

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS – UEG CÂMPUS DE
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL**

LÍDIA ALLA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO CONFORTO TÉRMICO EM
EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS**

ANÁPOLIS/GO: 2018

LÍDIA ALLA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO CONFORTO TÉRMICO EM
EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE GOIÁS**

**ORIENTADOR: Dra. RAPHAELA CHRISTINA COSTA
GOMES**

CO-ORIENTADOR: Msc. CAMILLA POMPEO SILVA

ANÁPOLIS / GO: 2018

FICHA CATALOGRÁFICA**SILVA LIDIA ALLA**

Análise comparativa do conforto térmico em edificações residenciais

xi, 60p., 90 mm (ENC/UEG, Bacharel, Engenharia Civil, 2018)

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Estadual de Goiás. Capus de Ciências Exatas e Tecnológicas.

Curso de Engenharia Civil.

1. Conforto térmico em edificações residenciais 2. Simulação Computacional

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, L. A.. Análise comparativa de conforto térmico em edificações residenciais . Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, GO

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lídia Alla Silva

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análise comparativa de conforto térmico em edificações residenciais

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil.

ANO: 2018

É concedida à Universidade Estadual de Goiás a permissão para reproduzir cópias deste projeto final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste projeto final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Lídia Alla Silva

email: lidiaallasilva@gmail.com

LÍDIA ALLA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO CONFORTO TÉRMICO EM
EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE BACHAREL**

APROVADO POR:

RAPHAELA CHRISTINA COSTA GOMES, Dra. (UEG)
(ORIENTADOR)

CAMILLA POMPEO DE CAMARGO E SILVA, Msc.. (UEG)
(CO-ORIENTADORA)

ISRAEL CÂNDIDO DA SILVA, Esp. (UEG)
(EXAMINADOR INTERNO)

LUDMILA RODRIGUES DE MORAIS, Dra. (UEG)
(EXAMINADORA INTERNA)

DATA: ANÁPOLIS, 11 de DEZEMBRO de 2018

DEDICATÓRIA

À Deus, aos meus pais, Sérgio e Sandra, minhas irmãs, Laís e Livia, ao meu cunhado, Osvaldo e minha quase irmã, Karolyn que sempre estiveram ao meu lado.

“Tudo quanto te vier à mão para fazer, faze-o conforme as tuas forças (...)”
Eclesiastes 9:10a

AGRADECIMENTOS

Á Deus que me concede força, vida e saúde para que eu possa realizar meus propósitos. Se não fosse a convicção que Ele está comigo, que me sustenta e está comigo em todos os momentos eu não teria conseguido continuar quando tudo deu errado.

Á minha família que me apoia em todos os momentos. Em especial agradeço á minha mãe, Sandra Cristina Alla, que me apoiou e ensinou a ser guerreira desde pequena. Ao meu pai que sua simples presença me acalma. Ás minhas irmãs, Lais Alla Silva e Livia Alla Silva que me apoiam em todos os momentos. Ao meu cunhado Osvaldo que me socorreu quando meu computador parou de funcionar. Aos meus avós e tia, Sônia Ferreira Alla, Luis Alla e Cristiane Alla, que me acolheram e me apoiaram dia e noite.

Aos meus amigos que me apoia em todos os momentos. Em especial agradeço á Karolyn, que me apoia e aconselha com as melhores palavras. Ao Pedro, Alexia, Gabriel, Filipe, Patrícia, Alana, Hiury que me acompanham todos esses anos me suportando.

Aos professores que me mostraram os melhores caminhos a seguir. Em especial á prof. Dra. Raphaela Gomes que me apoiou e me guiou desde meus primeiros interesses e pesquisas sobre conforto térmico; agradeço por todo incentivo e apoio. Á prof. Ms. Camilla Pompeo por toda instrução e acompanhamento durante a realização do presente trabalho. Á prof. Ms. Julliana Simas que me inspirou e me ensinou a amar materiais de construção. Ao prof. Paulo Paulse e equipe que me direcionaram nos primeiros passos com o *software DesignBuilder*.

Á Universidade Estadual de Goiás pela oportunidade de formação acadêmica, científica e profissional. Agradeço cada servidor público que se dedica para manter o Campus funcionando para capacitar mais profissionais para nossa sociedade.

Á todos vocês e todos que me apoiaram meu muito obrigada.

RESUMO

Diante das mudanças climáticas observa-se a crescente preocupação com o desempenho térmico e energético das edificações. Dessa forma, questiona-se se as tecnologias construtivas mais empregadas atualmente atendem às necessidades de conforto térmico humano. O presente trabalho analisa, baseado nas NBR 15.220: Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2003) e NBR 15.575: Edificações habitacionais – Desempenho (ABNT, 2013), quais componentes construtivos oferecem melhor conforto térmico a uma edificação residencial para as condições climáticas de Goiânia-GO, localizada na zona bioclimática 6. Por meio do Procedimento Simplificado e Simulação Computacional, comparou-se o desempenho térmico que a alvenaria convencional com blocos cerâmicos, alvenaria estrutural com blocos de concreto, alvenaria aparente com tijolos maciços e paredes de concreto de 10 cm de espessura. O principal critério normativo para definição do nível de desempenho térmico é que o valor da transmitância térmica (U) seja menor que $3,7$ ($W/m^2.K$) quando a absorvância solar (α) do componente é menor ou igual a $0,6$. Observou-se que somente o modelo composto por parede de concreto não atingiu o nível de desempenho térmico mínimo exigido em norma com transmitância igual a $4,40$ $W/m^2.K$. Verificou-se que a alvenaria convencional composta por argamassa interna $2,5$ cm, bloco cerâmico $9x14x24$ cm e argamassa externa $2,5$ cm é o melhor componente construtivo em termos de desempenho térmico ($U = 2,57$ $W/m^2.K$). Os demais materiais apresentaram valores muito próximos, a saber: alvenaria estrutural (composta de gesso interno $0,2$ cm, bloco concreto $14x19x39$ cm e argamassa externa $2,5$ cm) com transmitância de $3,32$ $W/m^2.K$ e tijolo cerâmico maciço aparente ($6x9x19$ cm) com valores de $3,33$ $W/m^2.K$.

Palavras-chave: Desempenho térmico. Componentes construtivos. Procedimento Simplificado. Simulação Computacional.

ABSTRACT

Toward climate changes, there is a growing concern about thermal and energy performances of buildings. By this means, it is wondered if the majority of constructive technologies currently used meets the needs of human thermal comfort. The present work analysis, based on the NBR 15.220: Thermal Performances of Buildings (ABNT, 2003) and NBR 15.575: Housing Buildings - Performance (ABNT, 2003), which constructive component offers better thermal comfort to a residential building for the climate conditions of the city of Goiânia in state of Goiás in Brazil, locates in the bioclimatic zone 6. Through two methods: Simplified Procedure and Computational Simulation, we compared the thermal performance of conventional masonry with ceramic blocks, structural masonry with concrete blocks, apparent masonry with solid bricks and concrete walls 10cm thick. The main normative criterion to determine the thermal performance level is that the value of the thermal transmittance (U) is less than 3.7 ($W / m^2.K$) when the solar absorptive (a) of the component is less than or equal 0,6. It was observed that only concrete wall model did not reach the level of minimum thermal performance required by norm with transmittance equal 4.40 $W/m^2.K$. It was verified that the conventional masonry composed of 2.5cm internal mortar, 9x14x24 cm ceramic block and 2.5 cm external mortar is the best constructive component in terms of thermal performance ($U = 2.57 W m^2.K$). The remaining materials, exhibit very close values: structural masonry (composed of internal plaster 0.2 cm, concrete blocks 14x19x39 and external mortar 2.5 cm) with transmittance 3.32 $W/m^2.K$ and solid ceramic brick (6x9x19 cm) with values of 3.33 $W/m^2.K$.

Keywords: Thermal performance. Construction components. Simplified Proceduring. Computational Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Zoneamento bioclimático brasileiro (NBR 15.220-3)	15
Figura 2: Localização das células com dados medidos (NBR 15.220-3)	16
Figura 3: Carta bioclimática adaptada (NBR 15.220-3)	16
Figura 4: Fluxograma do Procedimento Simplificado e Simulação Computacional	29
Figura 5: Fluxograma da simulação computacional	30
Figura 6: Mapa esquemático da zona tropical, subtropical e fria (FERNANDES, 2006)	
Figura 7: Temperaturas médias, médias das máximas e médias das mínimas (FERNANDES, 2006)	32
Figura 8: Amplitude térmica diária (FERNANDES, 2006)	32
Figura 9: Zona Bioclimática 6 (NBR 15.220-3)	34
Figura 10: Carta Bioclimática para Zona 6 (NBR 15.5220-3)	34
Figura 11: Cidades próximas à Goiânia-GO com arquivos EPW disponíveis (LABEEE – USFC)	36
Figura 12: Fluxograma das alternativas para avaliação do desempenho térmico (CBIC)	41
Figura 13: Características necessárias para softwares de avaliação do desempenho térmico (CBIC)	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade (ϵ) para radiações a temperaturas comuns (ondas longas) (Fonte: NBR 15.220-2 - Adaptado)	13
Tabela 2: Resistência térmica superficial interna e externa (NBR 15.220-2 - Adaptado)	14
Tabela 3: Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico (NBR 15.220-3)	
Tabela 4: Resumo das diretrizes construtivas e Estratégias de condicionamento térmico passivo para as zonas bioclimáticas (NBR 15.220-3 - Adaptado)	18
Tabela 5: Critério - Transmitância térmica de paredes externas (NBR 15.575-4)	22
Tabela 6: Critério - Capacidade térmica de paredes externas (NBR 15.575-4)	22
Tabela 7: Condições de cálculo	22
Tabela 8: Área mínima de ventilação em dormitórios e salas de estar (NBR 15.575-4)	23
Tabela 9: Critério - Transmitância térmica das coberturas (NBR 15.575-5)	24
Tabela 10: Métodos de medição de propriedades térmicas de materiais e elementos construtivos (NBR 15.575-1)	25
Tabela 11: Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno (NBR 15.575-1)	27
Tabela 12: Nebulosidade (N), %; Insolação (I), h/mês; Radiação (R), w/m ² .dia	33
Tabela 13: Diretrizes construtivas para Zona bioclimática 6 (ABNT NBR 15.220)	34
Tabela 14: Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 6 (ABNT NBR 15.220)	35
Tabela 15: Propriedade dos materiais (ABNT NBR 15.220)	39
Tabela 16: Transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico para algumas paredes (NBR15.220-3 – Adaptado)	40
Tabela 17: Transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico para cobertura (NBR15.220-3 – Adaptado)	40

Tabela 18: Critérios de avaliação pelo procedimento simplificado	40
Tabela 19: Requisitos de absorptância solar, transmitância térmica e capacidade	42
Tabela 20: Critério de avaliação de avaliação de desempenho térmico para condições de verão (NBR 15.575-1)	44
Tabela 21: Critério de avaliação de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno (NBR 15.575-1)	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	3
1.1 OBJETIVOS	4
1.1.1 Objetivo Geral	4
1.1.2 Objetivos Específicos	4
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS	5
2.1.1 Trocas térmicas	6
2.1.2 ABNT NBR 15.220 (2003) – Desempenho térmico de edificações	8
2.1.2.1 NBR 15.220-1 Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades	9
2.1.2.2 NBR 15.220-2 Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações	11
2.1.2.3 NBR 15.220-3 Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social	14
2.1.3 ABNT NBR 15.575 Edificações habitacionais – Desempenho	19
2.1.3.1 NBR 15.575-1 Edificações habitacionais– Parte 1: Requisitos gerais	20
2.1.3.2 NBR 15.575-4 Edificações habitacionais - Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais e externas – SVVIE	21
2.1.3.3 NBR 15.575-5 Edificações habitacionais – Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas	24
2.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	25
2.2.1 Procedimento de simulação computacional (normativo)	25
3. METODOLOGIA	28
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO	31
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO	37
3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS EM ESTUDO	39

3.3 CÁLCULO DA TRANSMITÂNCIA TÉRMICA E CAPACIDADE TÉRMICA – PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO	40
3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS – PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO	42
3.5 MODELAGEM DA EDIFICAÇÃO – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	42
3.6 CÁLCULO DOS VALORES MÁXIMOS DE TEMPERATURA – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	44
3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	44
4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	46
4.1 PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO	46
4.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	50

1. INTRODUÇÃO

Observa-se a necessidade atual de projetar e construir edificações residenciais que ofereçam conforto térmico aos futuros moradores do empreendimento. A diretriz normativa que auxilia os profissionais da construção civil nesse desafio é a NBR 15.220 (ABNT, 2003). Essa primeira norma define conceitos, metodologia de cálculo, zoneamento bioclimático brasileiro e medições das variáveis importantes em campo. Outro recurso normativo é a NBR 15.575 (ABNT, 2013), norma específica sobre Desempenho em Edificações habitacionais, com a definição de parâmetros e requisitos que as edificações residenciais devem atender em termos de conforto térmico.

Por meio dessas normas pode-se avaliar o desempenho térmico da edificação como um todo e ainda observar qual é a contribuição térmica dos materiais que compõem as paredes da edificação. Ao se fixar as variáveis climáticas e condições específicas em que o ambiente está submetido, pode-se realizar uma análise comparativa do conforto térmico se as paredes da edificação fossem compostas de outros materiais.

Para realizar esse estudo comparativo, é necessário definir as variáveis que serão avaliadas, assim como a Zona bioclimática na qual a edificação residencial em estudo pertence. A variável mais relevante para o estudo é a temperatura do ambiente interno da edificação, resultante das atividades realizadas no interior da edificação, das condições térmicas externas e das características dos materiais que compõem a edificação.

O empreendimento em análise está localizado em Goiânia-GO, pertence assim à Zona bioclimática 6, que possui como características a necessidade de estratégias de condicionamento térmico passivo específicas, que envolvem resfriamento passivo e massa térmica para resfriamento, além da ventilação seletiva para promover conforto térmico no verão, e a inércia térmica nas vedações internas no inverno.

Sabendo que cada região bioclimática possui estratégias de condicionamento térmico específicas, procura-se distinguir os melhores materiais para constituir as paredes das residências que atendem os requisitos de desempenho térmico para a zona bioclimática 6, na qual Goiânia faz parte. Por meio desse trabalho será possível observar a influência dos materiais que compõem as vedações verticais internas e externas sobre o desempenho térmico da edificação, além de analisar o resultado que cada solução construtiva, escolhida para estudo, oferece para uma edificação em condições semelhantes.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento térmico de uma edificação residencial quando composta de diferentes materiais construtivos, tais como alvenaria convencional, alvenaria convencional, tijolos maciços e parede de concreto de 10 cm de espessura por meio de dois métodos normativos: Procedimento Simplificado e a Simulação computacional pelo *software DesignBuilder*, orientados pelas NBR 15.220 (ABNT, 2003) e NBR 15.575 (ABNT, 2003). Com o intuito de comparar o desempenho térmico que cada material fornece à edificação quando submetida a uma mesma condição ambiental e verificar qual material promove melhor nível de desempenho térmico à edificação.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Compreender os conceitos, metodologia e requisitos das normas de desempenho térmico vigentes;
- Compreender as características da zona bioclimática 6, na qual a cidade de Goiânia está inserida, e distinguir melhores materiais e tecnologias construtivas para esta zona;
- Realizar a avaliação por meio do Procedimento Simplificado conforme as normas NBR 15.220 e NBR 15.575;
- Realizar a avaliação detalhada por meio da simulação por *software DesignBuilder* conforme as normas NBR 15.220 e NBR 15.575.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS

De acordo com Lamberts (2014, p. 46 apud ASHRAE, 2005, p. 7) conforto térmico é o estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Conhecer as exigências humanas de conforto térmico, as premissas da arquitetura adequada a climas particulares, assim como as características térmicas dos materiais é essencial para a concepção e construção de edificações que forneçam resposta térmica que atenda às exigências de conforto térmico (FROTA e SCHIFFER, 2003).

Além dos benefícios relativos a sensação de conforto térmico das pessoas, a adequação da edificação ao clima também se relaciona com o uso racional da energia. Em casos que o edifício não apresenta condições suficientes para aquecimento ou resfriamento passivo, se faz necessário suprir tal necessidade com soluções que envolvem o consumo de energia para resfriamento ou aquecimento do ambiente interno das edificações residenciais. Segundo Lamberts *et al.* (2014), uma edificação é mais eficiente que outra quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor custo de energia.

Para possibilitar a promoção do conforto térmico de forma mais eficiente é necessário avaliar o desempenho térmico da edificação por meio de variáveis que indicam as condições térmicas do ambiente e as propriedades dos materiais que o envolvem. Devido a diversidade das variáveis de conforto térmico, estudiosos desenvolveram cerca de três dezenas de índices que agrupam as condições que proporcionam as mesmas sensações e respostas, os índices térmicos. Para a análise das condições climáticas brasileiras distingue-se três instrumentos: Carta Bioclimática, Temperatura efetiva de Yaglou e Houghtlhen e Índice de Conforto Equatorial (FROTA e SCHIFFER, 2003).

