

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Denise Cristina Pêgo Batista

**MODELAGEM DIGITAL DO PROCESSO DE CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA DE
AMBIENTES COM AR-CONDICIONADO**

Betim
2026

DENISE CRISTINA PÊGO BATISTA

**MODELAGEM DIGITAL DO PROCESSO DE CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA DE
AMBIENTES COM AR-CONDICIONADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à banca examinadora do
curso de Engenharia Mecânica do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais *Campus*
Betim, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Virgil Del Duca Almeida

Betim
2026

FICHA CATALOGRÁFICA

B333m Batista, Denise Cristina Pêgo

Modelagem digital do processo de cálculo de carga térmica de ambientes com ar condicionado / Denise Cristina Pêgo Batista. – 2026.

59 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Me. Virgil Del Duca Almeida

1. Carga térmica. 2. Ar condicionado. 3. Sistema de climatização. 4. Visual Basic for applications (Linguagem de programação de computador. 5. Engenharia Mecânica. I. Batista, Denise Cristina Pêgo. II. Título

CDU:004.4

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Denísio Pereira Marcos CRB-6/3142



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Betim
Diretoria de Ensino
Docentes Automação Industrial e Tecnologia da Informação
Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135976360 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 09 dias do mês de Julho do ano de 2026, às 17:45, nas dependências do IFMG – Campus Betim, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Virgil Del Duca Almeida e demais membros, Bruno de Souza Baptista e Evanilton José Alves Barbosa. Nesta ocasião o discente **Denise Cristina Pêgo Batista** do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, com **registro acadêmico de número 0057292** do IFMG – Campus Betim, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado **“Modelagem Digital do Processo de Cálculo de Carga Térmica de Ambientes com Ar-condicionado”** e foi **APROVADO**, com **85 (oitenta e cinco)** pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e seu orientador no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o consequente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes e o atendimento as correções sugeridas pela banca. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 25 dias, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e consequente reprovação.

A sessão foi encerrada às dezoito horas e cinquenta e quatro minutos. Para constar, eu, Virgil Del Duca Almeida, redigi a presente ata.

Betim, 09 de julho de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Virgil Del Duca Almeida, Professor**, em 09/07/2026, às 19:57, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Bruno de Souza Baptista, Professor**, em 10/07/2026, às 14:14, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Evanilton Jose Alves Barbosa, Professor**, em 25/07/2026, às 20:18, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2803898** e o código CRC **AA6B94E8**.

23792.000837/2026-22

2803898v1

Dedico esse trabalho a todos que
acreditaram e me apoiaram nessa longa
trajetória acadêmica, sem vocês nada
disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por sempre me acompanhar e me iluminar durante todo este processo longo e desafiador.

Expresso minha eterna gratidão aos meus amigos João Victor, Jonatan Fraga, Otávio Luiz, Pedro Cordeiro e Tiago Carmo, que caminharam comigo e estiveram ao meu lado em todos os altos e baixos da graduação. Nunca esquecerei da companhia, do carinho e da força que vocês me deram. É um orgulho imenso ter vivido a Engenharia ao lado de amigos tão especiais, não poderia ter sido melhor.

Agradeço, com todo meu coração, à minha mãezinha, que com simplicidade, amor e dedicação cuidou de mim e me incentivou em todos os momentos da minha vida.

Depois de uma pandemia e de uma doença avassaladora, reconheço que, se não fosse pela presença de tantos anjos na minha vida, eu não estaria aqui hoje. Obrigada, meu Deus, por todas essas pessoas e por aquelas que, mesmo não citadas, fizeram parte desta caminhada.

Este trabalho é dedicado a todos vocês. Obrigada por serem exatamente quem são. Sou imensamente grata por cada apoio e por tudo o que representam. Chegar até aqui é uma honra, e ter companhia nessa conquista torna tudo ainda mais especial. Que Deus os abençoe.

Denise Cristina Pêgo Batista

“Se você faz o que sempre fez, sempre terá o que sempre teve.”
- Henry Ford

RESUMO

O cálculo de carga térmica constitui uma etapa fundamental para o dimensionamento de sistemas de ar-condicionado, pois determina a capacidade necessária para atender às condições de conforto térmico e às características de ocupação dos ambientes. No Brasil, esse processo é regulamentado pela ABNT NBR 16401, que estabelece os critérios para a determinação das cargas térmicas sensíveis e latentes decorrentes das características construtivas da edificação, da ocupação, da iluminação, dos equipamentos e da ventilação. Este trabalho apresenta a modelagem digital do processo de cálculo de carga térmica de ambientes condicionados por meio do desenvolvimento de uma ferramenta em Microsoft Excel com interface em Visual Basic for Applications (VBA), baseada nos procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 16401. A ferramenta integra, de forma automatizada, as diferentes parcelas que compõem a carga térmica, realizando os cálculos de transmissão de calor pelos elementos construtivos, das cargas internas provenientes de pessoas, iluminação e equipamentos, bem como das parcelas sensível e latente associadas à ventilação. Para verificar sua aplicação, foram realizados três estudos de caso em ambientes administrativos, permitindo avaliar a coerência da implementação e o comportamento da ferramenta diante de diferentes configurações de entrada. Os resultados possibilitaram determinar a carga térmica total e a capacidade recomendada do sistema de ar-condicionado, expressas em quilowatts (kW), toneladas de refrigeração (TR) e BTU/h. Como principal contribuição, o trabalho disponibiliza uma ferramenta padronizada, acessível e de baixo custo para apoiar as etapas iniciais do cálculo de carga térmica, reduzindo o tempo de execução, padronizando o processo e minimizando a possibilidade de erros inerentes aos procedimentos manuais.

Palavras-chave: carga térmica; ar-condicionado; modelagem digital; VBA; ABNT NBR 16401.

ABSTRACT

Cooling load calculation is a fundamental step in the design of air conditioning systems, as it determines the required capacity to provide adequate thermal comfort according to the occupancy and characteristics of indoor environments. In Brazil, this process is regulated by ABNT NBR 16401, which establishes the criteria for determining sensible and latent cooling loads resulting from building characteristics, occupancy, lighting, equipment, and ventilation. This study presents the digital modeling of the cooling load calculation process for conditioned environments through the development of a Microsoft Excel-based tool with a Visual Basic for Applications (VBA) interface, following the procedures established by ABNT NBR 16401. The tool automatically integrates the different cooling load components, including heat transfer through building elements, internal loads generated by occupants, lighting and equipment, as well as the sensible and latent loads associated with ventilation. To evaluate its application, three case studies were conducted in administrative environments, allowing the assessment of the implementation consistency and the tool performance under different input conditions. The results enabled the determination of the total cooling load and the recommended air conditioning system capacity, expressed in kilowatts (kW), refrigeration tons (RT), and BTU/h. The main contribution of this work is an accessible, standardized, and low-cost tool to support the early stages of cooling load calculation by reducing execution time, standardizing the calculation procedure, and minimizing errors associated with manual calculations.

Keywords: cooling load; air conditioning; digital modeling; VBA; ABNT NBR 16401.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - PRINCIPAIS FONTES DE GANHO DE CALOR EM UM AMBIENTE CONDICIONADO	13
FIGURA 2 - CARTA PSICROMÉTRICA DO AR ÚMIDO COM DESTAQUE PARA AS PRINCIPAIS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS.....	23
FIGURA 3 - COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE VENTILAÇÃO NATURAL E VENTILAÇÃO MECÂNICA.....	24
FIGURA 4 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DE UM ELEMENTO CONSTRUTIVO E DEFINIÇÃO DO COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISSÃO TÉRMICA (U).....	27
FIGURA 5 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA METODOLOGIA ADOTADA NO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.	30
FIGURA 6 - PLANTA BAIXA SIMPLIFICADA DO ESCRITÓRIO 1 ADOTADO COMO ESTUDO DE CASO ..	32
FIGURA 7 - PLANTA BAIXA SIMPLIFICADA DO ESCRITÓRIO 2 ADOTADO COMO ESTUDO DE CASO ..	33
FIGURA 8 - PLANTA BAIXA SIMPLIFICADA DO ESCRITÓRIO 3 ADOTADO COMO ESTUDO DE CASO ..	33
FIGURA 9 - FLUXO DE UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA DESENVOLVIDA.....	35
FIGURA 10 TELA PRINCIPAL FONTE: DO AUTOR (2026).....	37
FIGURA 11 INTERFACE PARA INSERÇÃO DOS DADOS GERAIS DO AMBIENTE	38
FIGURA 12 - FORMULÁRIO DE PARÂMETROS DETALHADOS PARA DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES TÉRMICAS E OPERACIONAIS DO AMBIENTE	39
FIGURA 13 - RELATÓRIO SIMPLIFICADO GERADO AUTOMATICAMENTE PELA FERRAMENTA.....	42
FIGURA 14 – RELATÓRIO DETALHADO GERADO AUTOMATICAMENTE PELA FERRAMENTA	44
FIGURA 15 - CONSOLIDAÇÃO RECOMENDADA DAS PARCELAS DE CARGA TÉRMICA PARA O ESCRITÓRIO 1.	52

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PRINCIPAIS METODOLOGIAS DE CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA.....	20
TABELA 2 - PARTES DA ABNT NBR 16401 UTILIZADAS NO DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA....	26
TABELA 3 - PARÂMETROS ADOTADOS PARA OS ESTUDOS DE CASO.....	34
TABELA 4 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA FERRAMENTA DESENVOLVIDA E DA PLANILHA PROBEN (UFPEL).....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

BTU/h – British Thermal Unit per hour

HVAC – Heating, Ventilation and Air Conditioning

IFMG – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

ISO – International Organization for Standardization

kW – Quilowatt

ℓ/s – Litros por segundo

m^3/h – Metros cúbicos por hora

MG – Minas Gerais

NBR – Norma Brasileira

PMV – Predicted Mean Vote

PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied

Q – Carga térmica

QAI – Qualidade do Ar Interior

TR – Tonelada de Refrigeração

U – Coeficiente global de transmissão térmica

VBA – Visual Basic for Applications

ΔT – Diferença de temperatura

$^{\circ}C$ – Graus Celsius

kg/kg – Relação de umidade específica do ar

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
2.	JUSTIFICATIVA.....	16
3.	OBJETIVOS.....	17
3.1	OBJETIVO GERAL.....	17
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
4.1	CONFORTO TÉRMICO.....	18
4.2	CARGA TÉRMICA EM SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO.....	19
4.2.1	MÉTODOS DE CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA.....	20
4.3	CARGAS TÉRMICAS SENSÍVEL E LATENTE	21
4.4	PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS DO AR	22
4.5	VENTILAÇÃO E QUALIDADE DO AR INTERIOR	24
5.	NORMAS TÉCNICAS APLICADAS.....	26
5.1	NORMA ABNT NBR 16401	26
5.2	ABNT NBR 15220 – DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES	27
6.	METODOLOGIA	28
6.1	CARACTERIZAÇÃO DO MÉTODO	28
6.2	CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DE ESTUDO	31
6.3	FUNCIONAMENTO DA FERRAMENTA	35
6.4	ESTRUTURA DA PLANILHA	36
6.4.1	TELA PRINCIPAL.....	36
6.4.2	INTERFACE DE INSERÇÃO DE DADOS GERAIS DO AMBIENTE	37
6.4.3	PARÂMETROS DETALHADOS	38
6.4.4	RELATÓRIO TÉCNICO GERADO	41
7.	CÁLCULO DAS CARGAS TÉRMICAS.....	46
7.1	CARGA TÉRMICA POR TRANSMISSÃO	46
7.2	CARGAS TÉRMICAS INTERNAS.....	47
7.2.1	CARGA TÉRMICA PROVENIENTE DA OCUPAÇÃO	47
7.2.2	CARGA TÉRMICA PROVENIENTE DA ILUMINAÇÃO.....	48
7.2.3	CARGA TÉRMICA PROVENIENTE DOS EQUIPAMENTOS	49
7.3	CARGA TÉRMICA POR VENTILAÇÃO	50
7.3.1	CARGA TÉRMICA SENSÍVEL DE VENTILAÇÃO	50
7.3.2	CARGA TÉRMICA LATENTE DE VENTILAÇÃO	51
8.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
8.1	ESTUDO DE CASO.....	52
8.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS	52
8.3	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	54
8.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DOS RESULTADOS	55
9.	CONCLUSÃO	56

1. INTRODUÇÃO

O crescente uso de sistemas de ar-condicionado em edificações comerciais, institucionais e residenciais reforça a importância do correto dimensionamento desses sistemas, devido à sua influência no conforto térmico, no consumo de energia, nos custos operacionais e na vida útil dos equipamentos.

