

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Henrique Zanini Luz

**ANÁLISE DE UMA EDIFICAÇÃO HABITADA PARA
ATENDIMENTO AO DESEMPENHO TÉRMICO VISANDO
ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA**

Porto Alegre
Junho 2017

Henrique Zanini Luz

**ANÁLISE DE UMA EDIFICAÇÃO HABITADA PARA
ATENDIMENTO AO DESEMPENHO TÉRMICO VISANDO
ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof^a Dr^a Luciani Somensi Lorenzi

Porto Alegre

Junho 2017

Henrique Zanini Luz

**ANÁLISE DE UMA EDIFICAÇÃO HABITADA PARA
ATENDIMENTO AO DESEMPENHO TÉRMICO VISANDO
ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, junho de 2017

Prof. Luciani Lorensi Somensi
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Márcia Elisa (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Cristiane Sardin Padilla de Oliveira (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Rômulo Plentz Giralt (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a minha família, em especial a meus pais, Ionira e Sérgio, por todo seu suporte, paciência e incentivo durante toda a minha vida, em especial ao apoio as minhas escolhas no período de faculdade.

Agradeço a meu irmão, Daniel, pela parceria nos momentos de descanso, e ajuda quando necessário em problema de qualquer âmbito.

Agradeço a minha namorada, Thyana, pela paciência, que foi necessária no período da realização desse trabalho, sua ajuda e companheirismo nas tardes de estudo.

Agradeço à Professora Luciani Somensi Lorenzi, orientadora deste trabalho, pela disponibilidade e ajuda em todos as etapas deste processo. Agradeço também pela oportunidade de trabalhar com uma profissional com amplo conhecimento nesta área, que foi de muita ajuda na solução dos problemas encontrados.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelas oportunidades disponibilizadas em todo o processo de aprendizado no decorrer da minha graduação, e pelo conhecimento que foi adquirido e será usado ao longo de minha vida.

RESUMO

Em grandes centros urbanos o consumo excessivo de energia elétrica tem causado apagões nos últimos anos, boa parte devido ao uso de sistemas mecânicos de controle de temperatura. Parte desse problema é devido ao grande número de unidades habitacionais construídas com sistemas construtivos que não apresentam um desempenho térmico adequado à zona bioclimática. Esse trabalho tem como objetivo analisar e avaliar uma residência unifamiliar existente, construída na década de 1954 quanto ao desempenho térmico e energético. O método utilizado no trabalho foi caracterizado como estudo de caso, possibilitando uma análise do desempenho térmico com a ABNT NBR 15220-2:desempenho térmico de edificações, que apresenta métodos de cálculo para determinar a eficiência dos elementos (paredes e coberturas) da edificação. Na avaliação do desempenho térmico foram utilizados softwares para o desenvolvimento de modelos computacionais (*SketchUP Pro 2017*, *Openstudio Plugin*), e para a análise do desempenho térmico foi utilizado o software *Openstudio 2.1*. Foram desenvolvidas simulações com alterações pontuais nos elementos que compõem a unidade habitacional e no sistemas construtivo da edificação. Os resultados obtidos indicam que os níveis de desempenho térmico exigidos para simulações computacionais em nossas normas construtivas são de fácil alcance. Há seções da unidade habitacional que apresentam ineficiência de desempenho em seus elementos, entretanto ainda atingem o mínimo requerido. Como conclusão observou-se que os critérios necessários para a satisfação da norma são muito brandos, conforme pode ser visto nas simulações, em que todas atingiram ao menos o mínimo estipulado. Além disso ao longo das simulações realizadas é possível notar que as sugestões previstas em norma para aumento de eficiência da edificação não tem o efeito esperado, assim reduzindo sua competência térmica.

Palavras-chave: Desempenho Térmico, Simulação Computacional, Economia de Energia

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho.....	14
Figura 2–Gráfico de exigência de desempenho da norma ASHRAE 55.....	24
Figura 3– Carta Bioclimática adotada no território brasileiro.....	26
Figura 4– Detalhamento de diretrizes construtivas para edificações.....	29
Figura 5 –Imagem via Satélite da Edificação.....	32
Figura 6 – Etapas de execução	34
Figura 7 – Detalhamento das paredes externas com 22cm.....	35
Figura 8– Vista frontal e posterior, respectivamente, da residência em 1954.....	36
Figura 9 – Detalhamento das paredes externas com 28cm.....	36
Figura 10–Vista frontal e posterior, respectivamente, da residência em 1980.....	37
Figura 11–Vista frontal e posterior, respectivamente, da residência atual	38
Figura 12 – Esboço de planta baixa com suíte destacada em vermelho.....	38
Figura 13– Critérios de avaliação de desempenho para dias característicos de verão....	40
Figura 14– Critérios de avaliação de desempenho para dias característicos de inverno.	41
Figura 15 – Zonas Térmicas.....	42
Figura 16–Localização da suíte presente na edificação.....	42
Figura 17 – Modificação na constituição das janelas	43
Figura 18– Modificação da constituição do conjunto de paredes externas	44
Figura 19– Sistema de Resfriamento e Aquecimento Mecânico.....	46
Figura 20 – Valores obtidos para cálculos de desempenho previsto na NBR 15220-2....	49
Figura 21 – Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional original.....	54
Figura 22 – Valores de temperatura para dia característico de inverno da simulação computacional original.....	56
Figura 23– Valores de temperatura para simulação anual original.....	57
Figura 24– Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com presença de vidro duplo.....	59
Figura 25– Valores de temperatura para dia característico de inverno da simulação computacional com presença de vidro duplo.....	60
Figura 26– Valores de temperatura para simulação anual original com presença de vidro duplo	61
Figura 27– Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com alteração de paredes externas	62

Figura 28– Valores de temperatura para dia característico de inverno da simulação computacional com alteração de paredes externas.....	63
Figura 29– Valores de temperatura para simulação anual original com alteração de paredes externas	64
Figura 30– Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com controle de fluxo de ar	65
Figura 31– Valores de temperatura para dia característico de inverno da simulação computacional com controle de fluxo de ar.....	66
Figura 32–Valores de temperatura para simulação anual original com controle de fluxo de ar.....	67
Figura 33– Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com alterações nos vidros e paredes.....	68
Figura 34– Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com alterações nos vidros e paredes.....	69
Figura 35– Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com alterações nos vidros e controle de fluxo de ar.....	71
Figura 36– Valores de temperatura para dia característico de inverno da simulação computacional com alterações nos vidros e controle de fluxo de ar.....	72
Figura 37– Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com alteração nas paredes e controle de fluxo de ar.....	73
Figura 38– Valores de temperatura para dia característico de inverno da simulação computacional com alteração nas paredes e controle de fluxo de ar.....	74
Figura 39–Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com todas alterações.....	75
Figura 40–Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com todas alterações	76
Figura 41– Tabela com temperaturas máximas e mínimas para os dias característicos de verão e inverno respectivamente.....	77
Figura 42– Tabela com gastos referentes as simulações	78

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

EUA – Estados Unidos da América

3D – Tridimensional

INMET– Instituto Nacional de Meteorologia

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

TBS – Temperatura de Bulbo Seco

IDF – EnergyPlus Input Data Files

OSM – OpenStudio Model File

LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações

CEEE – Companhia Estadual Elétrica de Energia

NREL – National Renewable Energy Laboratory

LISTA DE SÍMBOLOS

U – Transmitância térmico de um componente ($W/(m^2.K)$)

R_t – A resistência térmicototal ($(m^2.K)/W$)

CT – Capacidade térmico de um componente ($kJ/(m^2.K)$)

λ – Condutividade térmico do material ($W/(m.K)$)

c – Calor específico ($kJ/(kg.K)$)

ρ – Densidade de massa aparente do material (kg/m^3)

e – Espessura de uma camada (m)

R_{si} – Resistência térmico superficial interna ($(m^2.K)/W$)

R_{se} – Resistência térmico superficial externa ($(m^2.K)/W$)

Σ – Somatório

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 CONCEITOS NECESSÁRIOS ABNT NBR 15575 E ABNT NBR 15220.....	17
2.2 DEFINIÇÕES NBR 15575-1.....	18
2.2.1 Método de Cálculo	19
2.2.2 Simulação Computacional	19
2.3 CONFORTO TÉRMICO	22
2.4 CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO	26
2.4.1 Cálculos Transmitância e Capacidade Térmico	27
2.4.2 Exigências de Aberturas para Circulação de Ar	28
2.4.3 Diretrizes Construtivas	28
2.5 <i>SOFTWARE</i> UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES.....	29
3 MÉTODO	32
3.1 ESTRUTURA DA EDIFICAÇÃO AO LONGO DOS ANOS.....	35
3.2 CÁLCULO DE DESEMPENHO TÉRMICO – NBR 15220-2.....	39
3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL – NBR 15575-1	39
3.3.1 Simulação computacional com vidros duplos	43
3.3.2 Simulação computacional com paredes modificadas	43
3.3.3 Simulação computacional com fluxo de ar controlado	45
3.3.4 Simulações computacionais com mais de uma alteração	45
3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	46
4 SIMULAÇÕES	49
4.1 CÁLCULO DE TRANSMITÂNCIA E CAPACIDADE TÉRMICA.....	49
4.2 MODELAGEM TÉRMICA.....	50
4.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ORIGINAL.....	53
4.3.1 Dia Característico de Verão	54
4.3.2 Dia Característico de Inverno	55
4.3.3 Simulação Anual	56
4.4 SIMULAÇÃO COM JANELAS COM LÂMINAS DUPLAS DE VIDRO.....	58
4.5 SIMULAÇÃO COM ALTERAÇÃO NAS PAREDES EXTERNAS.....	61
4.6 SIMULAÇÃO COM CONTROLE DE FLUXO DE AR DE ENTRADA.....	64
4.7 DESEMPENHO COM ALTERAÇÕES EM VIDROS E PAREDES.....	67
4.8 DESEMPENHO COM FLUXO CONTROLADO E VIDROS DUPLOS.....	70

4.9 DESEMPENHO COM FLUXO CONTROLADO E PAREDES CORRIGIDAS....	72
4.10 DESEMPENHO COM CONTROLE DE FLUXO DE AR, PAREDES CORRIGIDAS E VIDROS DUPLOS.....	74
4.11 COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS PARA OS DIAS ESPECÍFICOS.....	76
4.12 COMPARAÇÃO DE CONSUMOS DE ENERGIA AO LONGO DO ANO.....	77
5 CONCLUSÃO.....	79
REFERÊNCIAS	81
ANEXO A	83
APÊNDICE A	84

1. INTRODUÇÃO

O mercado brasileiro do setor da construção civil começou a sofrer mudanças na última década em função da atualização e implantação de novas normas técnicas que possuem maior grau de exigências quanto ao desempenho de edificações habitacionais.

Essas normas começam a ser inseridas a partir da fase de planejamento de edificações, influenciando na especificação de materiais, sistemas e métodos construtivos. Entre as normas estabelecidas na Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) destaca-se a NBR 15575 (Norma de Desempenho) que estabelece requisitos, critérios e parâmetros de aceitabilidade para os sistemas construtivos. A Norma de Desempenho é complementada por outra norma a NBR 15220-2 (Desempenho térmico de edificações) da ABNT que inclui, entre outras coisas, os métodos de cálculo para determinação de desempenho térmico de edificações.

Atualmente, no mundo, exemplos de tecnologias inovadoras para a área de economia de energia são utilizadas, um exemplo disso é o edifício modelo Bullitt Center, localizado em Seattle (EUA), finalizado em 2012, que utiliza tecnologias inovadoras para diminuir o consumo de energia, associados a métodos mecânicos de aquecimento e resfriamento. Alguns dos métodos implementados para que isso ocorra está no controle de fluxo de entrada e saída de ar da edificação, utilizados para controlar a temperatura interna. Esse processo transforma a edificação em uma região isolada do exterior, ou seja, quando é preciso adequar a temperatura aos usuários, se realizam as trocas de ar com o exterior para ganho ou perda de calor, facilitando a manutenção da temperatura em uma faixa determinada. O exemplo da edificação citado foi classificada como “prédio vivo” pelo International Living Future Institute, seu mecanismo reativo a temperatura externa que resulta em menores consumos de energia foi um dos fatores determinantes para esse certificado, entre várias outras especificações e ações de aumento de eficiência energética.

Considerando os requisitos de desempenho térmico da NBR 15575, de 2013, é razoável estimar que novos projetos de edificações devem passar por processos mais complexos na fase de projeto, com o objetivo de atingir o desempenho térmico mínimo estabelecido. Entretanto,

edificações executadas antes de julho de 2013 não estão sujeitas a essa norma, podendo ocasionar um consumo elevado de energia.

O efeito do consumo elevado de energia pode ser observado em períodos de temperaturas extremas, que acabam ocasionando faltas de energia em determinadas regiões de centros urbanos, devido a elevada taxa de consumo e a crescente utilização da refrigeração mecanizada no verão, algo que tende a aumentar em anos futuros considerando as tendências de aumento das temperaturas mundiais, e aquecimento no inverno, situação específica do sul do país.

Uma possível solução para melhorar o desempenho térmico das edificações é fazer a avaliação com possíveis mudanças nos materiais empregados na edificação. Devido a essa possibilidade de melhora em desempenho térmico foi selecionada uma residência na região de Porto Alegre, para ser analisada e avaliada quanto ao desempenho térmico no estado atual e, durante o projeto, com mudanças nos elementos da edificação, tendo como foco identificar qual o impacto dessas mudanças para a economia de energia.

Este trabalho apresenta um estudo de caso e de ações sobre o desempenho térmico de uma residência unifamiliar existente desde 1954, onde o autor reside com sua família e vivencia o impacto das variações de temperatura no seu cotidiano. Os estudos serão realizados com base na unidade habitacional em seu estado atual e após modificações nas composições dos sistemas de vedação vertical (paredes) e em suas condições de uso, o que implica em possíveis alterações no fluxo de entrada de ar nas zonas da edificação.

Assim, este trabalho tem como objetivo principal a simulação computacional das temperaturas internas da residência, analisando seu desempenho pelo método previsto em NBR 15220-2, que prevê cálculos e pelo modelo descrito na NBR 15575-1 com simulação computacional de desempenho.