Segundo as normas de referência NBR 15.220 (2003) e NBR 15.575 (2013), a ferramenta de análise de conforto mais adequada, para aplicação em condições ambientais de edificações habitacionais no cenário brasileiro é a Carta Bioclimática. Esse é o instrumento que compõe a metodologia de zoneamento bioclimático do Brasil e direciona as estratégias de condicionamento térmico passivo para cada zona.

No estudo do conforto térmico também é necessário, primeiramente, compreender o funcionamento das trocas térmicas que acontecem entre a edificação e o ambiente no qual está inserido.

2.1.1 Trocas térmicas

As trocas térmicas acontecem em duas condições: quando existem corpos com temperaturas diferentes, e/ou quando há mudança de estado de agregação. A primeira condição, é chamada de troca térmica seca, envolve os mecanismos de convecção, radiação e condução. A segunda condição, é chamada troca térmica úmida, pois envolve a mudança de estado da água por meio dos mecanismos de evaporação e condensação (FROTA e SCHIFFER, 2003).

Segundo Frota *et al.* (2003), nas trocas secas acontece a troca de calor entre corpos que estejam em diferentes temperaturas, o chamado calor sensível. Quando essa transmissão de calor envolve um corpo no estado sólido e um fluido (líquido ou gás), ocorre a convecção. Quando há transmissão de calor entre dois corpos distantes entre si, por meio da capacidade dos corpos de emitir e absorver energia eletromagnética, ocorre a radiação. E quando a trocam calor acontece entre dois corpos pelo contato que há entre eles ou em um corpo que possui duas partes em temperaturas diferentes, ocorre condução.

As trocas úmidas, de acordo com Frota *et al.* (2003), envolve o calor latente onde verifica-se a mudança do estado de agregação da água, mudando do líquido para o vapor e vice versa. A água precisa de certo dispêndio de energia para que a mudança de estado se transcorra. A evaporação advém na mudança do estado líquido para o estado gasoso, a condensação por sua vez ocorre na mudança de estado inversa.

A seguir descreve-se as formulações matemáticas que permitem mensurar a intensidade do fluxo de calor envolvido nas trocas de calor:

- Convecção

$$q_c = h_c (t - \theta) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (1)$$

onde,

q_c – intensidade do fluxo térmico por convecção (W/m^2);

h_c – coeficiente de trocas térmicas por convecção ($\text{W/m}^2\text{°C}$);

t – temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);

θ - temperatura da superfície do sólido (parede) ($^{\circ}\text{C}$), sendo $t > \theta$ ou $\theta > t$.

- Radiação

$$q_r = h_r (\theta - \theta_r) \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (2)$$

onde,

q_r – intensidade do fluxo térmico por radiação (W/m^2);

h_r – coeficiente de trocas térmicas por radiação ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$);

θ – temperatura da superfície da parede considerada ($^{\circ}\text{C}$);

θ_r - temperatura radiante relativa às demais superfícies ($^{\circ}\text{C}$).

- Condução

$$q_{cd} = \frac{\lambda}{e} (\theta_e - \theta_i) \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (3)$$

onde,

q_{cd} – intensidade do fluxo térmico por condução (W/m^2);

λ - coeficiente de condutividade térmica do material ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$);

e – espessura da parede (m);

θ_e – temperatura da superfície externa envolvente ($^{\circ}\text{C}$);

θ_i – temperatura da superfície interna envolvente ($^{\circ}\text{C}$).

Sendo $\frac{e}{\lambda} = r$, sabendo que r é a resistência térmica específica da parede ($\text{m}^2\text{C}/\text{W}$),

tem-se:

$$q_{cd} = \frac{(\theta_e - \theta_i)}{r} \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (4)$$

- Condensação

$$R = \left(\frac{t_e - t_i}{t_i - t_o} \right) \cdot \frac{1}{h_i} \quad (\text{m}^2\text{C}/\text{W}) \quad (5)$$

onde,

R – resistência térmica ($\text{m}^2\text{C}/\text{W}$);

t_i – temperatura do ar interno ($^{\circ}\text{C}$);

t_e – temperatura do ar externo ($^{\circ}\text{C}$);

t_o – temperatura do ponto de orvalho relativa a t_i ($^{\circ}\text{C}$);

h_i - coeficiente de condutância térmica superficial interna (W/m^2C).

As trocas térmicas que se dão à superfície da parede compõem a condutância térmica superficial. Conforme a Equação 6, sabe-se que a soma dos coeficiente de trocas térmicas por radiação (h_r) e coeficiente de trocas térmicas por radiação h_r , W/m^2C , equivale a soma dos coeficiente de condutância térmica superficial interna (h_i) e externa (h_e), W/m^2C , tem-se que:

$$h_c + h_r = h_e + h_i \quad (6)$$

onde,

h_e - coeficiente de condutância térmica superficial externa (W/m^2C).

h_i - coeficiente de condutância térmica superficial interna (W/m^2C).

O coeficiente global de transmissão térmica K envolve as trocas térmicas superficiais (por convecção e radiação) e as trocas térmicas por meio do material (condução) (FROTA e SCHIFFER, 2003). Sua intensidade é obtida por meio da equação 7.

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{e}{\lambda} \quad (m^2C/W) \quad (7)$$

onde,

$\frac{1}{K} = R$ – resistência térmica global (m^2C/W);

A partir da compreensão do funcionamento das trocas térmicas que acontecem entre a edificação e o ambiente por meio das paredes segue-se para as orientações normativas que estabelecem os conceitos, zoneamento bioclimático brasileiro e metodologia de cálculos para se determinar o desempenho térmico das edificações.

2.1.2 ABNT NBR 15.220 (2003) – Desempenho térmico de edificações

O desempenho térmico adequado influencia diretamente no conforto e qualidade de vida das pessoas. Na fase de projeto, avaliação de desempenho térmico pode ser realizada de forma simplificada ou por simulação computacional baseando-se nas propriedades térmicas dos materiais construtivos, ou por medição *in loco* após dois anos da construção da edificação.

O desempenho térmico do edifício depende das características do local, dessa forma a edificação deve reunir características que atendam aos requisitos de desempenho térmico para

a zona climática na qual o empreendimento está inserido, conforme a NBR 15.220 (2005). Essa norma é dividida em cinco partes, da seguinte forma:

- NBR 15.220-1 Desempenho Térmico de Edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades;
- NBR 15.220-2 Desempenho Térmico de Edificações – Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos construtivos e componentes de edificações;
- NBR 15.220-3 Desempenho Térmico de Edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social;
- NBR 15.220-4 Desempenho Térmico de Edificações – Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida;
- NBR 15.220-5 Desempenho Térmico de Edificações – Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluxométrico.

O presente trabalho envolve a comparação do desempenho e conforto térmico promovido por diferentes materiais construtivos para um empreendimento que será construído em Goiânia-GO, dessa maneira se refere, principalmente, às partes 1, 2 e 3 da NBR 15.220.

2.1.2.1 NBR 15.220-1 Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades

Para iniciar a análise do desempenho térmico de edificações, é fundamental que haja compreensão dos conceitos definidos pela norma em estudo. Apresenta-se a seguir os conceitos que serão usados no presente estudo:

- Atraso térmico - Tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor.
- Capacidade térmica - Quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema.
- Coeficiente de sombreamento - Quociente entre o fator solar do componente transparente ou translúcido estudado e o fator solar de um vidro plano incolor de 3 mm de espessura ($F_{St} = 0,87$).
- Condutividade térmica - Propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m^2 , quando

submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro.

- Conforto térmico - Satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente.
- Desconforto local - Aquecimento ou resfriamento de uma parte do corpo gerando insatisfação do indivíduo.
- Emissividade - Quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura.
- Fator de ganho de calor solar de elementos opacos ou Fator solar de elementos opacos - Quociente da taxa de radiação solar transmitida através de um componente opaco pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo.
- Fator de ganho de calor solar de elementos transparentes ou translúcidos ou Fator solar de elementos transparentes ou translúcidos - Quociente da taxa de radiação solar diretamente transmitida através de um componente transparente ou translúcido, sob determinado ângulo de incidência, mais a parcela absorvida e posteriormente retransmitida para o interior, pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo.
- Fluxo de calor ou Taxa de fluxo de calor - Quociente da quantidade de calor que atravessa uma superfície durante um intervalo de tempo pela duração desse intervalo.
- Neutralidade térmica - Estado físico no qual a densidade do fluxo de calor entre o corpo humano e o ambiente é igual à taxa metabólica do corpo, sendo mantida constante a temperatura do corpo.
- Resistência térmica de elementos e componentes - Quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário.
- Temperatura operativa - Temperatura uniforme de um ambiente com comportamento de corpo negro imaginário, no qual o ocupante poderia trocar a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que no ambiente real não uniforme.
- Temperatura efetiva - Temperatura operativa de um ambiente com 50% de umidade relativa que resulta na mesma troca total de calor do corpo humano que em um ambiente real.
- Temperatura neutra - Temperatura operativa para a qual o corpo humano encontra-se em neutralidade térmica.
- Temperatura de bulbo seco - Temperatura do ar medida por um termômetro com dispositivo de proteção contra a influência da radiação térmica.

- Temperatura de bulbo úmido - Temperatura à qual a evaporação de água conduzirá uma massa de ar úmido, por meio de um processo isobárico de saturação adiabática. (Pode ser medida por um termômetro cujo bulbo está embutido em uma mecha embebida em água destilada, sobre o qual atua um exaustor de ar, tornando forçada a convecção entre a mecha e o ar).
- Transmitância térmica ou Coeficiente global de transferência térmica de calor - Inverso da resistência térmica total.
- Umidade absoluta do ar - Quociente da massa de vapor d'água (em gramas) pela massa de ar seco (em quilogramas).
- Umidade relativa do ar - Quociente da umidade absoluta do ar pela umidade absoluta do ar saturado para a mesma temperatura e pressão atmosférica.
- Zona bioclimática - Região geográfica homogênea quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano.

Entender esses conceitos apresentados pela NBR 15.220-1 é essencial para leitura da Carta Bioclimática, uso consciente das equações, construção de gráficos e interpretação dos resultados obtidos.

2.1.2.2 NBR 15.220-2 Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações

Esta parte da norma apresenta os dados das propriedades térmicas dos materiais que são necessários para seguir a metodologia de cálculo para aplicação do Procedimento Simplificado definido na NBR 15.220-2 e NBR 15.575-4 (que será apresentada em seguida).

Segundo a NBR 15.220-2, temos que:

- A transmitância térmica (U) de componentes, de ambiente a ambiente, é o inverso da resistência térmica total:

$$U = \frac{1}{R_t} \quad (8)$$

- A capacidade térmica de um componente plano constituído de camadas homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada por:

$$C_T = \sum \lambda_i \cdot R_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad (9)$$

ou

$$C_T = \sum e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad (10)$$

onde,

λ_i - condutividade térmica do material da camada i ;

R_i - resistência térmica da camada i ;

c_i - calor específico do material da camada i ;

ρ_i - densidade de massa aparente do material da camada i ;

e_i - espessura da camada i .

- A capacidade térmica de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada por:

$$C_T = \frac{\sum A_i}{\sum \frac{A_i}{C_{Ti}}} \quad (11)$$

onde,

C_{Ti} - capacidade térmica do componente para cada seção determinadas pelas Equações 9 e 10;

A_i - área de cada seção.

- O atraso térmico de um elemento homogêneo, com espessura “ e ” e submetida a um regime térmico variável e senoidal com período de 24 horas, pode ser estimado por:

$$\phi = 0,7284 \cdot \sqrt{R_T + C_T} \quad (12)$$

onde,

R_T - resistência térmica de superfície a superfície do componente;

C_T - capacidade térmica do componente.

- O atraso térmico de um elemento heterogêneo, formado por diferentes materiais superpostos em “ n ” camadas paralelas às faces (perpendiculares ao fluxo de calor), é determinado através da expressão:

$$\phi = 1,382 \cdot R_T \cdot \sqrt{B_1 + B_2} \quad (13)$$

onde,

R_t - resistência térmica de superfície a superfície do componente;

B_1 é dado pela expressão 14;

B_2 é dado pela expressão 15.

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_0}{R_t} \quad (14)$$

onde,

B_0 é dado pela expressão 16.

$$B_2 = 0,205 \cdot \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{R_T} \right) \cdot \left(R_{ext} - \frac{R_t - R_{ext}}{10} \right) \quad (15)$$

$$B_0 = C_T - C_{T_{ext}} \quad (16)$$

Onde:

C_T - capacidade térmica total do componente;

$C_{T_{ext}}$ - capacidade térmica da camada externa do componente.

Vale ressaltar que quando B_2 for negativo, deve ser considerado nulo.

- O fator solar de elementos opacos é dado pela seguinte expressão:

$$FS_0 = 4 \cdot U \cdot \alpha \quad (17)$$

onde,

FS_0 - fator solar de elementos opacos, em percentagem;

U - transmitância térmica do componente;

α - absorptância à radiação solar, está em função da cor, dada pela Tabela 1;

Tabela 1 Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade (ϵ) para radiações a temperaturas comuns (ondas longas) (Fonte: NBR 15.220-2 - Adaptado)

Tipo de superfície	α	ϵ
Concreto aparente	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Telha de barro	0,75 / 0,80	0,85 / 0,95
Tijolo aparente	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Reboco claro	0,30 / 0,50	0,85 / 0,95
Vidro incolor	0,06 / 0,25	0,84
Vidro colorido	0,40 / 0,80	0,84
Pintura:		
Branca	0,2	0,9
Amarela	0,3	0,9
Verde clara	0,4	0,9
“Alumínio”	0,4	0,5
Verde escura	0,7	0,9
Vermelha	0,74	0,9
Preta	0,97	0,9

Pode-se determinar o máximo valor de α em função do fator solar e da transmitância

térmica, conforme mostra a equação 18, quando é necessário respeitar um limite de fator solar para uma determinada região.

$$\alpha \leq \frac{F \cdot S_0}{4 \cdot U} \quad (18)$$

A Tabela 1 apresenta a absorvância (α) e a emissividade (ϵ) de algumas superfícies e cores.

- Fator solar de elementos transparentes ou translúcidos é determinado por:

$$FS_t = U \cdot \alpha \cdot R_{se} + \tau \quad (19)$$

onde:

FS_t - fator solar de elementos transparentes ou translúcidos;


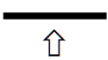
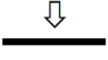

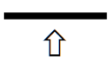
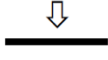
U - transmitância térmica do componente;

α - absorvância à radiação solar – função da cor, dada pela Tabela 1;

R_{se} - resistência superficial externa, dada pela Tabela 2;

τ - transmitância à radiação solar.

Tabela 2: Resistência térmica superficial interna e externa (NBR 15.220-2 - Adaptado)

$R_{si} (m^2 \cdot K)/W$			$R_{se} (m^2 \cdot K)/W$		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
					
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Ao analisar o fluxo de calor através da parede, utiliza-se os valores referentes à direção horizontal para R_{si} e R_{se} .

2.1.2.3 NBR 15.220-3 Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social

Com o objetivo de otimizar o conforto térmico por meio da melhor adequação das edificações ao clima no qual ele está inserido, dividiu-se o território brasileiro em oito zonas bioclimáticas relativamente homogêneas quanto ao clima. Essa divisão apresentada nesta parte da norma NBR 15.220, possibilitou o estabelecimento das estratégias de condicionamento térmico passivo mais adequado para cada região de estudo.

Para a formulação das recomendações e diretrizes construtivas foram considerados como parâmetros e condições de contorno fixos, tais como: o tamanho das aberturas para ventilação, a proteção das aberturas, o tipo de paredes externas e cobertura e estratégias de condicionamento passivo. As oito zonas bioclimáticas brasileiras são apresentadas na Figura 1:

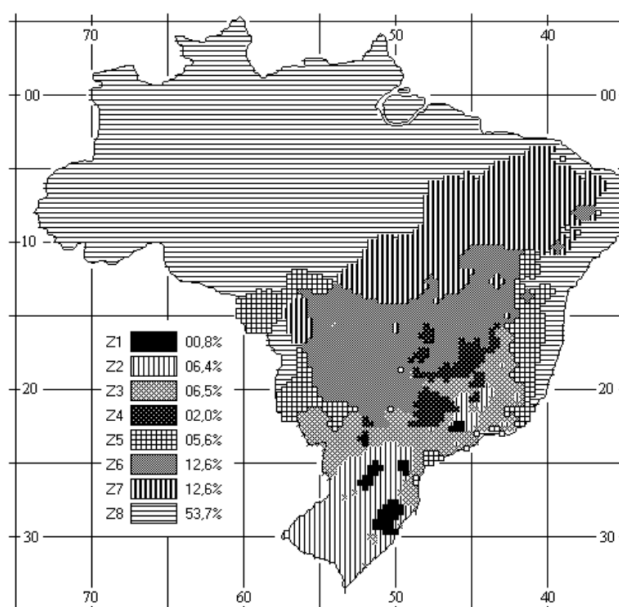


Figura 1: Zoneamento bioclimático brasileiro (NBR 15.220-3)

Para realizar essa classificação, foram escolhidos 6500 locais para instalar células para análise do comportamento térmico de cada lugar. Cada célula foi caracterizada pela sua posição geográfica e por três variáveis climáticas – a saber: temperaturas médias mensais máximas, temperaturas médias mensais mínimas e médias mensais de umidades relativas do ar. Escolhidas 330 células conforme Figura 2, coletou-se dados das Normais Climatológicas de 1961 a 1990 em 206 cidades, e coletou-se dados das Normais Climatológicas e outras fontes medidos de 1931 e 1960 em 124 cidades. Para as demais células, o clima foi estipulado por interpolação conforme o procedimento descrito no Anexo B da NBR 15.220-3.