A carga térmica corresponde à quantidade de calor sensível e latente que deve ser removida do ambiente para manter as condições internas de conforto. Seu cálculo considera ganhos externos, como radiação solar e transmissão por paredes, coberturas, pisos, portas e janelas, e ganhos internos provenientes de pessoas, iluminação, equipamentos e ventilação. A Figura 1 apresenta as principais fontes de ganho de calor em um ambiente condicionado.

Figura 1 - Principais fontes de ganho de calor em um ambiente condicionado

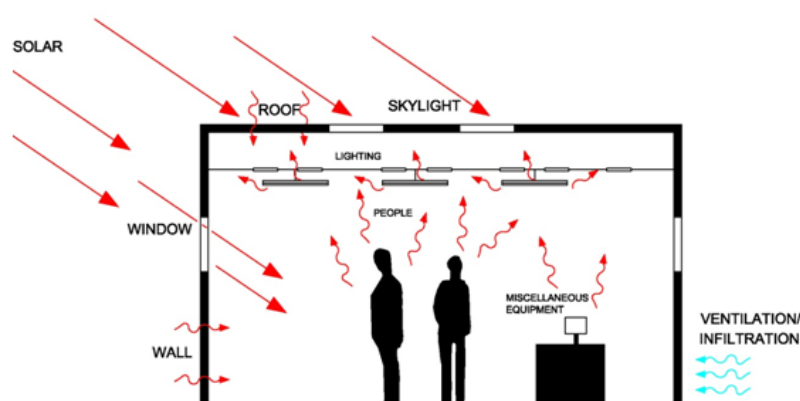


FIGURE 5: VARIOUS HEAT GAINS IN A BUILDING

<u>External</u>	<u>Internal</u>
Roofs/Walls – Conduction	Lights
Roofs/Walls – Radiation	People
Skylights/Windows – Conduction	Miscellaneous Equipment
Skylights/Windows – Radiation	
Ventilation/Infiltration	

Fonte: Engineering Pro Guides (s.d.).

As características construtivas da edificação, a orientação das superfícies em relação ao sol, o número de ocupantes, a potência dos equipamentos elétricos, a iluminação artificial e as condições de ventilação influenciam diretamente o resultado do cálculo. Por esse motivo, ambientes com dimensões semelhantes podem

apresentar cargas térmicas distintas em função de suas condições construtivas e operacionais.

Como exemplo, podem ser consideradas duas salas administrativas com área de 25 m². A primeira possui quatro ocupantes, seis computadores, maior potência de iluminação e uma janela voltada para o oeste. A segunda possui dois ocupantes, dois computadores, menor potência de iluminação e uma janela voltada para o sul. Embora apresentem a mesma área, as salas possuem cargas térmicas distintas, demonstrando que a capacidade do sistema de ar-condicionado não deve ser estimada exclusivamente com base na área do ambiente.

No Brasil, o cálculo da carga térmica de ambientes condicionados é fundamentado principalmente nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 16401, que apresenta parâmetros e procedimentos aplicáveis aos sistemas de ar-condicionado. Entre as informações utilizadas no cálculo estão as propriedades térmicas dos componentes construtivos da edificação, relacionadas também aos critérios apresentados pela ABNT NBR 15220.

Na prática profissional, esse cálculo envolve a organização de diversas informações e a aplicação sequencial de equações e parâmetros técnicos. Embora existam softwares especializados destinados a esse processo, essas ferramentas podem apresentar custos de licenciamento, exigir treinamento específico ou dificultar a visualização detalhada das etapas de cálculo, especialmente em contextos acadêmicos e nas fases iniciais dos projetos.

Também é comum a utilização de métodos simplificados baseados em valores médios de carga térmica por unidade de área. Apesar de permitirem estimativas rápidas, esses métodos não consideram individualmente as características construtivas, ocupacionais e operacionais de cada ambiente, podendo resultar no superdimensionamento ou subdimensionamento do sistema de climatização.

Diante desse cenário, este trabalho propõe a modelagem digital do processo de cálculo de carga térmica de ambientes condicionados por meio de uma planilha desenvolvida em Microsoft Excel, com interface em Visual Basic for Applications (VBA), fundamentada nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 16401. A ferramenta organiza as informações de entrada, automatiza as etapas do cálculo e apresenta os resultados de forma padronizada e rastreável, contribuindo

para a redução de erros associados ao processamento manual e facilitando a análise das diferentes parcelas da carga térmica.

O modelo desenvolvido contempla o cálculo das cargas térmicas por transmissão, pessoas, iluminação, equipamentos e ventilação, consolidando os resultados e fornecendo a carga térmica total do ambiente e a capacidade recomendada para o sistema de climatização. Para demonstrar sua aplicação, foram adotados três ambientes de uso administrativo como estudos de caso, de acordo com o escopo estabelecido para o trabalho.

Este estudo busca, portanto, contribuir para a digitalização e a padronização do processo de cálculo de carga térmica, disponibilizando uma ferramenta funcional, acessível e tecnicamente fundamentada, aplicável ao ensino e às etapas iniciais do desenvolvimento de projetos com ar-condicionado, além de estabelecer uma base para futuras ampliações e aperfeiçoamentos do modelo desenvolvido.

2. JUSTIFICATIVA

Apesar da existência de normas técnicas consolidadas para o cálculo de carga térmica e de softwares comerciais destinados ao dimensionamento de sistemas de climatização, sua aplicação ainda pode representar um desafio em contextos acadêmicos e nas etapas iniciais do desenvolvimento de projetos. A necessidade de reunir um grande volume de informações, interpretar critérios normativos e executar sucessivas etapas de cálculo torna o processo suscetível a erros e dificulta sua compreensão por estudantes e profissionais em início de carreira. Nesse contexto, torna-se relevante o desenvolvimento de ferramentas que organizem e automatizem o processo de cálculo, mantendo a rastreabilidade das informações e permitindo maior entendimento das etapas envolvidas. Além de reduzir atividades repetitivas e minimizar erros associados ao processamento manual, esse tipo de ferramenta contribui para a padronização do procedimento e para a aplicação consistente dos critérios técnicos estabelecidos pelas normas.

A escolha do Microsoft Excel, associado à linguagem Visual Basic for Applications (VBA), justifica-se por se tratar de uma plataforma amplamente difundida, de fácil acesso e familiar à maioria dos usuários. Essa característica favorece a utilização da ferramenta sem a necessidade de aquisição de softwares específicos, possibilitando que estudantes e profissionais tenham acesso a uma solução capaz de automatizar o cálculo mantendo transparência sobre as equações implementadas e os resultados obtidos.

Dessa forma, este trabalho justifica-se pelo desenvolvimento de uma ferramenta computacional que contribui para a digitalização e a padronização do cálculo de carga térmica de ambientes condicionados, oferecendo uma alternativa acessível para apoio ao ensino e às etapas iniciais de projetos de climatização, além de estabelecer uma base para futuras ampliações e aperfeiçoamentos do modelo desenvolvido.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma ferramenta computacional em Microsoft Excel, com interface em Visual Basic for Applications (VBA), destinada à modelagem digital do processo de cálculo de carga térmica de ambientes condicionados, fundamentada nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 16401 e ABNT NBR 15220, utilizando ambientes administrativos como estudo de caso.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver uma ferramenta computacional para automatizar o cálculo de carga térmica de ambientes condicionados conforme os critérios da ABNT NBR 16401 e ABNT NBR 15220;
- Implementar rotinas para determinação das diferentes parcelas da carga térmica, considerando transmissão, pessoas, iluminação, equipamentos e ventilação;
- Consolidar automaticamente os resultados obtidos, fornecendo a carga térmica total e a capacidade recomendada do sistema de climatização;
- Aplicar a ferramenta em três ambientes administrativos, analisando a coerência dos resultados obtidos. Avaliar a aplicabilidade do modelo desenvolvido por meio de um estudo de caso, analisando a coerência dos resultados obtidos;

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os principais conceitos e fundamentos técnicos relacionados ao cálculo de carga térmica em ambientes condicionados. São abordados os mecanismos de transferência de calor, as parcelas que compõem a carga térmica, as normas técnicas utilizadas no desenvolvimento da ferramenta e os conceitos necessários para a compreensão da metodologia proposta

4.1 CONFORTO TÉRMICO

O conforto térmico pode ser definido como a condição de satisfação do indivíduo em relação ao ambiente térmico em que se encontra, resultante da interação entre variáveis ambientais, como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar e radiação térmica, bem como de fatores pessoais, tais como vestimenta e nível de atividade metabólica. A adequada combinação desses fatores é essencial para garantir o bem-estar dos ocupantes em ambientes internos climatizados (FROTA; SCHIFFER, 2001).

Em ambientes com ar-condicionado, o conforto térmico assume papel fundamental, uma vez que condições inadequadas podem comprometer a saúde, o bem-estar e a produtividade dos usuários. A adequada determinação da carga térmica e o correto dimensionamento dos sistemas de ar-condicionado tornam-se essenciais para assegurar condições térmicas compatíveis com o uso previsto do ambiente, conforme parâmetros técnicos estabelecidos por normas e literatura especializada. Estudos mais recentes consolidam esses parâmetros por meio de modelos amplamente aceitos, como o PMV (Predicted Mean Vote – Voto Médio Previsto) e o PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied – Percentual Previsto de Insatisfeitos), utilizados para avaliar, respectivamente, a sensação térmica média percebida pelos ocupantes e a estimativa da porcentagem de pessoas que tendem a se sentir insatisfeitas com as condições térmicas do ambiente (ISO, 2005; ASHRAE, 2017).

No contexto nacional, os parâmetros de conforto térmico aplicáveis a ambientes com ar-condicionado são definidos pela norma ABNT NBR 16401 e ABNT NBR 15220, a qual estabelece limites recomendados de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, servindo como base para o projeto e a

avaliação de sistemas de ar-condicionado. Esses critérios estão alinhados com diretrizes internacionais, como as estabelecidas pela ASHRAE Standard 55, amplamente utilizada como referência técnica em projetos de climatização em nível internacional (ABNT NBR 16401-2; ASHRAE, 2017).

4.2 CARGA TÉRMICA EM SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO

A carga térmica corresponde à quantidade de calor que deve ser removida ou adicionada a um ambiente com o objetivo de manter as condições internas de conforto térmico previamente estabelecidas. No contexto de ambientes com ar-condicionado, o cálculo da carga térmica constitui uma das etapas mais relevantes, uma vez que permite determinar a capacidade requerida para atender às condições de uso previstas do ambiente.

De acordo com a literatura técnica e normas vigentes, a carga térmica total de um ambiente é composta por diferentes parcelas, incluindo as cargas por transmissão de calor através dos fechamentos da edificação, as cargas internas provenientes da ocupação humana, da iluminação e dos equipamentos, bem como as cargas associadas à ventilação e à infiltração de ar. A correta identificação e quantificação dessas parcelas é essencial para evitar a determinação inadequada da capacidade requerida de sistemas de ar-condicionado, o que pode resultar em desconforto térmico, aumento do consumo de energia elétrica e redução da vida útil dos equipamentos (ASHRAE, 2017; ABNT NBR 16401-1, 2024).

Métodos consagrados para o cálculo de carga térmica, amplamente difundidos na literatura, fornecem a base teórica para o desenvolvimento de ferramentas computacionais e planilhas de apoio ao cálculo de carga térmica de ambientes com ar-condicionado, permitindo maior organização e confiabilidade nos resultados obtidos (MCQUISTON; PARKER; SPITLER, 2005).

4.2.1 MÉTODOS DE CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA

A determinação da carga térmica pode ser realizada por diferentes metodologias, que se diferenciam principalmente pelo nível de detalhamento das análises, pelo tratamento das trocas térmicas e pela precisão dos resultados obtidos. Entre as metodologias mais difundidas destacam-se o CLTD/SCL/CLF (Cooling Load Temperature Difference / Solar Cooling Load / Cooling Load Factor) e o RTS (Radiant Time Series), desenvolvidos pela ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), entidade internacional responsável pela publicação de normas, manuais e referências técnicas para sistemas de aquecimento, ventilação, ar-condicionado e refrigeração (ASHRAE, 2017). O método CLTD/SCL/CLF estima a carga térmica por meio da utilização de diferenças equivalentes de temperatura e fatores de correção aplicados às diferentes parcelas de ganho de calor, como transmissão pela envoltória da edificação, radiação solar, ocupação, iluminação e equipamentos. Em função de sua simplicidade e facilidade de aplicação, tornou-se amplamente empregado em estudos preliminares e dimensionamentos convencionais. Como evolução das metodologias simplificadas, a ASHRAE desenvolveu o RTS (Radiant Time Series), fundamentado na representação dos efeitos transitórios da transferência de calor e da influência temporal das cargas radiantes. Essa abordagem proporciona resultados mais representativos do comportamento térmico dos ambientes, razão pela qual o RTS passou a constituir uma das principais referências para o desenvolvimento de softwares de simulação energética e projetos que exigem maior precisão. As diferenças entre as metodologias CLTD/SCL/CLF e RTS são sintetizadas na Tabela 1, evidenciando suas principais características e aplicações.

