v7.n11.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

DESEMPENHO TÉCNICO-ECONÔMICO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE SISTEMAS VRF E GHP EM EDIFICAÇÕES NO CLIMA EQUATORIAL DE MANAUS

TECHNO-ECONOMIC PERFORMANCE AND SENSITIVITY ANALYSIS OF VRF AND GHP SYSTEMS IN BUILDINGS UNDER THE EQUATORIAL CLIMATE OF MANAUS

DESEMPEÑO TÉCNICO-ECONÓMICO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE SISTEMAS VRF Y GHP EN EDIFICACIONES EN EL CLIMA ECUATORIAL DE MANAUS

Emerson Pires de Souza Neto[1], João D'Anuzio Lima de Azevedo[2], José Ramón Hechavarría Pérez[3]

e7119532

https://doi.org/10.47820/recima21.v7i11.9532

PUBLICADO: 11/2026

RESUMO

Impulsionado pelo clima quente e úmido de Manaus, este estudo compara o desempenho técnico e econômico de sistemas de Bomba de Calor a Gás (GHP) e de Fluxo de Refrigerante Variável (VRF) em edificações residenciais e comerciais. A metodologia incluiu simulação horária de carga térmica, dimensionamento dos sistemas, análise do custo do ciclo de vida de 10 anos utilizando o Valor Presente Líquido (VPL) e análise de sensibilidade da Taxa Mínima de Atratividade (TMA), variando de 8% a 15% ao ano. Os resultados mostraram que, embora o GHP seja tecnicamente viável, o VRF alcançou desempenho econômico superior em todas as tipologias, com os custos do GHP superando os do VRF em mais de 100% nas aplicações comerciais. Mesmo assumindo custo zero para o gás natural, o GHP não atingiu paridade financeira com o VRF devido ao seu maior investimento inicial e aos seus maiores custos de manutenção. Esses achados indicam que os sistemas GHP enfrentam severas limitações econômicas em climas equatoriais sem demanda de aquecimento.

PALAVRAS-CHAVE: Ar-condicionado. Eficiência energética. Viabilidade técnico-econômica. Sistemas VRF. Sistemas GHP.

ABSTRACT

Driven by the hot and humid climate of Manaus, this study compares the technical and economic performance of Gas Heat Pump (GHP) and Variable Refrigerant Flow (VRF) systems in residential and commercial buildings. The methodology included hourly thermal load simulation, system sizing, a 10-year life cycle cost analysis using Net Present Value (NPV), and a sensitivity analysis with the Minimum Attractive Rate (MAR) ranging from 8% to 15% per year. The results showed that, although GHP is technically feasible, VRF achieved superior economic performance across all building types, with GHP costs exceeding those of VRF by more than 100% in commercial applications. Even assuming zero natural gas costs, GHP did not achieve financial parity with VRF due to its higher initial investment and higher maintenance costs. These findings indicate that GHP systems face severe economic limitations in equatorial climates without heating demand.

KEYWORDS: *Air conditioning. Energy efficiency. Techno-economic feasibility. VRF systems. GHP systems.*

[1] Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade do Estado do Amazonas (UEA), com atuação em climatização, refrigeração e inspeção de equipamentos.

[2] Doutor em Ciência e Tecnologia de Materiais pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), com atuação em Engenharia Térmica.

[3] Doutor em Ciências Técnicas pelo Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, com atuação em Engenharia de Manutenção, Tribologia e Processos de Fabricação.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

RESUMEN
Impulsado por el clima cálido y húmedo de Manaus, este estudio compara el desempeño técnico y económico de sistemas de Bomba de Calor a Gas (GHP) y de Flujo de Refrigerante Variable (VRF) en edificaciones residenciales y comerciales. La metodología incluyó simulación horaria de carga térmica, dimensionamiento de los sistemas, análisis del costo del ciclo de vida de 10 años utilizando el Valor Presente Neto (VPN) y análisis de sensibilidad de la Tasa Mínima Atractiva (TMA), con valores entre el 8% y el 15% anual. Los resultados mostraron que, aunque el GHP es técnicamente viable, el VRF alcanzó un desempeño económico superior en todas las tipologías, con costos del GHP que superaron los del VRF en más del 100% en las aplicaciones comerciales. Incluso suponiendo un costo cero para el gas natural, el GHP no alcanzó la paridad financiera con el VRF debido a su mayor inversión inicial y a sus mayores costos de mantenimiento. Estos hallazgos indican que los sistemas GHP enfrentan severas limitaciones económicas en climas ecuatoriales sin demanda de calefacción.

PALABRAS CLAVE*: Aire acondicionado. Eficiencia energética. Viabilidad técnico-económica. Sistemas VRF. Sistemas GHP.*

INTRODUÇÃO

O clima quente e úmido de Manaus, associado ao crescimento urbano e à expansão das edificações residenciais e comerciais, tem intensificado a demanda por sistemas de climatização. Esse cenário contribui para o aumento do consumo de energia elétrica e torna a escolha do sistema de condicionamento de ar um fator relevante para o desempenho energético e econômico das edificações. Estudos sobre o desempenho térmico e o comportamento climático urbano em Manaus destacam que as condições locais, marcadas por elevadas temperaturas e alta umidade relativa, exigem estratégias adequadas de condicionamento ambiental (Pereira *et al.*, 2025).

No contexto local, a discussão sobre eficiência energética em climatização está associada tanto às características climáticas quanto às condições energéticas da região. Estudos sobre a questão energética no Amazonas apontam desafios relacionados ao suprimento de energia e à necessidade de diversificação da matriz regional (Baggio; Moura, 2018). Embora o Amazonas disponha de gás natural proveniente da Bacia do Solimões, a climatização de edificações em Manaus ainda é predominantemente baseada em sistemas elétricos. Dessa forma, torna-se necessário avaliar se tecnologias acionadas a gás natural podem representar uma alternativa técnica e economicamente competitiva em relação às soluções elétricas já consolidadas, especialmente em edificações residenciais e comerciais.

Entre as tecnologias aplicáveis a edificações com múltiplas zonas térmicas, destacam-se os sistemas *Variable Refrigerant* Flow (VRF) e *Gas Heat Pump* (GHP). Os sistemas VRF utilizam compressores elétricos, geralmente associados à tecnologia inverter, permitindo a modulação da capacidade conforme a demanda térmica dos ambientes. Essa característica

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

favorece a operação em carga parcial e o controle individualizado das zonas climatizadas, aspectos associados ao melhor desempenho energético dessa tecnologia em diferentes aplicações (Costa *et al.*, 2018; Rosa; Lopes, 2022). Duarte *et al.* (2020) compararam sistemas VAV e VRF em uma edificação comercial brasileira, demonstrando a importância de análises comparativas padronizadas para avaliar o desempenho energético de sistemas de climatização.

Os sistemas GHP, por sua vez, utilizam motor de combustão interna alimentado por gás natural ou gás liquefeito de petróleo para acionar o compressor do ciclo de refrigeração. Essa configuração reduz a demanda elétrica direta e permite o aproveitamento do calor residual do motor em aplicações com demanda térmica simultânea. Revisões indicam que a eficiência global desses sistemas depende intimamente da integração entre motor, compressor e, sobretudo, a recuperação de calor (Pawela; Jaszczur, 2022).

No entanto, a viabilidade técnica e a eficiência de operação dessas duas tecnologias sofrem forte influência das condições de contorno climáticas. Em climas equatoriais, a demanda térmica é predominantemente voltada ao resfriamento sensível e à desumidificação, com ausência quase total de necessidade de aquecimento. A literatura evidencia que sistemas GHP tendem a apresentar degradação expressiva do coeficiente de performance (COP) em regimes de carga parcial prolongada quando não há o aproveitamento do calor residual do motor de combustão, cenário típico de Manaus (Farghali *et al.*, 2023). Em contrapartida, os sistemas VRF acionados por compressores inverter demonstram maior resiliência termodinâmica e eficiência no ajuste dinâmico do PLR em zonas com alta variabilidade térmica e elevados índices de umidade (Zha *et al.*, 2025).

