

Emerson Pires de Souza Neto

**Análise Comparativa Entre Sistemas GHP e
VRF: Um Estudo Aplicado para Edificações
Comerciais e Residências na Cidade de Manaus**

Manaus-AM

2025

Emerson Pires de Souza Neto

Análise Comparativa Entre Sistemas GHP e VRF: Um Estudo Aplicado para Edificações Comerciais e Residências na Cidade de Manaus

Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia Mecânica da Universidade do Estado do Amazonas como pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico, orientado pelo Prof. Dr. João D'anuzio Lima de Azevedo.

Universidade do Estado do Amazonas – UEA

Escola Superior de Tecnologia – EST

Engenharia Mecânica

Orientador: Dr. João D'anuzio Lima de Azevedo

Manaus-AM

2025

Emerson Pires de Souza Neto

Análise Comparativa Entre Sistemas GHP e VRF: Um Estudo Aplicado para Edificações Comerciais e Residências na Cidade de Manaus

Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia Mecânica da Universidade do Estado do Amazonas como pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico, orientado pelo Prof. Dr. João D'anuzio Lima de Azevedo.

Trabalho aprovado. Manaus-AM, 26 de junho de 2025

Documento assinado digitalmente
 **JOAO DANUZIO LIMA DE AZEVEDO**
Data: 26/06/2025 19:08:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. João D'anuzio Lima de Azevedo
Universidade do Estado do Amazonas (UEA)
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **PAULO FERNANDO FIGUEIREDO MACIEL**
Data: 26/06/2025 20:08:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Paulo Fernando Figueiredo Maciel
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Amazonas (IFAM)
Examinador 1

Documento assinado digitalmente
 **RUBELMAR MAIA DE AZEVEDO CRUZ NETO**
Data: 26/06/2025 19:03:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Rubelmar Maia de Azevedo Cruz
Neto**
Universidade do Estado do Amazonas (UEA)
Examinador 2

Manaus-AM
2025

Agradecimentos

A Deus, pela força, sabedoria e proteção concedidas ao longo de toda essa jornada. Por iluminar meus caminhos, renovar minha fé e me sustentar nos momentos de desafios.

À minha família, meu alicerce, por todo amor, incentivo e apoio incondicional. Em especial, ao meu eterno avô Emerson Souza, que, mesmo não estando mais presente fisicamente, foi quem me mostrou, desde cedo, o caminho acadêmico que hoje trilhar e que desejo seguir. Ao meu pai, Luiz Manoel Pontes, que nunca mediu esforços e jamais permitiu que me faltasse qualquer recurso necessário para minha formação educacional, sendo exemplo de dedicação e compromisso. À minha mãe, Danielle Pontes, que, com sua história de vida e sua determinação, sempre foi e sempre será para mim uma inspiração como estudante e como ser humano. À minha querida avó Ivone, pelo amor incondicional, pelo carinho e pelo suporte constante, sendo sempre uma presença de acolhimento, afeto e segurança. E ao meu irmão, Luís Fernando Pontes, que, com seu jeito único e espontâneo, sempre esteve por perto, arrancando sorrisos nos momentos em que eu mais precisava, e mostrando, à sua maneira, que a leveza também faz parte dessa caminhada.

À minha namorada, Luana Ribeiro, que foi e é meu maior exemplo de dedicação, esforço e resiliência. Sempre digo a ela, e reafirmo aqui, que eu não estaria onde estou se não fosse por ela. Minha parceira de vida e de estudos, que esteve ao meu lado em cada madrugada de esforço, em cada desafio, em cada dificuldade. A quem nunca faltou uma palavra de incentivo, apoio e amor. Este trabalho carrega também muito do seu esforço, da sua paciência e da sua confiança em mim, e sou eternamente grato por tudo o que construímos juntos até aqui.

Aos meus amigos, que fizeram parte dessa caminhada, oferecendo apoio, companheirismo e motivação. De forma muito especial, agradeço ao meu amigo Nilton Segundo, que, em um momento crucial da minha formação, foi meu grande parceiro de estudos, compartilhando conhecimentos, desafios e conquistas, contribuindo diretamente para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao meu orientador, Professor Doutor João D'anuzio Lima de Azevedo, que, desde o início, acreditou no meu potencial e, de forma generosa, me concedeu a primeira oportunidade dentro da Universidade do Estado do Amazonas, quando muitos não me deram. Sua orientação, paciência e dedicação foram fundamentais para a realização deste trabalho e para meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao meu co-orientador, Professor Doutor Ricardo Cruz, por ser não apenas um excelente profissional, mas uma verdadeira inspiração. Seu amor pela engenharia, que me contagiou desde a primeira vez em que assisti a uma de suas aulas, e seu compromisso

com a profissão, são exemplos que levarei comigo ao longo da minha carreira.

Aos professores que contribuíram para minha formação na graduação, em especial ao Professor Doutor Rubelmar Neto, que, com suas aulas, seus conselhos e sua visão profissional, abriu meus olhos para uma área da engenharia na qual me identifiquei profundamente e que, desde então, se tornou o caminho que escolhi seguir.

De forma muito especial, deixo também meu agradecimento a dois professores que marcaram minha trajetória ainda no ensino médio: ao professor Welff Junior, de Química, que sempre acreditou no potencial de seus alunos, e me orgulho em dizer que sou um deles; e ao professor Gilson Lima, de Matemática, cuja dedicação, paixão pelo ensino e exemplo profissional foram fundamentais para minha decisão em seguir a carreira na Engenharia Mecânica.

À Cargo Engenharia, pela oportunidade de aprendizado prático e pelo suporte no desenvolvimento deste trabalho, e à empresa LG, pela disponibilidade e prontidão no fornecimento dos dados técnicos necessários para a execução deste projeto. Em especial, à colaboradora Fatima Higuchi, que, com extrema paciência e profissionalismo, me auxiliou nas cotações, esclareceu dúvidas e contribuiu significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

E, por fim, à Universidade do Estado do Amazonas (UEA), pela formação acadêmica, pelos recursos oferecidos, pela qualidade do ensino e por proporcionar um ambiente de desenvolvimento, tanto profissional quanto pessoal, que me possibilitou chegar até aqui e concluir mais essa importante etapa da minha vida.

*"Tal como um sistema de refrigeração bem projetado, a preparação é a chave para manter
o seu desempenho em alta."
- Rick Anderson*

Resumo

A climatização de ambientes é fundamental para assegurar conforto térmico, bem-estar e eficiência no uso de energia. Em Manaus, onde predominam altas temperaturas e umidade elevada, encontrar soluções que aliem desempenho técnico e viabilidade econômica é especialmente desafiador. Este trabalho analisa a viabilidade técnica e econômica dos sistemas de climatização *Gas Heat Pump* (GHP), movidos a gás natural, em comparação aos sistemas *Variable Refrigerant Flow* (VRF), elétricos, em edificações comerciais e residenciais na cidade de Manaus. Os objetivos incluem o cálculo da carga térmica, o dimensionamento dos sistemas, a estimativa dos custos de investimento, manutenção e consumo energético, além da comparação do desempenho e custos operacionais entre ambos. A metodologia envolveu a caracterização das edificações, cálculos térmicos conforme normas técnicas, especificação dos equipamentos, análise de custos com base nas tarifas locais e avaliação econômica por meio do Valor Presente Líquido (VPL). Os resultados indicaram que, embora os sistemas GHP sejam tecnicamente viáveis, não apresentaram vantagens competitivas diante dos custos e da manutenção. Já os sistemas VRF mostraram melhor desempenho energético, menor investimento inicial e menores custos operacionais. As diferenças de VPL entre os sistemas chegaram até 99,4% no setor residencial e 121,17% no setor comercial, evidenciando uma expressiva superioridade econômica dos sistemas VRF. Pode-se inferir, portanto, que os sistemas VRF são mais adequados para edificações comerciais e residenciais em Manaus, considerando as condições analisadas.

Palavras-chave: Climatização, Eficiência energética, *Variable Refrigerant Flow*, *Gas Heat Pump*, Viabilidade econômica.

Abstract

The air conditioning of indoor environments is essential to ensure thermal comfort, well-being, and energy efficiency. In Manaus, where high temperatures and elevated humidity prevail, finding solutions that combine technical performance with economic viability is particularly challenging. This study analyzes the technical and economic feasibility of Gas Heat Pump (GHP) air conditioning systems, powered by natural gas, in comparison to Variable Refrigerant Flow (VRF) systems, which are electrically powered, in commercial and residential buildings in the city of Manaus. The objectives include calculating the thermal load, sizing the systems, estimating investment, maintenance, and energy consumption costs, as well as comparing the performance and operational costs between both systems. The methodology involved building characterization, thermal calculations according to technical standards, equipment specification, cost analysis based on local tariffs, and economic evaluation using Net Present Value (NPV). The results indicated that, although GHP systems are technically viable, they did not present competitive advantages in terms of costs and maintenance. On the other hand, VRF systems demonstrated better energy performance, lower initial investment, and reduced operational costs. The differences in NPV between the systems reached up to 99.4% in the residential sector and 121.17% in the commercial sector, highlighting the clear economic superiority of VRF systems. It can therefore be inferred that VRF systems are more suitable for commercial and residential buildings in Manaus, given the conditions analyzed.

Keywords: Air conditioning, Energy efficiency, Variable Refrigerant Flow, Gas Heat Pump, Economic feasibility.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Primeiro sistema de ar-condicionado.	16
Figura 2 – Ciclo de refrigeração.	17
Figura 3 – Diagrama Pressão (P) X Entalpia (h)	17
Figura 4 – Esquema de um sistema VRF.	19
Figura 5 – Tecnologia convencional e inverter. (a) Rotação do compressor. (b) Relação de economia.	20
Figura 6 – Esquema de um sistema GHP.	21
Figura 7 – Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.	29
Figura 8 – Perfil Horário da Carga Térmica (TR) em Dias Típicos Mensais – Planta Residencial, Padrão 1.	37
Figura 9 – Perfil Horário da Carga Térmica (TR) em Dias Típicos Mensais – Planta Residencial, Padrão 2.	37
Figura 10 – Perfil Horário da Carga Térmica (TR) em Dias Típicos Mensais – Planta Residencial, Padrão 3.	38
Figura 11 – Perfil Horário da Carga Térmica (TR) em Dias Típicos Mensais – Planta Comercial, Padrão 1.	38
Figura 12 – Perfil Horário da Carga Térmica (TR) em Dias Típicos Mensais – Planta Comercial, Padrão 2.	39
Figura 13 – Perfil Horário da Carga Térmica (TR) em Dias Típicos Mensais – Planta Comercial, Padrão 3.	39
Figura 14 – Carga Térmica de Pico de Edificações Residenciais.	40
Figura 15 – Carga Térmica de Pico Edificações Comerciais.	41
Figura 16 – Variação do Consumo Energético em Função da Carga Parcial para Sistemas GHP.	46
Figura 17 – Variação do Consumo Energético em Função da Carga Parcial para Sistemas VRF.	47
Figura 18 – Custo Acumulado dos Sistemas GHP e VRF ao Longo da Vida Útil - Residencial (Utilizando o Custo Operacional (a)).	50
Figura 19 – Custo Acumulado dos Sistemas GHP e VRF ao Longo da Vida Útil - Residencial (Utilizando o Custo Operacional (b)).	51
Figura 20 – Comparativo de Custo Acumulado dos Sistemas GHP e VRF ao Longo da Vida Útil - Comercial (Utilizando o Custo Operacional (a)).	52
Figura 21 – Comparativo de Custo Acumulado dos Sistemas GHP e VRF ao Longo da Vida Útil - Comercial (Utilizando o Custo Operacional (b)).	53
Figura 22 – Diferença de Custo Acumulado dos Sistemas GHP ao Longo da Vida Útil - Residencial (Utilizando o Custo Operacional (a) e (b)).	55

Figura 23 – Diferença dos Custos Acumulados dos Sistemas GHP ao Longo da Vida Útil - Comercial (Utilizando o Custo Operacional (a) e (b)).	56
Figura 24 – Planta Residencial - Padrão 1.	60
Figura 25 – Planta Residencial - Padrão 2.	61
Figura 26 – Planta Residencial - Padrão 3 (a).	61
Figura 27 – Planta Residencial - Padrão 3 (b).	62
Figura 28 – Planta Residencial - Padrão 3 (c).	62
Figura 29 – Planta Comercial - Padrão 1.	63
Figura 30 – Planta Comercial - Padrão 2.	63
Figura 31 – Planta Comercial - Padrão 3.	64

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
GLP	<i>Liquefied Petroleum Gas</i>
GHP	<i>Gas Heat Pump</i>
IL	Índice de Lucratividade
LG	<i>Life's Good</i> (Marca sul-coreana de eletrônicos e eletrodomésticos)
MCI	Motor a Combustão Interna
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ROI	Retorno sobre o Investimento
TBS	Temperatura de Bulbo Seco
TIR	Taxa Interna de Retorno
TR	Toneladas de Refrigeração
VPL	Valor Presente Líquido
VRF	<i>Variable Refrigerant Flow</i>
VRV	<i>Variable Refrigerant Volume</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	A evolução do ar-condicionado: da invenção à tecnologia moderna	15
2.2	Funcionamento do sistema VRF (<i>Variable Refrigerant Flow</i>)	16
2.2.1	Ciclo de refrigeração - VRF	16
2.2.1.1	Compressão	17
2.2.1.2	Condensação	18
2.2.1.3	Expansão	18
2.2.1.4	Evaporação	18
2.2.2	Tecnologias VRF	18
2.2.3	Características do sistema VRF	19
2.3	Funcionamento do sistema GHP (<i>Gas Heat Pump</i>)	20
2.3.1	Ciclo de refrigeração GHP	20
2.3.2	Tecnologias GHP	20
2.3.3	Características do sistema GHP	20
2.4	Carga térmica	21
2.4.1	Calor Sensível	22
2.4.2	Calor latente	23
2.5	“Mercado de energia”	24
2.5.1	Setor Residencial (Grupo B, Subgrupo B1)	24
2.5.2	Setor Comercial (Grupo A, Subgrupo A3 e A3a)	26
2.6	Análise de viabilidade econômica	26
3	METODOLOGIA	29
3.1	Tipologia dos Projetos	29
3.2	Cálculo de Carga Térmica	30
3.3	Dimensionamento dos Sistemas VRF e GHP	31
3.3.1	Seleção das Unidades Internas	31
3.3.2	Seleção das Unidades Externas	32
3.4	Estimativa de Custos	32
3.5	Análise de Retorno Econômico	34

4	RESULTADOS	36
4.1	Variação de Carga Térmica	36
4.1.1	Perfil Horário	36
4.1.2	Carga Térmica de Pico	40
4.2	Dimensionamento dos Sistemas	42
4.2.1	Unidades Condensadoras e Evaporadoras	42
4.2.2	Infraestrutura Frigorífica	44
4.3	Curvas de Consumo	45
4.4	Análises de Custos	48
4.5	Viabilidade Econômica	49
5	CONCLUSÕES	57
	 ANEXOS	 59
	ANEXO A – PLANTAS BAIXAS DAS EDIFICAÇÕES.	60
A.1	Plantas baixas residenciais	60
A.2	Plantas baixas comerciais	63
	 REFERÊNCIAS	 65

1 Introdução

O clima quente e úmido de Manaus, aliado ao crescimento urbano e à expansão imobiliária, tem impulsionado significativamente a demanda por sistemas de climatização em edificações comerciais e residenciais. Esse cenário resulta em um elevado consumo de energia elétrica, pressionando ainda mais o sistema energético do estado do Amazonas, que ainda depende, em parte, de fontes térmicas, como usinas movidas a diesel — conhecidas por seus altos custos operacionais e impactos ambientais negativos (HALL et al., 2021).

Apesar dos desafios relacionados à infraestrutura energética, o Amazonas destaca-se pela abundância de gás natural, especialmente na Bacia do Solimões, com reservas estimadas em 38 bilhões de metros cúbicos de gás convencional, além de recursos prospectivos como o *shale gas* (que é gás natural que se encontra preso em rochas de xisto ou folhelho, um tipo de rocha sedimentar). Essa riqueza energética representa uma oportunidade estratégica para diversificar a matriz energética regional e adotar tecnologias mais eficientes, ou menos poluentes. Entre essas tecnologias, os sistemas de climatização do tipo VRF (*Variable Refrigerant Flow*) movidos a gás natural, conhecidos como GHPs (*Gas Heat Pumps*), surgem como alternativa promissora. De acordo com Baggio et al. (2018) esses sistemas ajustam dinamicamente o fluxo de fluido refrigerante de acordo com a demanda térmica, proporcionando maior flexibilidade e eficiência.

No entanto, mesmo com a disponibilidade local de gás natural e o elevado custo da energia elétrica, observa-se uma baixa adoção dos sistemas GHPs no mercado de climatização em Manaus. Essa resistência está associada à ausência de estudos específicos que analisem o desempenho técnico e econômico desses sistemas em condições típicas da região Amazônica. Como consequência, empresas e consumidores enfrentam incertezas ao considerar a substituição dos sistemas elétricos convencionais por soluções a gás, o que limita o avanço de tecnologias mais eficientes e sustentáveis no setor (CAZOTTI; AMORIM, 2017).

Diante desse cenário, este trabalho parte da hipótese de que a adoção de sistemas GHPs pode representar uma solução mais econômica e eficiente a longo prazo, especialmente quando se leva em conta a disponibilidade regional de gás natural e os altos custos da energia elétrica. Segundo Zuza (2019) uma avaliação projetada para um período de 10 anos sugere que esses sistemas podem reduzir significativamente os custos operacionais. No entanto, é importante considerar também os desafios técnicos, como as adaptações estruturais necessárias nas edificações, que podem limitar sua implementação, sobretudo em ambientes residenciais.

A escolha por investigar essa temática se justifica pela urgente necessidade de

soluções energeticamente eficientes ou que utilizem fontes alternativas de energia economicamente viáveis para climatização na capital amazonense. O uso do gás natural, abundante e subutilizado na região, pode representar uma alternativa estratégica para reduzir os impactos do déficit energético e oferecer custos mais competitivos em comparação a outras fontes. Embora estudos anteriores apontem vantagens dos sistemas GHPs em alguns contextos, ainda há escassez de análises focadas nas particularidades climáticas, energéticas e econômicas de Manaus (CIGÁS, 2024).

Este trabalho busca, portanto, contribuir, ao comparar os sistemas VRF elétricos e a gás natural quanto ao desempenho energético e aos custos operacionais com o intuito de avaliar a viabilidade técnico-econômica. A partir dos resultados, espera-se não apenas fundamentar decisões mais assertivas por parte de consumidores e profissionais do setor, como também incentivar o uso eficiente dos recursos disponíveis na região, promovendo benefícios econômicos e ambientais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade técnica e econômica dos GHPs como alternativa aos VRFs convencionais em edificações comerciais e residenciais em Manaus.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Calcular a carga térmica horária considerando três diferentes padrões de edificações, tanto residenciais quanto comerciais;
2. Dimensionar os sistemas VRF e GHP para as edificações propostas;
3. Estimar os custos de investimento, manutenção e energia para ambos os sistemas;
4. Comparar os custos operacionais e o desempenho energético de cada sistema.

