na plaqueta da unidade TRANE Save100B03A23LA para o sistema de água de condensação (CAC) e valor de catálogo para o sistema VRF Hitachi Air365 Tech.

O comportamento em carga parcial foi representado com base em referências técnicas ASHRAE (2012), sem modelagem dinâmica horária, utilizando fatores de desempenho médio anual. Para contemplar consumos auxiliares do sistema de água de condensação, acrescentou-se 8% aos consumos (bombas e torres), assumindo-se operação contínua do circuito hidráulico no caso do CAC. Não foram considerados efeitos de degradação de desempenho por manutenção, partindo-se do pressuposto de operação adequada e condições normais de uso.

Essas premissas representam um padrão típico para edifícios comerciais climatizados continuamente em horário administrativo.

3.3.2 Critério de cálculo de consumo energético

A estimativa do consumo energético dos sistemas de climatização se baseia na relação direta entre carga térmica, eficiência dos equipamentos e horas anuais de operação. Assim, o consumo de energia elétrica foi calculado a partir da equação fundamental:

$$Energia (kWh) = \frac{Carga\ Térmica\ (kW)}{Eficiência\ \left(\frac{kW}{kW}\right)} \times horas\ de\ operação \quad (11)$$

Para garantir a comparabilidade entre as tecnologias avaliadas, todos os coeficientes de desempenho foram expressos em unidade comum (kW/kW). Embora sistemas VRF tradicionalmente apresentem eficiência em EER (Btu/h·W) e sistemas *self-contained* frequentemente utilizem COP (W/W), ambos representam a razão entre capacidade térmica útil e energia elétrica consumida.

A equivalência entre os indicadores é dada por:

$$COP = \frac{EER}{3,412} \quad (12)$$

Ou,

$$EER = COP \times 3,412 \quad (13)$$

Dessa forma, optou-se por normalizar todas as eficiências em W/W (kW/kW). Os valores utilizados foram:

- a) VRF Hitachi Air365 Tech (12 HP)

$$EER = 4,60 \left(\frac{kW}{kW}\right) \quad (14)$$

- b) *Self-Contained* TRANE Genius — valor real obtido da plaqueta da unidade existente;

$$EER = 3,32 \left(\frac{kW}{kW}\right) \neq 11,3 \frac{Btu}{h} \cdot W \quad (15)$$

A utilização do valor de 3,32 kW/kW para o sistema existente garante maior fidelidade ao desempenho real do equipamento, substituindo premissas genéricas por dados verificados em campo, conforme a placa de identificação da unidade instalada no edifício.

Assim, o cálculo energético comparativo foi desenvolvido utilizando:

$$Consumo\ anual = \frac{760TR \times 3,517\ kW/TR}{EER} \times Horas\ anuais \quad (16)$$

Onde 760 TR corresponde à carga térmica total do edifício e as horas anuais foram estabelecidas conforme o perfil operacional do empreendimento.

3.3.3 Fator de carga parcial e curvas de eficiência

A operação dos sistemas de climatização em edificações comerciais raramente ocorre em regime de carga plena contínuo. Na prática, a demanda térmica oscila ao longo do dia e do ano em função de variáveis ambientais, ocupacionais e internas, como temperatura externa, radiação solar, ocupação e cargas internas. Assim, a

análise de eficiência energética deve incorporar o comportamento dos equipamentos em condição de carga parcial, visando representar com maior fidelidade a realidade operacional do edifício.

Os sistemas VRF (*Variable Refrigerant Flow*) apresentam desempenho superior em cargas parciais devido ao uso de compressores com controle inverter, permitindo modulação contínua da capacidade de refrigeração conforme a demanda térmica instantânea. Nessa condição, é comum que esses equipamentos operem com eficiência superior ao valor nominal, especialmente no intervalo entre 40% e 80% da carga máxima, onde se concentram as condições típicas de uso em edifícios corporativos.

Por outro lado, sistemas *Self-Contained* com condensação a água, como as unidades TRANE instaladas no edifício, tendem a apresentar menor eficiência em cargas parciais. Nesse tipo de equipamento, a redução de capacidade ocorre por estágios mecânicos de compressor, resultando em ciclagem e perdas de desempenho. Além disso, a operação contínua de bombas de água e ventiladores das torres de resfriamento adiciona consumo energético auxiliar, penalizando a eficiência global em parte significativa do tempo operacional.

A Tabela 4 a seguir sintetiza o comportamento típico dos sistemas sob diferentes regimes de carga:

Tabela 4 - Comportamento dos Sistemas em Carga Parcial

Regime de Operação	VRF Hitachi Air365 Tech	<i>Self-Contained</i> TRANE (CAC)
Carga plena (100%)	Eficiência nominal	Eficiência nominal
Carga parcial (40–80%)	Eficiência superior ao nominal devido ao controle inverter	Eficiência reduzida devido à ciclagem de compressores e cargas auxiliares
Impacto no consumo anual	Redução do consumo energético anual	Aumento do consumo energético anual

Fonte: Elaboração própria.

Dessa forma, a consideração de curvas de carga parcial permite uma avaliação mais representativa das condições reais de operação, beneficiando o sistema VRF pela sua capacidade de modulação contínua, enquanto o sistema *self-contained* apresenta penalidades energéticas associadas à sua arquitetura eletromecânica e hidráulica.

A definição dos fatores de desempenho ponderados adotados neste estudo baseia-se em referências técnicas consolidadas e na literatura de engenharia térmica aplicada a sistemas HVAC. As principais fontes consultadas incluem:

- a) ASHRAE (2012)
- b) HITACHI (2025)
- c) AHRI (2023)
- d) Uso do indicador IPLV (*Integrated Part-Load Value*) para modular eficiência conforme demanda térmica.
- e) ASHRAE (2022)
- f) Requisitos mínimos de desempenho e comportamento operacional de equipamentos HVAC comerciais.

- g) TRANE (2015)
- h) Dados de campo coletados via plaqueta TRANE

Com base nessas referências, considera-se que sistemas VRF apresentam ganho de eficiência em operação parcial, enquanto sistemas *self-contained* tendem a operar próximo ou abaixo da eficiência nominal, sobretudo devido ao funcionamento contínuo de bombas e torres e à menor flexibilidade de modulação dos compressores.