Outros estudos observaram que a escolha entre as tecnologias depende fortemente dos preços relativos das fontes energéticas e do perfil de demanda (Escrivà *et al.*, 2021). Apesar das constatações termodinâmicas no cenário internacional, a disponibilidade de gás natural na Bacia do Solimões gera uma expectativa regional de viabilidade que carece de comprovação.

Diante dessa lacuna, este artigo tem como objetivo comparar a viabilidade técnico-econômica de sistemas GHP e VRF aplicados a edificações residenciais e comerciais em Manaus. A análise considera a simulação da carga térmica horária, o dimensionamento, as limitações de desempenho em carga parcial e os custos operacionais, utilizando o Valor Presente Líquido (VPL) em um horizonte de 10 anos. A contribuição central consiste em fornecer subsídios técnicos e econômicos robustos para reduzir as incertezas do setor de engenharia de AVAC-R quanto à real competitividade dos sistemas a gás natural frente às soluções elétricas em climas quentes e úmidos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1. METODOLOGIA

1.1. Tipologia dos Projetos

A análise comparativa foi aplicada em seis edificações reais cedidas por uma empresa de engenharia local: três edificações residenciais de alto padrão e três edificações comerciais (supermercados), como mostra a Tabela 1, com diferentes áreas totais brutas. A seleção das plantas visou representar uma amostra diversificada, abrangendo diferentes faixas de demanda e complexidade (pequeno, médio e grande porte) em Manaus.

Tabela 1. Áreas por tipologias e padrões

Tipologia	Padrão	Área Climatizada (m^2)	Área Bruta (m^2)
Residencial	Padrão 1	116,3	215,7
	Padrão 2	228,9	295,9
	Padrão 3	197,6	459,3
Comercial	Padrão 1	1130,5	1650,7
	Padrão 2	1359,6	2711,9
	Padrão 3	2495,9	3164,9

Fonte: Autor (2026).

Para padronizar as simulações termodinâmicas no software TRACE 700™ (*Trane Air Conditioning Economics*), adotou-se a mesma caracterização da envoltória para todas as edificações analisadas. As vedações verticais externas foram modeladas como alvenaria de tijolos comuns, com revestimento argamassado em ambas as faces e câmara de ar, totalizando 254 mm de espessura, massa superficial de 485,0 kg/m², absortância solar de 0,90 e transmitância térmica de 1,450 W/(m²·K). A cobertura foi padronizada com telha metálica (0,853 mm) e forro de placa de gesso (12,7 mm), separados por uma câmara de ar, apresentando massa superficial de 16,9 kg/m², absortância solar de 0,90 e transmitância térmica de 2,389 W/(m²·K).

1.2. Cálculo de carga térmica

A estimativa da carga térmica horária mensal para cada edificação utilizou o *software* TRACE 700™. O uso da ferramenta viabilizou a obtenção dos dados apresentados nesta pesquisa, garantindo resultados em conformidade com os parâmetros da norma vigente NBR 16401:2024 e com o padrão internacional ANSI/ASHRAE/IES *Standard* 90.1-2025.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

As simulações consideraram as variáveis geográficas e climáticas do Aeroporto Internacional Eduardo Gomes, Manaus, conforme dados da NBR 16401-1:2024. Adotaram-se os seguintes parâmetros internos de projeto para garantir a precisão dos cálculos:

- Temperatura de Bulbo Seco (TBS): 24 °C
- Umidade Relativa (UR): 50%

A carga térmica de pico resultante dessas simulações serviu como base para o dimensionamento dos sistemas.

1.3. Dimensionamento dos Sistemas VRF e GHP

O dimensionamento dos sistemas VRF e GHP foi baseado nas cargas térmicas de pico de cada ambiente e realizado com o auxílio de software fornecido pelo próprio fabricante do equipamento.

- Unidades Internas: Foram padronizadas para cada tipologia. Em residências, utilizou-se a combinação de unidades *Hi-Wall* e Cassete 4 vias, enquanto em comércios, optou-se por unidades Duto de alta pressão.
- Unidades Externas: A capacidade total das unidades condensadoras foi dimensionada para atender à soma das cargas térmicas, considerando um fator de simultaneidade ajustado até 130%. Esta abordagem garante capacidade para suportar as demandas térmicas máximas em uso simultâneo. A infraestrutura frigorífica (tubulações) foi mantida idêntica para VRF e GHP.

A adoção de um índice de combinação (simultaneidade) superior a 100% justifica-se pela diversidade de ocupação das zonas climatizadas, alinhando-se às boas práticas de dimensionamento que consideram o perfil dinâmico de carga térmica em edifícios de múltiplos ambientes (Cardoso; Magalhães, 2018). Adicionalmente, para representar a operação real dos equipamentos, as simulações adotaram perfis de carga baseados nos horários de ocupação e utilização, conforme práticas recomendadas para aumentar a fidedignidade do desempenho energético estimado e permitir a otimização da capacidade nominal instalada, com consequente redução do investimento inicial (O'Brien *et al.*, 2019). Entretanto, o dimensionamento levou em conta as características do clima quente e úmido de Manaus. Em condições de elevada simultaneidade de demanda, o aumento da temperatura de evaporação do fluido refrigerante pode comprometer a capacidade dos terminais internos de remover calor latente. Para minimizar esse efeito e assegurar o controle higrotérmico requerido pela ABNT NBR 16401, as unidades evaporadoras foram selecionadas com fator de calor sensível compatível, garantindo a desumidificação adequada dos ambientes mesmo durante a operação da unidade condensadora em seu limite de modulação.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.4. Estimativa de Consumo

Com o dimensionamento das unidades condensadoras definido, fez-se necessário realizar o ajuste das curvas de consumo para ambos os tipos de sistemas GHP e VRF. O objetivo desse procedimento foi representar de forma mais precisa o comportamento do consumo de energia em função da carga parcial de operação, visto que a eficiência desses sistemas é altamente dependente do *Part Load Ratio* (PLR), conforme discutido por Pezzola, Danti e Magnani (2016).

Para os sistemas VRF, o próprio fabricante fornece os valores de consumo elétrico (kW) nas diferentes faixas de carga. No caso dos sistemas GHP, o consumo informado foi convertido para vazão de gás natural, utilizando a relação entre o Poder Calorífico Inferior (PCI) e o consumo nominal especificado para cada ponto de operação, conforme mostrado na Equação 1.

$$Pot = Q \cdot PCI \qquad \text{Eq. 1}$$

Onde:

- Pot = Potência térmica (kcal/h)
- Q = Vazão de combustível (m³/h)
- PCI = Poder Calorífico Inferior (kcal/m³)

O ajuste das curvas foi realizado utilizando um modelo matemático polinomial de sexto grau, uma vez que este modelo apresenta elevada capacidade de aderência aos dados disponibilizados. A escolha deste grau polinomial se justifica pelo comportamento não linear do consumo energético em função da carga parcial, sobretudo nas faixas extremas de operação (baixa e alta carga), onde ocorrem maiores variações no desempenho dos equipamentos.

As equações resultantes do ajuste para os sistemas GHP estão apresentadas na Tabela 2, enquanto as relativas aos sistemas VRF estão na Tabela 3.

Tabela 2. Equações de Ajuste do Consumo Energético (y) em Função da Carga Parcial (x) para o Sistema GHP

Capacidade da evaporadora	Equação do ajuste de curva	R^2
20 HP	$y = 2518{,}5x^6 - 12645x^5 + 25700x^4 - 27074x^3 + 15960x^2 - 4643{,}8x + 568{,}84$	0,9959
25 HP	$y = 3129{,}6x^6 - 15706x^5 + 31970x^4 - 33583x^3 + 19343x^2 - 5748{,}7x + 703{,}03$	0,9958

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

28 HP	$y = 3472{,}2x^6 - 17362x^5 + 35124x^4 - 36613x^3 + 21110x^2 - 6245{,}2x + 761{,}69$	0,9955
40 HP	$y = 4879{,}6x^6 - 24114x^5 + 49460x^4 - 51801x^3 + 29707x^2 - 8789{,}4x + 1071{,}9$	0,9957
64 HP	$y = 8703{,}7x^6 - 44301x^5 + 91657x^4 - 98812x^3 + 56861x^2 - 18157x + 2330{,}5$	0,9954

Fonte: Autor (2026).