2 Referencial Teórico

O referencial teórico deste trabalho abrange aspectos essenciais para a compreensão e análise do tema proposto. Inicialmente, será apresentada uma breve história da criação do ar-condicionado, contextualizando sua evolução tecnológica até os sistemas VRF (*Variable Refrigerant Flow*) e GHP (*Gas Heat Pump*). Esses sistemas serão detalhados em termos de seus ciclos de funcionamento, tecnologias e características operacionais. Em seguida, será explorado o mercado de energia, com foco nas particularidades do Amazonas, e abordadas metodologias de análise financeira, como o cálculo de retorno sobre o investimento (ROI), que embasam a avaliação de viabilidade técnico-econômica dos projetos. Essa abordagem proporciona uma base sólida para as discussões e resultados da pesquisa.

2.1 A evolução do ar-condicionado: da invenção à tecnologia moderna

Existem relatos de que no ano de 1620, o alquimista Cornelius Drebbel apostou com o rei Jaime I que transformaria um dia quente de verão em um dia de inverno, através do arrefecimento do ar, o palco dessa história era o salão de Westminster, na Inglaterra. O alquimista desenvolveu uma espécie de ventoinha, que era ativada através de uma alavanca, e o ar quente passava por vasilha frias, que eram resfriadas através de uma reação simples de adição de sal à água. Assim, nos dando a primeira unidade de ar-condicionado do mundo. Entretanto, essa ideia não era suficiente para ser utilizada em massa, mas de extrema importância para base que seria desenvolvida em trabalhos futuros ([History of Refrigeration, 2024](#)).

Seguindo as ideias de Cornelius, em 1902 foi desenvolvido o primeiro sistema de ar-condicionado por Willis Carrier, visto na Figura 1, com o simples intuito de solucionar a umidade elevada, que afetava a qualidade da impressão do papel, em uma indústria gráfica de Nova York. Solucionando o problema, o sistema de *Carrier* foi um sucesso, então, começou a ganhar notoriedade não só no âmbito industrial, mas no residencial e comercial também ([Carrier, 2024](#)).

Com as evoluções tecnológicas que o mundo passa, em 1984, a Daikin, empresa japonesa de ar condicionado começou a comercialização de sistema VRV (*Variable Refrigerant Volume*), tecnologia de nome patenteado pela própria empresa ([Daikin, 2024](#)). Esse sistema é semelhante ao VRF (*Variable Refrigerant Flow*), que consiste em um sistema avançado de climatização utilizado tanto para resfriar como aquecer mais de um ambiente. O VRF funciona ajustando o fluxo de fluido refrigerante nos equipamentos evaporadores,

Figura 1 – Primeiro sistema de ar-condicionado.



Fonte: [Carrier \(2024\)](#).

de acordo com a demanda térmica do espaço que está instalado. Esse novo sistema levou o conceito de sustentabilidade energética a outro patamar, pois o consumo de energia elétrica foi reduzido ([ROSA; LOPES, 2022](#)).

Seguindo com os avanços tecnológicos na indústria de climatização, chega no mercado mundial um sistema VRF a gás natural, onde a empresa sul-coreana LG *Eletronics* é uma das empresas líderes no desenvolvimento desse sistema. Segundo a própria empresa, esses sistemas oferecem soluções sustentáveis, reduzindo o consumo de energia elétrica e emissões de carbono ([ROSA; LOPES, 2022](#)).

Atualmente, tanto o sistema VRF à energia elétrica quanto o gás natural são amplamente utilizados no mundo. E, a escolha entre esses dois sistemas de climatização em uma aplicação específica está diretamente relacionado ao equilíbrio econômico que um equipamento tem em relação ao outro, ou seja, o retorno do investimento está condicionado ao custo de instalação da infraestrutura para recebê-los somados aos custos dos equipamentos e às variações de preços do combustível e da energia elétrica ([PEIL, 2014](#)).

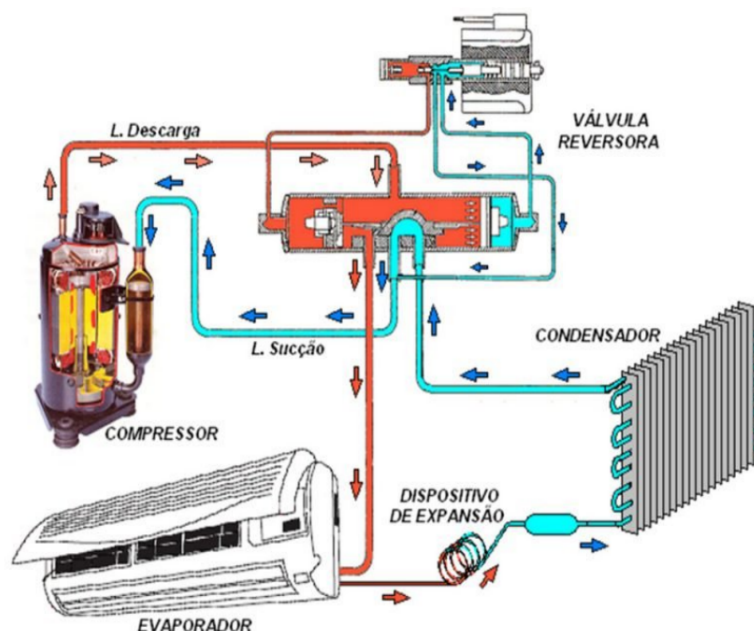
2.2 Funcionamento do sistema VRF (*Variable Refrigerant Flow*)

2.2.1 Ciclo de refrigeração - VRF

O sistema VRF utiliza o ciclo de compressão a vapor, como as Figura 2 e 3, amplamente usado em sistemas de refrigeração. Esse ciclo é constituído por quatro etapas

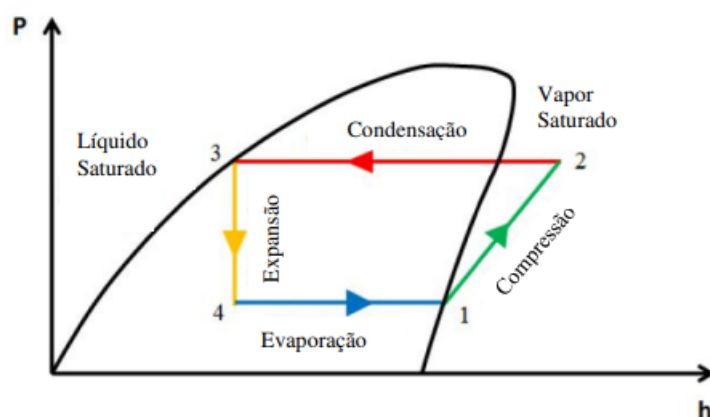
principais: compressão, condensação, expansão e evaporação (MORAN; SHAPIRO, 2009).

Figura 2 – Ciclo de refrigeração.



Fonte: Rosa e Lopes (2022).

Figura 3 – Diagrama Pressão (P) X Entalpia (h) .



Fonte: Librado et al. (2018).

2.2.1.1 Compressão

O ciclo inicia-se no compressor, onde o refrigerante, no estado gasoso e a baixa pressão, é comprimido. Essa etapa aumenta tanto a pressão quanto a temperatura do refrigerante, convertendo-o em um gás superaquecido. Nos sistemas VRF convencionais, o

compressor é controlado por inversores de frequência, que ajustam sua velocidade conforme a carga térmica, otimizando o consumo energético (NUNES; ALMEIDA, 2021).

2.2.1.2 Condensação

O gás superaquecido segue para a unidade condensadora, onde ocorre a rejeição de calor para o ambiente externo. Nesse processo, o refrigerante perde calor e se condensa, tornando-se um líquido de alta pressão. O calor dissipado depende do modo de operação do sistema (aquecimento ou resfriamento) (FERREIRA; SILVA, 2020).

2.2.1.3 Expansão

Na sequência, o refrigerante líquido passa pela válvula de expansão, onde sua pressão é reduzida significativamente. Como consequência, o refrigerante atinge temperaturas muito baixas, tornando-se uma mistura bifásica de líquido e vapor a baixa pressão (SANTOS, 2019).

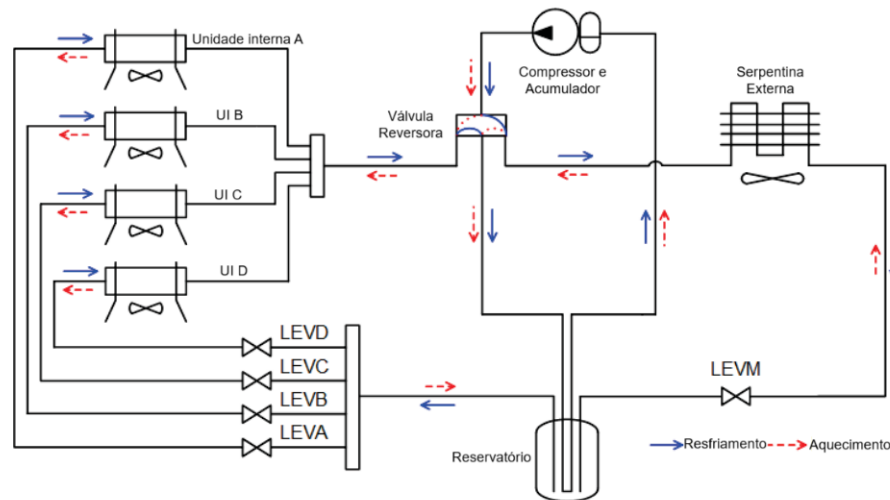
2.2.1.4 Evaporação

O refrigerante expandido entra no evaporador das unidades internas, onde absorve calor do ambiente interno (modo resfriamento) ou do ambiente externo (modo aquecimento). Durante esse processo, o refrigerante evapora e retorna ao estado gasoso, pronto para ser comprimido novamente, reiniciando o ciclo (COSTA; PEREIRA; LIMA, 2018).

2.2.2 Tecnologias VRF

O principal diferencial do VRF reside no uso de controles eletrônicos que regulam o fluxo de refrigerante, ajustando-o conforme a demanda térmica específica de cada ambiente, como mostra a Figura 4. Essa característica possibilita uma climatização eficiente e personalizada, adaptada às necessidades particulares de cada zona atendida pelo sistema (OLIVEIRA et al., 2020). Na Figura 4 podemos ver o funcionamento do sistema VRF que permite o controle individual de diversas unidades internas (UI A, B, C e D), operando simultaneamente em modos de resfriamento (setas azuis) ou aquecimento (setas vermelhas). O sistema funciona a partir do compressor e acumulador, responsáveis por comprimir o refrigerante, e da válvula reversora, que controla o sentido do fluxo, alternando entre os modos de operação. O refrigerante segue até a serpentina externa, que age como condensador no resfriamento ou evaporador no aquecimento. O refrigerante é então direcionado para o reservatório e distribuído às unidades internas através das linhas controladas pelos dispositivos de expansão (LEV). Cada unidade interna ajusta a temperatura de forma independente, o que torna o sistema eficiente e flexível, atendendo diferentes demandas térmicas simultaneamente e com baixo consumo energético.

Figura 4 – Esquema de um sistema VRF.



Fonte: Adaptado de [Qiao et al. \(2017\)](#).

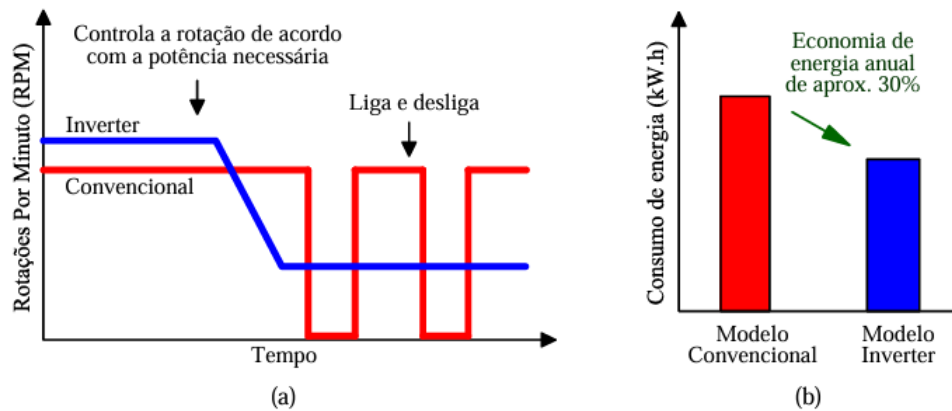
Além disso, compressores com tecnologia inverter permitem ajustar a velocidade do compressor conforme a demanda, o que reduz o consumo de energia elétrica e aumenta a durabilidade do equipamento. Cada unidade interna possui microprocessadores que controlam precisamente o fluxo de refrigerante, possibilitando ajustes individuais da temperatura para cada ambiente climatizado ([KONOPATZKI et al., 2015](#)).

2.2.3 Características do sistema VRF

O sistema destaca-se pela possibilidade de controle individualizado da temperatura em cada unidade interna, proporcionado por microprocessadores que regulam automaticamente o fluxo de refrigerante. Essa característica permite uma climatização eficiente e personalizada para cada ambiente atendido ([DUARTE et al., 2020](#)).

Além disso, o VRF é reconhecido pela alta eficiência energética, como mostrado na Figura 5 a e b, obtida pelo ajuste da quantidade de fluido refrigerante circulante com base na carga térmica de cada ambiente. Outro ponto positivo é sua flexibilidade de instalação, que o torna ideal para edifícios comerciais e residenciais com configurações variadas ([DUARTE et al., 2020](#)).

Figura 5 – Tecnologia convencional e inverter. (a) Rotação do compressor. (b) Relação de economia.



Fonte: Adaptado de [Daikin \(2024\)](#).

A sustentabilidade é outra vantagem importante, já que muitos sistemas VRF utilizam refrigerantes ecológicos, como o R-410A, que apresentam menor impacto ambiental quando comparados aos refrigerantes convencionais ([JANKOVSKI et al., 2024](#)).

2.3 Funcionamento do sistema GHP (*Gas Heat Pump*)

2.3.1 Ciclo de refrigeração GHP

O sistema GHP (*Gas Heat Pump*), ou bomba de calor a gás, funciona com um ciclo termodinâmico semelhante ao dos sistemas tradicionais de climatização. Entretanto, ele se diferencia por usar Gás Natural (GN) ou Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) como principal fonte de energia para operar o compressor ([LG, 2024](#)).

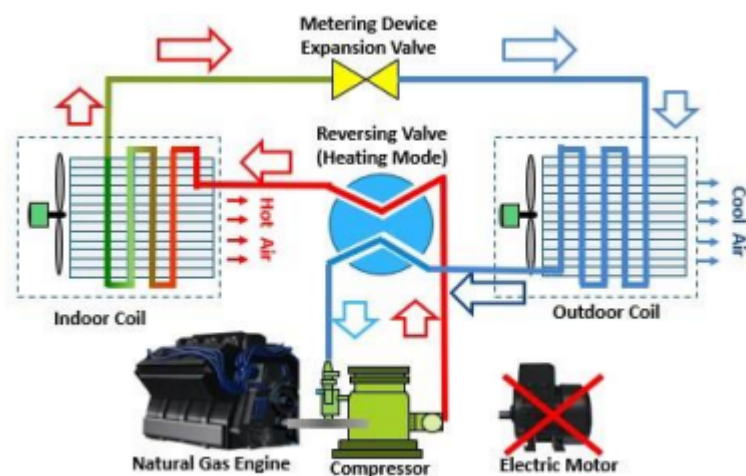
2.3.2 Tecnologias GHP

A principal tecnologia por trás é o motor de combustão interna que aciona o compressor no sistema GHP, usando gás natural ou GLP como fonte principal de energia, como mostrado na Figura 6. Essa particularidade elimina a necessidade direta de eletricidade, tornando-o uma solução eficaz em áreas com restrições no fornecimento elétrico ([FERREIRA; SILVA, 2020](#)). Além do *boiler*, que é um dispositivo que acumula a energia térmica proveniente do MCI (Motor a Combustão Interna).

2.3.3 Características do sistema GHP

Uma característica relevante dos sistemas GHP é o aproveitamento do calor gerado pelo motor a gás para outras finalidades, como o aquecimento de água. Essa funcionalidade

Figura 6 – Esquema de um sistema GHP.



Fonte: Intermont Gas Company.

aumenta a eficiência geral do sistema, especialmente em aplicações comerciais e residenciais. Adicionalmente, a modularidade dos sistemas GHP permite o controle independente de temperatura em diferentes zonas, atendendo às demandas específicas de cada espaço (MACHADO, 2022).

Além disso, os sistemas GHP se destacam por sua flexibilidade de aplicação, especialmente em locais onde a infraestrutura elétrica é inexistente ou fornecida de forma precária. Tornando-os uma solução viável para regiões remotas, áreas rurais e comunidades isoladas. Conforme discutido em estudos, os GHP utilizam combustíveis como gás natural ou biogás, garantindo operação eficiente mesmo fora das redes elétricas convencionais. Isso é especialmente relevante no contexto de países com vastas áreas rurais e desafios na distribuição de energia elétrica, como o Brasil e outras regiões em desenvolvimento (BAPTISTA; ANDREOS, 2016).

2.4 Carga térmica

O cálculo da carga térmica é uma etapa essencial no dimensionamento de sistemas de climatização. Trata-se da quantificação do calor que deve ser retirado ou adicionado ao ambiente para manter condições internas de conforto térmico, como temperatura e umidade, dentro dos parâmetros adequados, conforme normas como a ASHRAE (2021). Diversos fatores influenciam o cálculo da carga térmica, sendo os principais:

- Cargas Sensíveis e Latentes: O calor sensível está relacionado à variação de temperatura do ar, enquanto o calor latente refere-se à troca de umidade.

- Ganhos Internos: Incluem o calor gerado por ocupantes, iluminação, equipamentos eletrônicos e processos internos.
- Infiltração e Ventilação: Representam as trocas de ar com o ambiente externo, tanto de forma controlada (ventilação) quanto não controlada (infiltração).
- Cargas Externas: Influenciadas por fatores como radiação solar, variação da temperatura externa e orientação do edifício.
- Características Construtivas do Edifício: O isolamento térmico, os materiais utilizados e o tamanho das aberturas (como janelas) impactam diretamente no ganho ou perda de calor.
- Clima Local: Condições climáticas, como altas temperaturas e umidade elevada.

2.4.1 Calor Sensível

O calor sensível é a quantidade de calor necessária para mudar a temperatura de uma substância sem alterar seu estado físico. É particularmente relevante em processos de climatização, onde o controle da temperatura do ar é fundamental. A quantidade de calor sensível necessária depende da massa da substância, da variação de temperatura e da capacidade calorífica da substância, que pode variar dependendo da sua composição e estado físico ([ASHRAE, 2021](#)).