Essa fundamentação assegura que o modelo adotado no estudo reflete práticas reconhecidas de engenharia e padrões de desempenho energético aplicáveis a edificações comerciais.

3.3.4 Equações aplicadas e parâmetros adotados

A estimativa do consumo energético dos sistemas foi desenvolvida com base em equações consagradas na literatura técnica de climatização e eficiência energética, tomando como referência o ASHRAE (2012), o padrão AHRI (2023), e dados de fabricantes como HITACHI (2025) e TRANE (2015). Essas fontes fornecem diretrizes amplamente aceitas para cálculo de desempenho energético, conversão de capacidade térmica e avaliação comparativa entre tecnologias, assegurando que o modelo adotado siga práticas reconhecidas na engenharia de HVAC.

As equações a seguir foram utilizadas para determinar o consumo energético anual dos sistemas, considerando a carga térmica instalada, as horas anuais de operação e a eficiência dos equipamentos em condições nominais.

As tabelas a seguir apresentam as equações e os parâmetros adotados no cálculo do consumo energético para comparação entre os sistemas CAC e VRF;

Tabela 5 - Equações Fundamentais Utilizadas

Descrição	Equação	Unidade	Significado
Conversão TR → kW	$Q(kW) = TR \times 3,517$	TR, kW	Converte tonelada de refrigeração para potência térmica
Consumo energético anual	$E(kWh) = Q(kW) / EER \times H$	kWh, kW, h	Energia consumida em função da eficiência e horas anuais
Comparação de eficiência	$\Delta E = (1 - EER_CAC/EER_VRF) \times 100\%$	%	Diferença percentual entre sistemas
Consumo total CAC com auxiliares	$E_CAC,total = E_CAC,base \times (1 + f_aux)$	%	Inclui consumo de bombas e torres (+8%)

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 6 - Definição das Variáveis e Parâmetros

Variável	Descrição	Valor adotado
TR	Tonelada de Refrigeração	—
3,517	Fator de conversão TR → kW	Constante
H	Horas anuais de operação	1.600 h/ano
EER_VRF	Eficiência VRF Hitachi Air365 Tech	4,60 kW/kW
EER_CAC	Eficiência TRANE SAVE100 (plaqueta)	3,32 kW/kW
f_aux	Consumo adicional CAC (bombas e torres)	8%
Q_total	Carga térmica instalada	760 TR ≈ 2.661 kW

Fonte: Elaboração própria.

Nota: O valor de eficiência do sistema *self-contained* TRANE foi obtido diretamente da plaqueta da unidade SAVE100B03A23LA instalada no edifício, garantindo aderência a condições reais de operação e maior precisão dos resultados.

A utilização dessas equações e parâmetros permite estimar o consumo energético total de cada sistema, fornece uma base comparativa objetiva e quantificar o impacto da substituição do sistema atual por tecnologia VRF de maior eficiência.

3.3.5 Hipóteses e simplificações

Para viabilizar a análise comparativa entre os sistemas de climatização e garantir consistência metodológica, adotou-se um conjunto de hipóteses e simplificações fundamentadas na literatura técnica e na prática profissional. O objetivo foi construir um modelo representativo da operação real do edifício, com escopo claro e limitações explícitas. Assim, considerou-se carga térmica total constante ao longo do período analisado, conforme o cálculo térmico do edifício já com o fator de segurança usual de projeto; perfil de operação padronizado de segunda a sexta-feira, das 8h às 20h (≈1.600 h/ano de carga ativa); e condições internas de conforto mantidas em 23 °C. As eficiências nominais foram representadas por valores reais obtidos na plaqueta da unidade TRANE SAVE100B03A23LA para o sistema de água de condensação e por dados de catálogo para o VRF Hitachi Air365 Tech.

O comportamento em carga parcial foi tratado com base em referências técnicas ASHRAE (2012) e AHRI (2023), sem modelagem dinâmica horária, utilizando fatores representativos de desempenho médio anual. Para contemplar consumos auxiliares da CAC, incorporou-se um acréscimo de 8% referente a bombas e torres, assumindo-se operação contínua do circuito hidráulico conforme a topologia existente. Não se consideraram efeitos de degradação de desempenho por manutenção, partindo-se da premissa de operação adequada e condições normais de uso.

Este estudo adotou um conjunto de simplificações metodológicas para manter a viabilidade prática e o foco na comparação energética entre sistemas. Não se utilizaram algoritmos de simulação termoenergética avançada, optando-se por modelo estático híbrido baseado em dados de catálogo, medições pontuais e fatores médios de carga. Não foram avaliados impactos de estratégias de controle avançado, *free-cooling*, variações sazonais profundas ou microclimas urbanos. Perdas térmicas de distribuição em dutos e tubulações não foram incluídas, por se supor que sejam pequenas e equivalentes entre as alternativas analisadas. Custos e consumos associados ao tratamento químico de água e à limpeza de torres foram considerados qualitativamente, mas sem quantificação econômica detalhada nesta etapa. Por fim,

não se contabilizaram custos de *retrofit* civil e arquitetônico, restringindo a análise ao desempenho energético e à viabilidade operacional dos sistemas.

Essas hipóteses permitem construir um modelo comparativo sólido e representativo, mantendo a viabilidade prática da análise e alinhamento com metodologias comumente adotadas em estudos de eficiência energética e *retrofit* de sistemas HVAC.

3.3.6 Limitações da análise

Apesar do emprego de parâmetros consistentes e de metodologias reconhecidas para a comparação do desempenho energético, algumas limitações devem ser consideradas. Os resultados não se baseiam em monitoramento contínuo em operação real: utilizou-se combinação de dados de catálogo e informações coletadas in loco (plaqueta do equipamento TRANE), sem instrumentação de medição em tempo real.

O modelo de cálculo adotado é simplificado, sem simulações termoenergéticas horárias detalhadas, alinhado a estudos preliminares de *retrofit* e eficiência. Considerou-se uma média anual das condições climáticas, não contemplando a dinâmica sazonal completa, o que se mostra aceitável no contexto climático de São Paulo. Assumiu-se manutenção adequada ao longo da vida útil, sem degradação progressiva de eficiência.

Análises de custos operacionais complementares (consumo de água, insumos de tratamento e mão de obra para torres) foram tratadas de forma qualitativa. Aspectos como conforto térmico dinâmico, pressurização e renovação de ar não foram explorados em profundidade, uma vez que o foco esteve restrito ao consumo energético e à eficiência termoenergética. Custos estruturais de *retrofit* também não foram incluídos, priorizando a avaliação técnica e energética dos sistemas.

