



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

GABRIEL ANDRADE LIMA

PROJETO DE CLIMATIZAÇÃO E RENOVAÇÃO DE AR:

Dimensionamento e projeto executivo de climatização utilizando sistema VRF para a
biblioteca do Campus Nova Gameleira do CEFET-MG

**Belo Horizonte
2026**

GABRIEL ANDRADE LIMA

PROJETO DE CLIMATIZAÇÃO E RENOVAÇÃO DE AR:

Dimensionamento e projeto executivo de climatização utilizando sistema VRF para a biblioteca do Campus Nova Gameleira do CEFET-MG

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Paulo Eduardo Lopes Barbieri

**Belo Horizonte
2026**

L732p Lima, Gabriel Andrade
Projeto de climatização e renovação de ar: dimensionamento e projeto executivo de climatização utilizando sistema VRF para a biblioteca do Campus Nova Gameleira do CEFET-MG / Gabriel Andrade Lima. – 2026.
25 f. : il., tabs., fotos.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Orientador: Paulo Eduardo Lopes Barbieri.
Banca examinadora: Paulo Eduardo Lopes Barbieri, Etienne Lima Ribeiro, Frederico Romagnoli Silveira Lima e Tiago de Freitas Paulino.
Bibliografia: f. 24-25.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Ar condicionado – Belo Horizonte (MG) – Teses. 2. Midea MCSSP (Software) – Teses. 3. Análise térmica – Carga – Teses. 4. Ventilação – Teses. 5. Biblioteca Universitária – Projetos e construção – Teses. I. Barbieri, Paulo Eduardo Lopes. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

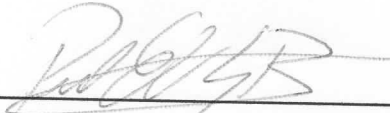
CDD 697.9208151

GABRIEL ANDRADE LIMA

PROJETO DE CLIMATIZAÇÃO E RENOVAÇÃO DE AR

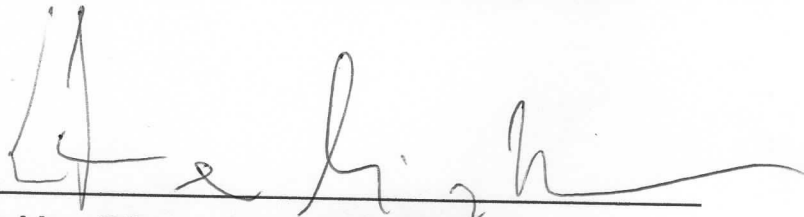
Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada no Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data de aprovação: 15/06/2026



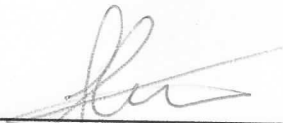
Paulo Eduardo Lopes Barbieri, Doutor, Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Etienne Lima Ribeiro, Engenheiro Mecânico, Avaliador

Kelvin Engenharia Térmica



Frederico Romagnoli Silveira Lima, Doutor, Avaliador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Tiago de Freitas Paulino, Doutor, Avaliador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Etienne Ribeiro e Laria Lacerda.

Ao meu pai, Engenheiro Mecânico com mais de trinta anos de atuação na área de ar-condicionado, devo não apenas o conhecimento técnico que me foi transmitido desde cedo, mas sobretudo o encantamento por essa profissão. Ele foi minha primeira escola de engenharia e de vida.

À minha mãe, devo a disciplina, o caráter e a formação de quem eu sou. Cada puxão de orelha foi um ensinamento absorvido. Serei, com muito orgulho, o filhinho de mamãe para o resto da vida.

Ao meu tio Lauro, que há muito tempo ocupa o lugar de um segundo pai, agradeço por me ensinar, dia após dia, o que significa ser uma pessoa boa, de coração generoso e conduta reta.

Aos profissionais de engenharia que trabalharam e ainda trabalham ao meu lado — cada um foi peça fundamental na minha formação técnica e humana.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica do CEFET-MG, pela formação técnica e humana proporcionada durante toda a graduação.

Às empresas Total Ar Ltda. e Kelvin Ar Condicionado Ltda., pela disponibilidade no fornecimento das informações técnicas e dos orçamentos utilizados neste trabalho.

Ao Professor Paulo Barbieri, pela orientação cuidadosa, pelas dicas precisas e, sobretudo, pela confiança depositada neste trabalho.

"Crack of dawn, all is gone except the will to be."

— *Metallica, For Whom the Bell Tolls (1984)*

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto executivo de climatização e renovação de ar para a biblioteca do Campus Nova Gameleira do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), edificação de uso institucional intenso que opera atualmente sem qualquer sistema de climatização instalado. O objetivo geral foi desenvolver o projeto contemplando o dimensionamento da carga térmica, a seleção do sistema de Volume de Refrigerante Variável (VRF), o dimensionamento do sistema dedicado de renovação de ar (DOAS) e a elaboração das plantas técnicas, visando garantir o conforto térmico e a qualidade do ar interior dos ambientes. O cálculo da carga térmica foi realizado pelo *software* HAP 6.2 da Carrier, com base no método *Heat Balance Method* (HBM) da ASHRAE, e resultou em uma carga total de resfriamento de 142,8 kW (40,6 TR), com pico em janeiro às 17 horas. A cobertura sem isolamento respondeu por 31,1% da carga sensível total, evidenciando o impacto da envoltória antiga sobre a demanda energética. O sistema VRF Midea V8 220V foi selecionado por meio do *software* Midea MCSSP, composto por duas unidades condensadoras combinadas (50 HP / 140 kW) e 19 unidades evaporadoras (13 cassetes de 4 vias e 6 mini cassetes), com taxa de combinação de 124,79% e EER de 3,88 kW/kW. O sistema DOAS foi dimensionado pelo método VRP da ASHRAE 62.1-2022 e dividido em duas máquinas independentes (MAQ-01 e MAQ-02), totalizando vazão de 917 L/s. Os dutos foram especificados em painéis MPU (alumínio pré-isolado com poliuretano), dimensionados pelo método da perda de carga constante. O orçamento total do projeto resultou em R\$ 435.746,08, correspondendo a R\$ 471,43/m² de área climatizada. Concluiu-se que o sistema VRF associado a DOAS constitui a solução técnica mais adequada para a edificação, tendo em vista a inviabilidade de instalação de *chiller* e os benefícios de eficiência energética em cargas parciais e controle individualizado por zona.

Palavras-chave: climatização; sistema VRF; carga térmica; renovação de ar; biblioteca universitária.

ABSTRACT

This work presents the executive air-conditioning and ventilation project for the library of the Nova Gameleira Campus of the Federal Center for Technological Education of Minas Gerais (CEFET-MG), an institutional building of intense use currently operating without any air-conditioning system installed. The general objective was to develop the project including thermal load calculation, selection of the Variable Refrigerant Flow (VRF) system, sizing of the Dedicated Outdoor Air System (DOAS), and elaboration of the technical drawings, aiming to ensure thermal comfort and indoor air quality. The thermal load calculation was performed using Carrier's HAP 6.2 software, based on ASHRAE's Heat Balance Method (HBM), resulting in a total cooling load of 142.8 kW (40.6 TR), with peak in January at 5 PM. The uninsulated roof accounted for 31.1% of the total sensible load, highlighting the impact of the old envelope on the energy demand. The Midea V8 220V VRF system was selected through the Midea MCSSP software, composed of two combined condensing units (50 HP / 140 kW) and 19 evaporating units (13 four-way cassettes and 6 mini-cassettes), with a combination ratio of 124.79% and an EER of 3.88 kW/kW. The DOAS system was sized using the ASHRAE 62.1-2022 VRP method and divided into two independent machines (MAQ-01 and MAQ-02), totaling 917 L/s. The ducts were specified in MPU panels (pre-insulated aluminum with polyurethane), sized using the equal friction method. The total project budget amounted to R\$ 435,746.08, corresponding to R\$ 471.43/m² of conditioned area. It was concluded that the VRF system associated with DOAS constitutes the most adequate technical solution for the building, considering the unfeasibility of installing a chiller and the benefits of energy efficiency at partial loads and individualized zone control.

Keywords: air-conditioning; VRF system; thermal load; outdoor air ventilation; university library.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fachada da Biblioteca do Campus Nova Gameleira, CEFET-MG.....	12
Figura 2 – Interface do <i>software</i> HAP 6.2, árvore de zonas e ambientes da Biblioteca do Campus Nova Gameleira.....	25
Figura 3 – Tela principal do <i>software</i> HAP 6.2 com o projeto modelado.....	33
Figura 4 – Modelo 3D da edificação no HAP 6.2, composição das assemblagens de envoltória.....	36
Figura 5 – Configuração das assemblagens de envoltória no HAP 6.2.....	37
Figura 6 – Configuração das cargas internas (iluminação e equipamentos) na aba Spaces do HAP 6.2.....	39
Figura 7 – Configuração do sistema DOAS com controle DCV no HAP 6.2.....	41
Figura 8 – Planta arquitetônica da biblioteca: Hall e Acervo (CEFET-MG, Campus Nova Gameleira).....	44
Figura 9 – Planta arquitetônica da biblioteca: Mezanino e Hall (CEFET-MG, Campus Nova Gameleira).....	45
Figura 10 – Relatório de dimensionamento por zona (<i>Zone Cooling Sizing Summary</i>), HAP 6.2.....	50
Figura 11 – Decomposição das cargas térmicas por componente no horário de pico, HAP 6.2.....	52
Figura 12 – Modelo do edifício no HAP 6.2, zoneamento térmico da Biblioteca do Campus Nova Gameleira.....	53
Figura 13 – Unidades condensadoras VRF instaladas em área externa, sistema similar ao adotado no projeto.....	54
Figura 14 – Cassete de 4 vias instalado em ambiente comercial, modelo adotado para Hall, Salão de Estudos e Acervo.....	55
Figura 15 – Sistema VRF completo no Midea MCSSP, condensadoras e evaporadoras selecionadas.....	56
Figura 16 – Ficha técnica do sistema VRF Midea V8, EER, COP e CR nas condições de projeto.....	56
Figura 17 – Verificação dos limites de tubulação (<i>Piping Limitations</i>), Midea MCSSP.....	57
Figura 18 – Linha frigorígena de cobre do sistema VRF, tubulação de líquido e sucção com isolamento termoacústico.....	58
Figura 19 – Especificações técnicas da caixa de ventilação Sicflux GRF280M (MAQ-01) ...	61
Figura 20 – Especificações técnicas da caixa de ventilação Sicflux ACI 315 (MAQ-02).....	62
Figura 21 – Dutos MPU pré-instalados em ACI-315, painéis de alumínio pré-isolados com espuma de poliuretano.....	64
Figura 22 – Projeto executivo de climatização, Planta Geral (1º Piso: Acervo e Hall).....	65
Figura 23 – Projeto executivo de climatização, Planta Geral (2º/3º Piso: Hall e Mezanino) ..	66
Figura 24 – Detalhamento da Z_AreasComuns, Hall (2º Piso).....	67
Figura 25 – Detalhamento da Z_AreasComuns, Salão de Estudos (3º Piso).....	68
Figura 26 – Detalhamento da Z_Acervo, Acervo e Biblioteca Setorial (1º Piso).....	69
Figura 27 – Detalhamento da Z_SalasEstudos, Salas de Estudos 1 a 6 (3º Piso).....	69
Figura 28 – Detalhamento da Z_Administrativo, Chefia e Salas de Trabalho (1º Piso).....	70
Figura 29 – Detalhe do posicionamento das unidades condensadoras (UC-01A/B) na laje	70
Figura 30 – Detalhe construtivo da caixa de ventilação CX-01 (MAQ-01), posição de instalação.....	71
Figura 31 – Detalhe do ventilador VEN-01 (MAQ-02), conexão flexível e tomada de ar	71
Figura 32 – Proposta comercial de fornecimento dos equipamentos VRF, Total Ar Ltda., maio/2026.....	73

Figura 33 – Orçamento de execução do sistema de climatização e renovação de ar, Kelvin Ar-Condicionado Ltda., maio/2026 74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis de conforto térmico	16
Tabela 2 – Escala de sensação térmica de Fanger	17
Tabela 3 – Limites de concentração de poluentes em ambientes climatizados	19
Tabela 4 – Panorama dos sistemas de climatização	20
Tabela 5 – Comparativo entre sistemas VRF e Chiller	23
Tabela 6 – Rugosidade absoluta de materiais utilizados em dutos	28
Tabela 7 – Condições de conforto recomendadas para ambientes de biblioteca.....	30
Tabela 8 – Parâmetros climáticos externos de projeto	34
Tabela 9 – Parâmetros internos de projeto adotados	35
Tabela 10 – Zoneamento térmico adotado no projeto	35
Tabela 11 – Composição dos elementos construtivos da envoltória	36
Tabela 12 – Densidades de iluminação e equipamentos por ambiente	38
Tabela 13 – Vazões de renovação de ar exterior por zona de ventilação	40
Tabela 14 – Características técnicas dos painéis MPU	46
Tabela 15 – Carga térmica de resfriamento por zona	50
Tabela 16 – Decomposição da carga térmica sensível no horário de pico (Janeiro, 17h).....	51
Tabela 17 – Unidades condensadoras selecionadas	53
Tabela 18 – Unidades evaporadoras selecionadas.....	54
Tabela 19 – Resumo do desempenho do sistema VRF selecionado	55
Tabela 20 – Diâmetros e comprimentos da linha frigorígena	58
Tabela 21 – Vazões de renovação de ar exterior por zona	59
Tabela 22 – Resumo geral das máquinas de renovação de ar	60
Tabela 23 – Dimensionamento dos dutos, MAQ-01 (Pavimento Superior).....	61
Tabela 24 – Dimensionamento dos dutos, MAQ-02 (Pavimento Térreo).....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAVA	Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BS	Bulbo Seco
BU	Bulbo Úmido
CAG	Casa de Água Gelada
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CO₂	Dióxido de Carbono
COP	<i>Coefficient of Performance</i> (Coeficiente de Performance)
CR	<i>Combination Ratio</i> (Taxa de Combinação)
DCV	<i>Demand Controlled Ventilation</i> (Ventilação por Demanda)
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DOAS	<i>Dedicated Outdoor Air System</i> (Sistema Dedicado de Ar Externo)
EER	<i>Energy Efficiency Ratio</i> (Razão de Eficiência Energética)
GWP	<i>Global Warming Potential</i> (Potencial de Aquecimento Global)
HAP	<i>Hourly Analysis Program</i>
HFC	Hidrofluorocarbono
HP	<i>Horsepower</i>
IDU	<i>Indoor Unit</i> (Unidade Interna / Evaporadora)
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MCSSP	<i>Midea Commercial Selection Software Platform</i>
MPU	Painéis de Alumínio Pré-isolados com Espuma de Poliuretano
NBR	Norma Brasileira
ODU	<i>Outdoor Unit</i> (Unidade Externa / Condensadora)
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i> (Voto Médio Estimado)
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i> (Porcentagem Estimada de Insatisfeitos)
ppm	Partes por Milhão
PUR	Poliuretano
RTS	<i>Radiant Time Series Method</i>
SMACNA	<i>Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association</i>

TAB	Teste, Ajuste e Balanceamento
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
HBM	<i>Heat Balance Method</i>
TR	Tonelada de Refrigeração
UE	Unidade Evaporadora
UC	Unidade Condensadora
UR	Umidade Relativa
UTA	Unidade de Tratamento de Ar
VOC	<i>Volatile Organic Compounds</i> (Compostos Orgânicos Voláteis)
VRF	<i>Variable Refrigerant Flow</i> (Volume de Refrigerante Variável)
VRP	<i>Ventilation Rate Procedure</i>
VRV	<i>Variable Refrigerant Volume</i> (Volume de Refrigerante Variável)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Conforto Térmico	16
3.1.1 Definição e Importância	16
3.1.2 Variáveis de Conforto Térmico	16
3.1.3 Índices PMV e PPD: Modelo de Fanger	17
3.1.4 Parâmetros Normativos para Condicionamento Artificial	18
3.2 Qualidade do Ar Interior e Renovação de Ar	18
3.2.1 Importância da Renovação de Ar	18
3.2.2 CO ₂ como Indicador de Qualidade do Ar	19
3.2.3 Cálculo da Vazão de Ar Exterior: Método VRP	19
3.2.4 DOAS: Sistema Dedicado de Renovação de Ar	20
3.3 Sistemas de Climatização	20
3.3.1 Panorama Geral dos Sistemas	20
3.3.2 Sistema VRF: Volume de Refrigerante Variável	21
3.3.3 Vantagens do Sistema VRF	22
3.3.4 Limitações do Sistema VRF	22
3.3.5 Comparativo VRF x Chiller	23
3.4 Carga Térmica e Métodos de Cálculo	24
3.4.1 Componentes da Carga Térmica	24
3.4.2 Métodos de Cálculo Aceitos pela Norma	24
3.4.3 Software HAP: <i>Hourly Analysis Program</i>	25
3.5 Software de Seleção: Midea MCSSP	26
3.6 Sistemas de Dutos para Renovação de Ar	26
3.6.1 Função dos Dutos no Sistema de Climatização	26
3.6.2 Materiais de Dutos: Chapa Galvanizada e MPU	27
3.6.3 Rugosidade dos Materiais e Influência na Perda de Carga	27
3.6.4 Vantagens Adicionais do Sistema MPU	28
3.7 Climatização em Bibliotecas Universitárias	29
3.7.1 Especificidades do Uso	29
3.7.2 Distinção entre Acervo Comum e Acervo Especial	29
3.7.3 Boas Práticas para Climatização de Bibliotecas	30
3.8 Síntese da Revisão Bibliográfica	31

4 METODOLOGIA.....	32
4.1 Cálculo da Carga Térmica	32
4.1.1 Software e Método de Cálculo	32
4.1.2 Dados Climáticos.....	34
4.1.3 Condições Internas de Projeto e Conforto Térmico	34
4.1.4 Zoneamento Térmico.....	35
4.1.5 Caracterização da Envoltória.....	36
4.1.6 Cargas Internas	37
4.1.7 Sistema de Renovação de Ar e Controle de Qualidade do Ar Interior.....	39
4.1.8 Fator de Segurança	41
4.2 Seleção de Equipamentos	42
4.2.1 Escolha do Sistema VRF	42
4.2.2 Procedimento de Seleção no Midea MCSSP.....	42
4.2.3 Dimensionamento da Linha Frigorígena	43
4.3 Elaboração do Projeto em Planta.....	43
4.3.1 Especificação do Material dos Dutos: MPU.....	46
4.3.2 Método de Dimensionamento dos Dutos.....	47
4.3.3 Instalação, Ensaios e Balanceamento	48
4.4 Levantamento de Preços.....	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1 Carga Térmica	50
5.2 Seleção dos Equipamentos VRF	53
5.3 Renovação de Ar	59
5.4 Dimensionamento dos Dutos.....	59
5.4.1 MAQ-01: Pavimento Superior.....	60
5.4.2 MAQ-02: Pavimento Térreo.....	62
5.4.3 Discussão dos Resultados.....	63
5.5 Orçamento	72
6 CONCLUSÕES.....	75
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

A climatização de ambientes em edificações institucionais deixou de ser um requisito apenas de conforto para se consolidar como um aspecto fundamental de saúde pública, eficiência energética e qualidade do ambiente construído. Em bibliotecas universitárias (onde a permanência dos usuários é prolongada e a atividade exige concentração e bem-estar) a manutenção de condições adequadas de temperatura, umidade e qualidade do ar interior assume importância especial.

O Campus Nova Gameleira do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) apresenta um cenário comum a diversas instituições públicas brasileiras: muitas das edificações foram construídas há décadas, sem projetos de climatização originais, e as adaptações realizadas posteriormente são, em sua maioria, pontuais e ineficientes. Grande parte dos prédios administrativos do campus opera com sistemas de ar-condicionado tipo *split* instalados de forma fragmentada e, em muitos casos, em estado precário de conservação. Esses sistemas não atendem aos requisitos atuais de eficiência energética nem aos parâmetros normativos de renovação de ar interior.

A biblioteca do Campus Nova Gameleira (objeto deste trabalho, cuja fachada é apresentada na Figura 1) apresenta uma situação ainda mais crítica: a edificação não possui qualquer sistema de climatização instalado, apesar de receber fluxo constante de alunos, professores e funcionários durante todo o horário de funcionamento. O desconforto térmico em períodos de maior temperatura é frequentemente relatado pelos próprios usuários, comprometendo a qualidade do espaço como ambiente de estudo e leitura.

Figura 1 – Fachada da Biblioteca do Campus Nova Gameleira, CEFET-MG



Fonte: Elaboração própria.