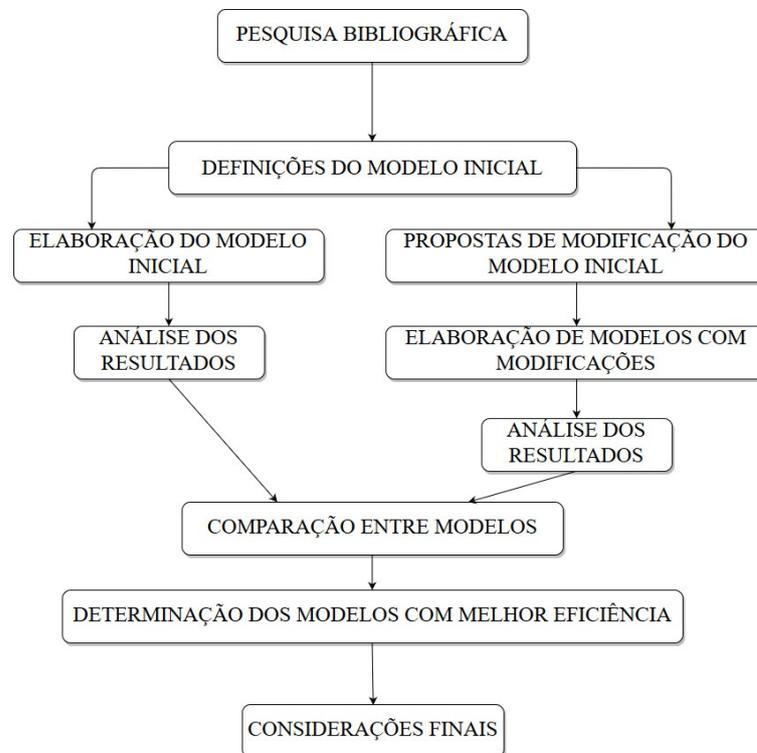
O trabalho tem por hipótese que a edificação analisada apresenta um desempenho térmico insuficiente por não atender a norma de desempenho térmico NBR 15220-2 em vigor atualmente. Tal condição não permite que seus usuários tenham um adequado conforto térmico. O trabalho está delimitado a uma edificação habitacional construída na década de 1954 e com sistema construtivo alvenaria portante. Foi usado no trabalho o software *SketchUP Pro 2017* para modelagem da edificação e o software *Openstudio 2.1* para a

simulação do desempenho térmico. Como limitante deste trabalho não foram analisadas e avaliadas outras edificações e não foi utilizado outros *softwares* de simulação.

O trabalho foi realizado por meio das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definições do modelo inicial a ser analisado;
- c) elaboração do modelo inicial;
- d) propostas de possíveis modificações no modelo inicial;
- e) elaboração de modelos com modificações
- f) análise dos resultados;
- g) comparação entre modelos;
- h) determinação dos modelos que apresentam um aumento de eficiência energética;
- i) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

A pesquisa bibliográfica serviu como ponto de partida para a elaboração do trabalho e foi realizada em paralelo durante todo processo. Fez-se o levantamento inicial dos dados e das informações necessárias ao decorrer do projeto, de modo que também serviu para descrever o tema que é abordado, e evidenciar a necessidade de uma solução para o problema proposto.

Devido às limitações computacionais dos *softwares*, algumas simplificações nos modelos para acelerar as simulações fizeram-se necessárias, como por exemplo, considerar blocos cerâmicos iguais em sua composição, mesmo que eles possuam diferentes características e períodos de confecção, devido ao fato que a residência analisada sofreu alterações e ampliações ao longo de sua utilização, portanto apenas a geometria dos blocos foi considerada.

No levantamento de dados para o modelo inicial foram realizadas medições no local da edificação estudada e identificadas as características de índice de incidência solar, índice de reflexão, este último determinado pela cor dos materiais utilizado, entre outros fatores. Os dados que não foram extraídos do local da edificação foram obtidos de bibliotecas virtuais e modelos disponibilizados nos *softwares* utilizados.

Posteriormente foi utilizado o *software SketchUp 2017 Pro* para a elaboração do modelo 3D inicial. O *software Openstudio*, que possui o *plugin* de integração com *SketchUp*, foi utilizado para analisar a edificação modelada no ambiente descrito no arquivo climático disponibilizado pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), que também foi inserido no *software*.

Os resultados encontrados nas simulações, quando considerando apenas as variações de temperatura nos dias característicos, como estipulado na ABNT NBR 15575-1, não representam grandes variações de desempenho, pois os pré-requisitos previstos em norma são alcançados facilmente. Sendo assim a utilização de uma análise de gasto energético ao longo do ano apresenta resultados facilmente utilizados como parâmetros comparativos. Assim caracteriza melhor quanto ao seu real desempenho, podendo atribuir valores monetários a estes resultados, o que reflete na economia gerada pelas modificações implementadas, utilizando sistemas mecânicos para manutenção de temperatura.

Para o levantamento dos dados de gastos de energia foram realizadas uma segunda leva de simulações com a introdução de sistemas mecânicos de climatização. Como parâmetro foi estabelecido que dormitórios e salas devem ser climatizadas para permanecer entre 20-25°C, faixa que apresenta temperaturas agradáveis aos usuários da unidade habitacional segundo a

carta bi climática de Baruch Givoni para inverno e verão, adotada no território brasileiro, figura 3.

Na conclusão deste trabalho encontram-se as considerações finais, onde são abordadas as análises dos resultados e avaliação de desempenho, obtidos nas simulações realizadas e suas possibilidades de implementação. Também é apresentada a economia de energia de acordo com as modificações sugeridas e simuladas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEITOS NECESSÁRIOS – ABNT NBR 15575 e ABNT NBR 15220

Antes de analisar o desempenho térmico é necessário verificar se a construção em questão se enquadra nos critérios de desempenho térmico estipulados nas normas vigentes no país de construção. Em solo brasileiro as normas que regem os pré-requisitos mínimos para uma edificação são: NBR 15575 e NBR 15220. Sendo que a NBR 15575 trata das definições e métodos de avaliação de rendimento, não somente os térmicos. Já a NBR 15220 serve como um complemento com os métodos de cálculo que devem ser usados para dimensionar uma construção quanto ao seu desempenho térmico.

Inicialmente, é importante mencionar algumas definições destas normas, pois serão referidas futuramente. Transcrevemos a seguir:

- a) **Capacidade térmica:** “Quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema.” (ABNT, 2005a).
- b) **Transmitância térmica:** “transmissão de calor em unidade de tempo e através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo; neste caso, dos vidros e dos componentes opacos das paredes externas e coberturas, incluindo as resistências superficiais interna e externa, induzida pela diferença de temperatura entre dois ambientes.” (ABNT, 2013a).
- c) **Condutividade térmica:** “propriedade física de um material homogêneo e isótropo, 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.” ABNT(2005a).
- d) **Difusão térmico:** “Quociente da condutividade térmico de um material (λ) pela sua capacidade de armazenar energia térmico (ρc).” (ABNT, 2005a).
- e) **Emissividade:** “Quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura.” (ABNT,2005a).
- f) **Absortância à radiação solar:** “Quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície”, (ABNT,2005a).

- g) **Reflexão à radiação solar:** “Quociente da taxa de radiação solar refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície.” (ABNT, 2005a).
- h) **Transmitância à radiação solar:** “Quociente da taxa de radiação solar que atravessa um elemento pela taxa de radiação solar incidente sobre este mesmo elemento.” (ABNT,2005a).
- i) **Zona Bioclimática:**“Região geográfica homogênea quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano.” (ABNT, 2005a).
- j) **Zona Térmica:**“Uma zona térmica é um espaço ou uma coleção de espaços dentro de um prédio com requisitos de condicionamento de espaço suficientemente semelhantes para que essas condições possam ser mantidas com um único dispositivo de controle térmico.” (Califórnia, 2013, “tradução nossa”)

É importante para o tema abordado nesse trabalho de conclusão de curso e anteriormente já citada o termo **retrofit**: “remodelação ou atualização do edifício ou de sistemas, através da incorporação de novas tecnologias e conceitos, normalmente visando valorização do imóvel, mudança de uso, aumento da vida útil, eficiência operacional e energética.” ABNT(2013a). Entre os principais pontos de um *retrofit* vale-se citar a otimização de partes da edificação já existente, melhorando seu desempenho. É necessário analisar se essas modificações irão trazer benefícios econômicos para os usuários, pois modificações que em toda sua vida útil não apresentam uma economia comparada a outros métodos acabam tornando-se inviáveis. Desse modo, faz-se necessário analisar diferentes possibilidades, deixando em segundo plano as mudanças de retorno negativo, que geram prejuízos considerando toda sua vida útil.

Os valores dos conceitos citados podem ser levantados em simulações ou medições locais, sendo utilizados para determinar a **inércia térmica** descrita como: “À inércia térmica estão associados a dois fenômenos de grande significado para o comportamento térmico da unidade habitacional: o amortecimento e o atraso da onda de calor, devido ao aquecimento ou ao resfriamento dos materiais. A inércia térmica depende das características térmicas da envolvente e dos componentes construtivos internos.” (FROTA, SCHIFFER, 2001, p 48), pelos motivos descritos, há a necessidade de determiná-la.

2.2 DEFINIÇÕES NBR 15575-1

Na apresentação dos requisitos gerais da norma NBR 15575 é descrito como deve ser efetuadas as análises de desempenho térmico de uma construção. Existem dois meios descritos para realizar da avaliação.

2.2.1 Método de Cálculo

Segundo a NBR 15220, que estabelece cálculos para resistência e capacidade térmica, de modo a determinar o atraso térmico gerado por um conjunto de camadas, essas sendo as camadas das paredes externas de uma edificação.

Os cálculos envolvidos na NBR 15220 são utilizados para uma estimativa inicial do desempenho, assim quando alguma seção da edificação não apresenta um desempenho favorável é necessária a utilização de métodos computacionais, como pode ser visto na ABNT(2013a),quando descrito em relação ao desempenho de vedações e coberturas:

“atendimento aos requisitos e critérios para os sistemas de vedação e coberturas, conforme ABNT NBR 15575-4 e ABNT NBR 15575-5. Para os casos em que a avaliação de transmitância térmica e capacidade térmica, conforme os critérios e métodos estabelecidos nas ABNT NBR 15575-4 e ABNT NBR 15575-5, resultem em desempenho térmico insatisfatório, o projetista deve avaliar o desempenho térmico da edificação como um todo pelo método da simulação computacional.”

2.2.2 Simulação Computacional

Quando os resultados obtidos apresentam valores fora dos estipulados em norma, existe a possibilidade da realização de simulações computacionais para determinar o desempenho de uma edificação.A NBR 15575 define as especificações que devem ser utilizadas na realização dessas demonstrações, e faz sugestões quanto a forma maneira devem ser realizadas. Como é dito:

“Para a realização das simulações computacionais devem ser utilizadas como referência as tabelas A1, A2 e A3 apresentadas no Anexo A, que fornecem informações sobre a localização geográfica de algumas cidades brasileiras e os dados climáticos correspondentes aos dias típicos de projeto de verão e de inverno” (ABNT,2013)

As tabelas na citação apresentam os dados de classificação de capitais quanto a sua zona bioclimática, que regem os níveis de desempenho exigidos na norma.Além disso, nas tabelas A2 e A3 da NBR 15575 são disponibilizados os dados para dias típicos de verão e inverno,

com suas temperaturas máximas, mínimas e níveis de radiação solar. Também é descrito como a geometria deve ser modelada: “Para a geometria do modelo de simulação, deve ser considerada a habitação como um todo, considerando cada ambiente como uma zona térmica.”, (ABNT,2005a).

A norma também preve recomendações para casos em que a edificação esteja nafase de projetos, como pode ser observado a seguir, ABNT(2005a):

- a) Verão: janela do dormitório ou da sala voltada para oeste e a outra parede exposta voltada para norte. Caso não seja possível, o ambiente deve ter pelo menos uma janela voltada para oeste;
- b) Inverno: janela do dormitório ou da sala de estar voltada para sul e a outra parede exposta voltada para leste. Caso não seja possível, o ambiente deve ter pelo menos uma janela voltada para sul;
- c) Obstrução no entorno: considerar que as paredes expostas e as janelas estão desobstruídas, ou seja, sem a presença de edificações ou vegetação nas proximidades que modifiquem a incidência de sol e/ou vento. Edificações de um mesmo complexo, por exemplo, um condomínio, pode ser considerado, desde que previstas para habitação no mesmo período. Esta informação deve constar na documentação de comprovação de desempenho;
- d) Obstrução por elementos construtivos previstos na edificação: dispositivos de sombreamento (exemplos: para-sóis, marquises, beirais) devem ser consideradas na simulação.

Os dados de dias típicos são muito importantes na realização de uma simulação, pois são exigidas as simulações para situações específicas dos dias de solstícios de inverno e verão, assim estabelecendo as simulações nas situações mais adversas das regiões em questão. Estes dados também são disponibilizados pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) na forma de *design days*, utilizados para simulação de situações extremas. Em casos que a localidade simulada não apresente estes dados devem ser seguidas algumas recomendações, ABNT(2013a):

“O dia tomado para análise deve corresponder a um dia típico de projeto, de verão ou de inverno, precedido por pelo menos um dia com características semelhantes. Recomenda-se, como regra geral, trabalhar com uma seqüência de três dias e analisar os dados do terceiro dia. Para efeito da avaliação por medição, o dia típico é caracterizado unicamente pelos valores da temperatura do ar exterior medidos no local.”

É sugerido em norma a utilização do *software* Energyplus, (ABNT,2013a):

“Para a realização das simulações computacionais recomenda-se o emprego do programa EnergyPlus. Outros programas de simulação poderão ser utilizados, desde que permitam a determinação do comportamento térmico de edificações sob condições dinâmicas de exposição ao clima, sendo capazes de reproduzir os efeitos de inércia térmico e sejam validados pela ASHRAE Standard 140.”

Fez-se a escolha de utilização de outro *software* para realização das simulações presentes nesse trabalho, porém este software utiliza a estrutura de cálculos do Energyplus. O software utilizado se chama *OpenStudio*, que apresentam, além da estrutura de cálculo, ferramentas para elaboração de modelagem 3D dentro do *software Sketchup Pro 2017*. Como descrito em sua página, (COLORADO, 2017):

“OpenStudio® é uma coleção de ferramentas de software multiplataforma (Windows, Mac e Linux) para suportar a modelagem de energia de edifícios inteiros usando o EnergyPlus e a análise de luz diurna avançada usando o Radiance. OpenStudio é um projeto de código aberto para facilitar o desenvolvimento comunitário, extensão e adoção do setor privado. O OpenStudio inclui interfaces gráficas juntamente com um Software Development Kit.

As aplicações gráficas incluem o OpenStudio SketchUp Plug-in, o OpenStudio Application, o ResultsViewer e a Parametric Analysis Tool. O OpenStudio SketchUp Plug-in é uma extensão da popular ferramenta de modelagem SketchUp 3D da Trimble, que permite aos usuários criar rapidamente geometria necessária para o EnergyPlus. Além disso, o OpenStudio suporta a importação de gbXML e IFC para criação de geometria. O aplicativo OpenStudio é uma interface gráfica totalmente funcional para modelos OpenStudio incluindo envelope, cargas, agendas e HVAC. O ResultsViewer permite navegar, traçar e comparar dados de saída de simulação, especialmente séries temporais.”

