

**Estudo do desempenho térmico e energético de diferentes sistemas
construtivos através da tecnologia BIM**

**Assessment of the thermal and energy performance of different construction
systems using BIM technology**

**Evaluación del desempeño térmico y energético de diferentes sistemas
constructivos utilizando la tecnología BIM**

Matheus Luca Dietrich de Oliveira

Bacharel em Engenharia Civil

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - campus
Governador Valadares

Endereço: Belo Horizonte – Minas Gerais, Brasil

E-mail: matheusdietrich1@gmail.com

Caio de Oliveira Vitor Aquino

Bacharel em Engenharia Civil

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - campus
Governador Valadares

Endereço: Belo Horizonte – Minas Gerais, Brasil

E-mail: caioaquino35@gmail.com

Jonathan Charles Lucas Martins Almeida Siqueira

Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho

Instituição: Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG)

Endereço: Governador Valadares – Minas Gerais, Brasil

E-mail: jonathan.siqueira@ifmg.edu.br

Carolynne Amélia Assis Ávila

Mestra em Educação

Instituição: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Endereço: Governador Valadares – Minas Gerais, Brasil

E-mail: carolyne.avila@ifmg.edu.br

RESUMO

A busca pela eficiência energética na construção civil tornou-se essencial diante das exigências de sustentabilidade e das particularidades climáticas brasileiras. Este estudo tem como objetivo analisar o desempenho térmico e energético de uma edificação residencial unifamiliar de padrão normal localizada em Governador Valadares, MG, utilizando a tecnologia Building Information Modeling. A pesquisa comparou três sistemas construtivos distintos: alvenaria de vedação convencional com estrutura de concreto armado, alvenaria estrutural cerâmica e Light Steel Framing (com e sem isolamento térmico). A metodologia baseou-se na modelagem geométrica tridimensional no software Trimble SketchUp e na realização de simulações termoenergéticas no software EnergyPlus, por meio da extensão OpenStudio. O foco foi quantificar a Carga Térmica

Ideal de aquecimento e resfriamento, avaliando o comportamento passivo da envoltória sem a adoção de sistemas ativos de climatização. Os resultados demonstraram que o sistema de alvenaria convencional obteve a melhor eficiência global, registrando as menores cargas térmicas anuais devido à sua elevada inércia térmica, seguido de perto pela alvenaria estrutural. Em contrapartida, o Light Steel Framing sem isolamento térmico revelou-se ineficiente, elevando a demanda de resfriamento em 32,3% no verão. A inserção de manta térmica no Steel Frame mitigou o ganho de calor no verão, porém sua baixa massa térmica resultou em uma demanda de aquecimento quase três vezes maior nas madrugadas frias de inverno. Conclui-se que a inércia térmica é um fator decisivo para o conforto passivo na região estudada, reafirmando a importância do uso de simulações computacionais nas fases iniciais de projeto.

Palavras-chave: eficiência energética, desempenho térmico, sistemas construtivos, BIM, simulação computacional.

ABSTRACT

The pursuit of energy efficiency in the construction industry has become essential in light of sustainability requirements and the particular climatic conditions of Brazil. This study aims to analyze the thermal and energy performance of a standard single-family residential building located in Governador Valadares, Minas Gerais, using Building Information Modeling (BIM) technology. The research compared three distinct construction systems: conventional masonry with reinforced concrete structure, structural ceramic masonry, and Light Steel Framing (with and without thermal insulation). The methodology was based on three-dimensional geometric modeling using Trimble SketchUp software and thermo-energy simulations performed in EnergyPlus through the OpenStudio extension. The focus was to quantify the Ideal Heating and Cooling Thermal Loads, evaluating the passive behavior of the building envelope without the use of active air-conditioning systems. The results demonstrated that the conventional masonry system achieved the best overall efficiency, presenting the lowest annual thermal loads due to its high thermal inertia, followed closely by structural masonry. In contrast, Light Steel Framing without thermal insulation proved to be inefficient, increasing cooling demand by 32.3% during the summer. The incorporation of thermal insulation in the Steel Frame system reduced heat gain during the summer; however, its low thermal mass resulted in a heating demand nearly three times higher during cold winter early mornings. It is concluded that thermal inertia is a decisive factor for passive comfort in the studied region, reinforcing the importance of computational simulations during the early stages of building design.

Keywords: energy efficiency, thermal performance, construction systems, BIM, computational simulation.

RESUMEN

La búsqueda de la eficiencia energética en la construcción civil se ha convertido en una necesidad ante las exigencias de sostenibilidad y las particularidades climáticas de Brasil. Este estudio tiene como objetivo analizar el desempeño térmico y energético de una vivienda unifamiliar de estándar medio ubicada en Governador Valadares, Minas Gerais, mediante el uso de la tecnología Building Information Modeling (BIM). La investigación comparó tres sistemas constructivos diferentes: mampostería convencional de cerramiento con estructura de hormigón armado, mampostería estructural cerámica y Light Steel Framing (con y sin aislamiento térmico). La metodología se basó en la modelación geométrica tridimensional mediante el software Trimble

SketchUp y en la realización de simulaciones termoenergéticas en el software EnergyPlus a través de la extensión OpenStudio. El enfoque consistió en cuantificar las Cargas Térmicas Ideales de calefacción y refrigeración, evaluando el comportamiento pasivo de la envolvente del edificio sin la utilización de sistemas activos de climatización. Los resultados demostraron que el sistema de mampostería convencional obtuvo la mejor eficiencia global, registrando las menores cargas térmicas anuales debido a su elevada inercia térmica, seguido de cerca por la mampostería estructural. Por el contrario, el sistema Light Steel Framing sin aislamiento térmico resultó ineficiente, aumentando la demanda de refrigeración en un 32,3 % durante el verano. La incorporación de aislamiento térmico en el sistema Steel Frame mitigó la ganancia de calor en verano; sin embargo, su baja masa térmica generó una demanda de calefacción casi tres veces mayor durante las frías madrugadas de invierno. Se concluye que la inercia térmica es un factor decisivo para el confort pasivo en la región estudiada, reafirmando la importancia del uso de simulaciones computacionales en las etapas iniciales del diseño de edificaciones.

Palabras clave: eficiencia energética, desempeño térmico, sistemas constructivos, BIM, simulación computacional.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil desempenha um papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico, o que exige escolhas criteriosas de sistemas construtivos que garantam a racionalização técnica e econômica das edificações (Yazigi, 2009). Além da viabilidade financeira, o setor contemporâneo precisa atender a parâmetros mínimos de desempenho e sustentabilidade, com especial atenção à eficiência energética (ABNT, 2021; Lima; Pertel, 2024). Essa exigência demanda avaliações técnicas rigorosas ainda na fase de concepção, avaliando o impacto que diferentes materiais exercem sobre o comportamento térmico da envoltória.

Para impulsionar esse desempenho, o aprimoramento de ferramentas digitais tem sido essencial. O uso da tecnologia Building Information Modeling (BIM) destaca-se ao permitir a modelagem e a simulação integrada de variáveis ambientais, como temperatura, iluminação e ventilação, antes da execução da obra (Costa, 2023). Contudo, diante das particularidades climáticas brasileiras e da crescente demanda por eficiência, o conhecimento comparativo sobre o comportamento energético real de diferentes métodos construtivos residenciais avaliados por ferramentas BIM ainda se mostra limitado na literatura técnica (Alves *et al.*, 2026; Jin; Jeong, 2019).

Essa lacuna torna-se ainda mais crítica em regiões de forte expansão urbana e clima severo, como o município de Governador Valadares, MG. Caracterizada por um crescimento

demográfico constante (Brasil, 2022) e inserida em uma zona de clima quente com temperaturas máximas que frequentemente atingem os 37°C (INMET, 2025), a cidade apresenta uma alta demanda por climatização artificial. Esse cenário térmico intensifica a necessidade de estratégias que minimizem o ganho de calor na envoltória, tornando a escolha do sistema construtivo uma decisão de forte impacto operacional, econômico e ambiental.