A Resolução ANVISA RE nº 09/2003 estabelece padrões mínimos de qualidade do ar interior em ambientes climatizados não industriais, evidenciando que a climatização adequada é uma questão de saúde pública e não apenas de conforto. Complementarmente, a ABNT NBR 16401:2024, em suas três partes, define os parâmetros técnicos para o dimensionamento, conforto térmico e qualidade do ar em sistemas de climatização para edificações brasileiras. O atendimento a esses requisitos exige um projeto técnico estruturado, e não soluções pontuais e fragmentadas.

Neste contexto, o presente trabalho desenvolve o projeto executivo de climatização e renovação de ar para a biblioteca do Campus Nova Gameleira do CEFET-MG, adotando o sistema VRF (Volume de Refrigerante Variável) com sistema dedicado de renovação de ar (DOAS). A escolha do VRF justifica-se pela adequação ao porte da edificação, pelo controle individual de capacidade por zona (característica essencial para ambientes com perfis de ocupação distintos), pela maior eficiência energética em cargas parciais e pela viabilidade de implantação sem necessidade de infraestrutura adicional, como casa de máquinas para *chiller*, inexistente no edifício.

O projeto contempla o cálculo da carga térmica, a seleção dos equipamentos, o dimensionamento da rede de dutos do sistema de renovação de ar, a elaboração do projeto executivo em AutoCAD e o levantamento orçamentário dos materiais e da mão de obra. O desenvolvimento utiliza ferramentas reconhecidas no mercado de engenharia AVAC (HAP 6.2 (Carrier) para a carga térmica, Midea MCSSP para a seleção dos equipamentos e McQuay Duct Sizer para o dimensionamento dos dutos), com fundamentação nas normas técnicas nacionais e internacionais aplicáveis.

Espera-se que este trabalho contribua como base técnica para a futura execução da climatização da biblioteca, oferecendo à instituição um projeto fundamentado e exequível, e que sirva como referência para projetos semelhantes em outras edificações do campus e em outras instituições públicas com características construtivas e operacionais comparáveis.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira:

- O Capítulo 2 descreve os objetivos do trabalho: geral e específicos.
- O Capítulo 3 reúne os principais conceitos, teorias e trabalhos anteriores sobre conforto térmico, qualidade do ar interior, sistemas de climatização e cálculo de carga térmica.
- O Capítulo 4 apresenta a metodologia adotada, os *softwares* utilizados e os parâmetros de projeto.

- O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos em cada etapa do projeto.
- O Capítulo 6 traz as conclusões do trabalho.
- O Capítulo 7 apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver o projeto executivo de climatização e renovação de ar para a biblioteca do Campus Nova Gameleira (Campus II) do CEFET-MG, contemplando o dimensionamento da carga térmica, a seleção e o dimensionamento do sistema de Volume de Refrigerante Variável (VRF), o dimensionamento do sistema de renovação de ar e a elaboração das plantas técnicas, com vistas a garantir o conforto térmico e a qualidade do ar interior do ambiente.

2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos deste trabalho, propõe-se:

- Caracterizar o edifício da biblioteca quanto à arquitetura, ocupação, orientação solar e materiais construtivos, identificando os fatores que influenciam a carga térmica.
- Realizar o levantamento e o cálculo da carga térmica do edifício utilizando o *software* HAP 6.2, com base nas normas e nos parâmetros técnicos aplicáveis.
- Analisar e justificar tecnicamente a escolha do sistema VRF frente às demais alternativas de climatização disponíveis no mercado.
- Selecionar e dimensionar os equipamentos do sistema VRF utilizando o *software* de seleção Midea MCSSP, definindo as unidades condensadoras, evaporadoras e o dimensionamento da linha frigorígena.
- Dimensionar o sistema de renovação de ar, definindo as vazões necessárias e os equipamentos de tratamento do ar conforme as normas aplicáveis.
- Dimensionar a rede de dutos do sistema de renovação de ar, incluindo o cálculo de perdas de carga e a especificação dos materiais.
- Elaborar o projeto executivo em planta utilizando o *software* AutoCAD, com memorial descritivo das decisões de projeto.
- Elaborar a relação de materiais e o levantamento de preços do sistema projetado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica que sustenta as decisões técnicas adotadas no projeto. São discutidos os conceitos de conforto térmico, qualidade do ar interior, sistemas de climatização, métodos de cálculo de carga térmica, sistemas de dutos para renovação de ar e particularidades da climatização em ambientes de bibliotecas universitárias. As referências utilizadas incluem normas técnicas brasileiras e internacionais, manuais de fabricantes, livros técnicos e trabalhos acadêmicos sobre o tema.

3.1 Conforto Térmico

3.1.1 Definição e Importância

Segundo a ABNT NBR 16401-2:2024, o conforto térmico é definido como o estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico. Trata-se de um conceito subjetivo, influenciado por variáveis fisiológicas, psicológicas e ambientais, sendo praticamente impossível satisfazer simultaneamente todos os ocupantes de um mesmo espaço (ABNT, 2024).

A garantia de condições de conforto térmico em ambientes de uso prolongado, como bibliotecas e salas de estudo, é fundamental para o desempenho cognitivo dos usuários. Ambientes com temperaturas inadequadas reduzem a capacidade de concentração, causam fadiga e prejudicam a permanência prolongada nos espaços de leitura e estudo.

3.1.2 Variáveis de Conforto Térmico

A ABNT NBR 16401-2:2024 e a norma ISO 7730 estabelecem seis variáveis principais que determinam a percepção de conforto térmico, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Variáveis de conforto térmico

Variável	Descrição
VARIÁVEIS PESSOAIS	
Taxa metabólica (M)	Calor produzido pelo corpo em função da atividade (W/m ²)
Isolamento da vestimenta (Icl)	Resistência térmica das roupas, 1 clo = 0,155 m ² ·K/W

Variável	Descrição
VARIÁVEIS AMBIENTAIS	
Temperatura do ar (ta)	Temperatura de bulbo seco do ar ambiente (°C)
Temperatura radiante média (tr)	Temperatura uniforme equivalente das superfícies (°C)
Umidade relativa do ar (UR)	Razão entre pressão parcial de vapor e pressão de saturação (%)
Velocidade do ar (var)	Velocidade média do ar no entorno do ocupante (m/s)

Fonte: ABNT NBR 16401-2:2024, adaptado.

As duas primeiras variáveis são relacionadas ao ocupante, enquanto as quatro restantes caracterizam o ambiente. A interação entre essas variáveis define a sensação térmica percebida pelos usuários e deve ser analisada de forma integrada no projeto de climatização.

3.1.3 Índices PMV e PPD: Modelo de Fanger

O modelo desenvolvido por Fanger e adotado pelas normas ABNT NBR 16401-2:2024, ISO 7730 e ASHRAE *Standard* 55-2017 utiliza dois índices principais para avaliação do conforto térmico em ambientes condicionados artificialmente: o Voto Médio Estimado (PMV (Predicted Mean Vote) e a Porcentagem Estimada de Insatisfeitos (PPD) Predicted Percentage of Dissatisfied).

O PMV expressa o valor médio da sensação térmica de um grupo de ocupantes em uma escala de sete pontos, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Escala de sensação térmica de Fanger

PMV	Sensação Térmica
+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Levemente quente
0	Neutro (zona de conforto)

PMV	Sensação Térmica
-1	Levemente frio
-2	Frio
-3	Muito frio

Fonte: ABNT NBR 16401-2:2024.

A zona de conforto é definida pela combinação das seis variáveis para as quais o PMV permanece dentro do intervalo de $\pm 0,5$, o que corresponde a aproximadamente 90% de pessoas satisfeitas ($PPD \leq 10\%$). Na prática, devido a efeitos de desconforto local (como assimetria de temperatura radiante, gradiente vertical de temperatura ou correntes de ar), considera-se um adicional de 10% no PPD, resultando em uma satisfação esperada de aproximadamente 80% (ABNT, 2024).

3.1.4 Parâmetros Normativos para Condicionamento Artificial

Para o período de verão em ambientes condicionados artificialmente, a ABNT NBR 16401-2:2024 estabelece a faixa aceitável de temperatura operativa entre **22,5°C e 26,0°C**, com umidade relativa entre **35% e 65%**, para ocupantes em atividade sedentária com vestimenta típica de 1,0 clo. A norma ASHRAE *Standard* 55-2017 estabelece adicionalmente uma temperatura de orvalho máxima de 16,8°C, que deve ser mantida mesmo durante o recesso operacional, com vistas a mitigar a proliferação de fungos e mofo (ASHRAE, 2017).

A ASHRAE recomenda ainda que a umidade relativa em ambientes ocupados se mantenha entre 40% e 60%, faixa considerada ideal para conforto, salubridade e desempenho cognitivo (ABRAVA, 2026).

3.2 Qualidade do Ar Interior e Renovação de Ar

3.2.1 Importância da Renovação de Ar

A ABNT NBR 16401-3:2024 define ar interior de qualidade aceitável como aquele que não contém poluentes em concentração prejudicial à saúde ou ao bem-estar e que é percebido como satisfatório pela grande maioria (80% ou mais) dos ocupantes do recinto. A renovação contínua do ar interno é essencial para a diluição de contaminantes gerados pela ocupação humana, materiais de acabamento, mobiliário e processos internos (ABNT, 2024).

Em ambientes de biblioteca, onde a permanência dos usuários é prolongada e o acervo emite compostos orgânicos voláteis (VOCs) provenientes do papel, encadernações e mobiliário, a renovação adequada de ar é especialmente crítica. A insuficiência de ar externo provoca acúmulo de CO₂, odores e contaminantes, comprometendo o conforto e a saúde dos ocupantes.

3.2.2 CO₂ como Indicador de Qualidade do Ar

A ABNT NBR 16401-3:2024 e a ANVISA destacam que o dióxido de carbono (CO₂) é utilizado como marcador químico da qualidade do ar interior. Embora pouco reativo, sua concentração é diretamente proporcional ao número de ocupantes e indica indiretamente a presença de outros contaminantes biológicos liberados pelo metabolismo humano.

A concentração média de CO₂ na atmosfera mundial atinge aproximadamente 400 ppm, podendo superar 500 ppm em centros urbanos. A Resolução ANVISA RE nº 09/2003 estabelece o limite máximo de 1.000 ppm de CO₂ em ambientes climatizados não industriais. A Tabela 3 apresenta os principais contaminantes monitorados e seus respectivos limites.

Tabela 3 – Limites de concentração de poluentes em ambientes climatizados

Poluente	Limite (ambiente climatizado)	Principais fontes
Dióxido de carbono (CO ₂)	1.000 ppm	Respiração humana, indicador de ocupação
Monóxido de carbono (CO)	9 ppm (8h)	Garagens, queima de combustíveis
Formaldeído (HCHO)	27 ppb (8h)	Aglomerados de madeira, colas, vernizes
Material particulado (PM _{2,5})	25 a 35 µg/m ³	Poeira, fumaça, ar externo poluído

Fonte: ABNT NBR 16401-3:2024 e ANVISA RE nº 09/2003.

3.2.3 Cálculo da Vazão de Ar Exterior: Método VRP

A ASHRAE *Standard* 62.1-2022 estabelece o método VRP (*Ventilation Rate Procedure*) como o procedimento padrão para o cálculo da vazão mínima de ar exterior em zonas de ventilação. O método considera, de forma independente, as cargas relacionadas aos ocupantes e as cargas relacionadas à área do ambiente, refletindo a contribuição diferenciada de cada fonte de contaminantes.

A norma define taxas mínimas de ar exterior por categoria de uso. Para a categoria *Libraries*, a taxa combinada de referência é de 1,13 L/(s·m²), conforme o Anexo M (*Check Table for VRP*) da ASHRAE 62.1-2022. A ABNT NBR 16401-3:2024 adota procedimento equivalente, calculando a vazão eficaz na zona de ventilação e aplicando correção pela eficiência da distribuição de ar (Ev), determinada conforme as Equações 7 e 8 da norma.

3.2.4 DOAS: Sistema Dedicado de Renovação de Ar

O sistema **DOAS** (*Dedicated Outdoor Air System*) é a estratégia mais eficiente para o controle da qualidade do ar interior em sistemas de climatização. Conforme apresentado pela ABRAVA (2026), o tratamento centralizado do ar externo de renovação por meio de UTAs dedicadas (separado do sistema de resfriamento sensível) permite controlar de forma independente a temperatura, a umidade e a qualidade do ar, otimizando o consumo energético e garantindo a qualidade do ambiente interno.

Sistemas VRF, por serem essencialmente sistemas de controle de temperatura, integram-se ao DOAS para garantir a renovação adequada de ar. Esta arquitetura é especialmente recomendada para edificações de uso público com ocupação variável, como bibliotecas, onde o controle por demanda de CO₂ (DCV, *Demand Controlled Ventilation*) ajusta a vazão de ar externo em tempo real conforme a presença de ocupantes (ABRAVA, 2026).

3.3 Sistemas de Climatização

3.3.1 Panorama Geral dos Sistemas

A ABNT NBR 16401-1:2024 e a literatura técnica (CREDER, 2004) classificam os sistemas de climatização conforme o tipo de expansão (direta ou indireta), o tipo de condensação (a ar ou a água) e a configuração construtiva. A Tabela 4 apresenta um panorama dos principais sistemas disponíveis no mercado brasileiro.

Tabela 4 – Panorama dos sistemas de climatização

Sistema	Faixa de capacidade	Aplicação típica	Limitações principais
Janela	Até 9 kW	Residências, salas pequenas	Sem renovação de ar; ruído elevado
Split / Mini Split	Até 18 kW	Escritórios, salas individuais	Sem renovação de ar; baixa eficiência multi-zona

Sistema	Faixa de capacidade	Aplicação típica	Limitações principais
Multi Split	Até 18 kW (várias UEs)	Residências/comércio (poucas zonas)	Capacidade limitada; sem controle individual avançado
Self-contained	Acima de 14 TR	Bancos, lojas, indústrias (>400 m²)	Requer sala de máquinas; menor flexibilidade
VRF / VRV	8 a 90 HP por sistema	Escritórios, hotéis, escolas, retrofit	Custo de refrigerante; limitação de comprimento de linha
Chiller (água gelada)	Acima de 30 TR	Hospitais, shoppings, datacenters	Requer CAG; obra complexa; bombas e tubulação hidráulica

Fonte: ABNT NBR 16401-1:2024 e Creder (2004), adaptado.

A escolha do sistema deve considerar a área e o tipo de ocupação do edifício, a disponibilidade de espaço para casas de máquinas, os requisitos de controle individual, o orçamento de implantação e a expectativa de consumo energético ao longo do ciclo de vida (CREDER, 2004).

3.3.2 Sistema VRF: Volume de Refrigerante Variável

O sistema VRF (*Variable Refrigerant Flow*), também conhecido como VRV (*Variable Refrigerant Volume*), foi desenvolvido pela Daikin no Japão em 1982 (PINTO, 2023). Sua principal característica é a **modulação contínua da vazão do fluido refrigerante** enviada a cada unidade evaporadora, conforme a demanda térmica de cada ambiente. A unidade externa é equipada com um ou mais compressores do tipo scroll com inversor de frequência (*inverter*), que ajusta a rotação e, consequentemente, a vazão de refrigerante de forma proporcional à carga real do edifício (ABRAVA, 2026).

Goetzler (2007) define o conceito da seguinte forma: o termo vazão de fluido variável se refere à habilidade do sistema de controlar a quantidade de refrigerante fluindo em cada um dos evaporadores, permitindo o uso de muitos evaporadores de diferentes tamanhos e configurações, controle de conforto individualizado, aquecimento e refrigeração simultâneos em zonas diferentes, e recuperação de calor de uma zona para outra (apud PINTO, 2023).

3.3.3 Vantagens do Sistema VRF

As principais vantagens do sistema VRF, segundo Corrêa (2013) apud Pinto (2023) e a ABRAVA (2026), são:

- Eficiência em cargas parciais, a modulação contínua via *inverter* elimina os ciclos liga/desliga característicos dos sistemas convencionais, resultando em significativa economia energética em cenários com cargas variáveis (típico de escritórios, hotéis, escolas e edifícios mistos).
- Controle individual avançado, cada unidade evaporadora pode ser controlada de forma independente, permitindo diferentes temperaturas em cada ambiente e a desativação de áreas não ocupadas, otimizando o consumo energético.
- Facilidade e velocidade de instalação, a tubulação de cobre de pequeno diâmetro substitui a complexa rede hidráulica dos sistemas de água gelada, reduzindo o peso, o volume e o tempo da obra.
- Modularidade e expansibilidade, o sistema permite ampliações futuras de forma simplificada, desde que respeitados os limites da unidade condensadora e os parâmetros de simultaneidade.
- Vida útil estendida, a operação contínua em rotação variável reduz o desgaste dos compressores e dos motores elétricos, em comparação com o ciclo liga/desliga dos sistemas convencionais.

3.3.4 Limitações do Sistema VRF

Apesar das vantagens, o sistema VRF apresenta algumas limitações importantes. A ABRAVA (2026) destaca:

- Limitação de comprimento e desnível, o sistema é limitado pelo comprimento total das linhas de refrigerante e pela diferença de nível entre as unidades. Para o sistema Midea VC Max, por exemplo, o comprimento total de tubulação pode atingir até 1.100 m, respeitados os limites do fabricante (MIDEA CARRIER, 2024).
- Volume e impacto ambiental do refrigerante, o sistema carrega grandes volumes de refrigerante, e vazamentos podem causar impacto ambiental direto devido ao alto Potencial de Aquecimento Global (GWP) dos fluidos HFC, além de paralisar todo ou parte do sistema até o reparo.

- Limitações em projetos de alta performance, a integração com estratégias avançadas de qualidade do ar interior, umidificação/desumidificação precisa e free-cooling é mais complexa do que em sistemas de água gelada, sendo necessário associar o VRF a um sistema DOAS para garantir a renovação adequada do ar.

3.3.5 Comparativo VRF x Chiller

A escolha entre VRF e sistemas de água gelada (*chiller*) é uma decisão estratégica de projeto, que deve ponderar diversos critérios técnicos, econômicos e arquitetônicos. A Tabela 5 apresenta o comparativo entre os dois sistemas.

Tabela 5 – Comparativo entre sistemas VRF e Chiller

Critério	VRF	Chiller (Água Gelada)
Eficiência em carga parcial	Excelente, modulação contínua via <i>inverter</i>	Boa, mas inferior ao VRF em cargas parciais
Eficiência em carga plena	Boa	Superior, principalmente com torre de resfriamento
Espaço necessário	Compacto, não requer CAG	Requer Casa de Água Gelada (CAG)
Velocidade de instalação	Alta, tubulação de cobre de pequeno diâmetro	Baixa, bombas, tubulação hidráulica, vasos de expansão
Controle individual por zona	Excelente, controle independente	Possível, porém mais complexo
Volume de refrigerante	Alto, risco ambiental em vazamentos	Baixo, usa água/glicol como fluido secundário
Custo operacional	Geralmente menor (até 36% em alguns estudos)	Maior consumo elétrico em carga parcial
Aplicação ideal	Edifícios comerciais, escolas, hotéis, retrofit	Hospitais, datacenters, grandes shoppings, indústrias

Fonte: ABRAVA (2026), Pinto (2023) e Souza (2010), adaptado.

Estudos comparativos demonstram que o sistema VRF apresenta consumo energético inferior ao sistema de água gelada em aplicações com cargas parciais predominantes, tendo Pinto (2023) registrado uma redução de até 36% no custo operacional para um setor de aulas universitário. A escolha entre os sistemas, no entanto, não é trivial e exige análise de cada projeto considerando a setorização, a variabilidade da carga e o espaço disponível para a infraestrutura.

3.4 Carga Térmica e Métodos de Cálculo

3.4.1 Componentes da Carga Térmica

A carga térmica de um ambiente corresponde ao total de calor que deve ser removido (no modo resfriamento) ou adicionado (no modo aquecimento) para manter as condições internas de conforto desejadas. Conforme a ABNT NBR 16401-1:2024, o cálculo deve contemplar todos os componentes de carga que atuam simultaneamente sobre o ambiente, separando-os em cargas externas e cargas internas.

As cargas externas compreendem: a transmissão de calor pela envoltória opaca (paredes externas, cobertura e piso), o ganho solar através das superfícies envidraçadas, e a infiltração de ar externo não intencional. As cargas internas incluem: o calor sensível e latente dissipado pelos ocupantes, o calor gerado pela iluminação artificial, o calor gerado pelos equipamentos elétricos e o calor associado ao ar de renovação do sistema DOAS.