A fórmula utilizada para calcular o calor sensível é dada por 2.1:

$$\dot{Q}_s = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Onde:

- $\dot{Q}_s$ é a quantidade de calor sensível (em joules);
- $\dot{m}$ é a massa da substância (em kg);
- c_p é a capacidade calorífica específica da substância (em J/kg°C);
- ΔT é a variação de temperatura ($T_f - T_i$, onde T_f é a temperatura final e T_i é a temperatura inicial).

Esse conceito é aplicado em sistemas de climatização, como os sistemas de ar-condicionado, que removem ou fornecem calor sensível para ajustar a temperatura do ambiente. A capacidade de um sistema de resfriamento ou aquecimento em lidar com o calor sensível é uma das suas características mais importantes, pois determina a eficiência do sistema em atingir as temperaturas desejadas ([ASHRAE, 2021](#)).

2.4.2 Calor latente

O calor latente é a quantidade de calor necessária para que uma substância mude seu estado físico (como de sólido para líquido, ou de líquido para gás), sem que haja alteração em sua temperatura. Esse calor é absorvido ou liberado durante a mudança de fase, que pode ocorrer, por exemplo, durante a fusão, a vaporização ou a sublimação de uma substância (SAKAMOTO; MARCONDES, 2017).

Ao contrário do calor sensível, que provoca variação de temperatura em um material, o calor latente é essencial para a mudança de estado sem alterar a temperatura da substância. Por exemplo, quando o gelo derrete, ele absorve calor do ambiente sem que sua temperatura aumente até atingir o ponto de fusão. O mesmo ocorre quando a água ferve para se transformar em vapor (ASHRAE, 2021).

A fórmula utilizada para calcular o calor latente é 2.2:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot h_{fg}(W_f - W_i) \quad (2.2)$$

Onde:

- $\dot{Q}$ é a quantidade de calor latente (Joules);
- $\dot{m}$ é a massa da substância (kg);
- h_{fg} é a entalpia de vaporização da água (kJ/kg);
- W_i é a umidade específica inicial (kg de vapor de água/kg de ar seco);
- W_f é a umidade específica final (kg de vapor de água/kg de ar seco).

Esse conceito é crucial em processos que envolvem mudanças de fase, como no funcionamento de sistemas de climatização. Em um ar-condicionado, por exemplo, o refrigerante passa por mudanças de fase durante o ciclo de resfriamento, absorvendo e liberando calor latente durante a evaporação e a condensação, o que contribui para a remoção de calor do ambiente sem alterar a temperatura do refrigerante de forma significativa (SAKAMOTO; MARCONDES, 2017).

A seguir, apresenta-se a Tabela 1, que consolida as principais contribuições para a carga térmica, com suas respectivas equações abordadas ao longo desta seção.

Tabela 1 – Principais Equações de Cargas Térmicas.

Componente da Carga Térmica	Equação Representativa	Descrição / Parâmetros	Referência
Infiltração / Ventilação	$\dot{Q} = \rho \cdot c_p \cdot \dot{V} (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})$	ρ : densidade do ar [kg/m ³], c_p : calor específico, $\dot{V}$: vazão de ar [m ³ /s]	ASHRAE (2021)
Transmissão pelas Paredes	$\dot{Q} = U \cdot A \cdot (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})$	U : coef. de transmissão térmica [W/m ² · K], A : área da parede [m ²]	CRESESB (2020)
Ganhos Internos - Ocupação	$\dot{Q} = N \cdot q_{\text{ocup}}$	N : n.º de pessoas, q_{ocup} : carga térmica por pessoa [W]	ASHRAE (2021)
Ganhos Internos - Iluminação	$\dot{Q} = P_{\text{ilum}} \cdot F_{\text{uso}} \cdot F_{\text{calor}}$	Potência instalada, fator de uso e fração da potência convertida em calor	ASHRAE (2021)
Ganhos Internos - Equipamentos	$\dot{Q} = \sum P_{\text{equip}} \cdot F_{\text{uso}}$	Soma das potências dos equipamentos com fator de uso considerado	ASHRAE (2021)
Cargas Solares (Radiação)	$\dot{Q} = A_{\text{vidro}} \cdot SHGF \cdot SC \cdot CLF$	Área envidraçada, ganho solar horário, coef. de sombreamento e fator de carga térmica	ASHRAE (2021); CRESESB
Clima Local	—	Parâmetros externos como T_{ext} , umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento etc.	NBR 16401:2024

Fonte: Adaptado de [ASHRAE \(2021\)](#).

2.5 “Mercado de energia”

A regulação tarifária do fornecimento e distribuição de energia elétrica no Brasil, sob a responsabilidade da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), desempenha um papel fundamental na definição das tarifas para os diferentes grupos e subgrupos de consumidores. Essa regulação visa garantir a modicidade tarifária, a qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias e a acessibilidade à energia elétrica para os consumidores, ao mesmo tempo em que assegura a sustentabilidade do setor ([ANEEL, 2024a](#)).

A ANEEL estabelece as tarifas com base em um conjunto de critérios técnicos e econômicos, levando em consideração as classes e subclasses tarifárias, as modalidades de tarifas e os postos tarifários ([AGRESE, 2024](#)). No caso dos consumidores residenciais e comerciais, a regulação tarifária diferencia as condições de consumo, buscando atender às peculiaridades de cada perfil ([ANEEL, 2024a](#)), como mostrado na Tabela 2

2.5.1 Setor Residencial (Grupo B, Subgrupo B1)

O setor residencial no Brasil está classificado no Grupo B, subgrupo B1, que abrange os consumidores de baixa tensão. As tarifas aplicadas a este grupo são estruturadas em

Tabela 2 – Tarifas de aplicação e base econômica para os grupos A e B.

SUBGRUPO	MODALIDADE	POSTO	TARIFAS DE APLICAÇÃO			TARIFAS DE APLICAÇÃO		
			TUSD		TE	TUSD		TE
			R\$/kW	R\$/MWh	R\$/MWh	R\$/kW	R\$/MWh	R\$/MWh
A3 (69kV)	AZUL	P	14,95	71,96	566,41	12,72	77,69	518,11
		FP	12,13	71,96	368,70	10,36	77,69	320,12
	AZUL APE	P	14,95	36,28	0,00	12,72	37,12	0,00
		FP	12,13	36,28	0,00	10,36	37,12	0,00
	SCEE - AZUL	P	14,95	71,96	94,09	12,72	77,69	45,15
		FP	12,13	71,96	94,09	10,36	77,69	45,15
	GERAÇÃO	NA	9,58	0,00	0,00	9,58	0,00	0,00
B1	BRANCA	P	0,00	909,07	568,34	0,00	885,22	520,04
		INT	0,00	641,08	370,62	0,00	629,87	322,05
		FP	0,00	373,10	370,62	0,00	374,52	322,05
	PRÉ-PAGAMENTO	NA	0,00	470,12	387,10	0,00	466,97	338,55
	CONVENCIONAL	NA	0,00	470,12	387,10	0,00	466,97	338,55
	PRÉ-PAGAMENTO	NA	0,00	470,54	383,00	0,00	399,78	334,45
	CONVENCIONAL	NA	0,00	470,54	383,00	0,00	399,78	334,45
	SCEE - BRANCA	P	0,00	909,07	96,01	0,00	886,22	47,08
		INT	0,00	641,08	96,01	0,00	629,87	47,08
		FP	0,00	373,10	96,01	0,00	374,52	47,08
	SCEE - PRÉ-PAGAMENTO	NA	0,00	470,12	96,01	0,00	466,97	47,08
	SCEE - CONVENCIONAL	NA	0,00	470,12	96,01	0,00	466,97	47,08
	SCEE - PRÉ-PAGAMENTO	NA	0,00	470,54	91,91	0,00	399,78	42,97
	SCEE - CONVENCIONAL	NA	0,00	470,54	91,91	0,00	399,78	42,97

Fonte: Adaptado de [ANEEL \(2024a\)](#).

diferentes modalidades, oferecendo opções flexíveis de acordo com o perfil de consumo do usuário ([ANEEL, 2024a](#)).

- Modalidade Convencional: Nesta modalidade, a tarifa de energia elétrica é cobrada de maneira fixa, ou seja, o valor do kWh consumido é o mesmo ao longo do mês, independentemente do horário de utilização ([ANEEL, 2024e](#)). Essa opção é destinada a consumidores residenciais que não têm flexibilidade para modificar o horário de consumo de energia ([ANEEL, 2024a](#)).
- Modalidade Branca: A tarifa branca é caracterizada pela variação do preço de acordo com o horário de consumo. O valor do kWh varia entre horário de ponta, horário intermediário e horário fora de ponta. Os consumidores que optam por essa modalidade podem reduzir seus custos se conseguirem ajustar seus horários de consumo para os períodos de menor demanda, onde as tarifas são mais baixas ([ANEEL, 2024a](#)).
- Modalidade Pré-Pagamento: A modalidade pré-pagamento é semelhante ao sistema de celular pré-pago, no qual o consumidor paga antecipadamente pelo consumo de energia. Essa opção proporciona maior controle sobre os gastos com energia elétrica, permitindo que o consumidor decida quando e quanto consumir, de acordo com o crédito disponível ([ANEEL, 2024d](#)).

2.5.2 Setor Comercial (Grupo A, Subgrupo A3 e A3a)

O setor comercial, que abrange estabelecimentos como supermercados, está classificado no Grupo A, subgrupo A3 ou A3a, destinado a consumidores de média e alta tensão. Esse setor tem acesso a modalidades tarifárias específicas, com custos que variam de acordo com a demanda contratada e os horários de utilização ([ANEEL, 2024a](#)).

- Modalidade Azul: A tarifa azul é voltada para consumidores com grandes demandas de energia, como indústrias e comércios de grande porte. Nessa modalidade, as tarifas são diferenciadas e baseadas na demanda contratada e no consumo de energia. Além disso, os preços do kWh variam de acordo com o período do dia, com o objetivo de refletir os custos de geração e distribuição de energia em diferentes horários ([ANEEL, 2024a](#)).
- Modalidade Verde: A tarifa verde é aplicada aos consumidores do setor comercial que têm um consumo regular e previsível. As tarifas de consumo de energia variam ao longo do dia, mas a demanda de potência permanece constante, sendo cobrada uma tarifa fixa para o consumo de energia elétrica, independentemente da hora em que for utilizada ([ANEEL, 2024b](#)). ([ANEEL, 2024a](#)).
- Modalidade de Distribuição: Os consumidores comerciais também podem estar sujeitos a tarifas relacionadas ao uso do sistema de distribuição. Essa modalidade tem como objetivo cobrir os custos operacionais das distribuidoras, que são responsáveis por transportar a energia até o ponto de consumo ([ANEEL, 2024a](#)).
- Modalidade de Geração: A tarifa de geração é voltada para consumidores de alta demanda que negociam diretamente com os fornecedores de energia elétrica. Nessa modalidade, o preço da energia gerada é acordado entre o consumidor e a geradora, refletindo os custos de produção da energia ([ANEEL, 2024c](#)).

2.6 Análise de viabilidade econômica

Com o intuito de analisar se o investimento é vantajoso, os métodos que mais se destacam em uma pesquisa incluem o *PayBack* (tempo de retorno), Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL) e o Índice de Lucratividade (IL) ([FASSIMA; OUTROS, 2006](#)).

De acordo com [Penedo \(2005\)](#), o método do *Payback* é uma técnica relativamente simples e amplamente adotada na análise de investimentos. Sua principal finalidade é calcular o tempo necessário para que um projeto recupere o investimento inicial. Esse método avalia o tempo de retorno do capital inicial, considerando os fluxos de caixa gerados ao longo da operação. O *Payback* simples fornece o período (em meses ou anos)

necessário para que o desembolso inicial seja completamente recuperado. Para que um projeto seja aceito, um dos critérios pode ser que o período de *Payback* seja inferior ou igual ao prazo máximo aceitável definido pela organização. O cálculo é dado pela equação 2.3, considerando um caixa uniforme.

$$\text{Payback Simples} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Fluxo de Caixa Anual}} \quad (2.3)$$

No entanto, o método do *Payback* simples não considera o valor do dinheiro no tempo, o que pode gerar distorções, especialmente em análises de longo prazo. Para corrigir essa limitação, utiliza-se o *Payback* descontado, que incorpora uma taxa de desconto para trazer os fluxos de caixa futuros ao valor presente, como mostrado na equação 2.4. Dessa forma, é possível obter uma análise mais precisa do tempo de retorno do investimento (ALMEIDA, 2021).

$$\text{Payback Descontado} = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} \quad (2.4)$$

- **FC_t**: Fluxo de caixa no período *t*;
- **TMA**: Taxa mínima de atratividade;
- **t**: Período em anos.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é uma métrica financeira utilizada para avaliar a viabilidade de um investimento. Ela representa a taxa de desconto que equilibra o valor presente dos fluxos de caixa futuros com o investimento inicial, resultando em um Valor Presente Líquido (VPL) de zero, como mostra a equação 3.2. Em termos simples, a TIR é a taxa de retorno que o projeto gera ao longo de sua duração, considerando o tempo e o risco. Se a TIR de um projeto for superior à taxa de retorno mínima exigida pelo investidor, geralmente o Custo de Capital, significa que o investimento é financeiramente viável e deve ser considerado. Caso contrário, se a TIR for menor que a taxa requerida, o projeto gerará um valor presente líquido negativo, o que indica que o investimento deve ser rejeitado (ROSS; WESTERFIELD; JAFFE, 2015).

$$VPL = -I + \frac{FC_1}{(1 + TMA)^1} + \frac{FC_2}{(1 + TMA)^2} + \dots + \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} \quad (2.5)$$

Onde:

- **I**: Investimento inicial;

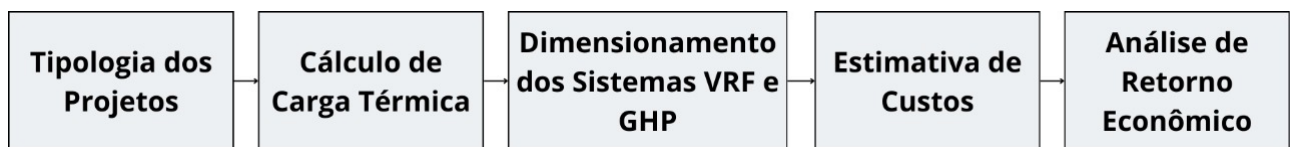
- **FC_t**: Fluxo de caixa no período t ;
- **TMA**: Taxa mínima de atratividade.

Finalmente, o Índice de Lucratividade (IL) surge como um indicador fundamental para avaliar se uma empresa gerou retornos adequados para justificar os recursos investidos no lançamento de um novo projeto. O cálculo do IL é realizado dividindo-se o Valor Presente Líquido (VPL) do período analisado, excluindo o investimento inicial, pelo próprio investimento inicial. Quando esse índice é igual ou superior a 1, refletindo a solidez financeira da empresa, isso demonstra que os retornos obtidos superaram ou igualaram os investimentos iniciais, tanto financeiros quanto físicos, realizados na empreitada (PENEDO, 2005).

3 Metodologia

A análise considera aspectos relacionados a custos de instalação, operação, manutenção e eficiência energética, com base em dados coletados junto a fabricantes, fornecedores e tarifas locais de energia elétrica e gás natural. O sistema de avaliação busca oferecer suporte a profissionais e tomadores de decisão no setor, promovendo escolhas mais alinhadas às necessidades econômicas e energéticas da região. O fluxo geral do desenvolvimento pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Autor (2025).

3.1 Tipologia dos Projetos

Para a seleção dos edifícios utilizados neste trabalho, foram escolhidas seis plantas fornecidas por uma empresa de engenharia local, especializada em ar condicionado: três residências e três comércios, conforme Tabela 3. As residências, todas classificadas como de alto padrão, foram selecionadas com base em suas dimensões para representar diferentes níveis de consumo energético - pequeno, médio e grande porte. Os comércios não apenas variaram em tamanho mas também levaram em consideração o público-alvo e as diferenças que isso pode implicar nos fatores de carga térmica segundo a NBR 16401/2 (2024).

A seleção dessas edificações foi realizada de forma a representar uma amostra diversificada que abrange diferentes condições de operação e consumo. Isso aconteceu sem precisar abordar explicitamente a localização das construções ou as variações significativas nas condições climáticas, já que elas seguem parâmetros gerais estabelecidos para a região de Manaus pela norma mencionada. As edificações são climatizadas, o que facilita a análise comparativa com os sistemas propostos, embora inicialmente não estejam adaptadas para os sistemas VRF ou GHP.

Este conjunto de edificações é representativo dos diferentes perfis de consumo encontrados na cidade, possibilitando uma abordagem diversificada para o estudo da viabilidade econômica e energética dos sistemas. Além disso, a segmentação em diversos tamanhos e categorias (residenciais e comerciais) busca oferecer uma visão ampla do impacto que

essas tecnologias podem ter em Manaus, onde há alta demanda por climatização devido às características climáticas locais. As plantas podem ser visualizadas no Anexo 5

Tabela 3 – Áreas Climatizadas por Tipologia.

TIPOLOGIA	PADRÃO	ÁREA CLIMATIZADA (m ²)	ÁREA BRUTA (m ²)
RESIDENCIAL	Padrão 1	166,3	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 (2025).

3.2 Cálculo de Carga Térmica

A estimativa da carga térmica para os edifícios em estudo foi feita utilizando um *software* especializado que atende aos parâmetros técnicos e normativos estabelecidos pela NBR-16401/2 (2024) e pelo padrão *ASHRAE Standard* 90.1, assegurando precisão e confiabilidade nos resultados obtidos. Esse *software* realiza a simulação do perfil de carga térmica horária mensal ao longo de todo o ano, considerando as variações sazonais, ocupacionais e operacionais dos edifícios. A partir dessa simulação, é possível determinar a carga térmica de pico, que serve como base para o dimensionamento dos sistemas de climatização.

De acordo com as normativas supracitadas, as condições internas de conforto térmico são determinadas para garantir um ambiente climatizado eficiente e confortável. Essas condições apresentam um intervalo de variabilidade, conforme ilustrado na Tabela 4, que estabelece parâmetros gerais com base em estudos e normas internacionais.

Tabela 4 – Parâmetros de Conforto Térmico.

Condições Internas do Ar	Valores
TBS	23,5 °C a 26,1 °C
Umidade relativa	30% a 60%

Fonte: Adaptada de NBR-16401/2 (2024).

Contudo, para este trabalho, foi adotado um padrão específico, apresentado na Tabela 5. Essa escolha visa compatibilizar a análise com os objetivos do estudo, garantindo maior precisão no cálculo da carga térmica e na modelagem dos sistemas propostos.

Tabela 5 – Parâmetros adotados.