Diante disso, este estudo teve como objetivo central analisar, por meio da tecnologia BIM, a eficiência energética de uma edificação residencial de padrão normal em Governador Valadares, MG, simulando três sistemas construtivos distintos: alvenaria estrutural cerâmica; alvenaria de vedação de blocos cerâmicos com estrutura em concreto armado; e sistema estrutural em steel frame com fechamento em drywall. A pesquisa buscou gerar evidências técnicas para subsidiar a tomada de decisão no mercado habitacional regional, onde a incorporação de novas tecnologias depende da demonstração de seu desempenho prático face às demandas climáticas locais (Silva, 2023).

Para o alcance desse objetivo, as etapas metodológicas envolveram a construção de modelos tridimensionais detalhados da edificação no software Trimble SketchUp, contemplando os três cenários construtivos avaliados. Como o SketchUp atua na modelagem geométrica e não como uma plataforma BIM nativa, sua integração a um fluxo de trabalho orientado por essa tecnologia foi realizada por meio da extensão OpenStudio. Em seguida, procedeu-se com a definição dos parâmetros físicos e térmicos dos materiais para inserção no software de simulação EnergyPlus, permitindo analisar o comportamento energético da edificação frente às variações do clima local e propriedades da envoltória. A partir dessas simulações, realizou-se a comparação dos resultados quanto às cargas térmicas e ao conforto térmico, culminando na formulação de recomendações técnicas para apoiar o processo decisório em projetos residenciais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A CRISE ENERGÉTICA E A NECESSIDADE DE EFICIÊNCIA

A eficiência energética em edificações está diretamente relacionada à capacidade da construção de oferecer conforto térmico, funcionalidade e condições adequadas de habitabilidade com o menor consumo possível de energia elétrica. Segundo Pereira e Assis (2010), o

desempenho energético de uma edificação depende essencialmente de fatores como características da envoltória, propriedades térmicas dos materiais, estratégias de ventilação e sombreamento, além do comportamento do usuário. Ainda, o desempenho energético resulta da interação desses fatores com o sistema construtivo e o uso racional de equipamentos e sistemas de climatização e iluminação (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). Edificações ineficientes tendem a demandar maior uso de sistemas artificiais de climatização e iluminação, contribuindo para o aumento expressivo da demanda energética nacional, cenário que se agrava diante das crises energéticas recorrentes e da pressão por matrizes mais sustentáveis (EPE, 2023).

No Brasil, essa discussão é fortalecida por regulamentações como o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL Edifica) e o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), instituído pelo INMETRO (2010). Esses documentos estabelecem critérios, métodos e diretrizes para a classificação da eficiência energética de edificações, considerando elementos como envoltória, sistemas de iluminação e condicionamento térmico. A aplicação dessas diretrizes é fundamental para validar resultados obtidos por meio de análises computacionais de desempenho térmico e energético e para orientar intervenções capazes de reduzir o consumo e melhorar o conforto ambiental.

Em países de clima predominantemente tropical, como o Brasil, a busca por eficiência energética deixa de ser uma opção e se torna uma necessidade. De acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005), grande parte do território brasileiro está inserida em zonas bioclimáticas caracterizadas por elevadas temperaturas e forte incidência solar, condições que intensificam o desconforto térmico quando as edificações não são projetadas de forma bioclimática. Nessas situações, a inadequação térmica da envoltória leva ao uso frequente de sistemas artificiais de climatização, como aparelhos de ar-condicionado. A International Energy Agency (IEA, 2018) aponta que o ar-condicionado é um dos equipamentos que mais consomem energia no setor residencial mundial, podendo representar até 50% do consumo elétrico em climas quentes.

Além do impacto no consumo energético, o uso intensivo desses equipamentos pode acarretar danos ambientais adicionais. De acordo com o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2022), muitos sistemas de climatização utilizam fluidos refrigerantes com elevado potencial de aquecimento global (GWP), o que intensifica o impacto ambiental de edificações ineficientes. Assim, enfrentar a crise energética atual exige tanto a adoção de sistemas

construtivos mais eficientes quanto o uso de ferramentas digitais capazes de prever e otimizar o desempenho energético ainda na fase de projeto.

2.2 DESEMPENHO TÉRMICO DA EDIFICAÇÃO

A envoltória da edificação - composta por paredes, coberturas, aberturas e demais elementos que separam o ambiente interno do externo - exerce influência direta no comportamento térmico global da construção. Segundo Goulart, Lamberts e Firmino (1998), esse desempenho depende diretamente das propriedades físicas dos materiais utilizados e da forma como esses elementos interagem com o clima local.

No contexto normativo brasileiro, a NBR 15220:2005 (ABNT, 2005) é a base para a caracterização das propriedades termoenergéticas da envoltória, definindo parâmetros como transmitância térmica (U), resistência térmica (R), capacidade térmica (CT), atraso térmico e fator solar. Além disso, a norma estabelece as zonas bioclimáticas brasileiras e recomenda estratégias de projeto adequadas a cada contexto climático, fornecendo critérios técnicos que permitem avaliar e comparar o comportamento térmico de diferentes sistemas construtivos (ABNT, 2005).

Complementarmente, a NBR 15575:2021 define critérios mínimos, intermediários e superiores de desempenho térmico para edificações habitacionais, considerando temperaturas internas resultantes, cargas térmicas e condições de conforto (ABNT, 2021). Dessa forma, ambas as normas fornecem o arcabouço técnico necessário para estimar a eficiência térmica dos componentes da edificação e orientar soluções construtivas que melhorem o desempenho global.

2.3 SISTEMAS CONSTRUTIVOS E DESEMPENHO ENERGÉTICO

Os sistemas construtivos adotados em uma edificação influenciam de maneira significativa seu desempenho térmico e, consequentemente, sua eficiência energética. Estudos como o de Souza, Pereira e Santos (2017) apontam que cada sistema construtivo apresenta comportamento térmico particular, resultante da variação nas propriedades de condutividade, inércia térmica, resistência térmica e capacidade de absorção de calor. Assim, a forma como os elementos da envoltória são concebidos, espessura, massa, camadas, materiais e acabamentos,

determina o modo como o calor é armazenado, retardado ou transferido para o interior do ambiente.

No caso da alvenaria convencional (Figura 1), composta por blocos cerâmicos assentados com argamassa e associada a uma estrutura independente em concreto armado, a presença de vazados cerâmicos fornece resistência térmica moderada e capacidade térmica significativa. A elevada massa térmica contribui para o amortecimento das oscilações de temperatura ao longo do dia, garantindo melhor desempenho em climas quentes ao retardar a transferência de calor para o interior (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

Figura 1. Sistema construtivo em concreto armado com alvenaria convencional



Fonte: Pauluzzi, 2020

A alvenaria estrutural cerâmica (Figura 2), por sua vez, apresenta comportamento semelhante, porém com blocos geralmente mais espessos e homogêneos, resultando em maior inércia térmica e maior capacidade de atenuar picos de calor. Segundo Barros e Sabbatini (2009), sistemas de alvenaria estrutural tendem a apresentar melhor desempenho passivo em regiões de elevada amplitude térmica, devido à sua maior massa incorporada.

Figura 2. Alvenaria estrutural cerâmica



Fonte: Blocos Arcanjo, 2024

Em contraste, o steel frame (Figura 3) caracteriza-se por uma estrutura leve em perfis metálicos e fechamento em chapas de gesso acartonado (drywall) ou painéis cimentícios. Por ser um sistema de baixa massa térmica, apresenta menor capacidade de armazenamento e retardamento de calor. Seu desempenho térmico depende fortemente da composição das camadas da parede, especialmente do uso de isolantes térmicos como lã mineral ou poliuretano (Silva; Ghisi, 2018). Sem isolamento adequado, sistemas leves tendem a responder rapidamente às variações climáticas externas, aumentando a demanda por climatização artificial.