Nas definições de características de uma edificação também são estabelecidos os métodos de medição que devem ser utilizados para levantamento de dados, tais como; condutividade térmica, calor específico, densidade aparente, emissividade, absorvância à radiação solar, entre outros. Tais métodos são enumerados na tabela 11.1, ABNT NBR 15575-1, presente no Anexo A nesse trabalho. Entretanto, como método alternativo para obtenção dos valores referentes as características necessárias citadas, também são disponibilizados dados já medidos presentes na NBR 15220-2, anexo B da norma. Além de especificações de dados térmicos, também são exigidos valores para ventilação e sombreamento, como pode ser visto na ABNT(2013b):

No procedimento de simulação do desempenho térmico podem ser consideradas condições de ventilação e de sombreamento, conforme NBR 15575-1. No caso da ventilação pode ser considerada uma condição “padrão”, com taxa de 1ren/h, ou seja, uma renovação de ar por hora do ambiente (renovação por frestas), e uma condição “ventilada”, com taxa de 5ren/h, ou seja, cinco renovações de ar por hora do ambiente sala ou dormitório. No caso do sombreamento das aberturas pode ser considerada uma condição “padrão”, na qual não há nenhuma proteção da abertura

contra a entrada da radiação solar, e uma condição “sombreada”, na qual há proteção da abertura que corte pelo menos 50% da radiação solar incidente no ambiente sala ou dormitório.

Em uma eventual falha da simulação, a norma ainda define como devem ser realizadas as próximas simulações para um melhor resultado no caso de verão, (ABNT2013a):

11.5.2 A unidade habitacional que não atender aos critérios estabelecidos para verão deve ser simulada novamente considerando-se as seguintes alterações:

- **ventilação:** configuração da taxa de ventilação de cinco renovações do volume de ar do ambiente por hora (5,0 Ren/h) e janelas sem sombreamento;
- **sombreamento:** inserção de proteção solar externa ou interna da esquadria externa com dispositivo capaz de cortar no mínimo 50 % da radiação solar direta que entraria pela janela, com taxa de uma renovação do volume de ar do ambiente por hora (1,0 ren/h);
- **ventilação e sombreamento:** combinação das duas estratégias anteriores, ou seja, inserção de dispositivo de proteção solar e taxa de renovação do ar de 5,0 ren/h.

Também são descritos desempenhos desejáveis para paredes externas, que seguem requisitos dependentes da zona bioclimática estabelecida na simulação, além disso, também é previsto a área mínima de ventilação para um cômodo, ABNT (2013b), “Os ambientes de permanência prolongada devem ter aberturas para ventilação com áreas que atendam à legislação específica do local da obra, incluindo Códigos de Obras, Códigos Sanitários e outros.”, existindo uma tabela com os valores mínimos caso não houver exigências legais para a região, (ABNT,2013b), presente no Anexo A dessa monografia.

2.3 Conforto Térmico

A ideia de conforto térmico não é algo relativamente novo, se comparado à realidade brasileira. Inicialmente o conforto térmico era mais direcionado a ideia de aumento de eficiência de operários nos locais de trabalho, como descrito, (FROTA; SHIFFER, 2001, p 24 e 25):

“Os primeiros estudos acerca da influência das condições termo higrométricas sobre o rendimento no trabalho foram desenvolvidas pela Comissão Americana da Ventilação. Em 1916, presidida por Winslow, essa comissão efetuou estudos e

pesquisas com o objetivo de determinar a influência das condições termo higrométricas no rendimento do trabalho, visando, principalmente, ao trabalho físico do operário, aos interesses de produção surgidos com a Revolução Industrial e às situações especiais de guerra, quando as tropas são deslocadas para regiões de diferentes tipos de clima.”

Devido à proporção da utilização de energia para controle de temperatura em ambientes industriais, a arquitetura atual tem se focado no aumento de eficiência residencial, como escrito em Lamberts et al. (2013, p 15): “É importante enfatizar que, em uma indústria, a maior parte da energia elétrica consumida provém das máquinas e motores (consumo independente do projeto arquitetônico), limitando a atuação do arquiteto no sentido de economizar energia.”, assim, “Os setores residencial, comercial e público concentram, portanto, a parte mais significativa da atuação do arquiteto em aumentar a eficiência energética nas edificações, ...”,(LAMBERTS ET AL 2013, p 16). Com essas informações é possível estimar a necessidade de uma melhor eficiência energética de nossas construções residenciais. Porém a maioria das residências não apresentam estudos energéticos, como antes mencionado, devido a data de implementação das normas reguladoras no mercado brasileiro. Portanto, faz-se necessária a realização de estudos para execução de *retrofits* em residências que apresentam um desempenho desfavorável para sua região de implementação.

Para realizar este estudo é necessário quantificar o conforto térmico. Entretanto, como sua natureza é subjetiva, depende da diferença de sensações entre pessoas, cuja explicação se dá devido ao metabolismo diferenciado de cada indivíduo, e o seu papel em atingir uma sensação de conforto térmico, como descrito em Lambertset al. (2013, p 43):

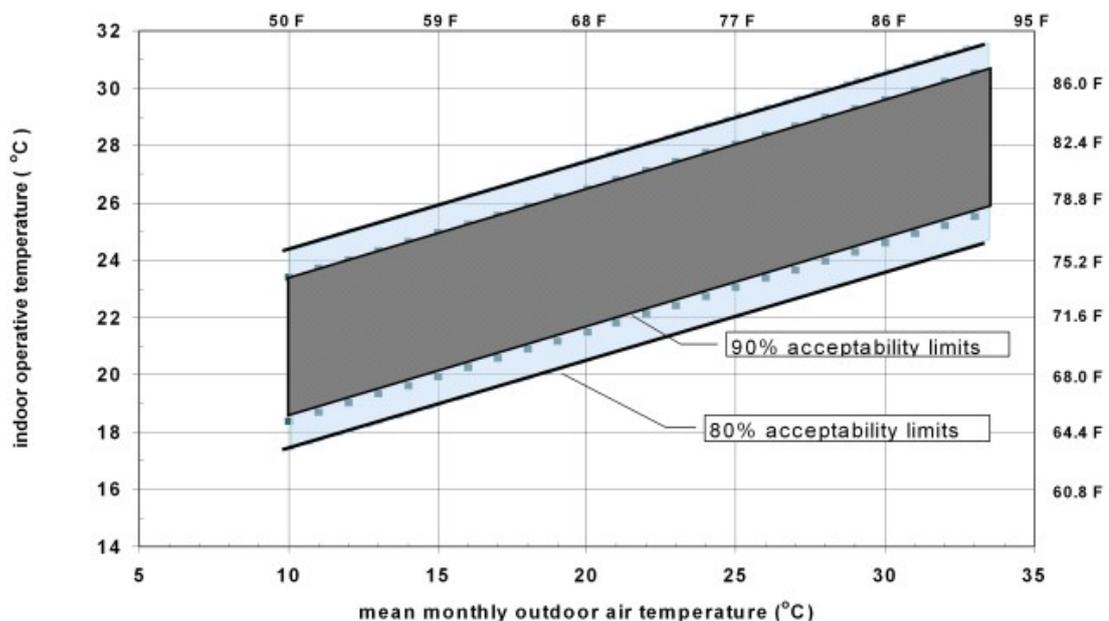
“O homem é um ser homeotérmico, ou seja, a temperatura interna do organismo tende a permanecer constante independente das condições do clima. Com o uso do oxigênio o organismo promove a queima de calorias existentes nos alimentos (processo conhecido como metabolismo), transformando-as em energia. Assim é gerado o calor interno do corpo. Entretanto, sempre existem trocas térmicas entre o corpo humano e o meio.”.

Outros fatores que também alteram a condição de conforto térmico estão associados ao nível de atividade das pessoas que utilizam o espaço, como descrito em Lamberts et al. (2013, p 47): “Quanto maior a atividade física, tanto maior será o calor gerado por metabolismo. É importante ao arquiteto saber a função de sua arquitetura de forma a prever o nível de atividade realizado no seu interior, tirando daí algumas premissas sobre a sensação de conforto térmico das pessoas”.

Além do anteriormente citado, variáveis ambientais também afetam o nível de conforto das pessoas, podendo ser observado no texto descrito por Lamberts et al (2013, p 46) algumas dessas variáveis: “As variáveis ambientais que influenciam no conforto térmico e podem ser medidas diretamente são a temperatura do ar (T_{AR} – °C), a temperatura radiante (TRM – °C), a umidade relativa (UR – %) e a velocidade do ar (V – m/s) ...” além disso “a atividade física (MET – met ou W/m^2) e vestimenta (I_{CLO} – clo ou m^2 °C/W) também interagem na sensação de conforto térmico do homem.”(LAMBERTS ET AL 2013,p 46).

Uma outra descrição também pode ser encontrada na norma americana ASHRAE, (2010, p 4, tradução nossa): “O conforto térmico é a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico. Porque há grandes variações, tanto fisiologicamente quanto psicologicamente, de pessoa para pessoa, é difícil satisfazer todos em um espaço.” Em sua norma é possível analisar o intervalo de temperaturas de funcionamento através de um gráfico disponível, podendo ser observado na figura 2.

Figura 2 – Gráfico de exigência de desempenho da norma ASHRAE 55



(fonte:ASHRAE, 2010, p 12)

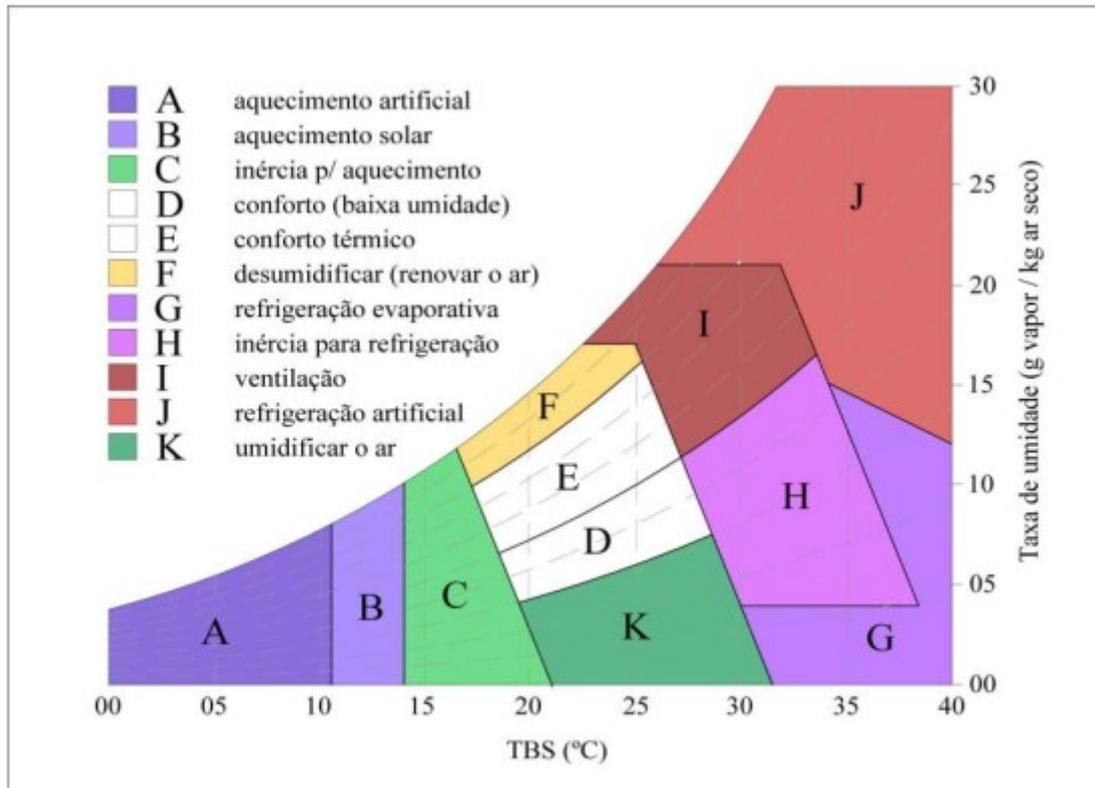
Devido à data de implementação das normas de desempenho térmico no Brasil, a maior parte das construções atuais não foram dimensionadas adequadamente as suas zonas bioclimáticas. Esse fator faz com que o conforto térmico seja muito baixo em determinadas épocas do ano, o que leva a utilização de climatização artificial para suprir a demanda por maior conforto térmico. Isso pode ser observado em todo tipo de construção, desde ambientes domésticos a comerciais. Em sua grande maioria, espaços comerciais apresentam sistemas de climatização durante todo o ano para tornar o ambiente interno confortável.

Levando isso em consideração, há necessidade de especificação de uma temperatura operativa, esta compreende uma faixa estabelecida de temperatura para funcionamento com elevado nível de conforto, para uma determinada zona térmica, como em ASHRAE (2010, p 5, tradução nossa), referida a seguir:

“Para determinados valores de humidade, velocidade do ar, taxa metabólica e isolamento de vestuário, a zona de conforto pode ser determinada. A zona de conforto é definida em termos de uma gama de temperaturas operacionais que proporcionam condições ambientais térmicas aceitáveis ou em termos das combinações de temperatura do ar e temperatura radiante média que as pessoas acham aceitáveis termicamente.”

No caso brasileiro foi adotada uma carta bioclimática, inicialmente elaborada por Baruch Givoni, com temperaturas de operação, conforto, e soluções por regiões, considerando temperatura e umidade para chegar a zona de conforto térmico, em que a temperatura é considerada de bulbo seco, TBS, podendo ser observada na figura 3.

Figura 3 – Carta Bioclimática adotada no território brasileiro



(fonte: adaptada de GIVONI *apud* MILAN, 2015, p 38)

2.4 CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO

Em termos de construções, o método mais comum e econômico de realizar uma análise térmica de uma edificação é utilizando o cálculo descrito na NBR 15220-2. Os valores obtidos são classificados na NBR 15575 de acordo com faixas de desempenho, sendo que as partes mais importantes consideradas são paredes externas, ventilação e cobertura, possuindo especificações mínimas, mas desprezando os efeitos da edificação como um todo, e somente levando em conta simulações computacionais no caso de falha destes cálculos. As exigências são ainda vinculadas a zona bioclimática específica da construção. Portanto nas especificações a seguir será considerada a zona bioclimática 3, onde está situada a cidade de Porto Alegre e localizada a construção analisada nesta pesquisa.

2.4.1 Cálculos Transmitância e Capacidade Térmico

Nas definições térmicas de paredes externas e coberturas as faixas de desempenhos são definidas quanto à transmitância e capacidade térmica, de acordo com os materiais que compõem o limite externo das zonas. É exigido em norma um valor máximo para transmitância de 3,7 W/m²K para paredes, de 2,3 W/m²K para coberturas e também um valor mínimo de capacidade para ambos de 130 kJ/m²K respectivamente.

Pela necessidade do escoamento de água da chuva o formato usual de coberturas é o de telhados inclinados. Para podermos calcular a transmitância térmica de modo simplificado consideramos uma camada de ar média constante na faixa entre telhas e lajes.

As fórmulas para o cálculo de transmitância térmica podem ser observadas a seguir:

$$U = 1/R_T$$

Onde R_T :

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si}$$

Sendo R_t “A resistência térmica de superfície a superfície de um componente plano constituído de camadas homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor”, (ABNT, 2005b). R_{se} e R_{si} sendo constantes estabelecidas no Anexo A da norma NBR 15220-2.