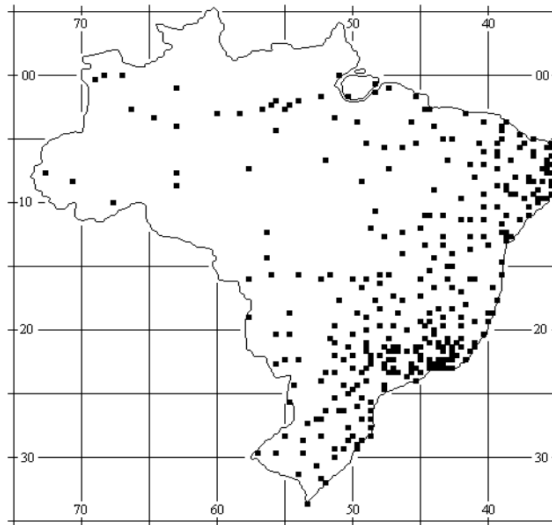


Figura 2: Localização das células com dados medidos (NBR 15.220-3)

O método de classificação bioclimática adotado pela norma foi a Carta Bioclimática conforme Figura 3.

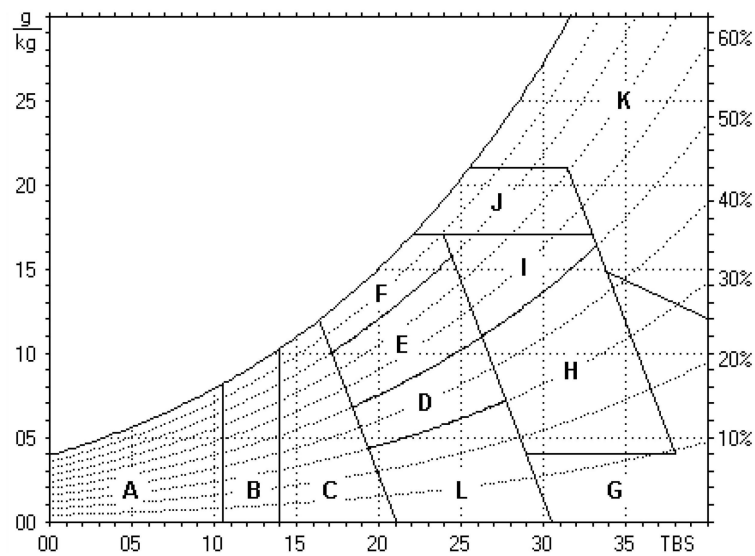


Figura 3: Carta bioclimática adaptada (NBR 15.220-3)

Cada zona da carta corresponde a uma estratégia de condicionamento térmico passivo conforme detalhado na Tabela 3.

Tabela 3: Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico (NBR 15.220-3)

(continua)

Estratégia	Detalhamento
A	O uso de aquecimento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por frio.
B	A forma, a orientação e a implantação da edificação, além da correta orientação de superfícies envidraçadas, podem contribuir para otimizar o seu aquecimento no período frio através da incidência de radiação solar. A cor externa dos componentes também desempenha papel importante no aquecimento dos ambientes através do aproveitamento da radiação solar.
C	A adoção de paredes internas pesadas pode contribuir para manter o interior da edificação aquecido.
D	Caracteriza a zona de conforto térmico (a baixas umidades).
E	Caracteriza a zona de conforto térmico.
F	As sensações térmicas são melhoradas através da desumidificação dos ambientes. Esta estratégia pode ser obtida através da renovação do ar interno por ar externo através da ventilação dos ambientes.
G e H	Em regiões quentes e secas, a sensação térmica no período de verão pode ser amenizada através da evaporação da água. O resfriamento evaporativo pode ser obtido através do uso de vegetação, fontes de água ou outros recursos que permitam a evaporação da água diretamente no ambiente que se deseja resfriar.

Tabela 3: Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico (NBR 15.220-3)

(continuação)

Estratégia	Detalhamento
H e I	Temperaturas internas mais agradáveis também podem ser obtidas através do uso de paredes (externas e internas) e coberturas com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite, quando as temperaturas externas diminuem.
I e J	A ventilação cruzada é obtida através da circulação de ar pelos ambientes da edificação. Isto significa que se o ambiente tem janelas em apenas uma fachada, a porta deveria ser mantida aberta para permitir a ventilação cruzada. Também deve-se atentar para os ventos predominantes da região e para o entorno, pois o entorno pode alterar significativamente a direção dos ventos.
K	O uso de resfriamento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por calor.
L	Nas situações em que a umidade relativa do ar for muito baixa e a temperatura do ar estiver entre 21°C e 30 °C, a umidificação do ar proporcionará sensações térmicas mais agradáveis. Essa estratégia pode ser obtida através da utilização de recipientes com água e do controle da ventilação, pois esta é indesejável por eliminar o vapor proveniente de plantas e atividades domésticas.

As diretrizes construtivas estabelecidas para cada zona bioclimática foram resumidas na Tabela 4. Com essas informações, é possível definir com mais assertividade quais são as dimensões de aberturas (pequena, média ou grande), sombreamento e vedações das paredes externas e cobertura.

Tabela 4: Resumo das diretrizes construtivas e Estratégias de condicionamento térmico passivo para as zonas bioclimáticas (NBR 15.220-3 - Adaptado)

Zona	Cidade	Aberturas para ventilação	Sombreamento	Vedações externas (parede)	Vedações externas (cobertura)	Estratégias de condicionamento térmico passivo
Z1	Caxias do Sul (RS)	Médias	Permitir sol durante o período frio	Leve	Leve isolada	Inverno: B e C
Z2	Ponta Grossa (PR)	Médias	Permitir sol durante o inverno	Leve	Leve isolada	Verão: J Inverno: B e C
Z3	Florianópolis (SC)	Médias	Permitir sol durante o inverno	Leve refletora	Leve isolada	Verão: J Inverno: B e C
Z4	Brasília (DF)	Médias	Sombrear aberturas	Pesada	Leve isolada	Verão: H e J Inverno: B e C
Z5	Santos (SP)	Médias	Sombrear aberturas	Leve refletora	Leve isolada	Verão: J Inverno: C
Z6	Goiânia (GO)	Médias	Sombrear aberturas	Pesada	Leve isolada	Verão: H e J Inverno: C
Z7	Picos (PI)	Pequenas	Sombrear aberturas	Pesada	Pesada	Verão: H e J
Z8	Belém (PA)	Grandes	Sombrear aberturas	Leve refletora	Leve refletora	Verão: J

Além da norma de Desempenho térmico de edificações NBR 15.220, tem-se a NBR 15.575 como referência para realizar a avaliação de desempenho térmico, especificando os requisitos de desempenho de edificações habitacionais.

2.1.3 ABNT NBR 15.575 Edificações habitacionais – Desempenho

Essa norma apresenta os procedimentos e requisitos para avaliar o desempenho em edificações residenciais de forma geral envolve diversos aspectos, tais como: segurança contra incêndio, segurança no uso e na operação, estanqueidade, desempenho estrutural, desempenho térmico, desempenho acústico, desempenho lumínico, durabilidade e manutenibilidade e etc.

Devido ao seu carácter abrangente, foi necessário que a norma fosse fracionada para melhor orientar como alcançar um alto nível de desempenho em cada componente, sistema e para a edificação como um todo. Assim, a norma é dividida em seis partes, da seguinte forma:

- NBR 15.575-1 Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais;
- NBR 15.575-2 Edificações habitacionais – Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais;
- NBR 15.575-3 Edificações habitacionais – Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos;
- NBR 15.575-4 Edificações habitacionais –Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE;
- NBR 15.575-5 Edificações habitacionais –Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas;
- NBR 15.575-6 Edificações habitacionais –Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

O presente trabalho está relacionado ao desempenho e conforto térmico, dessa maneira se refere, principalmente, às partes 1, 4 e 5 desta norma. O Sistema de Vedação Vertical Interno e Externo (SVVIE) consiste nas partes da edificação habitacional que delimitam verticalmente a edificação e seus ambientes, como as fachadas e as paredes ou divisórias internas.

2.1.3.1 NBR 15.575-1 Edificações habitacionais– Parte 1: Requisitos gerais

A primeira parte da NBR 15.575, envolve diversos tipos de desempenho de forma geral. Entre eles, tem-se o desempenho térmico onde é descrito o procedimento de cálculo e requisitos para realização da simulação computacional. A norma recomenda que a avaliação do desempenho térmico seja realizada primeiramente por meio do Procedimento Simplificado. Esse primeiro procedimento avalia o atendimento aos requisitos e critérios para os sistemas de vedação e coberturas conforme descrito nas partes 4 e 5 da NBR 15.575. Caso a avaliação realizada por meio das propriedades físicas dos materiais resultem em desempenho térmico insatisfatório, é necessário avaliar o desempenho térmico da edificação como um todo por meio do método da simulação computacional.

Para a realização da avaliação por meio da simulação computacional é necessário obter a localização geográfica e dados climáticos correspondentes aos dias típicos de projeto de verão e inverno da cidade onde o estudo está sendo realizado. A referência para esses dados

estabelecida em norma será apresentado no capítulo 3 deste trabalho referente à simulação computacional.

A norma recomenda a utilização do programa *EnergyPlus* para realizar as simulações computacionais. Outros programas podem ser utilizados desde que permitam a determinação do comportamento térmico de edificações sob condições dinâmicas de exposição clima e sejam capazes de reproduzir os efeitos de inércia térmica e validados pela ASHRAE Standard 140. Para realização do presente trabalho, será utilizado o *software DesignBuilder*.

A edificação submetida à simulação computacional deve atingir o nível mínimo de desempenho de aceitação em cada requisito estabelecido em norma considerando a zona bioclimática na qual está inserida. Quando o desempenho térmico da edificação é inferior ao mínimo requerido, considera-se que haja necessidade de realizar adequações para melhorar o conforto térmico no interior da edificação. Essa adequação pode envolver a alteração da espessura das paredes, a troca do material utilizado, a modificação da área de aberturas da edificação ou sua disposição, entre outras alternativas.

Os requisitos avaliados envolvem o desempenho térmico da edificação no verão e no inverno conforme será detalhado no capítulo 3 deste trabalho.

2.1.3.2 NBR 15.575-4 Edificações habitacionais - Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais e externas – SVVIE

Os requisitos e critérios necessários para a verificação dos níveis mínimos de desempenho térmico do sistema de vedações verticais externas pelo Procedimento Simplificado são apresentados nesta parte da norma. A edificação deve proporcionar desempenho térmico mínimo cumprindo requisitos de adequação de paredes externas e para ventilação.

Requisito - Adequação de paredes externas

As paredes externas da edificação devem apresentar transmitância térmica e capacidade térmica que promovam pelo menos o nível mínimo de desempenho térmico estabelecido de acordo com as características da zona bioclimática correspondente. Ao realizar os cálculos pelo método simplificado apresentado na NBR 15.220-2, os resultados obtidos devem ser comparados com os critérios a seguir para que se possa avaliar do nível de desempenho do sistema de vedação vertical externa.

Os valores máximos admissíveis de transmitância térmica segundo a zona bioclimática em questão são apresentados pela Tabela 5. Para as zonas 3 a 8, o valor máximo admissível depende do valor da absortância à radiação solar da superfície externa da parede.

Tabela 5: Critério - Transmitância térmica de paredes externas (NBR 15.575-4)

Nível de desempenho	Transmitância térmica (U)		
	W/m ² .K		
	Zona 1 e 2	Zonas 3 a 8	
Mínimo	$U \leq 2,5$	$\alpha^a \leq 0,6$	$\alpha^a > 0,6$
		$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$

^a α é absortância à radiação solar da superfície externa da parede

A capacidade térmica das paredes externas apresenta, por sua vez, valores mínimos admissíveis para obtenção do nível mínimo de desempenho térmico. Os valores correspondentes a zona 1 a zona 7 estão apresentados na Tabela 6, para a zona bioclimática 8 esse requisito não é considerado na avaliação.

Tabela 6: Critério - Capacidade térmica de paredes externas (NBR 15.575-4)

Nível de desempenho	Capacidade térmica (CT)	
	kJ/m ² .K	
	Zona 1 a 7	Zonas 8
Mínimo	≥ 130	Sem requisito

O cálculo da capacidade térmica de paredes que possuem em sua composição térmica materiais isolantes térmicos de condutividade térmica (λ) menor ou igual a 0,065 W/(m.K) e resistência térmica (R_T) maior que 0,5 (m².K)/W deve ser feito desprezando-se todos os materiais voltados para o ambiente e externos, posicionados a partir do isolante ou espaço de ar conforme Tabela 7.

Tabela 7: Condições de cálculo

Condutividade térmica (λ)	Resistência térmica (R_t)	Cálculo da Capacidade térmica (CT)
W/m.K	(m².K)/W	kJ/m².K
$\leq 0,065$	$> 0,5$	Despreza-se todos os materiais voltados para o ambiente externo, posicionados a partir do isolante ou espaço de ar
Outros valores	Outros valores	Conforme o padrão de cálculos

Requisito - Aberturas para ventilação

As aberturas na fachada da edificação devem promover ventilação interna dos ambientes. O requisito apresentado neste item é aplicado somente para os ambientes de longa permanência: salas e dormitórios. As aberturas desses ambientes devem atender à legislação específica do local da obra, incluindo códigos de obras, códigos sanitários e outros. Nos casos em que os órgãos locais vigentes não apresentam requisitos de ordem legal para implantação da obra, devem ser adotados os valores indicados na Tabela 8.

Tabela 8: Área mínima de ventilação em dormitórios e salas de estar (NBR 15.575-4)

Nível de desempenho	Aberturas para ventilação (A)	
	Zona 1 a 7	Zonas 8
Mínimo	$A \geq 7\%$ da área do piso	$A \geq 12\%$ da área de piso - região norte do Brasil $A \geq 8\%$ da área de piso - região sudeste do Brasil

NOTA: Nas zonas 1 a 6, as áreas de ventilação devem ser passíveis de serem vedadas durante o período de frio.

A avaliação deste requisito envolve a análise do projeto arquitetônico considerando a Equação 20 para cada ambiente de longa permanência.

$$A = 100 \cdot \left(\frac{A_A}{A_P} \right) (\%) \quad (20)$$

onde,

A_A - área efetiva de abertura de ventilação do ambiente; e,

A_p - área de piso do ambiente.

A área efetiva de abertura de ventilação do ambiente abrange somente as aberturas que permitem a livre circulação do ar, devendo ser descontadas as áreas de perfis, vidros e de qualquer outro obstáculo; nesta área não são computadas as áreas de portas internas. No caso de cômodos dotados de portas-balcão ou semelhantes, na fachada da edificação, toda a área aberta resultante do deslocamento da folha móvel da porta é computada.

2.1.3.3 NBR 15.575-5 Edificações habitacionais – Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas

Os requisitos e critérios necessários para a verificação dos níveis mínimos de desempenho térmico de cobertura pelo Procedimento Simplificado são apresentados nesta parte da norma. A edificação deve proporcionar desempenho térmico mínimo cumprindo requisito de isolamento térmico da cobertura.

De acordo com as exigências da zona bioclimática em estudo, a cobertura deve apresentar transmitância térmica e absorvância à radiação solar que promovam desempenho térmico requerido. Ao realizar os cálculos pelo método simplificado apresentado na NBR 15.220-2, os resultados obtidos devem ser comparados com os critérios a seguir para que se possa avaliar o nível de desempenho da cobertura.

Os valores máximos admissíveis de transmitância térmica apresentados pela Tabela 9, consideram o fluxo térmico descendente, para cada zona bioclimática. Para as zonas 3 a 8, o valor máximo admissível depende do valor da absorvância à radiação solar da superfície externa da parede.

Tabela 9: Critério - Transmitância térmica das coberturas (NBR 15.575-5)

Nível de desempenho	Transmitância térmica U				
	W/m ² .K				
	Zonas 1 e 2	Zona 3 a 6		Zonas 7 e 8	
Mínimo	$U \leq 2,3$	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$
		$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$	$U \leq 2,3$ FT	$U \leq 1,5$ FT

α é absorptância à radiação solar da superfície externa da cobertura

NOTA O fator de correção da transmitância (FT) é estabelecido na ABNT NBR 15.220-3

2.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A avaliação de desempenho térmico é primeiramente realizada pelo procedimento simplificado, caso a edificação não atenda aos requisitos mínimos estabelecidos, faz-se necessário realizar o procedimento de simulação computacional. Por meio da simulação computacional é possível avaliar o desempenho térmico da edificação de forma global e elaborar propostas de melhorias no projeto da edificação para que passe a atender as exigências humanas de conforto térmico.