Tabela 3. Equações de Ajuste do Consumo Energético (y) em Função da Carga Parcial (x) para o Sistema VRF

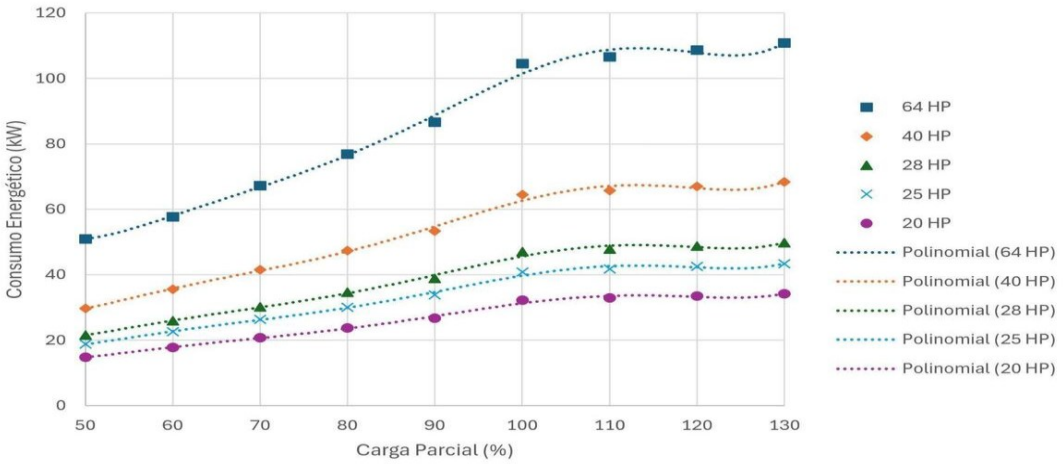
Capacidade da evaporadora	Equação do ajuste de curva	R^2
20 HP	$y = 2072{,}2x^6 - 11015x^5 + 23785x^4 - 26663x^3 + 16376x^2 - 5219{,}2x + 677{,}86$	0,9944
25 HP	$y = 1038{,}9x^6 - 5304{,}2x^5 + 10884x^4 - 11749x^3 + 6982{,}2x^2 - 1938{,}9x + 233{,}01$	0,9933
28 HP	$y = 1535{,}2x^6 - 7943{,}2x^5 + 16588x^4 - 17826x^3 + 10502x^2 - 3196{,}9x + 288{,}9$	0,9975
40 HP	$y = 1802{,}6x^6 - 9239{,}8x^5 + 19620x^4 - 20246x^3 + 11707x^2 - 3485x + 423{,}88$	0,9980
64 HP	$y = 2721{,}3x^6 - 13954x^5 + 28768x^4 - 30563x^3 + 17646x^2 - 5251{,}8x + 638{,}45$	0,9982

Fonte: Autor (2026).

As Figuras 1 e 2 apresentam, respectivamente, as curvas geradas a partir dessas equações.

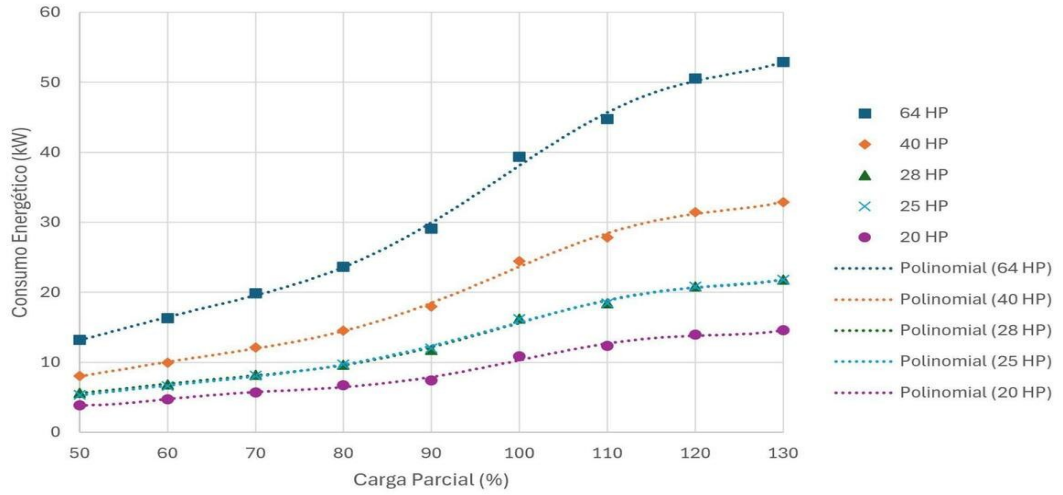
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Variação do consumo energético em função da carga parcial para sistemas GHP



Fonte: Autor (2026).

Figura 2. Variação do consumo energético em função da carga parcial para sistemas VRF



Fonte: Autor (2026).

Para avaliar a qualidade dos ajustes, foi utilizado o coeficiente de determinação (R^2), que expressa o grau de aderência do modelo aos dados observados. O valor de R^2 varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, maior é a capacidade da equação ajustada de explicar a variabilidade dos dados. Nos ajustes realizados, os valores de R^2 ficaram todos superiores a 0,993, indicando boa aderência dos modelos às curvas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A partir da obtenção dos valores de carga térmica horária, torna-se possível determinar o fator de carga parcial de cada edificação. Por conseguinte, essa correlação permite calcular o consumo energético horário de cada sistema (GHP e VRF) com maior fidedignidade, integrando as variações de demanda às curvas de desempenho previamente ajustadas.

1.5. Estimativa de custos

A estimativa de custos para um horizonte de 10 anos considerou equipamentos, materiais, mão de obra, operação e manutenção. Os custos operacionais basearam-se nas tarifas locais de energia elétrica e gás natural, conforme reguladas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Para maior precisão na simulação do consumo, realizou-se o ajuste da curva de consumo das unidades condensadoras dos sistemas VRF e GHP. Esse procedimento permitiu representar o consumo energético em função da carga parcial de operação dos equipamentos, com base em dados extraídos das fichas técnicas do fabricante. Para o ajuste, adotou-se um modelo matemático polinomial de sexto grau, o qual apresentou boa aderência aos dados analisados. O consumo de energia elétrica dos sistemas VRF foi comparado ao consumo de gás natural dos sistemas GHP, sendo este convertido em energia equivalente por meio do Poder Calorífico Inferior (PCI) do gás natural, adotado como 8.600 kcal/m³. Para a estimativa dos custos operacionais associados ao consumo de energia elétrica, foram utilizadas as tarifas vigentes aplicáveis à tipologia das edificações analisadas. Adicionalmente, os custos de instalação e manutenção considerados no estudo foram obtidos a partir de orçamentos levantados junto a fornecedores e empresas locais.

1.6. Análise de retorno econômico

O desempenho econômico dos sistemas foi avaliado por meio da métrica de Valor Presente Líquido (VPL) ao longo de 10 anos. O cálculo do VPL seguiu a Equação 2 e considerou os seguintes parâmetros:

$$VPL = \sum_{t=1}^{n} \frac{FC_t}{(1+i)t} + I_0 - \frac{VR}{(1+i)n} \qquad \text{Eq. 2}$$

Onde:

- I_0: Investimento Inicial
- FC_t: Fluxo de caixa no período t
- n: Vida útil do projeto (10 anos)

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

- i: Taxa de desconto ou TMA (80% da taxa Selic, principal taxa de juros brasileira, projetada para 2025)
- VR: Valor residual (adotado como 30% do custo do equipamento)

Esta análise, que considera a depreciação e o valor do dinheiro no tempo, foi utilizada para determinar a superioridade econômica do sistema mais vantajoso em Manaus.

1.7. Análise de sensibilidade econômica

Para avaliar a robustez das conclusões financeiras diante das oscilações macroeconômicas e da volatilidade do mercado energético ao longo do horizonte de 10 anos, foi realizada uma análise de sensibilidade paramétrica (Almeida *et al.*, 2022). De acordo com Tsvetkova e Ouarda (2021), essa etapa permitiu identificar o grau de vulnerabilidade do Valor Presente Líquido (VPL) em relação às variações no custo de oportunidade do capital e nas tarifas dos insumos energéticos. A avaliação adotou o método de variação paramétrica unitária, aplicando testes de condição-limite às tipologias de maior impacto, a fim de verificar a estabilidade da tomada de decisão.