Figura 3. Sistema construtivo Steel frame com fechamento em drywall



Fonte: KyDrywall, s.d.

Assim, cada sistema construtivo apresenta características próprias que influenciam diretamente o desempenho energético da edificação. A literatura demonstra que a eficiência térmica não depende exclusivamente do tipo de material ou da espessura das vedações, mas do conjunto formado pela massa térmica, pela capacidade de isolamento, pelas estratégias de ventilação e sombreamento e pela adequação às condições bioclimáticas locais (Goulart; Lamberts; Firmino, 1998; Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). Esses fatores determinam a interação entre o ambiente externo e o interno e são fundamentais para orientar a escolha do sistema construtivo mais adequado a cada zona bioclimática, de modo a garantir menor consumo energético e níveis superiores de conforto térmico.

Para assegurar isonomia na análise comparativa, o desempenho energético dos sistemas deve ser avaliado sob as mesmas condições de entorno, como taxa de ventilação natural, incidência solar, orientação da edificação, localização geográfica e condições atmosféricas de referência. Ademais, é necessário padronizar características inerentes ao modelo arquitetônico, incluindo perfil de ocupação, cargas internas, materiais de revestimento, esquadrias, cobertura, forro e demais elementos que afetam a transferência de calor e o comportamento térmico global do edifício. Conforme recomendam as normas NBR 15220 (ABNT, 2005) e RTQ-R (INMETRO, 2010), variáveis que não puderem ser totalmente equalizadas devem ser aproximadas e suas diferenças devidamente registradas, como é o caso das espessuras das paredes, da posição das aberturas e das peculiaridades construtivas específicas de cada sistema. A adoção desse procedimento assegura maior rigor metodológico e confiabilidade nos resultados, conforme enfatizado por Asdrubali *et al.* (2015) em estudos comparativos de desempenho térmico em sistemas construtivos.

A seguir, no quadro 1 encontram-se sintetizadas as principais particularidades relevantes dos três sistemas construtivos mencionados anteriormente.

Quadro 1. Características principais dos sistemas construtivos

Critério de análise	Alvenaria estrutural cerâmica	Concreto armado e alvenaria cerâmica de vedação	Steel frame e drywall
Descrição do sistema	Na alvenaria estrutural, as paredes são responsáveis pela resistência aos esforços verticais e laterais, dispensando a utilização de vigas e pilares convencionais. ^a	No sistema construtivo convencional, vigas, pilares e lajes em concreto armado constituem a estrutura, enquanto as paredes cerâmicas exercem apenas a função de vedação. ^c	Os perfis estruturais de aço formados a frio, empregados em sistemas construtivos leves, são produzidos em aço galvanizado e conformados em chapas delgadas. ^b

Principais materiais	O sistema é composto por blocos estruturais, graute e armaduras, que atuam conjuntamente para a resistência mecânica. ^a	O concreto armado utiliza aço como reforço e elementos cerâmicos como vedação, compondo o sistema estrutural mais empregado no país. ^c	A estrutura é formada por perfis galvanizados do tipo montante e guia, dimensionados conforme a demanda estrutural. ^b
Desempenho térmico	Os blocos cerâmicos possuem elevada capacidade térmica e contribuem para reduzir oscilações de temperatura interna, sobretudo em climas quentes. ^c	O concreto, por possuir elevada inércia térmica, apresenta bom desempenho térmico, especialmente quando associado a paredes cerâmicas. ^c	Sistemas de vedação leves exigem camadas adicionais de isolamento térmico para atingir conforto térmico adequado. ^d
Desempenho acústico	Elementos de vedação com maior massa superficial apresentam melhor desempenho na atenuação de ruídos aéreos. ^d	O desempenho acústico das paredes de vedação cerâmica varia conforme sua espessura, densidade e tipo de bloco utilizado. ^d	A combinação de placas drywall com lã mineral aumenta significativamente o índice de redução sonora, proporcionando excelente isolamento acústico. ^e
^a De acordo com Pareskian; Drysdale; Hamid, 2013. ^b De acordo com ABNT, 2014. ^c De acordo com Lamberts; Dutra; Pereira, 2014. ^d De acordo com ABNT, 2005. ^e De acordo com Knauf, 2015.			

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA

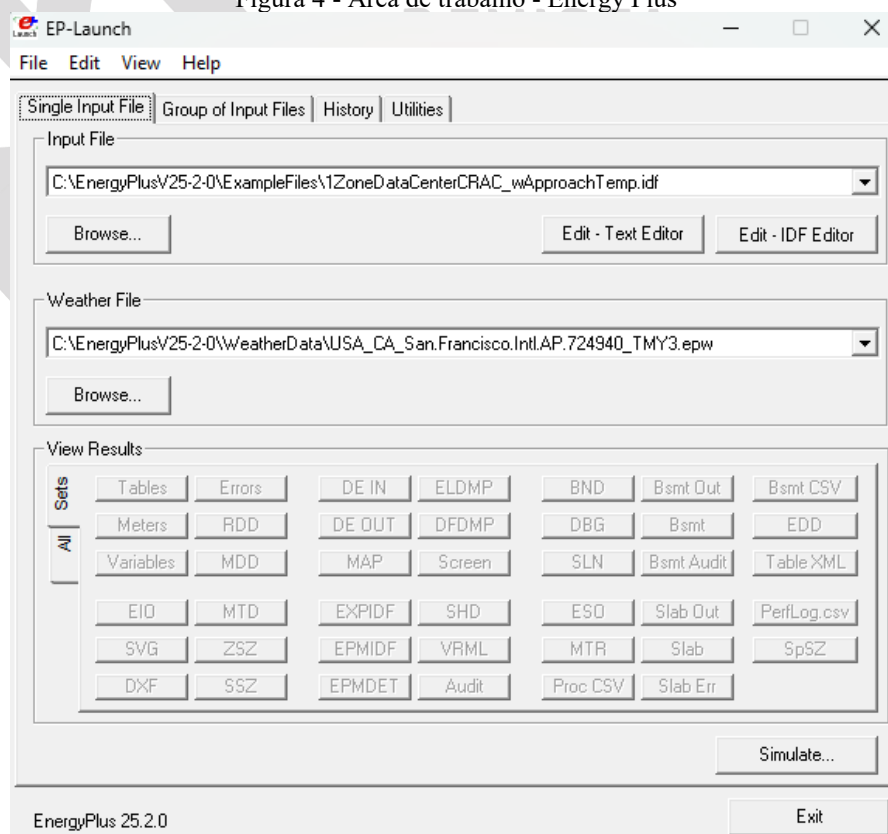
A simulação computacional tem se consolidado como uma das principais ferramentas para a avaliação do desempenho energético em edificações, permitindo prever, ainda na fase de projeto, o comportamento térmico, lumínico e energético de diferentes sistemas construtivos. Ao reproduzir condições reais de clima, uso e ocupação, esses softwares possibilitam estimar cargas térmicas, variação de temperatura interna, consumo de energia e a eficácia de estratégias passivas e ativas de climatização. Segundo Crawley *et al.* (2001), as simulações energéticas ampliam a precisão do processo de tomada de decisão ao fornecer dados que seriam inviáveis de obter apenas por métodos experimentais ou modelos simplificados.

Nesse contexto, a integração com a metodologia BIM potencializa ainda mais as análises, ao permitir interoperabilidade entre modelos, automatização de parâmetros e redução de erros de modelagem. A vinculação entre modelagem paramétrica e simulação energética viabiliza a transferência precisa de informações geométricas e construtivas, garantindo maior fidelidade aos cenários avaliados. Essa interoperabilidade assegura consistência na definição de propriedades da envoltória, materiais, cargas internas e condições operacionais, aprimorando a confiabilidade

dos resultados obtidos. Assim, a simulação computacional se torna essencial para avaliar o desempenho energético dos sistemas construtivos estudados e fundamentar escolhas projetuais alinhadas às exigências contemporâneas de eficiência e sustentabilidade (BAZJANAC, 2008).