Em casos de paredes não homogêneas a fórmula a seguir é utilizada para calcular sua resistência térmica.

$$R_t = \frac{Aa + Ab + \dots + An}{\frac{Aa}{Ra} + \frac{Ab}{Rb} + \dots + \frac{An}{Rn}}$$

A segunda grandeza avaliada é a capacidade térmica e seu método de cálculo pode ser observado abaixo:

$$C_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R_i \cdot c_i \cdot \rho_i = \sum_{i=1}^n \theta_i \cdot c_i \cdot \rho_i$$

2.4.2 Exigências de Aberturas para Circulação de Ar

Os critérios para aberturas são extremamente simples, considerando quartos e salas de estar como necessidade de cumprimento da norma. Porém a NBR 15575-4 não é a única definição a ser considerada, “Os ambientes de permanência prolongada devem ter aberturas para ventilação com áreas que atendam à legislação específica do local da obra, incluindo Códigos de Obras, Códigos Sanitários e outros.” (ABNT, 2013b). Caso não existam requisitos para a região segue-se uma área mínima de abertura igual a 7% do piso, levando em conta a zona analisada, conforme ABNT(2013b).

2.4.3 Diretrizes Construtivas

Mais detalhadamente algumas especificações podem ser feitas para cada zona bioclimática, considerando, neste caso, a zona 3, como descrito na figura 4 abaixo.

Figura 4 – Detalhamento de diretrizes construtivas para edificações

Tabela 7 — Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para a zona bioclimática 3

Aberturas para ventilação	Sombreamento das aberturas
Médias	Permitir sol durante o inverno

Tabela 8 — Tipos de vedações externas para a zona bioclimática 3

Vedações externas
Parede: Leve refletora
Cobertura: Leve isolada

(fonte: ABNT, 2005c)

A norma ainda conta com estratégias de condicionamento térmico de forma passiva, que servem como guias para modificações, caso esteja em busca de um melhor desempenho térmico da unidade habitacional analisada.

2.5 SOFTWARE UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES

O programa *Openstudio*, ferramenta usada nessa pesquisa, foi por muito tempo utilizado somente como um *plug-in* para o *software Sketchup*. Entretanto, a partir do ano passado, foi disponibilizada uma interface para edição de informações, antes exclusivo ao programa *Energyplus*. O *software Openstudio* também continua funcionando com sua base 3D, sendo realizado em *Sketchup*, porém possui ferramentas de análise de dados e informações com disponibilização de gráficos de rendimento e funcionalidade da edificação modelada.

Entre as funções disponíveis em seu *software* nativo, *Energyplus*, é possível desenvolver cronogramas de funcionamento de edificações, inserir cargas térmicas com seus próprios cronogramas e criar simulações completas com ventilação natural estabelecida. Suas antigas funções de elaboração de geometrias e inserção de informações em *Sketchup* ainda estão presentes de modo inalterado. Os dados dos materiais utilizados devem seguir os parâmetros requeridos pelo *software Energyplus*.

Em sua pesquisa sobre SIMULAÇÃO PARA ESTUDO DO ENVOLTÓRIO DE UM PRÉDIO, Liberali descreve como devem ser inseridas as informações dos materiais, de modo a obter melhores resultados utilizando o software *Energyplus*:

“De acordo com Energyplus [2010] há uma subdivisão dos materiais opacos em materiais opacos comuns e materiais opacos de massa desprezível. A diferença entre ambos durante a simulação é que os materiais de massa desprezível não contribuem para a inércia térmico do ambiente enquanto os materiais comuns participam desse fenômeno.

Tijolos e placas de concreto são exemplos de materiais comuns enquanto carpetes representam os materiais de massa desprezível.

Os materiais translúcidos são divididos em vidro e película. Os vidros têm sua massa considerada nos cálculos, enquanto películas são consideradas com massa desprezível.” (LIBERALI, 2010, p 6)

O motivo da utilização do modelo *Energyplus* para inserção de dados deve-se a forma como a simulação é feita no software *Openstudio*, conforme descrito no site oficial do software: “o Modelo *OpenStudio* é traduzido para o formato *IDF EnergyPlus*. Uma vez no formato *EnergyPlus IDF*, são aplicadas medidas *OpenStudio EnergyPlus*. Após essas medidas, a simulação *EnergyPlus* é executada. Assim que a simulação do *EnergyPlus* estiver concluída, são aplicadas as Medidas de Relatórios do *OpenStudio* que geram relatórios.”, de maneira simplificada, o software *Openstudio* serve como plataforma para modelagem da simulação, inserindo todas as informações necessárias para realizar a mesma, que é efetuada utilizando apenas as rotinas de cálculo provenientes do programa *Energyplus*. Ao final, são disponibilizados na plataforma *Openstudio* os resultados com geração de gráficos.

Apesar do recente lançamento de sua interface modificada, ainda faltam algumas funções no programa. Entretanto, é possível a utilização de medidas extras diretamente no código fonte do projeto. Essas medidas podem ser elaboradas em linguagem C++, C# e *Ruby*, linguagens de programação, e ainda conta com uma biblioteca *online* com equipamentos e medidas prontas para utilização, *Building Component Library*, uma fonte aberta que conta com inserção de dados por usuários e pelos desenvolvedores do software. (COLORADO, 2017)

Nas versões anteriores era necessária a instalação do software *Energyplus* como uma extensão ao método de cálculo do *Openstudio*, visto que as rotinas de cálculo deste software não eram completas. Entretanto, nas suas últimas atualizações, este pré-requisito tornou-se desnecessário,

pois o *software Openstudio* vem, agora, com os mecanismos de cálculo requeridos para as simulações, sem a exigência de instalação do programa *Energyplus*.

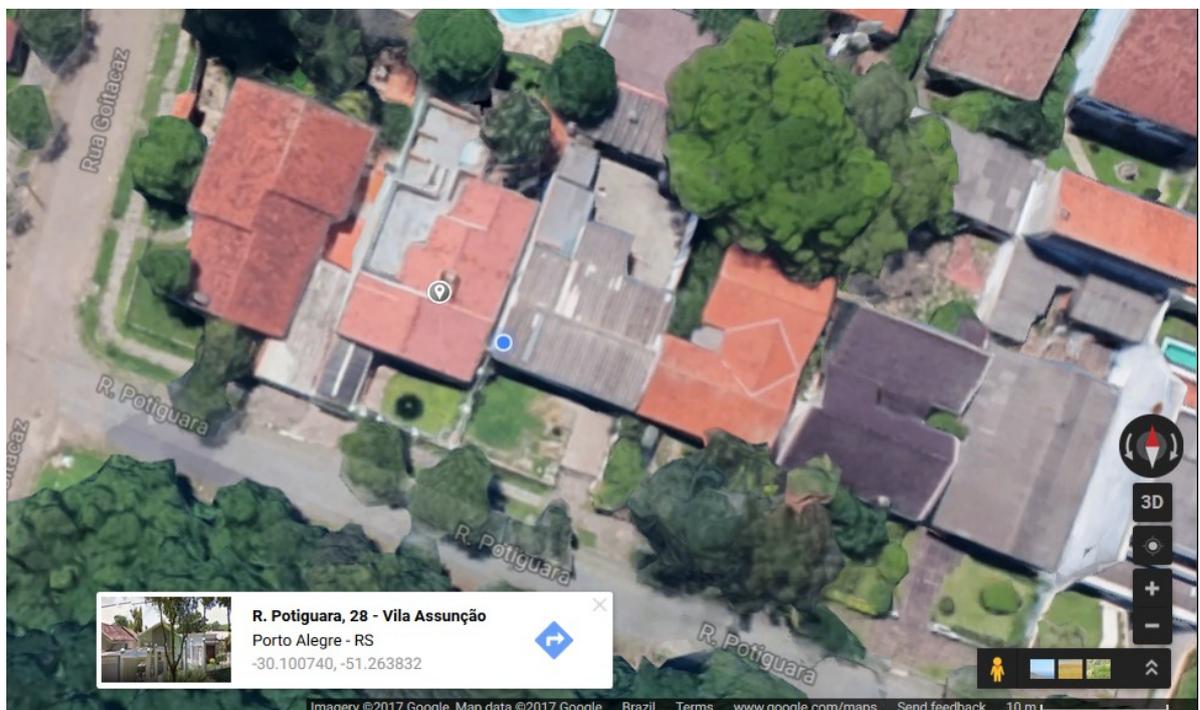
3 MÉTODO

Conforme já descrito, este trabalho trata de um estudo de caso e ações sobre o desempenho térmico de uma residência unifamiliar, apresentando o método previsto na NBR 15220-2 (cálculo) e NBR 15575-1 simulação computacional.

A motivação da escolha da unidade habitacional que será analisada deve-se ao seu histórico de renovações e diferenças construtivas. A residência unifamiliar selecionada localiza-se na cidade de Porto Alegre/RS, possibilitando determinar qual a zona bioclimática que deve ser considerada nos cálculos e simulações, sendo esta a zona 3.

As simulações presentes neste trabalho são feitas utilizando como base uma residência construída aproximadamente em 1954, localizada no bairro Assunção, próxima ao lago Guaíba, na zona sul de Porto Alegre/RS, podendo ser observado na figura 5. Para iniciarmos as simulações foi necessário fazer um levantamento das dimensões da edificação, devido a falta de documentos, como a planta baixa, para que fosse possível elaborar os cálculos necessários e o modelo gráfico inicial.

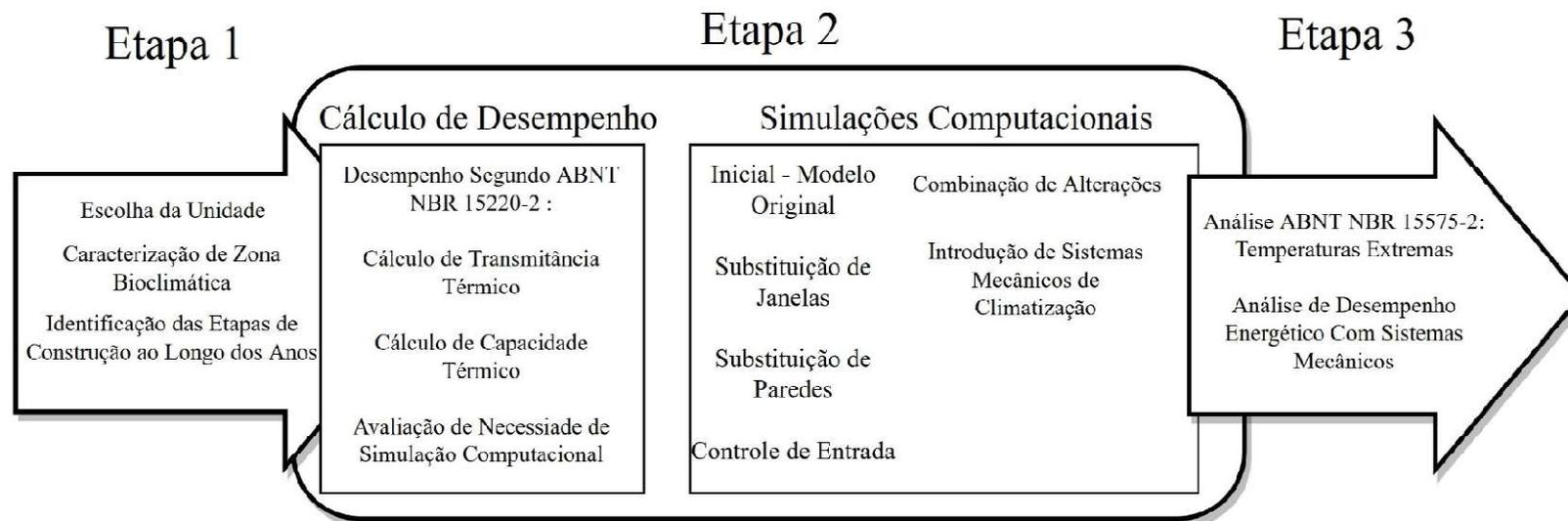
Figura 5 – Imagem via Satélite da Edificação



(fonte: GOOGLE MAPS, 2017)

É seguido um roteiro de execução dos métodos citados (figura 6) que mostra como são analisados os resultados obtidos com as simulações mencionadas anteriormente.

Figura 6 – Etapas de execução



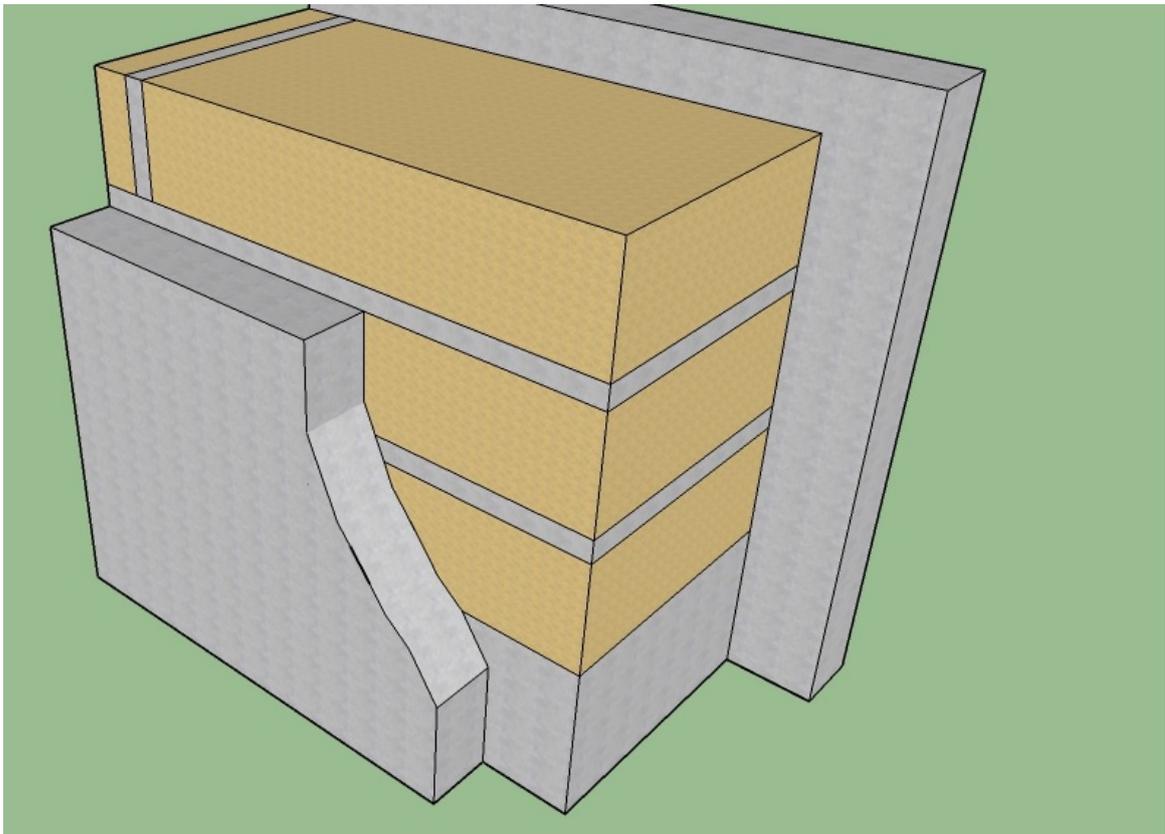
(fonte: elaborado pelo autor)

3.1 EVOLUÇÃO DA EDIFICAÇÃO AO LONGO DOS ANOS

A residência utilizada como base para a elaboração desta pesquisa sofreu modificações estruturais ao longo dos anos, o que acarretou numa construção com diferentes métodos construtivos, principalmente nas paredes externas que sofreram alterações de espessura devido ao posicionamento do tijolo em relação ao sentido da parede.