2.2.1 Procedimento de simulação computacional (normativo)

Durante a simulação computacional considera-se cada ambiente da edificação como uma zona isolada analisando os efeitos do entorno sobre o ambiente e seu desempenho térmico. Segundo a NBR 15.575-1, a composição dos materiais da habitação para a simulação, deve utilizar os dados das propriedades térmicas dos materiais ou componentes construtivos obtidos em laboratório pelo método de ensaio normatizado. Caso esses dados não estejam disponíveis ou na impossibilidade de obtê-los junto ao fabricante, é permitido utilizar os dados fornecidos pela NBR 15.220-2 como referência. Para os ensaios obtidos em laboratório, recomenda-se a utilização dos métodos apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Métodos de medição de propriedades térmicas de materiais e elementos construtivos (NBR 15.575-1)

Propriedades	Determinação
Condutividade térmica	ASTM C518 ou ASTM C177 ou ISO 8302
Calor específico	Medição ASTM C351 - 92b
Densidade de massa aparente	Medição conforme método de ensaio preferencialmente normatizado, específico para o material
Emissividade	Medição JIS A 1423/ASTM C1371 - 04a
Absortância à radiação solar	Medição ANSI/ASHRAE 74/88 ASTM E1918-06, ASTM E903-06
Resistência ou transmitância térmica de elementos	Medição conforme ABNT NBR 6488 ou cálculo conforme ABNT NBR 15220-2, tomando-se por base valores de condutividade térmica medidos ASTM E903-06
Características fotoenergéticas (vidros)	EN 410 - 1998/EN 12898

Os requisitos normativos estabelecidos pela NBR 15.575-1 referem-se ao desempenho no verão e no inverno. Os critérios para atingir tais requisitos estão relacionados aos valores máximos e mínimos de temperatura e para cada zona bioclimática.

Desempenho térmico de verão

O requisito referente ao desempenho de verão requer que a edificação habitacional apresente condições térmicas em seu interior melhores ou iguais às do ambiente externo, à sombra, para o dia típico de projeto de verão. Dessa forma, a temperatura máxima diária do ar interior dos recintos de permanência prolongada (salas e dormitórios), sem a presença de fontes internas de calor (ocupantes, lâmpadas, outros equipamentos em geral), deve ser sempre menor ou igual a temperatura máxima diária do ar exterior conforme a Equação 21

$$T_{i,máx} \leq T_{e,máx} \quad (21)$$

Desempenho térmico de inverno

O desempenho de inverno requer que o edifício apresente condições térmicas no seu interior melhores que do ambiente externo no dia típico de projeto de inverno nas zonas bioclimáticas 1 a 5. Para as zonas 6 a 8, por sua vez, não é necessário realizar avaliação de desempenho térmico de projeto para inverno. Assim, a temperatura mínima diária do ar interior dos recintos de permanência prolongada, salas e dormitórios, deve ser sempre maior ou igual a temperatura mínima externa acrescida 3 °C como exibido na Tabela 11.

Tabela 11: Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno (NBR 15.575-1)

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas bioclimáticas 1 a 5	Zonas bioclimáticas 6 a 8
M	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3 \text{ } ^\circ\text{C})$	Nestas zonas, este critério não pode ser verificado

$T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius;

$T_{e,min}$ é valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius;

NOTA Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3.

3. METODOLOGIA

Foi necessário realizar o estudo sobre os conceitos, metodologias e normativas a respeito de conforto térmico para compreender os procedimentos e requisitos do desempenho térmico. Nesse estudo foi fundamental distinguir as características da zona bioclimática 6 que envolve a maior parte do estado de Goiás. A partir da compreensão do comportamento climático local é possível especificar as estratégias de condicionamento térmico e conseqüentemente quais seriam os materiais a serem empregados em edificações da região a fim de oferecer melhor conforto térmico à edificação.

A avaliação do desempenho térmico em edificações, inicia-se pela aplicação do Procedimento Simplificado, envolvendo o cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes da edificação. Em seguida, analisou-se os dados obtidos, por meio de cálculo, e os comparou com os dados fornecidos pela plataforma nacional, o Projeteee – Projetando Edificações Energéticamente Eficientes, onde é apresentado diversos dados para especificação de materiais para projetos de edifícios eficientes. O Projeteee é uma ferramenta pública que fornece informações sobre dados bioclimáticos de 400 cidades brasileiras, apresenta as estratégias bioclimáticas para cada região, além de apresentar as propriedades térmicas dos componentes construtivos e quais são mais adequados para cada cidade.

A NBR 15.575 exige que seja feita a simulação computacional apenas em casos onde a edificação não atinge o nível de desempenho mínimo calculado pelo Procedimento Simplificado. Para este trabalho foi realizada a Simulação Computacional para todos os casos, independente do resultado do Procedimento anterior, para fins de análise comparativa entre materiais e metodologias.

A Simulação Computacional foi executada por meio do programa *DesignBuilder* para uma edificação levando em conta as quatro possibilidades de materiais compondo as paredes da edificação considerando: a mesma localização geográfica, as mesmas condições climáticas externas, mesmas condições de uso de equipamentos e nível de atividade realizada no interior da edificação para todos os modelos.

Ao iniciar a Simulação Computacional no *software DesignBuilder*, é preciso inserir dados de entrada. Para obter esses dados, foi necessário realizar o levantamento das informações climáticas da cidade e estado em estudo, das informações gerais sobre a edificação, realizar o levantamento das informações sobre as propriedades térmicas dos materiais e componentes da edificação. Os dados de saída do programa necessários para a análise são os

ganhos de calor devido à radiação solar, à condução em regime transitório, às fontes de calor internas, às trocas de massas de ar e às cargas térmicas de condicionamento e/ou as temperaturas do ambiente.

Os Fluxogramas apresentados nas Figuras 4 e 5 apresentam um passo a passo da metodologia para realizar o Procedimento Simplificado e a Simulação Computacional, respectivamente.

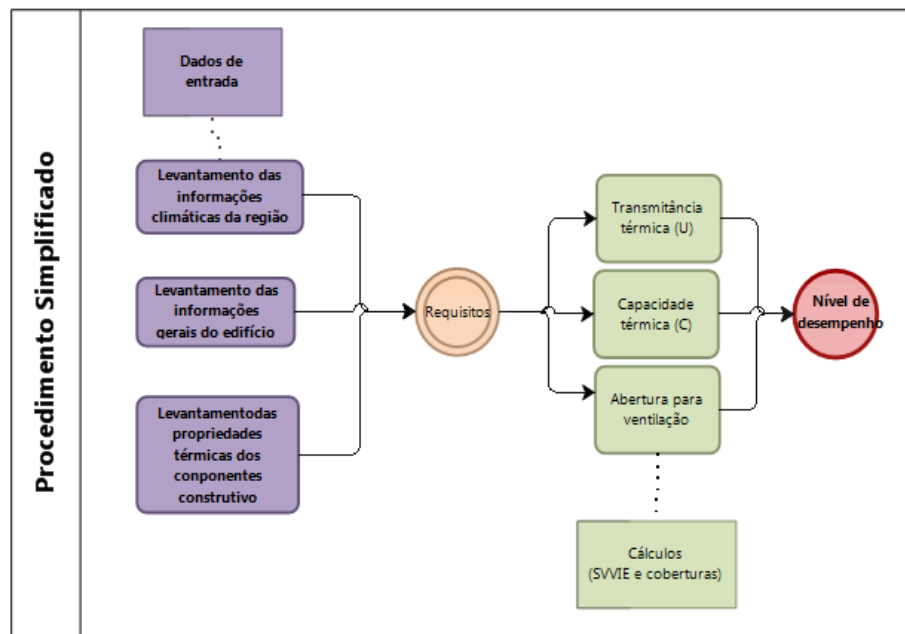


Figura 4: Fluxograma do Procedimento Simplificado

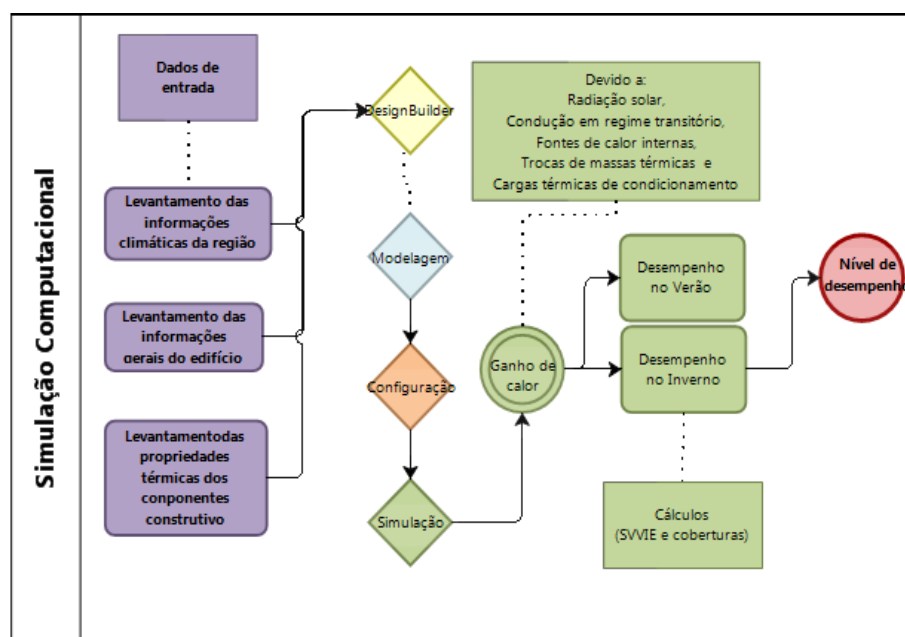


Figura 5: Fluxograma da Simulação Computacional

Semelhante ao Procedimento Simplificado, na Simulação Computacional foi aplicado para a edificação composta por alvenaria convencional (blocos cerâmicos de 8 furos). E em seguida replicado para outros materiais tais como, tijolos maciços aparente e concreto. A Figura 6 apresenta o passo a passo dos procedimentos realizados durante a Simulação Computacional.

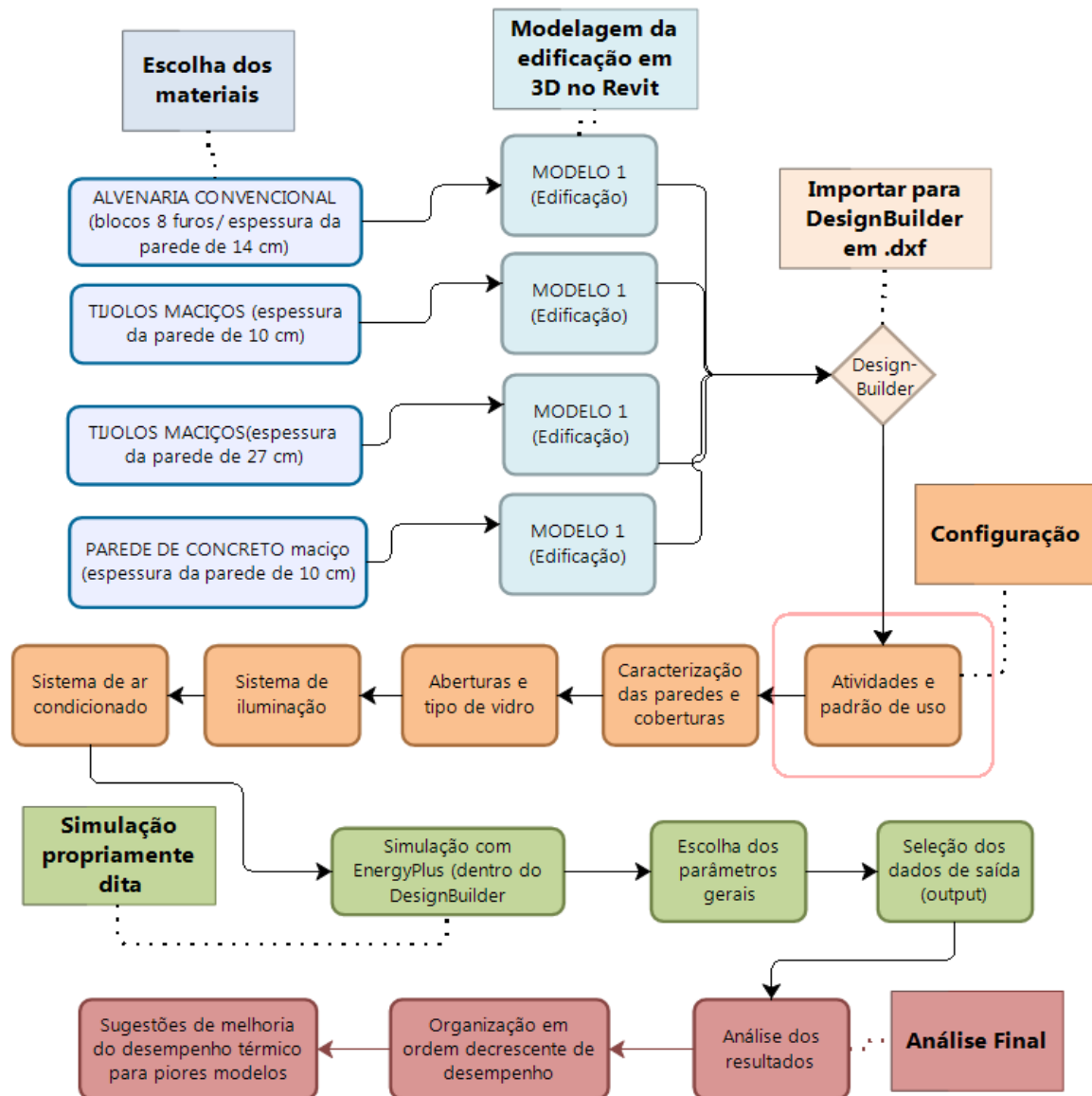


Figura 6: Fluxograma da simulação computacional

Finalmente foram analisados os resultados obtidos para cada material e distinguiu-se os materiais que promoveram melhor desempenho térmico à edificação segundo o nível de desempenho estabelecidos nas normas de referência. Segue o passo a passo da metodologia de trabalho:

1. Pesquisa bibliográfica em livros, normas técnicas, manuais relacionados ao tema;
2. Caracterização da zona bioclimática da qual o empreendimento do projeto em estudo será construído;
3. Seleção e caracterização da edificação para realização do estudo;
4. Cálculo da Transmitância térmica e Capacidade térmica das paredes segundo o procedimento simplificado (normativo);
5. Seleção dos sistemas de vedação vertical e cobertura para simulação segundo procedimento das normas de desempenho (NBR 15.575 e NBR 15.220).
6. Avaliação detalhada por meio da simulação por programa *DesignBuilder* – (Procedimento normativo);
7. Análise comparativa dos resultados

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

A cidade de Goiânia, capital do Estado de Goiás, encontra-se na região Centro-Oeste brasileira, na latitude 16°41' sul e longitude 49°17'. Localizada em um planalto de altitudes médias entre 600 e 1000 m e, a altitude da cidade oscila na faixa dos 700 m. A região de Goiânia localiza-se entre a zona tropical e a subtropical, muito distante do litoral oceânico. O enquadramento climático da cidade não se encontra entre as duas divisões clássicas de climas quentes, sendo eles: quente e úmido ou quente e seco. Devido um conjunto de características peculiares do local, o clima de Goiânia e da região ao seu redor é um clima composto (FERNANDES, 2007)

Quanto ao clima, Goiânia apresenta duas características significativas: a continentalidade e a grande regularidade do processo cíclico dos deslocamentos das massas de ar. A primeira relaciona-se ao fato da capital goiana estar muito afastada do litoral atlântico. (FERNANDES, 2006)

Ao longo do ano, a oscilação térmica de Goiânia é de 8,4 °C. As curvas das temperaturas na Figura 6 expressam a média das máximas variam 3,7 °C entre os meses de dezembro (28,3 °C) e setembro (32,0 °C); a temperatura média anual varia 4,8 °C, de julho (18,8 °C) a outubro (23,6 °C); e, a média das mínimas 8,4 °C entre julho (9,8 °C) e dezembro (18,2 °C). Dessa forma, a capital apresenta calor à tarde durante o ano inteiro e frio apenas de madrugada durante os meses da estação seca (de maio a agosto) (FERNANDES, 2007).

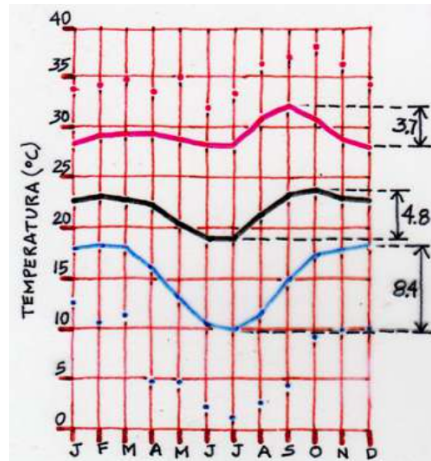


Figura 7: Temperaturas médias, médias das máximas e médias das mínimas (FERNANDES, 2006)

Clima e adequação da arquitetura

As características climáticas de maior destaque em relação ao clima da região de Goiânia e adequação da arquitetura são a amplitude térmica diária elevada, em especial no período da seca; a temperatura e umidade relativa elevadas no período das chuvas; e, a radiação solar global elevada e constante o ano inteiro. Essa atenção se deve ao fato desses fatores influenciarem a necessidade de inércia térmica da construção, ventilação intensiva e sombreamento eficiente (FERNANDES, 2007).