Tabela 1 - Comparação entre as principais metodologias de cálculo da carga térmica.

METODOLOGIA	CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÃO
CLTD/SCL/CLF	Utiliza diferenças equivalentes de temperatura e fatores de correção para estimar as parcelas da carga térmica.	Estudos preliminares e dimensionamentos convencionais.
RTS	Considera os efeitos transitórios da transferência de calor e das cargas radiantes ao longo do tempo.	Projetos que exigem maior precisão e softwares de simulação energética.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026, adaptado de ASHRAE (2017).

Os parâmetros utilizados na ferramenta desenvolvida neste trabalho foram definidos conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 16401, enquanto a implementação computacional concentrou-se na automatização das etapas de cálculo compatíveis com o escopo proposto para ambientes administrativos.

4.3 CARGAS TÉRMICAS SENSÍVEL E LATENTE

As cargas térmicas envolvidas no condicionamento de ambientes podem ser classificadas em cargas sensíveis e cargas latentes. A carga térmica sensível está associada à variação da temperatura do ar no ambiente, enquanto a carga térmica latente relaciona-se à variação do teor de umidade do ar. Ambas devem ser consideradas de forma conjunta no cálculo da carga térmica de ambientes com ar-condicionado, uma vez que influenciam diretamente a determinação da capacidade requerida para atender às condições de conforto térmico do ambiente (SONNTAG; BORGNAKKE; VAN WYLEN, 2009; ASHRAE, 2017).

Fontes como a transmissão de calor através dos fechamentos, a iluminação artificial e os equipamentos contribuem predominantemente para a carga sensível. Por sua vez, a ocupação humana e a ventilação contribuem simultaneamente para as cargas sensível e latente, devido à liberação combinada de calor sensível e vapor d'água. A separação adequada dessas componentes é fundamental para o correto controle das condições térmicas e de umidade em ambientes com ar-condicionado, garantindo níveis adequados de conforto térmico e qualidade do ar interior (ABNT NBR 16401-1, 2024; ASHRAE, 2017).

A distinção entre cargas sensível e latente também é essencial para a seleção apropriada dos equipamentos de climatização e para a definição das estratégias de controle do sistema, especialmente em ambientes com elevada ocupação ou altas taxas de renovação de ar.

4.4 PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS DO AR

As propriedades psicrométricas descrevem o comportamento termodinâmico do ar úmido e desempenham papel fundamental na análise de sistemas de climatização. A psicrometria corresponde ao estudo das relações entre o ar seco e o vapor d'água, permitindo analisar as transformações sofridas pelo ar durante processos de aquecimento, resfriamento, umidificação, desumidificação e mistura de correntes de ar. Entre os principais parâmetros psicrométricos utilizados em projetos de climatização destacam-se a temperatura de bulbo seco, a umidade relativa, a umidade específica e a entalpia.

A temperatura de bulbo seco corresponde à temperatura do ar medida por um termômetro convencional protegido da radiação térmica. Trata-se de uma das principais variáveis utilizadas em sistemas de climatização, pois influencia diretamente as trocas de calor sensível entre o ambiente e seus elementos construtivos, além de servir como referência para a definição das condições internas e externas de projeto.

A umidade relativa representa a relação entre a quantidade de vapor d'água presente no ar e a quantidade máxima que esse ar pode conter na mesma temperatura, sendo normalmente expressa em porcentagem. Essa propriedade está diretamente relacionada às condições de conforto térmico e ao cálculo das parcelas de calor latente presentes no ambiente.

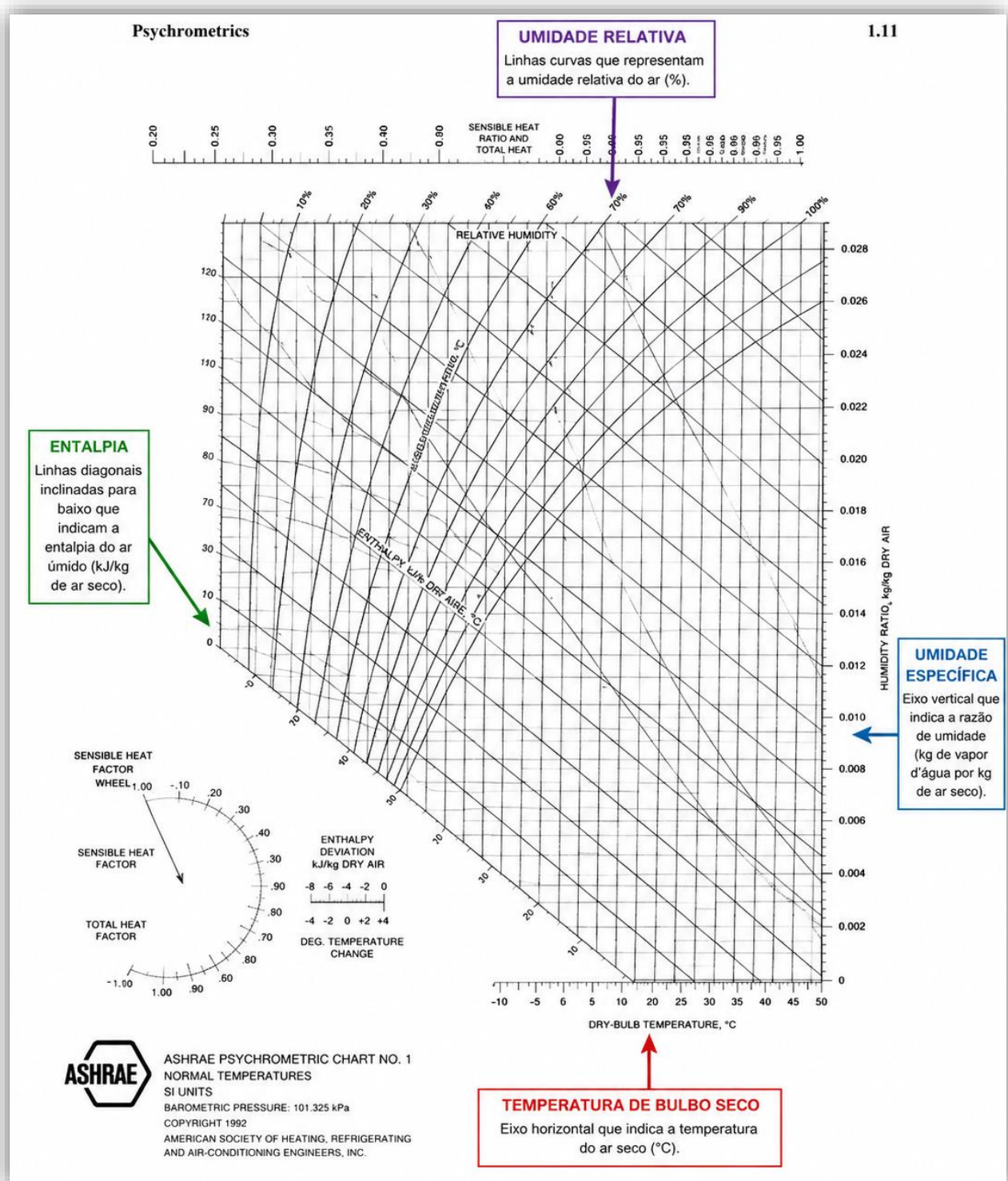
A umidade específica corresponde à razão entre a massa de vapor d'água e a massa de ar seco, sendo normalmente expressa em kg de vapor d'água por kg de ar seco. Essa propriedade é empregada na análise dos processos de umidificação, desumidificação e renovação do ar, permitindo quantificar a quantidade efetiva de umidade transportada pelo fluxo de ar.

A entalpia representa a quantidade total de energia contida na mistura de ar úmido, considerando simultaneamente as parcelas de calor sensível e calor latente. Essa propriedade é amplamente utilizada na avaliação dos processos de condicionamento do ar e na determinação da energia envolvida nas transformações psicrométricas (SONNTAG; BORGNACKE; VAN WYLEN, 2009).

As relações entre essas propriedades são representadas graficamente por meio da carta psicrométrica, ferramenta amplamente utilizada para determinar o estado do ar úmido e analisar os processos de condicionamento do ar. A Figura 2

apresenta a carta psicrométrica da ASHRAE, destacando as principais propriedades psicrométricas empregadas na determinação das parcelas de calor sensível e latente consideradas neste trabalho.

Figura 2 - Carta psicrométrica do ar úmido com destaque para as principais propriedades psicrométricas.



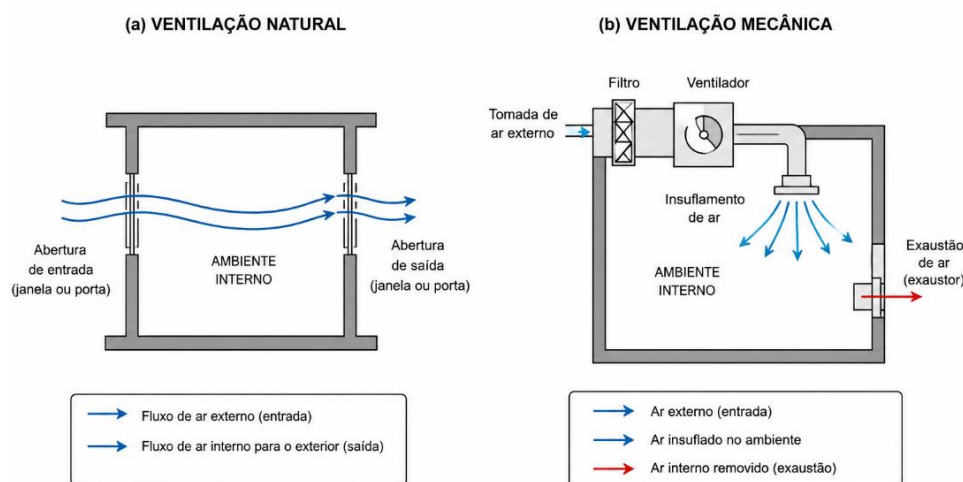
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026, adaptado de ASHRAE (2017).

4.5 VENTILAÇÃO E QUALIDADE DO AR INTERIOR

A ventilação corresponde ao processo de renovação do ar em ambientes climatizados, promovendo a introdução de ar externo e a remoção do ar interno. Esse processo é fundamental para manter a qualidade do ar interior, reduzindo a concentração de dióxido de carbono (CO_2), odores, partículas e outros contaminantes gerados pela ocupação e pelas atividades desenvolvidas no ambiente. O dimensionamento da ventilação depende de diferentes parâmetros, entre os quais destacam-se a vazão de ar externo, o número de ocupantes, a temperatura, a umidade e a finalidade de utilização do ambiente. Esses fatores influenciam diretamente a quantidade de calor sensível e calor latente introduzida pela renovação do ar, impactando o cálculo da carga térmica do sistema de climatização. A renovação do ar pode ocorrer por ventilação natural ou ventilação mecânica. A ventilação natural utiliza aberturas, como portas e janelas, permitindo a circulação do ar em função das diferenças de pressão e temperatura entre os ambientes interno e externo. Já a ventilação mecânica emprega equipamentos, como ventiladores, exaustores e unidades de tratamento de ar, proporcionando maior controle da vazão, da filtragem e das condições do ar insuflado.

A Figura 3 apresenta, de forma comparativa, os princípios de funcionamento da ventilação natural e da ventilação mecânica, destacando os principais elementos envolvidos em cada processo.

Figura 3 - Comparação entre os processos de ventilação natural e ventilação mecânica.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026, com base em ASHRAE (2017).

Neste trabalho, a parcela de ventilação foi calculada a partir das vazões de ar externo estabelecidas pela ABNT NBR 16401-3:2008, considerando as condições psicrométricas do ar externo e interno para estimar as parcelas de calor sensível e calor latente associadas à renovação do ar.