Inicialmente, a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) foi submetida a oscilações em relação ao valor de referência adotado, contemplando um cenário de maior acessibilidade ao crédito e outro de encarecimento do capital. Na sequência, determinou-se analiticamente o ponto de equilíbrio tarifário, calculando-se a variação percentual no preço do gás natural e a consequente alteração no diferencial de preço entre eletricidade e gás, estritamente necessária para estabelecer a paridade do VPL entre os sistemas VRF e GHP. Esse procedimento buscou mapear as margens de segurança financeira e verificar sob quais condições de contorno a solução a gás natural poderia atingir competitividade econômica no clima de Manaus.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.1. Carga térmica mensal de Pico

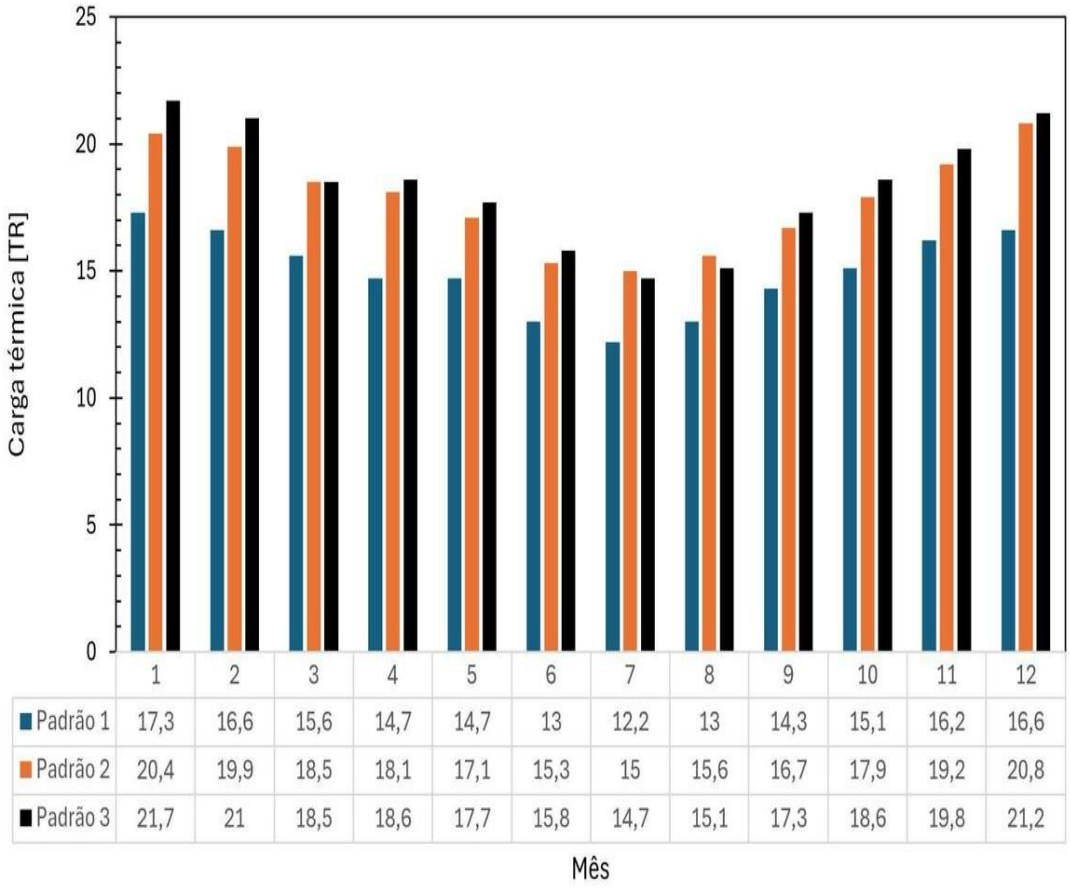
O cálculo da carga térmica das edificações é realizado em perfil horário para cada mês do ano, conforme a norma ABNT NBR 16401 e ANSI/ASHRAE/IES *Standard* 90.1-2025. Este procedimento permitiu armazenar a dinâmica da demanda térmica e fornecer dados precisos para o dimensionamento dos sistemas.

A Figura 3 exibe a carga térmica mensal de pico para o setor residencial, no qual a demanda variou de 17,3 TR (Padrão 1) a 21,7 TR (Padrão 3). Embora a variação ao longo dos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

meses seja menos acentuada, refletindo o uso mais constante, o Padrão 3 se mostrou o mais exigente, com cargas térmicas que são, em média, 39,3% superiores ao Padrão 1.

Figura 3. Carga térmica de pico de edificações residenciais



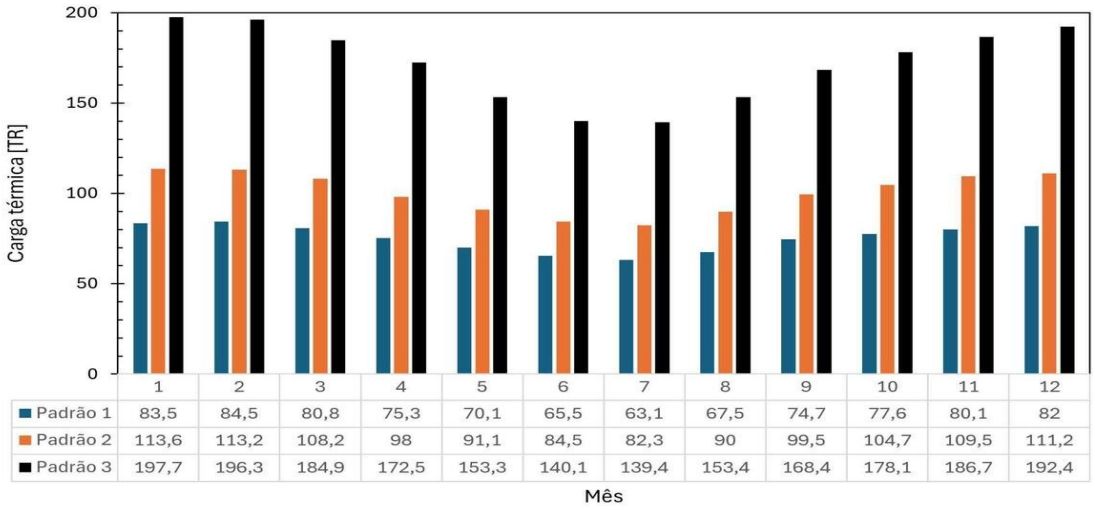
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Padrão 1	17,3	16,6	15,6	14,7	14,7	13	12,2	13	14,3	15,1	16,2	16,6
Padrão 2	20,4	19,9	18,5	18,1	17,1	15,3	15	15,6	16,7	17,9	19,2	20,8
Padrão 3	21,7	21	18,5	18,6	17,7	15,8	14,7	15,1	17,3	18,6	19,8	21,2

Fonte: Autor (2026).