A amplitude térmica diária média apresenta uma significativa oscilação longo do ano (ver Figura 8). No período chuvoso varia entre 10 °C e 12 °C, enquanto, nos meses da estação seca, permanece acima de 16 °C, com pico em agosto (mês mais seco, com 19 °C de amplitude térmica). Uma edificação considerável inércia térmica apresenta notáveis efeitos positivos para o período de junho a outubro, principalmente em agosto que apresenta a maior variação diária de temperaturas (em média 19,4 °C) e a umidade relativa média mais baixa do ano (51,6 %) (FERNANDES, 2007)

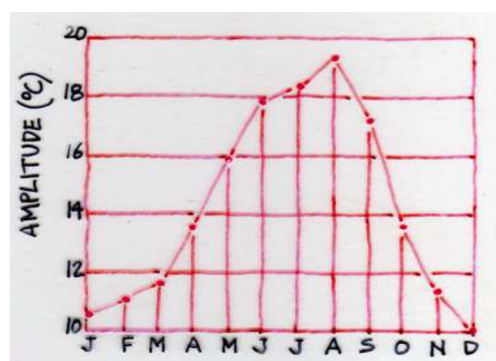


Figura 8: Amplitude térmica diária (FERNANDES, 2006)

As temperaturas mais elevadas do ano ocorrem durante a primavera, no final do período seco, início do chuvoso (setembro e outubro), quando o sol passa pelo paralelo local. A umidade relativa do ar (UR) acompanha a mudança das chuvas mas num ritmo ligeiramente mais lento. Enquanto as chuvas reduzem rapidamente, a umidade cai mais lentamente, o mesmo acontece na transição da seca para as chuvas, a umidade aumenta no mesmo ritmo. Nesse período, o vento sopra principalmente de leste e sudeste, chegando à região com baixo teor de umidade. Devido a esses valores de clima desértico no mês de agosto, e meses de junho e julho (de pouca chuva) é importante que a edificação seja projetada para promover uma ventilação intensiva para promover conforto térmico para esses períodos do ano (FERNANDES, 2007).

Além disso, vale observar os dados de nebulosidade, insolação e radiação e, a radiação solar global elevada e constante o ano inteiro conforme a Tabela 12, devido sua influência no sombreamento necessário da edificação.

Tabela 12: Nebulosidade (N), %; Insolação (I), h/mês; Radiação (R), w/m².dia (FERNANDES,2006)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
N	80	77	74	60	49	43	38	34	50	67	78	80
I	177	162	188	233	267	275	88	299	11	207	178	161
R	385	3148	2451	3120	3077	2708	3301	3473	3198	2871	3077	3361

Na latitude de Goiânia, a diferença aproximada entre a duração do dia no período do solstício de inverno, em junho, e a duração do solstício de verão é de duas horas. Dessa forma, pode-se perceber que o período de insolação no verão é maior que no inverno. Quando os dias são menores, há menos nuvens, logo, muito sol, com radiação direta de aproximadamente 70% da global. Quando os dias são maiores, tem-se mais nuvens e menos sol direto, com radiação direta de cerca de 35% da global. O sombreamento eficiente da edificação começa pela sua orientação e forma, segue pela cobertura, paredes exteriores e envidraçados planejados cuidadosamente (FERNANDES, 2007).

Zona bioclimática local

De acordo com a NBR 15.220-3, o Brasil é dividido em 8 Zonas bioclimáticas, sabendo que Goiânia pertence a Zona Bioclimática 6 (Figura 9), a Carta Bioclimática apresentada pela Figura 10 é válida para essa capital.

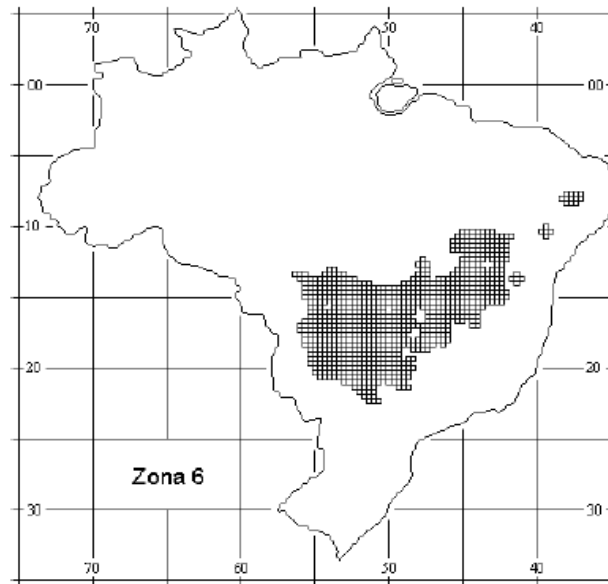


Figura 9: Zona Bioclimática 6 (NBR 15.220-3)

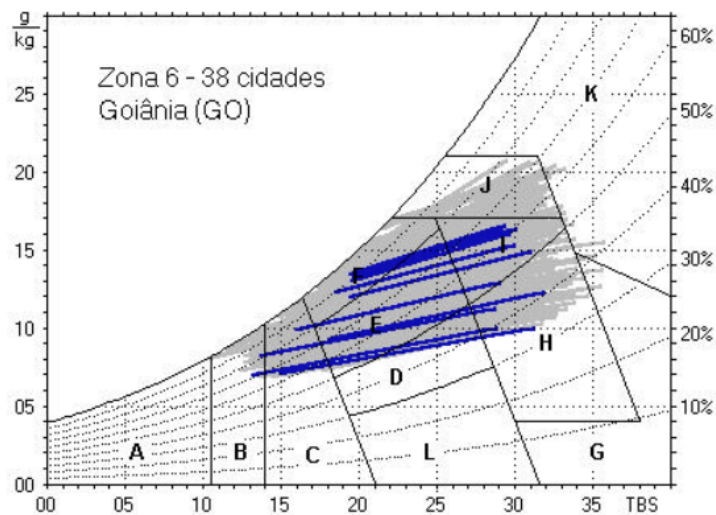


Figura 10: Carta Bioclimática para Zona 6 (NBR 15.5220-3)

Ao distinguir a zona bioclimática na qual a cidade pertence é possível identificar as características da envoltória mais adequadas para as edificações da região. As diretrizes construtivas para edifícios pertencentes a essa Zona estão apresentadas na Tabela 13 a seguir:

Tabela 13: Diretrizes construtivas para Zona bioclimática 6 (ABNT NBR 15.220)

Categoria	Diretriz	
Aberturas para ventilação	Médias	
Sombreamento das aberturas	Sombrear aberturas	
Vedações externas	Parede	Pesada
	Cobertura	Leve isolada

Os efeitos positivos das diretrizes construtivas apresentadas na Tabela 13 são potencializados ao aliá-las às estratégias de condicionamento térmico passivo descritos na Tabela 14. É comum observar pessoas que acreditam que a única solução para promover conforto térmico em edificações seja o emprego de equipamentos de resfriamento artificial. Mas edificações que são projetadas respeitando as reais exigências da edificação segundo o clima local, apresentam estratégias de condicionamento térmico passivo. Ao projetar e construir segundo as orientações normativas é possível oferecer soluções que promovem melhor conforto térmico e eficiência energética.

As estratégias de condicionamento térmico passivo para a zona bioclimática 6 envolve o resfriamento evaporativo, massa térmica para resfriamento e ventilação seletiva para proporcionar conforto térmico no verão e vedações internas pesadas para o inverno.

Tabela 14: Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 6 (ABNT NBR 15.220)

Estação	Estratégias de condicionamento térmico passivo
Verão	H) Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento
	J) Ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa)
Inverno	C) Vedações internas pesadas (inércia térmica)

Dados bioclimáticos

Para realizar a simulação computacional no software DesignBuilder é necessário, primeiro, inserir os dados bioclimáticos do local de estudo. É por meio desses dados que o programa tem condições de conhecer o comportamento térmico do local de estudo ao longo do ano. Quando não se possui dados bioclimáticos da cidade com edificação sob análise, utiliza-

se os arquivos climáticos da cidade mais próxima que possui tais dados. Devido à falta desses dados para o município de Goiânia, utilizou-se os dados bioclimáticos da cidade mais próxima: Pires do Rio – GO.

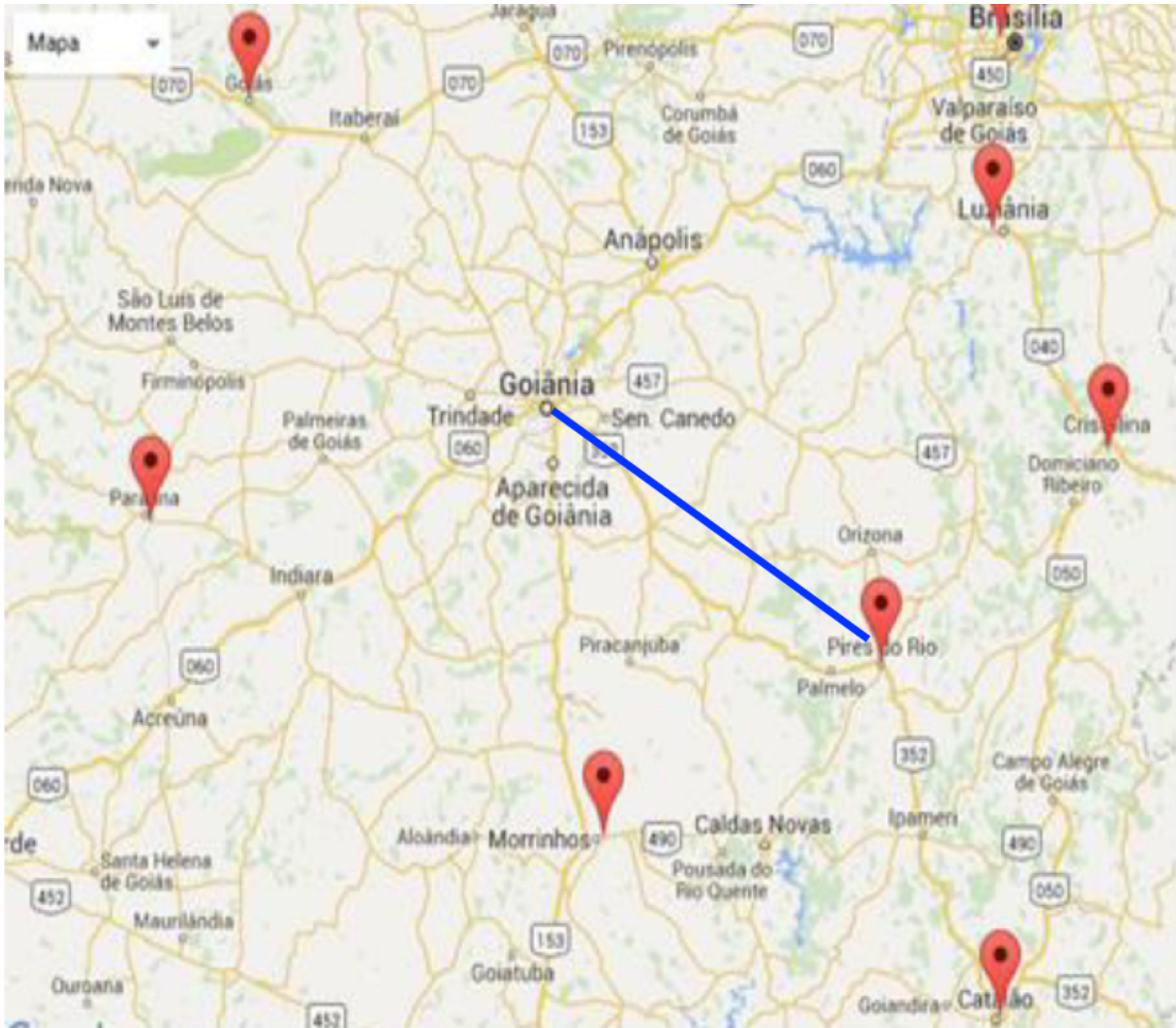


Figura 11: Cidades próximas à Goiânia-GO com arquivos EPW disponíveis (LABEEE – USFC)

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO EM ESTUDO

A análise comparativa do desempenho térmico foi realizada para uma edificação residencial unifamiliar de 50,69 m² localizada em Goiânia-GO. A residência popular estudada contém dois quartos, de 9,40 m² e 14,44 m², uma sala de 15,85 m², cozinha de 11,00 m². As Figuras 10, a 16 apresentam o layout, planta baixa, cortes transversais e longitudinais, fachadas e vista em 3D.



Figura 12: Vista 3D da edificação em estudo – Fachada sul-leste

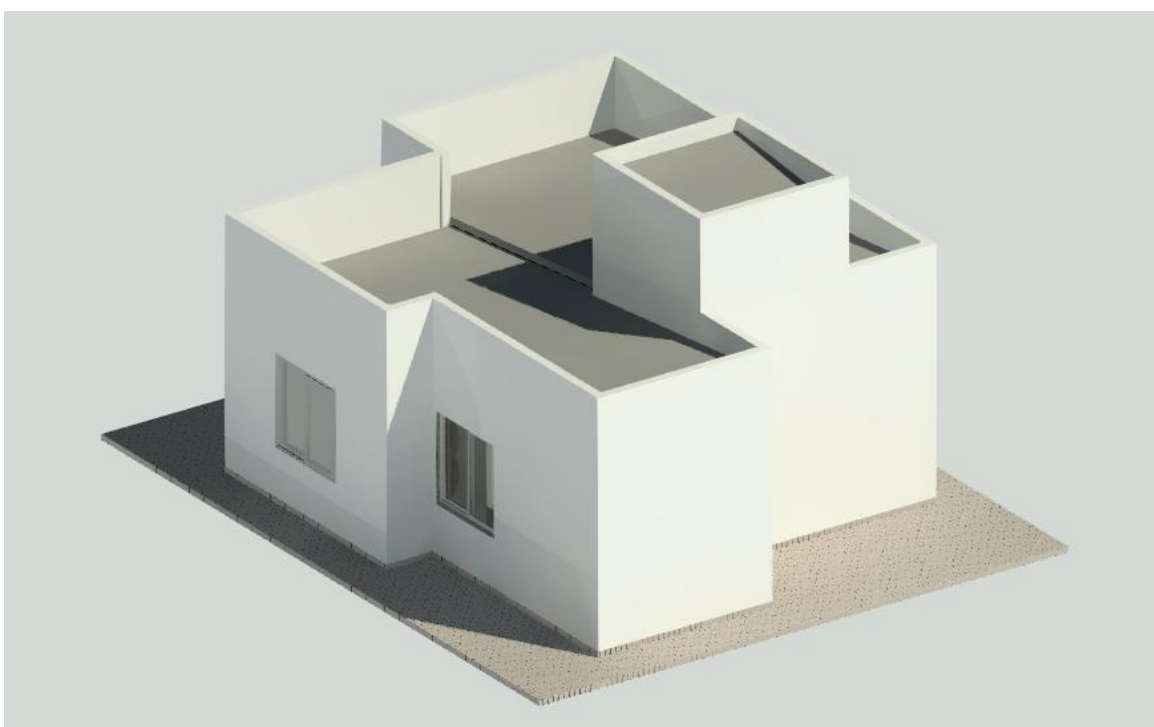
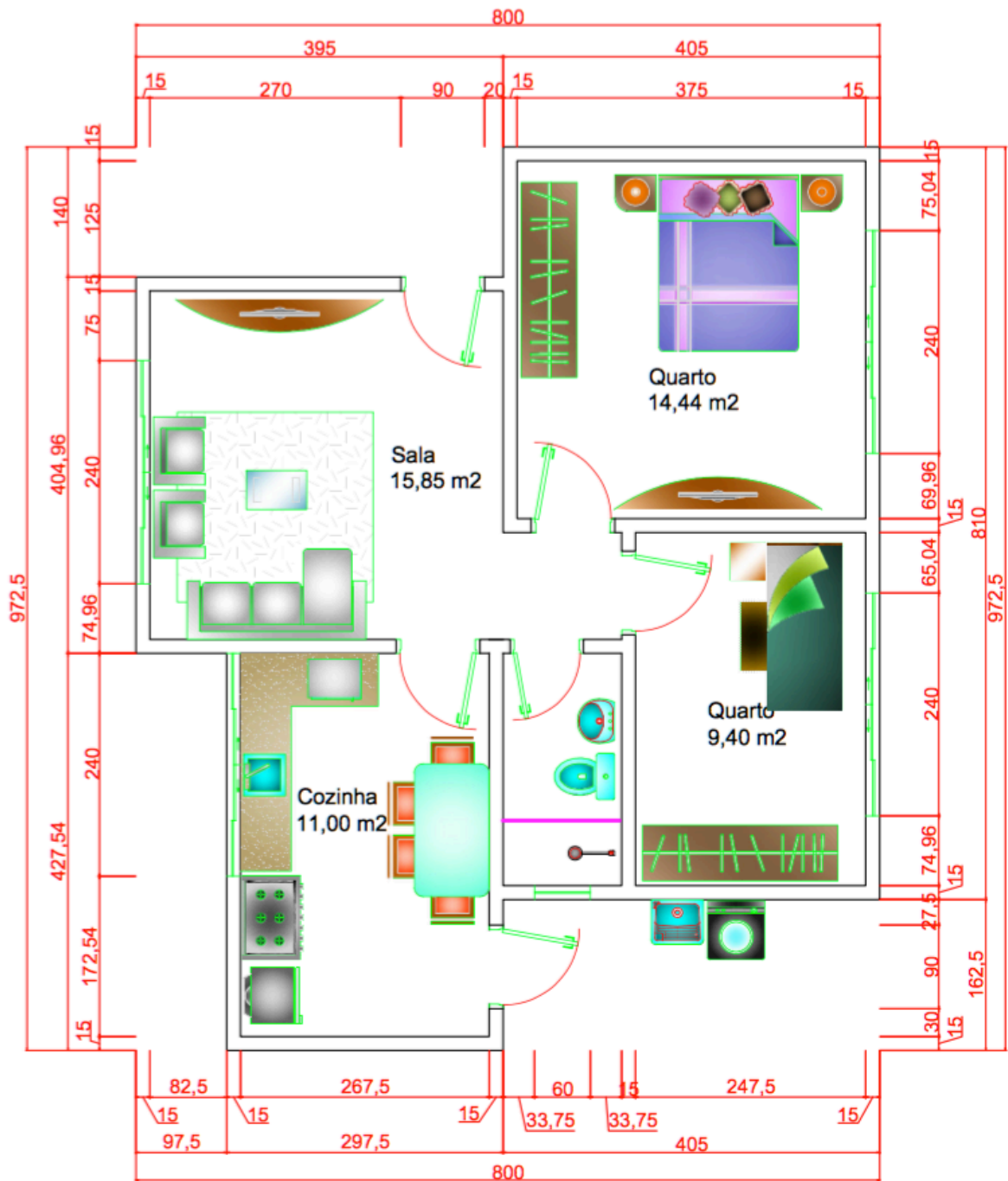