É nesse cenário que se destaca o EnergyPlus, desenvolvido pelo U.S. Department of Energy e amplamente reconhecido por sua robustez na modelagem termoenergética (Crawley *et al.*, 2001). O software (cuja área de trabalho está ilustrada na Figura 4) permite simular, com elevado nível de detalhamento, a interação entre a envoltória da edificação, as propriedades térmicas dos materiais e as cargas internas, possibilitando análises comparativas precisas de consumo energético, conforto térmico e eficiência construtiva. Sua ampla aceitação na comunidade científica o torna uma ferramenta adequada para estudos que buscam quantificar o impacto de diferentes sistemas construtivos sobre o comportamento térmico e o consumo de energia em edificações residenciais.

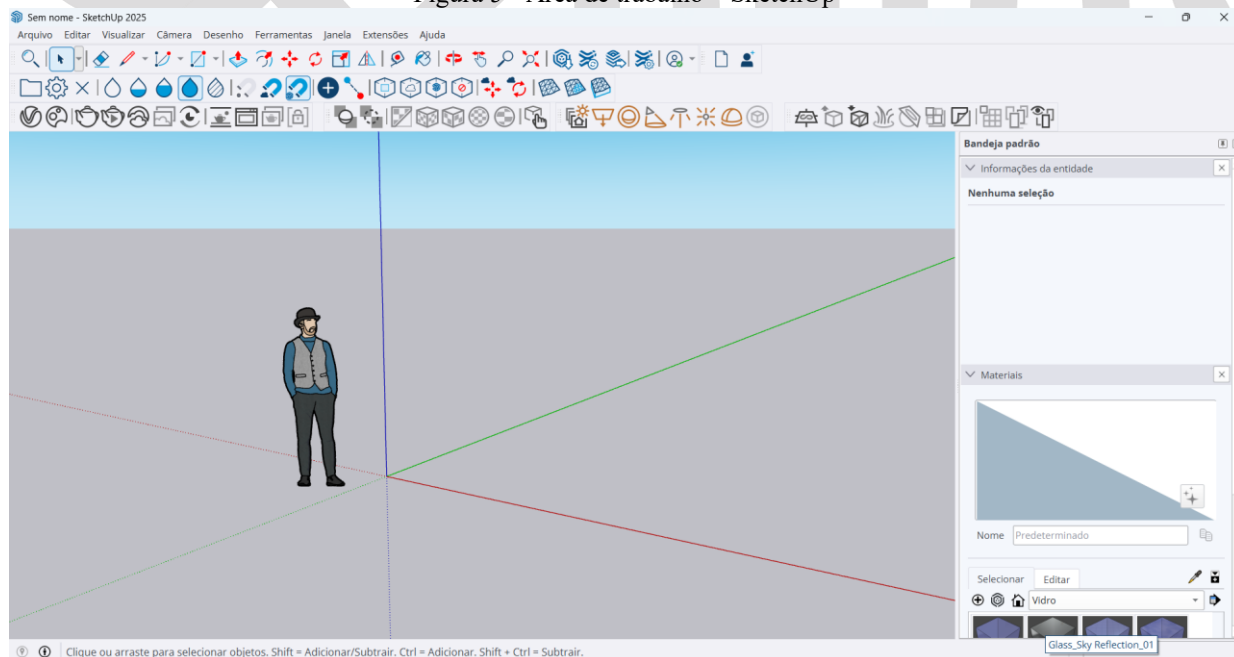
Figura 4 - Área de trabalho - Energy Plus



Fonte: Próprios autores, 2025

Já o Trimble SketchUp, amplamente utilizado em projetos de Engenharia Civil e Arquitetura, destaca-se como uma ferramenta de modelagem geométrica intuitiva que pode ser integrada ao fluxo BIM por meio de extensões e *plugins* especializados. Embora não seja uma plataforma BIM completa, o software permite representar com precisão a geometria, os materiais e os sistemas da edificação, possibilitando a criação de modelos detalhados e compatíveis com ferramentas de simulação energética. Segundo Ellingwood e Shahnewaz (2018), a utilização de modelos simplificados em SketchUp, quando corretamente parametrizados, produz resultados compatíveis com softwares BIM mais robustos para análises energéticas preliminares. Por meio de extensões como o OpenStudio (NREL, 2020) e o Legacy Plug-in para EnergyPlus (Crawley *et al.*, 2008), o SketchUp viabiliza a definição de zonas térmicas, propriedades construtivas e exportação de modelos para avaliação de desempenho. Assim, sua flexibilidade e ampla adoção no meio profissional tornam o SketchUp (Figura 5) um recurso estratégico para estudos comparativos de eficiência energética, especialmente nas etapas iniciais de projeto, quando ajustes morfológicos e construtivos têm maior impacto sobre o consumo energético final da edificação.

Figura 5 - Área de trabalho – SketchUp



Fonte: Próprios autores, 2025

Ambos os softwares apresentam acesso facilitado para estudantes e pesquisadores. O Trimble SketchUp disponibiliza licenças acadêmicas com acesso integral às funcionalidades, permitindo modelagem geométrica detalhada e compatível com *workflows* BIM. O EnergyPlus, por sua vez, é uma plataforma gratuita e de código aberto, amplamente utilizada na comunidade científica para simulação termoeenergética de edificações (Crawley *et al.*, 2001). A integração entre SketchUp e EnergyPlus ocorre por meio de plug-ins como o OpenStudio, desenvolvido pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL, 2020), que viabiliza a definição de zonas térmicas, materiais e parâmetros construtivos diretamente no modelo tridimensional. Essa interoperabilidade assegura consistência entre o projeto digital e a análise energética, reduzindo erros de modelagem e aumentando a confiabilidade dos resultados. No contexto deste estudo, a combinação dessas ferramentas permite avaliar de forma precisa o impacto dos diferentes sistemas construtivos sobre o consumo energético da edificação, conforme recomendado em pesquisas recentes sobre simulação integrada em BIM (Jin; Jeong, 2019).

2.5 SUSTENTABILIDADE E CONSTRUÇÃO DE BAIXO CONSUMO

A busca pela eficiência energética está intrinsecamente vinculada aos princípios da construção sustentável, que visam reduzir os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida das edificações. Cole (1998) destaca que o setor da construção civil é responsável por uma parcela expressiva do consumo global de energia e das emissões de gases de efeito estufa, o que reforça a necessidade de adotar soluções construtivas capazes de conciliar desempenho térmico, redução do consumo e menor impacto climático. Nesse sentido, a eficiência energética passa a ser não apenas um requisito de conforto, mas um componente essencial da sustentabilidade ambiental.

Estratégias diversas têm sido implementadas em edificações contemporâneas para alcançar níveis mais elevados de desempenho, abrangendo tanto soluções passivas quanto tecnologias ativas. Entre elas, destacam-se o uso de materiais com elevado isolamento térmico, fachadas ventiladas, orientação solar adequada, ventilação cruzada, dispositivos de sombreamento, sistemas de climatização passiva e integração de painéis fotovoltaicos. Estudos como os de Torcellini *et al.* (2006) e Hernández e Kenny (2010) demonstram que sistemas

passivos bem planejados podem reduzir significativamente a demanda energética, enquanto tecnologias ativas auxiliam no suprimento de energia limpa e na otimização do consumo.