Condições Internas do Ar	Valores
TBS	24 °C
Umidade relativa	50%

Fonte: Adaptada de NBR-16401/2 (2024).

Considerando as condições climáticas específicas da região de Manaus, adotou-se como ponto de referência geográfico a localidade do Aeroporto Internacional Eduardo Gomes para o cálculo da carga térmica e o dimensionamento dos sistemas. As variáveis geográficas e climáticas dessa área foram obtidas a partir de dados normativos da NBR 16401/1:2024. A Tabela 6 apresenta os dados geográficos correspondentes, utilizados como base para os cálculos no *software*.

Tabela 6 – Parâmetros geográficos e climáticos de Eduardo Gomes, Manaus.

Fator	Valor
Latitude	3° S
Longitude	60° W
Elevação	81 m
Temperatura de Projeto (Bulbo Seco)	35,9°C
Temperatura de Projeto (Bulbo Úmido)	26,3°C
Variação Média de Temperatura	9,8°C
Temperatura de Bulbo Seco Mínima	21,8°C

Fonte: Adaptada de NBR-16401/2 (2024).

3.3 Dimensionamento dos Sistemas VRF e GHP

O dimensionamento dos sistemas de climatização foi efetuado com base nas cargas térmicas de pico calculadas anteriormente, seguindo a metodologia detalhada na seção anterior. Para a escolha dos equipamentos foi utilizado o *software* de uma empresa fabricante de VRFs e GHPs, que é especializado na seleção de unidades evaporadas e condensadoras, para ambos os sistemas.

3.3.1 Seleção das Unidades Internas

Visando padronizar as unidades internas, adota-se os seguintes critérios:

- Para as residências, foram selecionadas unidades internas do tipo *Hi-Wall* e Cassete 4 vias, de acordo com o tamanho e a carga térmica de cada ambiente;

- As unidades *Hi-Wall* foram utilizadas em ambientes menores, pois possuem uma capacidade de climatização mais adequada para atender os limites de carga térmica desses espaços;
- As unidades Cassete 4 vias foram empregadas em áreas mais amplas ou com maior carga térmica, proporcionando uma distribuição de ar mais eficiente e uniforme;
- Para os comércios, todos os ambientes contaram com unidades internas Duto de alta pressão, considerando insuflamento direto. Isso se deve à maior necessidade de climatização em espaços amplos e à exigência de distribuir o ar eficientemente em áreas com grande fluxo de pessoas.

3.3.2 Seleção das Unidades Externas

Utilizando, novamente, o *software* supracitado para dimensionar as unidades externas. Considerou-se a soma das cargas térmicas de todos os ambientes climatizados. Isso assegura que a capacidade instalada seja adequada para suprir as demandas de cada planta. Essa metodologia leva em conta a simultaneidade dos sistemas VRF (*Variable Refrigerant Flow*) e GHP (*Gas Heat Pump*), ajustada até 130%. Essa decisão garante que o sistema consiga suportar todas as demandas térmicas planejadas, mesmo nas condições de uso máximo, eliminando assim o risco de falta na capacidade fornecida. A simultaneidade total pressupõe que em qualquer instante todas as unidades internas possam operar no máximo desempenho, assegurando um conforto térmico constante e a flexibilidade necessária para atender a diferentes padrões de utilização.

3.4 Estimativa de Custos

A análise de custos foi desenvolvida considerando os principais componentes que impactam a implementação e a operação dos sistemas VRF (*Variable Refrigerant Flow*) e GHP (*Gas Heat Pump*). Os custos foram organizados em quatro categorias principais: equipamentos, materiais de instalação, mão de obra, e operação e manutenção ao longo de 10 anos, equivalente a vida útil dos equipamentos. Essa abordagem busca garantir uma visão abrangente das despesas associadas a cada sistema, fornecendo subsídios para a avaliação de viabilidade econômica.

Os custos dos equipamentos foram obtidos diretamente dos fabricantes e incluem as unidades internas e externas para os sistemas VRF e GHP. Para cada uma das plantas analisadas, as cargas térmicas previamente calculadas serviram como base para o dimensionamento e seleção dos equipamentos. A seleção considerou modelos compatíveis com as demandas específicas de cada planta, diferenciando entre as categorias residencial e comercial.

E, os custos de materiais e instalação foram levantados junto a fornecedores locais, refletindo as condições específicas do mercado de Manaus. Esses custos incluem itens como tubulações, conexões, isolamento térmico, suportes e acessórios necessários para a instalação dos sistemas. A mão de obra foi considerada com base em cotações regionais para técnicos especializados em sistemas de climatização.

Por último, os custos de operação incluem as tarifas de energia elétrica (Tabelas 7 e 8) e gás natural aplicáveis a Manaus (Tabela 9), conforme reguladas pela ANEEL, ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) e outros órgãos competentes. Para estimar o consumo de gás natural, foi utilizada a equação 3.1, onde o consumo horário de energia em kW é convertido em volume de combustível (m^3) com base no poder calorífico inferior do gás. Neste estudo, adotou-se um valor de $\text{PCI}=8.600\text{kcal}/\text{m}^3$, representativo do gás natural distribuído na região. A manutenção foi estimada com base em tabelas fornecidas por empresas do setor, considerando inspeções regulares, substituição de peças e eventuais reparos. Os valores foram projetados para um período de 10 anos, alinhados com o horizonte de análise de viabilidade econômica.

Tabela 7 – Tarifa para Grupo A 2024/2025.

GRUPO	SUBGRUPO	MODALIDADE	POSTO	2024/2025
				R\$/kWh
A	A3	Azul	P	0,638370
			FP	0,440660

Fonte: Adaptado de [AME \(2025\)](#).

Tabela 8 – Tarifa de Energia para o Grupo B1 Residencial Convencional em 2024/2025.

GRUPO	SUBGRUPO	MODALIDADE	CLASSE	SUBCLASSE	POSTO	2024/2025
						R\$/kWh
B	B1	CONVENCIONAL	RESIDENCIAL	RESIDENCIAL	NA	0,857220

Fonte: Adaptado de [AME \(2025\)](#).

Tabela 9 – Tarifa do Gás Natural Canalizado (Tabela Tarifária 09/2025).

Aplicação	Faixa de consumo		Tarifa com impostos (R\$/m ³)
	Mínima	Máxima	
Comercial e industrial baixo consumo	1	6.000	4,0501
	6.001	15.000	3,9329
	15.001	30.000	3,8171
Residencial - consumo coletivo	-	-	4,1225
Comercial: Cogeração, climatização e geração própria de energia	1	6.000	3,3673
	6.001	15.000	3,3295
	15.001	30.000	3,2802

Fonte: Adaptado de [Cigás \(2025\)](#).

$$Pot = Q \cdot PCI \quad (3.1)$$

Onde:

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

3.5 Análise de Retorno Econômico

A análise de retorno econômico foi desenvolvida para comparar os sistemas de climatização VRF (*Variable Refrigerant Flow*) e GHP (*Gas Heat Pump*) considerando o custo-benefício ao longo de 10 anos. A abordagem baseia-se na métrica de Valor Presente Líquido (VPL) levando em consideração uma depreciação, vista na equação 3.2, buscando refletir as condições reais de viabilidade econômica.

Para o cálculo do VPL, a taxa de desconto foi considerada como 80% da taxa Selic projetada para o ano de 2025. Esta escolha buscou refletir uma taxa de atratividade mais alinhada ao perfil de risco específico de projetos de eficiência energética, que tendem a apresentar menor volatilidade em comparação com investimentos de mercado mais agressivos, além de estar compatível com práticas recomendadas em estudos de viabilidade econômica no setor de climatização.

O valor residual dos sistemas foi estimado entre 30% e 35% do custo dos equipamentos, conforme informações fornecidas pelos fabricantes. Contudo, para fins deste estudo, foi adotado um valor conservador de 30% do custo apenas dos equipamentos, com

o objetivo de evitar a superestimação dos benefícios econômicos ao final da vida útil do sistema.

Os resultados serão apresentados por meio de tabelas e gráficos comparativos, destacando o desempenho econômico dos sistemas VRF e GHP para cada planta analisada. Essas análises permitirão identificar o tempo de retorno do investimento para cada cenário e compreender quais fatores exercem maior influência na viabilidade econômica.

Os dados finais da análise serão discutidos para determinar as condições em que cada sistema apresenta vantagens econômicas. Esse estudo oferecerá subsídios tanto para a tomada de decisão quanto para pesquisas futuras na área de climatização em Manaus.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} + I_0 - \frac{VR}{(1+i)^n} \quad (3.2)$$

Onde:

- FC_t = Fluxo de caixa no período t
- n = Vida útil do projeto (em anos)
- i = Taxa de desconto ou (TMA)
- VR = Valor residual no final do período
- I_0 = Investimento inicial

4 Resultados

Neste capítulo, são apresentados os principais resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho. Primeiramente, apresenta-se o levantamento da carga térmica de pico das edificações analisadas, etapa essencial para garantir o dimensionamento correto dos sistemas de climatização. Na sequência, é realizado o dimensionamento dos sistemas VRF e GHP, considerando as demandas específicas de cada edificação. Posteriormente, são expostos os dados comparativos relacionados aos custos de aquisição, instalação, operação e manutenção dos sistemas. Por fim, são apresentados e discutidos os resultados da análise econômica comparativa, que visa avaliar a viabilidade financeira de cada alternativa, considerando seu desempenho técnico e os custos ao longo do período de análise.

4.1 Variação de Carga Térmica

4.1.1 Perfil Horário

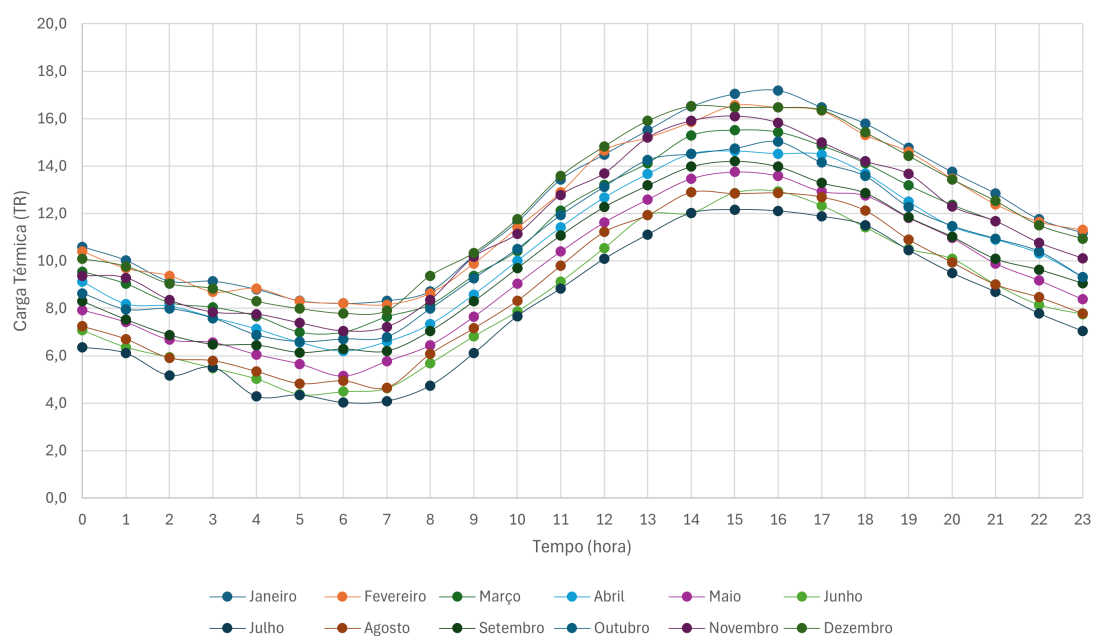
A simulação da carga térmica foi realizada considerando o perfil horário de operação das edificações ao longo dos 12 meses do ano. Esse perfil permite avaliar a variação da demanda térmica hora a hora, refletindo as influências das condições climáticas, ocupação e envelope construtivo.

As Figuras 8, 9 e 10 mostram os perfis horários da carga térmica (TR) ao longo dos meses para os três padrões avaliados nas edificações residenciais. Nota-se que o comportamento é relativamente consistente entre os padrões, com menores cargas térmicas nas primeiras horas do dia e elevação gradual a partir do final da manhã. Os picos de carga térmica ocorrem em horários distintos para cada padrão: nos Padrões 1 e 2, os picos se concentram entre 15h e 17h, enquanto no Padrão 3 ocorrem entre 16h e 18h. Essas diferenças refletem a influência direta da orientação das plantas das edificações, que afeta o ganho térmico solar ao longo do dia.

Já nas edificações comerciais (Figuras 11, 12 e 13), observa-se um comportamento mais pronunciado da carga térmica ao longo do dia, com valores significativamente mais elevados que os residenciais, especialmente nos horários de pico. As curvas apresentam rápida elevação a partir do início da jornada de trabalho, com máximos que variam conforme o padrão: nos Padrões 1 e 2, os picos ocorrem entre 12h e 14h, enquanto no Padrão 3 se concentram entre 13h e 15h. Essas variações também estão diretamente relacionadas à orientação das plantas arquitetônicas e à exposição solar, que influencia de maneira significativa o momento de maior ganho térmico nas diferentes tipologias comerciais. Tal comportamento reforça a necessidade de análises específicas por tipologia

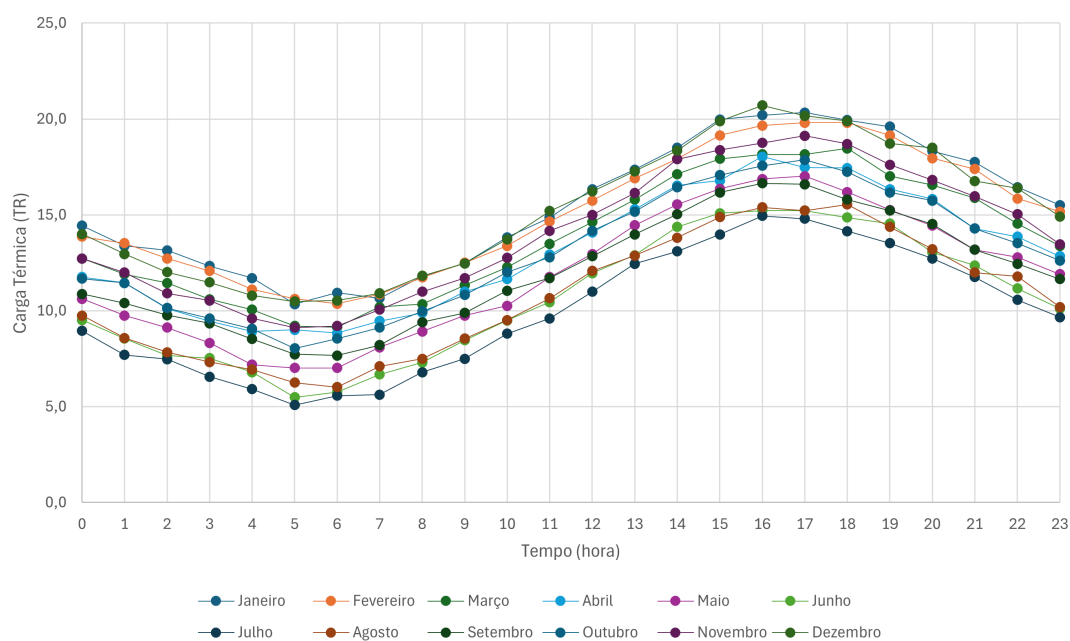
e orientação solar para um dimensionamento mais preciso dos sistemas de climatização.

Figura 8 – Perfil Horário da Carga Térmica (TR) em Dias Típicos Mensais – Planta Residencial, Padrão 1.



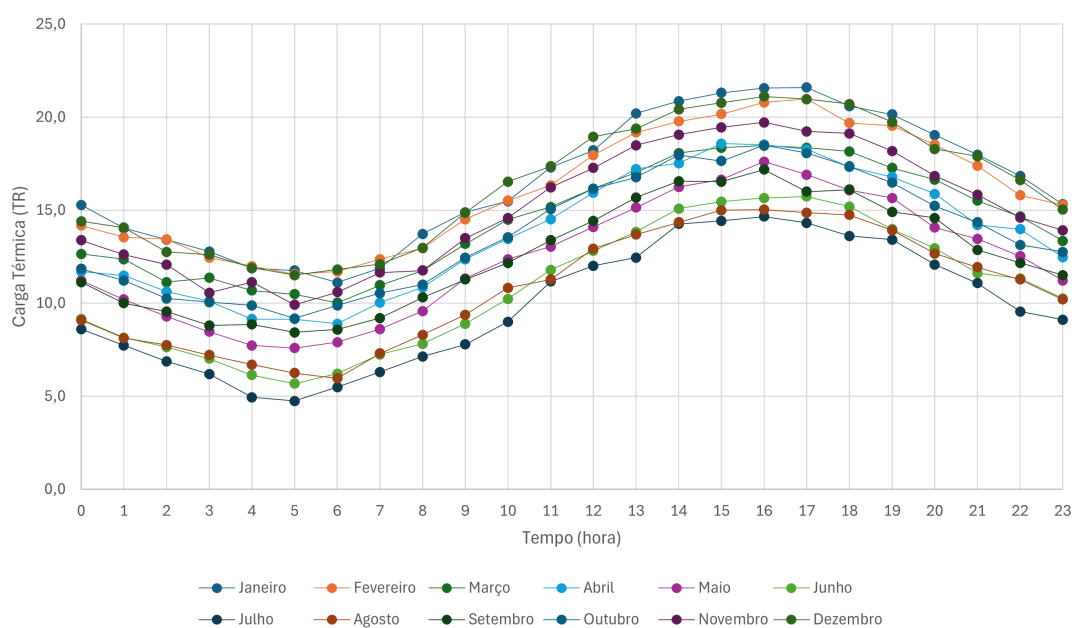
Fonte: Autor (2025).

Figura 9 – Perfil Horário da Carga Térmica (TR) em Dias Típicos Mensais – Planta Residencial, Padrão 2.