A separação entre carga sensível e carga latente é fundamental para o dimensionamento: a carga sensível altera a temperatura do ar, enquanto a carga latente altera o conteúdo de umidade. O sistema deve remover ambas para manter simultaneamente temperatura e umidade relativa dentro das faixas de conforto.

3.4.2 Métodos de Cálculo Aceitos pela Norma

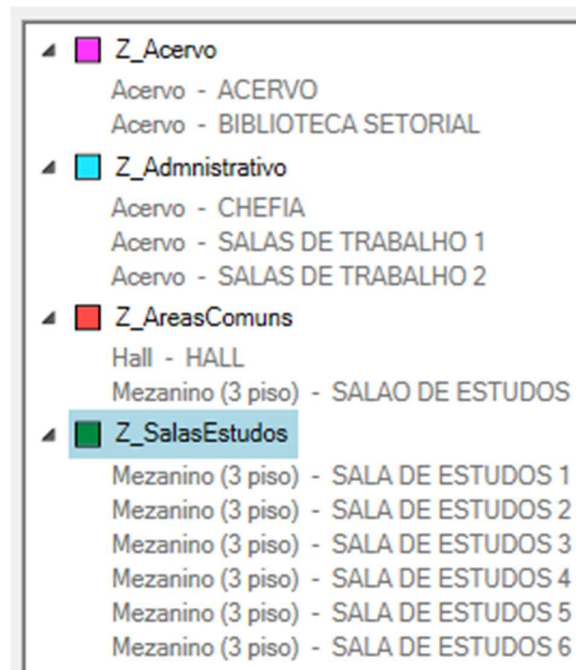
A ABNT NBR 16401-1:2024 (item 6.1.3.3) estabelece que o cálculo de carga térmica pode ser realizado com o auxílio de programas de computador baseados em métodos reconhecidos pela ASHRAE, como o *Heat Balance Method* (HBM) e o *Radiant Time Series Method* (RTS), descritos no ASHRAE Handbook of Fundamentals. A norma admite explicitamente o uso de programas computacionais validados, desde que os métodos empregados sejam baseados em procedimentos reconhecidos pela ASHRAE.

3.4.3 Software HAP: *Hourly Analysis Program*

O *software* HAP (*Hourly Analysis Program*), versão 6.2, desenvolvido pela Carrier Corporation, é amplamente utilizado por engenheiros de AVAC para o cálculo de carga térmica e simulação energética de edificações comerciais e institucionais. O HAP utiliza o *Heat Balance Method* (HBM) da ASHRAE e realiza simulação hora a hora ao longo de todas as 8.760 horas do ano, identificando automaticamente os horários e meses de pico de carga para cada zona e para o sistema como um todo (CARRIER, [s.d.]).

O HAP organiza o projeto em Spaces (ambientes individuais), Zones (conjuntos de ambientes com sistema comum) e Air Systems (sistemas de ar que atendem as zonas). Para cada zona, o programa calcula as cargas de resfriamento e aquecimento com base nos parâmetros de envoltória, cargas internas, dados climáticos e condições internas especificadas pelo projetista. O *software* modela ainda o sistema DOAS de renovação de ar, aplicando o método VRP da ASHRAE 62.1 para o cálculo das vazões mínimas de ar exterior por zona de ventilação (Figura 2).

Figura 2 – Interface do *software* HAP 6.2, árvore de zonas e ambientes da Biblioteca do Campus Nova Gameleira



Fonte: Elaboração própria.

3.5 Software de Seleção: Midea MCSSP

O Midea MCSSP (Midea Commercial Selection Software Platform) é a ferramenta oficial de seleção e dimensionamento de sistemas VRF da Midea Carrier. O *software* recebe como entrada a carga térmica de cada ambiente e as condições de projeto, e realiza o dimensionamento integrado das unidades condensadoras e evaporadoras, verificando a taxa de combinação, os limites de tubulação e o desempenho do sistema nas condições locais.

O principal parâmetro verificado pelo MCSSP é a taxa de combinação (CR (*Combination Ratio*)), que representa a relação entre a soma das capacidades nominais das unidades internas e a capacidade nominal da unidade condensadora. Para o sistema Midea V8, a faixa recomendada é de 100% a 130%) acima disso o sistema opera em sobrecarga; abaixo de 50% compromete a estabilidade do compressor (MIDEA CARRIER, 2024).

O *software* também verifica todos os limites de tubulação: comprimento total, maior trecho real, maior trecho equivalente, desnível entre unidades e distância entre derivações. Esses limites garantem que o refrigerante chegue a todas as unidades internas com pressão e temperatura adequadas para o funcionamento correto do sistema.

3.6 Sistemas de Dutos para Renovação de Ar

3.6.1 Função dos Dutos no Sistema de Climatização

Os dutos de ar são os elementos responsáveis pelo transporte do ar tratado entre a unidade de tratamento (UTA ou DOAS) e os pontos de insuflamento nos ambientes condicionados, bem como pelo retorno do ar até a casa de máquinas. Em sistemas DOAS associados a VRF, os dutos transportam o ar exterior renovado, previamente filtrado e tratado, até cada zona de ventilação, garantindo a manutenção da qualidade do ar interior conforme as taxas estabelecidas pela ASHRAE 62.1-2022 e pela ABNT NBR 16401-3:2024.

A ABNT NBR 16401-1:2024 (item 10.2.1) estabelece que o projeto de distribuição de ar deve considerar o diferencial de pressão entre ambientes, o gerenciamento de fumaça e calor, o isolamento térmico, o vazamento admissível, o nível de ruído, os procedimentos de teste, ajuste e balanceamento (TAB) e o dimensionamento adequado do ventilador, levando em conta as perdas de carga totais do sistema.

3.6.2 Materiais de Dutos: Chapa Galvanizada e MPU

Os materiais tradicionalmente utilizados para a fabricação de dutos incluem chapa de aço galvanizado, alumínio, aço inoxidável e, mais recentemente, painéis pré-isolados de poliuretano. Cada material possui características específicas que influenciam o desempenho aerodinâmico, térmico e acústico do sistema (ABNT NBR 16401-1:2024; CREDER, 2004).

A chapa de aço galvanizado é o material mais tradicional, regulamentado pela ABNT NBR 16401-1:2024 (Anexo B), que estabelece as espessuras mínimas em função da maior dimensão do duto e da classe de pressão do sistema. Os dutos em chapa galvanizada apresentam rugosidade interna típica de 0,09 mm (referência adotada nas tabelas de perda de carga da ASHRAE) e exigem aplicação de isolamento térmico externo quando transportam ar com temperatura diferente da temperatura do ambiente externo, evitando perdas de calor e condensação superficial.

Os painéis MPU (**Painéis de Alumínio Pré-isolados com Espuma de Poliuretano**) representam uma alternativa moderna que integra a função estrutural do duto com o isolamento térmico em um único painel. O painel é composto por duas folhas externas de alumínio gofrado e um núcleo de espuma rígida de poliuretano de 20 mm de espessura, com densidade típica de 42 kg/m³ e condutividade térmica de 0,020 W/(m·K), valor inferior ao da maioria dos materiais isolantes convencionais (MPU DO BRASIL, 2024). A norma técnica de referência para dutos de painéis pré-isolados é a ABNT NBR 16235.

3.6.3 Rugosidade dos Materiais e Influência na Perda de Carga

A rugosidade interna do material do duto é um parâmetro fundamental no cálculo das perdas de carga por atrito, sendo um dos termos da equação de Colebrook-White que determina o fator de atrito de Darcy. Materiais com menor rugosidade absoluta resultam em menores perdas de carga distribuídas ao longo do duto, reduzindo a potência requerida pelo ventilador e o consumo energético do sistema (Tabela 6).

Tabela 6 – Rugosidade absoluta de materiais utilizados em dutos

Material	Rugosidade absoluta (mm)	Categoria
Alumínio (painel MPU)	0,03 a 0,06	Lisa
Aço inoxidável	0,03	Lisa
Chapa galvanizada (costura longitudinal)	0,09	Média
Chapa galvanizada (espiralada)	0,09 a 0,15	Média
Concreto	0,90 a 3,00	Rugosa

Fonte: ABNT NBR 16401-1:2024 e ASHRAE Fundamentals (2021), adaptado.

Como pode ser observado, a superfície interna de alumínio dos painéis MPU apresenta rugosidade significativamente inferior à da chapa galvanizada com costura longitudinal, resultando em menor perda de carga distribuída e, consequentemente, menor consumo de energia pelo ventilador ao longo da vida útil do sistema.

3.6.4 Vantagens Adicionais do Sistema MPU

Além da menor rugosidade, o sistema MPU oferece vantagens significativas em relação aos sistemas tradicionais de chapa galvanizada com isolamento externo. A integração do isolamento térmico no próprio painel elimina a necessidade de aplicação posterior de manta isolante, reduzindo o tempo de obra e os custos de instalação.

Os painéis MPU apresentam estanqueidade superior à Classe C da norma EN 1507 (DW144), reduzindo as perdas de ar e aumentando a eficiência do sistema. Adicionalmente, a tecnologia incorpora nanopartículas de prata e outros compostos antimicrobianos que reduzem em mais de 99,999% a proliferação de bactérias na superfície interna dos dutos (incluindo *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*) conforme ensaios laboratoriais realizados em conformidade com a norma JIS 2801:2000 (MPU DO BRASIL, 2024). Essa característica é especialmente relevante para aplicações em bibliotecas, hospitais e ambientes onde a qualidade do ar interior é crítica.

3.7 Climatização em Bibliotecas Universitárias

3.7.1 Especificidades do Uso

Bibliotecas universitárias apresentam particularidades que devem ser consideradas no projeto de climatização. A ocupação varia significativamente ao longo do dia e ao longo do ano, com picos durante períodos de provas e baixa ocupação em períodos de recesso acadêmico. Os ambientes de leitura e estudo exigem condições de conforto térmico estáveis, baixo nível de ruído e alta qualidade do ar para favorecer a concentração e o desempenho cognitivo dos usuários.

Conforme Creder (2004), a estimativa de ocupação para bibliotecas e museus situa-se em uma pessoa por 5,50 m² de área. Esse valor pode ser superado em períodos de pico, exigindo sistemas com capacidade de modulação para manter as condições de conforto sem desperdício energético em períodos de baixa ocupação, característica em que o sistema VRF associado a DOAS com controle DCV se destaca.

3.7.2 Distinção entre Acervo Comum e Acervo Especial

Um aspecto fundamental no projeto de climatização de bibliotecas é a distinção entre **acervo comum** (composto por livros, periódicos e materiais didáticos de uso corrente) e **acervo especial**, composto por obras raras, manuscritos, mapas antigos e documentos de valor histórico ou cultural. As exigências de climatização para cada tipo são diferentes (CREDER, 2004).

Para acervos especiais, com obras raras e manuscritos, Creder (2004) recomenda condições mais restritivas: temperatura de bulbo seco entre 21°C e 23°C e umidade relativa controlada entre 40% e 50%, com pequenas tolerâncias. Esse controle restritivo visa minimizar a degradação do papel, o crescimento de fungos e a deterioração das encadernações, sendo necessário sistemas com controle de umidade independente (THIC, Temperatura e Umidade com Controle Independente) e monitoramento contínuo (ABRAVA, 2026).

Já para o acervo comum de bibliotecas universitárias (caso da biblioteca objeto deste trabalho) não é exigido controle restritivo de umidade. As condições de conforto humano estabelecidas pela ABNT NBR 16401-2:2024 para ambientes ocupacionais são suficientes para garantir a preservação adequada do material bibliográfico de uso corrente, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Condições de conforto recomendadas para ambientes de biblioteca

Tipo de Ambiente	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)
Bibliotecas e ambientes de leitura (acervo comum)	22,5 a 26,0 (verão)	35 a 65
Depósitos de livros, manuscritos e obras raras	21 a 23	40 a 50
Museus e galerias de arte	21 a 23	50 a 55

Fonte: ABNT NBR 16401-2:2024 e Creder (2004), adaptado.

Esta distinção é fundamental para o dimensionamento do sistema de climatização. Para o acervo comum (o caso deste projeto), o sistema VRF associado ao DOAS atende plenamente os requisitos normativos de conforto e qualidade do ar, sem necessidade de adicionar sistemas dedicados de controle de umidade ou desumidificação independente, o que simplifica o projeto e reduz os custos de implantação e operação.

3.7.3 Boas Práticas para Climatização de Bibliotecas

Além dos parâmetros de conforto térmico e qualidade do ar, o projeto de climatização de bibliotecas deve considerar aspectos específicos do uso prolongado e silencioso desses ambientes:

- Baixo nível de ruído, conforme a ABNT NBR 10152, ambientes de biblioteca exigem níveis de pressão sonora inferiores aos de ambientes comerciais convencionais. A seleção das unidades evaporadoras e o dimensionamento da rede de dutos devem priorizar baixas velocidades do ar e equipamentos com nível sonoro reduzido.
- Distribuição uniforme do ar, em ambientes de leitura prolongada, é fundamental evitar correntes de ar diretas sobre os usuários, que podem causar desconforto localizado. Cassetes de quatro vias com defletores ajustáveis são particularmente adequados para ambientes amplos como salões de leitura e halls de entrada.
- Modulação eficiente, a ocupação variável das bibliotecas, com picos em períodos de provas e baixa ocupação em recessos, favorece o uso de sistemas com modulação contínua de capacidade. O sistema VRF, associado ao controle DCV no DOAS, ajusta automaticamente tanto a capacidade de resfriamento quanto a vazão de renovação de ar conforme a ocupação real, otimizando o consumo energético sem comprometer o conforto.

- Controle individualizado, diferentes setores da biblioteca apresentam perfis de carga distintos. O acervo, geralmente com baixa ocupação humana, demanda principalmente o controle de cargas de envoltória; o salão de estudos, com alta densidade de ocupação, demanda principalmente o controle das cargas internas. O controle individual por zona, característica intrínseca do sistema VRF, permite atender essas demandas distintas com a máxima eficiência.

3.8 Síntese da Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica apresentada fundamenta as escolhas técnicas adotadas no projeto. A ABNT NBR 16401, em suas três partes, constitui a base normativa nacional para o dimensionamento do sistema, complementada pelas normas internacionais ASHRAE 55-2017 (conforto térmico) e ASHRAE 62.1-2022 (qualidade do ar interior). A literatura técnica e os trabalhos acadêmicos consultados confirmam o sistema VRF associado a DOAS como a solução tecnicamente mais adequada para a climatização de uma biblioteca universitária com as características da edificação em estudo.

Os pontos centrais que sustentam o projeto são: a adoção do método HBM via *software* HAP 6.2 para o cálculo da carga térmica, em conformidade com a NBR 16401-1; a definição das condições internas de conforto (23,9°C e 50% UR) dentro da zona estabelecida pela NBR 16401-2; o dimensionamento do sistema de renovação de ar pelo método VRP da ASHRAE 62.1-2022 com controle DCV, atendendo o limite de 1.000 ppm de CO₂ da ANVISA e da NBR 16401-2; a especificação do sistema VRF Carrier VC Max selecionado pelo *software* Midea MCSSP, justificada pela inviabilidade de instalação de *chiller* (ausência de espaço para CAG) e pelas vantagens de eficiência em cargas parciais e modularidade; e a adoção de dutos MPU para o sistema de renovação de ar, justificada pela menor rugosidade, isolamento integrado e propriedades antimicrobianas particularmente benéficas para o ambiente de biblioteca.

4 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos, ferramentas e normas técnicas adotados para o desenvolvimento do projeto de climatização e renovação de ar da biblioteca do Campus Nova Gameleira do CEFET-MG. A metodologia foi estruturada em quatro etapas: cálculo da carga térmica, seleção de equipamentos, elaboração do projeto em planta e levantamento de preços.

4.1 Cálculo da Carga Térmica

4.1.1 Software e Método de Cálculo

O cálculo da carga térmica foi realizado por meio do *software* HAP 6.2 (*Hourly Analysis Program*) da Carrier. O HAP utiliza o método *Heat Balance Method* (HBM), desenvolvido pela ASHRAE, que realiza simulação hora a hora ao longo de todos os meses do ano, considerando a variação dinâmica das cargas externas e internas. Conforme a ABNT NBR 16401-1:2024, este método é aceito para o dimensionamento de sistemas de condicionamento de ar em edificações.

De forma objetiva, o método consiste em resolver, para cada hora do ano, um sistema de equações que contabiliza simultaneamente todos os fluxos de calor que entram e saem de cada zona térmica: a condução de calor pelas paredes, pela cobertura e pelo piso; a radiação solar transmitida e absorvida pelas superfícies; as trocas convectivas com o ar interior; e os ganhos internos provenientes de ocupantes, iluminação e equipamentos. Por resolver esse balanço hora a hora ao longo dos doze meses, o método capta o efeito da inércia térmica da construção, ou seja, o atraso entre o instante em que o calor é absorvido pelas superfícies e o momento em que ele é efetivamente liberado para o ambiente interno. A carga térmica de projeto corresponde ao maior valor de carga de resfriamento encontrado em toda a simulação anual.

O método do balanço energético (HBM) tem como base um balanço energético aplicado às superfícies interiores e exteriores do envelope da edificação, na área envidraçada e no ar interior da zona (ASHRAE, 2005). O HBM pressupõe a definição de pelo menos uma zona térmica, isto é, uma zona com uma determinada temperatura de conforto definida. Esta zona térmica consiste em quatro paredes, uma cobertura e um pavimento, que podem ser interiores ou exteriores, incluindo o efeito de inércia térmica dos componentes construtivos.

O processo de balanço energético para esta zona genérica envolve análises de 24 horas por dia das temperaturas interiores e exteriores das superfícies da zona, bem como do sistema

de HVAC. Dentro das cargas internas da zona, é necessário discriminar as parcelas sensíveis e latentes, de acordo com o tipo de geração (ocupação, equipamentos, entre outros).

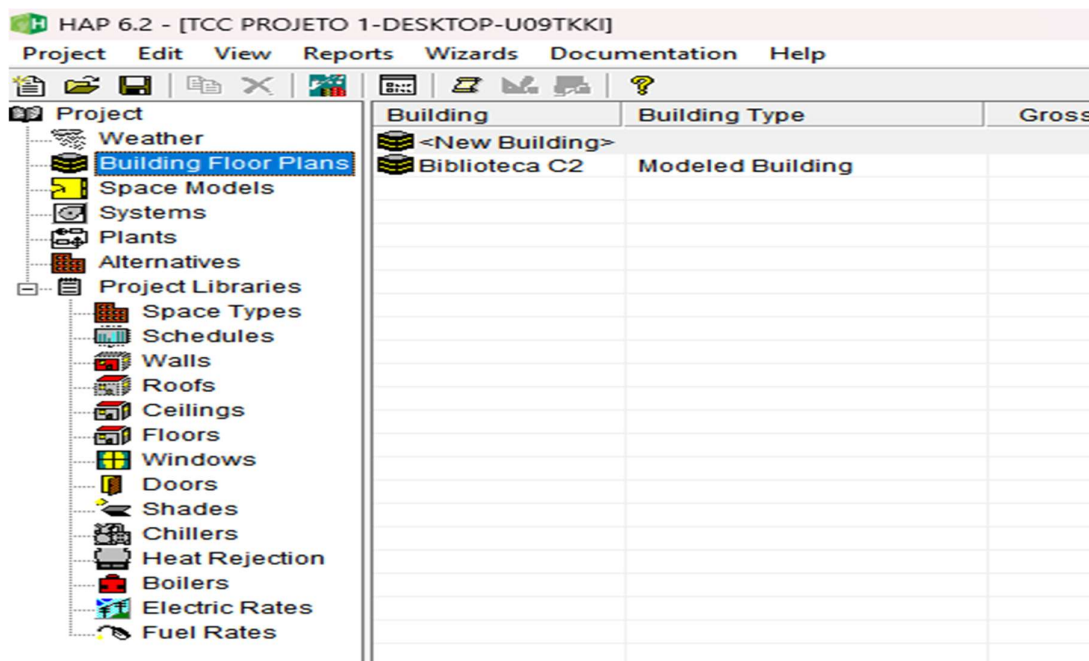
O *Heat Balance Method* garante que toda a energia que flui em cada zona esteja balanceada e envolve a solução de um conjunto de equações de balanço de energia no ar da zona, nas superfícies interiores e exteriores, combinadas com as equações de condução de calor transiente, assim como dados climáticos, radiação solar, temperaturas e umidades, entre outros. A carga total de resfriamento da edificação é obtida pela soma das parcelas sensível e latente de todas as zonas, conforme a Equação (1) (Figura 3).

$$Q_{total} = Q_{sens} + Q_{lat} \quad (1)$$

onde:

$$Q_{total} = \text{carga total de resfriamento (kW);}$$
$$Q_{sens} = \text{carga sensível total (kW)};$$
$$Q_{lat} = \text{carga térmica total (kW)}.$$

Figura 3 – Tela principal do *software* HAP 6.2 com o projeto modelado.