5. NORMAS TÉCNICAS APLICADAS

5.1 NORMA ABNT NBR 16401

A ABNT NBR 16401 estabelece os requisitos técnicos para o projeto de instalações de ar-condicionado de sistemas centrais e unitários, abrangendo critérios relacionados ao conforto térmico, à qualidade do ar interior, à ventilação e aos procedimentos empregados na estimativa da carga térmica. Dessa forma, constitui a principal referência normativa utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

A norma é composta por três partes complementares, cada uma destinada a um conjunto específico de requisitos aplicáveis aos sistemas de climatização. A Tabela 2 apresenta um resumo das partes da ABNT NBR 16401 utilizadas no desenvolvimento da ferramenta proposta.

Tabela 2 - Partes da ABNT NBR 16401 utilizadas no desenvolvimento da ferramenta

PARTE	OBJETIVO	APLICAÇÃO NESTE TRABALHO
<i>ABNT NBR 16401-1:2024</i>	Projeto das instalações de ar-condicionado	Definição dos critérios para estimativa da carga térmica e dimensionamento do sistema.
<i>ABNT NBR 16401-2:2024</i>	Parâmetros de conforto térmico	Definição das condições internas de projeto, como temperatura e umidade relativa.
<i>ABNT NBR 16401-3:2008</i>	Qualidade do ar interior	Determinação das vazões mínimas de ar externo e critérios de ventilação utilizados na ferramenta.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram adotadas as edições ABNT NBR 16401-1:2024 e ABNT NBR 16401-2:2024. Para os critérios de qualidade do ar interior e ventilação foi utilizada a ABNT NBR 16401-3:2008, uma vez que a edição publicada em 2024 teve sua aplicação suspensa pela ABNT em decorrência da identificação de inconsistências técnicas relacionadas aos procedimentos de cálculo das vazões de ar exterior, permanecendo válida a edição de 2008 até a publicação de uma revisão definitiva.

A utilização conjunta das três partes da norma permitiu estabelecer os parâmetros empregados na ferramenta computacional desenvolvida, contemplando os critérios de projeto, as condições de conforto térmico e os requisitos de ventilação necessários para a estimativa da carga térmica de ambientes climatizados.

5.2 ABNT NBR 15220 – DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

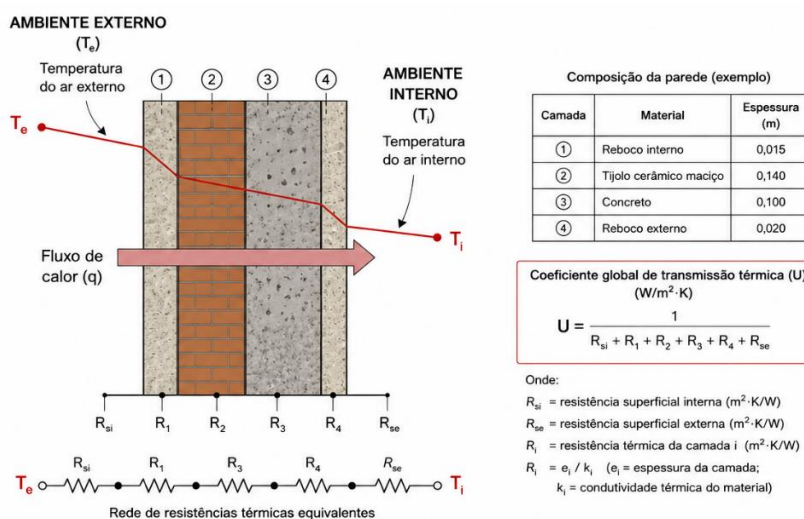
A ABNT NBR 15220 estabelece critérios para a avaliação do desempenho térmico de edificações, apresentando métodos para determinação das propriedades térmicas dos materiais e dos elementos construtivos que compõem a envoltória das edificações. A norma constitui uma importante referência para estudos relacionados à transferência de calor através de paredes, coberturas, pisos, portas e janelas.

Entre os principais parâmetros definidos pela norma destaca-se o coeficiente global de transmissão térmica (U), que representa a capacidade de um elemento construtivo de transmitir calor entre dois ambientes com diferentes temperaturas. Quanto menor o valor de U , maior é a resistência térmica do elemento e menor será a transferência de calor através da envoltória da edificação.

No desenvolvimento da ferramenta proposta, os coeficientes de transmissão térmica dos diferentes elementos construtivos foram utilizados para estimar a parcela de carga térmica decorrente da transmissão de calor através da envoltória do ambiente climatizado. Dessa forma, foi possível representar a influência das características construtivas sobre a carga térmica total do ambiente.

A Figura 4 apresenta, de forma esquemática, a transferência de calor através da envoltória de uma edificação, evidenciando a influência do coeficiente global de transmissão térmica (U) nos ganhos de calor considerados durante o cálculo da carga térmica.

Figura 4 - Transferência de calor através de um elemento construtivo e definição do coeficiente global de transmissão térmica (U).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026, com base em **ASHRAE Handbook – Fundamentals** (2017, Cap. 4 e Cap. 27).

6. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para o desenvolvimento do presente trabalho, descrevendo os procedimentos utilizados para a digitalização do cálculo de carga térmica de ambientes com ar-condicionado. São abordados os critérios normativos empregados, a estrutura do método proposto, as ferramentas computacionais utilizadas e as etapas envolvidas na implementação da planilha eletrônica desenvolvida, bem como a forma de aplicação do método para obtenção dos resultados.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DO MÉTODO

A presente pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem quantitativa e caráter exploratório-descritivo. O estudo foi desenvolvido com o objetivo de estruturar um modelo computacional simplificado para o cálculo de carga térmica em ambientes com ar-condicionado, utilizando como base os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 16401 e ABNT NBR 15220.

A pesquisa possui natureza aplicada por buscar a implementação prática de uma ferramenta computacional destinada ao apoio no dimensionamento preliminar de sistemas de ar-condicionado. A abordagem quantitativa está relacionada à utilização de parâmetros numéricos, equações matemáticas e variáveis térmicas para estimativa das cargas sensíveis e latentes do ambiente analisado.

O caráter exploratório-descritivo do trabalho está associado à análise dos parâmetros envolvidos no cálculo da carga térmica e à organização das rotinas de processamento implementadas na planilha eletrônica desenvolvida em Excel com interface em VBA.

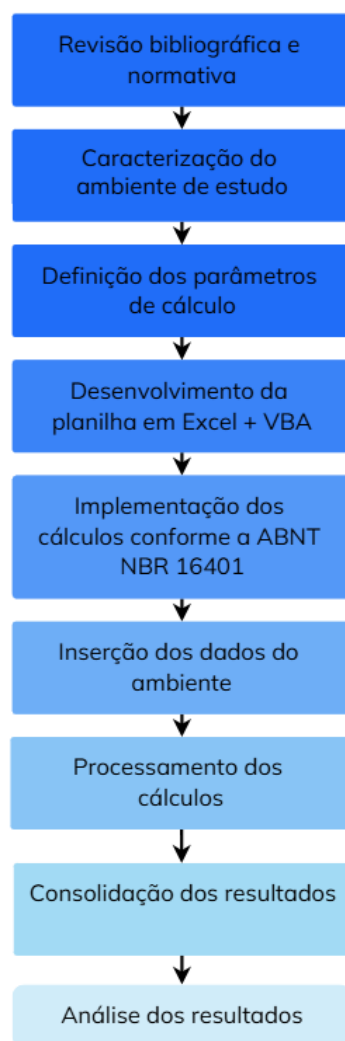
O presente trabalho adota como metodologia o desenvolvimento e a aplicação de uma planilha eletrônica no Microsoft Excel, com interface automatizada por meio da linguagem VBA, para a digitalização do processo de cálculo de carga térmica de um ambiente com ar-condicionado de uso administrativo. A interface computacional foi desenvolvida em Visual Basic for Applications (VBA), linguagem de programação integrada ao Microsoft Excel que permite automatizar rotinas,

desenvolver interfaces gráficas, validar dados de entrada e implementar procedimentos de cálculo dentro da própria planilha.

No modelo desenvolvido, o VBA foi utilizado para estruturar a interface de interação com o usuário, organizar o preenchimento dos dados de entrada, acionar as etapas de cálculo e permitir a visualização consolidada dos resultados. Dessa forma, a planilha não se limita à inserção manual de valores em células, mas apresenta uma sequência orientada de preenchimento, cálculo e geração de resultados, reduzindo a possibilidade de erros de entrada e facilitando a rastreabilidade do processo.

A metodologia foi estruturada em etapas sequenciais, compreendendo a revisão bibliográfica e normativa, caracterização do ambiente de estudo, definição dos parâmetros de entrada, desenvolvimento da ferramenta computacional, implementação dos cálculos, processamento das informações e análise dos resultados.

Figura 5 - Fluxograma simplificado da metodologia adotada no desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A escolha por ambientes administrativos teve como objetivo manter a homogeneidade dos parâmetros de entrada e garantir a coerência da avaliação da ferramenta em sua primeira versão. Ambientes residenciais apresentam padrões distintos de ocupação, utilização de equipamentos, renovação de ar e condições operacionais, enquanto ambientes administrativos possuem características mais uniformes e compatíveis com o escopo inicialmente definido para o desenvolvimento do modelo computacional.

A utilização do Microsoft Excel justifica-se por sua ampla disponibilidade, facilidade de uso e recursos de automação, os quais permitem a integração de cálculos, organização dos dados de entrada e consolidação dos resultados em um único ambiente computacional. A automação por meio da linguagem VBA contribui

para a redução de erros manuais e maior agilidade no processamento das informações (MICROSOFT, 2024).

O método proposto dispensa o uso de softwares especializados ou licenças adicionais, tornando-se uma alternativa acessível tanto para aplicações acadêmicas quanto para uso preliminar em projetos de sistemas de ar-condicionado.

O modelo desenvolvido tem como finalidade a estimativa e consolidação da carga térmica de ambientes com ar-condicionado, conforme os critérios da ABNT NBR 16401. O modelo não contempla o dimensionamento detalhado de equipamentos ou sistemas específicos de climatização, destinando-se ao apoio às etapas iniciais de projeto.

A estrutura parametrizada da planilha permite futura adaptação para diferentes ambientes administrativos com ar-condicionado, mantendo-se os critérios normativos utilizados no presente estudo. A ampliação do modelo para outras tipologias de ambientes poderá demandar a incorporação de parâmetros normativos adicionais, constituindo uma possibilidade de expansão futura da ferramenta desenvolvida.

6.2 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DE ESTUDO

Os ambientes adotados neste trabalho possuem caráter representativo de escritórios administrativos, sendo definidos com o objetivo de avaliar o funcionamento da planilha desenvolvida e a coerência dos resultados obtidos a partir da aplicação dos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 16401 e ABNT NBR 15220.

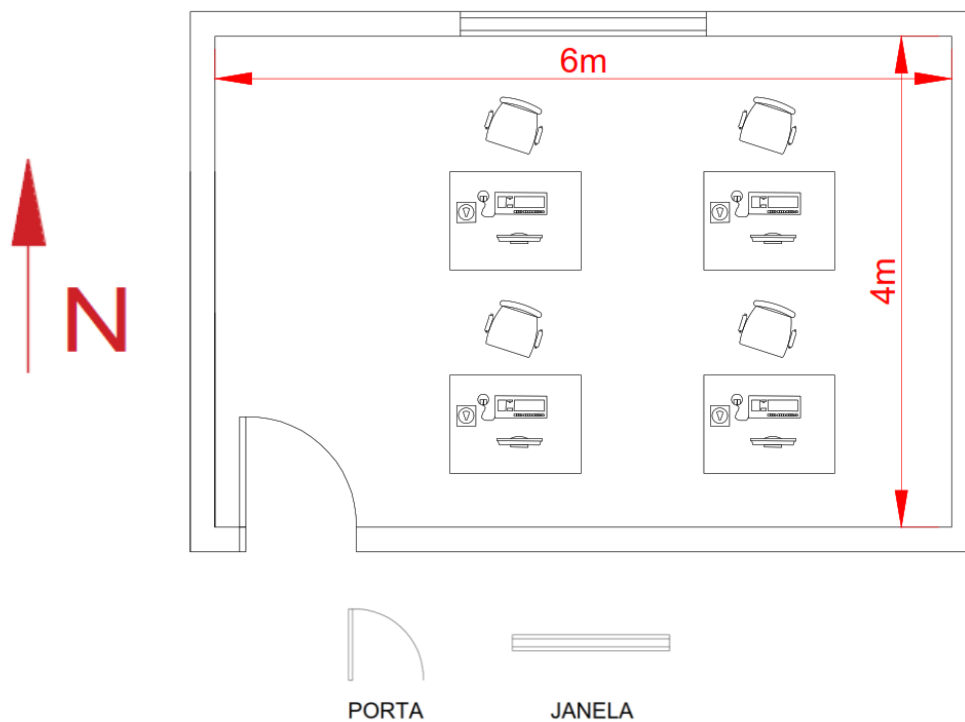
Embora os ambientes analisados não correspondam a edificações reais específicas, os parâmetros adotados foram definidos com base em características comumente encontradas em ambientes administrativos com ar-condicionado, permitindo a aplicação prática do modelo proposto e a análise do comportamento da ferramenta em diferentes condições de ocupação e área útil.