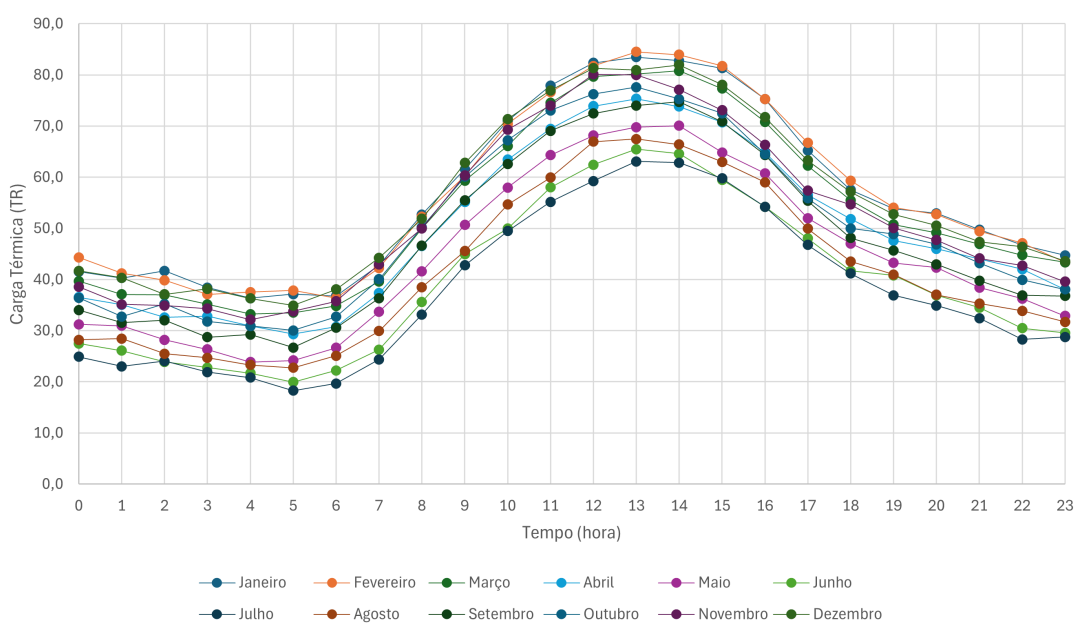
Fonte: Autor (2025).

Figura 10 – Perfil Horário da Carga Térmica (TR) em Dias Típicos Mensais – Planta Residencial, Padrão 3.



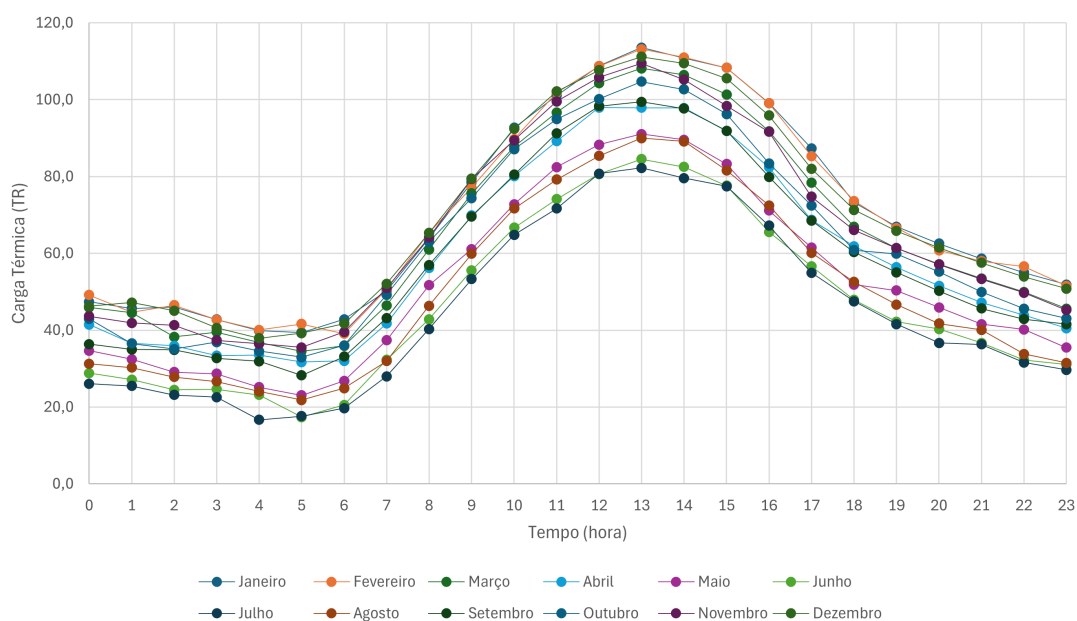
Fonte: Autor (2025).

Figura 11 – Perfil Horário da Carga Térmica (TR) em Dias Típicos Mensais – Planta Comercial, Padrão 1.



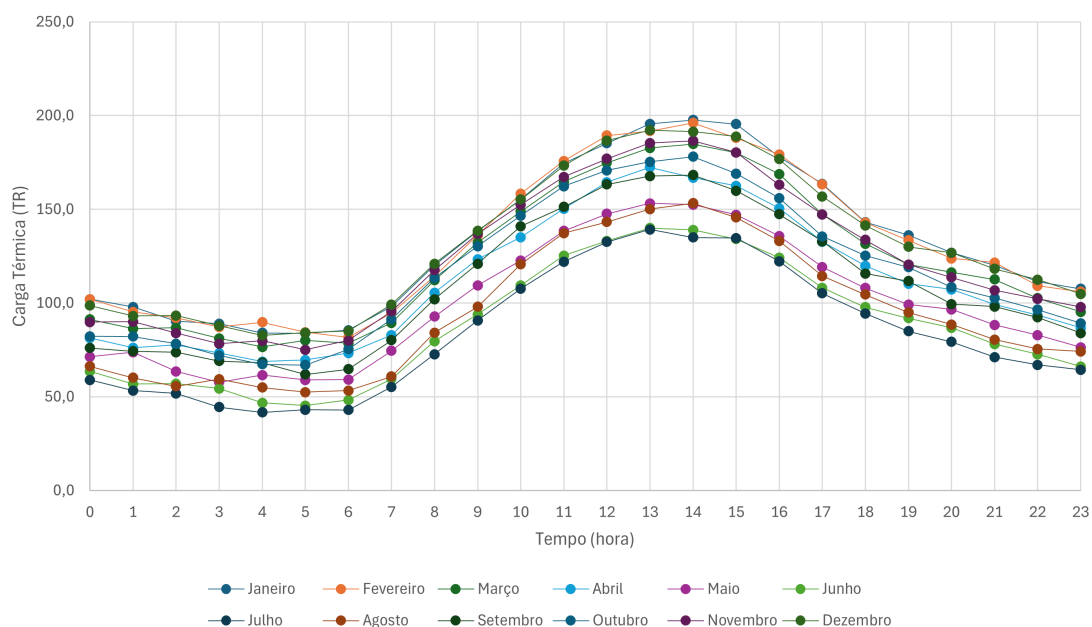
Fonte: Autor (2025).

Figura 12 – Perfil Horário da Carga Térmica (TR) em Dias Típicos Mensais – Planta Comercial, Padrão 2.



Fonte: Autor (2025).

Figura 13 – Perfil Horário da Carga Térmica (TR) em Dias Típicos Mensais – Planta Comercial, Padrão 3.

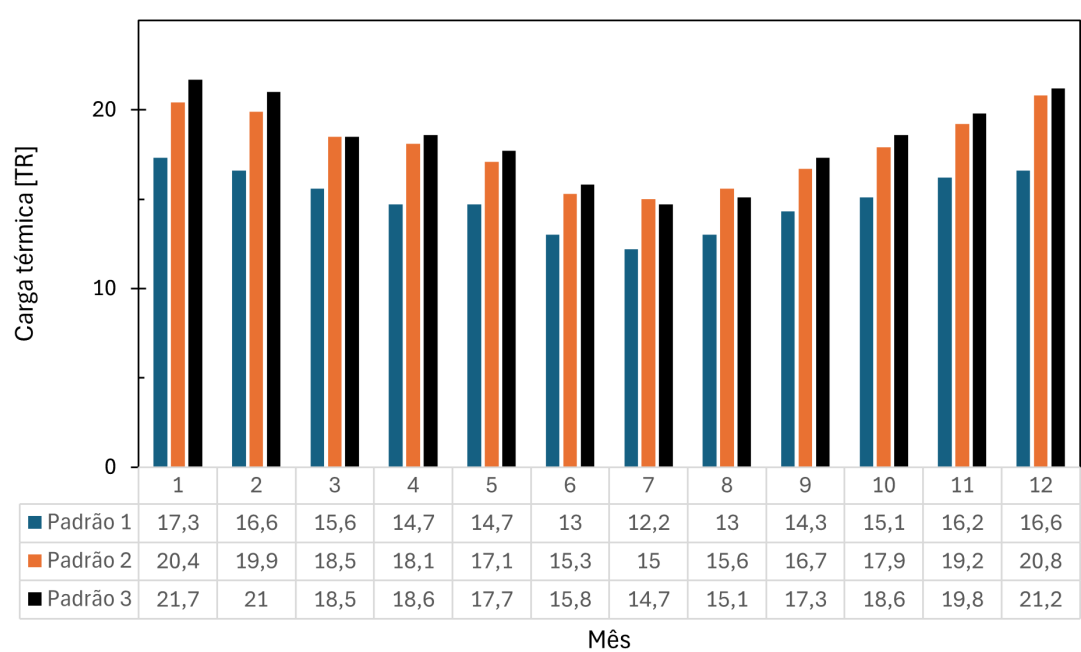


Fonte: Autor (2025).

4.1.2 Carga Térmica de Pico

As Figuras 14 e 15, a seguir, apresentam a variação da carga térmica mensal de pico considerando um perfil horário, em toneladas de refrigeração (TR), ao longo dos 12 meses do ano, para os cenários residencial e comercial, considerando três padrões distintos de densidade ocupacional, área a ser climatizada e envelope construtivo para cada planta.

Figura 14 – Carga Térmica de Pico de Edificações Residenciais.



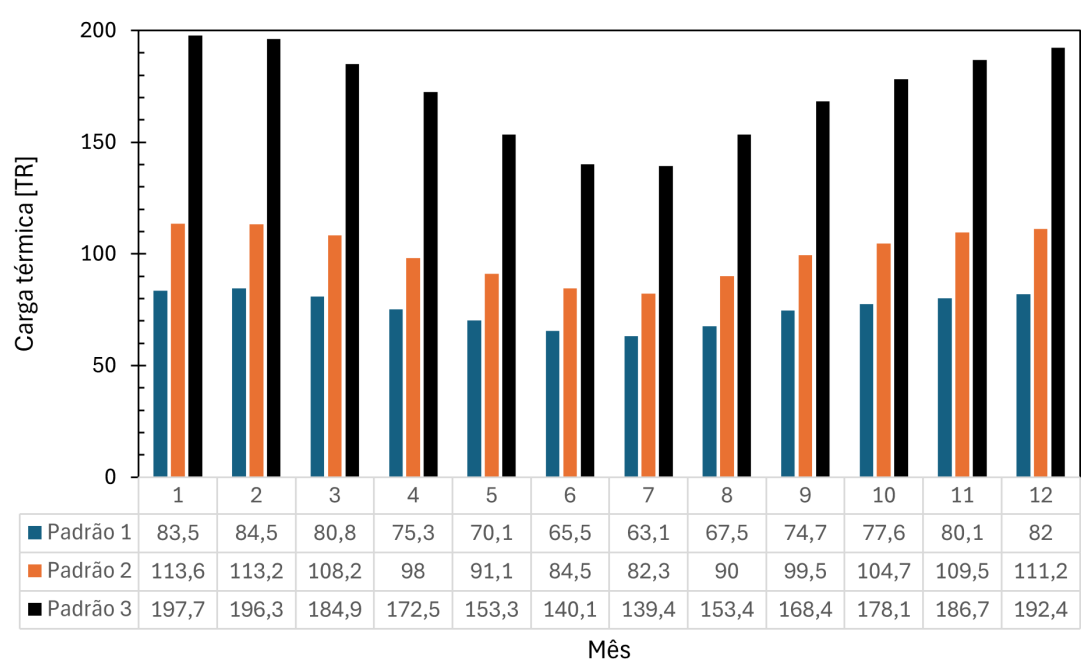
Fonte: Autor (2025).

Na Figura 14, é apresentada a carga térmica mensal para o setor residencial. Observa-se que o Padrão 3 apresenta as maiores demandas térmicas, atingindo picos próximos de 21 TR nos meses mais críticos. Contudo, a variação da carga térmica ao longo dos meses é menos acentuada, refletindo o comportamento mais constante do uso residencial. As cargas térmicas são consideravelmente menores quando comparadas ao setor comercial, o que é esperado devido à menor área e densidade de ocupação, consequentemente, menor geração interna de calor nas residências.

Ao comparar os diferentes padrões construtivos, nota-se que o Padrão 2 apresenta, em média, cargas de pico 17,6% maiores que o Padrão 1, enquanto o Padrão 3 se mostra ainda mais exigente, com cargas 18,8% superiores ao Padrão 2. Quando comparado diretamente ao Padrão 1, o Padrão 3 apresenta uma média de 39,3% a mais em termos de carga térmica de pico. Esses aumentos refletem a influência direta das características construtivas e dos níveis de conforto adotados, que impactam significativamente na demanda térmica das edificações residenciais.

Embora o Padrão 3 normalmente apresente os maiores valores, há exceções pontuais que merecem destaque. No mês 3, por exemplo, as cargas térmicas de pico dos Padrões 2 e 3 foram idênticas (18,5 TR), evidenciando uma condição de equivalência térmica entre os modelos, possivelmente influenciada por um regime de insolação e ventilação que equiparou a carga térmica dos padrões. Já no mês 7, observa-se um comportamento atípico: o Padrão 2 ultrapassa o Padrão 3 em carga térmica (15,6 TR contra 14,7 TR). Essa diferença pode ser explicada por fatores climáticos sazonais e pela posição geográfica da edificação, que afetam diretamente a incidência solar nas construções. Em determinadas épocas do ano, a trajetória solar e a orientação do edifício podem favorecer um maior ganho solar em padrões com menor isolamento ou maior exposição, como pode ocorrer no Padrão 2. Além disso, variações na cobertura vegetal ao redor, sombreamento natural ou artificial e diferenças no coeficiente de absorção dos materiais de fachada contribuem para esse comportamento específico, revelando a complexidade do desempenho térmico sazonal em edificações residenciais

Figura 15 – Carga Térmica de Pico Edificações Comerciais.



Fonte: Autor (2025).

Na Figura 15, observa-se o comportamento da carga térmica para o setor comercial. O Padrão 3 se destaca por apresentar os maiores valores ao longo do ano, superando 190 TR nos meses de maior demanda, como janeiro, fevereiro e dezembro. Esse padrão representa edificações comerciais com maior área e alta densidade de ocupação. O Padrão 2 apresenta valores intermediários, enquanto o Padrão 1 reflete as menores cargas térmicas,

associado a edificações menores. De maneira geral, observa-se uma redução da carga térmica nos meses de meio de ano (junho, julho e agosto), condizente com as variações climáticas sazonais, mesmo em regiões de clima predominantemente quente, como Manaus.

A análise das cargas térmicas de pico, conforme mostrado na Tabela 10, impacta diretamente a escolha, o dimensionamento e a quantidade de equipamentos necessários para atender cada demanda. No setor residencial, é possível observar que a carga térmica varia de 17,3 TR na Planta Padrão 1 até 21,7 TR na Planta Padrão 3. Isso representa um aumento aproximado de 25% entre a menor e maior planta. Esse dado demonstra que à medida que o tamanho das plantas aumenta cresce proporcionalmente também a necessidade por equipamentos com maior capacidade.

Tabela 10 – 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 (2025).

Já, no setor comercial, essa variação é ainda mais significativa. A carga térmica aumenta de 84,6 TR na Planta Padrão 1 para 197,8 TR na Planta Padrão 3, correspondendo a um crescimento de cerca de 134%. Esse aumento expressivo demanda sistemas de climatização mais robustos em termos tanto da capacidade quanto do número de unidades.

Dessa forma, a compreensão das variações nas cargas térmicas de pico é fundamental para o dimensionamento adequado dos sistemas de climatização, assegurando a eficiência operacional, o desempenho térmico satisfatório e o atendimento pleno às exigências de conforto ambiental.

4.2 Dimensionamento dos Sistemas

4.2.1 Unidades Condensadoras e Evaporadoras

O dimensionamento dos sistemas VRF e GHP, apresentado na Tabela 11, foram realizados com auxílio de *software* especializado de acordo com as cargas térmicas de pico de cada tipologia e planta. A configuração das unidades condensadoras e evaporadoras reflete diretamente as demandas térmicas específicas dos ambientes, considerando tanto aplicações residenciais quanto comerciais.

Nas plantas residenciais, observa-se que a quantidade de unidades é relativamente menor, uma vez que as cargas térmicas variam entre 17,3 TR e 21,7 TR. As unidades evaporadoras escolhidas predominam nos modelos *Hi-Wall*, combinadas com algumas unidades Cassete 4 vias, adequadas para garantir uma melhor distribuição do ar em ambientes de maiores dimensões ou com características específicas de *layout*.

Na tipologia comercial, onde as cargas térmicas são significativamente maiores (variando de 84,6 TR até 197,8 TR), verifica-se uma predominância das unidades evaporadoras do tipo Duto, que são mais indicadas para atender grandes volumes, possibilitando integração com projetos de forro e distribuição homogênea do ar. As unidades condensadoras, tanto para VRF quanto para GHP, são agrupadas conforme a necessidade de atender essas maiores demandas, chegando, na Planta Padrão 3 comercial, a uma configuração de até 5 unidades condensadoras (1 de 40 HP e 4 de 64 HP).

Tabela 11 – Detalhamento das Unidades Condensadoras e Evaporadoras

TIPOLOGIA	PLANTA	UNIDADES CONDENSADORAS	UNIDADES EVAPORADORAS
RESIDENCIAL	Padrão 1	1x 20 HP	1x Hi-Wall – 19.100 Btu/h 2x Hi-Wall – 24.200 Btu/h 1x Hi-Wall – 30.000 Btu/h 1x Hi-Wall – 36.000 Btu/h
	Padrão 2	1x 25 HP	2x Cassete 4 Vias – 54.100 Btu/h 1x Hi-Wall – 12.300 Btu/h 1x Hi-Wall – 15.400 Btu/h 1x Hi-Wall – 30.000 Btu/h 1x Hi-Wall – 30.000 Btu/h 3x Cassete 4 Vias – 19.100 Btu/h 3x Cassete 4 Vias – 54.100 Btu/h
	Padrão 3	1x 28 HP	1x Hi-Wall – 12.300 Btu/h 2x Hi-Wall – 15.400 Btu/h 1x Hi-Wall – 24.200 Btu/h 3x Cassete 4 Vias – 19.100 Btu/h 3x Cassete 4 Vias – 54.100 Btu/h
COMERCIAL	Padrão 1	2x 64 HP	2x Duto – 48.000 Btu/h 3x Duto – 60.000 Btu/h 1x Duto – 96.000 Btu/h
	Padrão 2	1x 40 HP, 2x 64 HP	1x Duto – 54.000 Btu/h 14x Duto – 60.000 Btu/h 10x Duto – 96.000 Btu/h
	Padrão 3	1x 25 HP, 4x 64 HP	1x Duto – 54.000 Btu/h 1x Duto – 76.000 Btu/h 26x Duto – 96.000 Btu/h

Fonte: Autor (2025).