Além disso, certificações ambientais têm desempenhado papel fundamental na consolidação de práticas construtivas sustentáveis. O selo LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), desenvolvido pelo U.S. Green Building Council, estabelece critérios rigorosos relacionados ao desempenho energético, uso racional de água, qualidade do ambiente interno e seleção de materiais de baixo impacto (USGBC, 2019). No contexto brasileiro, sistemas como AQUA-HQE e BREEAM também se destacam por oferecer metodologias estruturadas para avaliação ambiental, promovendo parâmetros que incentivam a melhoria contínua do desempenho das edificações (Vieira; Ghisi, 2016).

Diante disso, a análise comparativa entre diferentes sistemas construtivos revela-se fundamental para identificar alternativas mais eficientes e adequadas ao contexto climático e socioeconômico brasileiro. Compreender como cada sistema, seja de alvenaria convencional, alvenaria estrutural ou *steel frame*, responde às condições ambientais e às demandas de conforto permite a proposição de soluções mais sustentáveis, capazes de reduzir o consumo energético e minimizar os impactos ambientais. Assim, essa abordagem contribui para a disseminação de práticas construtivas responsáveis e para a consolidação de um ambiente construído alinhado aos princípios de sustentabilidade, eficiência e inovação tecnológica.

3 METODOLOGIA

A pesquisa pode ser classificada, quanto à sua natureza, como aplicada, uma vez que busca gerar conhecimento direcionado à solução de um problema concreto: a avaliação da eficiência energética de diferentes sistemas construtivos. Quanto aos objetivos, caracteriza-se como descritiva e comparativa, pois realiza a descrição detalhada do comportamento térmico e energético da edificação e compara o desempenho entre três sistemas construtivos distintos. Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, trata-se de um estudo de simulação computacional, apoiado em tecnologia BIM e análise termoenergética no EnergyPlus, o que também a aproxima de um estudo de caso virtual, por empregar uma edificação específica como referência para análises comparativas. Por fim, quanto à abordagem do problema, a pesquisa é quantitativa, uma vez que utiliza dados numéricos gerados por modelos computacionais, permitindo mensurar o

desempenho energético e apoiar conclusões objetivas baseadas em indicadores e parâmetros normativos.

4 OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo foi uma edificação residencial unifamiliar de padrão normal (R1-N), representativa das tipologias mais comuns no contexto habitacional brasileiro. A planta-base teve as principais características de um projeto-padrão para uma R1-N conforme especificado pela NBR 12721:2021 (Quadro 2), composta de três dormitórios, sendo uma suíte com banheiro, banheiro social, sala, circulação, cozinha, área de serviço com banheiro e varanda.

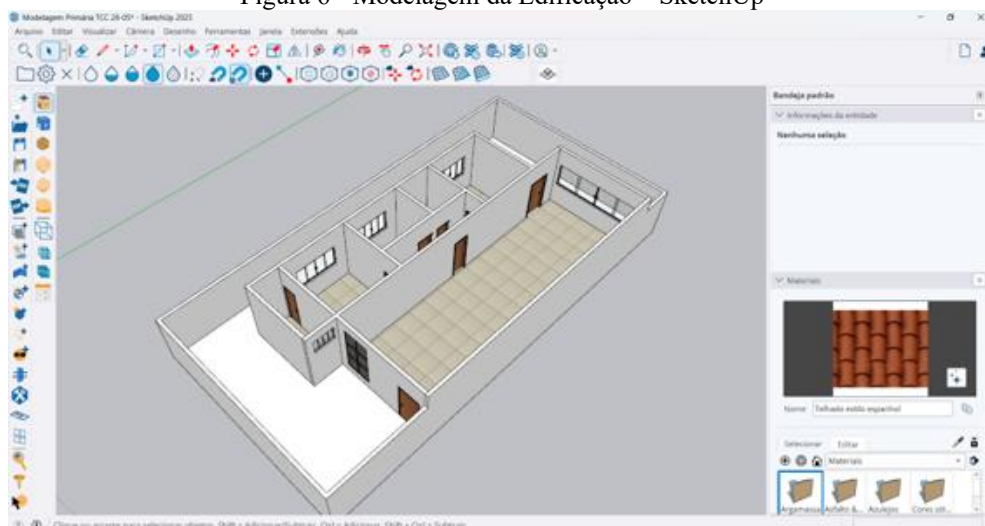
Quadro 2 - Características principais dos projetos-padrão

Residência Unifamiliar		
Residência padrão baixo (R1-B)	Residência padrão normal (R1-N)	Residência padrão alto (R1-A)
Residência composta de dois dormitórios, sala, banheiro, cozinha e área para tanque	Residência composta de três dormitórios, sendo um suíte com banheiro, banheiro social, sala, circulação, cozinha, área de serviço com banheiro e varanda (abrigo para automóvel)	Residência composta de quatro dormitórios, sendo um suíte com banheiro e closet, outro com banheiro, banheiro social, sala de estar, sala de jantar e sala íntima, circulação, cozinha área de serviço completa e varanda (abrigo para automóvel)
Área real: 58,64 m ² Área equivalente: 51,94 m ²	Área real: 106,44 m ² Área equivalente: 99,47 m ²	Área real: 224,82 m ² Área equivalente: 210,44 m ²

Fonte: ABNT 12721, 2021

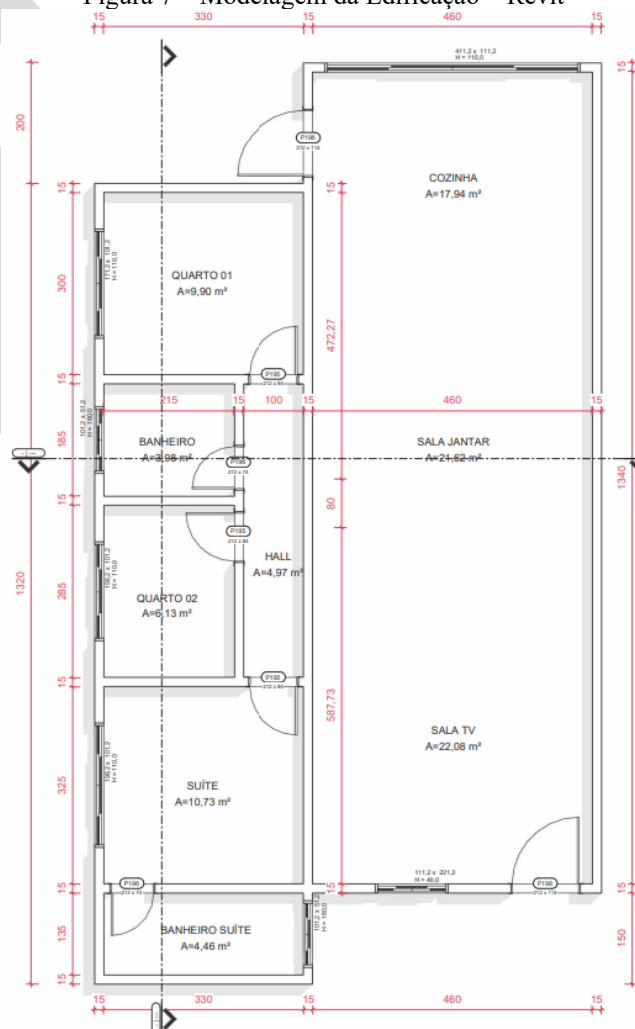
A concepção geométrica tridimensional e a distribuição espacial dos ambientes foram desenvolvidas no software Trimble SketchUp, conforme ilustrado na Figura 6 (vista externa e arranjo dos espaços internos).