Fonte: Elaboração própria.

Cabe esclarecer que todos os programas computacionais utilizados neste trabalho (HAP 6.2 da Carrier, Midea MCSSP e McQuay Duct Sizer) são *softwares* comerciais de uso profissional, disponibilizados ao autor por distribuidor credenciado da Carrier. O acesso a essas ferramentas decorre da condição do autor como comprador e instalador credenciado de sistemas de climatização, o que assegura o direito de utilização dos *softwares* de seleção e dimensionamento que os fabricantes disponibilizam aos profissionais habilitados do setor.

4.1.2 Dados Climáticos

Os dados meteorológicos foram obtidos diretamente da base de dados do *software* HAP 6.2 e conferidos no portal ASHRAE Climatic Design Conditions (ashrae-meteo.info), utilizando a estação de referência Belo Horizonte, Pampulha AP (WMO: 835830), com registros do período de 1999 a 2023, classificados como grau A (ASHRAE, 2025). A estação de Pampulha foi adotada por ser a mais próxima do edifício da biblioteca do CEFET-MG Campus Nova Gameleira, não havendo estação meteorológica instalada no local.

Os parâmetros climáticos de projeto adotados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros climáticos externos de projeto

Condição	Temperatura	Referência
Resfriamento (BS / BU)	32,4°C / 20,0°C	HAP 6.2, BH Pampulha AP
Aquecimento (BS / BU)	11,1°C / 6,2°C	HAP 6.2, BH Pampulha AP
Altitude	789,1 m	HAP 6.2, BH Pampulha AP

Fonte: ASHRAE (2025), adaptado.

4.1.3 Condições Internas de Projeto e Conforto Térmico

As condições internas de projeto foram definidas com base na ABNT NBR 16401-2:2024, que estabelece os parâmetros de conforto térmico para ambientes artificialmente condicionados. A norma define como aceitável, para o período de verão, a faixa de temperatura operativa entre 22,5°C e 26,0°C, com umidade relativa entre 35% e 65% (ABNT, 2024). Adotou-se temperatura interna de 23,9°C (bulbo seco) e umidade relativa de 50%, valores dentro da zona de conforto estabelecida pela norma para ocupantes em atividade sedentária (*Seated at Rest*), com vestimenta típica de 1,0 clo. A Tabela 9 resume os parâmetros internos adotados no projeto.

Tabela 9 – Parâmetros internos de projeto adotados

Parâmetro	Valor Adotado	Referência Normativa
Temperatura interna de projeto	23,9°C (bulbo seco)	ABNT NBR 16401-2:2024
Umidade relativa interna	50%	ABNT NBR 16401-2:2024
Temperatura interna de aquecimento	21,1°C (bulbo seco)	ABNT NBR 16401-2:2024
Limite máximo de CO ₂	1.000 ppm	ANVISA RE nº 09/2003
Diferencial de CO ₂ (DCV)	580 ppm (100 ppm mínimo)	ASHRAE 62.1-2022
Temperatura de projeto VRF (OADB/EWB)	35,0°C / 19,4°C	HAP 6.2, VRF Equipment
EER do sistema VRF	3,194	HAP 6.2, VRF Equipment
COP do sistema VRF (aquecimento)	3,300	HAP 6.2, VRF Equipment

Fonte: ABNT NBR 16401-2:2024; ANVISA RE nº 09/2003, adaptado.

4.1.4 Zoneamento Térmico

O edifício foi dividido em quatro zonas térmicas, agrupando ambientes com perfil de uso e cargas internas semelhantes, conforme apresentado na Tabela 10. O zoneamento é fundamental para o dimensionamento correto do sistema VRF, pois cada zona é atendida por unidades evaporadoras independentes com controle individual de capacidade (ABNT NBR 16401-1:2024).

Tabela 10 – Zoneamento térmico adotado no projeto

Zona	Área	Ambientes
Z_Acervo	308,3 m ²	Acervo + Biblioteca Setorial
Z_Administrativo	63,7 m ²	Chefia + Salas de Trabalho 1 e 2
Z_AreasComuns	468,8 m ²	Hall + Salão de Estudos
Z_SalasEstudos	83,5 m ²	Salas de Estudos 1 a 6
TOTAL	924,3 m²	13 ambientes

Fonte: Elaboração própria.

4.1.5 Caracterização da Envoltória

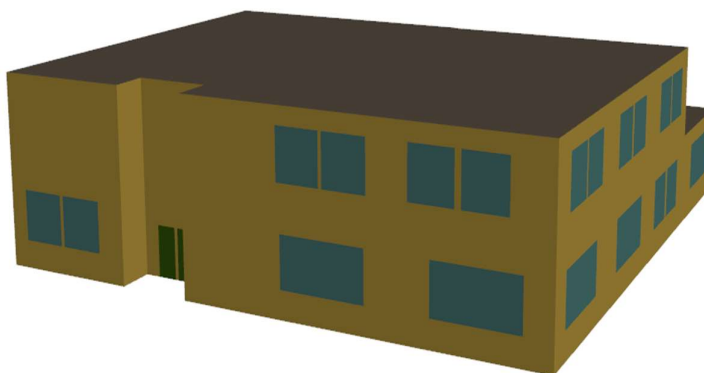
A envoltória do edifício foi modelada com base nas características arquitetônicas e construtivas observadas na planta fornecida pelo Departamento de Infraestrutura do CEFET-MG. Conforme a ABNT NBR 16401-1:2024, o desempenho térmico dos elementos construtivos deve ser considerado no cálculo da carga, levando em conta a inércia térmica das estruturas. A Tabela 11 apresenta a composição dos elementos construtivos adotados (Figuras 4 e 5).

Tabela 11 – Composição dos elementos construtivos da envoltória

Elemento	Composição	Observação
Paredes externas	Tijolo comum 100 mm + argamassa 50 mm + tijolo comum 100 mm + reboco gesso 13 mm	Absortividade externa: escura
Paredes internas	Reboco 13 mm + tijolo comum 100 mm + reboco 13 mm	Parede de divisa
Cobertura	Concreto pesado 305 mm + gesso 13 mm	Laje sem isolamento
Piso térreo	Concreto pesado 150 mm + Terrazzo 25 mm	Laje no nível
Janelas	Vidro simples, caixilho metálico, sem proteção solar	Vidro simples (129 m²)

Fonte: Elaboração própria.

Figura 4 – Modelo 3D da edificação no HAP 6.2, composição das assemblagens de envoltória



Fonte: Elaboração própria.

Figura 5 – Configuração das assemblagens de envoltória no HAP 6.2

Surface Type	Surface Group	Selected Assembly
[-] Exterior Above Grade Wall		
	Default	Paredes externas completas
	Paredes Externas	Paredes externas completas
	Paredes Internas	Divisorias
[-] Interior Wall		
	Paredes Internas	Divisorias internas
[-] Roof		
	Default	Laje
[-] Floor Above Space		
	Interior Floors Above Space	Piso de cerâmica
[-] Slab Floor On Grade		
	At-Grade Floors	Piso térreo

Fonte: Elaboração própria.

A modelagem da edificação no HAP exige a caracterização detalhada de todos os elementos da envoltória. Cada elemento construtivo é definido pela sua composição em camadas (material e espessura), pela absorvidade da superfície externa e pela área exposta em cada orientação solar. Para a Biblioteca do Campus Nova Gameleira do CEFET-MG, foram modelados: paredes externas em alvenaria dupla (face brick 100 mm + argamassa 50 mm + tijolo comum 100 mm + reboco 13 mm, absorvidade Dark), cobertura em laje maciça de concreto de 305 mm sem isolamento (absorvidade Dark), piso em concreto de 150 mm com terrazzo (slab on grade), laje intermediária de 200 mm sobre o Acervo, e janelas em vidro simples clear com caixilho metálico sem proteção solar (129 m² de área total envidraçada), conforme descrito na tabela 11.

A ausência de isolamento térmico na cobertura é uma configuração conservadora típica da época de construção do edifício, que favorece a segurança do dimensionamento ao maximizar a contribuição desse elemento para a carga térmica. A área total de cobertura modelada foi de 647 m², diretamente exposta ao sol e sem forro ou câmara de ar.

4.1.6 Cargas Internas

As cargas internas foram configuradas por ambiente, contemplando três fontes: iluminação, equipamentos elétricos e ocupantes. As densidades de potência de iluminação e equipamentos foram obtidas da ASHRAE *Standard* 90.1-2010, seguindo a classificação de uso de cada espaço conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Densidades de iluminação e equipamentos por ambiente

Ambiente	Tipo (ASHRAE 90.1)	Iluminação (W/m²)	Equipamentos (W/m²)	Schedule
Acervo / Biblioteca Setorial	Biblioteca, Acervo	18,40	9,69	Escola
Chefia / Salas de Trabalho	Escritório, fechado	11,90	8,07	Escritório
Hall	Hall, Área Comum	9,70	4,31	Escritório
Salas de Estudos / Salão	Biblioteca, Área de Leitura	10,00	9,69	Escola

Fonte: ASHRAE 90.1-2010, adaptado.

O calor dissipado pelos ocupantes foi calculado conforme os valores tabelados pela ABNT NBR 16401-1:2024 (Tabela C.1) para cada nível de atividade, separando as frações sensível e latente. O número de ocupantes por zona foi estimado com base na área útil de cada ambiente e na densidade de ocupação típica para o tipo de uso, conforme a ASHRAE 62.1-2022. No pico de resfriamento (janeiro às 18h), o sistema registrou 97 ocupantes simultâneos no total do edifício.

O instante de pico de resfriamento não foi arbitrado, e sim determinado pelo próprio método HBM. Como o HAP 6.2 resolve o balanço térmico de cada zona para todas as horas dos doze meses do ano, o programa compara os valores horários de carga e identifica automaticamente o momento em que a soma das cargas de todas as zonas atinge seu valor máximo. Para esta edificação, esse máximo ocorreu em uma tarde de janeiro, período em que se sobrepõem a maior incidência de radiação solar sobre a cobertura sem isolamento, a temperatura externa elevada típica do verão de Belo Horizonte e a ocupação significativa da biblioteca. É sobre essa condição mais desfavorável que a carga total de projeto, de 142,8 kW (40,6 TR), foi dimensionada.

A infiltração de ar externo foi desprezada no cálculo, justificada pela presença de cortina de ar na entrada principal e pela composição de alvenaria dupla nas três fachadas externas, conforme admitido pela ABNT NBR 16401-1:2024 para edificações com essas características construtivas (Figura 6).

Figura 6 – Configuração das cargas internas (iluminação e equipamentos) na aba Spaces do HAP 6.2

	Space	Level	Floor Area (sqm)	Space Type	Occupants					
					Occupancy	Units	Schedule	Activity Level	Sensible (W/person)	Latent (W/person)
1	ACERVO	Acervo	245.9	Library - Stacks	9.3	sqm/person	90.1 School Occupancy	Seated at Rest	67.4	35.2
2	BIBLIOTECA SETORIAL	Acervo	62.4	Library - Stacks	9.3	sqm/person	90.1 School Occupancy	Seated at Rest	67.4	35.2
3	CHEFIA	Acervo	18.1	Office - Enclosed, Small	9.3	sqm/person	90.1 Office Occupancy	Office Work	71.8	60.1
4	HALL	Hall	274.5	Lobby - All Other	40	People	90.1 Office Occupancy	User Defined	71.8	60.1
5	SALA DE ESTUDOS 1	Mezanino (3 piso)	14.9	Library - Reading Area	8	People	90.1 School Occupancy	Seated at Rest	67.4	35.2
6	SALA DE ESTUDOS 2	Mezanino (3 piso)	12.9	Library - Reading Area	8	People	90.1 School Occupancy	Seated at Rest	67.4	35.2
7	SALA DE ESTUDOS 3	Mezanino (3 piso)	14.3	Library - Reading Area	8	People	90.1 School Occupancy	Seated at Rest	67.4	35.2
8	SALA DE ESTUDOS 4	Mezanino (3 piso)	13.8	Library - Reading Area	8	People	90.1 School Occupancy	Seated at Rest	67.4	35.2
9	SALA DE ESTUDOS 5	Mezanino (3 piso)	14.4	Library - Reading Area	8	People	90.1 School Occupancy	Seated at Rest	67.4	35.2
10	SALA DE ESTUDOS 6	Mezanino (3 piso)	13.2	Library - Reading Area	8	People	90.1 School Occupancy	Seated at Rest	67.4	35.2
11	SALA DE ESTUDOS	Mezanino (3 piso)	194.2	Library - Reading Area	60	People	90.1 School Occupancy	Seated at Rest	67.4	35.2
12	SALAS DE TRABALHO 1	Acervo	17.3	Office - Enclosed, Small	18.6	sqm/person	90.1 Office Occupancy	Office Work	71.8	60.1
13	SALAS DE TRABALHO 2	Acervo	28.3	Office - Enclosed, Small	18.6	sqm/person	90.1 Office Occupancy	Office Work	71.8	60.1
13 spaces with floor area of 924 sqm (924 sqm overall)										

Fonte: Elaboração própria a partir do *software* HAP 6.2.

4.1.7 Sistema de Renovação de Ar e Controle de Qualidade do Ar Interior

O sistema de renovação de ar foi modelado como DOAS (*Dedicated Outdoor Air System*), configurado com controle por demanda de CO₂ (DCV, *Demand Controlled Ventilation*). As vazões mínimas de ar exterior foram determinadas pelo método VRP (*Ventilation Rate Procedure*) da ASHRAE 62.1-2022, que calcula a vazão necessária na zona de respiração (V_{bz}) pela Equação (2):

$$V_{bz} = (R_p * P_z) + (R_a * A_z) \quad (2)$$

onde:

V_{bz} = vazão de ar exterior na zona de respiração (L/s);

R_p = taxa de ar exterior por pessoa (L/s·pessoa);

P_z = número de ocupantes no pico da zona;

R_a = taxa de ar exterior por unidade de área (L/s·m²);

A_z = área do piso da zona (m²).

Para a categoria *Libraries*, a ASHRAE 62.1-2022 estabelece taxa combinada de referência de 1,13 L/(s·m²) (*Appendix M – VRP Check Table*). O controle DCV monitora a concentração de CO₂ no ar de retorno de cada zona, ajustando a vazão de ar exterior de forma proporcional à ocupação real. O limite máximo de CO₂ adotado foi de 1.000 ppm, conforme estabelecido pela Resolução ANVISA RE nº 09/2003 para ambientes climatizados não industriais. O diferencial de controle adotado foi de 580 ppm acima do nível externo (400 ppm), resultando no limite operacional de 980 ppm, abaixo do limite normativo. A Tabela 13 apresenta as vazões de renovação de ar por zona.

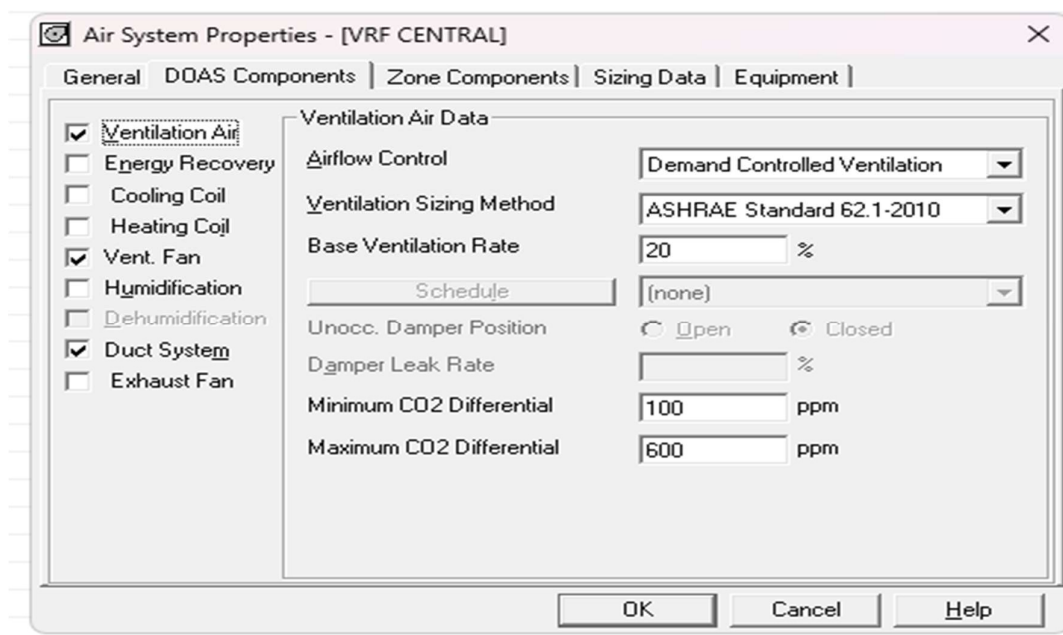
Ressalta-se que, no âmbito normativo brasileiro, a ABNT NBR 16401-3:2024 (Qualidade do ar interior) é a referência que estabelece os parâmetros de qualidade do ar e as vazões mínimas de ar exterior para sistemas de climatização, adotando procedimento de cálculo equivalente ao *Ventilation Rate Procedure* da ASHRAE 62.1-2022. Dessa forma, as vazões de renovação dimensionadas neste projeto atendem simultaneamente à norma brasileira e à referência internacional, em conformidade com a ABNT NBR 16401-3:2024 quanto à renovação de ar e ao controle da qualidade do ar interior (Figura 7).

Tabela 13 – Vazões de renovação de ar exterior por zona de ventilação

Zona	Área (m ²)	Pessoas (pico)	Vazão OA (L/s)	L/(s·m ²)
Z_Acervo	308,3	—	268	0,87
Z_Administrativo	63,7	—	30	0,47
Z_AreasComuns	468,8	100*	449	0,96
Z_SalasEstudos	83,5	48	170	2,04
TOTAL	924,3	148	917	0,99

* Pico de ocupação simultânea registrado no HAP. Fonte: Elaboração própria, com base na ASHRAE 62.1-2022.

Figura 7 – Configuração do sistema DOAS com controle DCV no HAP 6.2



Fonte: Elaboração própria a partir do *software* HAP 6.2.

4.1.8 Fator de Segurança

Foi aplicado fator de segurança de 20% sobre as cargas de resfriamento (sensível e latente) e sobre a carga de aquecimento, conforme configurado no *software* HAP 6.2. Este fator conservador é adequado para edificações de uso público institucional com características construtivas antigas (como a ausência de isolamento térmico na cobertura), absorvendo incertezas nas estimativas de cargas internas e variações de uso futuras.

Aplicados todos os parâmetros descritos nas seções anteriores (dados climáticos, condições internas de conforto, zoneamento, envoltória, cargas internas, sistema de renovação de ar e fator de segurança), o *software* HAP 6.2 executou a simulação hora a hora ao longo das 8.760 horas do ano. Os resultados da carga térmica obtida, com a decomposição por zona e por componente, são apresentados e discutidos no Capítulo 5) Resultados e Discussão.

4.2 Seleção de Equipamentos

4.2.1 Escolha do Sistema VRF

Com base na carga térmica calculada pelo HAP 6.2, optou-se pelo sistema VRF (Volume de Refrigerante Variável) em detrimento do sistema de água gelada (*chiller*). A justificativa para essa escolha é tripla: (i) a edificação não dispõe de espaço para uma casa de máquinas que comporte *chiller*, bombas, vasos de expansão e torres de resfriamento; (ii) a carga de projeto não atinge o patamar a partir do qual o *chiller* torna-se economicamente competitivo; e (iii) o VRF oferece controle individual de capacidade por zona, característica essencial para edificações com perfis de ocupação distintos como a biblioteca, onde o acervo opera com baixa ocupação humana e o salão de estudos com alta densidade variável de usuários.

Adotou-se a linha Midea V8 220V, comercializada no Brasil pela Midea Carrier, sistema VRF do tipo bomba de calor com fluido refrigerante R-410A, atendendo aos requisitos técnicos da edificação e às normas brasileiras aplicáveis.