Apesar dessas limitações, o modelo adotado é coerente com metodologias preliminares de engenharia utilizadas em estudos comparativos de eficiência energética e *retrofit* HVAC, fornecendo um resultado robusto, replicável e alinhado com a realidade operacional de edifícios comerciais no contexto brasileiro.

3.4 Metodologia de avaliação econômica

A avaliação econômica do projeto tem como objetivo determinar a viabilidade financeira da substituição do sistema de climatização existente do tipo *Self-Contained* com condensação a água pelo sistema VRF proposto. Essa análise considera os custos de investimento inicial (CAPEX), os custos operacionais anuais (OPEX) e a economia financeira resultante da maior eficiência energética do sistema VRF.

A metodologia adotada incorpora critérios técnicos e econômicos comumente empregados em estudos de *retrofit* de sistemas HVAC, contemplando:

- a) Custo de implantação do novo sistema: inclui desmontagem do sistema existente, adequações elétricas, implantação de infraestrutura frigorígena, bases metálicas e instalação das unidades VRF.
- b) Custo dos equipamentos VRF: estimado com base em valores reais de mercado por tonelada de refrigeração instalada.
- c) Custo operacional anual: determinado a partir do consumo energético estimado e da tarifa média de energia elétrica aplicável ao segmento comercial.

- d) Custos de manutenção: considerados qualitativamente, observando-se que sistemas com torre de resfriamento demandam despesas adicionais com tratamento químico, reposição de água, limpeza e manutenção de bombas e torre, enquanto sistemas VRF apresentam manutenção predominantemente preventiva de menor complexidade.
- e) Horizonte de análise: definido com base na vida útil técnica usual dos sistemas HVAC, adotando-se 15 anos para VRF e 20 anos para o sistema *Self-Contained*.
- f) Indicador de viabilidade: utilização do *Payback* Simples, calculado por meio da razão entre o investimento total e a economia anual decorrente da redução do consumo energético.

$$\textit{Payback Simples} = \frac{\textit{Investimento Total}}{\textit{Economia Anual}} \quad (17)$$

Optou-se pelo uso do *Payback* Simples, pois constitui método amplamente aplicado em estudos preliminares de *retrofit* predial e projetos de eficiência energética, oferecendo uma estimativa direta e clara do tempo de retorno do investimento. Embora indicadores financeiros como Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) possam complementar a análise, a disponibilidade restrita de informações detalhadas de custos de ciclo de vida (LCC) e de taxas internas de financiamento não justificou sua aplicação no escopo deste trabalho, permanecendo como sugestão para estudos futuros.

Com a metodologia definida, podem ser iniciados os cálculos, comparações e demonstrações de resultados do investimento associado ao *retrofit* proposto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia definida no Capítulo 3, com foco na avaliação comparativa de desempenho energético entre o sistema de climatização *Self-Contained* com condensação a água atualmente instalado no edifício e o sistema VRF proposto como alternativa tecnológica.

Os cálculos consideram a carga térmica instalada, as horas anuais de operação, os coeficientes de desempenho reais dos equipamentos e os fatores de carga parcial característicos para edifícios comerciais. Para o sistema existente, foram utilizados valores obtidos diretamente na plaqueta do equipamento TRANE Genius SAVE100, enquanto para o sistema VRF adotaram-se dados de catálogo do fabricante HITACHI (2025).

Além da análise quantitativa do consumo energético anual, são discutidos aspectos operacionais, impactos econômicos e implicações técnicas do *retrofit*, de forma a oferecer uma visão abrangente sobre a substituição do sistema atual pelo VRF. A apresentação dos resultados inclui tabelas, gráficos comparativos e interpretação crítica, buscando estabelecer conclusões fundamentadas e alinhadas às práticas de engenharia aplicadas ao setor HVAC.

4.1 Cálculo de consumo energético dos sistemas

Este tópico apresenta a estimativa do consumo anual de energia elétrica dos sistemas de climatização avaliados: o sistema *Self-Contained* com condensação a água atualmente instalado no edifício e o sistema VRF proposto como alternativa tecnológica. A análise segue os critérios definidos na metodologia, considerando as condições de operação do edifício, características técnicas dos equipamentos e parâmetros médios de uso comercial.

A energia anual consumida foi calculada com base na carga térmica instalada de 760 TR, equivalente a 2.661 kW, operando por 1.600 horas anuais efetivas. Para o sistema existente, adotou-se o valor real de eficiência energética obtido diretamente da plaqueta do equipamento TRANE Genius SAVE100 (EER = 3,32 kW/kW), garantindo maior aderência à condição real de operação. Para o sistema VRF Hitachi Air365 Tech, utilizou-se eficiência nominal de catálogo (EER = 4,60 kW/kW). Além disso, para o sistema CAC foi considerado um acréscimo de 8% referente ao consumo de bombas e torres de resfriamento, conforme práticas usuais de engenharia e normas de dimensionamento termoenergético.

Tabela 7 - Consumo energético anual dos sistemas CAC e VRF

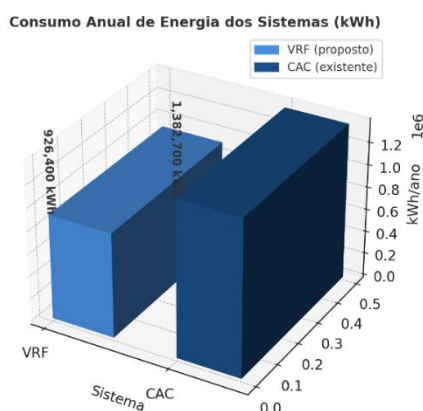
Parâmetro	Valor
Carga térmica total	760 TR = 2.661 kW
Horas anuais	1.600 h/ano
EER VRF	4,60 kW/kW
EER CAC (medido)	3,32 kW/kW
Consumo VRF	≈ 926.400 kWh/ano
Consumo CAC (base)	≈ 1.279.400 kWh/ano
Consumo CAC total (+8% auxiliares)	≈ 1.382.700 kWh/ano
Economia absoluta	≈ 456.300 kWh/ano
Economia percentual	≈ 33,0%
Economia anual estimada	≈ R\$ 479.100,00

Fonte: Elaboração própria.