Figura 13: Vista 3D da edificação em estudo – Fachada norte-oeste



1 **Planta baixa**

ESCALA: 0 50 100 150 cm

N

Figura 14: Planta baixa da edificação em estudo

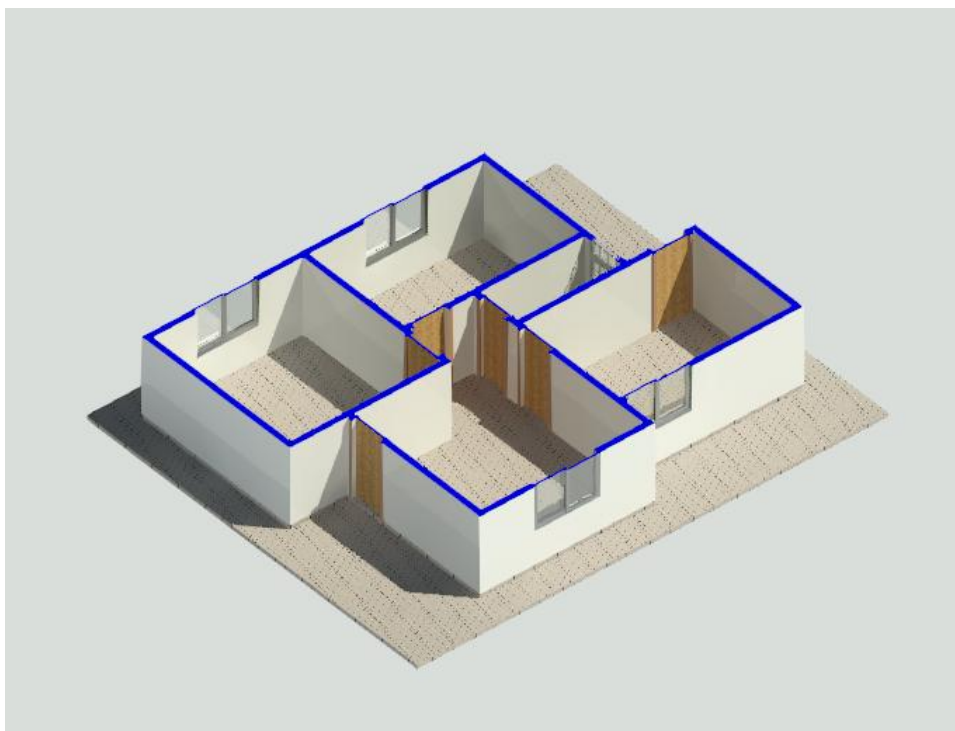


Figura 15: Corte da edificação em estudo

3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS EM ESTUDO

O procedimento simplificado considera as propriedades dos materiais para o cálculo da transmitância e capacidade térmica. Sendo assim, primeiramente, serão identificadas as propriedades térmicas dos materiais definidos em projeto para compor as paredes da edificação. Tais como a densidade de massa aparente (ρ), a condutividade térmica (λ), o calor específico (c) e espessura (e) dos materiais. As propriedades térmicas dos materiais escolhidos foram obtidos a partir do Anexo B da NBR 15.220, estão apresentados pela Tabela 15 a seguir:

Tabela 15: Propriedade dos materiais (ABNT NBR 15.220)

Material	ρ (kg/m³)	λ (W/(m.K))	c (kJ/(kg.K))
Argamassa comum	1800-2100	1,150	1,00
Tijolos e telhas de barro	1300-1600	0,700	0,92
Concreto normal	2200-2400	1,750	1,00
Placa de gesso; gesso acartonado	750-1000	0,350	0,84

Os materiais escolhidos para compor a envoltória da edificação foram: alvenaria convencional (argamassa interna 2,5 cm / bloco cerâmico 9x14x24 cm / argamassa externa 2,5 cm), alvenaria estrutural (gesso interno 0,2 cm / bloco concreto 14x19x39 cm / argamassa externa 2,5 cm), tijolo cerâmico maciço (6x9x19 cm) e parede de concreto (concreto maciço 10 cm). para compor as paredes da edificação. A cobertura escolhida é composta por três materiais: telha fibrocimento e forro pré-moldado com cesso. Diferentemente dos materiais das paredes, foi escolhido somente um tipo de cobertura pois o objetivo do trabalho é avaliar a influência da troca do material das paredes da edificação. Para que a avaliação seja mais simplificada, foi necessário manter o material da cobertura fixa para variar somente a composição das paredes no estudo da envoltória.

3.3 CÁLCULO DA TRANSMITÂNCIA TÉRMICA E CAPACIDADE TÉRMICA – PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO

O procedimento simplificado é realizado com base na transmitância térmica e capacidade térmica para a zona bioclimática em estudo, definida na ABNT NBR 15.220-3.

Tabela 16: Critérios de avaliação pelo procedimento simplificado

Requisito	Critério	Método de avaliação	Nível de desempenho
Adequação de paredes externas	Transmitância térmica de paredes externas	Conforme NBR 15.220-2	Nível mínimo de aceitação é o M (mínimo)
	Capacidade térmica de paredes externas	Conforme NBR 15.220-2	Nível mínimo de aceitação é o M (mínimo) / Tabela 14 NBR 15.575-4
Aberturas para ventilação	Área mínima de ventilação em dormitórios e salas de estar	Análise do projeto arquitetônico / Área efetiva	Nível mínimo de aceitação é o M (mínimo)

Com as propriedades térmicas de cada material que irá compor a envoltória da

edificação, pode-se calcular a Resistência térmica de cada camada pela Equação 3, a Transmitância térmica pela Equação 6 e a Capacidade térmica dos componentes construtivos pela Equação 8. Tais cálculos referentes ao procedimento simplificado serão realizados por meio de planilhas de cálculo Excel.

Em seguida, o procedimento de cálculo será replicado para os modelos que contêm outros materiais na composição das paredes. Caso a edificação não atenda os requisitos mínimos descritos pelo procedimento simplificado. O fluxo da verificação dos requisitos pode ser representado pelo fluxograma fornecido no guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013 da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) conforme a Figura 16.

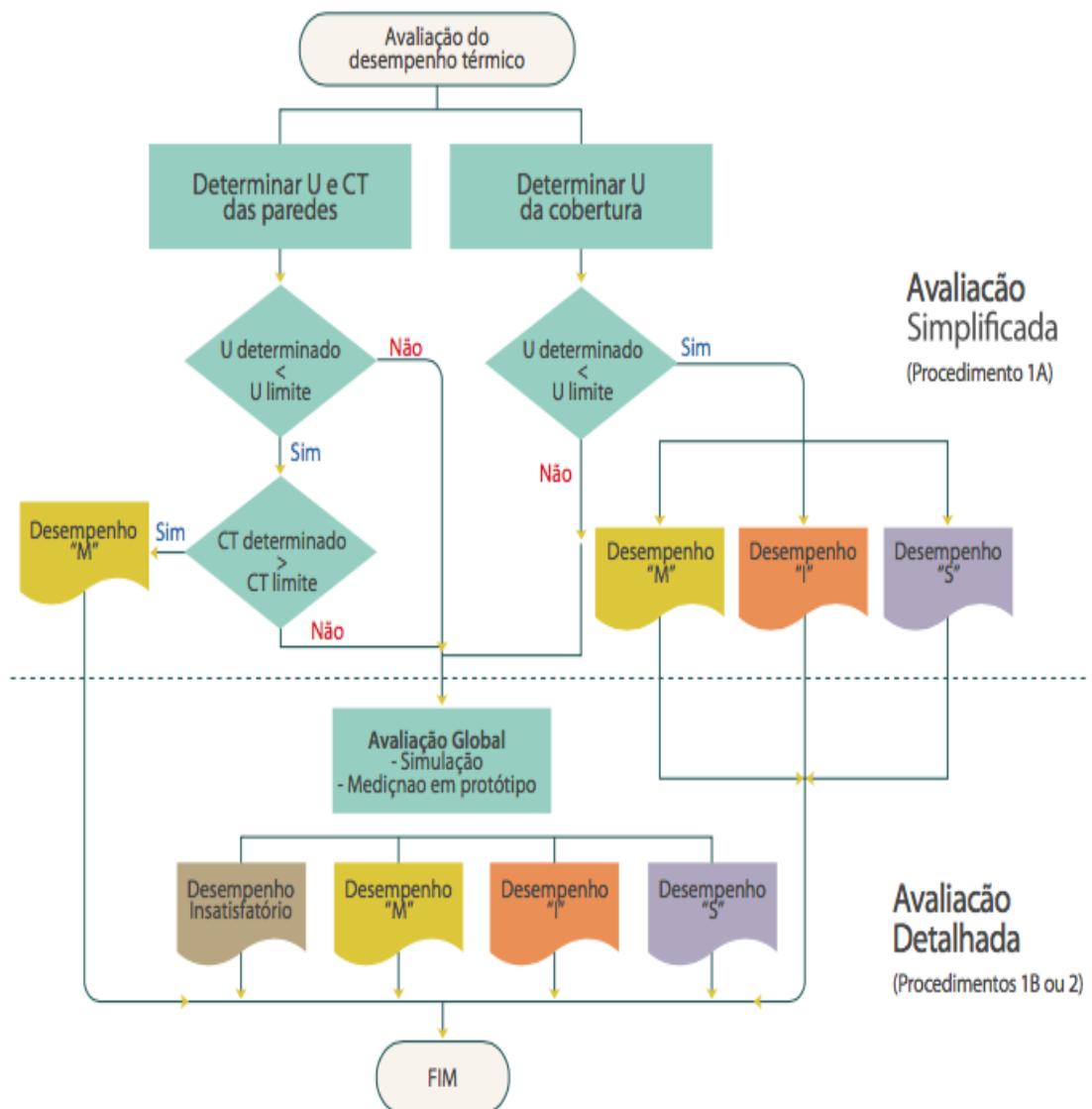


Figura 16: Fluxograma das alternativas para avaliação do desempenho térmico (CBIC)

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS – PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO

Após a realização dos cálculos do procedimento simplificado, é preciso analisar se os materiais do componente construtivo atenderam aos requisitos exigidos em norma. Na Tabela 17 apresenta de forma resumida os valores máximos admissíveis para transmitância térmica, valores mínimos admissíveis para a capacidade térmica segundo o valor da absorptância solar da superfície externa do componente.

Tabela 17: Requisitos de absorptância solar, transmitância térmica e capacidade

Zona Bioclimática	Componente	Absortância solar (adimensional)	Transmitância térmica [W/(m ² K)]	Capacidade térmica [kJ/(m ² K)]
Zona 6	Parede	$\alpha \leq 0,6$	$U \leq 3,70$	$CT \geq 130$
		$\alpha > 0,6$	$U \leq 2,50$	$CT \geq 130$
	Cobertura	$\alpha \leq 0,6$	$U \leq 2,30$	Sem exigência
		$\alpha > 0,6$	$U \leq 1,50$	Sem exigência

Quando os componentes da edificação não atendem aos requisitos requeridos pelo procedimento simplificado é necessário realizar a simulação computacional.

3.5 MODELAGEM DA EDIFICAÇÃO – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Até o procedimento anterior foi possível realizar os cálculos e análises apenas com a planta baixa, cortes, vistas e memorial descritivo da edificação. Para simulação computacional por sua vez, é necessário que se realize a representação da edificação em três dimensões, em seguida se adicione os parâmetros que influenciam o desempenho térmico, para só então iniciar a simulação propriamente dita.

A norma NBR 15.575 recomenda que a simulação computacional seja realizada por meio do programa *EnergyPlus*, um programa gratuito, disponível para *download*, que possibilita todas as análises necessárias para avaliar o desempenho térmico dos ambientes e da edificação. A norma também permite o uso de outro *software* para a realização da simulação

computacional desde de que permita a determinação do comportamento térmico de edificações sob condições dinâmicas de exposição ao clima, sendo capaz e reproduzir os efeitos de inércia e validados pela ASHRAE Standard 140.

Como o programa *EnergyPlus* apresenta interface pouco intuitiva, amigável e visual, optou-se por realizar a simulação computacional utilizando-se o *software DesignBuilder*. Esse software, por sua vez, apresenta uma interface onde é possível visualizar a edificação completa e por ambientes para análise do desempenho térmico. Além disso, o *Designbuilder* utiliza o *EnergyPlus* para realização os cálculos, oferecendo assim maior confiança dos cálculos e facilidade de interpretação dos resultados.

O fluxograma exposto na Figura 17 mostra as características requeridas em norma para que outro programa seja utilizado para simulação computacional em substituição ao *EnergyPlus*.

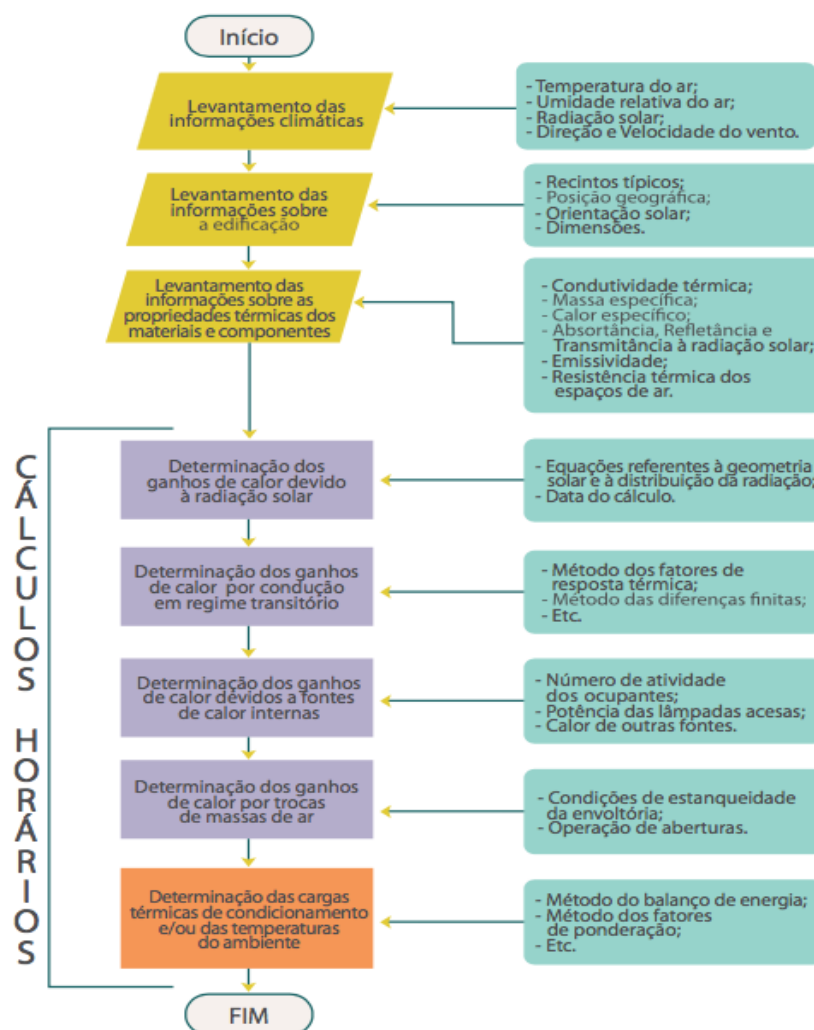


Figura 17: Características necessárias para softwares de avaliação do desempenho térmico (CBIC)

Devido a complexidade de modelar a edificação no próprio *DesignBuilder* será utilizado outro programa para modelagem da edificação em 3D, o Revit. E em seguida, o arquivo será importado na extensão .gbXML para o DesignBuilder para continuação do processo.