Já a Figura 4 apresenta o comportamento da carga térmica para o setor comercial. O Padrão 3 neste setor registrou os maiores valores ao longo do ano, superando 190 TR nos meses de maior demanda, como janeiro, fevereiro e dezembro. No geral, o setor comercial demonstrou cargas significativamente superiores às residenciais. A demanda extrema de 197,8 TR no Padrão 3 Comercial, que representa um crescimento de 134% em relação ao Padrão 1, exigiu o dimensionamento mais robusto, configurando até cinco unidades condensadoras para ambas as tecnologias.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 4. Carga térmica de pico de edificações comerciais



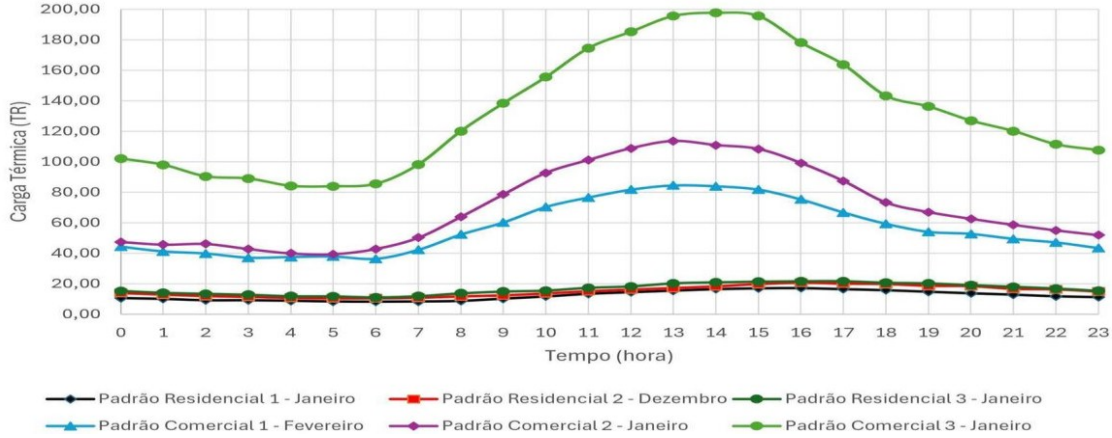
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Padrão 1	83,5	84,5	80,8	75,3	70,1	65,5	63,1	67,5	74,7	77,6	80,1	82
Padrão 2	113,6	113,2	108,2	98	91,1	84,5	82,3	90	99,5	104,7	109,5	111,2
Padrão 3	197,7	196,3	184,9	172,5	153,3	140,1	139,4	153,4	168,4	178,1	186,7	192,4

Fonte: Autor (2026).

2.2. Perfil diário de carga térmica

A simulação da carga térmica foi realizada considerando o perfil horário de operação das edificações ao longo de 12 meses. Esse perfil permite avaliar a variação da demanda térmica hora a hora, refletindo as influências das condições climáticas, ocupação e envelope construtivo. Para a construção da Figura 5, foram consideradas apenas as curvas correspondentes às cargas de pico das seis tipologias analisadas (três residenciais e três comerciais) para exemplificar o comportamento térmico diário de cada padrão.

Figura 5. Carga térmica de pico das edificações



Fonte: Autor (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Os valores máximos utilizados encontram-se na Tabela 4, que serviu de base para o traçado das curvas.

Tabela 4. Cargas Térmicas de pico por tipologia e planta

Tipologia	Planta	Carga térmica de pico (TR)
Residencial	Padrão 1	17,3
	Padrão 2	20,8
	Padrão 3	21,7
Comercial	Padrão 1	84,6
	Padrão 2	113,7
	Padrão 3	197,8

Fonte: Autor (2026).

Observa-se que as tipologias residenciais apresentam cargas mais baixas e relativamente estáveis, variando de 17,3 TR a 21,7 TR, enquanto as comerciais atingem valores significativamente superiores, entre 84,6 TR e 197,8 TR. Essa diferença está associada à maior densidade de ocupação, carga interna e ganho solar nas edificações comerciais (Amin *et al.*, 2020).

A comparação entre a Figura 5 e a Tabela 4 evidencia o aumento progressivo da carga térmica do Padrão 1 ao Padrão 3, tanto para o uso residencial quanto para o uso comercial, com picos concentrados entre 12h e 16h, período de maior incidência solar e atividade interna (Amin *et al.*, 2020).

2.3. Dimensionamento dos Sistemas VRF e GHP

O dimensionamento dos sistemas VRF e GHP foi executado com auxílio de *software* fornecido pelo fabricante, com base nas cargas térmicas de pico e manteve a equivalência técnica entre as soluções. A Tabela 5 detalha as configurações resultantes, demonstrando o aumento proporcional na capacidade das unidades e na quantidade de evaporadoras conforme a carga térmica se elevou.

Tabela 5. Detalhamento das unidades condensadoras e evaporadoras

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tipologia	Planta	Unidades condensadoras	Unidades evaporadoras
Residencial	Padrão 1	1 × 20 HP*	1 × HW – 19,1 kBtu/h; 2 × HW – 24,2 kBtu/h; 1 × HW – 30 kBtu/h; 1 × HW – 36 kBtu/h; 2 × K7 – 54,1 kBtu/h
	Padrão 2	1 × 25 HP	1 × HW – 12,3 kBtu/h; 1 × HW – 15,4 kBtu/h; 3 × HW – 30 kBtu/h; 3 × K7 – 19,1 kBtu/h; 3 × K7 – 54,1 kBtu/h
	Padrão 3	1 × 28 HP	1 × HW – 12,3 kBtu/h; 2 × HW – 15,4 kBtu/h; 1 × HW – 24,2 kBtu/h; 3 × K7 – 19,1 kBtu/h; 4 × K7 – 54,1 kBtu/h
Comercial	Padrão 1	2 × 64 HP	1 × D – 48 kBtu/h; 3 × D – 60 kBtu/h; 1 × D – 96 kBtu/h
	Padrão 2	1 × 40 HP; 2 × 64 HP	1 × D – 54 kBtu/h; 14 × D – 60 kBtu/h; 10 × D – 96 kBtu/h
	Padrão 3	1 × 25 HP; 4 × 64 HP	1 × D – 54 kBtu/h; 1 × D – 76 kBtu/h; 26 × D – 96 kBtu/h

* Nota: A unidade HP é tipicamente usada em sistemas VRF/GHP para diferenciá-los de outras tecnologias. As siglas D, HW e K7 referem-se a Duto, Hi-Wall e Cassete, respectivamente.
Fonte: Autor (2026).

2.4. Análises de custos

A análise de custos foi estruturada em três grupos principais: investimento inicial, custos operacionais anuais e custos de manutenção. Os valores foram determinados a partir das capacidades instaladas de cada tipologia, conforme o dimensionamento previamente definido. Para os custos operacionais, consideraram-se dois cenários tarifários: o Cenário (a), referente ao consumo de gás natural sem aproveitamento térmico, e o Cenário (b), que incorpora os benefícios associados à cogeração.

As tarifas de energia elétrica e gás natural seguiram os enquadramentos tarifários aplicáveis à cidade de Manaus, diferenciando-se entre os perfis residencial (Grupo B1) e comercial (Grupo A3/A3a). Os períodos de operação adotados refletem o uso típico de cada setor: das 20h às 07h para o residencial e das 07h às 22h para o comercial, abrangendo horários de ponta e fora de ponta conforme a modalidade Horária Azul.

As Tabelas 6 e 7 sintetizam os custos de investimento, consumo anual e manutenção para as seis tipologias analisadas. Observa-se a progressão dos custos totais em função do porte das edificações, tanto para o setor residencial quanto comercial, refletindo o aumento proporcional de capacidade instalada e carga térmica. Esses dados serviram de base para a etapa de avaliação econômica, na qual foram aplicados os indicadores de retorno e viabilidade financeira.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 6. Custos para as tipologias residenciais

Sistema	Planta	Investimento inicial	Custo de operação (a)	Custo de operação (b)	Custo de manutenção
GHP	Padrão 1	R$ 352.529,78	R$ 29.617,29	R$ 24.194,05	R$ 6.710,02
	Padrão 2	R$ 410.868,33	R$ 40.571,27	R$ 33.142,05	R$ 7.722,49
	Padrão 3	R$ 423.195,97	R$ 76.441,71	R$ 42.444,42	R$ 8.105,36
VRF	Padrão 1	R$ 207.503,15	R$ 23.437,08	R$ 23.437,08	R$ 3.141,59
	Padrão 2	R$ 241.814,28	R$ 22.613,12	R$ 22.613,12	R$ 3.778,70
	Padrão 3	R$ 289.016,72	R$ 24.173,35	R$ 24.173,35	R$ 4.823,30

*Custo operacional (a): para GHP, refere-se ao Residencial – Consumo Coletivo. *Custo operacional (b): para GHP, refere-se ao Comercial – Cogeração, Climatização e Geração Própria de Energia.
Fonte: Autor (2026).