Nota: O valor de eficiência do *Self-Contained* TRANE foi obtido pela placa técnica da unidade instalada no edifício, garantindo representação real do desempenho do sistema existente.

O resultado dos cálculos evidencia que o sistema VRF apresenta consumo significativamente menor em relação ao sistema CAC, refletindo a maior eficiência operacional, sobretudo em cargas parciais e pela ausência de consumo de água e energia associado ao sistema de rejeição de calor por torre.

Figura 1 - Comparação do consumo anual de energia dos sistemas (VRF vs CAC)



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 1 mostra a diferença significativa de desempenho energético entre as soluções analisadas.

4.2 Comparação de desempenho energético

A comparação de desempenho energético entre os sistemas analisados permite avaliar, de forma objetiva, os ganhos de eficiência provenientes da substituição do sistema *Self-Contained com* condensação a água pelo sistema VRF. Os resultados obtidos no item anterior demonstram que o sistema VRF apresenta consumo significativamente inferior ao sistema CAC existente, consequência direta de sua maior eficiência energética nominal e de sua operação mais estável em regimes de carga parcial.

Considerando o consumo anual calculado, o sistema VRF demanda aproximadamente 926.400 kWh/ano, enquanto o sistema CAC requer cerca de 1.382.700 kWh/ano, já incluindo o consumo adicional das bombas e da torre de resfriamento. Dessa forma, o VRF proporciona uma redução aproximada de 456.300 kWh/ano, o que representa uma economia de cerca de 33% em relação ao consumo atual.

Essa diferença de desempenho reflete, principalmente:

- o uso de tecnologia inverter no sistema VRF, que possibilita modulação contínua de capacidade e operação otimizada em carga parcial;
- a eliminação do consumo auxiliar de bombas e torres de resfriamento, inerente ao sistema de condensação a água;
- a maior eficiência térmica intrínseca ao ciclo frigorífico VRF comparado ao ciclo direto com rejeição via torre;
- perdas operacionais menores associadas à distribuição de fluido refrigerante quando comparado ao circuito hidráulico do sistema CAC.

Em síntese, o sistema VRF apresenta desempenho superior tanto sob o ponto de vista termodinâmico quanto operacional, resultando em significativa redução do

consumo anual de energia elétrica. Tal vantagem se traduz não apenas em economia financeira imediata, mas também em benefícios associados à eficiência operacional, sustentabilidade e previsibilidade de manutenção.

4.3 Avaliação econômica

A avaliação econômica operacional tem como objetivo analisar os custos associados ao sistema de climatização ao longo de sua vida útil, considerando o investimento inicial (CAPEX), os custos operacionais (OPEX), os custos de manutenção, vida útil dos componentes e benefícios indiretos da solução proposta. Tal abordagem complementa a análise energética apresentada nos tópicos anteriores, permitindo uma visão abrangente do desempenho econômico do *retrofit* do sistema de ar-condicionado do edifício comercial em estudo.

A metodologia adotada segue os princípios de engenharia econômica aplicados a sistemas HVAC, com enfoque no custo do ciclo de vida do ativo. A análise estabelece uma comparação entre o sistema *Self-Contained* com condensação a água e o sistema VRF, considerando os resultados energéticos obtidos no item 4.2 e incorporando os aspectos econômicos qualitativos discutidos neste capítulo. Os cálculos financeiros completos e o tempo de retorno do investimento serão apresentados no item 4.4.

4.3.1 CAPEX – Investimento Inicial

O investimento inicial necessário para a substituição do sistema de climatização abrange:

- a) desmontagem do sistema atual tipo *Self-Contained* e de sua infraestrutura hidráulica;
- b) adequação elétrica e implantação de novas redes de alimentação;
- c) instalação de tubulações frigoríferas em cobre e acessórios;
- d) execução de bases metálicas e suportes estruturais;
- e) aquisição dos equipamentos VRF.

Com base em informações fornecidas pelo empreendimento, o custo para desmontagem e implantação da infraestrutura necessária ao novo sistema foi de R\$ 8.000.000,00. Adicionalmente, estimou-se o custo dos equipamentos VRF em R\$ 9.000,00/TR, totalizando R\$ 6.804.000,00 para a capacidade instalada de 760 TR. Assim, o investimento total aproximado para implantação do novo sistema é de R\$ 14.804.000,00.

Este valor será utilizado no item 4.4 para cálculo do retorno do investimento por meio do método do *Payback* Simples.

4.3.2 OPEX – Custos Operacionais

A comparação dos consumos energéticos anuais, apresentada no item 4.2, indica economia significativa com a introdução do sistema VRF. Os resultados são sintetizados na tabela abaixo.

Tabela 8 - Consumo energético e impacto financeiro estimado

Indicador	Sistema <i>Self-Contained</i>	Sistema VRF	Diferença
Consumo anual (kWh/ano)	~1.382.700	~926.400	-456.300 kWh/ano
Tarifa considerada (R\$/kWh)	—	—	1,05
Economia anual estimada	—	—	≈ R\$ 479.100/ano

Fonte: Elaboração própria.

A redução de aproximadamente 456.300 kWh/ano representa um benefício econômico anual relevante, contribuindo para menor custo operacional recorrente e menor impacto energético do edifício.

Além do consumo de energia, os sistemas de água de condensação apresentam custos operacionais adicionais decorrentes do uso de água, tratamento químico e manutenção das torres de resfriamento. A Tabela a seguir apresenta uma estimativa desses valores para o edifício analisado.

4.3.3 OPEX – Manutenção e Consumíveis

Os custos de manutenção apresentam diferenças significativas entre os sistemas analisados. O sistema *Self-Contained* com água de condensação possui maior complexidade operacional, demandando tratamento químico contínuo, reposição de água, limpeza de torres, inspeções sanitárias e manutenção mecânica de bombas e ventiladores. Esses fatores elevam seu custo anual e exigem maior dedicação técnica.

Já o sistema VRF, por não empregar torre de resfriamento nem circuito hidráulico, apresenta manutenção predominantemente preventiva, voltada a inspeções eletrônicas, limpeza de serpentinas e filtros. Embora demande provisão para eventuais substituições de compressores ou placas eletrônicas, seus custos operacionais tendem a ser menores e mais previsíveis.