O mercado brasileiro dispõe de diversos fabricantes com linhas VRF consolidadas (entre eles Daikin, LG, Samsung e Hitachi), todos tecnicamente aptos a atender à carga do projeto. A escolha específica pela linha Midea V8 fundamentou-se em três critérios objetivos: (i) disponibilidade de representante técnico e assistência autorizada na praça de Belo Horizonte, fator decisivo para o suporte durante a instalação e a operação do sistema ao longo de sua vida útil; (ii) acesso ao *software* oficial de seleção do fabricante (Midea MCSSP), que permitiu o dimensionamento das unidades e a verificação dos limites de tubulação diretamente sobre as condições de projeto; e (iii) melhor relação capacidade/custo entre as propostas levantadas, confirmada pelo orçamento obtido junto à distribuidora Total Ar Ltda. para a configuração requerida. Ressalta-se que a metodologia de seleção adotada é independente do fabricante, podendo ser reproduzida com o *software* de seleção de qualquer outro fornecedor de sistema VRF.

4.2.2 Procedimento de Seleção no Midea MCSSP

A seleção das unidades condensadoras (ODU) e evaporadoras (IDU) foi realizada pelo *software* oficial do fabricante, o Midea MCSSP (Midea Commercial Selection Software Platform). O procedimento de seleção seguiu as seguintes etapas:

- Entrada das cargas térmicas por ambiente calculadas pelo HAP, considerando a carga sensível e a carga total de cada zona;
- Definição das condições externas de projeto (35,0°C BS / 19,4°C BU) conforme os parâmetros adotados;
- Distribuição preliminar das unidades evaporadoras por ambiente, selecionando o tipo construtivo adequado para cada espaço, cassetes de 4 vias para ambientes amplos como Hall, Salão de Estudos e Acervo, e cassetes compactos para Salas de Estudos, Salas de Trabalho e Chefia;
- Seleção das unidades condensadoras pelo *software*, considerando a soma das capacidades das unidades internas;
- Verificação da taxa de combinação (CR), que deve permanecer entre 100% e 130% para a linha Midea V8;
- Verificação dos limites de tubulação (comprimento total, maior trecho real e equivalente, desnível entre unidades) conforme o manual técnico do fabricante.

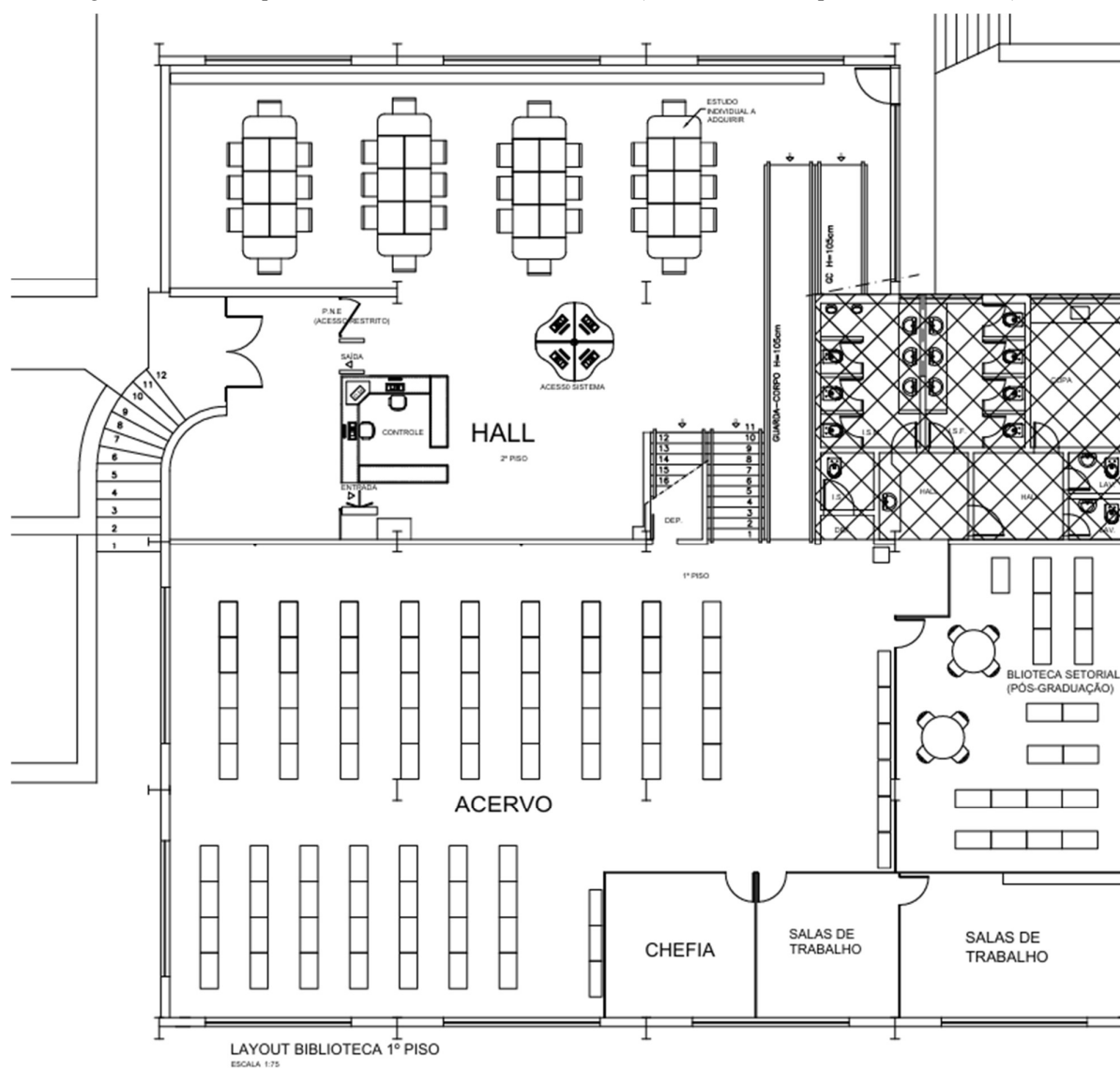
4.2.3 Dimensionamento da Linha Frigorígena

Os diâmetros das tubulações de cobre da linha frigorígena (linha de líquido e linha de sucção) foram dimensionados pelo próprio *software* MCSSP, que aplica as recomendações do fabricante para o fluido R-410A. O dimensionamento considera as perdas de carga admissíveis em cada trecho, garantindo que a vazão de refrigerante chegue a todas as unidades internas dentro dos limites operacionais. As tubulações foram especificadas em cobre desoxidado tipo L, próprio para sistemas de refrigeração, com isolamento termoacústico em borracha elastomérica de espessura mínima de 9 mm conforme recomendação do fabricante. Os equipamentos selecionados e os diâmetros adotados são apresentados no Capítulo 5, Resultados e Discussão.

4.3 Elaboração do Projeto em Planta

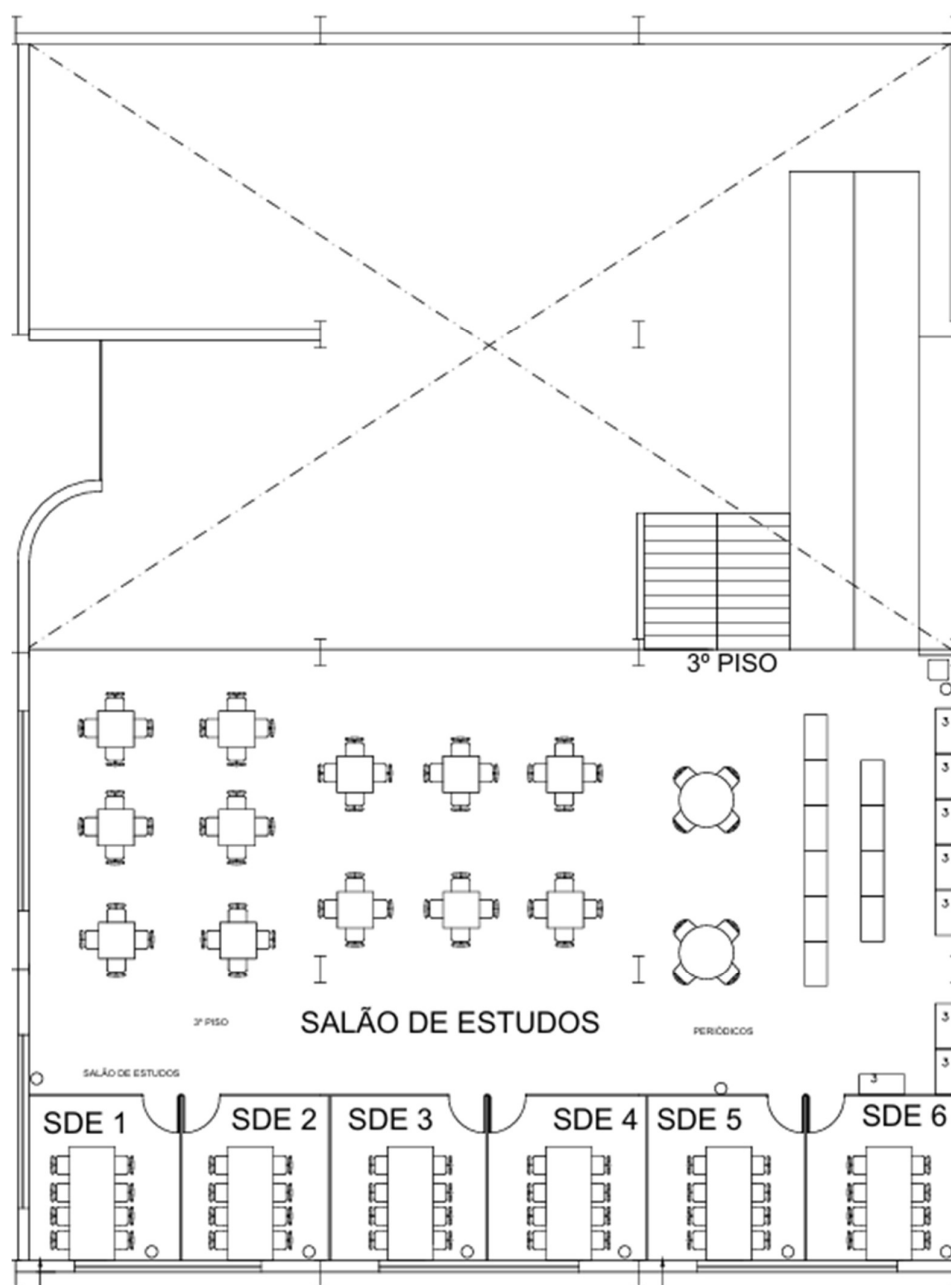
O projeto executivo foi elaborado no *software* AutoCAD, utilizando como base a planta arquitetônica fornecida pelo Departamento de Infraestrutura do CEFET-MG. O projeto contempla o posicionamento das unidades evaporadoras, o traçado da linha frigorígena, o sistema de renovação de ar com a rede de dutos e os detalhamentos técnicos necessários para a execução da instalação (Figuras 8 e 9).

Figura 8 – Planta arquitetônica da biblioteca: Hall e Acervo (CEFET-MG, Campus Nova Gameleira)



Fonte: CEFET-MG, Departamento de Infraestrutura.

Figura 9 – Planta arquitetônica da biblioteca: Mezanino e Hall (CEFET-MG, Campus Nova Gameleira)



Fonte: CEFET-MG, Departamento de Infraestrutura.

4.3.1 Especificação do Material dos Dutos: MPU

Os dutos de insuflamento e retorno do sistema DOAS foram especificados em painéis de alumínio gofrado pré-isolados com espuma rígida de poliuretano, denominados MPU (MPU do Brasil). Trata-se de um sistema de dutos que integra, em um único painel, a função estrutural do duto e o isolamento térmico, eliminando a necessidade de aplicação posterior de isolamento externo.

O poliuretano (PUR) utilizado é uma espuma rígida obtida pela reação de poliadição entre poliols de primeira qualidade e isocianatos, resultando em um polímero fisiológica e quimicamente inerte, insolúvel e impossibilitado de ser metabolizado (MPU DO BRASIL, 2024). As principais características técnicas do painel são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Características técnicas dos painéis MPU

Propriedade	Valor	Norma de referência
Espessura do painel	20 mm	—
Dimensões do painel	2000 × 1200 mm	—
Densidade da espuma	42 kg/m ³	—
Condutividade térmica inicial	0,020 W/(m·K) a 10°C	ISO 8301
Resistência à compressão	4,5 ± 0,5 kgf/cm ²	EN 826
Rigidez elástica	258.000 N·mm ²	prCEN/TC 156/WG3
Reação ao fogo	Classe A	NBR 9442
Opacidade da fumaça (com chama)	Dm = 250	ASTM 662 / IPT
Opacidade da fumaça (sem chama)	Dm = 7	ASTM 662 / IPT
Toxidade da fumaça	Dentro dos limites	BSS 7239
Absorção de água (28 dias)	≤ 1,5% de aumento de massa	EN 12087
Temperatura de utilização	−30°C a +80°C	—
Estanqueidade	Atende EN 1507 / DW144	EN 1507

Fonte: Multistar Indústria e Comércio LTDA (2024), adaptado.

O sistema MPU apresenta estanqueidade superior às classes de dutos convencionais, conforme demonstrado em ensaios comparativos. O vazamento nos dutos MPU é significativamente inferior ao permitido para a Classe A (pressão baixa), atingindo valores próximos à Classe C (pressão alta) da norma EN 1507, o que reduz as perdas de ar e melhora a eficiência energética do sistema.

Adicionalmente, os painéis MPU incorporam tecnologia antimicrobiana com nanopartículas de prata e outros compostos que reduzem em mais de 99,999% a proliferação de bactérias (incluindo *E. coli* e *Staphylococcus aureus*) conforme ensaios laboratoriais realizados em conformidade com a norma JIS 2801:2000 (MPU DO BRASIL, 2024). Esta característica é especialmente relevante para o ambiente de biblioteca, onde a qualidade do ar interior é determinante para o conforto e a saúde dos usuários.

Os dutos de ar externo e exaustão serão executados em chapa galvanizada de aço, conforme recomendações da SMACNA, Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association (SMACNA, 2006) e da ABNT NBR 16401-1:2024, com classe de pressão de 500 Pa.

4.3.2 Método de Dimensionamento dos Dutos

O dimensionamento da rede de dutos foi realizado pelo método da perda de carga constante (Equal Friction Method), com auxílio do *software* McQuay Duct Sizer. Neste método, adota-se uma perda de carga unitária constante em todos os trechos da rede, determinando-se as dimensões dos dutos de forma a satisfazer essa condição. O método é amplamente recomendado pela ASHRAE Fundamentals Handbook e pela SMACNA para sistemas de baixa velocidade em aplicações de conforto (ASHRAE, 2021).

A perda de carga em cada trecho é calculada com base na equação de Darcy-Weisbach, apresentada na Equação (3):

$$\Delta P = f * \left(\frac{L}{D_h} \right) * \left(\rho * \frac{V^2}{2} \right) \quad (3)$$

onde:

ΔP = perda de carga no trecho (Pa);

f = fator de atrito de Darcy (adimensional);

L = comprimento do trecho (m);

D_h = diâmetro hidráulico equivalente do duto (m);

ρ = massa específica do ar (kg/m^3);

V = velocidade do ar no duto (m/s).

Como os dutos MPU possuem seção retangular, a conversão da seção circular equivalente (obtida pelo método Equal Friction) para a seção retangular foi realizada pela tabela de equivalência da ASHRAE/ABRAVA, que fornece o diâmetro circular equivalente para cada combinação de dimensões retangulares, com base na Equação (4) do diâmetro hidráulico equivalente de dutos retangulares:

$$D_{eq} = \frac{1,30 \cdot (A \cdot B)^{0,625}}{(a+b)^{0,250}} \quad (4)$$

onde:

D_{eq} = diâmetro circular equivalente (mm);

a = dimensão maior da seção retangular (mm);

b = dimensão menor da seção retangular (mm).

O *software* McQuay Duct Sizer realiza automaticamente o dimensionamento pelo método Equal Friction, fornecendo para cada trecho: a vazão de ar (L/s), a velocidade (m/s), as dimensões do duto retangular equivalente e a perda de carga unitária (Pa/m). Os resultados do dimensionamento são apresentados no Capítulo 5, Resultados e Discussão.

4.3.3 Instalação, Ensaios e Balanceamento

A instalação dos dutos MPU deverá seguir o manual de construção e instalação fornecido pelo fabricante, em conformidade com as normas SMACNA, NAIMA e UNE 100-105-84. As junções transversais serão executadas pelo sistema de flanges característico do MPU, garantindo estanqueidade superior à Classe C da EN 1507. Todas as ligações entre ventiladores e dutos serão realizadas com conexões flexíveis de manta plástica com comprimento mínimo de 100 mm, para absorção de vibrações e ruídos.

Após a instalação, todos os dutos deverão ser submetidos a teste de estanqueidade, devendo atender à Classe C (até 500 Pa de pressão estática), conforme os parâmetros da SMACNA, HVAC Air Duct Leakage Test Manual. O balanceamento da rede deverá ser realizado por profissional ou entidade de reconhecida especialização técnica, independente do responsável pela instalação, com medição das vazões nos ramais principais por tubo de Pitot, admitindo-se variação máxima de $\pm 10\%$ em relação aos valores de projeto (SMACNA, 2006).

4.4 Levantamento de Preços

O levantamento de preços foi realizado junto a distribuidora especializada em equipamentos Carrier localizada em Belo Horizonte, Minas Gerais, com base na relação de materiais extraída do projeto executivo. Os valores obtidos refletem os preços praticados no mercado local no período de realização deste trabalho, para os equipamentos e materiais especificados no projeto. O levantamento incluiu unidades condensadoras, evaporadoras, controladores, materiais de linha frigorígena, equipamentos de renovação de ar, dutos e acessórios.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos em cada etapa do projeto de climatização e renovação de ar da biblioteca do Campus Nova Gameleira do CEFET-MG, discutindo as principais decisões técnicas e os valores encontrados em cada fase do desenvolvimento.

5.1 Carga Térmica

O cálculo da carga térmica pelo *software* HAP 6.2 resultou em uma carga total de resfriamento de 142,8 kW (40,6 TR), com pico em janeiro às 17h. A Tabela 15 apresenta o resumo das cargas por zona.

Tabela 15 – Carga térmica de resfriamento por zona

Zona	Área (m²)	Carga Sensível (kW)	Carga Total (kW)	Horário de Pico
Z_Acervo	308,3	33,0	34,2	Janeiro 17h
Z_Administrativo	63,7	12,9	13,4	Maior 14h
Z_AreasComuns	468,8	73,2	78,9	Janeiro 17h
Z_SalasEstudos	83,5	23,9	25,5	Abril 14h
TOTAL	924,3	143,0	142,8	Janeiro 17h

Fonte: HAP 6.2, Carrier, 2026. Elaboração própria.

A análise da distribuição das cargas por zona evidencia que a Z_AreasComuns (composta pelo Hall e pelo Salão de Estudos) concentra 55,3% da carga total do sistema, sendo a zona crítica do projeto. Esse resultado é consequência direta da combinação de três fatores: a grande área da zona (468,8 m²), o elevado pé-direito do Hall (8,0 m) que aumenta o volume de ar a condicionar, e a alta exposição da zona à envoltória externa. As demais zonas) Acervo (24,0%), Salas de Estudos (17,8%) e Administrativo (9,4%)) apresentam cargas equilibradas e adequadas ao perfil de uso de cada ambiente (Figura 10).

Figura 10 – Relatório de dimensionamento por zona (*Zone Cooling Sizing Summary*), HAP 6.2

Zone Name	Total Coil Load (kW)	Sens Coil Load (kW)	Coil Entering DB / WB (C)	Coil Leaving DB / WB (C)	Water Flow @ 5.6 K (L/s)	Time of Peak Coil Load	Zone L/(s sqm)
Z_Acervo	34.2	33.0	23.9 / 17.9	14.7 / 14.7	-	January 17:00	10.37
Z_Administrativo	13.4	12.9	23.9 / 18.0	14.9 / 14.9	-	May 14:00	19.99
Z_AreasComuns	78.9	73.2	23.9 / 17.9	14.6 / 14.6	-	January 17:00	14.93
Z_SalasEstudos	25.5	23.9	23.9 / 17.9	14.6 / 14.5	-	April 14:00	27.29

Fonte: Elaboração própria.

A decomposição das cargas por componente no horário de pico (Janeiro, 17h), apresentada na Tabela 16, permite identificar as principais fontes de calor da edificação e fundamenta a discussão sobre o desempenho térmico da envoltória.