Figura 6 - Modelagem da Edificação – SketchUp



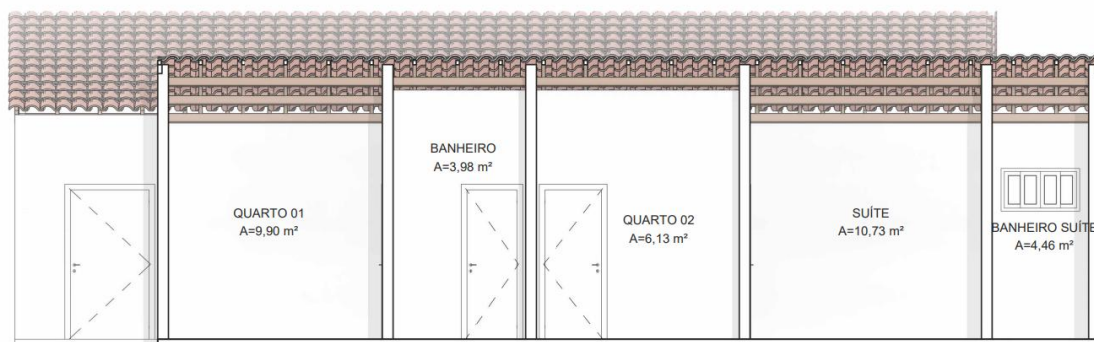
Fonte: Próprios autores, 2026

Figura 7 – Modelagem da Edificação – Revit



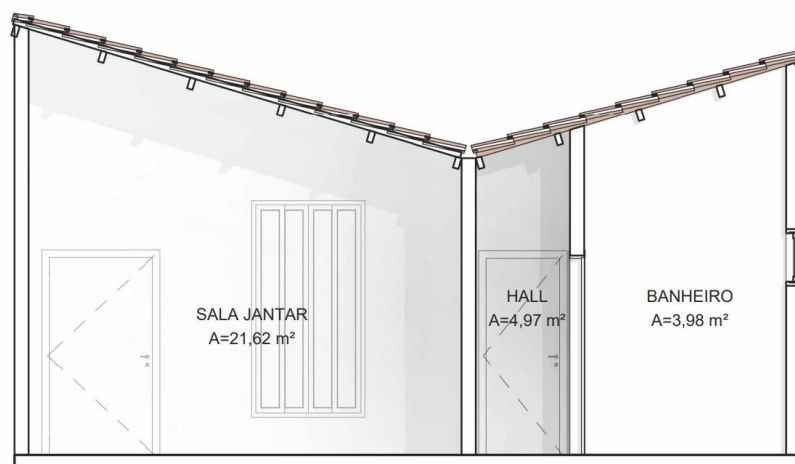
Fonte: Próprios autores, 2026

Figura 8 – Corte longitudinal da Edificação – Revit



Fonte: Próprios autores, 2026

Figura 9 – Corte longitudinal da Edificação – Revit



Fonte: Próprios autores, 2026

5 CONFIGURAÇÃO DOS CENÁRIOS CONSTRUTIVOS

Os três cenários construtivos foram modelados no software SketchUp, respeitando rigorosamente as propriedades físicas e geométricas de seus respectivos materiais. Esse detalhamento visou garantir a máxima fidelidade da envoltória para as simulações termoenergéticas realizadas posteriormente no EnergyPlus. As especificações de cada sistema são detalhadas a seguir.

6 ALVENARIA ESTRUTURAL CERÂMICA

Para o cenário em alvenaria estrutural, a envoltória foi definida por vedações autoportantes responsáveis pela absorção dos esforços verticais e solicitações de vento. A modelagem considerou o emprego de blocos cerâmicos estruturais, mantendo a concepção original do projeto. Para tanto, estruturou-se um arranjo de materiais customizado no software OpenStudio, onde as paredes externas e internas foram compostas pela associação desses blocos estruturais com os respectivos revestimentos de argamassa e gesso.

Devido às particularidades geométricas dos blocos cerâmicos estruturais (presença de vazados verticais), as propriedades termofísicas do material foram cadastradas no sistema utilizando o conceito de paredes equivalentes, tendo como base a Biblioteca de Componentes Construtivos Brasileiros para o uso no programa EnergyPlus (Weber *et al.*, 2017). Dessa forma, os parâmetros exatos de condutividade térmica, densidade e calor específico foram inseridos no software para representar fielmente o comportamento de inércia térmica e fluxo de calor característico deste sistema construtivo.

Para garantir a isonomia estrita entre os modelos computacionais comparados, os parâmetros de piso interno, sistema de cobertura, portas e esquadrias envidraçadas mantiveram-se rigorosamente idênticos às propriedades adotadas no cenário de alvenaria de vedação convencional.

7 CONCRETO ARMADO E ALVENARIA CERÂMICA DE VEDAÇÃO

No cenário composto por estrutura independente de concreto armado e fechamentos verticais em alvenaria convencional, as paredes externas e internas foram configuradas a partir de uma composição multi-camadas, integrando argamassa (reboco), tijolo cerâmico e gesso. Devido à ausência de um componente específico para o tijolo cerâmico vazado na biblioteca nativa do software OpenStudio, as propriedades termofísicas do material foram cadastradas manualmente, tendo como base a Biblioteca de Componentes Construtivos Brasileiros para o uso no programa EnergyPlus (Weber *et al.*, 2017). Adotou-se uma condutividade térmica de $0,72 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, densidade de 1.900 kg/m^3 e calor específico de $840 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$.

O piso interno foi modelado simulando a sobreposição de uma camada de concreto leve para o contrapiso e o revestimento final em porcelanato. Para representar o piso cerâmico, customizou-se um material com condutividade de $1,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, densidade de aproximadamente 2.000 kg/m^3 e calor específico de $800 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$. A cobertura foi definida por um sistema composto por telha, camada de proteção térmica e estrutura de suporte. O comportamento da telha foi caracterizado a partir do índice de alta rugosidade superficial fornecido pelo programa, correspondente ao padrão de coberturas cerâmicas ou de fibrocimento. As esquadrias (janelas e portas) utilizaram os componentes padrão (default) em madeira e vidro simples disponibilizados na biblioteca do OpenStudio, selecionados por sua ampla representatividade técnica nas construções residenciais tradicionais.

8 STEEL FRAME E DRYWALL

O terceiro cenário avaliado correspondeu ao sistema construtivo leve em Light Steel Framing, constituído por perfis estruturais de aço galvanizado formados a frio. Na modelagem das vedações verticais externas e internas, estruturou-se um fechamento composto por placas de gesso acartonado (drywall) fixadas sobre a ossatura metálica, utilizando os elementos nativos do OpenStudio. A envoltória foi configurada seguindo uma composição em camadas que associou placas de gesso ($1/2\text{IN}$ Gypsum), uma camada de ar interna confinada (F04 Wall air) correspondente ao miolo da estrutura e fechamentos em chapa metálica (Metal Decking).

Destaca-se que foram definidos dois cenários para a análise da estrutura: um com a utilização de isolamento térmico e outro sem esse recurso. No primeiro cenário, a composição da parede em drywall foi configurada com os montantes metálicos, uma câmara de ar, uma camada de isolamento térmico disponível na biblioteca nativa do software EnergyPlus e uma placa de gesso para fechamento. Já no segundo cenário, a estrutura foi modelada em sua configuração convencional, sem a inserção de materiais isolantes térmicos adicionais, como lã de rocha ou lã de vidro, na câmara de ar. Essa abordagem teve como objetivo avaliar o comportamento térmico natural do sistema de drywall, permitindo comparar sua resposta às trocas de calor com o ambiente externo na presença e na ausência de isolamento térmico.

9 PARÂMETROS GERAIS DE SIMULAÇÃO

Para a execução das simulações termoeenergéticas no software EnergyPlus, foi necessária a configuração do ambiente climático e dos parâmetros operacionais da edificação. Inicialmente, importou-se o arquivo climático no formato EPW (EnergyPlus Weather Data) correspondente ao município de Governador Valadares, MG, obtido na base de dados oficial do próprio programa. Considerando que o município está inserido na Zona Bioclimática 5 (ZB5) brasileira, realizou-se a correlação com as zonas climáticas da base normativa norte-americana adotada pelo software. Estabeleceu-se a zona ASHRAE 169-2006-3A (clima quente e úmido) como parâmetro de cálculo, por apresentar a maior similaridade termodinâmica com a região de estudo.