É importante destacar que o dimensionamento adotado, tanto para VRF quanto para GHP, seguiu critérios técnicos de atendimento à carga térmica, conforto ambiental e características arquitetônicas dos projetos, garantindo que ambos os sistemas estejam adequadamente configurados para oferecer desempenho eficiente e confiável. Para manter a coerência técnica da pesquisa, todas as unidades condensadoras e evaporadoras foram selecionadas de um mesmo fabricante, assegurando homogeneidade nos parâmetros técnicos

e operacionais.

Adicionalmente, ressalta-se que a diferença entre os sistemas VRF e GHP está restrita exclusivamente às unidades condensadoras, uma vez que no GHP estas operam com motor movido a gás natural, enquanto no VRF são elétricas. Entretanto, essa diferença não altera a capacidade nominal dos sistemas, mantendo-se equivalentes. As unidades evaporadoras permanecem exatamente as mesmas para ambas as tecnologias, uma vez que são responsáveis apenas pela expansão e distribuição do fluido refrigerante no ambiente, sem qualquer alteração quanto à fonte de energia da unidade condensadora.

4.2.2 Infraestrutura Frigorífica

A Tabela 12 apresenta os comprimentos totais das tubulações de cobre para cada tipologia e planta, discriminados por bitola. Esses dados refletem diretamente as demandas físicas de interligação entre unidades condensadoras e evaporadoras, considerando as particularidades de cada projeto.

Observa-se que as plantas residenciais possuem uma infraestrutura frigorífica mais simples, com menor quantidade de tubulações e utilização de bitolas menores. Já nas plantas comerciais, os comprimentos são significativamente maiores e exigem bitolas de maior diâmetro, devido às maiores cargas térmicas e distâncias envolvidas.

Toda a tubulação foi considerada com isolamento térmico em espuma elastomérica de 9 mm de espessura, conforme as recomendações do manual de instalação do fabricante, atendendo aos requisitos de desempenho térmico e controle de condensação.

Importante destacar que, tanto para os sistemas VRF quanto para GHP, a configuração da infraestrutura frigorífica permanece a mesma, uma vez que a diferença entre as tecnologias se limita às unidades condensadoras, sem impacto sobre as unidades internas e a rede de tubulações.

Tabela 12 – Comprimento da tubulação por tipologia e planta, em metros.

TIPOLOGIA	PLANTA	1/4"	3/8"	1/2"	5/8"	3/4"	7/8"	1 1/8"	1 3/8"	1 5/8"	1 3/4"
RESIDENCIAL	Padrão 1	3	24	9	24	3	3	12	-	-	-
	Padrão 2	14	23	16	32	6	-	8	9	-	-
	Padrão 3	17	16	23	10	15	6	9	12	-	-
COMERCIAL	Padrão 1	-	42	6	6	28	42	6	16	12	6
	Padrão 2	-	54	6	18	54	48	24	27	15	6
	Padrão 3	-	149	23	43	63	138	23	43	40	12

Fonte: Autor (2025).

4.3 Curvas de Consumo

Com o dimensionamento definido, foi necessário realizar o ajuste de curva de consumo das unidades condensadoras, tanto para os sistemas GHP quanto para os sistemas VRF. Este procedimento teve como objetivo representar de forma precisa o comportamento do consumo de energia em função da simultaneidade de operação, etapa essencial para a posterior análise dos custos operacionais.

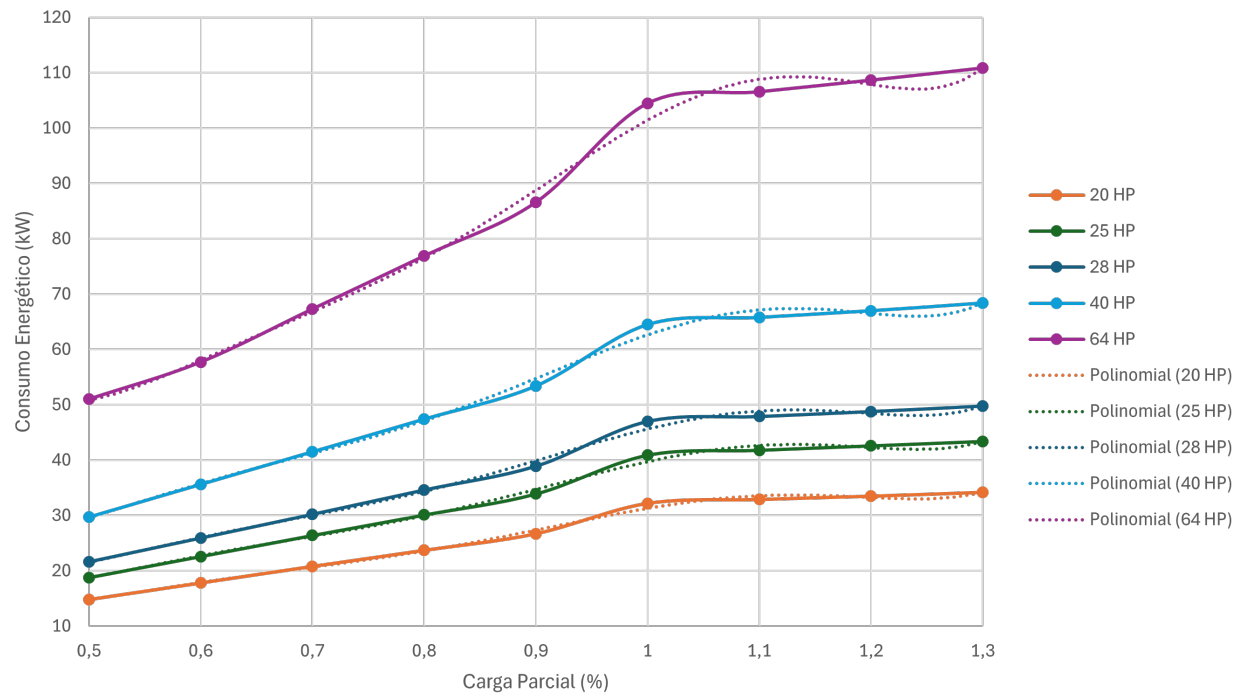
Os dados utilizados para esse ajuste foram obtidos diretamente dos datasheets do fabricante, que disponibiliza os valores de consumo para diferentes níveis de simultaneidade, variando de 50% a 130%, em intervalos de 10%.

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 a equação 3.1.

O ajuste das curvas foi realizado utilizando um modelo matemático polinomial de sexto grau (6º grau), uma vez que este modelo apresenta elevada capacidade de aderência aos dados experimentais. 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 13, enquanto as relativas aos sistemas VRF estão na Tabela 14. As curvas geradas a partir dessas equações estão representadas nas Figuras 16 e 17, respectivamente.

Figura 16 – Variação do Consumo Energético em Função da Carga Parcial para Sistemas GHP.



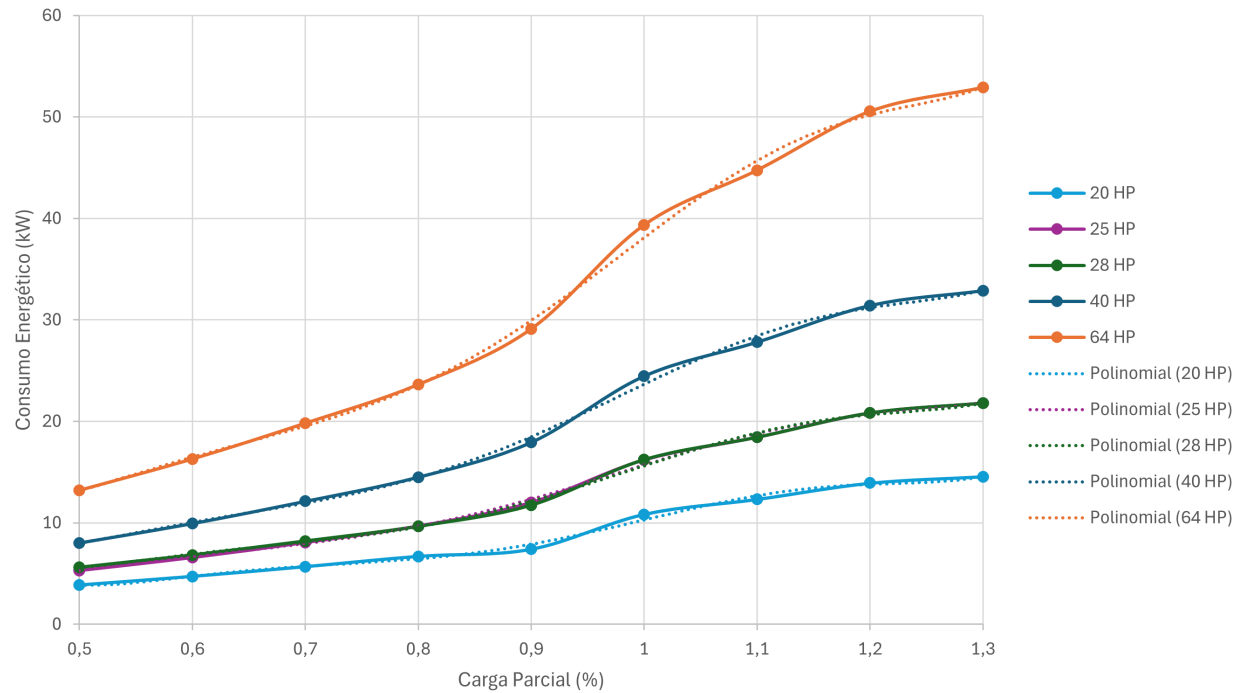
Fonte: Autor (2025).

Tabela 13 – Equações de Ajuste do Consumo Energético (kW) em Função da Carga Parcial (x) para Diferentes Capacidades de Evaporadoras no 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
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 (2025).

Figura 17 – Variação do Consumo Energético em Função da Carga Parcial para Sistemas VRF.



Fonte: Autor (2025).

Tabela 14 – Equações de Ajuste do Consumo Energético (kW) em Função da Carga Parcial (x) para Diferentes Capacidades de Evaporadoras no 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	$y = 1802.6x^6 - 9239.8x^5 + 19620x^4 - 20246x^3 + 11707x^2 - 3485x + 423.88$	0.998
64 HP	$y = 2721.3x^6 - 13954x^5 + 28768x^4 - 30563x^3 + 17646x^2 - 5251.8x + 638.45$	0.9982

Fonte: Autor (2025).

Para avaliar a qualidade dos ajustes, foi utilizado o coeficiente de determinação (R²), que expressa o grau de aderência do modelo aos dados observados. O valor de R² 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 excelente aderência dos modelos às curvas.

4.4 Análises de Custos

A análise de custos realizada contemplam três grandes grupos de custos: o investimento inicial, os custos operacionais anuais, considerando tanto o consumo de energia (elétrica ou gás natural) e os custos de manutenção.

Para a avaliação dos custos operacionais, foram considerados dois cenários distintos: o Custo Operacional (a), que representa o consumo de gás (m^3) sem considerar os benefícios para climatização, e o Custo Operacional (b), que inclui os benefícios para o uso do sistema GHP. Essa diferenciação permitiu abranger diferentes cenários.

As tarifas de energia elétrica e de gás natural seguem os enquadramentos definidos na metodologia, considerando os perfis de consumo residencial e comercial. Para os padrões residenciais, o funcionamento dos sistemas ocorre das 20h às 07h. Já para os padrões comerciais, o funcionamento ocorre das 07h às 22h, abrangendo tanto o horário de ponta (18h às 21h) quanto o fora de ponta (22h às 17h), conforme a modalidade tarifária Horária Azul da Amazonas Energia.

As Tabelas 15¹ e 16 seguir consolidam os custos de investimento, consumo anual de energia e manutenção para cada padrão analisado. Para a determinação dos Custos de Operação nos cenários (a) e (b), foi utilizada a Equação 3.1 para os sistemas GHPs, tendo como base de referência as Tabelas 7, 8 e 9, que apresentam as tarifas aplicáveis ao consumo de gás natural e energia elétrica.

Tabela 15 – 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

Fonte: Autor (2025).

¹ Custo operacional (a) - Para o GHP refere-se ao Residencial - Consumo Coletivo.
Custo operacional (b) - Para o GHP refere-se ao Comercial: Cogeração, Climatização e Geração Própria de Energia

Tabela 16 – 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 (2025).

A análise dos custos apresentados nas Tabelas 15 e 16 ² permite observar diferenças significativas entre os sistemas GHP e VRF nas tipologias residenciais e comerciais. No cenário residencial, o sistema VRF apresentou-se mais vantajoso em todos os aspectos avaliados, com menor investimento inicial, menores custos operacionais (tanto para consumo coletivo quanto para cogeração, climatização e geração própria de energia) e menores custos de manutenção. O GHP, por sua vez, apresentou valores mais elevados em todas as categorias.

No caso das tipologias comerciais, o comportamento se manteve semelhante. O GHP apresentou custos iniciais muito superiores, além de custos operacionais e de manutenção mais elevados em comparação ao VRF. Mesmo considerando o potencial de cogeração do GHP, os custos totais permaneceram desfavoráveis em relação ao VRF nas três plantas analisadas.

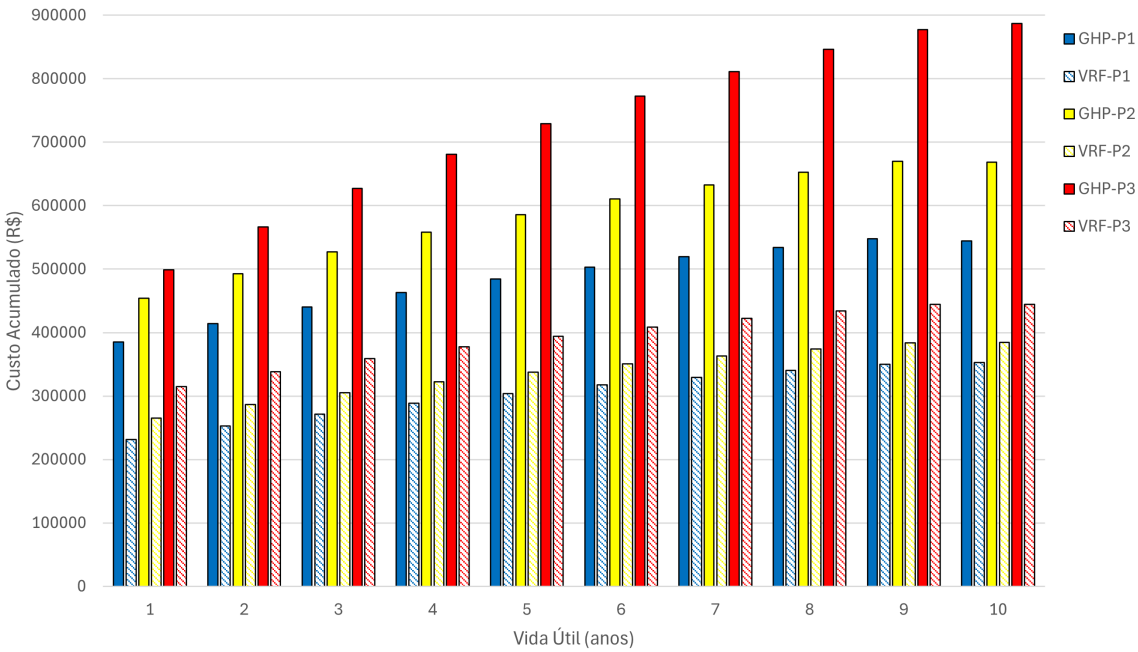
4.5 Viabilidade Econômica

As Figuras 18 e 20 apresentam a comparação do custo acumulado ao longo de 10 anos entre os sistemas GHP (*Gas Heat Pump*) e VRF (*Variable Refrigerant Flow*) para os setores residencial e comercial, usando o custo operacional (a), respectivamente, considerando três perfis distintos de consumo: P1 (Padrão 1), P2 (Padrão 2) e P3 (Padrão 3). Já as Figuras 19 e 21, aplicam-se a mesma métrica, mas seguindo o custo operacional (b).

² Custo operacional (a) - Para o GHP refere-se ao Comercial e Industrial Baixo Consumo.

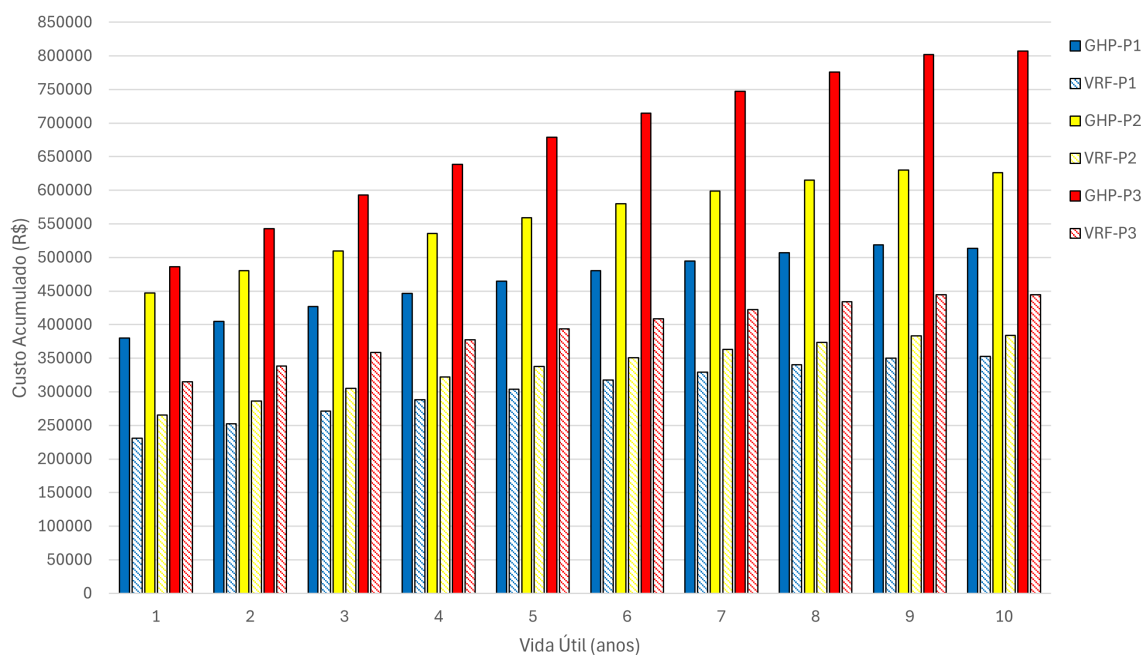
Custo operacional (b) - Para o GHP refere-se ao Comercial: Cogeração, Climatização e Geração Própria de Energia

Figura 18 – Custo Acumulado dos Sistemas GHP e VRF ao Longo da Vida Útil - Residencial (Utilizando o Custo Operacional (a)).



Fonte: Autor (2025).

Figura 19 – Custo Acumulado dos Sistemas GHP e VRF ao Longo da Vida Útil - Residencial (Utilizando o Custo Operacional (b)).



Fonte: Autor (2025).