3.6 CÁLCULO DOS VALORES MÁXIMOS DE TEMPERATURA – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os cálculos realizados pelo *software DesignBuilder* envolvem a determinação dos ganhos de calor devido à radiação solar, dos ganhos de calor por condução em regime transitório, dos ganhos de calor devidos a fontes de calor internas, dos ganhos de calor por trocas de massas de ar, das cargas térmicas de condicionamento e/ou as temperaturas do ambiente.

Ao final o procedimento será repetido para os demais materiais formando novos modelos para comparar o desempenho entre eles e o requerido em norma.

3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Através da realização da simulação computacional, será possível analisar quais modelos apresentam sistemas de vedação vertical interno e externo (SVVIE) atendem aos requisitos exigidos em norma e ordená-los em ordem decrescente de desempenho. Essa análise e distinção pode ser realizada por meio do nível de desempenho \ apresentado nas Tabelas 18 e 19. O nível de desempenho mínimo aceitável por norma é o mínimo (M), para que o usuário desfrute de maior conforto térmico, recomenda-se para os níveis intermediário (I) e superior (S).

Tabela 18: Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão (NBR 15.575-1)

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas bioclimáticas 1 a 5	Zonas bioclimáticas 6 a 8
M	$T_{i,\min} \leq T_{e,\min}$	$T_{i,\min} \leq T_{e,\min}$
I	$T_{i,\min} \leq (T_{e,\min} - 2 \text{ } ^\circ\text{C})$	$T_{i,\min} \leq (T_{e,\min} - 1 \text{ } ^\circ\text{C})$
S	$T_{i,\min} \leq (T_{e,\min} - 4 \text{ } ^\circ\text{C})$	$T_{i,\min} \leq (T_{e,\min} - 2 \text{ } ^\circ\text{C})$

Sendo, o desempenho térmico mínimo, intermediário e superior: M, I e S, respectivamente;

$T_{i,\min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus; Celsius;

$T_{e,\min}$ é valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus; Celsius;

NOTA Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3.

Tabela 19: Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno (NBR 15.575-1)

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas bioclimáticas 1 a 5	Zonas bioclimáticas 6 a 8
M	$T_{i,\min} \geq (T_{e,\min} + 3 \text{ } ^\circ\text{C})$	Nestas zonas, este critério não pode ser verificado
I	$T_{i,\min} \geq (T_{e,\min} + 5 \text{ } ^\circ\text{C})$	
S	$T_{i,\min} \geq (T_{e,\min} + 7 \text{ } ^\circ\text{C})$	

Sendo, o desempenho térmico mínimo, intermediário e superior: M, I e S, respectivamente;

$T_{i,\min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus; Celsius;

$T_{e,\min}$ é valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus; Celsius;

NOTA Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3.

Através dessa análise é possível visualizar quais seriam as melhores alternativas de materiais mais indicados para compor a parede a fim de resultar o melhor nível de desempenho térmico.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO

Realizou-se a análise comparativa do desempenho térmico que quatro componentes construtivos podem promover se aplicados na construção das paredes de uma edificação residencial localizada em Goiânia. Os materiais usados foram: alvenaria convencional (argamassa interna 2,5 cm / bloco cerâmico 9x14x24 cm / argamassa externa 2,5 cm), alvenaria estrutural (gesso interno 0,2 cm / bloco concreto 14x19x39 cm / argamassa externa 2,5 cm), tijolo cerâmico maciço (6x9x19 cm) e parede de concreto (concreto maciço 10 cm). Considerou-se a expressão $\frac{e}{\lambda} = r$ para o cálculo da resistência térmica em cada camada dos componentes construtivos conforme as Tabelas 20, 21, 22 e 23.

Tabela 20: Alvenaria Convencional - 9cm x 14cm x 24cm

Seção	Área (m ²)	Camadas	R _{ar}	R _{seção}	R _{parede}
Seção A	0,0101	reboco + argamassa + reboco	0,16	0,1217	
Seção B	0,0024	reboco + tijolo + reboco	0,16	0,1459	0,2194
Seção C	0,0096	tijolo + câmara de ar + tijolo + câmara de ar + tijolo	0,16	0,3992	

Tabela 21: Alvenaria Estrutural - 14cm x 19cm x 39cm

Seção	Área (m ²)	Camadas	R _{ar}	R _{seção}	R _{parede}
Seção A	0,0038	concreto	-	0,0514	
Seção B	-	-	-	0,0000	0,1312
Seção C	0,03135	concreto + câmara de ar + concreto	0,16	0,1829	

Tabela 22: Tijolos maciços - 6cm x 9cm x 19cm

Seção	Área (m ²)	Camadas	R _{ar}	R _{seção}	R _{parede}
Seção A	0,0026	reboco + argamassa + reboco	0,16	0,1130	0,1301
Seção B	0,0114	reboco + tijolo + reboco	0,16	0,1348	
Seção C	0	-	0,16	0,0000	

Tabela 23: Parede maciça de concreto - 10cm

Seção	Área (m ²)	Camadas	R _{ar}	R _{seção}	R _{parede}
Seção A	0	concreto	-	0,1871	0,1871
Seção B	0		-	0,0000	
Seção C	0	-	-	0,0000	

Posteriormente, aplicou-se o Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações - NBR 15.220-2 Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2003), para os componentes construtivos em estudo.

Tabela 24: Resultados do Procedimento Simplificado

Material	R _{parede} (m ² .K/W)	U (W/m ² .K)	CT (J/K)	φ (h)	FS _o (%)
Alvenaria Convencional	0,39	2,57	160,00	3,60	3,08
Alvenaria estrutural	0,30	3,32	216,00	1,80	3,98
Tijolos maciços	0,30	3,33	220,00	3,30	4,00
Parede de concreto 10cm	0,23	4,40	220,00	2,70	5,28

A resistência térmica (R) do material é a propriedade de resistir à passagem de calor. Dessa forma, observa-se que entre os materiais estudados, a alvenaria convencional é o material que apresenta maior resistência à passagem de calor, a parede de concreto a menor resistência e a alvenaria estrutural e tijolos maciços apresentam mesma resistência.

Inversamente proporcional à resistência tem-se a transmitância térmica (U). Sabendo que a transmitância é a variável de maior relevância durante a análise de conforto térmico, pode-se observar quais são os materiais promovem maior conforto térmico à edificação. Pelos critérios normativos, tem-se que o nível de desempenho mínimo está relacionado aos componentes construtivos que apresentam $U \leq 3,7$ para $\alpha \leq 0,6$ ou $U \leq 2,5$ para $\alpha > 0,6$ para a zona bioclimática 6. O valor de α está relacionado a cor da pintura da parede, definiu-se cores claras (como amarelo e verde claros) para todos os modelos compostos por diferentes materiais. Assim, todos possuem $\alpha < 0,6$, e critério de desempenho mínimo $U \leq 3,7$.

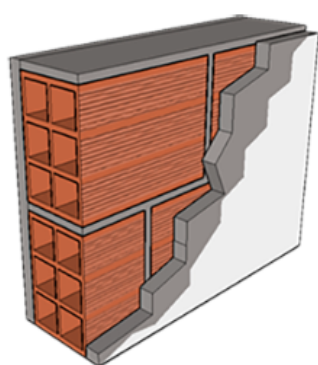
Os componentes construtivos estudados são os mais utilizados para construção de edificações residenciais populares na cidade de Goiânia. Conforme a Tabela 24, três dos quatro

materiais estudados atingiram o nível de desempenho térmico mínimo. O material de melhor desempenho mínimo é a alvenaria convencional com valor de $2,57 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Entre os demais materiais observa-se a semelhança dos valores de transmitância térmica da alvenaria estrutural e tijolos maciços com valores de $0,32 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ e $0,33 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, respectivamente. A parede de concreto de 10 cm de espessura apresentou o pior desempenho térmico com transmitância igual a $4,40 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, não atingindo o desempenho mínimo exigido em norma.

Ressalta-se que a alvenaria convencional é o componente construtivo que mais se aproxima do desempenho térmico mínimo se possuir absorvância à radiação solar (α) maior que 0,6. Ao se permitir valores de $\alpha > 0,6$ mantendo o desempenho térmico mínimo, pode-se aplicar cores mais escuras às fachadas da edificação.

Outro critério apresentado em norma é a capacidade térmica (CT). Essa propriedade indica a maior ou menor capacidade do material reter calor. Todos os materiais superaram os valores mínimos admissíveis por norma ($CT > 120 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$).

Após a realização dos cálculos por meio do procedimento simplificado, levantou-se os dados dos componentes construtivos estudados disponíveis pelo Projeteer - Projetando Edificações Energeticamente Eficientes - para conferir a equivalência dos mesmos com os cálculos realizados no presente trabalho uma vez que são realizados pela mesma metodologia de cálculos. Ver Figuras 18, 19, 20 e 21.



Paredes

Argamassa interna 2.5 cm | Bloco cerâmico 9x14x24 cm | Argamassa Externa 2.5cm

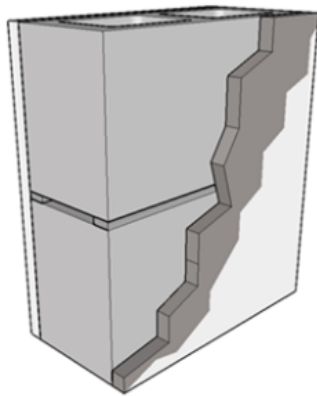
Resistência
0.42 $\text{m}^2\text{K/W}$

Transmitância
2.39 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$

Atraso Térmico
3.3 h

Capacidade Térmica
152 $\text{kJ/m}^2 \cdot \text{K}$

Figura 18: Propriedades físicas: Alvenaria convencional (Fonte: Projeteer)



Paredes

Gesso interno fino 0.2 cm | Bloco concreto 14x19x39 cm | Argamassa Externa 2.5 cm

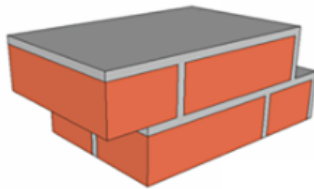
Resistência
0.36 m²K/W

Transmitância
2.78 W/m².K

Atraso Térmico
3.5 h

Capacidade Térmica
193 kJ/m².K

Figura 19: Propriedades físicas: Alvenaria estrutural (Fonte: Projeteee)



Paredes

Tijolo cerâmico maciço 9x6x19 cm

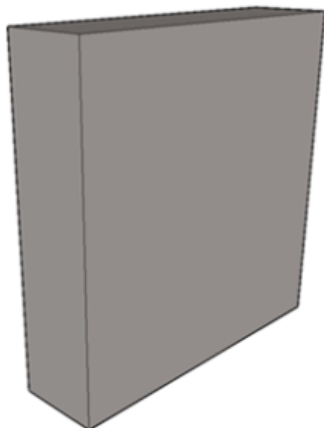
Resistência
0.26 m²K/W

Transmitância
3.80 W/m².K

Atraso Térmico
2.3 h

Capacidade Térmica
142 kJ/m².K

Figura 20: Propriedades físicas: Tijolos maciços aparentes (Fonte: Projeteee)



Paredes

Concreto maciço 10 cm

Resistência
0.23 m²K/W

Transmitância
4.40 W/m².K

Atraso Térmico
2.4 h

Capacidade Térmica
240 kJ/m².K

Figura 21: Propriedades físicas: Parede de concreto – 10 cm de espessura (Fonte: Projeteee)

Ao ter comparado as propriedades dos componentes construtivos, obteve-se

semelhança somente entre os resultados calculados por meio do Procedimento Simplificado durante o presente trabalho e os dados fornecidos pela ferramenta Projeteer. Observou-se certa discrepância entre os valores calculados, valores fornecidos pelo projeteer com os disponíveis para caracterização dos materiais pelo *software* de modelagem em 3D *Revit* conforme apresentado nas Tabelas 25 e 26.

Tabela 25: Comparação de U e R para Alvenaria convencional e estrutural

Material	U (W/m ² .K)		R (m ² .K/W)	
	Projeteer	Cálculo	Projeteer	Cálculo
Alvenaria Convencional	2,39	2,57	0,42	0,39
Alvenaria Estrutural	2,78	3,32	0,36	0,30
Tijolo maciço	3,80	3,33	0,26	0,30
Parede de concreto	4,40	4,40	0,23	0,23

Tabela 26: Comparação de CT e ϕ para tijolos maciços e parede de concreto

Material	CT (J/K)		ϕ (h)	
	Projeteer	Cálculo	Projeteer	Cálculo
Alvenaria Convencional	152	160	3,30	3,60
Alvenaria Estrutural	193	216	3,50	1,80
Tijolo maciço	142	220	2,30	3,30
Parede de concreto	240	240	2,40	2,70

A partir dos resultados obtidos pelo procedimento simplificado e comparações realizadas, pode-se definir quais valores devem ser inseridos no *software* de simulação computacional *DesignBuilder*. Esse programa permite a modelagem em 3D da edificação e caracterização dos materiais que a compõem por meio das ferramentas do próprio *software* e permite também a importação da edificação modelada em outro programa, como o *Revit*. Dessa forma, os dados inseridos para a realização da simulação computacional são os calculados no presente trabalho apresentados na Tabela 28.

4.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

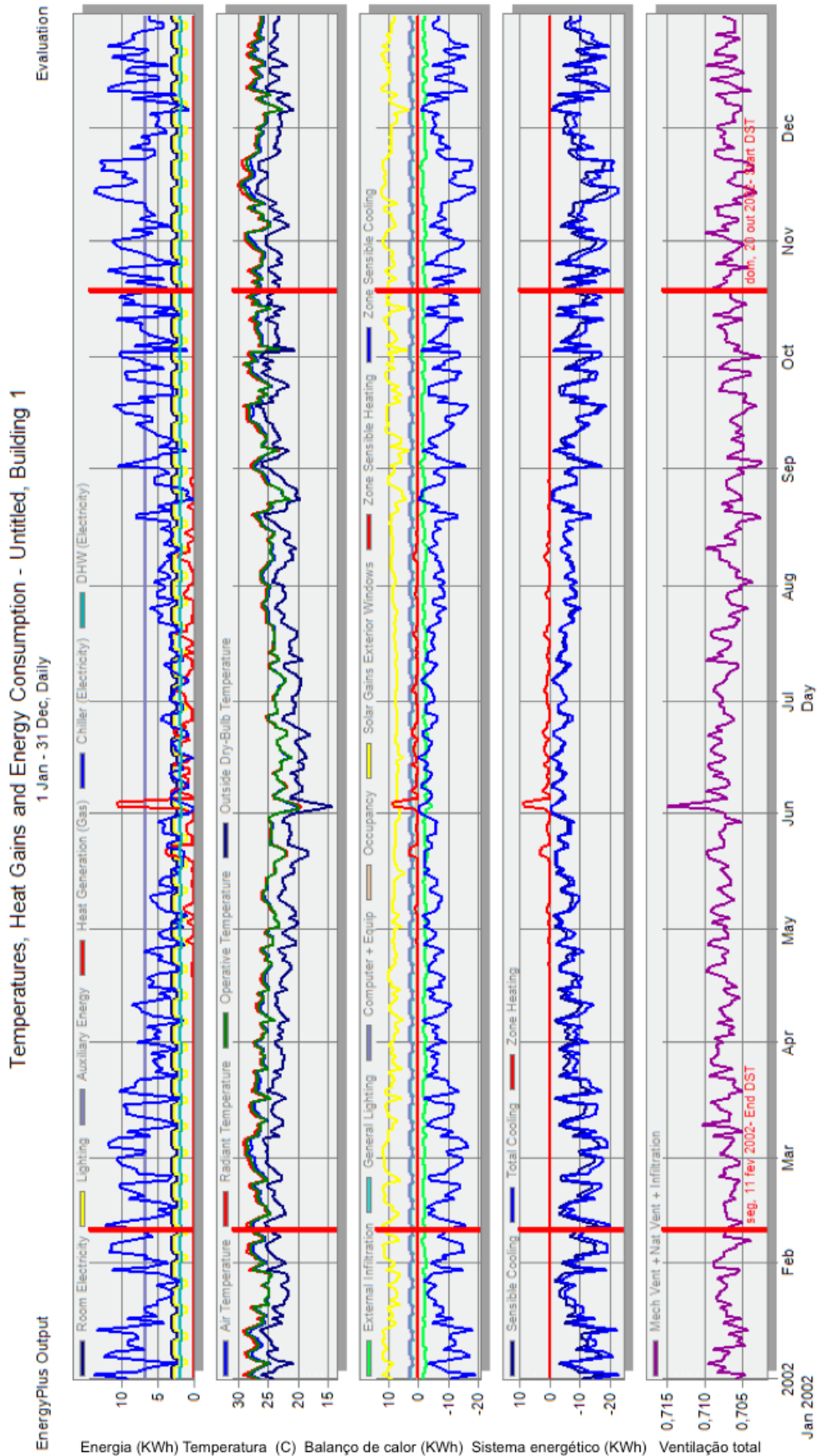
Quando o componente construtivo não atinge o desempenho térmico mínimo estabelecido em norma pelo procedimento simplificado, é necessário realizar a simulação computacional. Na simulação computacional, analisa-se a temperatura interna máxima de verão

e temperatura mínima de inverno da edificação como um todo e de cada ambiente da edificação como uma zona isolada.