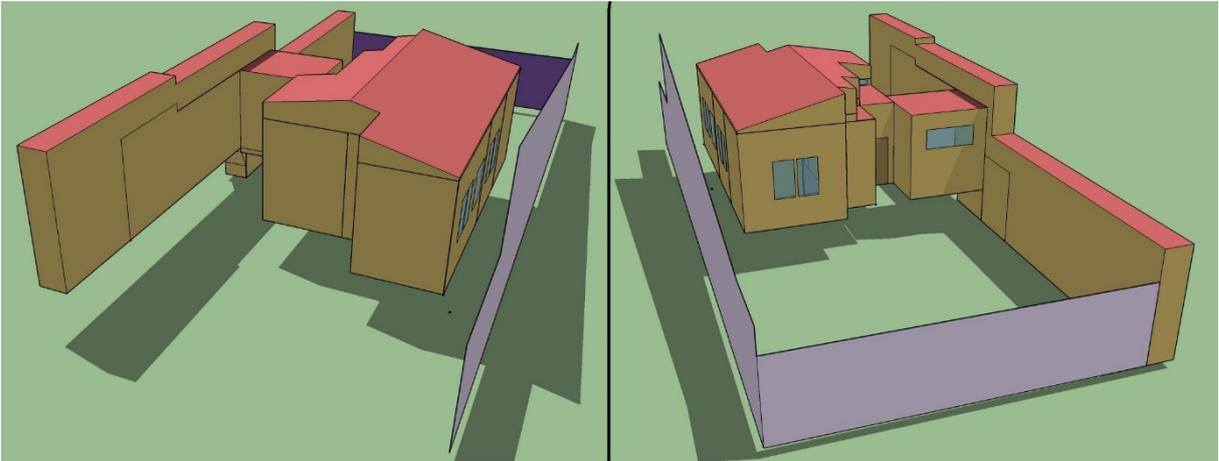
A construção original era composta por três quartos, um banheiro, dois corredores, uma sala de estar e cozinha. Devido à época de construção, ano 1954, e condições financeiras dos donos da edificação a espessura das paredes externa foi reduzida, com uma espessura média de 18 centímetros detalhamento na figura 7, sendo constituída por argamassa e tijolos, porém alocados no sentido longitudinal da parede. Na figura 8, podemos observar como era a estrutura original da edificação.

Figura 7 – Detalhamento das paredes externas com 22cm



(fonte: elaborado pelo autor)

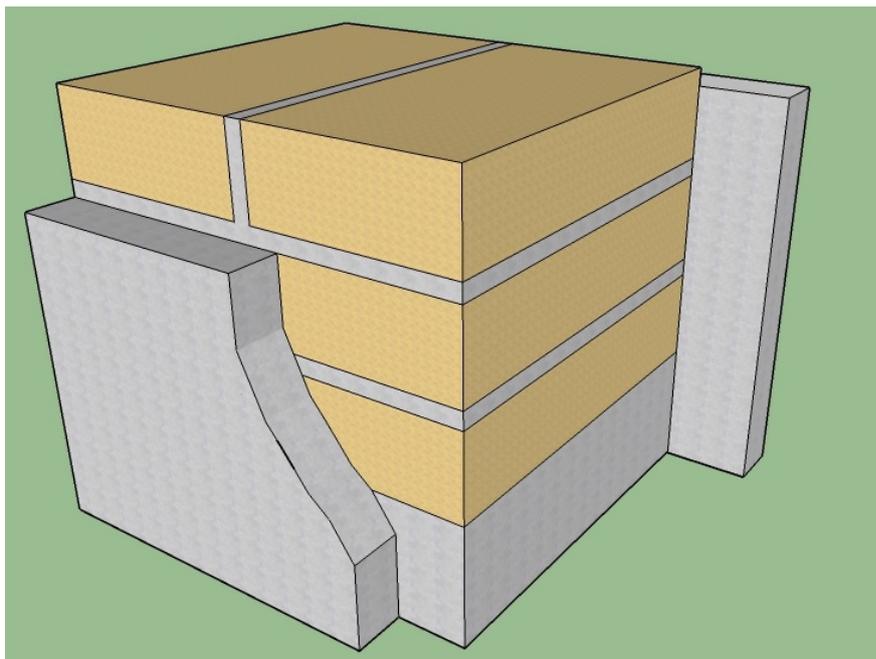
Figura 8 – Vista frontal e posterior, respectivamente, da residência em 1954



(fonte: elaborado pelo autor)

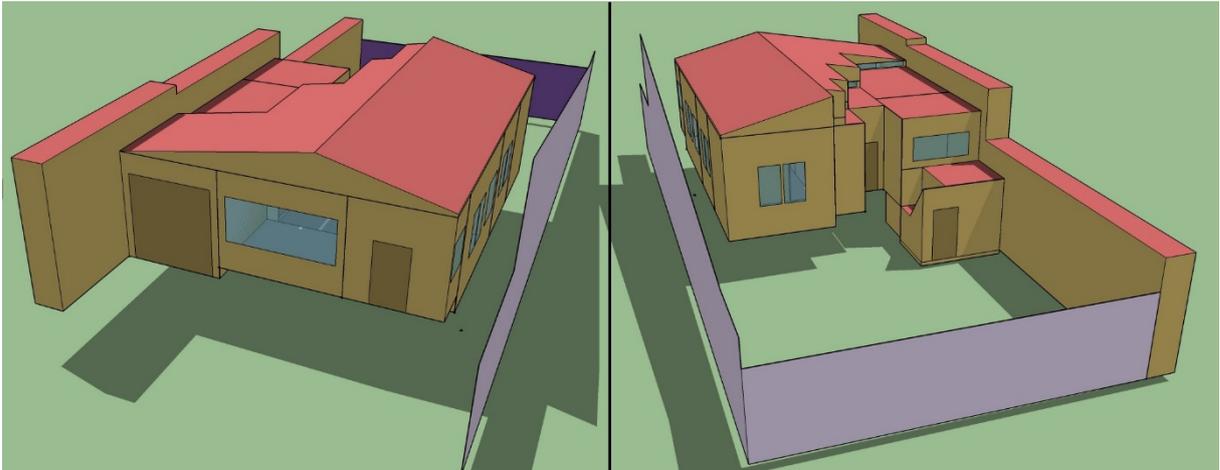
Após as reformas e expansões os seguintes cômodos foram adicionados: hall de entrada, uma segunda sala de estar e garagem. Essa expansão aconteceu por volta de 1980, e a família residente possuía melhores condições financeiras, assim estas novas áreas foram construídas utilizando uma técnica construtiva superior, alocando os tijolos no sentido transversal nas paredes externas, apresentando assim uma espessura de 28 centímetros, como pode ser visto na figura 9. A figura 10 mostra como a edificação ficou após ser modificada.

Figura 9 – Detalhamento das paredes externas com 28cm



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 10 – Vista frontal e posterior, respectivamente, da residência em 1980

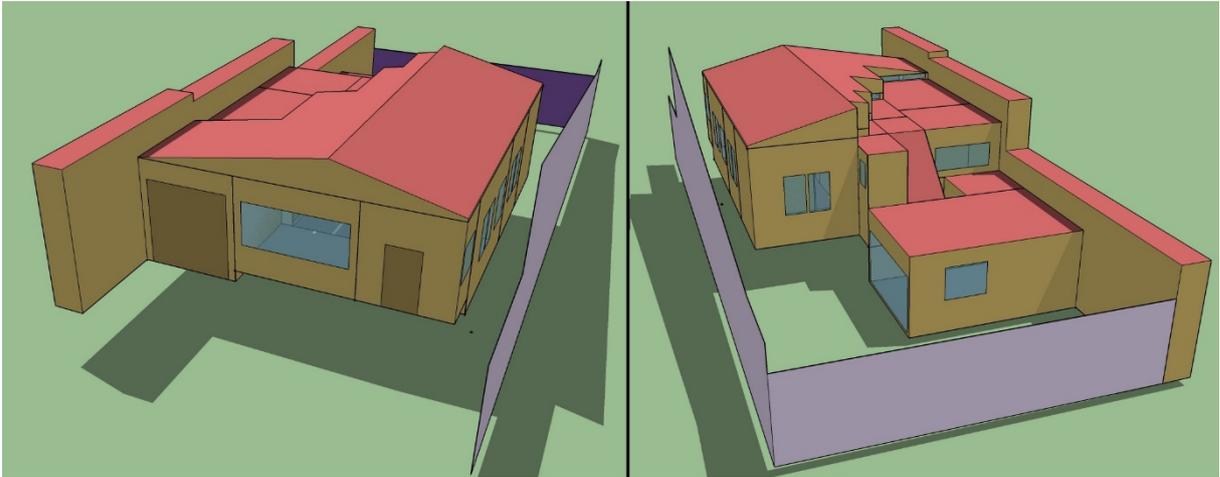


(fonte: elaborado pelo autor)

A reforma mais recente ocorreu em meados do ano 2000, na qual foi adicionada uma nova cozinha mais ampla, mudando a utilização da antiga cozinha para um escritório. Esta reforma foi realizada a partir do fechamento de uma área de churrasqueira que possuía um terraço, de uso, como cobertura.

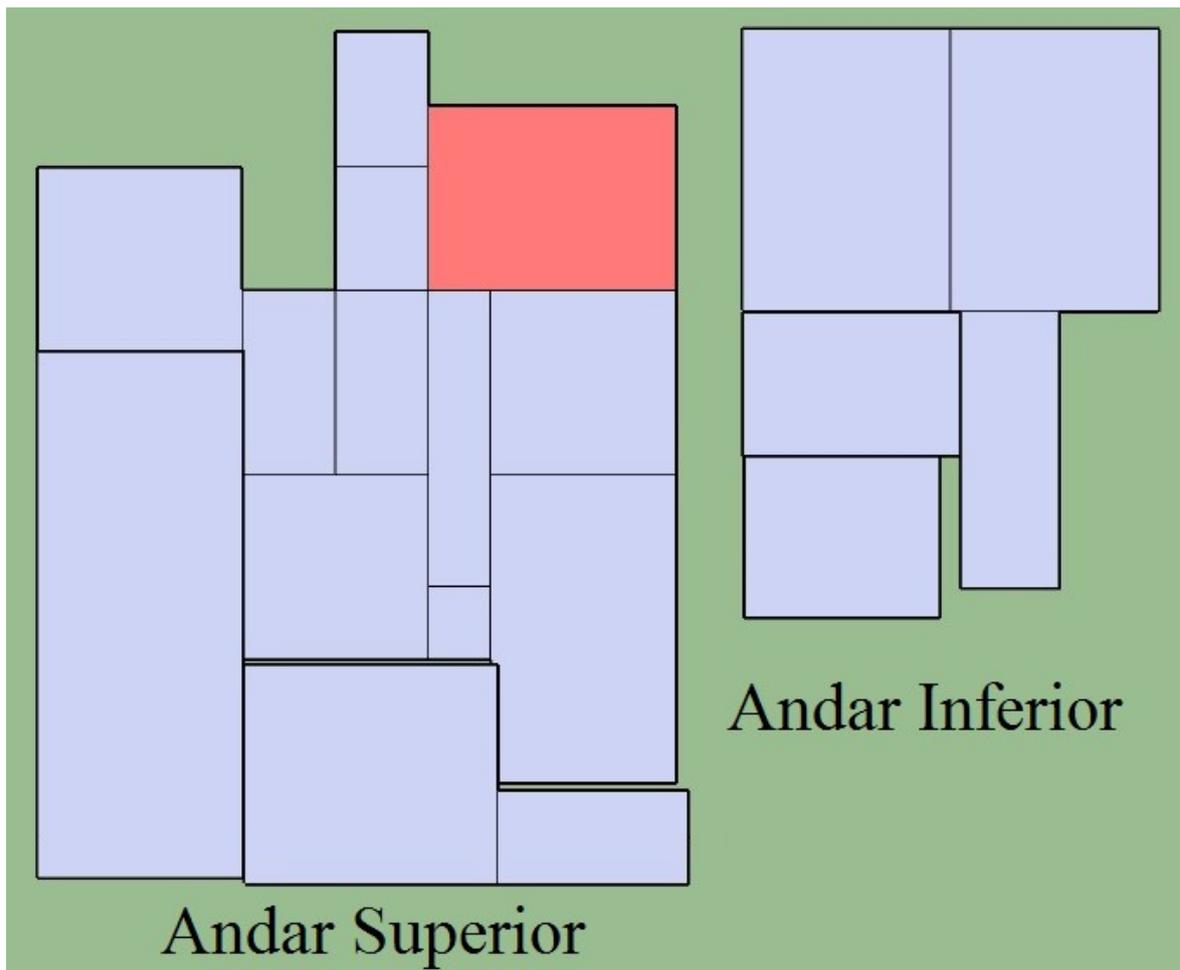
O terraço, por não ter sido executado para ser utilizado como cobertura de uma zona fechada, possibilita deduzir que terá um desempenho insatisfatório e inferior quando comparado ao resto da residência. A figura 11 representa o modelo computacional utilizado nas simulações de desempenho térmico e, posteriormente, pode-se observar o esboço da planta baixa na figura 12 ilustrando a edificação atual, com a suíte destacada em vermelho.

Figura 11 – Vista frontal e posterior, respectivamente, da residência em 2000 até atualmente



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 12 – Esboço de planta baixa com suíte destacada em vermelho



(fonte: elaborado pelo autor)

3.2 CÁLCULO DE DESEMPENHO – NBR 15220-2

Utilizando as fórmulas previamente explicadas de transmitância e capacidade térmica (páginas 25 e 26) serão realizados os cálculos de desempenho térmico da residência estudada. Para a realização desses cálculos foram seguidos os valores obtidos na NBR 15220-2 de densidade aparente, condutividade térmica e calor específico dos materiais. Seguindo as especificações da norma, serão apurados valores para o desempenho térmico de coberturas e paredes externas da edificação. Com os resultados é possível definir se há necessidade de executar uma simulação computacional, caso os elementos analisados não apresentem desempenho mínimo. As características dos componentes de paredes e coberturas podem ser observadas no Apêndice A, com as respectivas camadas que compõe suas estruturas.