Diante de limitações da biblioteca nativa da extensão OpenStudio, que não dispõe de um template pré-configurado específico para residências unifamiliares de padrão médio, adotou-se como base o template de tipologia comercial de Escritório (Office). O referencial de cálculo selecionado foi o ASHRAE 189.1-2009, escolhido por estar estruturado para a avaliação de edificações com considerável nível de eficiência energética.

Para adequar essa adaptação à realidade de uma residência, as nomenclaturas e usos dos espaços internos foram reclassificados na modelagem (como ClosedOffice para simular quartos e salas, Restroom para banheiros e Corridor para áreas de circulação). Além disso, as cargas internas foram corrigidas manualmente, fixando-se uma taxa de ocupação de 4 pessoas na edificação (representando o arranjo familiar de um casal e dois filhos), volume compatível com a tipologia de três quartos do projeto arquitetônico.

Por fim, a modelagem assumiu a premissa de avaliar de forma natural como a eficiência energética atua em função da materialidade de cada método construtivo. Desse modo, optou-se por não inserir o dimensionamento de sistemas ativos de climatização (como aparelhos de ar-condicionado ou ventilação mecânica) no modelo. A variável de saída adotada pelo software para avaliar os diferentes cenários foi a Carga Térmica Ideal de Aquecimento e Resfriamento (medida em Watts). Essa métrica calcula a quantidade exata teórica de energia que o ambiente demandaria para neutralizar o ganho ou a perda de calor através da envoltória, permitindo isolar o comportamento passivo das paredes e mensurar objetivamente qual método construtivo apresenta o melhor isolamento frente ao clima local.

10 RESULTADOS

Todos os parâmetros necessários à modelagem da edificação foram rigorosamente definidos no software de simulação. Destaca-se que não foram incorporados sistemas ativos de climatização, tais como ventiladores ou equipamentos de ar-condicionado. Tal delimitação metodológica visou isolar a envoltória e avaliar exclusivamente o desempenho térmico e a eficiência energética passiva associados à materialidade dos diferentes sistemas construtivos analisados. A variável de saída extraída foi a Carga Térmica Ideal, que quantifica a demanda energética (em Watts) necessária para manter o ambiente interno em condições de conforto térmico.

Para permitir uma comparação direta e objetiva da sazonalidade térmica da edificação ao longo do ano, as diversas saídas mensais de dados fornecidas pelo EnergyPlus foram consolidadas. A Tabela 1 apresenta as demandas de resfriamento (energia necessária para retirar calor da edificação), enquanto a Tabela 2 expõe as demandas de aquecimento (energia necessária para aquecer o ambiente em dias frios) para os três cenários construtivos avaliados.

Tabela 1 - Demanda Mensal de Energia para Resfriamento (Carga Térmica Ideal em W)

Mês	Alvenaria Convencional	Alvenaria Estrutural	Light Steel Framing	Light Steel Framing (C/ Isolamento)
Janeiro	7.820,75	8.406,36	10.795,54	8708.47
Fevereiro	8.946,52	9.314,25	11.586,73	9350.64
Março	9.288,01	9.610,15	12.296,86	9611.46
Abril	7.298,78	7.984,77	10.326,09	8209.47
Maio	5.463,74	5.781,32	8.888,67	7062.04
Junho	4.603,80	4.642,53	8.079,58	6449.48
Julho	4.231,20	4.528,24	8.088,74	6484.15
Agosto	5.909,32	6.435,63	10.027,45	7701.98
Setembro	7.414,08	7.970,05	11.525,79	8788.24
Outubro	7.686,10	8.917,46	11.122,04	8915.94
Novembro	8.516,83	8.691,13	11.307,47	8984.13
Dezembro	8.717,01	8.820,09	10.969,31	9007.77

Fonte: Próprios autores, 2026.

Tabela 2 - Demanda Mensal de Energia para Aquecimento (Carga Térmica Ideal em W)

Mês	Alvenaria Convencional	Alvenaria Estrutural	Light Steel Framing	Light Steel Framing (C/ Isolamento)
Janeiro	0,00	0,00	1.125,34	731.41
Fevereiro	0,00	0,00	1.043,45	691.19
Março	0,00	0,00	952,76	476.91
Abril	85,47	118,17	3.982,57	3071.86
Maio	1.349,42	1.450,30	6.204,73	4576.35
Junho	1.845,15	2.219,51	6.848,21	5243.16
Julho	2.026,13	1.934,36	6.910,55	5246.96
Agosto	1.297,13	1.190,28	7.744,47	5859.27
Setembro	340,23	266,94	4.254,51	3210.14
Outubro	0,00	22,03	1.819,62	1265.98
Novembro	0,00	0,00	1.212,38	836.00
Dezembro	0,00	0,00	1.323,52	979.48

Fonte: Próprios autores, 2026.

Com base na interpretação dos resultados obtidos, verifica-se que o sistema construtivo em Light Steel Framing sem isolamento térmico apresentou o menor desempenho energético de forma isolada, com demandas criticamente superiores em todos os meses. O seu pico de resfriamento em março atingiu 12.296,86 W, representando um aumento de 32,3% na demanda energética em relação à alvenaria convencional. No entanto, a incorporação da manta de isolamento térmico no cenário Light Steel Framing com isolamento revelou-se altamente eficaz para o controle do ganho de calor no verão. A demanda de resfriamento deste sistema otimizado despencou para 9.611,46 W, um valor praticamente idêntico ao exigido pela alvenaria estrutural (9.610,15 W) e apenas 3,4% superior à alvenaria convencional, comprovando que o uso de barreiras térmicas mitiga a desvantagem deste método nos meses mais quentes.

Entretanto, ao analisar os dados de aquecimento na Tabela 2, nota-se o impacto direto do fator "inércia térmica". Apesar da melhora significativa promovida pelo isolante, o Steel Frame com isolamento ainda exigiu um pico de 5.859,27 W para aquecimento em agosto. Esse valor é quase o triplo do exigido pela alvenaria convencional (2.026,13 W) no inverno. Tal comportamento comprova que a baixíssima massa térmica (peso) das paredes em drywall impede o armazenamento de calor durante o dia para ser liberado à noite, resultando em rápido resfriamento dos ambientes internos durante as madrugadas frias, ao contrário dos sistemas pesados em cerâmica.

O sistema em alvenaria estrutural cerâmica manteve um desempenho robusto e intermediário. A sua carga máxima de resfriamento foi de 9.610,15 W, também configurando um aumento muito leve (3,4%) em relação ao modelo convencional. Destaca-se que a utilização de blocos estruturais altera a inércia térmica do sistema, justificando a ligeira elevação na demanda energética tanto para aquecimento quanto para resfriamento.

Por fim, o sistema construtivo em alvenaria convencional de vedação cerâmica demonstrou a melhor eficiência termoenergética global entre os cenários analisados. A combinação da estrutura de concreto armado com os tijolos furados resultou nas menores cargas térmicas anuais, mantendo-se zerada a necessidade de aquecimento durante quase todo o verão e limitando drasticamente os picos de resfriamento. Esses dados quantificam a forte capacidade de amortecimento térmico desta tipologia frente às oscilações diárias de temperatura, traduzindo-se em menor necessidade de condicionamento artificial contínuo.