Tabela 7. Custos para as tipologias comerciais

Sistema	Planta	Investimento inicial	Custo de operação (a)	Custo de operação (b)	Custo de manutenção
GHP	Padrão 1	R$ 1.384.931,37	R$ 285.704,26	R$ 241.188,89	R$ 30.205,78
	Padrão 2	R$ 1.891.409,31	R$ 316.729,10	R$ 264.497,89	R$ 42.696,68
	Padrão 3	R$ 3.084.482,59	R$ 608.559,22	R$ 510.769,67	R$ 71.898,29
VRF	Padrão 1	R$ 813.794,19	R$ 103.402,02	R$ 103.402,02	R$ 15.700,36
	Padrão 2	R$ 1.039.237,28	R$ 129.382,00	R$ 129.382,00	R$ 20.771,94
	Padrão 3	R$ 1.591.397,53	R$ 237.956,71	R$ 237.956,71	R$ 35.071,36

Fonte: Autor (2026).

2.5. Viabilidade econômica

A análise de viabilidade econômica foi conduzida com base no Valor Presente Líquido (VPL), considerando um horizonte de 10 anos e uma taxa de desconto equivalente a 80% da Selic projetada para 2025. Essa abordagem permitiu avaliar o desempenho financeiro dos sistemas de climatização em diferentes tipologias residenciais e comerciais, a partir dos custos de investimento, operação e manutenção previamente determinados.

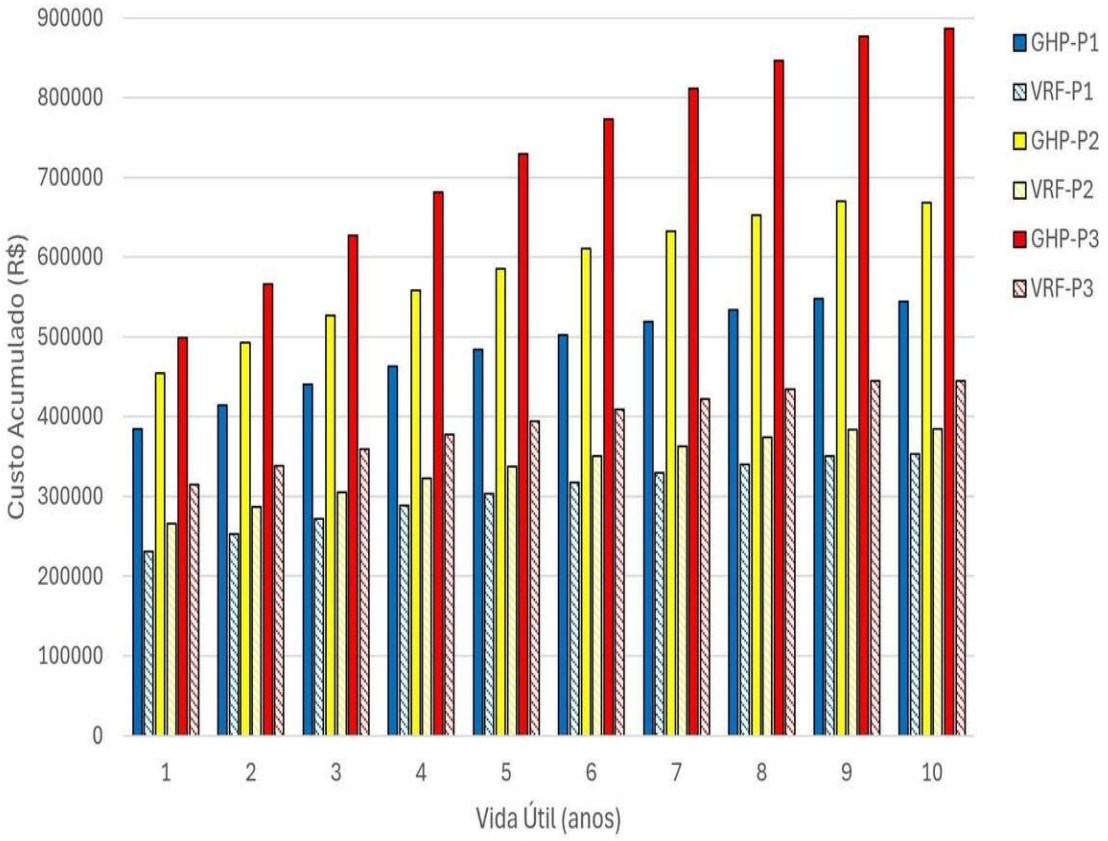
Foram avaliados dois cenários de custo operacional para o gás natural: o cenário (a), referente ao consumo convencional, e o cenário (b), associado às condições de cogeração, climatização e geração própria de energia. As Figuras 6 a 9 apresentam a evolução dos custos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

acumulados ao longo da vida útil dos sistemas, enquanto a Tabela 8 consolida os valores de VPL obtidos para cada sistema, tipologia e padrão de edificação.

No setor residencial, observa-se que o sistema VRF apresentou menor custo acumulado em todos os padrões analisados. No cenário (a), o sistema GHP apresentou VPLs superiores ao VRF em 54,20% para o Padrão 1, 74,00% para o Padrão 2 e 99,40% para o Padrão 3. No cenário (b), mesmo com condição tarifária mais favorável ao gás natural, as diferenças permaneceram elevadas, correspondendo a 45,45%, 63,03% e 85,57%, respectivamente. Esses resultados indicam que a redução no custo operacional do GHP não foi suficiente para alterar a tendência econômica observada no setor residencial.

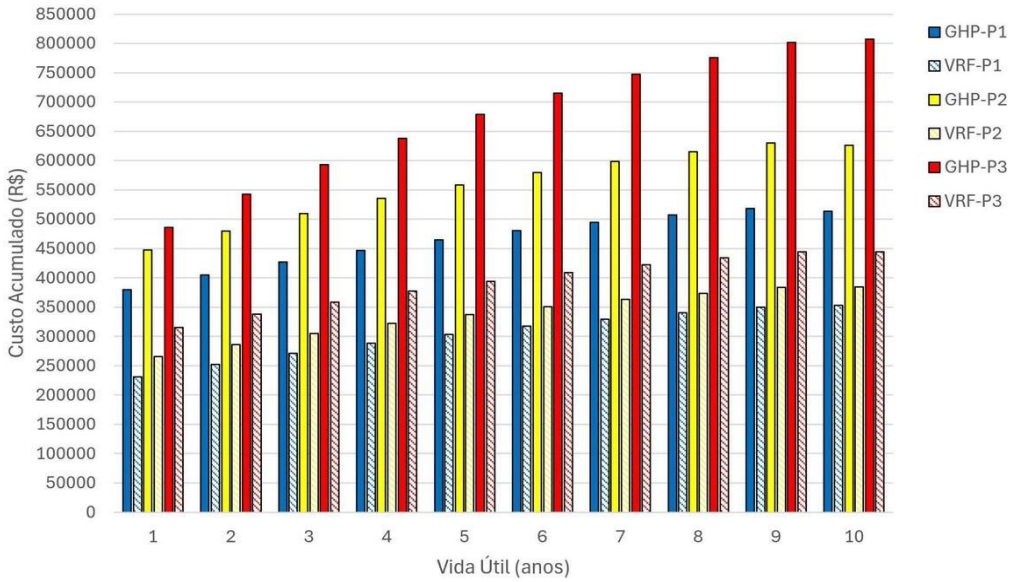
Figura 6. Comparativo de Custo acumulado entre sistemas GHP e VRF ao longo da vida útil - residencial (a).



Fonte: Autor (2026).