3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL – NBR 15575-1

Como previsto na NBR 15575-1 é necessária a simulação computacional para análise de desempenho do dia característico de verão e, em algumas situações, de inverno. Dependendo da zona bioclimática os pré-requisitos são diferentes e neste trabalho considera-se a zona 3, o que torna necessário a análise do dia característico de inverno. Assim foram considerados tais dias como parâmetros para uma primeira análise de desempenho da unidade habitacional em todas as simulações.

Além dos dias característicos, também foram realizadas simulações de desempenho térmico anual, que tem como propósito gerar dados para um segundo método de análise de desempenho, que será descrito no decorrer do trabalho.

O **dia característico de verão** em Porto Alegre é 21 de janeiro, apresentando temperatura máxima de 34,7°C e amplitude térmica de 9,7°C, informações disponibilizadas pelo INMET. Esses valores são diferentes dos disponibilizados pela NBR 15575-1 que possui temperatura máxima de 34,8°C e amplitude térmica de 12,6°C. Foi feita a escolha pelos valores apresentados pelo INMET, por esses representarem valores atualizados para 2016. O gráfico da curva diária pode ser observada em todas as simulações de dia característico de verão como parâmetro de comparação entre as temperaturas externas e internas das zonas.

Para avaliação de desempenho da simulação são utilizados os critérios estabelecidos na NBR 15575-1, que classifica o rendimento mínimo para capacidade de isolamento da temperatura interna de uma edificação. Devem ser considerados os valores referentes à zona bioclimática 3 presentes na figura 13, devido à localização da unidade habitacional avaliada ser em Porto Alegre/RS.

Figura 13 – Critérios de avaliação de desempenho para dias característicos de verão

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
M	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$
I	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^\circ \text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 1\text{o C})$
S	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4^\circ \text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2\text{o C})$ e $T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 1\text{o C})$
<p>$T_{i,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius; $T_{e,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius; $T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius; $T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius; NOTA Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3.</p>		

(fonte: ABNT, 2013a)

O **dia característico de inverno** ocorre em 21 de julho. Diferentemente da simulação do dia característico de verão os dados disponibilizados nos arquivos do INMET não possuíam amplitude térmica (sendo considerada 0°C) somente uma temperatura mínima de $3,9^\circ\text{C}$. Foi escolhida, para os critérios da simulação, a temperatura mínima fornecida, por apresentar valores atualizados em relação aos disponibilizados em norma. Entretanto a amplitude térmica de $8,6^\circ\text{C}$, descrita na NBR 15575-1, foi aplicada para uma melhor aproximação da situação real. O gráfico de temperatura diária pode ser observado como parâmetro de comparação em todas as simulações de dia característico de inverno.

Como método de avaliação de desempenho dos dados simulados foram usados os parâmetros estipulados em norma. A figura 14 apresenta os valores de temperatura mínima para verificação, como pode ser visto dependendo da zona analisada esse critério pode ser ignorado, entretanto como a residência unifamiliar avaliada é localizada na zona bioclimática 3, torna-se obrigatória a análise de desempenho térmico para os dias característicos de

inverno, como antes citado, visto que a norma estabelece que as zonas de 1 a 5 devem ter seus desempenhos calculados.

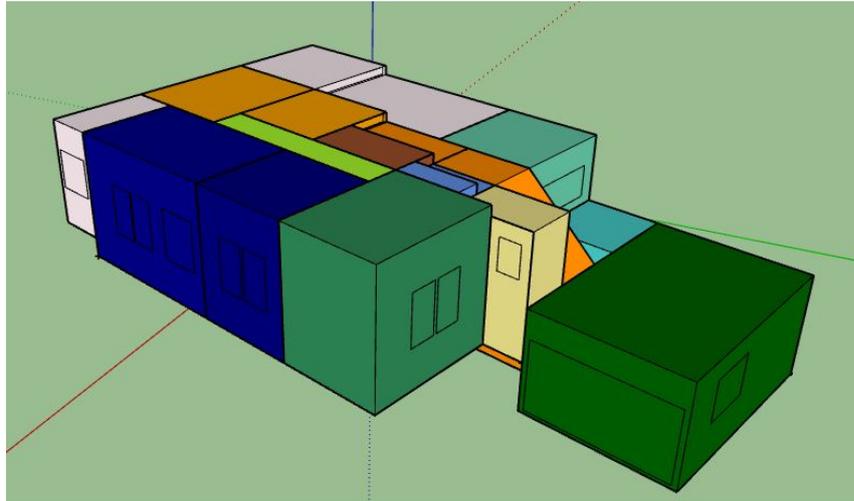
Figura 14 – Critérios de avaliação de desempenho para dias característicos de inverno

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas bioclimáticas 1 a 5)	Zonas bioclimáticas 6, 7 e 8
M	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3^\circ \text{ C})$	Nestas zonas, este critério não precisa ser verificado
I	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 5^\circ \text{ C})$	
S	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 7^\circ \text{ C})$	
<p>$T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius;</p> <p>$T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius;</p> <p>NOTA Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3.</p>		

(fonte: ABNT, 2013a)

De acordo com o estipulado na NBR 15575-1 é necessário identificar cada cômodo da edificação como uma zona térmica individual. As zonas térmicas que compõem estas simulações podem ser observadas na figura 15.

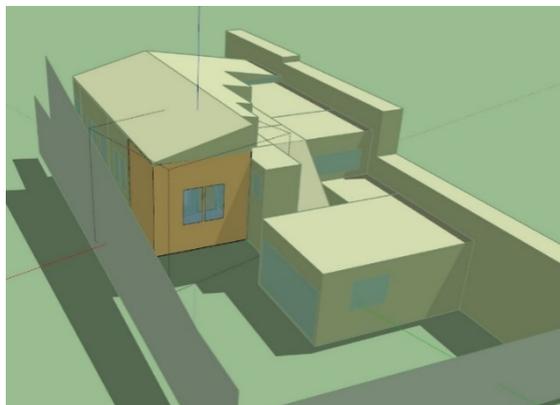
Figura 15 – Zonas Térmicas



(fonte: elaborado pelo autor)

Devido ao grande volume de resultados gerados pelo *software Openstudio* para cada simulação, foi necessário selecionar uma zona da residência como parâmetro para avaliar o efeito das modificações. Para essa escolha foi levado em consideração um local que todas as modificações tenham impacto direto. Por tal motivo a suíte foi selecionada e sua localização pode ser observada na figura 16 e também na figura 12, destacada em vermelho na planta baixa. A suíte apresenta paredes originárias de 1954, duas janelas com vidro simples de 6mm de espessura e dimensões de 0,8x1,5m cada, que possibilitam modificações das aberturas, além de se enquadrar como zona de dormitório, requisito da NBR 15575-1 para análise computacional.

Figura 16 – Localização da suíte presente na edificação



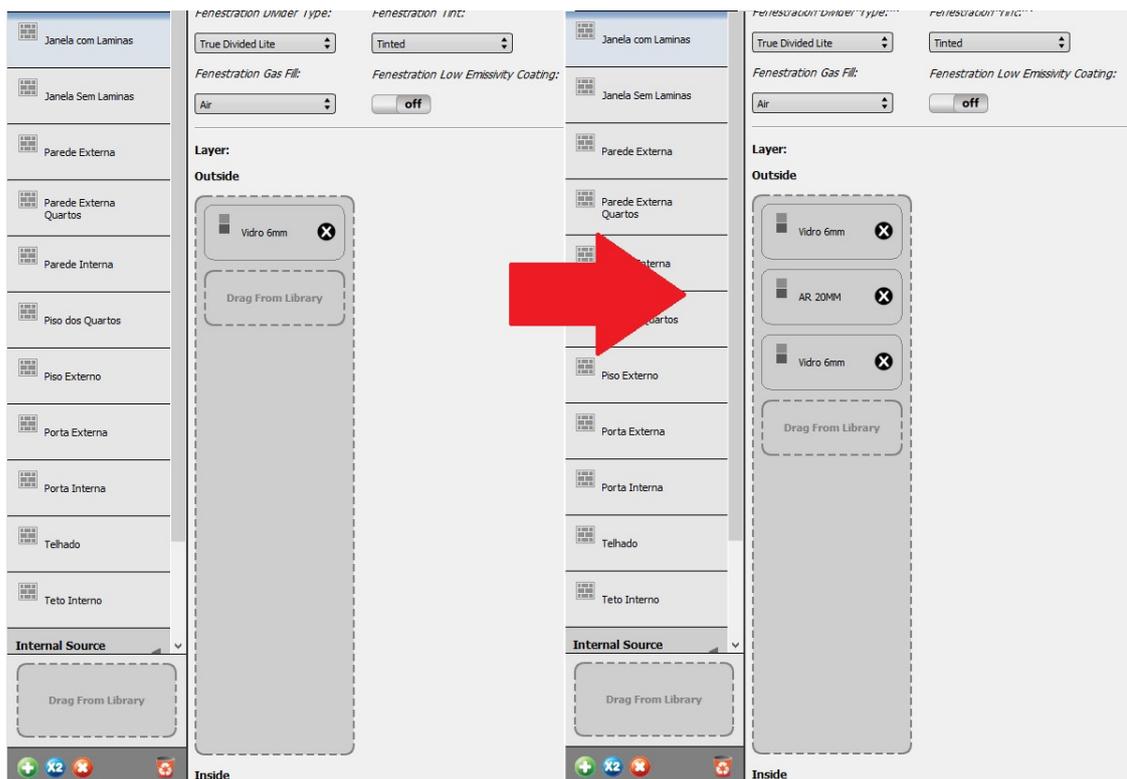
(fonte: elaborado pelo autor)

3.3.1 Simulação computacional com vidros duplos

A modificação realizada para analisar o desempenho da edificação será a substituição de todas as janelas, que atualmente são compostas por vidros simples, por janelas com composição de duas camadas de vidro 6mm e uma camada de ar de 20mm entre elas.

As características da mudança são dispostas na figura 17 a seguir, sendo aplicadas no desenvolvimento dos elementos do *software OpenStudio*, adicionando camadas extras de materiais, mais especificamente a inclusão de uma lâmina extra de 6mm de vidro normal e uma camada de 20mm de ar entre as duas lâminas de vidro.

Figura 17 – Modificação na constituição das janelas



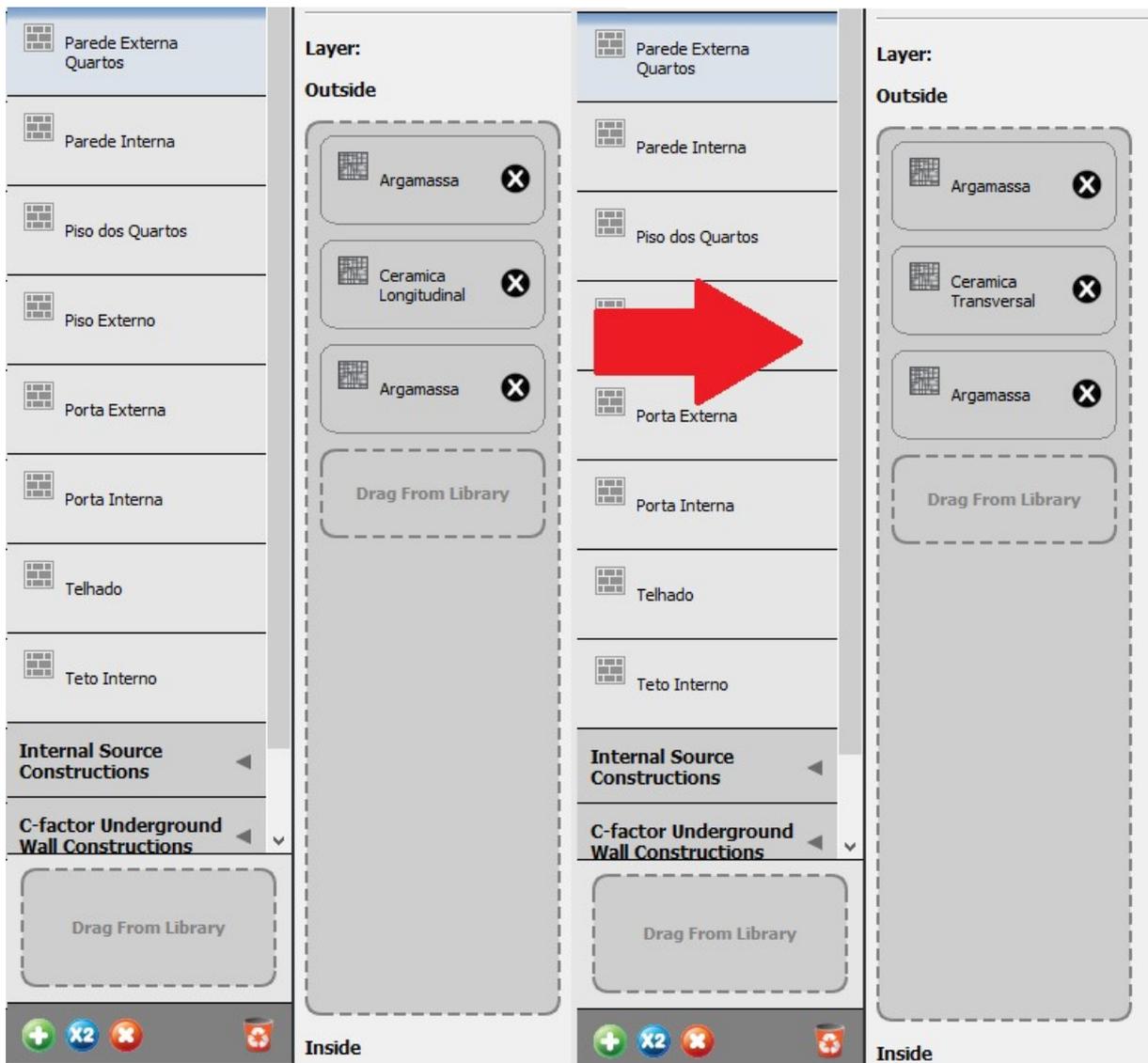
(fonte : elaborado pelo autor)

3.3.2 Simulação computacional com paredes modificadas

Para essa simulação serão realizadas mudanças nos elementos da edificação, nesse caso, aumentando a eficiência da capacidade de isolamento das paredes externas nas áreas construídas em 1954, apresentadas na figura 18.

O método construtivo utilizado foi igual ao efetuado no restante da edificação, escolha que foi empregada devido ao fato do modelo ter sido simulado numericamente no item 4.1 e aprovado nos critérios da NBR 15575-4, referente ao método de cálculo, resultando num desempenho superior. As mudanças foram efetuadas na camada de tijolos, alterando seu sentido em relação a parede e assim sua espessura, de 12 para 22 centímetros, aumentando o desempenho das paredes externas na edificação construída em 1954, especificamente a zona dos dormitórios.

Figura 18 – Modificação da constituição do conjunto de paredes externas



3.3.3 Simulação computacional com fluxo de ar controlado

Diferente das simulações anteriores, esta propõe uma nova alternativa de funcionamento da circulação de ar da edificação. Para tal, foi realizada uma mudança no fluxo de entrada de ar, alterando os critérios para que pudesse haver uma troca de ar com o exterior mais eficiente. O critério estabelecido na NBR 15575-1 anteriormente descrito, prevê uma renovação de ar por hora no dia característico de verão, independente da temperatura externa, com possível modificação para cinco renovações, ocasionando melhoria no desempenho da edificação.