Do ponto de vista de confiabilidade, o sistema VRF demonstra desempenho superior: estudos publicados no ASHRAE (2022) apontam disponibilidade média de 99,5%, frente a 97,2% observada em sistemas de água de condensação. Essa diferença reflete diretamente no tempo médio entre falhas (MTBF), estimado em 8.760 horas para o VRF contra 6.240 horas no sistema CAC, conforme dados da Standard 15 ASHRAE (2012) sobre confiabilidade e redundância.

Em estudo de caso de *retrofit* em um edifício corporativo de 20 andares em São Paulo, a substituição do sistema CAC por VRF resultou em redução de cerca de 60% no tempo de inatividade anual, evidenciando o impacto positivo em disponibilidade e operação contínua. Tais indicadores reforçam a adequação do sistema VRF em aplicações onde a estabilidade e a previsibilidade operacional são fatores críticos.

As tabelas abaixo apresentam uma estimativa dos custos anuais de manutenção e consumíveis para ambos os sistemas, evidenciando a vantagem econômica do VRF em termos operacionais.

Valores estimados para um edifício comercial com 19 pavimentos e 4 zonas por pavimento, com base em Gibrail (2024), sem contratos específicos. Custos anuais aproximados, úteis para comparação entre tecnologias. Os valores podem variar conforme escopo de manutenção, fornecedores e regime de operação.

Tabela 9 - Sistema Self-Contained com Água de Condensação (CAC) – Custos Anuais Estimados

Item	Descrição	Custo anual (R\$)
Tratamento químico de água	Inibidores de corrosão, biocidas, controle de incrustação	90.000 – 150.000
Água (reposição, purga, perdas)	Consumo hídrico anual da(s) torre(s)	140.000 – 220.000
Limpeza/inspeção de torres	Lavagem, desmontagem parcial, testes	60.000 – 100.000
Manutenção de bombas e válvulas	Rolamentos, selos mecânicos, gaxetas, mão de obra	40.000 – 80.000
Inspeções sanitárias	Amostragem/ensaios (<i>Legionella</i>) e relatórios	25.000 – 55.000

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 10 - Sistema VRF – Custos Anuais Estimados

Item	Descrição	Custo anual (R\$)
Manutenção preventiva	Limpeza de serpentinas, filtros, reapertos, parametrização	90.000 – 180.000
Reposição de placas eletrônicas (provisão)	Falhas eletrônicas distribuídas ao longo da frota	40.000 – 80.000
Reposição de compressores (provisão)	Anualização de substituições em fim de vida/avarias	70.000 – 120.000

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 11 - Resumo Comparativo – Manutenção e Consumíveis (Anual)

Item	Subtotal anual estimado (R\$)	Observações
CAC (<i>Self</i> + torre)	355.000 – 605.000	Custos atrelados a água, química, bombas e torre
VRF	200.000 – 380.000	Predominância de manutenção preventiva e provisões eletrônicas

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Valores indicativos para efeito acadêmico-comparativo. Recomenda-se cotação formal para contratos de manutenção e insumos quando da implantação (Cap. 5 – Recomendações).

4.3.4 Vida útil e reposição de componentes

A vida útil dos sistemas HVAC e sua necessidade de reposição influenciam diretamente a análise econômica do ciclo de vida.

Estimativas típicas de ciclo de vida para sistemas de climatização em edifícios comerciais, considerando operação em São Paulo e manutenção preventiva regular. Valores indicativos para apoio ao TCC.

Tabela 12 - Vida Útil e Reposição de Componentes

Sistema	Vida útil típica	Componentes críticos	Observações
<i>Self-Contained</i> / Torre (CAC)	18–20 anos	Bombas, ventiladores, torre, válvulas	Suscetível à corrosão/incrustação; dependência de água; inspeções sanitárias
VRF	12–15 anos	Compressores inverter, placas eletrônicas, sensores	Modularidade favorece continuidade; exige mão de obra especializada

Fonte: Elaboração própria.

Nota: valores podem variar conforme fabricantes, regime de operação, condições ambientais e qualidade da manutenção.

Embora o VRF apresente menor vida útil média, sua modularidade reduz o impacto operacional de falhas e aumenta a confiabilidade em regime contínuo de uso corporativo.

4.3.5 Custos indiretos e benefícios complementares

Além dos aspectos financeiros diretos, o sistema VRF proporciona benefícios indiretos significativos, tais como:

- a) Eliminação do consumo de água para rejeição térmica;
- b) Eliminação de risco sanitário associado a torres de resfriamento (*Legionella*);
- c) Redução de ruído e ocupação de áreas técnicas;
- d) Menor impacto ambiental e maior alinhamento a práticas ESG;
- e) Aumento do valor patrimonial do edifício por modernização de sistemas.

Esses elementos reforçam a relevância da substituição do sistema existente mesmo em cenários com retorno financeiro de longo prazo.

4.4 *Payback* simples e viabilidade econômica

O método de *Payback* Simples foi adotado para estimar o tempo necessário para retorno do investimento referente ao *retrofit* do sistema de climatização. Como fundamentado no Capítulo 3, esse método consiste na razão entre o investimento total e a economia anual proporcionada pela intervenção, sendo amplamente utilizado em análises preliminares de eficiência energética.

O custo total estimado para substituição do sistema *Self-Contained* por VRF, incluindo desmontagem, infraestrutura e aquisição dos equipamentos, é de aproximadamente R\$ 14.804.000,00. A economia anual obtida exclusivamente pela redução do consumo de energia elétrica foi estimada em R\$ 479.100,00/ano, conforme apresentado no item 4.2. Assim, o *Payback* simples considerando apenas economia energética é dado por:

$$\textit{Payback Simples} = \frac{R\$14.804.000,00}{R\$479.100,00} \equiv 30,9 \text{ ANOS} \quad (18)$$

Entretanto, decisões sobre *retrofit* de sistemas HVAC geralmente extrapolam a perspectiva energética. Dado que os sistemas *Self-Contained* com torre de resfriamento possuem custos operacionais adicionais associados ao consumo de água, tratamento químico, manutenção mecânica e inspeções sanitárias, também foi incluída na análise a economia potencial com manutenção e operação.

Com base nos valores estimados de OPEX anuais apresentados no item 4.3.3, a economia adicional com manutenção pode variar entre -R\$ 25 mil/ano (cenário pessimista) e R\$ 405 mil/ano (cenário otimista), com um cenário base de R\$ 190 mil/ano. A Tabela 13 apresenta o resumo dos cenários avaliados.