11 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Apesar do rigor metodológico aplicado na modelagem tridimensional e na simulação no ambiente EnergyPlus, este estudo apresenta limitações inerentes às ferramentas computacionais e às premissas de contorno adotadas. A principal restrição metodológica deste trabalho refere-se à adoção de um sistema único e padronizado de cobertura para todos os cenários simulados. Embora essa constante tenha sido uma delimitação proposital para isolar e comparar exclusivamente o comportamento térmico dos métodos de vedação vertical (paredes), a cobertura constitui a superfície da envoltória submetida à maior carga térmica por radiação solar direta em edificações residenciais horizontais (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). Dessa forma, a não variação de materiais no telhado limita a análise do potencial máximo de eficiência energética global da edificação. Além disso, os resultados expressam um comportamento idealizado e passivo da envoltória, sem considerar as influências ativas da ventilação natural cruzada ou sombreamentos sazonais do entorno urbano.

Diante dessas delimitações, recomenda-se que pesquisas futuras explorem a variação e otimização dos sistemas de cobertura (avaliando o uso de telhas termoacústicas, forros com diferentes espessuras de isolamento térmico ou coberturas de alta refletância) em conjunto com os sistemas de vedação estudados. Por fim, trabalhos futuros podem buscar a validação

experimental in loco destes resultados computacionais, realizando o monitoramento térmico de edificações reais executadas com estes mesmos métodos na região de Governador Valadares.

12 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo investigar o impacto de diferentes sistemas construtivos no desempenho térmico e na eficiência energética de uma residência unifamiliar na cidade de Governador Valadares, MG. Por meio da integração entre modelagem tridimensional e simulação termoenergética computacional em fluxo BIM, foi possível quantificar e comparar as cargas térmicas ideais exigidas pelas alvenarias convencional e estrutural cerâmicas, bem como pelo sistema Light Steel Framing, testado em configurações sem e com isolamento térmico.

As simulações evidenciaram que a inércia térmica e a materialidade da envoltória exercem papéis decisivos no conforto passivo. O sistema de alvenaria convencional de vedação cerâmica demonstrou a maior adequação bioclimática global para a região em estudo. Este sistema atua como um eficiente amortecedor das oscilações de temperatura, registrando as menores necessidades de energia para resfriamento no verão e os menores picos de aquecimento no inverno. A alvenaria estrutural cerâmica apresentou um desempenho muito similar ao método convencional, consolidando-se como uma alternativa técnica viável que alia racionalização de canteiro a um conforto térmico altamente satisfatório.

Em relação ao sistema Light Steel Framing, a pesquisa desmistificou o seu comportamento através da inserção do isolamento térmico. Na configuração sem isolamento, o método revelou-se inviável, elevando os gastos em até 32% no verão. Contudo, ao adicionar a manta isolante, o sistema Steel Frame equiparou o seu desempenho ao das construções em alvenaria para o controle de calor no verão, comprovando a eficácia da barreira térmica. O seu principal gargalo, contudo, recai sobre o inverno: devido à sua construção a seco de baixíssima massa térmica, o sistema não consegue armazenar calor, exigindo quase o triplo de energia de aquecimento nas madrugadas frias em relação às casas de tijolo.

Por fim, a pesquisa comprova que a aplicação de ferramentas de simulação computacional, como o software EnergyPlus, nas fases iniciais de projeto é indispensável. A capacidade de prever o comportamento físico da edificação antes de sua execução permite que engenheiros e arquitetos ajustem os projetos às realidades climáticas, fomentando a construção

de habitações ambientalmente sustentáveis, eficientes e economicamente vantajosas ao longo de todo o seu ciclo de vida.



REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. A. Expansão urbana e reestruturação da cidade média de Governador Valadares (MG). **Revista Percursos — NEMO**, Maringá, v. 8, n. 1, p. 63–86, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/revpercurso.v8i1.27661>. Acesso em: 30 out. 2025.
- ASDRUBALI, F. *et al.* Evaluation of the thermal and acoustic performance of different building envelope systems. **Energy and Buildings**, v. 86, p. 674–685, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15253:2014 – Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis estruturais reticulados em edificações — Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2021.
- BARROS, M. M. S. B.; SABBATINI, F. H. **Alvenaria estrutural: fundamentos e desempenho**. São Paulo: PINI, 2009.
- BAZJANAC, V. **IFC BIM-Based Methodology for Semi-Automated Building Energy Performance Simulation**. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008.
- BLOCOS ARCANJO. Entendendo as diferenças entre alvenaria estrutural e convencional. Blocos Arcanjo, 19 fev. 2024. Disponível em: <https://blocosarcanjo.com.br/alvenaria-estrutural-e-convencional/>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Cidades e Estados: Governador Valadares**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 30 out. 2025.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Cidades e Estados: Governador Valadares**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 30 out. 2025.
- COLE, R. J. Energy and greenhouse gas emissions in building design: a comparative review. **Building and Environment**, v. 34, n. 3, p. 335–348, 1998.
- COSTA, Y. F. **Análise da eficiência energética em edificações: estudo comparativo de envoltórias utilizando simulação computacional**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), Vitória, 2023.
- CRAWLEY, D. B. *et al.* EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 4, p. 319–331, 2001.

CRAWLEY, D. B. *et al.* Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 661–673, 2008.

ELLINGWOOD, K.; SHAHNEWAZ, M. Simplified BIM-based energy modeling using SketchUp. 2018.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2023: Ano base 2022**. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 30 nov. 2025.

GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Desempenho térmico de edificações e estratégias bioclimáticas para o Brasil**. Florianópolis: UFSC, 1998.

HERNÁNDEZ, P.; KENNY, P. From net energy to zero energy buildings: definitions and life cycle analysis. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 815–821, 2010.

IEA – International Energy Agency. **The Future of Cooling: Opportunities for Energy-Efficient Air Conditioning**. Paris: IEA, 2018.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)**. Séries históricas de temperatura para Governador Valadares – MG. Brasília, 2025. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 10 nov. 2025.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **RTQ-R: Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Brasília: INMETRO, 2010.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

JIN, R.; JEONG, W. Integrated BIM–energy simulation framework for improving building energy performance. **Journal of Building Engineering**, v. 26, p. 100–907, 2019.

KNAUF. **Manual Técnico de Sistemas Drywall**. São Paulo: Knauf do Brasil, 2015.

KYDRYWALL. Construção Steel Frame. Disponível em: <https://www.kydrywall.com.br/construcao-steel-frame.html>. Acesso em: 15 nov. 2025.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/PROCEL, 2014.

LIMA, M.; PERTEL, M. Construção sustentável: uma necessidade contemporânea. 2024.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). **OpenStudio Application Guide**. Golden, CO: NREL, 2020.

PARESKIAN, G. A.; DRYSDALE, R. G.; HAMID, A. A. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. 2. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2013.

PAULUZZI. Alvenaria de vedação. 2020. Disponível em:
<https://pauluzzi.com.br/alvenariadevedacao/>. Acesso em: 15 nov. 2025.

PEREIRA, F.; ASSIS, E. S. Eficiência energética em edificações no Brasil: panorama e diretrizes. 2010.

SANTOS, L. A. dos; PEREIRA, M. L. Inovações na Engenharia Civil: novas tecnologias e tendências em materiais de construção. **Caderno de Pedagogia**, v. 24, n. 49, p. 154–166, 2024.

SILVA, J. Análise do desempenho térmico de sistemas construtivos leves no Brasil. 2023.

SILVA, M.; GHISI, E. Thermal performance of lightweight steel frame systems in hot climates. 2018.

SOUZA, D. R. de; PEREIRA, J. M.; SANTOS, R. A. Avaliação térmica de sistemas construtivos alternativos: um estudo comparativo. **Revista Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 55–70, 2017.

TORCELLINI, P. *et al.* Lessons learned from zero energy buildings. **National Renewable Energy Laboratory**, 2006.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations**. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2020.

USGBC — U.S. Green Building Council. **LEED v4.1 Building Design and Construction**. Washington, DC, 2019.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. São Paulo: ProLivros, 2014.

WEBER, F. S. *et al.* Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus. Relatório Técnico. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2017.

VIEIRA, A.; GHISI, E. Environmental certification systems and sustainable construction. 2016.