Neste trabalho foi utilizada, desde o início, a taxa de cinco renovações de ar por hora. Entretanto, nesta simulação a taxa de entrada foi modificada para funcionar dependendo da temperatura externa, deixando de ser um fluxo constante. Portanto foi estabelecida uma troca de ar com o exterior somente quando a temperatura interna for deslocada para a faixa de 20-25°C, selecionada por se enquadrar no intervalo de conforto térmico estabelecido na carta bioclimática de Givoni, já citada.

O mecanismo programado assemelha-se ao utilizado pelo edifício Bullitt Center, que possui um sistema central de controle de entrada de ar para manutenção da temperatura interna em uma faixa desejada, como já mencionado na introdução deste trabalho.

Devido a limitações do *software Openstudio*, quando é definido uma ventilação natural com limites de temperatura específico sem a utilização de ferramentas de climatização mecânicas, automaticamente é limitada a entrada de ar somente para a refrigeração ambiental e não para o aquecimento, assim limitando seu efeito em dias de inverno, que possuem um aumento considerável de temperatura no período diurno. Entretanto como no inverno a maior parte de troca de calor é devido a radiação solar o impacto acaba sendo reduzido.

3.3.4 Simulações com mais de uma alteração

Todas as simulações que apresentam mais de um elemento alterado em relação ao modelo inicial, seguem a metodologia das simulações individuais, demonstrando apenas como é a relação e o efeito quando ocorre mais de uma alteração simultânea.

3.4 ANÁLISE DE RESULTADOS

A **primeira análise** realizada segue os parâmetros estabelecidos em norma, NBR 15220-2, e caracteriza a unidade habitacional quanto aos seus elementos e não ao todo, considerando o desempenho do fechamento vertical e superior (paredes externas e telhado) levando em conta a transmitância e capacidade térmica. Com esses valores é possível localizar zonas com problema de desempenho e, assim, determinar a necessidade da realização de uma simulação computacional.

A **segunda análise** realizada, proposta pela NBR 15575-2, estabelece o desempenho da residência unifamiliar em uma simulação computacional, na qual somente é considerado o desempenho dessa em relação aos seus dias característicos e quanto a temperaturas de pico, não levando em conta as variações de temperatura que ocorrem ao longo do dia.

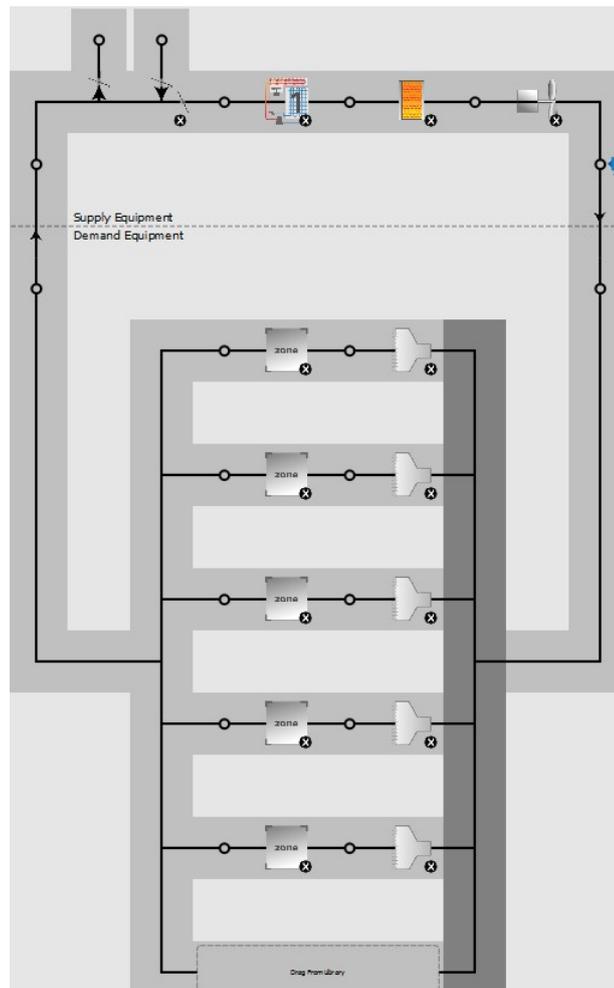
A **terceira análise** de desempenho foi desenvolvida pelo autor deste trabalho, considerando o consumo de energia para manutenção de temperatura, em determinadas zonas da residência unifamiliar, em uma faixa considerada agradável pelos usuários, servindo apenas como parâmetro para determinar a eficiência da simulação, em questão caso opta-se pela utilização de sistemas mecânicos de climatização.

Para tal serão realizadas simulações com manutenção de temperatura na faixa de 20 a 25°C, estabelecido para atingir uma temperatura de conforto térmico prevista na carta bioclimática de Givoni, por meios mecânicos de climatização elétrica, possibilitando quantificar a diferença causada pelas mudanças anteriormente descritas nas simulações.

Para desenvolver essa simulação, inicialmente foi estabelecido o sistema de fluxo de ar que é utilizado na dispersão do ar na unidade habitacional, o que pode ser observado na figura 19, escolhendo quais áreas da residência unifamiliar estariam sujeitas ao seu efeito. A escolha das zonas que serão climatizadas foi definida levando em consideração os critérios da NBR

15575-1, que prevê análise de desempenho térmico para quartos e salas. Devido ao formato dos dados gerados é possível expor todos os resultados das zonas selecionadas quanto ao seu consumo de energia elétrica, e não somente da suíte como foi necessário no segundo método de análise.

Figura 19 – Sistema de Resfriamento e Aquecimento Mecânico



(fonte : elaborado pelo autor)

Para seleção dos equipamentos encontrados no sistema apresentado na figura 19 serão utilizados equipamentos disponibilizados na Biblioteca de Componentes de Edificação do NREL, *National Renewable Energy Laboratory*. Esta escolha ocorre porque, caso contrário, se não fossem utilizados os dados existentes nesta biblioteca, o autor deste trabalho necessitaria realizar uma pesquisa a parte sobre o funcionamento de equipamentos de climatização e inseri-los manualmente no *software*, gerando um retrabalho, devido ao nível de precisão elevado dos dados já disponibilizados na NREL.

Os equipamentos foram submetidos a um cronograma de funcionamento associado a temperatura da zona, de forma que os aparelhos sejam utilizados quando há necessidade de ajuste na temperatura, deslocando-a para a faixa determinada.

Mesmo que um sistema de refrigeração e aquecimento central não seja prático em termos de implementação em uma residência unifamiliar, os valores de consumo que serão obtidos servem para uma quantificação de desempenho ao longo do ano, embora seja difícil estabelecer faixas de desempenho quanto ao consumo de energia, devido ao fato da norma não prever esse tipo de análise.

4. SIMULAÇÕES

Para analisar o desempenho da edificação, primeiro foram realizados cálculos especificados na NBR 15220-2 descritos anteriormente neste trabalho. Os cálculos efetuados levaram em consideração diferentes fatores, como desempenho térmico para diferentes espessuras de tijolos. Devido a fatores temporais não foi possível realizar ensaios com os materiais citados na norma em questão.

4.1 CÁLCULO DE TRANSMITÂNCIA E CAPACIDADE TÉRMICA

Como pode ser observada na figura 20, a transmitância térmica com tijolos colocados no sentido longitudinal da parede apresenta desempenho insuficiente quanto ao quesito requerido, visto que o valor máximo exposto em norma é 3,7 e, ao realizarmos os cálculos, foi encontrado um valor acima do mínimo exigido. Além da parede externa, a região da edificação com laje exposta, presente na área da cozinha nova, também não apresenta desempenho suficiente, com uma transmitância térmica muito elevada.

Figura 20 – Valores obtidos para cálculos de desempenho previsto na NBR 15220-2

Sistema Construtivo	Característica	Capacidade Térmica (kJ/ m ² .K)		Transmitância Térmica (W/m ² .K)	
		Mínimo	Resultado	Mínimo	Resultado
Cobertura	Laje	>=130	330	<=2,3	3,38
	Telha	>= 130	291,6	<=2,3	1,84
Parede Externa	18cm	>= 130	279,7	<= 3,7	3,98
	28cm	>= 130	485,8	<= 3,7	2,27

(fonte : elaborado pelo autor)

Por meio desse diagnóstico é possível determinar quais seções da casa apresentam problemas, sendo essas as zonas de construção original de 1954, executadas de modo incompatível com os pré-requisitos atuais de norma. Além disso, foi possível identificar que, apesar de ser um adendo recente a estrutura da residência, a zona construída da cozinha nova, ainda assim não segue os padrões da norma em questão, pois sua cobertura não foi dimensionada para atuar como laje exposta de uma zona fechada. Devido a este resultado é necessário realizar uma simulação térmica para estimar o rendimento da edificação de maneira eficiente e completa.

A partir dos resultados obtidos foi determinado que para melhor analisar o rendimento da edificação, seria necessária a realização de uma simulação computacional, seguindo os parâmetros definidos na NBR 15575-1, já mencionados neste trabalho.

4.2 MODELAGEM TÉRMICA

O processo de desenvolvimento dos modelos inicia-se com a seleção dos *softwares* empregados nas simulações. Foi utilizado o software *Sketchup Pro 2017* com o auxílio do *plug-in* do *software* de simulações térmicas *Open Studio 2.1* para elaboração do modelo computacional. Também, esse último programa foi selecionado devido aos resultados obtidos nas suas simulações térmicas apresentarem ótima precisão igualando-se, quando a modelagem é realizada de modo satisfatório, ao *software* mais utilizado da área térmica, *Energyplus*, que serve de base para realizar cálculos no *Open Studio*, gerando dados que podem, caso necessário, ser transferidos livremente entre os *softwares*.

O desenvolvimento de uma simulação começa no levantamento dos dados necessários para geração do modelo computacional. Os valores exigidos para uma simulação térmica vão além das dimensões físicas de uma edificação, sendo necessário identificar e caracterizar os materiais que compõem os elementos sólidos da construção. As dimensões das áreas compreendidas no modelo são de fácil obtenção, bastando apenas um aparelho de medição e acesso ao local, podendo observar-se na planta baixa da residência antes exibida.

Características físicas dos materiais limitantes das zonas, são de obtenção mais restrita, podendo ser adquiridas de duas formas:

- a) medições de desempenho *in loco* seguindo os métodos descritos na NBR 15575-1, Tabela 11.1 presente no anexo A;
- b) identificar os materiais utilizados na construção e selecionar os valores disponibilizados na NBR 15220-2, presentes no anexo B da norma.

Devido ao tempo e dispositivos necessários para a realização de medições de desempenho *in loco* serem muito longos, foi selecionado o segundo método para caracterização dos elementos estruturais da edificação. Os dados dos materiais que compõem a residência foram descritos por um usuário da unidade habitacional que conhece o histórico do local.

Para dar início às simulações elaborou-se a planta baixa do imóvel, visto que houve necessidade de criar a planta, devido à falta do projeto original. Somente após essa etapa é possível começar a modelagem da edificação, que se inicia pela concepção dos espaços da residência.

Como descrito na NBR 15575-1 cada cômodo deve ser dividido em um espaço próprio, entretanto é possível caracterizá-los em tipos de espaço, tais como banheiros, quartos, cozinhas e demais zonas diferenciadas para que sejam simulados com diferentes condições. Contudo, se um tipo de espaço sofrer alterações em sua constituição, essa variação será aplicada em todos os cômodos dentro do mesmo aspecto, por exemplo: diferentes dormitórios, com dimensões e aberturas com características independentes, mas com utilização e propriedades iguais, como mesmas cargas térmicas e definições de fluxo externo de ar. Fazendo uso destas divisões é possível alterar condições de uso escolhendo diretamente quais áreas devem ser afetadas com base em suas definições de espaço.

Após a modelagem básica estar concluída é necessário começar a introdução de aberturas para melhorar o resultado final da simulação. Inicialmente são inseridas janelas e portas com as dimensões medidas in-loco, para futuramente serem caracterizadas quanto a seus elementos.

A seguir, é preciso inserir as zonas de sombreamento, que afetam a incidência solar na unidade habitacional. As edificações vizinhas que não apresentam zonas adjacentes às zonas da residência analisada devem ser modelados como zonas de sombreamento, para assim simular as condições existentes no local. Além disso sombreamentos de janelas também podem ser inseridos ou não, respeitando a NBR 15575-1.

É válido ressaltar que construções adjacentes não podem ser simplesmente substituídas por zonas de sombreamento, devido ao fato de ocorrer trocas de calor por condução em suas superfícies, de maneira que é necessário inserir dados aproximados das construções junto a unidade habitacional analisada.

Após concluído o modelo computacional inicia-se a inserção dos dados de materiais que compõem a edificação, sendo que tais informações são retiradas da NBR 15220-2. O *software* usado detalha uma superfície como camadas de diferentes tipos de materiais, assim, por exemplo, uma parede de alvenaria estrutural é formada por uma camada de tijolos revestidos

em ambos os lados por camadas de argamassa, sendo esses desenvolvidos separadamente e unidos na ordem necessária para representar a realidade.

Para a caracterização dos elementos construtivos da edificação são desenvolvidos conjuntos de construção, que descrevem os materiais utilizados em cada superfície das zonas, como pisos, paredes, aberturas, entre outros. Cada superfície por sua parte é constituída como exemplificado no parágrafo anterior. Com esses conjuntos já detalhados é possível determinar a constituição de cada espaço elaborado no processo de modelagem, podendo diferenciar quando necessário cada região com grupos específicos, no caso estudado as áreas construídas em 1954 possuem diferentes elementos de vedação vertical externa em relação ao restante da edificação, sendo necessário a alteração de apenas um elemento no conjunto de construção.

Com os elementos físicos da construção estabelecidos é necessário começar a tipificação da edificação em zonas térmicas. Cada zona tem sua simulação interna independente, com trocas de calor quando justapostas, sendo que essas trocas ocorrem por condução quando há contato direto e por convecção através de aberturas internas entre as zonas.

Para determinar os níveis de rendimento exigidos, realizar a simulação e os cálculos de desempenho, foi selecionada a zona bioclimática três onde se encontra a cidade de Porto Alegre/RS. Sendo assim, foram implementados os dados climáticos da cidade no modelo computacional, disponibilizados no *site* do LabEEE (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações) da Universidade Federal de Santa Catarina, tais dados são originários do INMET.

A realização das simulações seguiram as considerações exigidas na NBR 15575-1: estabelecer a orientação solar correta; utilização dos dados climáticos de Porto Alegre; janelas sem sombreamento e os dados para caracterização da estrutura, utilizando as informações disponíveis na NBR 15220-2. Desta forma, é possível elaborar a simulação dos dias típicos de inverno e verão, assim como a simulação anual. Também foi adicionada a carga térmica de dois usuários em cada quarto na parte da noite, entre os horários das 22h às 8h, para simular a presença de pessoas, aproximando-se da real utilização informada pelos proprietários. Inicialmente qualquer carga elétrica envolvida na utilização de aparelhos não foi considerada, sendo resguardadas para outras simulações, conforme previsto na NBR 15575-1, que não recomenda a inclusão destas.