Tabela 16 – Decomposição da carga térmica sensível no horário de pico (Janeiro, 17h)

Componente	Carga Sensível (W)	% do Total
Cobertura (Roof Convection)	38.490	31,1%
Paredes externas	18.035	14,6%
Fator de segurança (20%)	21.889	17,7%
Piso	12.429	10,0%
Ventilação DOAS	8.528	6,9%
Iluminação	7.416	6,0%
Paredes internas	5.704	4,6%
Equipamentos	5.530	4,5%
Pessoas (ocupantes)	3.811	3,1%
Janelas (ganho solar)	3.619	2,9%
Infiltração	1.285	1,0%
Outros	6.401	5,2%
TOTAL SENSÍVEL	~123.900	100%

Fonte: HAP 6.2, Carrier, 2026. Elaboração própria.

A análise da Tabela 16 revela que a cobertura responde isoladamente por 31,1% da carga sensível total, seguida pelo fator de segurança (17,7%) e pelas paredes externas (14,6%). Conjuntamente, cobertura e paredes externas representam quase metade da carga sensível, reforçando o impacto da ausência de isolamento térmico na edificação. A laje de concreto de 305 mm sem isolamento e diretamente exposta ao sol em Belo Horizonte (cidade com elevada irradiação solar) é o caminho de menor resistência térmica entre o exterior e o interior, o que justifica sua predominância no balanço de cargas. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a avaliação técnica e econômica da aplicação de isolamento térmico na cobertura como medida de redução do consumo energético do sistema de climatização.

As superfícies envidraçadas, com 129 m² de área total (aproximadamente 14% da envoltória), contribuíram de forma relevante para a carga nos horários de insolação direta. As janelas em vidro simples sem proteção solar, voltadas predominantemente para as fachadas oeste e norte, recebem maior incidência solar no período da tarde durante o verão, coincidindo com o horário de pico de carga registrado (janeiro, 17h). A adoção de proteções solares ou vidros de baixa transmitância poderia reduzir significativamente essa parcela, constituindo recomendação para melhorias futuras de eficiência energética.

Quanto às cargas internas, a iluminação representou a maior parcela, com 35.613 W no pico, configurada segundo as densidades da ASHRAE 90.1-2010 (18,40 W/m² para o Acervo, 10,00 W/m² para áreas de leitura, 9,70 W/m² para o Hall e 11,90 W/m² para ambientes administrativos). Os equipamentos contribuíram com 7.374 W e a ocupação totalizou 97 pessoas simultâneas no pico. O Hall recebeu tratamento específico de infiltração (137 L/s), considerando a operação com portas abertas durante o funcionamento da biblioteca (Figuras 11 e 12).

Figura 11 – Decomposição das cargas térmicas por componente no horário de pico, HAP 6.2

Zone Heat Balance Component	DESIGN COOLING - JANUARY 17:00			DESIGN HEATING		
	OA DB / WB 32.4 C / 20.0 C			OA DB / WB 11.1 C / 6.2 C		
	Details	Sensible [W]	Latent [W]	Details	Sensible [W]	Latent [W]
Exterior Wall Convection	676 sqm	18035	-	676 sqm	8986	-
Roof Convection	647 sqm	38490	-	647 sqm	19227	-
Window Convection	129 sqm	3619	-	129 sqm	3452	-
Skylight Convection	0 sqm	0	-	0 sqm	0	-
Door Convection	4 sqm	87	-	4 sqm	69	-
Floor Convection	924 sqm	12429	-	924 sqm	6316	-
Interior Wall Convection	589 sqm	5704	-	589 sqm	2082	-
Ceiling Convection	278 sqm	4510	-	278 sqm	1348	-
Overhead Lighting Convection	35613 W	7416	-	0 W	0	-
Task Lighting Convection	0 W	0	-	0 W	0	-
Electric Equipment Convection	7374 W	5530	-	0 W	0	-
People Convection	186	3811	7633	0	0	0
Infiltration	137 L/s	1285	-198	0 L/s	0	0
Miscellaneous Equipment	-	0	0	-	0	0
DOAS Ventilation	917 L/s	8528	-	917 L/s	10073	-
Air Internal Energy Change	-	0	-	-	0	0
Safety Factor	20% / 20%	21889	1487	20%	10311	0
>> Total Zone Loads	-	131333	8922	-	61865	0
Key:	Positive values are cooling loads Negative values are heating loads			Positive values are heating loads Negative values are cooling loads		

Fonte: Elaboração própria.

Figura 12 – Modelo do edifício no HAP 6.2, zoneamento térmico da Biblioteca do Campus Nova Gameleira



Fonte: Elaboração própria.

5.2 Seleção dos Equipamentos VRF

Com base na carga térmica calculada, foi selecionado pelo Midea MCSSP o sistema VRF Midea V8 220V, composto por duas unidades condensadoras combinadas (50 HP / 140 kW) e 19 unidades evaporadoras distribuídas pelos ambientes. As Tabelas 17 e 18 apresentam os equipamentos selecionados.

Tabela 17 – Unidades condensadoras selecionadas

Código	Modelo	Capacidade	Alimentação	MCA (A)	Dim. L×A×P (mm)	Peso (kg)
UC-01	MV8-785WV2WN1M-C	28 HP / 78,5 kW	220V-3F-60Hz	82,5	1880×1760×825	380
UC-02	MV8-615WV2WN1M-C	22 HP / 61,5 kW	220V-3F-60Hz	75,9	1340×1760×825	300
TOTAL	Sistema combinado	50 HP / 140,0 kW	—	158,4	—	680

Fonte: Midea MCSSP, 2026. Elaboração própria.

As duas unidades condensadoras operam em conjunto como um sistema combinado de 50 HP / 140 kW, sendo a UC-01 o módulo mestre e a UC-02 o módulo auxiliar, interligados por uma junta de derivação externa (FQZHW-02N1E). Adotou-se essa configuração modular por proporcionar maior flexibilidade operacional, em períodos de carga parcial, o sistema pode operar com apenas uma das unidades, otimizando o consumo energético (Figura 13).

Figura 13 – Unidades condensadoras VRF instaladas em área externa, sistema similar ao adotado no projeto



Fonte: Kelvin Engenharia Térmica.

Tabela 18 – Unidades evaporadoras selecionadas

Código	Modelo	Ambiente	Tipo	Cap. (kW)	Qtd.
UE-01/02	MIH180Q4HN18	Hall	Q4 Cassete 4 vias	18,0	2
UE-03	MIH160Q4HN18	Hall	Q4 Cassete 4 vias	16,0	1
UE-04/05/06	MIH140Q4HN18	Salão de Estudos	Q4 Cassete 4 vias	14,0	3
UE-07/08/09	MI2-112Q4DHN1	Acervo	Q4 Cassete 4 vias	11,2	3
UE-10	MIH112Q4HN18	Biblioteca Setorial	Q4 Cassete 4 vias	11,2	1
UE-11	MIH71Q4HN18	Salas de Trabalho 2	Q4 Cassete 4 vias	7,1	1
UE-12/13	MIH36Q4CHN18	Salas de Trabalho 1 / Chefia	Q4C Mini Cassete	3,6	2

Código	Modelo	Ambiente	Tipo	Cap. (kW)	Qtd.
UE-14 a 19	MIH36Q4CHN18	Salas de Estudos 1 a 6	Q4C Mini Cassete	3,6	6
TOTAL	—	—	13× Q4 + 6× Q4C	174,7 kW	19

Fonte: Midea MCSSP, 2026. Elaboração própria.

A distribuição das unidades evaporadoras seguiu o critério de adequação ao tipo de ambiente: cassetes de 4 vias padrão (Q4) para os ambientes amplos do Hall, Salão de Estudos, Acervo e Biblioteca Setorial; e mini cassetes compactos (Q4C) para as salas menores. Essa configuração otimiza a distribuição do ar nos ambientes de maior área e respeita as limitações dimensionais dos espaços mais compactos (Figura 14 e Tabela 19).

Figura 14 – Cassete de 4 vias instalado em ambiente comercial, modelo adotado para Hall, Salão de Estudos e Acervo



Fonte: Kelvin Engenharia Térmica.

Tabela 19 – Resumo do desempenho do sistema VRF selecionado

Parâmetro	Valor
Capacidade de resfriamento disponível	158,54 kW (11,0% acima da carga)
Taxa de combinação (CR)	124,79%, dentro do limite de 130%
EER resfriamento	3,88 kW/kW
COP aquecimento	4,02 kW/kW
Total de unidades evaporadoras	19 unidades (13× Q4 + 6× Q4C)
Carga total de R-410A	44,12 kg
TCO ₂ equivalente do refrigerante	92,11 t CO ₂ eq.

Model		MV8-1400WV2WN1M-C	
Module		MV8-615WV2WN1M-C	MV8-785WV2WN1M-C
Tmp-C	°C	33.3	
RTC	kW		
ATC	kW	158.54	
PI-C	kW	40.82	
EER		3.88	
Tmp-H	°C/°C	12.2/11.1	
RHC	kW		
AHC	kW	180.2	
PI-H	kW	44.80	
COP		4.02	
CR		124.8	
Airflow	m ³ /h	22000	29000
Sound-Pr		63	64
Sound-Po			
Bas-Refr	kg	28.30	
Ex-Refr(ODU)	kg	0.00	
Ex-Refr(Piping)	kg	15.82	
TCO2 eq.		92.11	
MCA	A	75.9	82.5
MFA	A	100	100
Power supply	V/ph/Hz	220V-3ph-60Hz	220V-3ph-60Hz
Dimension (WxHxD)	mm	1340*1760*825	1880*1760*825
Weight	kg	300	380

Fonte: Midea MCSSP, 2026.

Figura 17 – Verificação dos limites de tubulação (*Piping Limitations*), Midea MCSSP

7.7.1 Piping Limitations

Item	Capability	Actual Value
Total piping length	1100.00(m)	226.00(m)
Longest actual length	220.00(m)	37.00(m)
Longest equivalent length	260.00(m)	39.50(m)
Longest equivalent length after first branch	120.00(m)	36.00(m)
Indoor unit to nearest branch length	40.00(m)	12.00(m)
Length difference between longest and shortest distance to indoor units	40.00(m)	29.00(m)
Height difference between indoor and outdoor unit(ODU up)	110.00(m)	0.00(m)
Height difference between indoor and outdoor unit(ODU down)	110.00(m)	0.00(m)
Height difference between indoor units	40.00(m)	0.00(m)
Combination ratio	50-200%	124.79%
IDU quantity	64	19

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 20 apresenta os diâmetros e comprimentos da linha frigorígena dimensionada pelo MCSSP. O comprimento total de tubulação foi de 290 m, bem abaixo do limite de 1.100 m do sistema (Figura 18).

Figura 18 – Linha frigorígena de cobre do sistema VRF, tubulação de líquido e sucção com isolamento termoacústico



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 20 – Diâmetros e comprimentos da linha frigorígena

Diâmetro (pol.)	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Aplicação
Φ1/4"	Φ6,35	16	Ramal, linha líquido (UEs compactas)
Φ3/8"	Φ9,52	74	Ramal, linha gás (UEs pequenas)
Φ1/2"	Φ12,7	34	Ramal, linha líquido/gás (UEs médias)
Φ5/8"	Φ15,9	78	Ramal, linha gás (UEs médias)
Φ3/4"	Φ19,1	30	Ramal, linha gás/principal
Φ7/8"	Φ22,2	3	Ramal, linha principal
Φ1-1/8"	Φ28,6	34	Trecho principal
Φ1-1/4"	Φ31,8	12	Trecho principal, condensadora
Φ1-1/2"	Φ38,1	9	Trecho principal, condensadora (1ª derivação)
TOTAL	—	290	—

Fonte: Midea MCSSP, 2026. Elaboração própria.

5.3 Renovação de Ar

O sistema DOAS dimensionado pelo HAP 6.2 pelo método VRP da ASHRAE 62.1-2022 resultou em vazão total de ar exterior de 917 L/s, com potência do ventilador de 0,92 kW a 500 Pa de pressão estática. O controle DCV por CO₂ garante que a concentração nos ambientes permaneça abaixo de 1.000 ppm, conforme a Resolução ANVISA RE nº 09/2003 (Tabela 21).

Tabela 21 – Vazões de renovação de ar exterior por zona

Zona	Área (m²)	Pessoas (pico)	Vazão OA (L/s)	L/(s·m²)
Z_Acervo	308,3	—	268	0,87
Z_Administrativo	63,7	—	30	0,47
Z_AreasComuns	468,8	100*	449	0,96
Z_SalasEstudos	83,5	48	170	2,04
TOTAL	924,3	148	917	0,99

* Pico de ocupação simultânea. Fonte: HAP 6.2. Elaboração própria.

5.4 Dimensionamento dos Dutos

O dimensionamento da rede de dutos de renovação de ar foi realizado pelo método da perda de carga constante (*equal friction*) com auxílio do *software* McQuay Duct Sizer. Para distribuir adequadamente o ar exterior pela edificação, o sistema foi dividido em duas máquinas independentes (MAQ-01 e MAQ-02) cada uma com sua própria caixa de ventilação, rede de dutos e tomada de ar externo, atendendo a zonas fisicamente distintas da biblioteca. A Tabela 22 apresenta o resumo geral das duas máquinas.

Tabela 22 – Resumo geral das máquinas de renovação de ar

Parâmetro	MAQ-01	MAQ-02
Pavimento atendido	Superior	Térreo
Ambientes	Hall + Salão de Estudos + Salas Estudos 1-6	Acervo + Bib. Setorial + Chefia + Salas Trab. 1-2
Vazão total (m³/h)	2.228	1.073
Vazão total (L/s)	619	298
Modelo da máquina	Sicflux GRF280M	Sicflux ACI 315
Nº de grelhas (TROX AT-DG 225×125)	15	7
Filtragem	G4 + F8	G4 + M5 (FillBox Red)
Perda de carga unitária (Pa/m)	1,24	1,91
Comprimento circuito crítico (m)	43,0	25,8
Pressão estática estimada (Pa)	~80	~74
Altura da tomada de ar (m)	6,0	3,5

Fonte: McQuay Duct Sizer e Sicflux, 2026. Elaboração própria.

5.4.1 MAQ-01: Pavimento Superior

A MAQ-01 atende o pavimento superior (Hall, Salão de Estudos e Salas de Estudos 1 a 6) com vazão total de 619 L/s (2.228 m³/h). A rede é composta por um duto principal a partir do qual partem quatro ramais, totalizando 15 grelhas de insuflamento. O duto principal sofre reduções progressivas de seção à medida que a vazão transportada diminui após cada derivação. Foi adotada a caixa de ventilação Sicflux GRF280M, equipada com filtros de classes G4 e F8 em duplo estágio, oferecendo pré-filtragem de partículas grosseiras seguida de filtragem fina, garantindo a qualidade do ar exigida em biblioteca. A Tabela 23 apresenta o dimensionamento detalhado dos trechos (Figura 19).

Tabela 23 – Dimensionamento dos dutos, MAQ-01 (Pavimento Superior)

Trecho	Descrição	Vazão (m³/h)	Dimensões (mm)	Compr. (m)	Vel. (m/s)	Δp (Pa)
T1	Duto principal, saída MAQ-01	2.228	500×250	4,5	6,0	5,58
R1a	Ramal 1, trecho inicial (3 grelhas)	449	250×125	11,3	6,0	14,01
R1b	Ramal 1, após redução	449	200×125	5,5	6,0	6,82
T2	Duto principal, após R1	1.780	350×250	6,5	6,0	8,06
R2	Ramal 2 (2 grelhas)	299	250×125	10,5	6,0	13,02
T3	Duto principal, após R2	1.481	300×250	4,0	6,0	4,96
R3	Ramal 3 (2 grelhas)	299	250×125	12,0	6,0	14,88
T4	Duto principal, após R3	1.182	250×250	5,0	6,0	6,20
R4	Ramal 4 (2 grelhas)	299	250×125	12,0	6,0	14,88
T5a	Trecho final 6 grelhas, inicial	882	250×200	13,0	6,0	16,12
T5b	Trecho final 6 grelhas, após redução	882	250×125	10,0	6,0	12,40

Fonte: McQuay Duct Sizer, 2026. Elaboração própria.

Figura 19 – Especificações técnicas da caixa de ventilação Sicflux GRF280M (MAQ-01)

Modelo	Velocidade	Vazão Máxima [m³/h]	Pressão Máxima [mmca]	Nível Pressão Sonora [dBA]	Frequência [Hz]	Potência Motor [W]	Potência Total Absorvida [W]	Tipo de Tensão	Tensão [V]	Dimensão boca de captação [mm]	Dimensão boca de saída [mm]
230	Alta	1393	29	60	60	450	734	Monofásica	230	550×330	300×260
	Média	1232	27	57			465	Monofásica	230		
	Baixa	976	22	55			330	Monofásica	230		
280	1660	2705	48	64	60	800	839	Monofásica	230	682×492	302×236

Fonte: Sicflux.

5.4.2 MAQ-02: Pavimento Térreo

A MAQ-02 atende o pavimento térreo (Acervo, Biblioteca Setorial, Chefia e Salas de Trabalho 1 e 2) com vazão total de 298 L/s (1.073 m³/h). Sua configuração apresenta uma bifurcação na saída da máquina, dividindo o sistema em Ramal A (3 grelhas) e Ramal B (4 grelhas), totalizando 7 grelhas de insuflamento. Foi adotada a caixa de ventilação Sicflux ACI 315, equipada com o sistema FillBox Red com filtros G4 e M5 em duplo estágio. A Tabela 24 apresenta o dimensionamento detalhado (Figura 20).

Tabela 24 – Dimensionamento dos dutos, MAQ-02 (Pavimento Térreo)

Trecho	Descrição	Vazão (m³/h)	Dimensões (mm)	Compr. (m)	Vel. (m/s)	Δp (Pa)
S0	Saída MAQ-02, antes da bifurcação	1.073	300×250	0,3	6,0	0,57
RA-1	Ramal A, trecho inicial (2 grelhas)	459	250×125	17,0	6,0	32,47
RA-2	Ramal A, trecho final (1 grelha)	153	200×125	5,0	6,0	9,55
RB-1	Ramal B, trecho inicial (2 grelhas)	612	250×125	15,0	6,0	28,65
RB-2	Ramal B, trecho final (2 grelhas)	306	200×125	10,5	6,0	20,05

Fonte: McQuay Duct Sizer, 2026. Elaboração própria.

Figura 20 – Especificações técnicas da caixa de ventilação Sicflux ACI 315 (MAQ-02)

ACI		MODELO								
Frequência	50Hz	100 mini	100	125	150	200	250	315	355	400
Vazão Máxima	m³/h	196	256	363	520	803	985	1635	1934	2903
	CFM	115	150	213	306	472	580	962	1138	1708
Pressão Máxima	mmca	17	29	30	48	52	42	60	28	53
Frequência	60Hz	100 mini	100	125	150	200	250	315	355	400
Vazão Máxima	m³/h	225	275	390	560	865	1080	1700	2210	3200
	CFM	132	161	229	329	509	635	1000	1300	2087
Pressão Máxima	mmca	22	34	35	56	60	50	65	37	65
Potência Motor		31	68	68	120	120	240	325	250	560
Tensão Monofásica					127 / 230V					230V
Potência Total Absorvida		29	62	62	109	105	220	286	353	625
Nível Pressão Sonora [dB] *		34	33	38	46	50	51	58	41	49
Nível Pressão Sonora Ambientado – Leq [dBA] **		45	51	50	61	62	68	74	61	69
Duto		4	4	5	6	8	10	12	14	16
Rotação		2550	2600	2600	2650	2650	2850	2550	1500	2475
Peso		2	3,14	3,14	4,36	4,36	5,16	6,86	10,50	22,5

Fonte: Sicflux.

5.4.3 Discussão dos Resultados

A velocidade de projeto de 6,0 m/s (1.200 FPM) foi adotada para os trechos principais por situar-se dentro da faixa recomendada pela ABNT NBR 16401-1:2024 para sistemas de ventilação em ambientes institucionais, conciliando a redução das dimensões dos dutos com a manutenção de baixos níveis de ruído aerodinâmico (condição especialmente importante em biblioteca, ambiente que demanda conforto acústico elevado. As perdas de carga unitárias resultantes) 1,24 Pa/m para a MAQ-01 e 1,91 Pa/m para a MAQ-02) situam-se dentro da faixa de 0,7 a 5,0 Pa/m indicada pela norma como adequada para projetos de perda de pressão moderada.

A pressão estática total estimada para o circuito crítico de cada máquina (~80 Pa para a MAQ-01 e ~74 Pa para a MAQ-02) inclui a perda distribuída calculada e uma margem de aproximadamente 50% para perdas localizadas (curvas, derivações, reduções, filtros e grelhas). Ambos os valores são compatíveis com a pressão disponível das caixas de ventilação selecionadas, garantindo o atendimento à vazão de projeto em todas as grelhas. O ajuste fino de vazão de cada grelha será realizado durante o procedimento de Teste, Ajuste e Balanceamento (TAB), conforme exigido pela seção 17 da ABNT NBR 16401-1:2024.