Os resultados gerados pela simulação computacional realizados no presente estudo envolvem temperatura, ganhos de calor e consumo de energia. Para as análises selecionadas no *software* de: ambiente, conforto térmico, ganhos de calor, gastos de energia, ar condicionado e fornecimento de ar fresco, foram gerados os gráficos de consumo de energia (kW/h), temperatura balanço de calor (kW/h), sistema energético (kW/h), ventilação total (ac/h), conforme apresentado nas Figuras 22, 23, 24 e 25.

Os critérios para o desempenho térmico exigidos na NBR 15.575-1 se dividem em desempenho térmico de verão e desempenho térmico de inverno. A avaliação de desempenho envolve a temperatura interna e externa da edificação e está relacionada a zona bioclimática do local onde a edificação está inserida. Para a zona bioclimática 6, onde Goiânia está inserida, a norma exige fornece apenas os critérios de desempenho de verão. Dessa forma, o único critério de desempenho é que a temperatura máxima interna seja menor que a temperatura máxima externa durante o verão.

Figura 22: Simulação Computacional da Edificação - Alvenaria Conventional



Energia (KWh) Temperatura (C) Balanço de calor (KWh) Sistema energético (KWh) Ventilação total

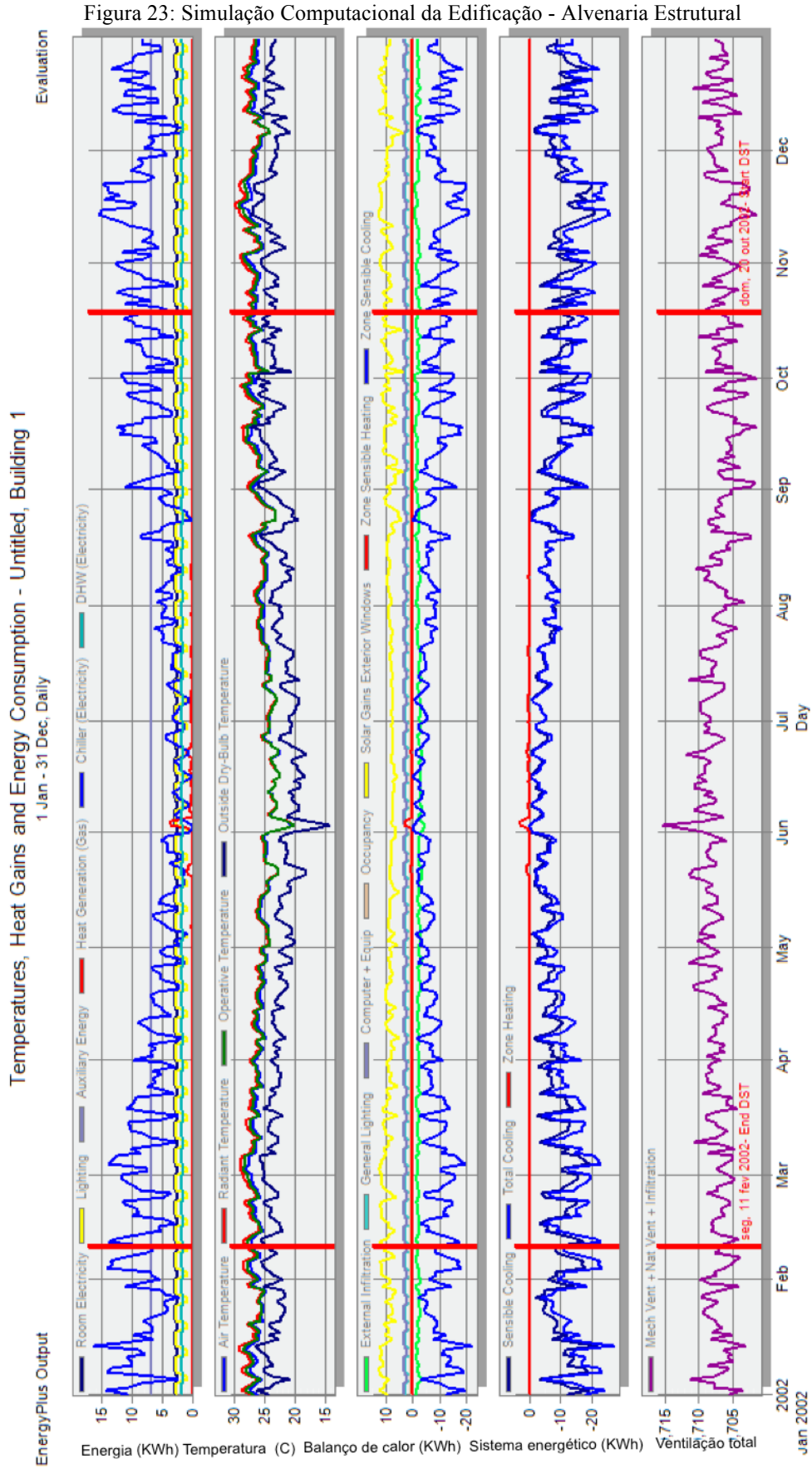


Figura 23: Simulação Computacional da Edificação - Alvenaria Estrutural

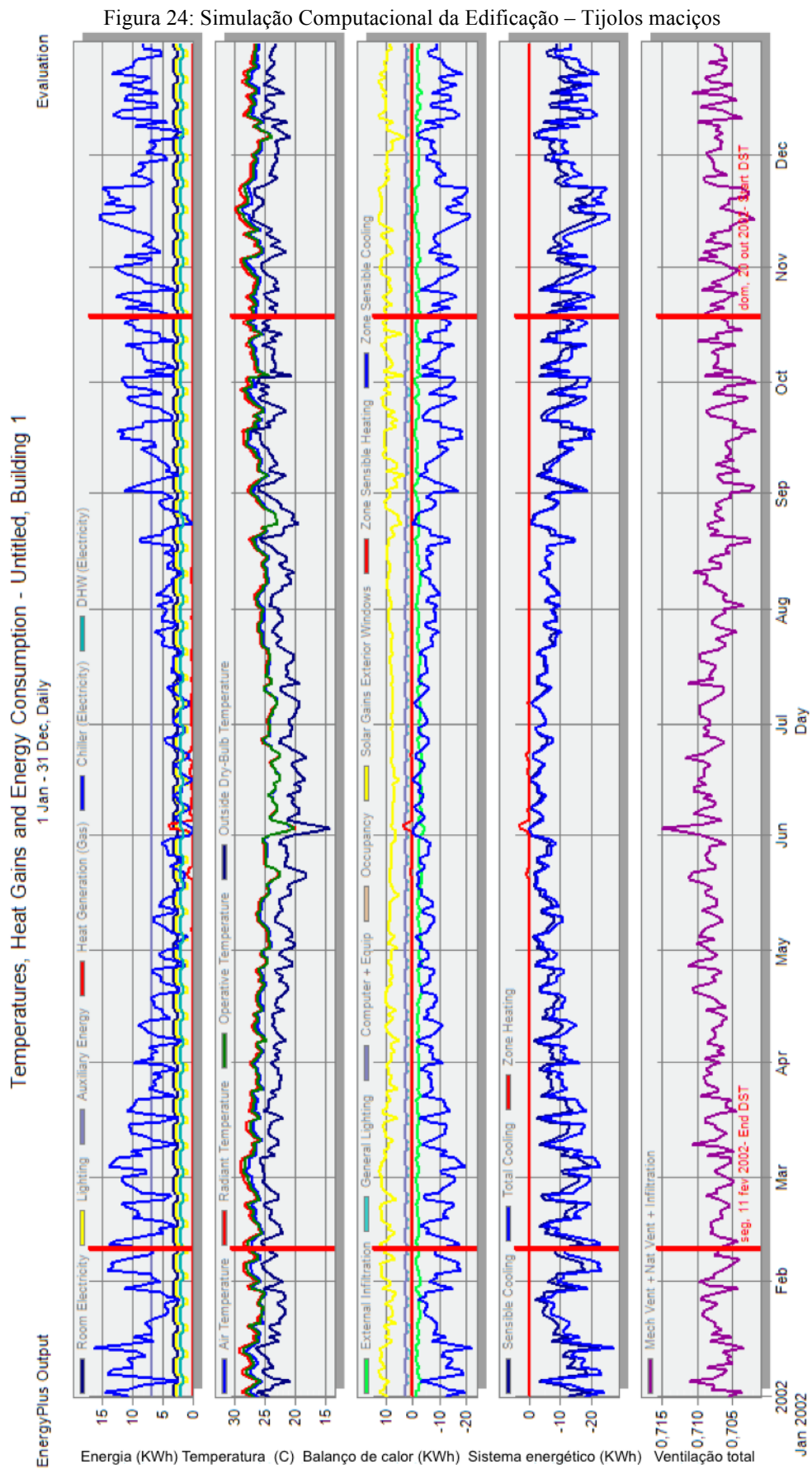
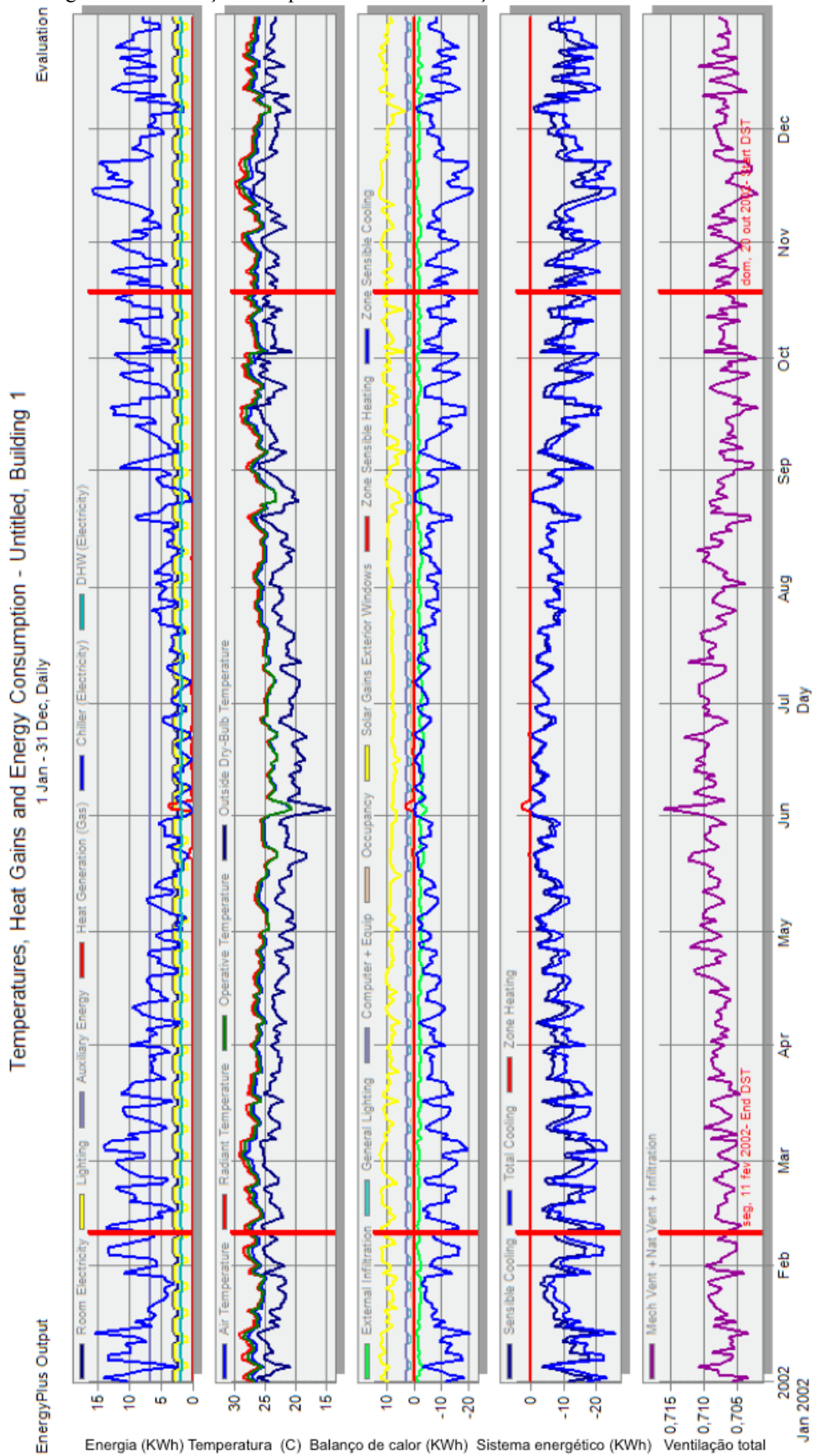


Figura 24: Simulação Computacional da Edificação – Tijolos maciços

Figura 25: Simulação Computacional da Edificação – Parede de concreto – 10 cm



As diretrizes normativas não possuem critérios de desempenho térmico para condições de inverno para as zonas bioclimáticas 6 a 8. Apesar da norma exigir a análise somente do desempenho térmico durante o verão, considera-se necessário analisar o desempenho térmico durante o inverno também, visto que durante esse período há desconforto térmico por frio na cidade de Goiânia. Para as zonas bioclimáticas 1 a 5, o critério para desempenho térmico de inverno rege que a temperatura mínima interna seja 3 °C maior que a temperatura mínima externa.

Analisando o gráfico de Temperatura (°C) apresentados nas Figuras 22, 23, 24 e 25 relativos às edificações com paredes compostas de alvenaria convencional, alvenaria estrutural, tijolos maciços e paredes de concreto, respectivamente, observa-se a sobreposição dos valores das temperaturas do ar, temperatura radiante e temperatura de operação na maior parte do ano. Observa-se também que a temperatura externa do bulbo seco se mantém menor que as demais temperaturas durante o ano todo.

Considerando-se o período de verão de 21 de dezembro a 20 de março e o período de inverno de 21 junho a 22 de setembro conforme os dados bioclimáticos do INMET, destaca-se esses períodos para análise comparativa.

Observa-se que a temperatura interna se manteve mais elevada que a temperatura externa durante o verão e inverno para todos os materiais. A elevada temperatura interna é favorável para promover conforto térmico durante o período de inverno e período noturno mas desfavorável para o período de verão. Dessa forma, os materiais estudados não atingem o nível de desempenho térmico pelos critérios estabelecidos para a simulação computacional.

Além da simulação geral, o *software Designbuilder* fornece informações para projeto de aquecimento e resfriamento da edificação. Por meio da Tabela 27 pode-se observar as temperaturas mínimas nos ambientes da edificação quando construído com os materiais estudados. Os ambientes possuem temperaturas menores quando a edificação é composta de paredes de concreto. Esse resultado se deve ao fato do material apresentar baixa resistência térmica permitindo que o calor saia do ambiente com maior facilidade que os demais materiais.

Tabela 27: Heating Design - Comfort Temperature (°C)

Zone	Alvenaria convencional	Alvenaria estrutural	Tijolos maciços	Parede de concreto
3 Cozinha	16,49	16,4	16,19	16,03
4 Sala de Estar	18,78	18,66	18,65	18,24

5 Quarto 2	16,51	16,2	16,19	16,16
2 Banho	17,1	17,05	16,94	16,84
1 Quarto 1	16,59	16,49	16,29	16,15

CONCLUSÃO

Conclui-se que é fundamental realizar análises comparativas do desempenho térmico que os componentes construtivos promovem às edificações uma vez que certas tecnologias construtivas tão difundidas e consolidadas no mercado não apresentam o desempenho térmico mínimo necessário ao conforto térmico humano. Segundo as análises realizadas, o componente construtivo que apresentou melhor desempenho térmico foi a alvenaria convencional, seguida de tijolos maciços e alvenaria estrutural. Paredes compostas de concreto, com espessura de 10 cm, por sua vez, devem ser evitados ou aplicados formando parede dupla com núcleo composto de material isolante térmico, ou ainda inserir agregados leves á composição do concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-1:** Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos Gerais. ABNT, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-4:** Edificações Habitacionais – Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE. ABNT, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-5:** Edificações habitacionais – Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas. ABNT, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-1:** Desempenho Edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades. ABNT, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-2:** Desempenho Térmico de Edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. ABNT, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-3:** Desempenho Térmico de Edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. ABNT, 2003.

FERNANDES, A. M. C. P. **Arquitetura e sombreamento: parâmetros para a região climática de Goiânia.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007

FERNANDES, A. M. C. P. **Clima, homem e arquitetura.** Goiânia: Trilhas Urbanas, 2006.

FROTA, A.; SCHIFFER, S. **Manual de Conforto Térmico.** 8ª ed. São Paulo: Studio Nobel, 2003.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na arquitetura**. 3^a ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás/Procel, 2014.

MARTINS, J. C. **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013**. 2^a ed. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013