Foram considerados três estudos de caso representativos de ambientes administrativos com dimensões e características operacionais distintas, denominados Escritório 1, Escritório 2 e Escritório 3. A adoção de múltiplos ambientes teve como objetivo verificar a adaptabilidade do modelo desenvolvido frente a diferentes condições de utilização, mantendo-se a tipologia de ambiente e os mesmos critérios normativos de cálculo.

Os ambientes foram considerados localizados na cidade de Betim, Minas Gerais, possibilitando a adoção de condições climáticas compatíveis com a região de estudo. Para cada ambiente foram consideradas características geométricas, construtivas e operacionais, como área útil, pé-direito, ocupação, iluminação, equipamentos, elementos de fechamento, ventilação e orientação solar.

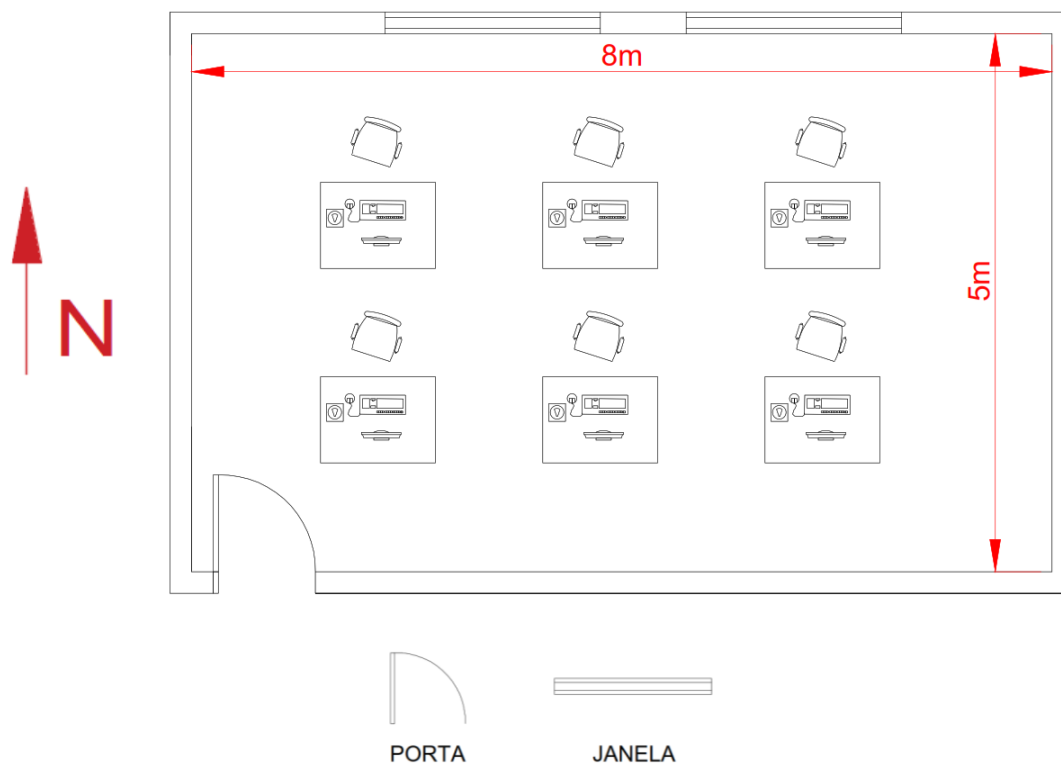
As Figuras 6, 7 e 8 apresentam as plantas baixas simplificadas dos ambientes analisados, contendo as principais dimensões, a distribuição interna dos elementos e a orientação adotada para fins de cálculo.

Figura 6 - Planta baixa simplificada do Escritório 1 adotado como estudo de caso



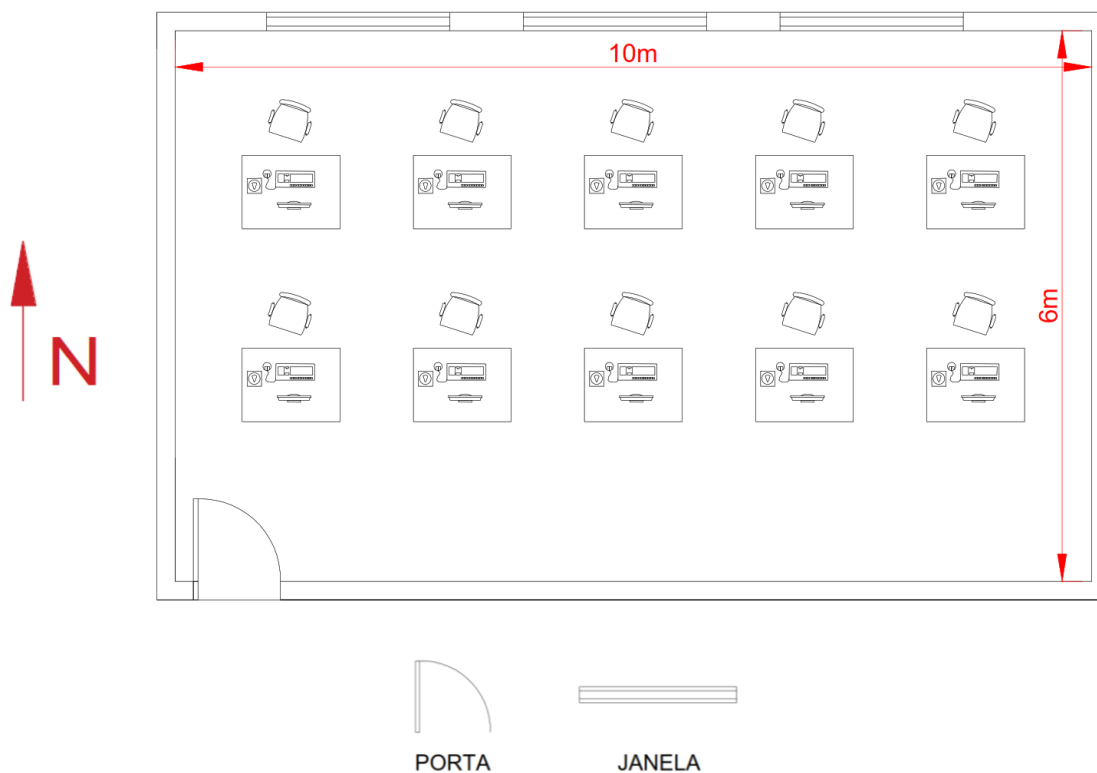
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 7 - Planta baixa simplificada do Escritório 2 adotado como estudo de caso



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 8 - Planta baixa simplificada do Escritório 3 adotado como estudo de caso



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A fim de avaliar a aplicabilidade da ferramenta desenvolvida em diferentes condições de utilização, foram selecionados três estudos de caso representativos de ambientes administrativos, variando-se as características geométricas e operacionais de cada ambiente, sem alterar a metodologia de cálculo empregada. A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros adotados para cada estudo de caso.

Tabela 3 - Parâmetros adotados para os estudos de caso

PARÂMETRO	ESCRITÓRIO 1	ESCRITÓRIO 2	ESCRITÓRIO 3
<i>Localização</i>	Betim – MG	Betim – MG	Betim – MG
<i>Tipo de ambiente</i>	Escritório administrativo	Escritório administrativo	Escritório administrativo
<i>Área útil interna</i>	24 m ²	40 m ²	60 m ²
<i>Dimensões internas</i>	6,00 × 4,00 m	8,00 × 5,00 m	10,00 × 6,00 m
<i>Pé-direito</i>	2,80 m	2,80 m	2,80 m
<i>Ocupação</i>	4 pessoas	6 pessoas	10 pessoas
<i>Temperatura interna de projeto</i>	24 °C	24 °C	24 °C
<i>Temperatura externa</i>	32 °C	32 °C	34 °C
<i>Área envidraçada</i>	3 m ²	5 m ²	8 m ²
<i>Orientação solar predominante</i>	Norte	Leste	Oeste
<i>Potência de iluminação</i>	240 W	320 W	480 W
<i>Potência de equipamentos</i>	1200 W	1500 W	2500 W
<i>Renovação de ar</i>	7,5 l/s por pessoa	10 l/s por pessoa	10 l/s por pessoa
<i>Coeficiente U das paredes</i>	2,50 W/m ² ·K	2,50 W/m ² ·K	2,50 W/m ² ·K

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Os parâmetros apresentados na Tabela 3 foram definidos com base nas recomendações das normas ABNT NBR 16401 (Partes 1, 2 e 3), que estabelecem critérios para conforto térmico, cargas térmicas de ocupação e renovação de ar em ambientes climatizados, e da ABNT NBR 15220, utilizada como referência para a definição do coeficiente global de transmissão térmica (U) dos fechamentos. Os valores referentes à potência instalada de iluminação e à potência dos equipamentos foram adotados de forma compatível com as características normalmente encontradas em escritórios administrativos. Com o objetivo de ampliar a representatividade da avaliação, os estudos de caso foram configurados com diferentes áreas úteis, ocupações, áreas envidraçadas, orientações solares e temperaturas externas, permitindo analisar o comportamento da ferramenta em distintos cenários de operação. Os demais parâmetros de cálculo foram mantidos conforme as recomendações normativas, assegurando que as diferenças observadas nos resultados estivessem relacionadas exclusivamente às

características específicas de cada ambiente. Os três cenários foram processados pela ferramenta desenvolvida para verificar sua aplicabilidade em diferentes condições de utilização. Entretanto, para a apresentação detalhada dos resultados e para a validação por comparação com a planilha PROBEN/UFPel, foi selecionado o Escritório 1 como cenário representativo do estudo.

6.3 FUNCIONAMENTO DA FERRAMENTA

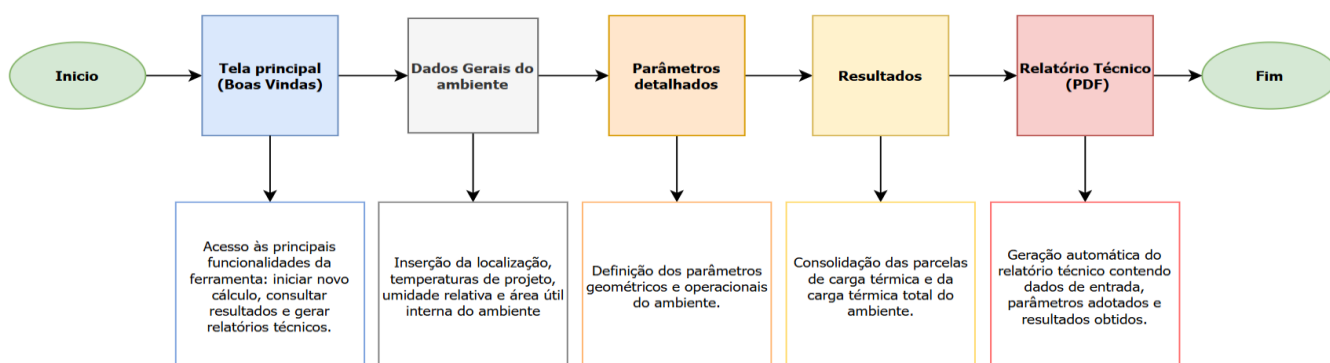
A ferramenta foi desenvolvida para conduzir o usuário de forma sequencial durante o preenchimento dos dados e a realização do cálculo de carga térmica. O processo inicia-se pela tela principal, na qual o usuário pode iniciar um novo cálculo, consultar resultados já processados e gerar relatórios técnicos.

Ao iniciar um novo cálculo, são inseridos inicialmente os dados gerais do ambiente, como localização, temperaturas de projeto, umidade relativa e área útil interna. Na etapa seguinte, são informados os parâmetros detalhados relacionados à geometria do ambiente, ocupação, iluminação, equipamentos, ventilação e características térmicas dos fechamentos.