Tabela 13 - Cenários de *Payback* considerando energia e manutenção

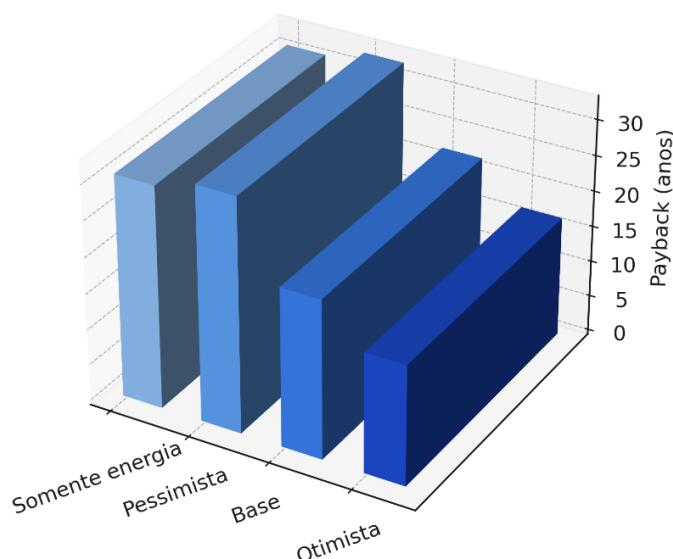
Cenário	Economia Anual (R\$)	<i>Payback</i> (anos)
Somente energia	R\$ 479.100	30.9
Pessimista	R\$ 454.100	32.6
Base	R\$ 669.100	22.1
Otimista	R\$ 884.100	16.7

Fonte: Elaboração própria.

Ou seja, a consideração dos custos operacionais altera significativamente o retorno do investimento, especialmente quando os custos associados à torre de resfriamento e ao tratamento de água são relevantes.

A Figura 2 ilustra, em formato gráfico, o comportamento do *Payback* para cada cenário de economia.

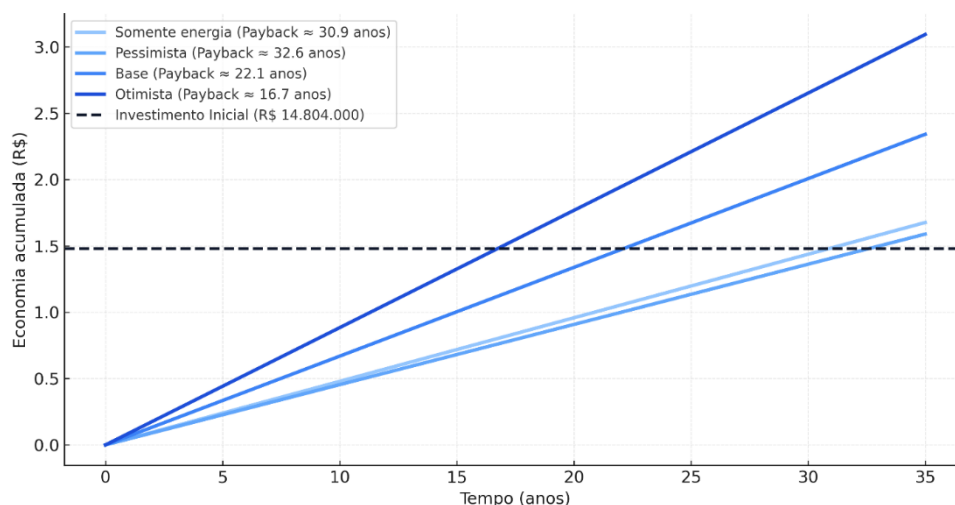
Figura 2 - *Payback* (anos) – Cenários de Economia VRF x CAC



Fonte: Elaboração própria.

Além disso, a Figura 3 apresenta a evolução da economia acumulada ao longo dos anos, destacando o ponto de equilíbrio financeiro no cenário base e nos extremos de análise.

Figura 3 - Economia acumulada ao longo do tempo (VRFxCAC) – Payback com energia + manutenção



Fonte: Elaboração própria.

A figura apresenta a evolução da economia acumulada em função do tempo considerando os cenários avaliados: somente economia de energia, cenário pessimista, cenário base e cenário otimista. A linha tracejada representa o investimento inicial total do *retrofit* (R\$ 14.804.000,00), permitindo identificar visualmente o ponto de equilíbrio financeiro para cada condição.

Embora o *Payback* simples ainda se mantenha elevado, especialmente quando considerado apenas o consumo energético, a evolução dos custos operacionais e dos requisitos normativos relacionados à qualidade sanitária reforçam a relevância e necessidade do *retrofit*. Benefícios como eliminação do risco sanitário associado à *Legionella*, redução do consumo hídrico, modularidade do VRF, menor emissão de ruído e alinhamento às diretrizes ESG constituem elementos determinantes na decisão de investimento, indo além da análise estritamente financeira.

Ressalta-se que, embora a metodologia de *Payback* simples seja adequada para avaliação preliminar, uma análise mais robusta, considerando métricas como Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR), poderia oferecer maior precisão financeira, sendo recomendada para estudos avançados ou tomada de decisão corporativa.

4.5 Discussão dos resultados

4.5.1 Análise técnica e desempenho energético

A partir das análises técnicas realizadas, verifica-se que o sistema VRF apresentou desempenho superior em relação ao sistema *Self-Contained* com condensação a água, sobretudo no que se refere ao consumo energético. A economia anual estimada do novo sistema foi de aproximadamente 456.300 kWh/ano, evidenciando a maior eficiência da tecnologia VRF na modulação e ajuste de carga térmica.

Tal desempenho é atribuído à arquitetura inverter dos compressores e ao controle individualizado dos circuitos frigoríficos, permitindo operação em regime parcial com elevada eficiência. Esse comportamento é particularmente relevante em

edifícios corporativos, onde a ocupação e o uso dos ambientes variam ao longo do dia, tornando o VRF mais adequado ao perfil dinâmico de carga térmica verificado.

Em contraste, o sistema *Self-Contained* opera com maior rigidez operacional, demandando acionamento contínuo de componentes como bombas hidráulicas e ventiladores, além de apresentar menor flexibilidade de modulação. Dessa forma, os resultados confirmam ganhos consistentes de performance energética com o *retrofit*, alinhados às tendências de eficiência estabelecidas para edificações comerciais de médio e alto padrão.