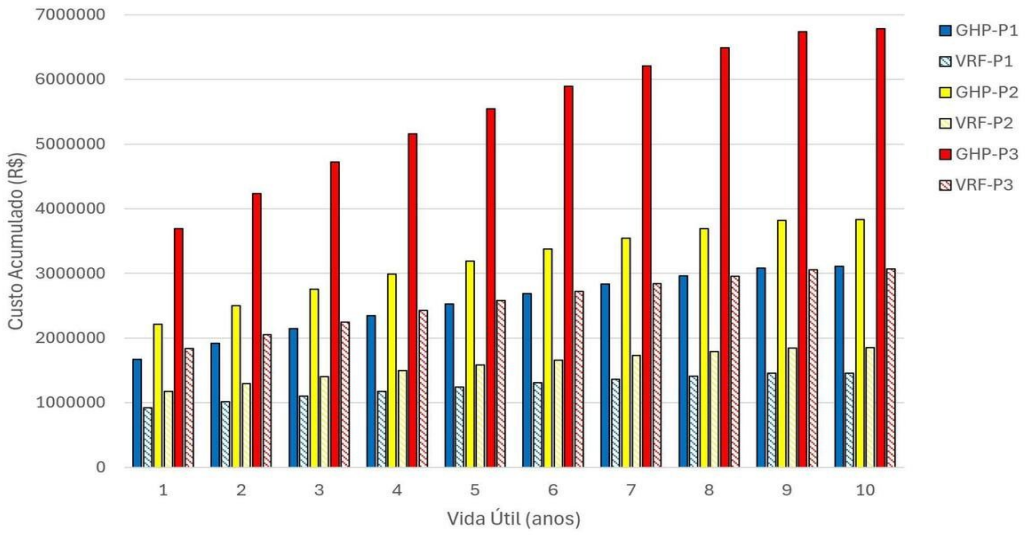
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 7. Comparativo de custo acumulado entre Sistemas GHP e VRF ao longo da vida útil - residencial (b).



Fonte: Autor (2026).

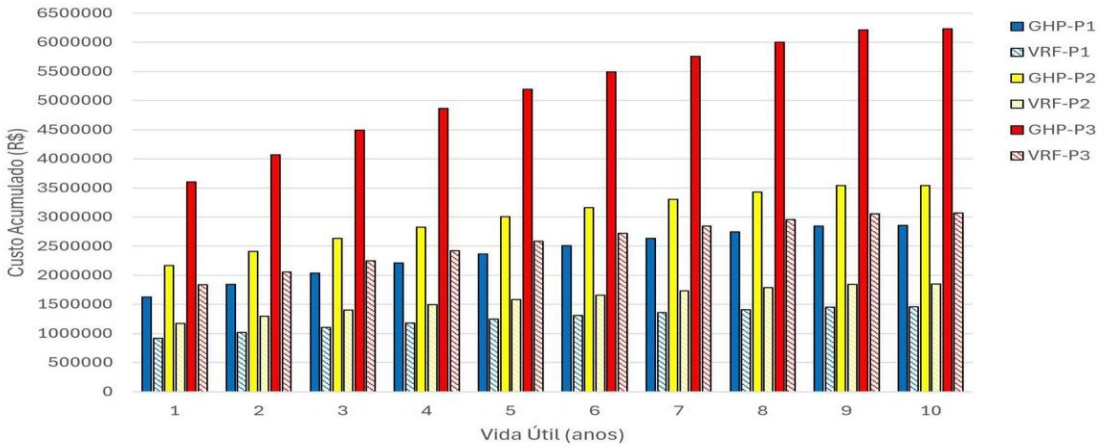
Figura 8. Comparativo de custo acumulado entre Sistemas GHP e VRF ao longo da vida útil - comercial (a).



Fonte: Autor (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 9. Comparativo de custo acumulado entre Sistemas GHP e VRF ao longo da vida útil - comercial (b).



Fonte: Autor (2026).

No setor comercial, as diferenças entre os sistemas foram ainda mais expressivas. No cenário (a), o sistema GHP apresentou VPLs superiores aos do VRF em 113,53% no Padrão 1, 107,50% no Padrão 2 e 121,17% no Padrão 3. No cenário (b), os percentuais foram reduzidos, mas permaneceram desfavoráveis ao GHP, com diferenças de 96,13%, 91,41% e 103,02%, respectivamente. Esse comportamento está associado ao maior investimento inicial, aos maiores custos de manutenção e ao impacto dos custos operacionais do sistema GHP ao longo do período de análise (Alsalem *et al.*, 2023).

Tabela 8. Comparativo consolidado do VPL entre sistemas GHP e VRF

Tipologia	VPL VRF (R$)	VPL GHP cenário (a) (R$)	Diferença cenário (a)	VPL GHP cenário (b) (R$)	Diferença cenário (b)
Residencial 1	352.932,66	544.248,85	+54,20%	513.353,84	+45,45%
Residencial 2	384.272,74	668.799,13	+74,00%	626.477,57	+63,03%
Residencial 3	444.636,14	886.769,77	+99,40%	825.102,74	+85,57%
Comercial 1	1.457.541,47	3.112.263,55	+113,53%	2.858.669,12	+96,13%
Comercial 2	1.848.879,87	3.836.412,82	+107,50%	3.538.862,97	+91,41%
Comercial 3	3.068.971,28	6.787.669,46	+121,17%	6.230.583,66	+103,02%

Fonte: Autor (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

De modo geral, os resultados indicam que o sistema VRF apresentou desempenho econômico superior em todos os cenários e tipologias analisadas. As Figuras 6 a 9 reforçam esse comportamento ao demonstrar que o custo acumulado do GHP cresce de forma mais acentuada ao longo da vida útil, especialmente nas edificações de maior porte. Mesmo no Cenário (b), que considera condições mais favoráveis ao uso do gás natural, não houve inversão da tendência observada. Assim, para as condições tarifárias, operacionais e climáticas consideradas neste estudo, o sistema VRF apresentou menor custo acumulado e menor VPL em comparação ao sistema GHP.

2.6. Análise de sensibilidade

A Tabela 9 consolida a variação do VPL frente a cenários estressados da Taxa Mínima de Atratividade (TMA de 8%, 11,8% e 15% a.a.) para a edificação Padrão 3 Comercial no Cenário (b).

Tabela 9. Sensibilidade do VPL à variação da TMA no Padrão 3 Comercial (Cenário b)

Cenário de TMA	VPL VRF (R$)	VPL GHP (R$)	Desvio (%)
Otimista (8% a.a.)	3.313.456,92	6.749.372,54	103,70%
Base (11,8% a.a.)	3.068.971,28	6.230.583,66	103,02%
Pessimista (15% a.a.)	2.902.950,56	5.878.045,94	102,49%

Fonte: Autor (2026).

Os dados da Tabela 9 evidenciam que a superioridade econômica do sistema VRF é insensível à variação do custo de capital, mantendo um desvio desfavorável ao GHP superior a 102% em todos os cenários. No cenário otimista (TMA de 8% a.a.), o desvio atinge seu ápice (103,70%), com VPLs de R$ 3.313.456,92 (VRF) e R$ 6.749.372,54 (GHP), pois taxas de desconto menores preservam o valor presente dos elevados custos operacionais do motor a gás. No cenário de referência (TMA Base de 11,8% a.a.), o VPL do VRF (R$ 3.068.971,28) mantém-se desfavorável ao GHP (R$ 6.230.583,66) em 103,02%. Já no cenário pessimista (TMA de 15% a.a.), o desvio reduz-se discretamente para 102,49% (VPLs de R$ 2.902.950,56 para VRF e R$ 5.878.045,94 para GHP), efeito do maior desconto aplicado aos fluxos futuros, sem, contudo, alterar a atratividade do investimento.

A determinação do ponto de equilíbrio revelou uma inviabilidade estrutural do sistema a gás. A diferença de investimento inicial é de R$ 1.493.085,06 (CAPEX de R$ 3.084.482,59 para o GHP contra R$ 1.591.397,53 para o VRF). O cálculo indicou que, mesmo sob a hipótese teórica de subsídio integral do combustível (custo operacional de gás igual a R$ 0,00/ano), o GHP não

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

alcança paridade financeira com o VRF. Isso ocorre porque a soma do CAPEX do GHP com sua manutenção anual (R$ 71.898,29) supera, por si só, o custo total do ciclo de vida de 10 anos do VRF (que engloba aquisição, manutenção e o consumo elétrico integral). Esse resultado alinha-se a Cazotti e Amorim (2017), confirmando que a viabilidade do GHP exige um diferencial de preço entre eletricidade e gás (spark spread) subsidiado e regime contínuo de aquecimento, condições ausentes no clima equatorial de Manaus.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo investigou a viabilidade técnica e econômica dos sistemas GHP e VRF em edificações residenciais e comerciais em Manaus, considerando a simulação da carga térmica horária, o dimensionamento dos sistemas e a avaliação do Valor Presente Líquido em um horizonte de 10 anos.