Complementando a análise gráfica, os dados da Tabela 17, obtidos a partir do cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) ao longo de 10 anos, reforçam o desempenho econômico inferior dos sistemas GHP em comparação aos sistemas VRF no setor residencial.

Mesmo considerando as particularidades de cada perfil de carga, o sistema VRF apresentou VPLs significativamente menores, o que indica menor custo total acumulado ao longo da vida útil dos sistemas. No Padrão 1 (P1), o GHP foi 54,2% mais caro que o VRF. Essa diferença aumentou para 74,0% no Padrão 2 (P2) e praticamente dobrou no Padrão 3 (P3), em que o GHP foi 99,4% mais oneroso.

Dando continuidade à análise econômica, os dados da Tabela 18, que consideram o Custo Operacional (b), observa-se que, mesmo considerando as particularidades de carga de cada padrão, o sistema VRF continua apresentando VPLs inferiores, o que indica menores custos totais acumulados ao longo da vida útil dos sistemas. No Padrão 1 (P1), o GHP se mostrou 45,6% mais oneroso que o VRF. No Padrão 2 (P2), essa diferença aumentou para 82,4%, enquanto no Padrão 3 (P3) o custo com o GHP foi 81,5% superior ao do VRF.

Tabela 17 – Comparativo do VPL dos sistemas VRF e GHP - Setor Residencial (Utilizando o Custo Operacional (a))

Padrão	VPL - GHP (R\$)	VPL - VRF (R\$)	Diferença (%)
P1	544.248,85	352.932,66	+54,2%
P2	668.799,13	384.272,74	+74,0%
P3	886.769,77	444.636,14	+99,4%

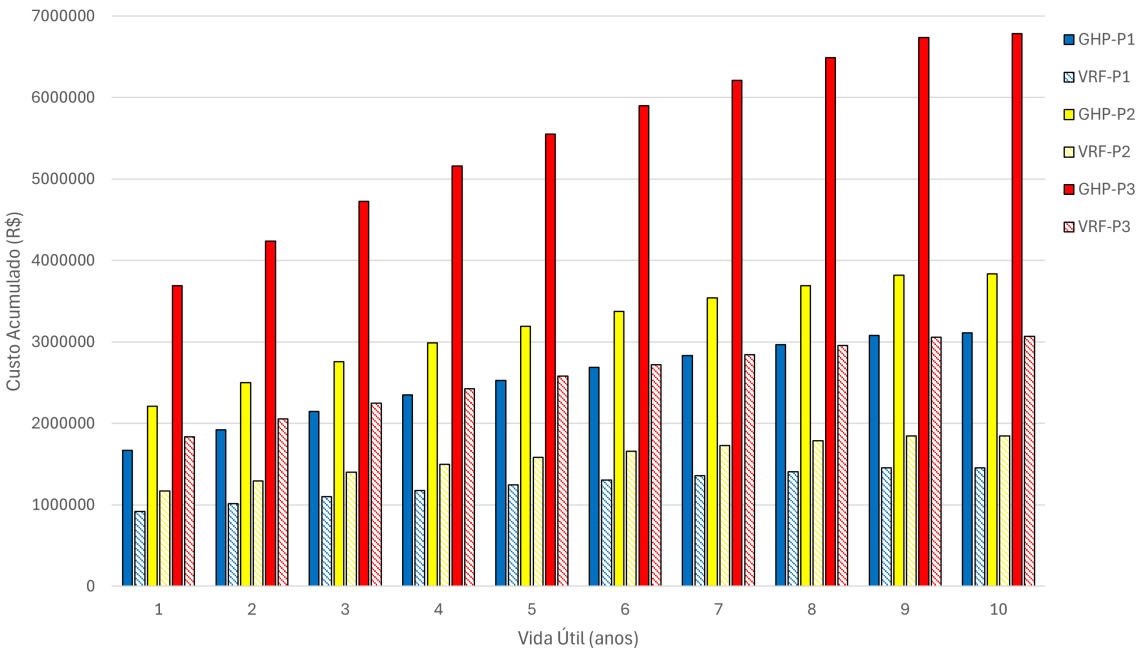
Fonte: Autor (2025).

Tabela 18 – Comparativo do VPL dos sistemas VRF e GHP - Setor Residencial (Utilizando o Custo Operacional (b))

Padrão	VPL - GHP (R\$)	VPL - VRF (R\$)	Diferença (%)
P1	513.353,84	352.932,66	+45,45%
P2	626.477,57	384.272,74	+63,03%
P3	825.102,74	444.636,14	+85,57%

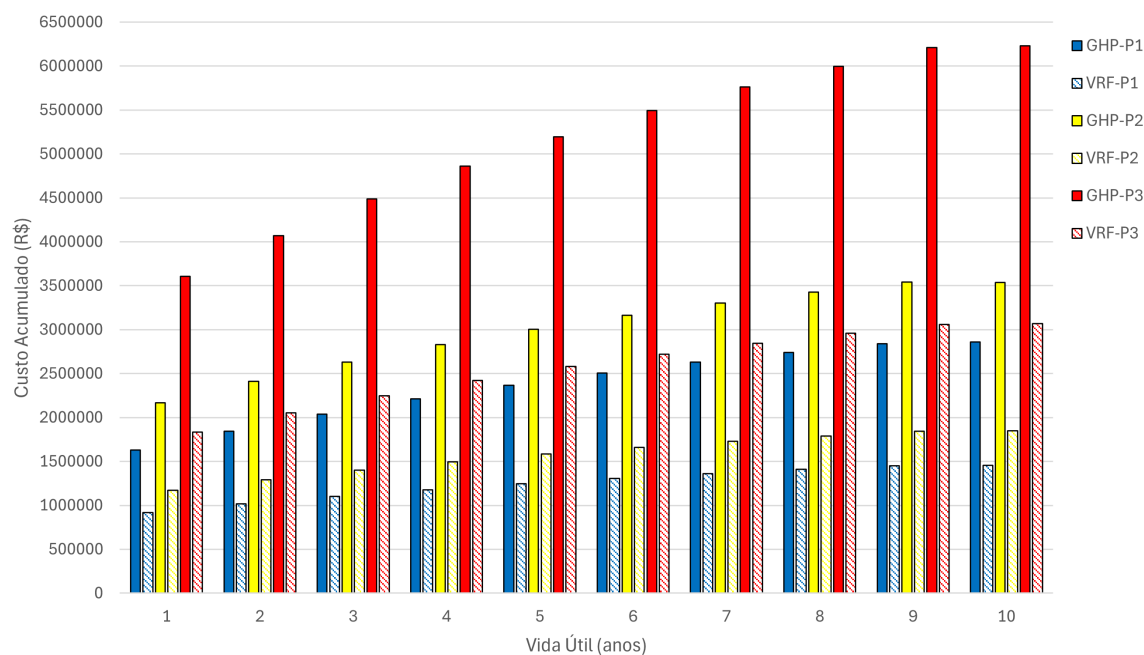
Fonte: Autor (2025).

Figura 20 – Comparativo de Custo Acumulado dos Sistemas GHP e VRF ao Longo da Vida Útil - Comercial (Utilizando o Custo Operacional (a)).



Fonte: Autor (2025).

Figura 21 – Comparativo de Custo Acumulado dos Sistemas GHP e VRF ao Longo da Vida Útil - Comercial (Utilizando o Custo Operacional (b)).



Fonte: Autor (2025).

A análise do VPL foi estendida para o setor comercial, cujos resultados corroboram a tendência observada anteriormente, evidenciando novamente a superioridade econômica dos sistemas VRF em relação aos sistemas GHP.

Conforme apresentado na Figura 20 e na Tabela 19, as diferenças entre os VPLs se mostram ainda mais expressivas nesse segmento. No Padrão 1 (P1), o sistema GHP apresentou um custo 113,53% superior ao do VRF. De forma semelhante, no Padrão 2 (P2), o acréscimo foi de 107,50%, enquanto no Padrão 3 (P3) essa diferença alcançou 121,17%, demonstrando um aumento contínuo da onerosidade do GHP conforme a complexidade e o perfil de carga se elevam.

Já os resultados da Tabela 20, considerando o Custo Operacional (b), mantêm a tendência observada no setor comercial, com o sistema GHP apresentando VPLs superiores em todos os cenários analisados. As diferenças variaram entre 96,13% (P1), 91,41% (P2) e 103,02% (P3), evidenciando novamente a maior onerosidade do GHP frente ao VRF, mesmo com a alteração na base de cálculo dos custos operacionais.

Tabela 19 – Comparativo do VPL entre sistemas VRF e GHP - Setor Comercial (Utilizando o Custo Operacional (a))

Padrão	VPL - GHP (R\$)	VPL - VRF (R\$)	Diferença (%)
P1	3.112.263,55	1.457.541,47	+113,53%
P2	3.836.412,82	1.848.879,87	+107,50%
P3	6.787.669,46	3.068.971,28	+121,17%

Fonte: Autor (2025).

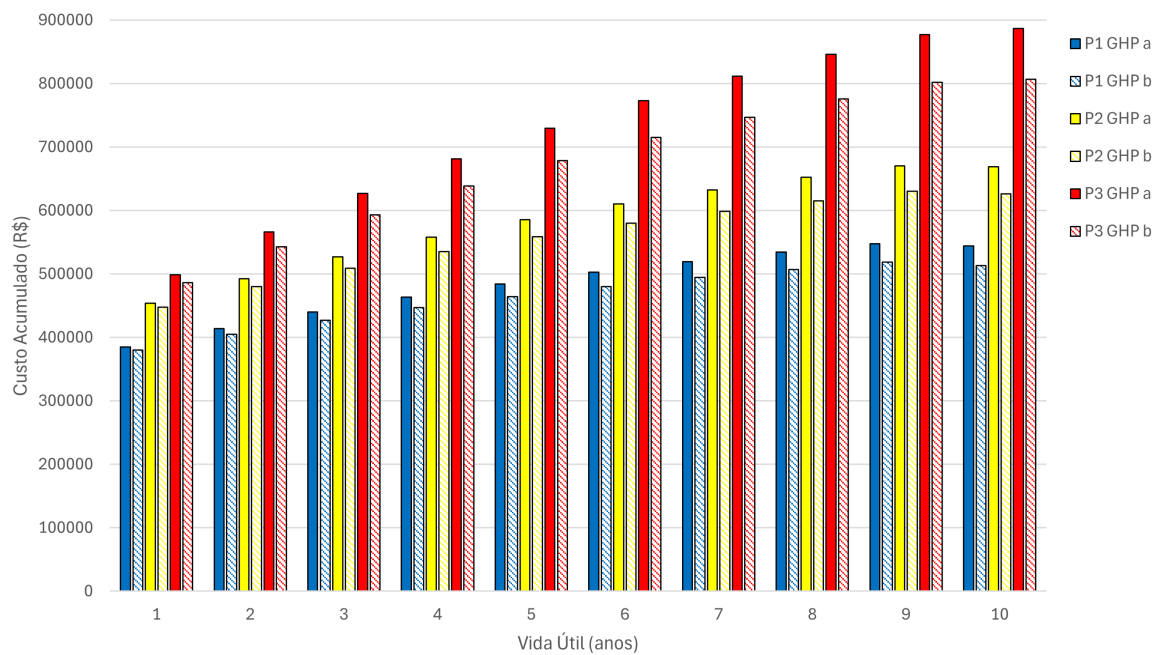
Tabela 20 – Comparativo do VPL entre sistemas VRF e GHP - Setor Comercial (Utilizando o Custo Operacional (b))

Padrão	VPL - GHP (R\$)	VPL - VRF (R\$)	Diferença (%)
P1	2.858.669,12	1.457.541,47	+96,13%
P2	3.538.862,97	1.848.879,87	+91,41%
P3	6.230.583,66	3.068.971,28	+103,02%

Fonte: Autor (2025).

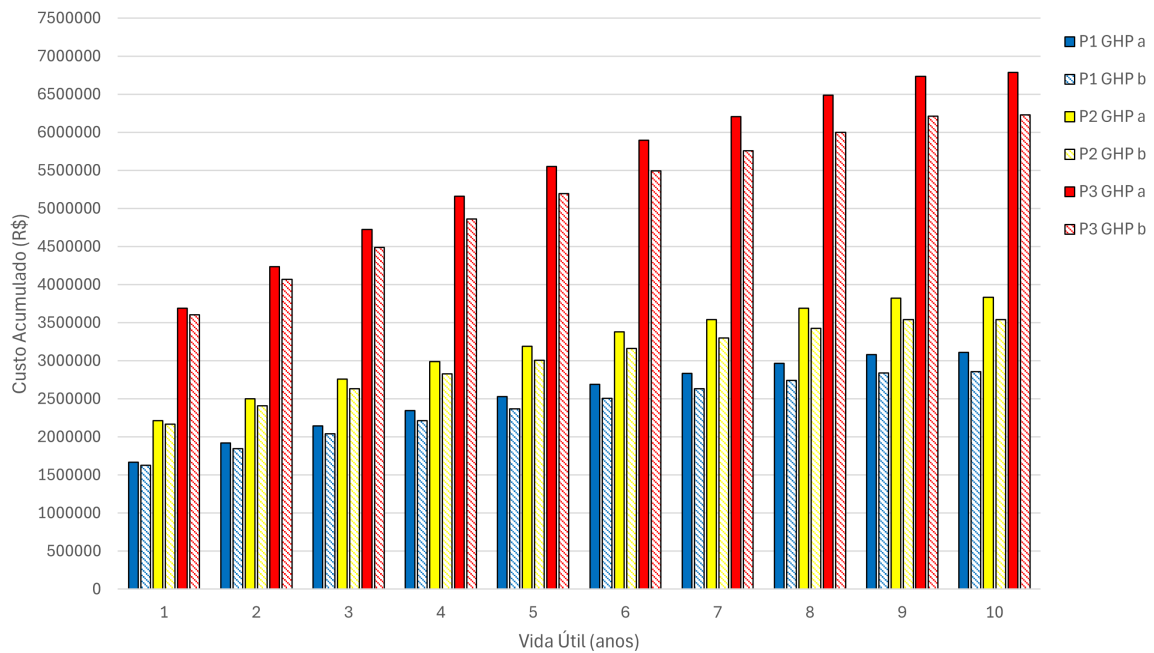
As Figuras 22 e 23 apresentam a comparação entre os custos operacionais considerando os cenários de cobrança (a) e (b) para os sistemas GHPs, nos setores residencial e comercial, respectivamente. Em ambos os casos, observa-se uma diferença entre os resultados obtidos para cada critério tarifário aplicado ao gás natural. No entanto, essas variações não são suficientemente significativas a ponto de alterar a conclusão quanto à superioridade econômica dos sistemas VRF. As Tabelas 17, 18, 19 e 20 complementam e reforçam essa análise, evidenciando que a escolha do critério tarifário impacta os valores absolutos, mas não modifica a tendência geral de viabilidade econômica.

Figura 22 – Diferença de Custo Acumulado dos Sistemas GHP ao Longo da Vida Útil - Residencial (Utilizando o Custo Operacional (a) e (b)).



Fonte: Autor (2025).

Figura 23 – Diferença dos Custo Acumulado dos Sistemas GHP ao Longo da Vida Útil - Comercial (Utilizando o Custo Operacional (a) e (b)).



Fonte: Autor (2025).

Esses resultados reforçam a constatação de que, sob as condições analisadas, o sistema VRF representa uma alternativa economicamente mais vantajosa em comparação ao GHP, considerado o horizonte de 10 anos. Independentemente do critério adotado para o cálculo do custo operacional, seja utilizando o Custo Operacional (a), baseado em valores comercial e industrial de baixo consumo, ou o Custo Operacional (b), baseados em valores comercial: cogeração, climatização e geração própria de energia. O VRF apresentou VPLs inferiores em todos os cenários avaliados. Essa consistência entre os métodos de análise evidencia a robustez da superioridade econômica do VRF frente ao GHP.

5 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica dos sistemas GHP (*Gas Heat Pump*) como alternativa aos sistemas VRF (*Variable Refrigerant Flow*) convencionais em edificações comerciais e residenciais na cidade de Manaus. A partir da metodologia aplicada, composta por simulações térmicas, dimensionamentos conforme normas técnicas e estimativas de custos, foi possível realizar uma comparação abrangente entre os dois sistemas, tanto sob a ótica do desempenho quanto dos custos envolvidos.

Durante a fase de cálculo da carga térmica horária, utilizaram-se *softwares* especializados conforme a norma ABNT NBR 16401, possibilitando uma avaliação precisa das demandas energéticas de edificações de natureza distinta — comercial e residencial. Esta base técnica foi necessária para o dimensionamento dos sistemas VRF e GHP, realizado segundo critérios das normas ABNT e ASHRAE, assegurando a validade técnica dos dados comparativos.

Os resultados apontaram que as edificações residenciais apresentaram demandas térmicas variando entre 17,3 TR e 21,7 TR, enquanto as edificações comerciais registraram cargas significativamente superiores, com faixas entre 84,6 TR e 197,8 TR, dependendo das características construtivas e do perfil de ocupação.

O dimensionamento dos sistemas revelou que, à medida que as cargas térmicas e a complexidade das edificações aumentaram, houve um crescimento proporcional tanto na capacidade das unidades condensadoras quanto na quantidade de evaporadoras necessárias, refletindo diretamente nas configurações finais dos projetos para ambas as tecnologias (VRF e GHP).

De modo geral, os sistemas VRF apresentaram desempenho superior em todos os aspectos analisados: menor investimento inicial, menores custos de operação e menores custos de manutenção. Além disso, destacaram-se pela eficiência operacional, simplicidade de instalação e melhor adaptação às variações de carga térmica, o que resultou em uma relação custo-benefício mais vantajosa, sobretudo considerando as condições específicas da cidade de Manaus. As análises demonstraram que, no setor residencial, as diferenças de VPL entre os sistemas chegaram a até 99,4%, enquanto no setor comercial atingiram até 121,17%, evidenciando a expressiva superioridade do sistema VRF em termos econômicos.

Portanto, pode-se inferir que os sistemas GHP, nas condições estudadas, não apresentam viabilidade econômica em comparação aos sistemas VRF para aplicação em edificações comerciais e residenciais em Manaus. Essa constatação está diretamente relacionada ao alto custo do gás natural na região, à infraestrutura limitada para sua distribuição e à baixa competitividade do GHP diante da eficiência e flexibilidade dos sistemas VRF.

Ainda que tecnicamente viável, o GHP mostrou-se economicamente desvantajoso frente ao cenário energético local.

Apesar dos resultados desfavoráveis ao GHP neste estudo, recomenda-se a continuidade de pesquisas sobre o tema, explorando outros cenários geográficos, avanços tecnológicos e possíveis incentivos governamentais que possam alterar esse panorama.