4.5.2 Avaliação econômica e operacional

A análise econômica demonstra que, considerando exclusivamente a economia de energia elétrica, o tempo de retorno do investimento (*Payback* simples) foi estimado em aproximadamente 31 anos. Contudo, ao incorporar a economia potencial associada à redução de custos de manutenção — resultante da eliminação das torres de resfriamento, dos sistemas de bombeamento e do tratamento químico de água — o *payback* passa a variar entre 16 e 22 anos nos cenários mais realistas.

Embora ainda seja um horizonte de retorno de longo prazo, a redução significativa no custo operacional anual torna o sistema VRF economicamente mais competitivo ao longo do ciclo de vida do equipamento. Vale destacar que o sistema *Self-Contained* possui demanda contínua de atividades de manutenção complexa, enquanto o VRF, apesar de exigir mão de obra especializada e reposição eventual de componentes eletrônicos, apresenta menor dependência de insumos e menor exposição a falhas sistêmicas.

Assim, a decisão de *retrofit* não se respalda exclusivamente na economia direta de energia, mas sim em um conjunto de fatores operacionais e estratégicos que reforçam a viabilidade e competitividade da modernização proposta.

4.5.3 Considerações operacionais, ESG e modernização do ativo

Para além dos indicadores econômicos e energéticos, os resultados reforçam a relevância da modernização do sistema de climatização sob uma perspectiva operacional e estratégica do edifício. A eliminação da torre de resfriamento resulta na supressão total do consumo de água para rejeição térmica, eliminando custos recorrentes e reduzindo significativamente riscos sanitários associados à proliferação de *Legionella*, tema de crescente atenção regulatória e de saúde pública.

A modularidade do sistema VRF constitui outro ponto de destaque, assegurando maior continuidade de operação e reduzindo a probabilidade de indisponibilidade ampla do sistema em caso de falhas localizadas. Esse comportamento contribui para maior confiabilidade do empreendimento e menor impacto nas rotinas corporativas dos usuários.

Do ponto de vista de sustentabilidade e governança, a substituição tecnológica alinha o edifício às práticas ESG, reforçando critérios ambientais e de eficiência energética e elevando o valor do ativo perante o mercado. A liberação de áreas técnicas, a redução de ruído e a diminuição da complexidade operacional contribuem para um ambiente corporativo mais eficiente, seguro e adequado às exigências atuais de edificações empresariais.

Portanto, embora o retorno financeiro direto apresente horizonte estendido, a análise integrada evidencia que os benefícios energéticos, operacionais e estratégicos

justificam o *retrofit* em empreendimentos de perfil corporativo que buscam modernização, eficiência e mitigação de riscos operacionais.

4.6 Limitações do estudo e interpretação dos resultados

Apesar dos resultados apresentados demonstrarem benefícios técnicos, operacionais e ambientais na substituição do sistema *Self-Contained* com condensação a água pelo sistema VRF, algumas limitações inerentes ao escopo deste estudo devem ser consideradas para a correta interpretação das conclusões.

Primeiramente, os valores de consumo energético foram obtidos com base em dados de catálogo, condições de projeto e parâmetros teóricos consolidados na literatura técnica. Embora esses dados sejam representativos e amplamente utilizados em avaliações preliminares, não refletem medições reais de operação do edifício. Conseqüentemente, eventuais variações de carga térmica, flutuações de ocupação e comportamento dinâmico do sistema ao longo de diferentes condições climáticas podem resultar em desvios entre os valores estimados e o desempenho real em campo.

Além disso, os custos de manutenção adotados foram estimados com referência a valores médios praticados no mercado para sistemas equivalentes, considerando provisões e escopo típico de contratos prediais. No entanto, a ausência de dados históricos detalhados de manutenção do edifício analisado limita a precisão da comparação econômica. Fatores como regimes específicos de manutenção, condições de uso, qualidade da água e vida útil residual dos equipamentos existentes podem influenciar significativamente os custos operacionais e o período de retorno financeiro.

A análise econômica utilizou o método de *payback* simples, adequado para comparações objetivas e estudos técnicos iniciais, mas que não considera a atualização monetária ao longo do tempo, a evolução de tarifas energéticas, o custo do capital, incentivos fiscais ou benefícios financeiros indiretos. Dessa forma, o período de retorno indicado representa uma aproximação conceitual, e não uma previsão financeira detalhada.

Por fim, o estudo não contemplou medições de conforto térmico, ruído, controle operacional e percepção dos usuários, aspectos que, embora qualitativos, podem influenciar a tomada de decisão em empreendimentos corporativos. Apesar dessas limitações, os resultados obtidos demonstram de forma consistente tendências operacionais e econômicas que reforçam a atratividade do sistema VRF como solução contemporânea para *retrofit* de edifícios comerciais, especialmente em contextos em que eficiência, confiabilidade e conformidade ambiental são fatores estratégicos.

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões gerais

Este estudo avaliou a substituição do sistema de climatização existente, baseado em unidades *Self-Contained* com condensação a água, por um sistema VRF em um edifício corporativo em São Paulo. Os resultados demonstraram que o sistema VRF apresenta ganhos relevantes de eficiência energética, com redução anual estimada de aproximadamente 456.300 kWh, além de vantagens operacionais como eliminação de torre de resfriamento, bombas hidráulicas, tratamento de água e maior simplicidade de manutenção.

Entretanto, a análise econômica evidencia que, quando considerada apenas a economia de energia, o *payback* simples tende a 31 anos, superior à vida útil típica do sistema VRF, o que pode tornar o *retrofit* financeiramente desfavorável se avaliado isoladamente. Quando incluídas as economias com manutenção e operação, o retorno estimado reduz-se para 16 a 22 anos, aproximando-se do ciclo de vida do equipamento e tornando o investimento mais razoável em uma análise ampliada.

Diante disso, recomenda-se que, antes da adoção da solução VRF, seja realizada uma avaliação detalhada do sistema existente, baseada em medições reais e diagnóstico operacional. Essa etapa pode identificar alternativas de modernização parcial do sistema atual, capazes de proporcionar ganhos relevantes com investimento inferior, o que pode representar cenário econômico mais favorável para o empreendimento.