Os dutos foram especificados em MPU (painel de alumínio pré-isolado com espuma rígida de poliuretano), em conformidade com a ABNT NBR 16235. A escolha justifica-se por três aspectos práticos: (i) menor custo total quando comparado à chapa galvanizada com isolamento externo aplicado em obra; (ii) maior praticidade de instalação, dispensando soldas e aplicação posterior de isolamento; e (iii) robustez superior, com estanqueidade que atende à Classe C da norma EN 1507, reduzindo perdas de ar do sistema. Os dutos de ar externo na captação, sujeitos às intempéries, foram especificados em chapa galvanizada com tratamento anticorrosivo, conforme prática usual recomendada pela SMACNA (Figura 21).

Figura 21 – Dutos MPU pré-instalados em ACI-315, painéis de alumínio pré-isolados com espuma de poliuretano



Fonte: Elaboração própria.

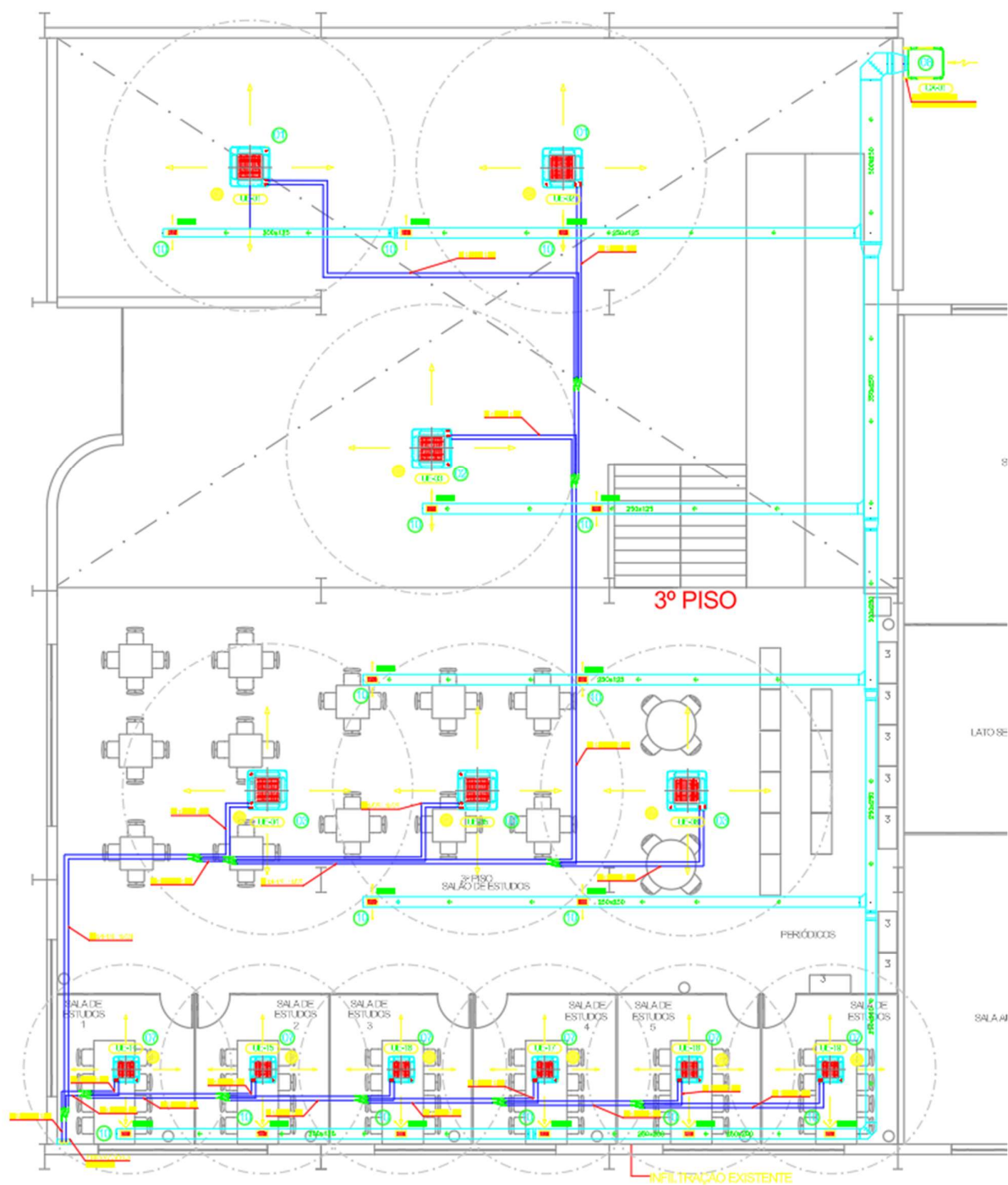
O projeto executivo elaborado no AutoCAD é apresentado nas figuras a seguir, organizadas por visão geral e por zoom de cada zona térmica. Todas as plantas mostram simultaneamente o posicionamento das unidades evaporadoras, o traçado da linha frigorígena e a rede de dutos de renovação de ar (Figuras 22 e 23).

Figura 22 – Projeto executivo de climatização, Planta Geral (1º Piso: Acervo e Hall)



Fonte: Elaboração própria.

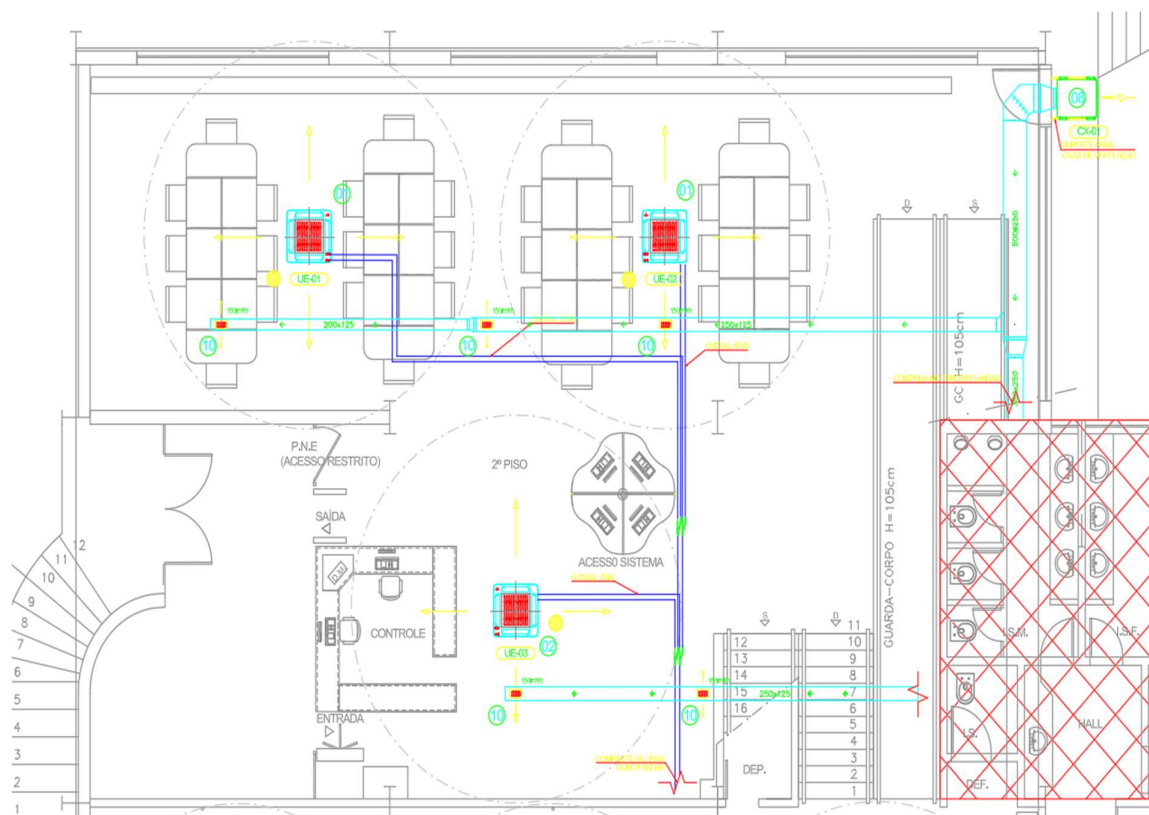
Figura 23 – Projeto executivo de climatização, Planta Geral (2º/3º Piso: Hall e Mezanino)



Fonte: Elaboração própria.

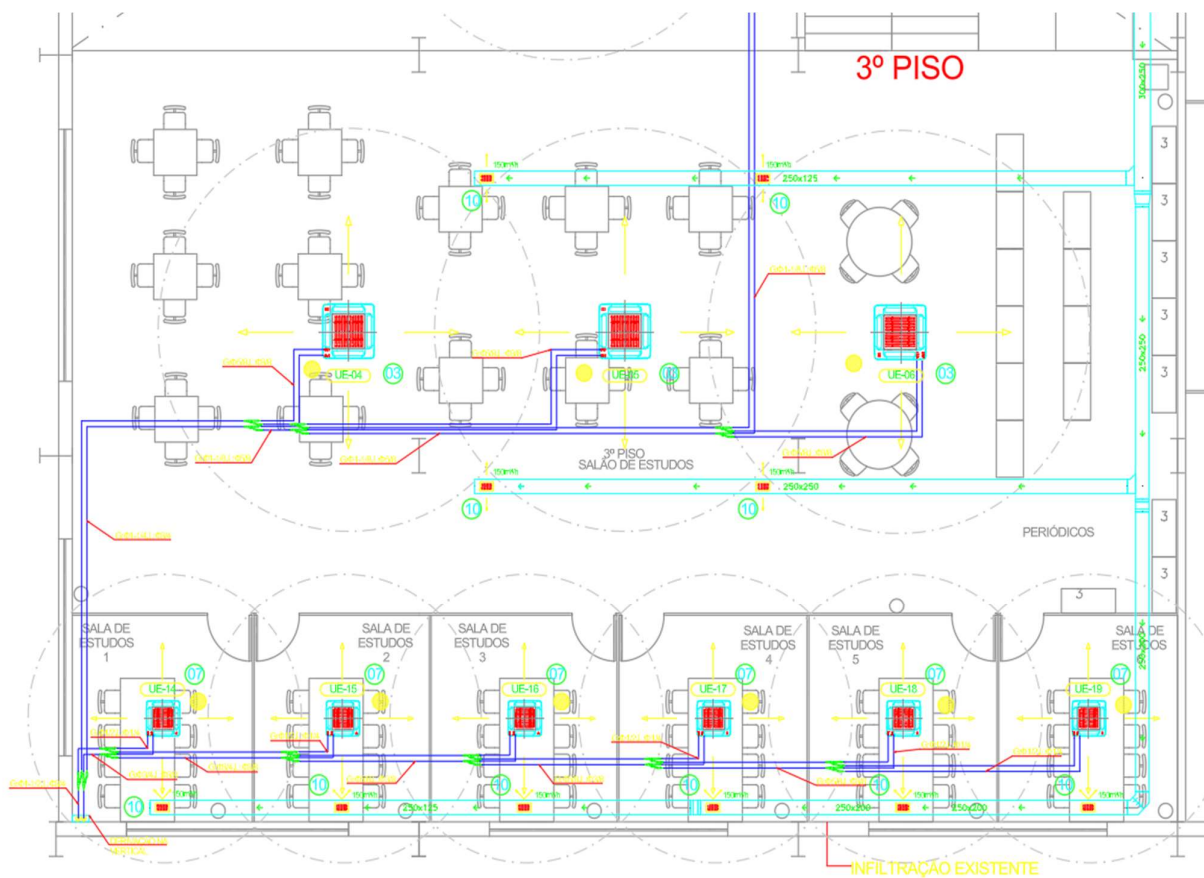
Para melhor visualização, as figuras seguintes apresentam o detalhamento de cada zona térmica individualmente (Figuras 24 a 31).

Figura 24 – Detalhamento da Z_AreasComuns, Hall (2º Piso)



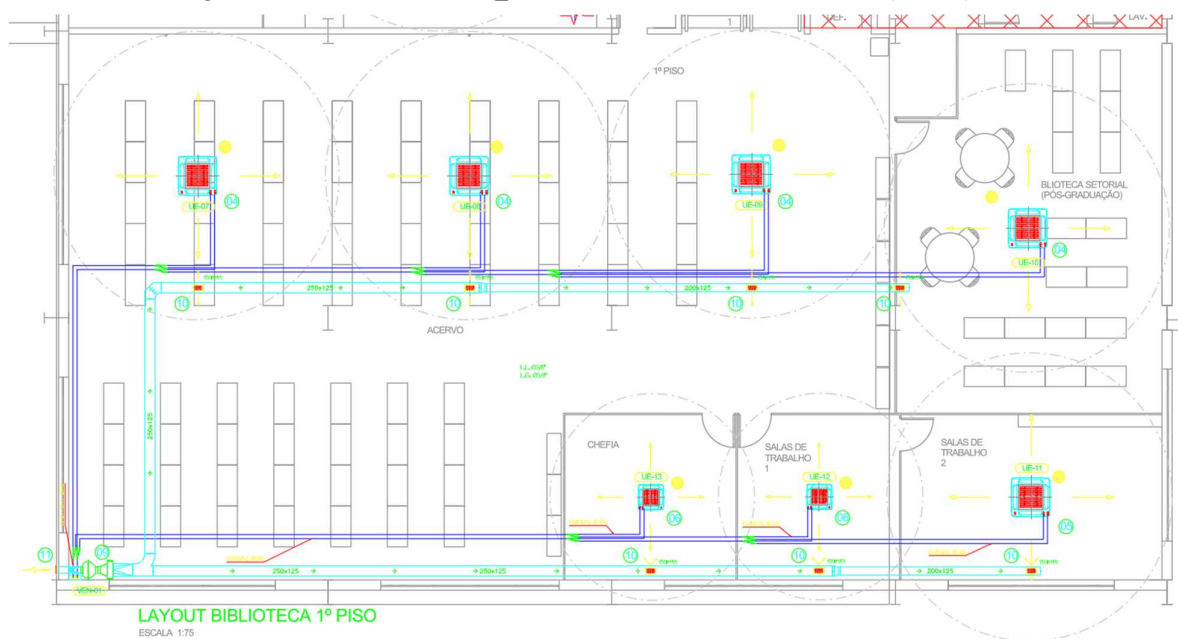
Fonte: Elaboração própria.

Figura 25 – Detalhamento da Z_AreasComuns, Salão de Estudos (3º Piso)



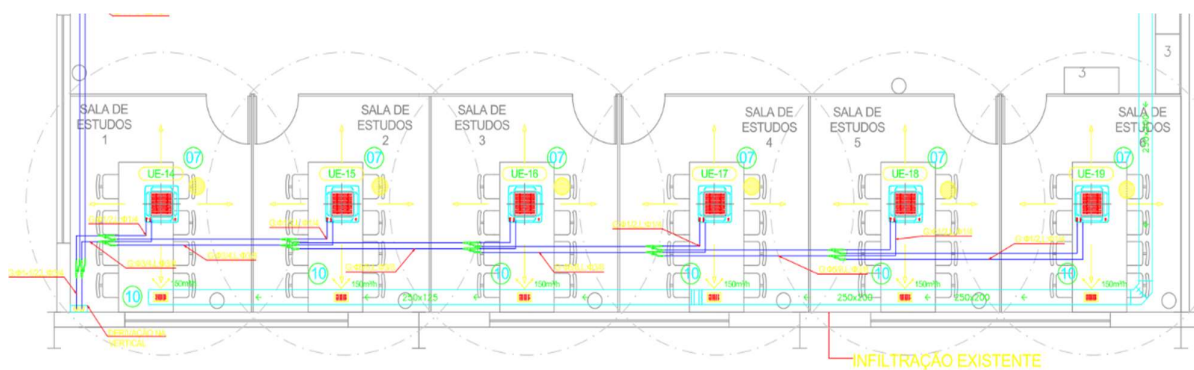
Fonte: Elaboração própria.

Figura 26 – Detalhamento da Z_Acervo, Acervo e Biblioteca Setorial (1º Piso)



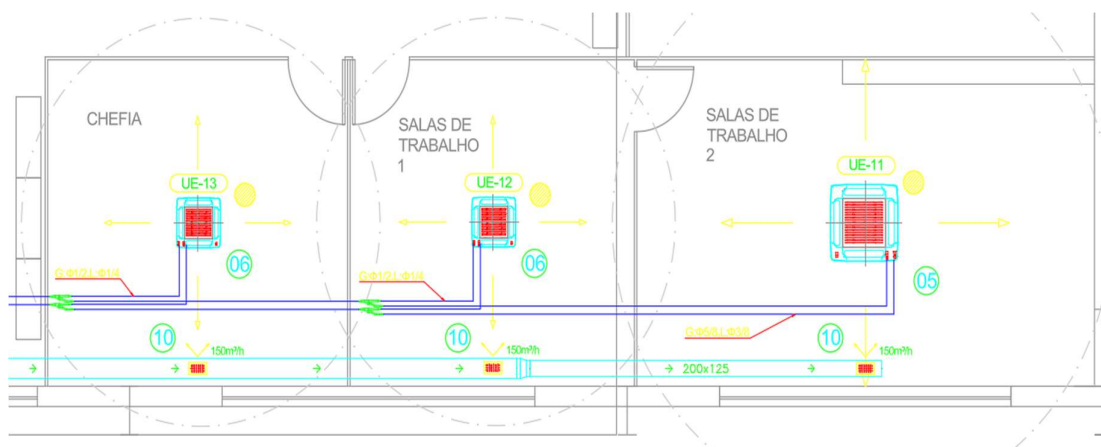
Fonte: Elaboração própria.

Figura 27 – Detalhamento da Z_SalasEstudos, Salas de Estudos 1 a 6 (3º Piso)



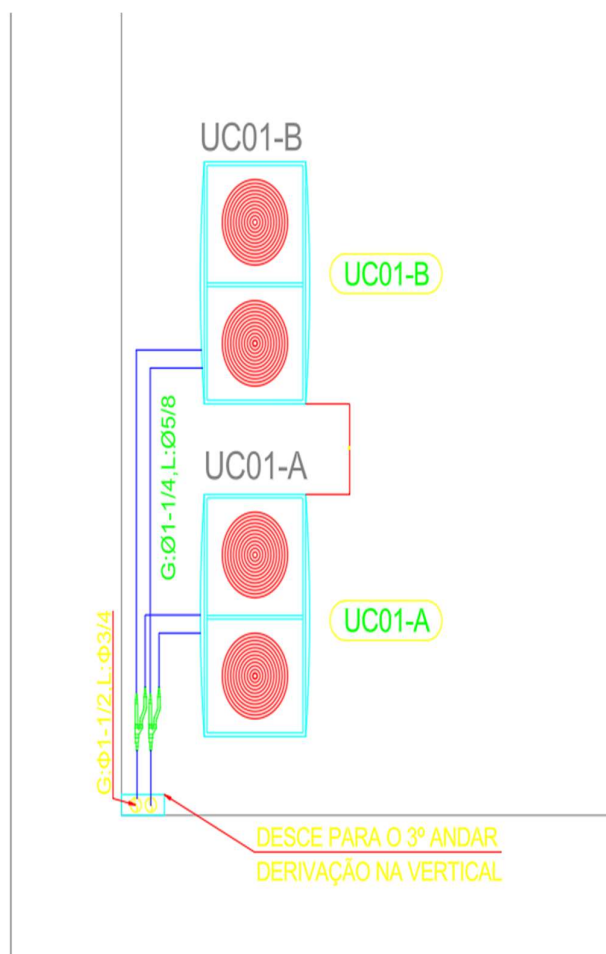
Fonte: Elaboração própria.