Após o preenchimento das informações, a ferramenta processa automaticamente as parcelas de carga térmica referentes à transmissão de calor pelos fechamentos, ocupação, iluminação, equipamentos e ventilação. Os resultados são consolidados em uma tela específica, permitindo a visualização das parcelas individuais e da carga térmica total calculada para o ambiente.

Ao final do processo, o usuário pode gerar um relatório técnico em formato PDF, contendo os dados de entrada, os parâmetros adotados e os resultados obtidos. O fluxo geral de utilização da ferramenta é apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Fluxo de utilização da ferramenta desenvolvida



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

6.4 ESTRUTURA DA PLANILHA

A planilha foi estruturada de forma modular, sendo organizada em diferentes interfaces destinadas à inserção dos dados de entrada, ao processamento dos cálculos e à apresentação dos resultados. Essa organização permite que o usuário realize o preenchimento das informações de forma sequencial, reduzindo a possibilidade de erros de entrada e facilitando a rastreabilidade das etapas de cálculo.

A ferramenta é composta por uma tela principal de navegação, responsável pelo acesso às funcionalidades do sistema, seguida por formulários específicos para inserção dos dados gerais do ambiente e dos parâmetros detalhados do projeto. Após o preenchimento das informações, os dados são processados automaticamente e os resultados são consolidados em uma interface própria, a partir da qual também é possível gerar o relatório técnico em formato PDF.

As principais interfaces que compõem a ferramenta são apresentadas nas Figuras 10 a 13 e descritas individualmente nas subseções seguintes.

6.4.1 TELA PRINCIPAL

A tela principal da ferramenta, apresentada na Figura 10, constitui a interface inicial de utilização do sistema, concentrando as principais funcionalidades disponíveis ao usuário. A partir dessa tela é possível iniciar um novo cálculo, consultar resultados previamente processados e gerar relatórios técnicos em formato PDF, permitindo acesso rápido às funcionalidades essenciais da aplicação. Além das opções de navegação, a interface apresenta informações resumidas sobre o objetivo da ferramenta, as cargas térmicas calculadas, instruções básicas de utilização e observações importantes para o correto preenchimento dos dados. Essas informações têm como finalidade orientar o usuário durante a utilização da ferramenta e esclarecer seu escopo de aplicação, destacando que a planilha foi desenvolvida para apoiar as etapas iniciais do dimensionamento de sistemas de climatização, não substituindo o dimensionamento executivo realizado por softwares especializados.

Figura 10 Tela principal



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

6.4.2 INTERFACE DE INSERÇÃO DE DADOS GERAIS DO AMBIENTE

A interface foi organizada em dois grupos principais: Dados Gerais do Ambiente e Dimensões do Ambiente, permitindo que o usuário informe inicialmente as características básicas do local analisado.

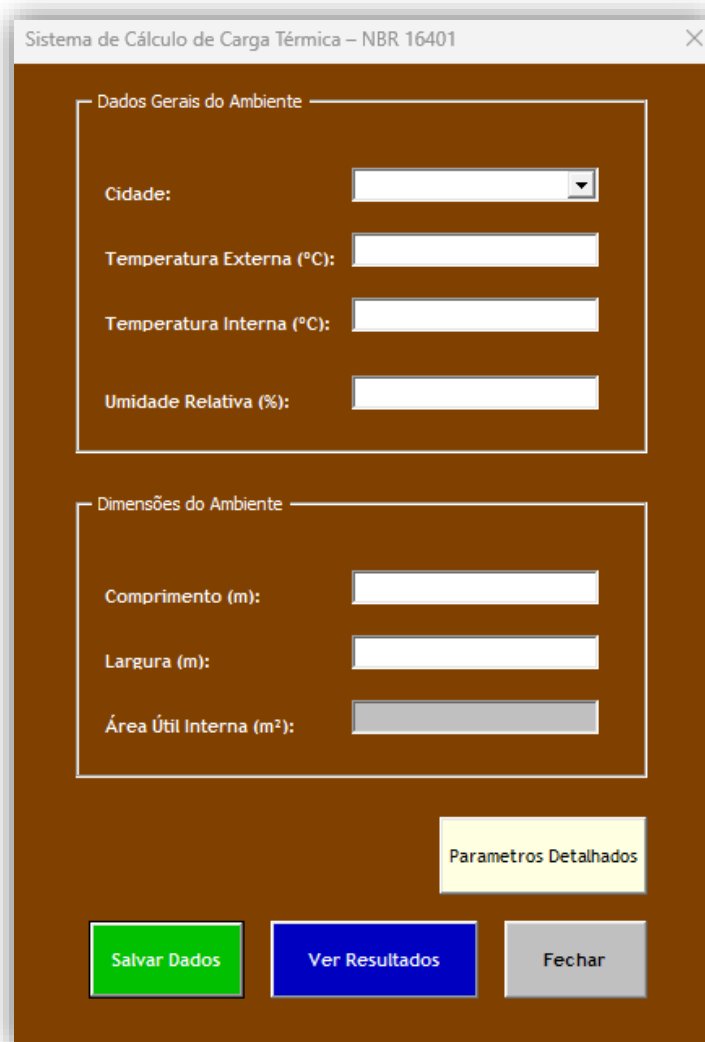
No grupo Dados Gerais do Ambiente são informadas a cidade, utilizada como referência para as condições climáticas do estudo, a temperatura externa de projeto, a temperatura interna desejada e a umidade relativa do ambiente.

No grupo Dimensões do Ambiente, o usuário informa o comprimento e a largura internos do recinto. A partir desses valores, a ferramenta calcula automaticamente a área útil interna, eliminando a necessidade de cálculos manuais e reduzindo a possibilidade de erros de preenchimento.

Após o preenchimento dessas informações, o usuário pode salvar os dados inseridos e acessar a tela Parâmetros Detalhados, onde são definidos os demais parâmetros necessários para a determinação da carga térmica.

Os botões disponíveis também permitem a visualização dos resultados obtidos e o encerramento da aplicação, proporcionando um fluxo de utilização simples e organizado.

Figura 11 Interface para inserção dos dados gerais do ambiente



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

6.4.3 PARÂMETROS DETALHADOS

A Figura 12 apresenta a interface da tela Parâmetros Detalhados, responsável pela inserção dos parâmetros complementares utilizados no cálculo da carga térmica do ambiente. Os campos foram organizados em seis grupos: Geometria, Ocupação, Iluminação, Equipamentos, Ventilação e Fechamentos, com o objetivo de facilitar o preenchimento das informações, reduzir erros de entrada de dados e tornar a utilização da ferramenta mais intuitiva.

Figura 12 - Formulário de parâmetros detalhados para definição das condições térmicas e operacionais do ambiente

Parâmetros Detalhados do Projeto

Geometria do Ambiente

Pé direito (m):

Orientação solar

Ocupação

Numero de pessoas:

Nível de atividade

Calor sensível por pessoa (W):

Calor latente por pessoa (W):

Iluminação

Potência Instalada (W):

Fator de uso:

Fator de correção:

Equipamentos

Potência total instalada (W):

Ventilação

Vazão de ar externo por pessoa (L/s.pessoa):

Razão de umidade do ar externo (kg/kg):

Razão de umidade do ar interno (kg/kg):

Fechamentos

Comprimento total dos fechamentos (m):

Altura dos fechamentos (m):

Área total dos fechamentos (m²):

Coefficiente global de transmissão térmica – U (W/m²·K):

Recebe insolação direta:

Salvar Parâmetros

Cancelar

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

No grupo Geometria, são informados o pé-direito do ambiente e a orientação solar predominante das fachadas, parâmetros utilizados na estimativa das cargas térmicas por transmissão.

O grupo Ocupação permite informar o número de ocupantes e selecionar o nível de atividade desenvolvido no ambiente. A partir dessa seleção, os valores de calor sensível e calor latente por pessoa são preenchidos automaticamente conforme parâmetros previamente definidos, reduzindo erros de entrada de dados e garantindo maior padronização dos cálculos.

O grupo Iluminação reúne os campos referentes à potência total instalada, ao fator de utilização e ao fator de correção da iluminação, informações utilizadas na determinação da carga térmica proveniente do sistema de iluminação.

O grupo Equipamentos permite informar a potência total instalada dos equipamentos presentes no ambiente. Esse valor é utilizado para calcular automaticamente a carga térmica gerada pelos equipamentos elétricos, compondo a parcela de carga sensível considerada no dimensionamento do sistema de climatização.

No grupo Ventilação, são informados a vazão de ar exterior por pessoa e as umidades específicas do ar externo e interno, parâmetros necessários para o cálculo das cargas térmicas sensível e latente associadas à renovação de ar, conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 16401.

Por fim, o grupo Fechamentos concentra os parâmetros relacionados às superfícies de envoltória do ambiente, incluindo altura, comprimento, área, coeficiente global de transmissão térmica (U) e condição de insolação direta. Esses dados são utilizados no cálculo da carga térmica por transmissão através dos fechamentos.

6.4.4 RELATÓRIO TÉCNICO GERADO

Após a realização dos cálculos, a ferramenta disponibiliza a geração automática de relatórios técnicos em formato PDF, permitindo documentar os resultados obtidos de maneira padronizada e organizada. Com o objetivo de atender diferentes necessidades de utilização, foram desenvolvidos dois modelos de relatório: um relatório simplificado e um relatório detalhado.

O relatório simplificado, apresentado na Figura 13, reúne as principais informações do ambiente analisado, incluindo suas características gerais, os parâmetros utilizados no dimensionamento e os resultados do cálculo da carga térmica. São apresentados os valores das cargas sensível, latente e total, além da capacidade recomendada do sistema de climatização em kW e BTU/h. Esse modelo foi desenvolvido para proporcionar uma visualização rápida dos resultados, sendo adequado para consultas, apresentações e documentação técnica resumida.

Figura 13 - Relatório simplificado gerado automaticamente pela ferramenta


CARGA TÉRMICA

ABNT NBR 16401

ABNT NBR 16401

Planilha Excel com VBA
Denise Pêgo - Engenharia Mecânica

Relatório de Cálculo de Carga Térmica

Identificação do Ambiente

Ambiente:	Escritório Administrativo
Área:	24,00 m ²
Pé-direito:	2,80 m
Localização:	Betim
Uso:	Administrativo

Dados Considerados

Número de Ocupantes:	4
Iluminação (W):	240 W
Equipamentos (W):	1200 W
Ventilação (L/s):	30,0 L/s

Resultados do Cálculo de Carga Térmica

Tipo de Carga	Valor
Carga Térmica Sensível (kW)	3,148 kW
Carga Térmica Latente (kW)	1,030 kW
Carga Térmica Total (kW)	4,178 kW
Carga Térmica Total (BTU/h)	14.256 BTU/h

Interpretação dos Resultados:

Carga Térmica Sensível:	Calor associado à variação de temperatura do ambiente.
Carga Térmica Latente:	Calor associado à umidade do ar
Carga Térmica Total:	Soma das cargas sensível e latente, utilizada para o dimensionamento do sistema de climatização.

Os resultados apresentados foram calculados automaticamente , conforme os parâmetros inseridos e a metodologia da ABNT NBR 16401.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O relatório detalhado, apresentado na Figura 14, fornece uma documentação completa de todo o processo de cálculo realizado pela ferramenta. Além da identificação do ambiente e das condições de projeto, o relatório apresenta individualmente as parcelas de carga térmica referentes à transmissão, ocupação, iluminação, equipamentos e ventilação, bem como a consolidação dos resultados em cargas sensível, latente e total. Também são apresentados os valores finais da capacidade recomendada do sistema em kW, TR e BTU/h, permitindo uma análise mais detalhada dos resultados obtidos.