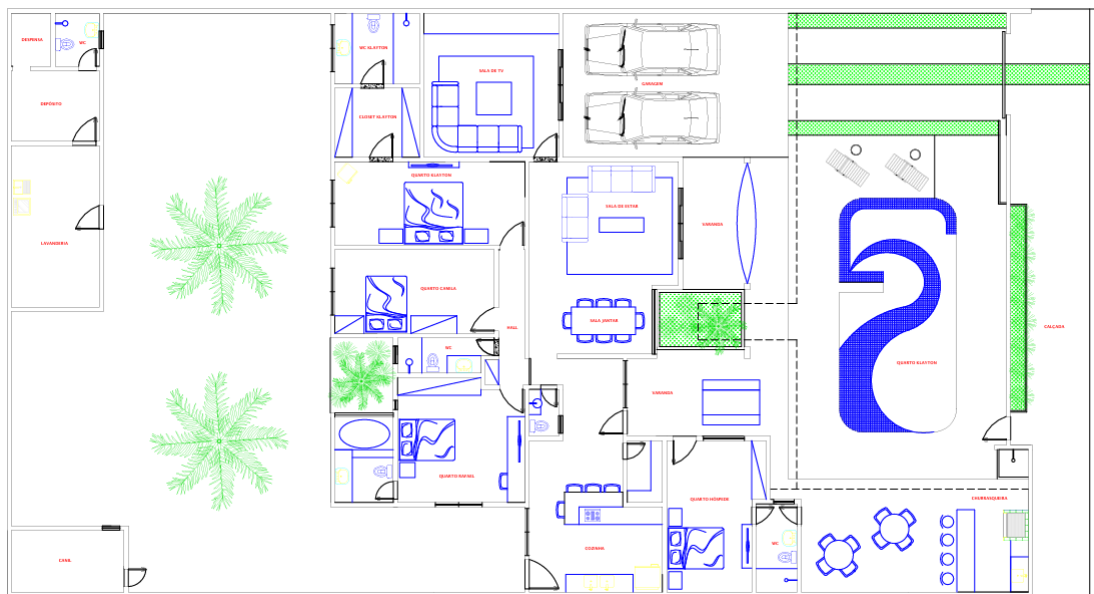
Anexos

ANEXO A – Plantas baixas das edificações.

A.1 Plantas baixas residenciais

As Figuras abaixo apresentam as plantas baixas residenciais utilizadas para o desenvolvimento do trabalho.

Figura 24 – Planta Residencial - Padrão 1.



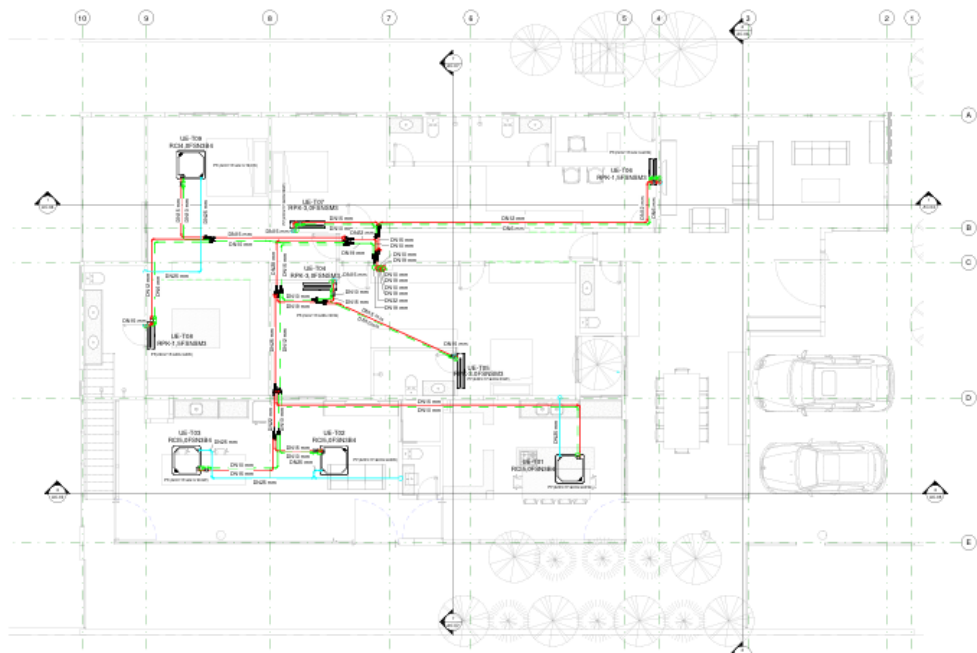
Fonte: Anônimo (2025).

Figura 25 – Planta Residencial - Padrão 2.



Fonte: Anônimo (2025).

Figura 26 – Planta Residencial - Padrão 3 (a).

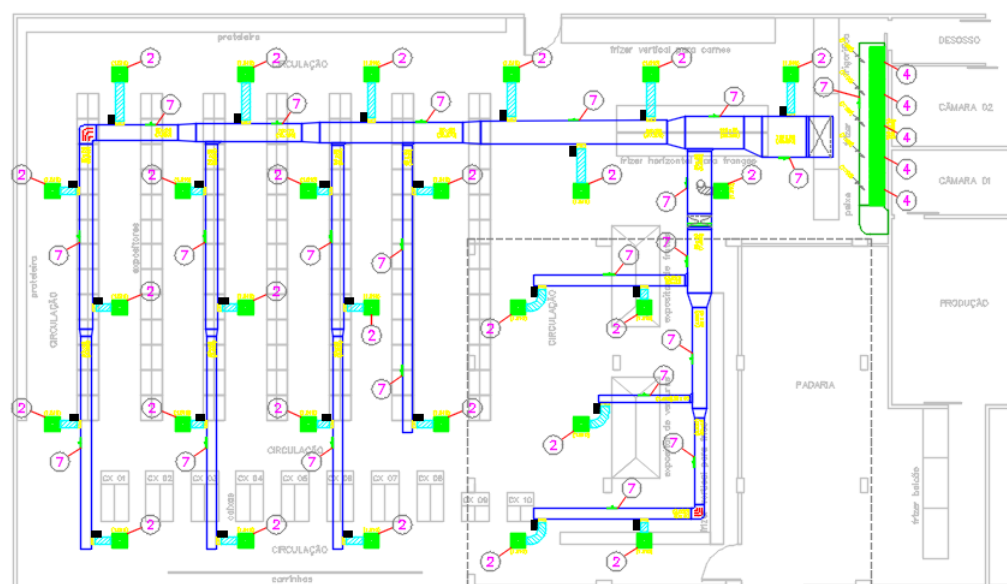


Fonte: Anônimo (2025).

A.2 Plantas baixas comerciais

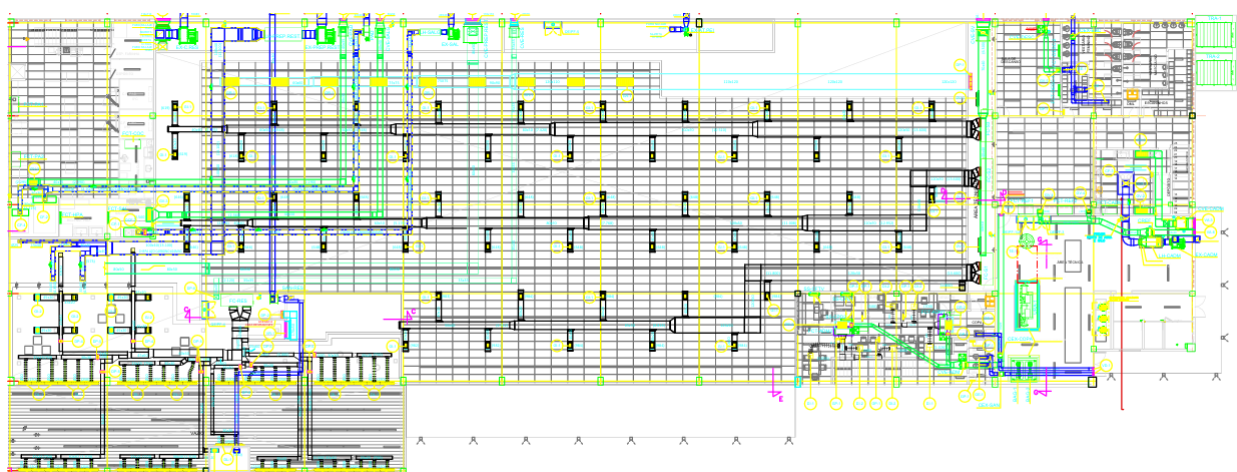
As Figuras abaixo apresentam as plantas baixas comerciais utilizadas para o desenvolvimento do trabalho.

Figura 29 – Planta Comercial - Padrão 1.



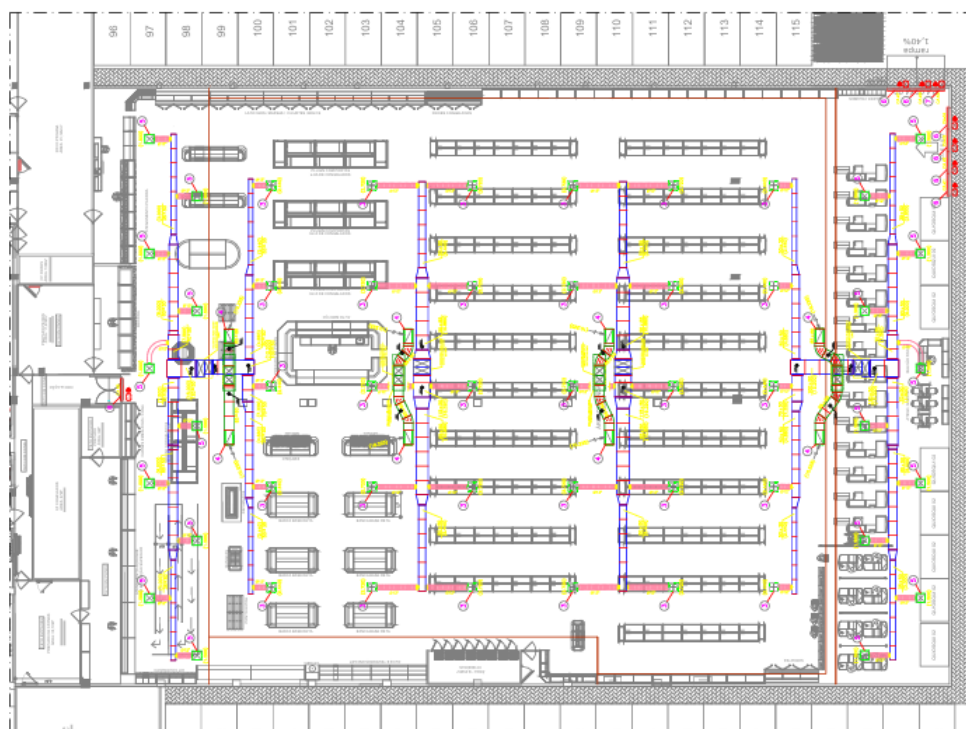
Fonte: Anônimo (2025).

Figura 30 – Planta Comercial - Padrão 2.



Fonte: Anônimo (2025).

Figura 31 – Planta Comercial - Padrão 3.



Fonte: Anônimo (2025).

Referências

- AGRESE. *Resoluções ANEEL*. 2024. <<https://agrese.se.gov.br/resolucoes-aneel/>>. Acesso em: 8 dez. 2024. Citado na página 24.
- ALMEIDA, L. F. *Critérios de decisão em análise de investimentos: um estudo comparativo entre payback simples e descontado*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021. Citado na página 27.
- AME. 2025. <<https://website.amazonasenergia.com/sua-conta/tarifa/>>. Acesso em: 1 jun. 2025. Citado na página 33.
- ANEEL. *Agência Nacional de Energia Elétrica*. 2024. <<https://www.gov.br/aneel/pt-br>>. Acesso em: 8 dez. 2024. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 26.
- ANEEL. *Contratos de Concessão e Permissão*. 2024. <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/contratos-de-concessao-e-permissao>>. Acesso em: 8 dez. 2024. Citado na página 26.
- ANEEL. *Mercado Livre de Energia: ANEEL autoriza Sandbox Tarifário para consumidores de baixa tensão*. 2024. <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/mercado-livre-de-energia-aneel-autoriza-sandbox-tarifario-para-consumidores-de-baixa-tensao>>. Acesso em: 8 dez. 2024. Citado na página 26.
- ANEEL. *Pré-Pagamento de Energia Elétrica*. 2024. <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/pre-pagamento>>. Acesso em: 8 dez. 2024. Citado na página 25.
- ANEEL. *Tarifas de Energia Elétrica*. 2024. <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas>>. Acesso em: 8 dez. 2024. Citado na página 25.
- ASHRAE. *Fundamentals Handbook*. [S.l.]: ASHRAE, 2021. Citado 4 vezes nas páginas 21, 22, 23 e 24.
- BAGGIO, L. et al. *Revisão Bibliográfica Sobre a Questão Energética no Estado do Amazonas*. 2018. <<https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2018/X-002.pdf>>. [s.l.: s.n.]. Acessado em: 8 dez. 2024. Citado na página 13.
- BAPTISTA, G. R.; ANDREOS, R. *Vantagens, benefícios e barreiras da utilização do GHP (gas heating pump) em substituição aos sistemas convencionais de climatização*. [S.l.]: PECE, 2016. Citado na página 21.
- Carrier. *História da Carrier / Ar condicionado, aquecimento e refrigeração da Carrier*. 2024. <<https://www.carrier.com/commercial/pt/pt/sobre-carrier/historia/>>. Acesso em: 08 dez. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- CAZOTTI, R. M.; AMORIM, P. A. Estudo de viabilidade técnica financeira de sistema de ar condicionado vrf operante com gás natural. *ABCustos*, v. 12, n. 1, jul 2017. Publicado em: 26 jul. 2017. Citado na página 13.

CIGÁS. *Gás natural no AM é o mais competitivo nos segmentos industrial e comercial*. 2024. Acesso em: 16 dez. 2024. Disponível em: <https://www.abegas.org.br/arquivos/89260?utm_source>. Citado na página 14.

CIGÁS. 2025. <<https://www.cigas-am.com.br/tabela-tarifaria>>. Acesso em: 1 jun. 2025. Citado na página 34.

COSTA, A. F.; PEREIRA, J. C.; LIMA, S. Tecnologia vrf: Sustentabilidade e eficiência energética. In: *Anais do Congresso Nacional de Climatização*. [S.l.: s.n.], 2018. v. 38, p. 215–227. Citado na página 18.

Daikin. *Daikin Brasil*. 2024. <<https://www.daikin.com.br/institucional/linha-do-tempo-global>>. Acesso em: 8 dez. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 20.

DUARTE et al. Assessing the energy performance of vav and vrf air conditioning systems in an office building located in the city of Florianópolis. *Ambiente Construído*, v. 20, 2020. ISSN 1415-8876. Citado na página 19.

FASSIMA, P. H.; OUTROS. Análise de viabilidade econômica de projetos de investimento: métodos utilizados em empresas fabricantes de balas do estado do rio grande do sul. In: *XIII Congresso Brasileiro de Custos*. Belo Horizonte - MG: [s.n.], 2006. Citado na página 26.

FERREIRA, L. R.; SILVA, M. P. Análise do desempenho de sistemas de fluxo de refrigerante variável em climas tropicais. *Revista Brasileira de Climatização*, v. 15, n. 2, p. 112–124, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

HALL, D. et al. Análise da variação sazonal do perfil de temperatura do ar em uma Área de alta intensidade de urbanização na cidade de Manaus. In: *Galoá Proceedings*. Proceedings.science, 2021. Disponível em: <<https://proceedings.science>>. Citado na página 13.

History of Refrigeration. *William Cullen - Inventor of Artificial Refrigeration*. 2024. <<http://www.historyofrefrigeration.com/refrigeration-invention/william-cullen/>>. Acesso em: 08 dez. 2024. Citado na página 15.

JANKOVSKI, H. et al. *Reaproveitamento de Energia em Sistemas Convencionais de Ar Condicionado II: Análise Comportamental de Diferentes Fluidos Refrigerantes*. 2024. <https://www.udesc.br/arquivos/ceplan/id_cpmenu/1580/148_515_1668200246425_1580.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2024. Citado na página 20.

KONOPATZKI, E. A. et al. Comparativo econômico entre condicionadores de ar com tecnologias convencional e inverter. In: *XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. [S.l.: s.n.], 2015. 13 out. 2015. Citado na página 19.

LG. *LG CES 2022 / LG Brasil*. 2024. <https://www.lg.com/br/ces2022_new/?srsltid=AfmBOopdg4Jd98O5NZ8fVqXwLbkG-Kkm8WgO6QoRkOovQUVgeJCh1kbO>. Acesso em: 8 dez. 2024. Citado na página 20.

LIBRADO, G. D. et al. Transient analysis of a single-stage vapor compression refrigeration system using lumped parameter approaches analysis and simulation validation based on a reduced order differential equation with few degrees of freedom. *International Journal of*

- Advanced Systems and Measurements*, v. 11, n. 3 and 4, p. 352–362, 2018. Disponível em: <http://www.iariajournals.org/systems_and_measurements/2018>. Citado na página 17.
- MACHADO, V. R. *Aplicações de GHP no Brasil: Cenários e Perspectivas*. São Paulo: Editora Técnica, 2022. Citado na página 21.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. *Princípios de termodinâmica para engenharia*. Rio de Janeiro: LTC, 2009. Citado na página 17.
- NUNES, F.; ALMEIDA, J. Sistemas de climatização vrf: Eficiência e controle modular. *Revista de Engenharia Mecânica Aplicada*, v. 35, n. 1, p. 45–58, 2021. Citado na página 18.
- OLIVEIRA, P. R. et al. Estudo comparativo entre sistemas vrf e sistemas split. *Revista de Tecnologia em Climatização*, v. 28, n. 3, p. 89–103, 2020. Citado na página 18.
- PEIL, D. New hvac technology emerges: Vrf/vrv systems. *Insulation Outlook Magazine*, p. 7, 2014. Citado na página 16.
- PENEDO, M. *Gestão Financeira para Pequenas e Médias Empresas*. São Paulo: Cengage Learning, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 28.
- QIAO, H. . et al. Dynamic characteristics of an r-410a multi-split variable refrigerant flow air-conditioning system. *12th IEA Heat Pump Conference*, 2017. Citado na página 19.
- 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. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- ROSS, S. A.; WESTERFIELD, R. W.; JAFFE, J. *Corporate Finance*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2015. Citado na página 27.
- SAKAMOTO, H.; MARCONDES, F. D. *Introdução à Termodinâmica e seus Processos*. [S.l.]: Edusp, 2017. Citado na página 23.
- SANTOS, R. L. *Desenvolvimento de Modelos Matemáticos para Sistemas VRF*. Tese (Tese (Doutorado em Engenharia Térmica)) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Citado na página 18.
- ZUZA, A. F. *O Abastecimento Energético em Cidades da Linha do Gasoduto Urucu-Coari-Manaus*. 2019. <<https://ufam.edu.br>>. Acessado em: 8 dez. 2024. Citado na página 13.