Figura 28 – Detalhamento da Z_Administrativo, Chefia e Salas de Trabalho (1º Piso)



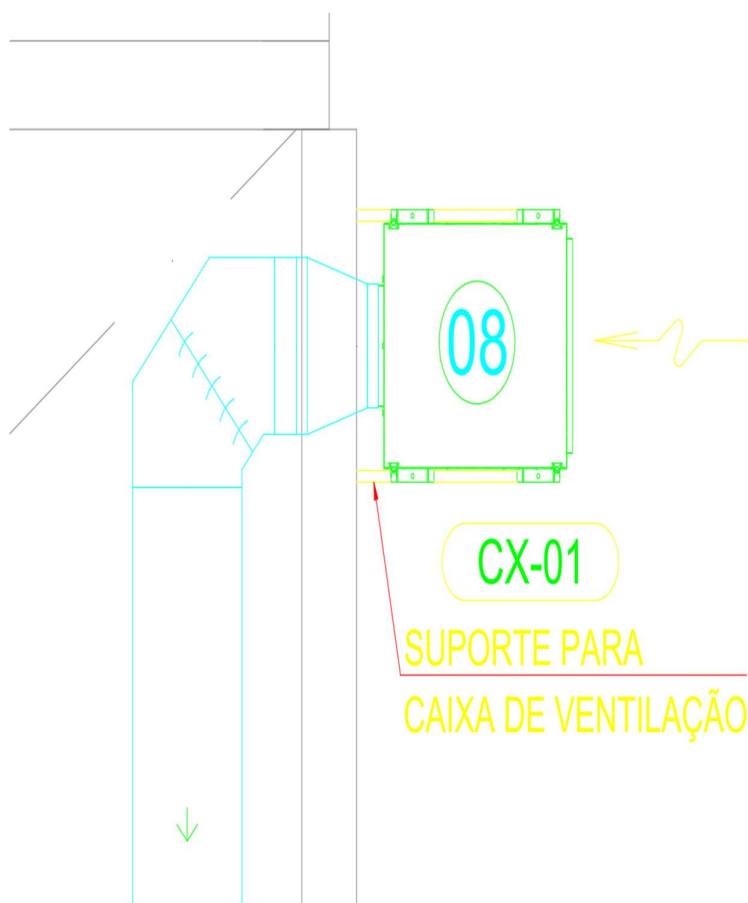
Fonte: Elaboração própria.

Figura 29 – Detalhe do posicionamento das unidades condensadoras (UC-01A/B) na laje



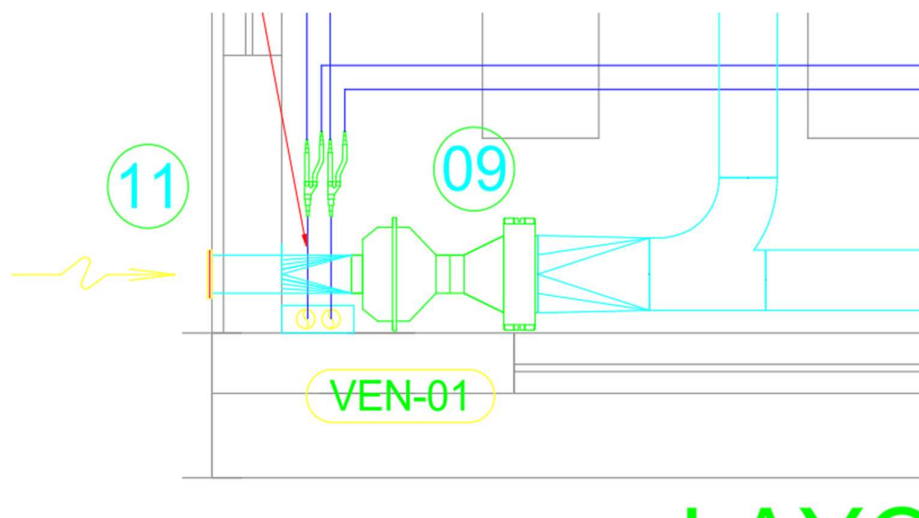
Fonte: Elaboração própria.

Figura 30 – Detalhe construtivo da caixa de ventilação CX-01 (MAQ-01), posição de instalação



Fonte: Elaboração própria.

Figura 31 – Detalhe do ventilador VEN-01 (MAQ-02), conexão flexível e tomada de ar



Fonte: Elaboração própria.

5.5 Orçamento

O levantamento de preços do projeto foi realizado em maio de 2026, junto à distribuidora Total Ar Ltda., localizada em Serra/ES, parceira credenciada da Midea Carrier em Minas Gerais e Espírito Santo, e junto à empresa Kelvin Ar Condicionado Ltda., de Belo Horizonte/MG, responsável pela execução dos serviços. Os valores apresentados refletem as condições de mercado vigentes na data da cotação e devem ser atualizados em caso de execução futura do projeto.

O orçamento foi estruturado em dois componentes distintos: o fornecimento dos equipamentos de ar-condicionado do sistema VRF e o custo de execução (materiais e mão de obra) para a instalação completa do sistema, incluindo a rede de dutos de renovação de ar.

O fornecimento dos equipamentos VRF (composto pelas duas unidades condensadoras (UC-01: 28 HP / 78,5 kW e UC-02: 22 HP / 61,5 kW), pelas 19 unidades evaporadoras (cassetes de 4 vias padrão e compactos), pelos painéis frontais, controles remotos sem fio e todos os acessórios de linha frigorígena (derivações, refinet)) totalizou R\$ 217.747,20, conforme Proposta Comercial nº 22122 da Total Ar Ltda., datada de 14/05/2026 (Figura 32).

Figura 32 – Proposta comercial de fornecimento dos equipamentos VRF, Total Ar Ltda., maio/2026



Total Ar Ltda
 Rua Nestor Guisso, Nº 408, Box 02
 29161019 - Serra, ES
 Telefone: (31) 3464-7644
 CNPJ: 24.996.733/0001-96

Proposta Nº 22122

Para

KELVIN AR CONDICIONADO LTDA.
 CNPJ: 03842185000170, IE: 0622450110070
 R. JOSE MARIA BOTELHO,, 243, Empresa, SANTA MONICA
 31525100 - Belo Horizonte, MG
 Fone: (31) 98896-9685, Celular: (31) 98896-9685,
 vendas@kelvinengenharia.com.br;financeiro@kelvinengenharia.com.br

Número da Proposta	22122
Data	14/05/2026

Vendedor(a): Emanuelle Ferreira Guimarães

Itens da proposta comercial

	Imagem	Descrição do produto/serviço	NCM	Código	Un	Qtd.	Preço un.	Preço total
1		UNID TERM CASSETE 4V V8 18KW (7HP)		MIH180Q4HN18	un	2,000	5.400,00	10.800,00
2		UNID TERM CASSETE 4V V8 16KW (5,7HP) (MIH160Q4HN18)	8415.90.10	02.MIH160Q4HN18	UN	1,000	4.900,00	4.900,00
3		Unid Term Cassete 4V 14,0kW (5HP) Midea (MIH140Q4HN18) VRF	8415.90.10	02.MIH140Q4HN18	UN	3,000	4.200,00	12.600,00
4		UNID TERM CASSETE 4V V8 11,2KW VRF (4HP) (MIH112Q4HN18)	8415.90.10	02.MIH112Q4HN18	AP	3,000	4.100,00	12.300,00
5		UNID TERM CASSETE 4V V8 11,2KW VRF (4HP) (MIH112Q4HN18)	8415.90.10	02.MIH112Q4HN18	AP	1,000	4.100,00	4.100,00
6		UNID TERM CASSETE 4V V8 7,1KW (2,5HP)(02.MIH71Q4HN18) VRF	8415.90.10	02.MIH71Q4HN18	UN	1,000	3.110,00	3.110,00
7		UNID TERM CASSETE 4V V8 3,6KW (1,3HP) VRF (MIH36Q4HN18)	8415.90.10	02.MIH36Q4HN18	AP	2,000	3.000,00	6.000,00
8		UNID TERM CASSETE 4V V8 3,6KW (1,3HP) VRF (MIH36Q4HN18)	8415.90.10	02.MIH36Q4HN18	AP	6,000	3.000,00	18.000,00
9		PAINEL CASSETE 4V 2,8-14KW(02.T-MBQ4-01F) VRF	8415.90.90	02.T-MBQ4-01F	UN	16,000	970,00	15.520,00
10		PAINEL CASSETE 4V 16-18KW (T-MBQ4-02E1)	8415.90.90	02.T-MBQ4-02E1	UN	3,000	1.150,00	3.450,00
11		(RM12F/BGF-E) Controle Remoto Sem Fio RM12F Midea VRF	8415.90.10	02.RM12F/BGF-E	UN	19,000	250,00	4.750,00
12		REFINET (DERIVACAO) MIDEA VRF FQZHN-01D VRF	7412.10.00	02.5427	UN	7,000	260,00	1.820,00
13		(FQZHN-02D) DERIVAÇÃO Y COBRE UN INT HP TAMANHO 02 VRF	7412.10.00	02.FQZHN-02D	UN	1,000	635,00	635,00
14		(FQZHN-03D)Derivação Y Cobre Unid Term 2 Tubos Tam 3 VRF	7412.10.00	02.FQZHN-03D	UN	8,000	495,00	3.960,00
15		REFINET (DERIVACAO Y 2 Tubos) MIDEA VRF FQZHN-04D			UN	2,000	1.400,00	2.800,00
16		VC MAX 220V/3F CO HD27 / 61,5 KW (22HP)		MVC-M615WV2WN	UN	1,000	52.680,00	52.680,00
17		C VC Max 220V/3F CO HD27 78,5kW (28HP)		MVC-M785WV2WN1-	un	1,000	60.322,20	60.322,20

Fonte: Total Ar Ltda. (2026).

O orçamento de execução, elaborado pela Kelvin Ar Condicionado Ltda., contempla três áreas de serviço: a Área 1, correspondente à instalação completa do sistema VRF (mão de obra e materiais), com valor total de R\$ 136.503,97; a Área 2, relativa à instalação do sistema de renovação de ar MAQ-01 (Sicflux GRF280M, dutos MPU, grelhas e acessórios do pavimento superior), com valor de R\$ 57.382,42; e a Área 3, referente à instalação do sistema MAQ-02 (Sicflux ACI 315, dutos MPU e acessórios do pavimento térreo), com valor de R\$ 24.112,50. O valor total de execução ficou em R\$ 217.998,88 (Figura 33).

Figura 33 – Orçamento de execução do sistema de climatização e renovação de ar, Kelvin Ar-Condicionado Ltda., maio/2026



KELVIN

ENGENHARIA

Desde 2000

RESUMO GERAL — CONSOLIDAÇÃO DO ORÇAMENTO

Esta aba consolida todas as áreas, aplica o BDI único e mostra o peso de cada categoria no orçamento.

BDI ÚNICO (aplicado a todas as áreas):

1,700

← Altere apenas esta célula amarela para mudar o BDI de todo o orçamento

RESUMO QUANTITATIVO DO PROJETO

VISÃO 1 — TOTAIS POR ÁREA

ÁREA	NOME / LOCAL	M.O. BRUTA	MAT. BRUTO	FATOR M.O.	FATOR MAT.	M.O. c/ BDI	MAT. c/ BDI	TOTAL c/ BDI
ÁREA 1	SISTEMA VRF	R\$ 37.385,00	R\$ 42.911,45	1,000	1,000	R\$ 63.554,50	R\$ 72.949,47	R\$ 136.503,97
ÁREA 2	EXAUSTÃO MAQ1	R\$ 12.797,64	R\$ 20.956,72	1,000	1,000	R\$ 21.755,99	R\$ 35.626,43	R\$ 57.382,42
ÁREA 3	EXAUSTÃO MAQ2	R\$ 4.371,66	R\$ 9.812,16	1,000	1,000	R\$ 7.431,82	R\$ 16.680,68	R\$ 24.112,50
TOTAL GERAL	03 áreas	R\$ 54.554,30	R\$ 73.680,34	—	—	R\$ 92.742,31	R\$ 125.256,57	R\$ 217.998,88

Fonte: Kelvin Ar Condicionado Ltda. (2026).

O custo total do projeto (equipamentos mais execução) ficou em **R\$ 435.746,08**. Considerando a área climatizada de 924,3 m², o custo específico do projeto é de aproximadamente **R\$ 471,43/m²**, valor condizente com projetos de climatização de médio porte com sistema VRF de alta eficiência em edificações institucionais no mercado de Belo Horizonte. A adoção do sistema VRF, em comparação com soluções convencionais de *splits* individuais, representa um investimento inicial maior, porém com retorno ao longo da vida útil pela maior eficiência energética (EER de 3,88 kW/kW contra 2,8 a 3,2 kW/kW típicos de *splits* convencionais) e pela redução dos custos de manutenção preventiva pela centralização do sistema.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho desenvolveu o projeto executivo de climatização e renovação de ar para a Biblioteca do Campus Nova Gameleira do CEFET-MG, uma edificação de uso intenso sem qualquer sistema de climatização instalado. O projeto demonstrou ser tecnicamente viável, economicamente dimensionado e normativamente fundamentado.

O cálculo da carga térmica pelo *software* HAP 6.2, método HBM, resultou em 142,8 kW (40,6 TR), com pico em janeiro às 17h. A análise revelou que a cobertura em laje de concreto de 305 mm sem isolamento é o elemento de maior contribuição para a carga (31,1% do total sensível), característica construtiva típica das edificações mais antigas do campus, que penaliza significativamente o consumo energético dos sistemas de climatização.

O sistema VRF Midea V8 220V foi selecionado como solução técnica mais adequada ao porte e às características da edificação. A inviabilidade de instalação de um sistema de água gelada (*chiller*) (pela ausência de espaço para casa de máquinas) e a carga de projeto abaixo do patamar economicamente competitivo para *chillers* reforçaram essa escolha. O sistema selecionado, composto por duas condensadoras combinadas de 50 HP e 19 unidades evaporadoras, apresentou taxa de combinação de 124,79% (dentro do limite recomendado) e EER de 3,88 kW/kW, desempenho significativamente superior aos sistemas *split* convencionais instalados em outras edificações do campus.

O sistema DOAS de renovação de ar foi dimensionado para uma vazão total de 917 L/s, garantindo qualidade do ar interior dentro dos limites da Resolução ANVISA RE nº 09/2003 (máximo 1.000 ppm de CO₂). A divisão em duas máquinas independentes (MAQ-01 para o pavimento superior (619 L/s) e MAQ-02 para o pavimento térreo (298 L/s)) atende adequadamente à compartimentação física da edificação, com pressões estáticas de projeto de aproximadamente 80 Pa e 74 Pa, respectivamente, dentro das capacidades dos equipamentos selecionados.

Os dutos de distribuição de ar foram dimensionados pelo método da perda de carga constante (*equal friction*), com velocidade de projeto de 6,0 m/s, e especificados em painéis MPU (alumínio pré-isolado com poliuretano), material que combina menor rugosidade, isolamento integrado e propriedades antimicrobianas, especialmente adequado para o ambiente de biblioteca.

O levantamento orçamentário resultou em custo total de R\$ 435.746,08 (R\$ 217.747,20 em equipamentos e R\$ 217.998,88 em execução), correspondendo a R\$ 471,43/m² de área climatizada. O projeto entrega à instituição uma solução completa, eficiente e fundamentada em normas técnicas nacionais e internacionais, que poderá servir de base para a execução da climatização da biblioteca e como referência para projetos similares em outras edificações do campus.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no desenvolvimento deste trabalho e nas limitações identificadas ao longo do projeto, sugere-se para trabalhos futuros:

Extensão do projeto aos demais campi e edificações do CEFET-MG: a metodologia adotada neste trabalho (levantamento de carga térmica via HAP 6.2, seleção por *software* de fabricante e projeto executivo em AutoCAD) pode ser replicada para as demais edificações do Campus Nova Gameleira e dos outros campi do CEFET-MG que ainda operam sem climatização adequada ou com sistemas fragmentados e ineficientes. Um plano diretor de climatização para o conjunto dos campi permitiria padronizar soluções, otimizar contratos de fornecimento e manutenção e planejar investimentos de forma mais eficiente.

Elaboração de plano de manutenção preventiva: o projeto executivo desenvolvido neste trabalho constitui a base técnica para a elaboração de um plano de manutenção preventiva e preditiva do sistema instalado. Trabalhos futuros poderiam desenvolver um plano de manutenção completo, com periodicidade, procedimentos e indicadores de desempenho para os equipamentos VRF, as caixas de ventilação e a rede de dutos, em conformidade com a NBR 16401 e com o manual do fabricante, visando garantir a vida útil do sistema e a qualidade do ar interior ao longo do tempo.

Análise de eficiência energética e retorno do investimento: sugere-se a realização de uma análise detalhada do consumo energético estimado do sistema projetado, utilizando a função de simulação energética anual do HAP 6.2, e a comparação com o consumo de soluções alternativas como *splits* convencionais ou fan-coils. O cálculo do payback e do retorno sobre o investimento (ROI) forneceria subsídios quantitativos para a tomada de decisão da instituição quanto à execução do projeto.

Estudo de isolamento da cobertura: a cobertura respondeu por 31,1% da carga térmica total, reflexo direto da laje de concreto de 305 mm sem isolamento. Um trabalho futuro poderia avaliar a viabilidade técnica e econômica da aplicação de isolamento térmico na cobertura (seja por membrana refletiva, poliestireno expandido ou lã de vidro), quantificando a redução potencial da carga térmica e, consequentemente, a possibilidade de redimensionamento para um sistema de menor capacidade e menor custo.

Monitoramento da qualidade do ar interior: após a implantação do sistema, recomenda-se o desenvolvimento de um programa de monitoramento contínuo da qualidade do ar interior da biblioteca, com medição periódica dos parâmetros definidos pela NBR 17037:2023 e pela Resolução ANVISA RE nº 09/2003, incluindo CO₂, material particulado (PM_{2,5}), temperatura e umidade relativa. Os dados coletados permitiriam validar o dimensionamento realizado e identificar eventuais ajustes necessários na operação do sistema DOAS.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução RE nº 09, de 16 de janeiro de 2003. Estabelece padrões referenciais de qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. Brasília: ANVISA, 2003.

ABRAVA, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO. Manual de boas práticas em sistemas VRF. São Paulo: ABRAVA, 2026.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. ASHRAE Handbook of Fundamentals. Atlanta: ASHRAE, 2021.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: ASHRAE, 2017.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. ASHRAE Standard 62.1: Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta: ASHRAE, 2022.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. ASHRAE Standard 90.1: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta: ASHRAE, 2010.

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DE INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA VRF/VRV PARA A UFRJ. Rio de Janeiro: UFRJ, [s.d.]. (Trabalho acadêmico).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6023: Informação e documentação (Referências) Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9442: Materiais de construção, Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10152: Níveis de ruído para conforto acústico. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14724: Informação e documentação (Trabalhos acadêmicos) Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16235: Duto fabricado com painel rígido de lã de vidro ou lã de rocha ou espuma rígida de poliisocianurato ou poliuretano, Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16401-1: Instalações de ar-condicionado (Sistemas centrais e unitários) Parte 1: Projetos das instalações. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16401-2: Instalações de ar-condicionado (Sistemas centrais e unitários) Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16401-3: Instalações de ar-condicionado (Sistemas centrais e unitários) Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17037: Qualidade do ar interior em ambientes não residenciais climatizados artificialmente, Padrões referenciais. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

CARRIER CORPORATION. HAP, Hourly Analysis Program: versão 6.2. User's Guide. Syracuse: Carrier, [s.d.]. Disponível em: <https://www.carrier.com/commercial/en/us/software/hvac-system-design/hourly-analysis-program/>. Acesso em: mar. 2026.

CREDER, H. Instalações de ar-condicionado. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

CORRÊA, Bruno Werner de Almeida. Análise da viabilidade técnica de instalação de um sistema VRF/VRV para a UFRJ. 2013. Projeto Final (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria INMETRO nº 50, de 8 de março de 2013, atualizada em 27 nov. 2017. Tabela de propriedades térmicas de elementos e componentes construtivos. Rio de Janeiro: INMETRO, 2017.

MIDEA CARRIER. Manual de projeto, Linha VC Max 220V. Campinas: Midea Carrier, 2024.

MPU DO BRASIL. Especificações técnicas dos painéis MPU. 2024. Disponível em: <https://mpu.com.br>. Acesso em: abr. 2026.

PINTO, E. G. Estudo de viabilidade e performance de sistema VRF para um setor de aulas universitário. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

SHEET METAL AND AIR CONDITIONING CONTRACTORS' NATIONAL ASSOCIATION. SMACNA HVAC Duct Construction Standards, Metal and Flexible. 3. ed. Chantilly: SMACNA, 2005.

SHEET METAL AND AIR CONDITIONING CONTRACTORS' NATIONAL ASSOCIATION. SMACNA HVAC Systems Testing, Adjusting and Balancing. 3. ed. Chantilly: SMACNA, 2002.

SICFLUX. Caixas de ventilação, linha GRF e ACI. 2024. Disponível em: <https://sicflux.com.br>. Acesso em: mai. 2026.

SOUZA, Welder Boeno de. Comparação entre dois sistemas de ar-condicionado para um prédio histórico. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.