Figura 14 – Relatório detalhado gerado automaticamente pela ferramenta

ABNT NBR 16401

Relatório Detalhado de Cálculo de Carga Térmica

Planilha Excel com VBA
Denise Pêgo - Engenharia Mecânica

Identificação do Ambiente

Ambiente:	Escritório Administrativo	Área m²:	24
Pé-direito (m):	2,8	Volume m³:	67,2
Localização:	Betim	Uso:	Administrativo
Orientação Solar:	Norte	Insolação direta:	Sim

Condições de Projeto

Temperatura externa:	32	Temperatura Interna:	24
Umidade específica interna:	0,009		
Umidade específica externa:	0,018		

Cargas por Transmissão (FECHAMENTOS)

Fechamento	Área (m²)	U(W/m²K)	ΔT (°C)	Carga (W)
Parede externa	56	2,5	8	1120
Carga por transmissão Total:				1120

Carga Interna - Pessoas

Pessoas	Sensível (W/pessoa)	Latente (W/pessoa)	Carga (W/pessoa)
4	75	55	130
Carga Pessoas Total:			520

Carga Interna - Iluminação

Descrição	Potência (W)	Fator uso	Carga (W)
LED	240	1	240
Carga Iluminação Total:			240

Carga Interna - Equipamentos

Descrição	Potência (W)	Fator uso	Carga (W)
Computador	1200	1	1200
Carga Equipamentos Total:			1200

Carga por Ventilação

Descrição	Valor
Vazão Total (L/s)	30
Vazão de ar exterior (m³/h)	108
Carga Sensível (W)	288
Carga Latente (W)	810

Consolidação das Cargas

Carga por transmissão:	1120
Carga interna - Iluminação:	240
Carga interna - Equipamentos:	1200
Carga interna - Pessoas (Sensível):	300
Carga interna - Pessoas (Latente):	220
Carga por ventilação (Sensível):	288
Carga por ventilação (Latente):	810
Carga Sensível Total	3148
Carga Latente Total	1030
Carga Térmica Total:	4178
Carga Total (KW):	4,178
Carga Total (BTU/h):	14256
Capacidade Recomendada (TR):	1,19

Resumo Final

A carga térmica total do ambiente foi calculada conforme os critérios da ABNT NBR 16401, considerando as parcelas de transmissão, cargas internas e ventilação (sensível e latente).
Capacidade recomendada do sistema de ar condicionado:

1,19 TR (14.255,92 BTU/h)

Equações Utilizadas (Resumo)

Transmissão:	$Q_{trans} = U \cdot A \cdot \Delta T$
Pessoas:	$Q_{p,s} = N \cdot q_{p,s}$ e $Q_{p,l} = N \cdot l$
Iluminação:	$Q_{lum} = P \cdot f_u \cdot f_c$
Equipamentos:	$Q_{equip} = \sum P_{equip}$
Ventilação Sensível:	$Q_{vs} = 1,23 \cdot V \cdot \Delta T$
Ventilação Latente:	$Q_{vl} = 3010 \cdot V \cdot \Delta W$

Os resultados apresentados foram calculados automaticamente, conforme os parâmetros inseridos e a metodologia da ABNT NBR 16401.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A geração automática dos relatórios elimina a necessidade de transcrição manual dos resultados, reduzindo a possibilidade de erros e garantindo maior padronização da documentação produzida. Além disso, a apresentação organizada das informações facilita a conferência dos dados de entrada, a validação dos cálculos realizados e o arquivamento dos resultados, tornando a ferramenta mais adequada para aplicações acadêmicas e para estudos preliminares de dimensionamento de sistemas de climatização.

7. CÁLCULO DAS CARGAS TÉRMICAS

7.1 CARGA TÉRMICA POR TRANSMISSÃO

A carga térmica por transmissão corresponde ao ganho ou perda de calor entre o ambiente climatizado e o meio externo por meio dos elementos construtivos que delimitam a edificação, como paredes, coberturas, pisos, portas e janelas. A intensidade dessa transferência depende principalmente da diferença de temperatura entre os ambientes interno e externo, da área dos fechamentos e das propriedades térmicas dos materiais utilizados na construção. Dessa forma, cada elemento construtivo contribui individualmente para a carga térmica total por transmissão do ambiente.

O cálculo da carga térmica por transmissão foi realizado utilizando a metodologia recomendada pela ABNT NBR 16401, baseada no coeficiente global de transmissão térmica (U), na área do elemento construtivo e na diferença de temperatura entre os ambientes interno e externo. O coeficiente U representa a capacidade de transferência de calor através do fechamento, sendo determinado em função das características construtivas dos materiais empregados.

A expressão utilizada para o cálculo da carga térmica por transmissão é apresentada na Equação (1):

$$Q_{Trans} = U \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{EQ.(1)}$$

Sendo:

Q_{Trans} = Carga térmica por transmissão (W);

U = Coeficiente global de transmissão térmica do fechamento (W/m²·K);

A = Área da superfície analisada (m²);

ΔT = Diferença entre a temperatura externa e interna de projeto (°C).

No modelo desenvolvido, o cálculo da carga térmica por transmissão é realizado individualmente para cada elemento construtivo cadastrado para o ambiente analisado. Embora o método permita considerar paredes, coberturas, pisos, portas e janelas, no estudo de caso apresentado neste trabalho foi utilizada apenas uma parede externa exposta à insolação direta, em função das características adotadas para os ambientes avaliados. Após o cálculo individual das parcelas, os valores são somados automaticamente, resultando na carga total por transmissão utilizada na consolidação da carga térmica do ambiente.

7.2 CARGAS TÉRMICAS INTERNAS

As cargas térmicas internas correspondem aos ganhos de calor gerados no interior do ambiente climatizado em decorrência da presença de ocupantes, da iluminação artificial e da operação de equipamentos elétricos. Essas parcelas influenciam diretamente a carga térmica sensível e, em alguns casos, também a carga térmica latente do ambiente, sendo fundamentais para o correto dimensionamento dos sistemas de climatização conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 16401.

7.2.1 CARGA TÉRMICA PROVENIENTE DA OCUPAÇÃO

A presença de pessoas no ambiente representa uma importante fonte de ganho térmico, decorrente do metabolismo humano. Esse calor é liberado continuamente durante a permanência dos ocupantes e é dividido em duas parcelas: calor sensível, responsável pelo aumento da temperatura do ar, e calor latente, associado à liberação de vapor d'água por meio da respiração e transpiração. A magnitude dessas parcelas depende da atividade desenvolvida pelos ocupantes, conforme valores recomendados pela ABNT NBR 16401.

A expressão utilizada para o cálculo da carga térmica associada à pessoas é apresentada na Equação (2) e (3).

$$Q_{p,s} = N \cdot q_s \quad \text{EQ.(2)}$$

$$Q_{p,l} = N \cdot q_l \quad \text{EQ.(3)}$$

Sendo:

$Q_{p,s}$ = Corresponde à carga térmica sensível gerada pelos ocupantes (W);

$Q_{p,l}$ = Corresponde à carga térmica latente gerada pelos ocupantes (W);

N = Representa o número de ocupantes no ambiente;

q_s = Representa o calor sensível liberado por pessoa (W/pessoa);

q_l = Representa o calor latente liberado por pessoa (W/pessoa).

Na planilha desenvolvida, o usuário informa o número de ocupantes e seleciona o tipo de atividade realizada no ambiente. A partir dessa seleção, os valores de calor sensível e calor latente por pessoa são preenchidos automaticamente com base nos parâmetros previamente cadastrados. As cargas sensível e latente são calculadas separadamente e posteriormente incorporadas aos respectivos somatórios da carga térmica total.

7.2.2 CARGA TÉRMICA PROVENIENTE DA ILUMINAÇÃO

A iluminação artificial também constitui uma fonte de ganho térmico interno, uma vez que praticamente toda a energia elétrica consumida pelas luminárias é convertida em calor no ambiente. A carga térmica depende da potência instalada e pode ser corrigida por fatores associados às condições de utilização do sistema de iluminação.

A expressão utilizada para o cálculo da carga térmica associada à iluminação é apresentada na Equação (4).

$$Q_{ilum} = P \cdot F_U \cdot F_C \quad \text{EQ.(4)}$$

Sendo:

Q_{ilum} representa a carga térmica associada à iluminação (W);

P corresponde à potência instalada de iluminação (W);

F_U representa o fator de utilização;

F_C representa o fator de correção adotado.

Na planilha desenvolvida, o usuário informa a potência total instalada do sistema de iluminação, bem como os fatores de utilização e de correção adotados. A partir desses parâmetros, a ferramenta calcula automaticamente a carga térmica proveniente da iluminação, incorporando esse valor à carga térmica sensível total do ambiente.

7.2.3 CARGA TÉRMICA PROVENIENTE DOS EQUIPAMENTOS

Equipamentos elétricos instalados no ambiente também contribuem para o ganho térmico interno, pois parte ou toda a potência elétrica consumida é dissipada na forma de calor. Em ambientes administrativos, computadores, impressoras e demais equipamentos eletrônicos representam parcela significativa da carga térmica sensível.

A expressão utilizada para o cálculo da carga térmica proveniente dos equipamentos é apresentada na Equação (5).

$$Q_{equip} = \sum P_{equip} \quad EQ.(5)$$

Sendo:

Q_{equip} = Representa a carga térmica proveniente dos equipamentos (W);

P_{equip} = Corresponde à potência térmica dissipada por cada equipamento presente no ambiente.

Na planilha desenvolvida, o usuário informa a potência total instalada dos equipamentos presentes no ambiente. A ferramenta utiliza esse valor para calcular automaticamente a carga térmica proveniente dos equipamentos elétricos, incorporando essa parcela ao somatório da carga térmica sensível do ambiente.

Após o cálculo individual das cargas provenientes da ocupação, da iluminação e dos equipamentos, os resultados são automaticamente consolidados na aba de resultados da planilha. Essa separação permite visualizar a contribuição de cada fonte de calor para a carga térmica total, facilitando a análise dos diferentes cenários de utilização do ambiente.

7.3 CARGA TÉRMICA POR VENTILAÇÃO

A carga térmica por ventilação corresponde ao ganho de calor decorrente da introdução de ar externo no ambiente climatizado. A renovação do ar é necessária para manter a qualidade do ar interior e atender às condições mínimas de conforto estabelecidas pela ABNT NBR 16401. Entretanto, como o ar externo normalmente apresenta temperatura e umidade diferentes das condições internas de projeto, sua introdução gera parcelas de carga térmica sensível e latente que devem ser consideradas no dimensionamento do sistema de climatização.

7.3.1 CARGA TÉRMICA SENSÍVEL DE VENTILAÇÃO

A parcela sensível da carga térmica de ventilação representa o calor associado à diferença de temperatura entre o ar externo admitido e o ar interno do ambiente. Quanto maior a vazão de renovação e maior a diferença de temperatura, maior será a carga térmica sensível introduzida no ambiente.

A expressão utilizada para o cálculo da carga térmica sensível associada à ventilação é apresentada na Equação (6).

$$Q_{vs} = 1,20 \cdot V \cdot \Delta T \quad \text{EQ. (6)}$$

Sendo:

Q_{vs} = Representa a carga térmica sensível de ventilação (W);

1,20 = Corresponde à constante associada às propriedades do ar;

V = Representa a vazão de ar externo (L/s);

ΔT = Representa a diferença de temperatura entre o ar externo e interno (°C).

Na planilha desenvolvida, a vazão de ar exterior é calculada automaticamente a partir do número de ocupantes e da taxa de renovação de ar por pessoa estabelecida pela ABNT NBR 16401. Em seguida, utilizando as temperaturas interna e externa informadas pelo usuário, a carga térmica sensível é determinada automaticamente por meio da Equação (6).

7.3.2 CARGA TÉRMICA LATENTE DE VENTILAÇÃO

A carga térmica latente está relacionada à diferença entre a quantidade de vapor d'água presente no ar externo e no ar interno. Quando o ar externo possui maior umidade específica, sua introdução aumenta a quantidade de vapor d'água no ambiente, exigindo maior capacidade do sistema de climatização para promover a desumidificação do ar.

A expressão utilizada para o cálculo da carga térmica latente associada à ventilação é apresentada na Equação (7).

$$Q_{vl} = 3010 \cdot \dot{V} \cdot \Delta W \quad \text{EQ. (7)}$$

Sendo:

Q_{vl} Representa a carga térmica latente de ventilação (W);

3010 Corresponde à constante associada ao transporte de vapor d'água no ar;

$\dot{V}$ Representa a vazão de ar externo (L/s);

ΔW Representa a diferença de umidade específica entre o ar externo e interno (kg/kg).

No modelo desenvolvido, a vazão de renovação de ar é obtida automaticamente a partir do número de ocupantes e da taxa mínima de renovação recomendada pela ABNT NBR 16401. As temperaturas interna e externa são informadas pelo usuário, enquanto os valores de umidade específica são definidos conforme as condições de projeto adotadas para o estudo. Com esses parâmetros, a planilha calcula automaticamente as parcelas sensível e latente da ventilação, que posteriormente são incorporadas ao cálculo da carga térmica total.