Em síntese, o sistema VRF apresenta benefícios técnicos e energéticos relevantes, porém sua viabilidade econômica depende de uma análise baseada no ciclo de vida e nas condições reais de operação do edifício. Recomenda-se, portanto, uma avaliação detalhada do sistema existente, com medições reais e estudo do perfil de ocupação e uso, antes da decisão de implantação. Em alguns cenários, intervenções de modernização parcial no sistema atual podem proporcionar melhorias significativas com investimento menor, tornando-se uma alternativa economicamente mais favorável dependendo das características do empreendimento. A substituição poderá ser vantajosa em edifícios com alta demanda térmica contínua, espaços limitados para infraestrutura de água e foco em modernização com metas ESG.

5.2 Principais contribuições do estudo

As contribuições deste trabalho podem ser sintetizadas como:

- a) Demonstração técnica fundamentada da viabilidade do *retrofit* de sistemas de água de condensação para sistemas VRF em edifícios comerciais de alto padrão.
- b) Apresentação de metodologia comparativa para avaliação energética entre sistemas HVAC.
- c) Quantificação dos ganhos energéticos e operacionais proporcionados pelo sistema VRF.
- d) Integração de aspectos econômicos, energéticos e operacionais na análise comparativa.
- e) Reforço da importância de critérios de eficiência, sustentabilidade e segurança sanitária em decisões de modernização predial.

5.3 Recomendações para aplicação prática

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se:

- a) Realização de medições reais de consumo energético do sistema existente antes da implementação definitiva de *retrofit*.
- b) Planejamento da implantação em etapas, minimizando impactos às operações do edifício.
- c) Capacitação técnica da equipe de manutenção para operação eficiente do sistema VRF.

- d) Implementação de programa contínuo de manutenção preventiva e monitoramento energético.
- e) Avaliação de soluções complementares, como automação predial integrada e ventilação controlada por demanda (VCD), visando maximização da eficiência energética global.

5.4 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se aprofundar o tema nas seguintes direções:

- a) Estudos experimentais com medições em campo para validação dos resultados teóricos.
- b) Simulações energéticas avançadas via softwares como *EnergyPlus*, *DesignBuilder* ou Trane TRACE.
- c) Análise de alternativas híbridas (VRF + água gelada / VRF + *fan coil*).
- d) Avaliação de impactos na qualidade do ar interior e conforto térmico dos usuários.
- e) Estudos econômico-financeiros avançados considerando VPL, TIR e cenários tarifários futuros.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos as nossas famílias por todo o apoio que nos deram durante todo o decorrer do curso. Aos nossos professores por nos passarem seus conhecimentos e nos tornarem aptos e capacitados para a profissão de Engenheiro Mecânico. A Deus por esta oportunidade e a todos os nossos colegas que estiveram presentes ao longo do curso, pela convivência e bons momentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401: Instalações de ar-condicionado — sistemas centrais e unitários**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ABRAVA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO. **VRF x Água Gelada: Concorrentes ou complementares?** Revista ABRAVA – Climatização & Refrigeração, São Paulo, ano IX, n. 121, p. 24-29, abr. 2024. Disponível em: <<https://abrava.com.br/wp-content/uploads/2024/04/Abril-de-2024.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2025.

AIR-CONDITIONING, HEATING, AND REFRIGERATION INSTITUTE. **AHRI Standard 1230-2023 (I-P) ICS: Performance Rating of Variable Refrigerant Flow (VRF) Multi-Split Air-Conditioning and Heat Pump Equipment**. Arlington: AHRI, 2023. Disponível em: <<https://www.ahrinet.org/system/files/2024-09/AHRI%20Standard%201230-2023%20%28I-P%29%20ICS.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2025.

ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2022: Energy Standard for Sites and Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. Atlanta: ASHRAE, 2022.

ASHRAE. **ASHRAE Handbook — Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment (SI Edition)**. [S.l.: s.n.], (2012). Disponível em: <<https://azaranstore.com/wp-content/uploads/2022/09/144-2012-ASHRAE-Handbook-Heating-Ventilating-and-Air-Conditioning-Systems-and-Equipment-SI-Edition.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2025.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanco Energético Nacional (BEN)**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanconergetico-nacional-ben>>. Acesso em: 22 out. 2025.

GIBRAIL, Ricardo Santos Dias. **Memorial descritivo (R2): sistema de ar-condicionado central – Centro Empresarial Mário Garnero (retrofit de climatização)**. Brasília, Maio, 2024. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1fY4annTFMoKXPk1EI0RgdOAFfN_gxGs9/view>. Acesso em: 31 out. 2025.

HITACHI. **Catálogo Técnico — Condensadoras VRF linha AirTech 365, 12HP**. [s.l. s.n.] Rev: Março, 2025. Disponível em: <https://tyco.widen.net/content/jkutg7ojxa/pdf/HCAT-VRFAR003_air365-Tech.pdf?u=oknhak>. Acesso em: 31 out. 2025.

HITACHI. **Catálogo Técnico — Unidades Evaporadoras Série RVT (Splitão Série E7)**. [s.l. s.n.] Rev: Abril, 2014. Disponível em: <https://www.jci-hitachi.com.br/static/site/files/IHMUS-RVTAR001_Rev01_Abr2014_Split%C3%A3o_S%C3%A9rie_E7.pdf>. Acesso em: 31 out. 2025.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás/PROCEL, 2014.

SOUZA, Welder Boeno de. **Comparação entre dois sistemas de ar-condicionado para um prédio histórico**. 2010. 121 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/27745/000766505.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> . Acesso em: 22 out. 2025.

TRANE. **Catálogo Técnico — Condicionadores de Ar Central tipo “Self-Contained” Genius e Diamond**. [s.l. s.n.]. Novembro, 2015. Disponível em: <[https://www.trane.com.br/content/dam/Trane/Commercial/lar/br/produtos-sistemas/equipamentos/Unitarios/Self_Containeds/Genius/Cat%C3%A1logo_IOM-Genius-Diamond\(PKG%20SVN002G%20PT\).pdf](https://www.trane.com.br/content/dam/Trane/Commercial/lar/br/produtos-sistemas/equipamentos/Unitarios/Self_Containeds/Genius/Cat%C3%A1logo_IOM-Genius-Diamond(PKG%20SVN002G%20PT).pdf)>. Acesso em: 31 out. 2025.