Os resultados confirmam que, embora o sistema GHP seja tecnicamente viável para suprir a demanda térmica das edificações, essa solução não apresenta atratividade econômica em comparação com o VRF. A hipótese inicial de vantagem do gás natural a longo prazo foi refutada, uma vez que o VRF apresentou custos acumulados e VPLs expressivamente menores em todos os cenários e tipologias. Essa desvantagem fundamenta-se nas características do clima equatorial de Manaus, no qual a ausência de demanda por aquecimento neutraliza o benefício da recuperação do calor residual do motor a gás, e no elevado custo de implantação da infraestrutura para o uso do gás.

A inclusão da análise de sensibilidade permitiu avançar além do estudo estático, revelando que a desvantagem do sistema GHP é estrutural. A variação da Taxa Mínima de Atratividade entre 8% e 15% ao ano manteve o desvio desfavorável ao GHP superior a 102% em relação ao VRF. Ademais, a determinação do ponto de equilíbrio demonstrou que, mesmo sob a hipótese teórica de subsídio integral do combustível, o GHP não alcançaria paridade financeira com a solução elétrica. A soma do investimento inicial do GHP com os custos de sua manutenção mecânica especializada supera, por si só, o custo total do ciclo de vida de 10 anos do VRF.

Dessa forma, os resultados sustentam que os sistemas GHP apresentam severas restrições à viabilidade econômica de sua aplicação no ambiente construído em Manaus, fornecendo subsídios que evidenciam as limitações financeiras e a baixa atratividade da tecnologia a gás natural em projetos de AVAC-R para regiões de clima quente e úmido.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

DECLARAÇÃO DE USO DE IA

Durante a preparação deste manuscrito, os autores utilizaram o modelo de linguagem Gemini (Google) exclusivamente para fins de suporte linguístico, incluindo a revisão gramatical, o aprimoramento da clareza e da fluidez do texto em português e o auxílio na adequação textual do resumo e do *abstract.* A ferramenta não foi utilizada para a geração de dados, a realização de cálculos ou simulações computacionais, nem para a formulação das conclusões científicas. Após o processamento do texto, os autores revisaram e editaram criticamente todo o conteúdo, assumindo integral e exclusiva responsabilidade pela exatidão, originalidade e integridade científica da publicação.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Tarifas e informações econômico-financeiras. Brasília, DF: ANEEL, 2022. Atualizado em: 3 jun. 2026. Disponível em: https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/tarifas-e-informacoes-economico-financeiras. Acesso em: 16 jun. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Tarifas: transporte de gás natural. Brasília, DF: ANP, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/movimentacao-estocagem-e-comercializacao-de-gas-natural/transporte-de-gas-natural/tarifas. Acesso em: 16 jun. 2026.

ALMEIDA, M. R. D.; CAMPOS, K. C.; CAMPOS, R. T. Avaliação financeira da energia fotovoltaica e eólica em cooperativas agrícolas do Ceará. Economia e Região, v. 10, n. 2, p. 73–93, 2022. DOI: https://doi.org/10.5433/2317-627x.2022v10n2p73.

ALSALEM, Y.; AYADI, O.; ASFAR, J. A. Techno-economic assessment of retrofitting heating, ventilation, and air conditioning system – case study. Journal of Ecological Engineering, v. 24, n. 3, p. 153–168, 2023. DOI: https://doi.org/10.12911/22998993/158383.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS; ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2025: energy standard for sites and buildings except low-rise residential buildings. Atlanta: ASHRAE, 2025. Disponível em: https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/read-only-versions-of-ashrae-standards. Acesso em: 16 jun. 2026.

AMIN, U.; HOSSAIN, M. J.; FERNANDEZ, E. Optimal price based control of HVAC systems in multizone office buildings for demand response. Journal of Cleaner Production, v. 270, p. 122059, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122059.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16401-1: instalações de ar-condicionado: sistemas centrais e unitários: parte 1: projetos das instalações. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

BAGGIO, L.; MOURA, D. A. Revisão bibliográfica sobre a questão energética no Estado do Amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 9., 2018, São Bernardo do Campo. Anais [...]. São Bernardo do Campo: IBEAS, 2018. Disponível em: https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2018/X-002.pdf. Acesso em: 16 jun. 2026.

CARDOSO, B. P.; MAGALHÃES, G. S. Análise de sistemas de condicionamento de ar (VRF e VAV) para o bloco de engenharia da Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados: UFGD, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/bitstream/prefix/2067/1/BrunoPiresCardoso%20-%20GabrieladaSilvaMagalhaes.pdf. Acesso em: 16 jun. 2026.

CAZOTTI, R. M.; AMORIM, P. A. Estudo de viabilidade técnica financeira de sistema de ar-condicionado VRF operante com gás natural. ABCustos, São Leopoldo, v. 12, n. 1, p. 28–41, 2017. DOI: https://doi.org/10.47179/abcustos.v12i1.402. Disponível em: https://revista.abcustos.org.br/abcustos/article/view/402. Acesso em: 16 jun. 2026.

COSTA, A. F.; PEREIRA, J. C.; LIMA, S. Tecnologia VRF: sustentabilidade e eficiência energética. In: CONGRESSO NACIONAL DE CLIMATIZAÇÃO, 38., 2018. Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2018. p. 215–227.

DUARTE, V. C. P.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Assessing the energy performance of VAV and VRF air conditioning systems in an office building located in the city of Florianópolis. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 261–283, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/S1678-86212020000200399. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ac/a/ZzbxNThsqtCM7hKF5GPnrTh/. Acesso em: 16 jun. 2026.

ESCRIVÀ, E. J. S.; HART, M.; ACHA, S.; FRANCÉS, V. M. S.; SHAH, N.; MARKIDES, C. N. Techno-economic evaluation of integrated energy systems for heat recovery applications in food retail buildings. Applied Energy, v. 305, p. 117799, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117799.

FARGHALI, M.; OSMAN, A. I.; MOHAMED, I. M. A.; CHEN, Z.; CHEN, L.; IHARA, I.; YAP, P.; ROONEY, D. W. Strategies to save energy in the context of the energy crisis: a review. Environmental Chemistry Letters, v. 21, n. 4, p. 2003–2039, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s10311-023-01591-5.

O'BRIEN, W.; ABDELALIM, A.; GUNAY, H. B. Development of an office tenant electricity use model and its application for right-sizing HVAC equipment. Journal of Building Performance Simulation, v. 12, n. 1, p. 37–55, 2019. DOI: https://doi.org/10.1080/19401493.2018.1463394.

PAWELA, B.; JASZCZUR, M. Review of gas engine heat pumps. Energies, v. 15, n. 13, p. 4874, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/en15134874. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/15/13/4874. Acesso em: 16 jun. 2026.

PEREIRA, L. A. B.; BRITO, T. O.; CERETO, M. Um chamado para o resgate: influências do design passivo no conforto térmico da arquitetura amazonense. Contribuciones a Las Ciencias Sociales, v. 18, n. 10, 2025. DOI: https://doi.org/10.55905/revconv.18.n10-215.

PEZZOLA, L.; DANTI, P.; MAGNANI, S. Performance comparison among Gas Heat Pump, Electric Heat Pump and conventional thermal devices in tertiary sector applications. Energy

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Procedia, v. 101, p. 416–423, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.053. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.053. Acesso em: 16 jun. 2026.

ROSA, D. E.; LOPES, D. M. Avaliação de eficiência energética em projeto de sistemas de climatização VRF. Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula, v. 5, n. 1, p. 155–171, 2022. Disponível em: https://revistas.icesp.br/index.php/TEC-USU/article/view/2082. Acesso em: 16 jun. 2026.

TSVETKOVA, O.; OUARDA, T. B. M. J. A review of sensitivity analysis practices in wind resource assessment. Energy Conversion and Management, v. 238, p. 114112, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114112.

ZHA, F.; WANG, Y.; LIANG, C.; SHI, W.; LI, X.; GUO, D.; MAO, S. Utilizing multi-connected three-fluid heat exchangers in indoor units to improve the low load-ratio performance of variable refrigerant flow systems. Journal of Building Engineering, v. 103, p. 112150, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112150.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.