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a aplicação da ferramenta desenvolvida para o cálculo da carga térmica de ambientes climatizados. Inicialmente são apresentados os resultados referentes ao estudo de caso adotado, seguido da análise das parcelas que compõem a carga térmica total do ambiente. Por fim, realiza-se a validação dos resultados por meio da comparação com uma ferramenta independente fundamentada em referências normativas compatíveis com as adotadas neste trabalho.

8.1 ESTUDO DE CASO

Para avaliar o funcionamento da ferramenta desenvolvida, foi considerado um ambiente administrativo com características representativas de pequenos escritórios. Os parâmetros adotados correspondem às condições internas e externas definidas na metodologia, permitindo verificar o comportamento da ferramenta diante de um cenário típico de climatização.

A Figura 15 apresenta os resultados obtidos para o ambiente analisado. Observa-se que a ferramenta consolida automaticamente todas as parcelas da carga térmica, fornecendo ao usuário a capacidade recomendada do sistema de climatização em diferentes unidades de engenharia (kW, TR e BTU/h).

Figura 15 - Consolidação recomendada das parcelas de carga térmica para o Escritório 1.

Carga por Transmissão (W)	Carga por Pessoas Sensível (W)	Carga por Pessoas Latente (W)	Carga por Iluminação (W)	Carga por Equipamentos (W)	Carga por Ventilação - Sensível (W)	Carga por Ventilação - Latente (W)	Carga Sensível Total (W)	Carga Latente Total (W)	Carga Térmica Total (W)	Capacidade Recomendada do Sistema (kW)	Capacidade Recomendada do Sistema (TR)
1120	300	220	240	1200	288	810	3148	1030	4178	4,178	1,19

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

8.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A carga térmica por transmissão representou uma parcela significativa da carga sensível do ambiente, resultado esperado em função da presença de uma parede externa submetida à insolação direta e da diferença entre as temperaturas interna e externa adotadas no estudo. O aumento da temperatura externa de projeto

refletiu diretamente no crescimento dessa parcela, evidenciando a influência das condições climáticas sobre o dimensionamento do sistema de climatização.

A contribuição dos ocupantes apresentou comportamento compatível com o esperado para ambientes administrativos. Como o número de ocupantes permaneceu constante durante o estudo de caso, as parcelas sensível e latente mantiveram valores proporcionais aos parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 16401, demonstrando o correto funcionamento da implementação realizada.

A carga proveniente da iluminação apresentou menor participação na carga térmica total quando comparada às demais parcelas sensíveis. Esse comportamento está associado à utilização de iluminação em LED, cuja potência instalada é relativamente reduzida quando comparada aos equipamentos elétricos presentes no ambiente.

A carga térmica decorrente da renovação do ar apresentou contribuições tanto na parcela sensível quanto na parcela latente. Embora a carga sensível tenha sido relativamente reduzida, a carga latente apresentou maior representatividade em função da diferença entre as umidades específicas do ar externo e do ar interno adotadas nas condições de projeto.

A consolidação das parcelas demonstrou que a ferramenta realiza automaticamente o somatório das cargas sensíveis e latentes, fornecendo a carga térmica total necessária para o dimensionamento do sistema de climatização. A conversão automática para kW, TR e BTU/h facilita a utilização dos resultados em diferentes aplicações práticas.

As expressões utilizadas para conversão da carga térmica total para BTU/h e toneladas de refrigeração (TR) são apresentadas nas Equações (8) e (9), respectivamente.

$$BTU/h = W \cdot 3,412 \quad EQ.(8)$$

Sendo:

BTU/h = Representa a capacidade térmica em British Thermal Units por hora;

W = Representa a carga térmica total calculada em watts.

3,412 = Corresponde ao fator de conversão entre watts e BTU/h.

$$TR = \frac{W}{3517} \quad \text{EQ. (9)}$$

Sendo:

TR = Representa a capacidade térmica em toneladas de refrigeração;

W = Representa a carga térmica total calculada em watts;

3517 = Corresponde ao fator de conversão entre watts e toneladas de refrigeração.

8.3 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Com o objetivo de avaliar a consistência dos resultados obtidos pela ferramenta desenvolvida, realizou-se uma comparação com a planilha simplificada de cálculo de carga térmica disponibilizada pelo Programa de Bom Uso Energético (PROBEN) da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). A ferramenta utilizada adota como referência a ABNT NBR 16401 e permite estimar a carga térmica de ambientes climatizados considerando as principais parcelas de ganho de calor.

Para a comparação, foram utilizados os mesmos parâmetros de entrada empregados no estudo de caso, incluindo dimensões do ambiente, temperaturas interna e externa, ocupação, iluminação, equipamentos e renovação de ar. A parcela de radiação solar disponibilizada pela planilha PROBEN/UFPel foi mantida igual a zero durante a comparação, uma vez que a ferramenta desenvolvida não apresenta essa contribuição como parcela independente no resultado consolidado. Dessa forma, foram comparadas apenas as parcelas equivalentes entre as duas implementações. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos pela ferramenta desenvolvida e pela planilha de referência.

Tabela 4 - Comparação entre os resultados da ferramenta desenvolvida e da planilha PROBEN (UFPel)

Parcela da carga térmica	Ferramenta desenvolvida (W)	Planilha PROBEN/UFPel (W)	Diferença (W)	Diferença (%)
<i>Transmissão/ Condução</i>	1.120,00	781,54	+338,46	+43,31
<i>Pessoas</i>	520,00	560,00	-40,00	-7,14
<i>Iluminação</i>	240,00	240,00	0,00	0,00
<i>Equipamentos</i>	1.200,00	1.200,00	0,00	0,00
<i>Ventilação / Infiltração</i>	1.098,00	1.098,00	0,00	0,00
Carga térmica total	4.178,00	3.879,54	+298,46	+7,69

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Nota: A diferença percentual foi calculada tomando-se os resultados da planilha PROBEN/UFPel como referência.

8.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DOS RESULTADOS

A comparação entre os resultados obtidos pela ferramenta desenvolvida e pela planilha simplificada disponibilizada pelo Programa de Bom Uso Energético (PROBEN) demonstrou boa concordância entre as duas metodologias. A ferramenta desenvolvida apresentou carga térmica total de 4.178,00 W, enquanto a planilha de referência resultou em 3.879,54 W, correspondendo a uma diferença aproximada de 7,69%.

Observou-se concordância integral nas parcelas referentes à iluminação, equipamentos e renovação de ar, evidenciando a correta implementação dessas rotinas de cálculo na ferramenta desenvolvida. As diferenças identificadas concentraram-se principalmente nas parcelas de transmissão térmica e ocupação, decorrentes dos diferentes critérios adotados pelas metodologias para caracterização dos fechamentos construtivos e dos ganhos térmicos por pessoa.

Mesmo com essas diferenças metodológicas, ambas as ferramentas produziram resultados da mesma ordem de grandeza, indicando que a ferramenta desenvolvida apresenta comportamento consistente quando comparada a uma planilha acadêmica fundamentada na ABNT NBR 16401. Dessa forma, considera-se que os resultados obtidos atendem ao objetivo de fornecer estimativas confiáveis para o dimensionamento preliminar da carga térmica de ambientes climatizados.

consolidadas. Dessa forma, estudos comparativos mais aprofundados constituem possibilidade de continuidade e aprimoramento do trabalho.

Ainda assim, os resultados obtidos indicam que a metodologia adotada apresenta potencial como ferramenta de apoio ao cálculo de carga térmica em etapas iniciais de projeto, especialmente em contextos acadêmicos e aplicações de dimensionamento preliminar de sistemas de ar-condicionado.

9. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional, utilizando Microsoft Excel® e VBA (Visual Basic for Applications), para auxiliar no cálculo da carga térmica de ambientes climatizados, com base nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 16401. A proposta buscou reunir, em uma única aplicação, uma interface intuitiva para inserção de dados, automatização dos cálculos, consolidação dos resultados e geração de relatórios técnicos, reduzindo o tempo necessário para a realização dos cálculos e minimizando erros decorrentes de procedimentos manuais.

Os resultados obtidos demonstraram que a ferramenta desenvolvida foi capaz de calcular de forma consistente as parcelas de carga térmica associadas à transmissão de calor pelos fechamentos, ocupação, iluminação, equipamentos e renovação de ar, apresentando resultados coerentes para o estudo de caso adotado. A comparação realizada com uma ferramenta acadêmica independente fundamentada na ABNT NBR 16401 evidenciou boa concordância entre os resultados, reforçando a confiabilidade da metodologia implementada.

Além da automatização dos cálculos, a ferramenta oferece recursos que contribuem para sua aplicação prática, como formulários para entrada de dados, validação das informações fornecidas pelo usuário, organização automática dos parâmetros do ambiente e geração de relatórios técnicos em formato PDF. Essas funcionalidades tornam o processo de cálculo mais ágil, padronizado e acessível, especialmente em estudos preliminares de dimensionamento de sistemas de climatização.

Embora a ferramenta tenha atendido aos objetivos propostos, algumas limitações devem ser consideradas. O estudo foi desenvolvido para ambientes administrativos e emprega simplificações compatíveis com o escopo estabelecido, não contemplando análises mais complexas relacionadas ao comportamento térmico dinâmico das edificações e às variações das condições climáticas ao longo do tempo.

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se ampliar a ferramenta para outras tipologias de ambientes, integrar bases de dados climáticos, implementar novos métodos de cálculo previstos em normas técnicas e incorporar funcionalidades como a importação de informações provenientes de projetos em

formato BIM e a geração de relatórios mais personalizados. Também poderão ser implementados recursos adicionais de tratamento e validação dos dados de entrada, permitindo maior consistência das informações fornecidas pelo usuário, bem como a redução de erros de preenchimento e maior confiabilidade dos resultados obtidos.

Dessa forma, conclui-se que a ferramenta desenvolvida atingiu os objetivos estabelecidos neste trabalho, constituindo uma alternativa prática, confiável e de fácil utilização para o cálculo preliminar da carga térmica de ambientes climatizados. Além de automatizar o processo de dimensionamento, a ferramenta contribui para maior produtividade, padronização dos cálculos e redução da possibilidade de erros operacionais, demonstrando o potencial da utilização de ferramentas computacionais como apoio às atividades de engenharia.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15220: **Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

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, 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, 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, 2008.

ASHRAE. **ASHRAE Handbook — Fundamentals**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017.

CARRIER. **Manual de ar-condicionado**. São Paulo: McGraw-Hill, 2001.

CREDER, Hélio. **Instalações de ar-condicionado**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

ISO. **ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices**. Geneva, 2005.

MCQUISTON, F. C.; PARKER, J. D.; SPITLER, J. D. **Heating, Ventilating, and Air Conditioning: Analysis and Design**. New York: Wiley, 2005.

MICROSOFT. **Microsoft Excel – documentação oficial**. Microsoft Corporation, 2024. Disponível em: <https://learn.microsoft.com>. Acesso em: 2026.

WALKENBACH, John. **Excel VBA Programming for Dummies**. Hoboken: Wiley, 2015.

ENGINEERING PRO GUIDES. **Heating/Cooling Loads for the Mechanical HVAC & Refrigeration PE Exam**. [S. l.], [s. d.]. Acesso em: 18 jul. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS (UFPeI). Programa de Bom Uso Energético (PROBEN). **Planilha simplificada para cálculo de carga térmica**. Pelotas: UFPeI, [s. d.]. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/proben/planilha-de-carga-termica/>. Acesso em: 25 jul. 2026

SONNTAG, Richard E.; BORGNACKE, Claus; VAN WYLEN, Gordon J. **Fundamentos da Termodinâmica**. 7. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

APÊNDICE A - DISPONIBILIZAÇÃO DA PLANILHA DESENVOLVIDA

A ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho, implementada em Microsoft Excel® com VBA (Visual Basic for Applications), é apresentada neste apêndice. O material reúne as planilhas de cálculo, formulários para entrada de dados, rotinas de processamento e geração automática de relatórios, constituindo o principal produto desenvolvido ao longo desta pesquisa.

Em conformidade com as diretrizes institucionais do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), a ferramenta acompanhará este Trabalho de Conclusão de Curso no repositório institucional da instituição, permitindo sua consulta, utilização e reprodução por estudantes, pesquisadores e profissionais interessados no cálculo preliminar da carga térmica de ambientes climatizados.

A disponibilização da ferramenta tem como finalidade ampliar o acesso ao conhecimento produzido neste trabalho, favorecer sua utilização em atividades acadêmicas e profissionais e possibilitar futuras adaptações, aperfeiçoamentos e aplicações em diferentes contextos da engenharia.