Para determinar a influência dos usuários é definida uma taxa 81w/pessoa, valor baseado em uma análise realizada na UFSC, como mencionado “A taxa metabólica para cada atividade é determinada em função do tipo de atividade desempenhada em cada ambiente. Para a atividade no dormitório (dormindo ou descansando), o valor de calor dissipado de 81 W/pessoa” (SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2013). Embora na NBR 15575-1 não seja recomendado a inclusão de cargas de utilização para o dia específico de verão, foi escolhido inclui-las para aproximar a simulação da condição de uso.

Foi determinada a taxa de cinco renovações de ar por hora em ambientes de salas e dormitórios, o que equivale a condição “ventilada”. Entretanto, na NBR 15575-1 é recomendado a utilização de uma taxa de uma renovação por hora para simulação dos dias característicos, com a possibilidade de utilização de cinco renovações por hora somente no dia de verão.

Nas simulações dos itens 4.4, 4.5, 4.6, e 4.8 foram utilizadas taxas de renovação de cinco por hora para ambos os dias característicos, podendo ser analisada a variação da taxa de renovação em ambas as situações para determinar a mais eficiente. Mais além, foram adicionadas alterações na estrutura para diferentes simulações, sendo elas, as correções das paredes nas zonas antigas (1954) da residência, equalizando seu desempenho com o restante da edificação, e alterações nos vidros da moradia, por meio do uso de aberturas com lâminas de vidros duplos.

4.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ORIGINAL

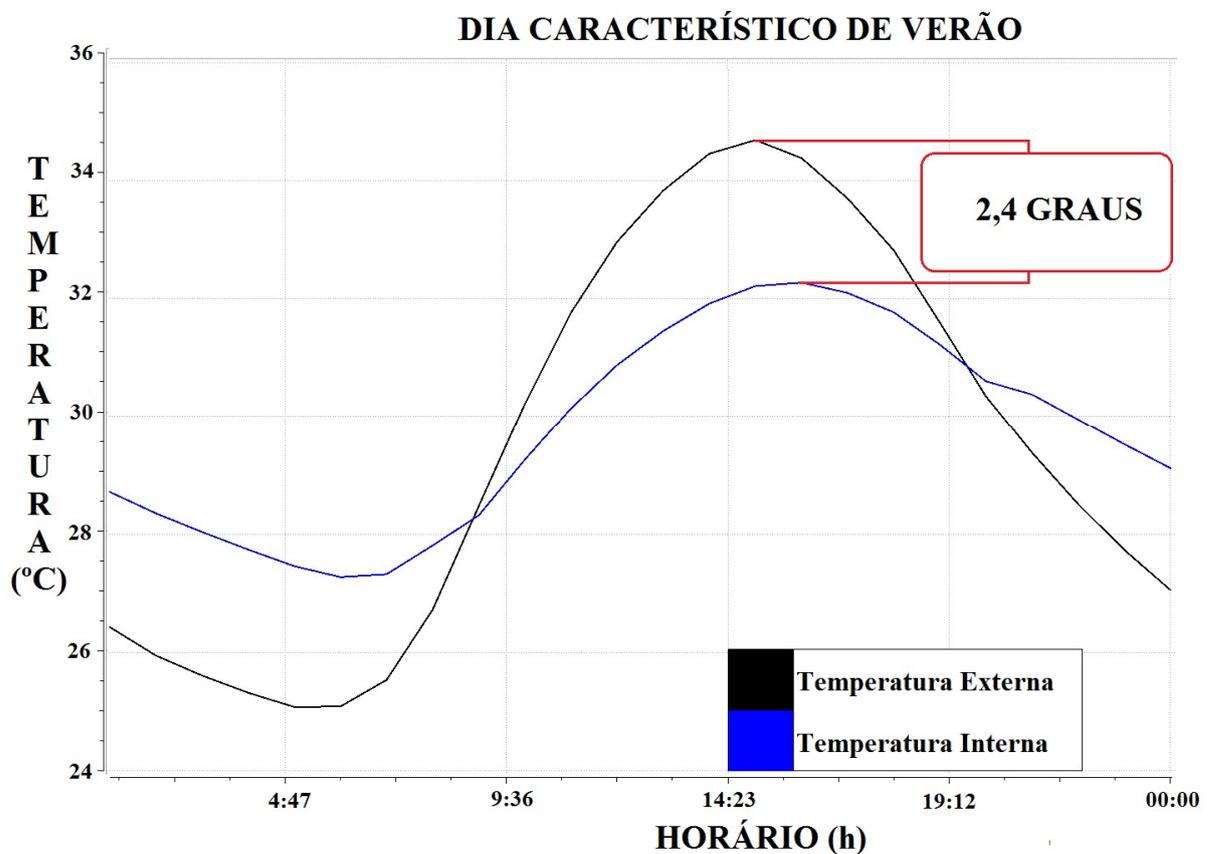
Para a escolha dos dois dias característicos, de inverno e verão, foi utilizado o critério de dia mais frio e mais quente do ano, a fim de exemplificar as piores situações climáticas que poderiam causar impacto na eficiência térmica da residência, utilizando os dados citados anteriormente. Sendo estes os dias que mais necessitam reguladores térmicos artificiais, tanto de aquecimento quanto refrigeração. Assim como descrito em ASHRAE 14, (2009, p 5, tradução nossa): “O mês com a temperatura média de bulbo seco mais elevada é utilizado, por exemplo, para determinar a época do ano em que ocorrem as cargas de arrefecimento sensíveis máximas, não tendo em conta as cargas solares” para os dias característicos de verão, e para os dias de inverno “O mês com a menor temperatura média de bulbo seco é

usado, por exemplo, para determinar a época do ano em que ocorre a carga de aquecimento máxima.”, (ASHRAE 14; 2009, p 5, tradução nossa).

4.3.1 Dia Característico de Verão

As temperaturas obtidas na simulação podem ser observadas na figura 21, que estão dentro do limite da NBR 15575-1, entretanto pode ser observado a elevada temperatura interna no período mais quente do dia, às 16:00 horas, em que a temperatura atinge 32,3°C, sendo este 2,4°C abaixo da temperatura máxima registrada externamente, valor aceito por norma e enquadrado como rendimento intermediário.

Figura 21 – Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional original



(fonte : elaborado pelo autor)

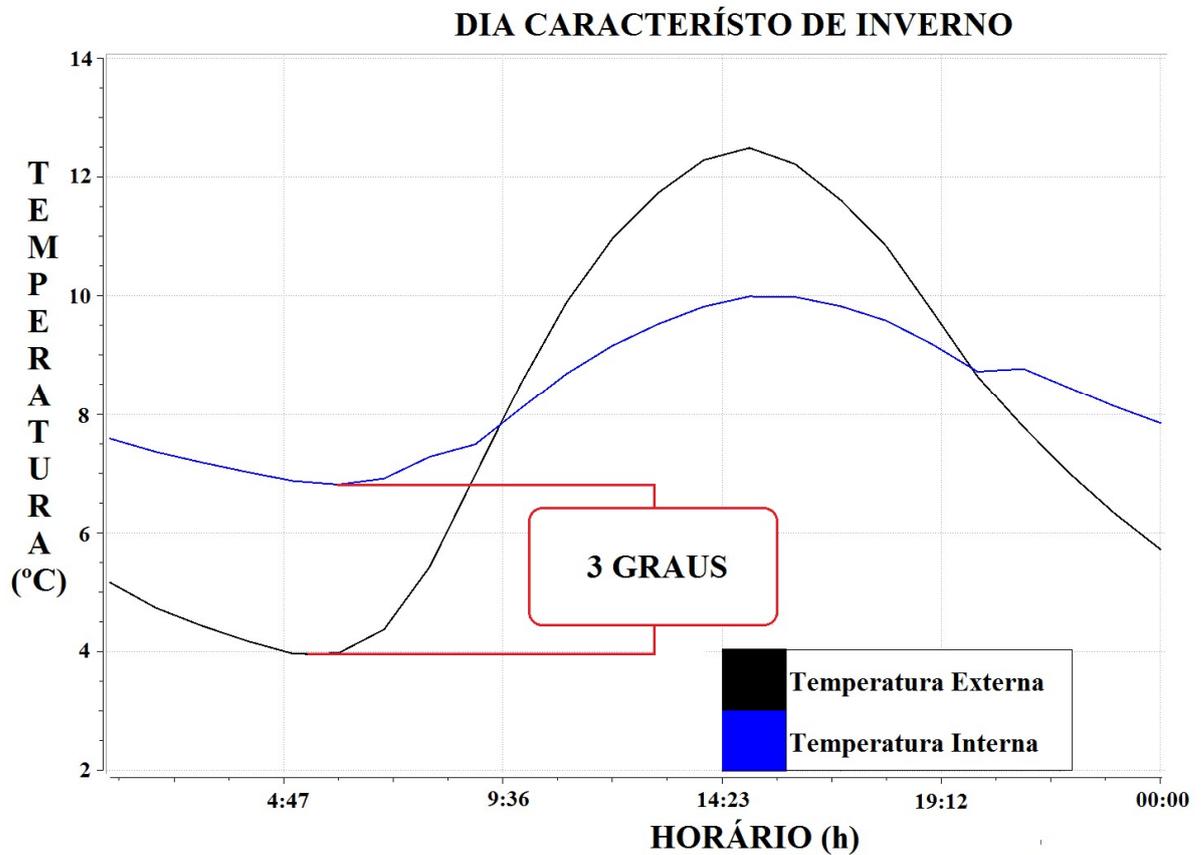
Nessa simulação é possível descrever o resultado como satisfatório por estar estabelecido dentro dos limites de desempenho intermediário, no entanto, não ideal devido a temperatura elevada para utilização da residência pelos seus usuários, que em situações normais acarreta na utilização de sistemas mecânicos de resfriamento do ambiente. Além disso, nos horários programados para a inserção e retirada da carga térmica dos ocupantes pode ser observada

uma mudança no gráfico, que poderá ser vista em todas as simulações, afetando a temperatura em determinados horários do dia.

4.3.2 Dia Característico de Inverno

Podemos observar no gráfico da figura 22 que a temperatura mínima atinge o estipulado na NBR 15575-1, essa sendo $6,9^{\circ}\text{C}$, exatamente 3°C acima da temperatura externa, caracterizando como desempenho mínimo, no horário com seu menor valor, aproximadamente às 05:00 horas. Analisando o resultado é possível determinar que, igual ao que foi observado no dia característico de verão, o desempenho obtido está dentro dos critérios para aprovação da edificação. Entretanto esse valor não pode ser considerado ideal para uso por apresentar uma temperatura abaixo do ideal em vários períodos do dia. Assim como no dia característico de verão, no inverno também pode-se notar uma mudança no gráfico nos horários de inserção e retirada da carga térmica dos ocupantes, devido ao aumento de temperatura que eles representam.

Figura 22– Valores de temperatura para dia característico de inverno da simulação computacional original



(fonte : elaborado pelo autor)

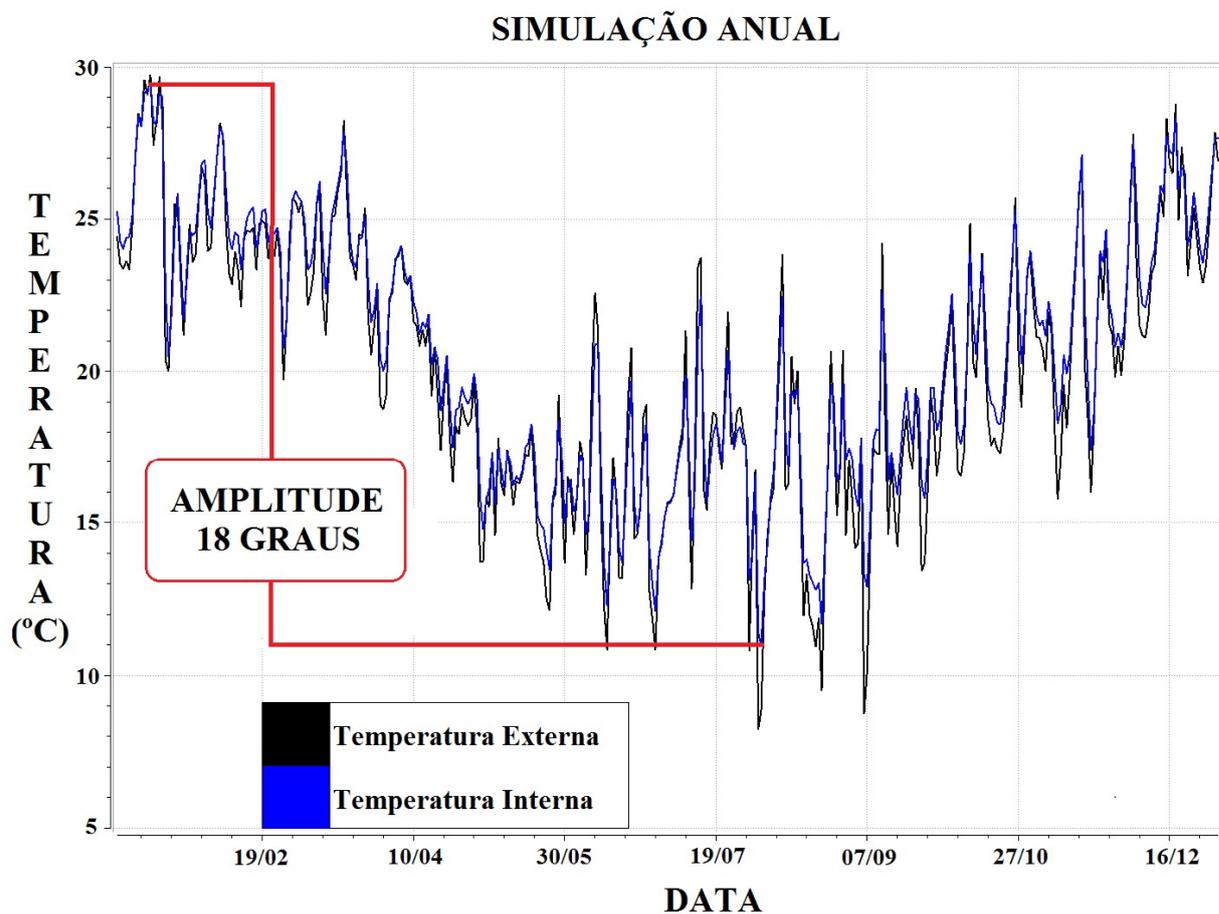
4.3.3 Simulação Anual

Em norma não é feita nenhuma exigência quanto ao desempenho térmico anual de uma edificação. Foram considerados valores de temperatura do ano de 2016 fornecidos pelo INMET, que podem ser observados em todos os gráficos anuais com a coloração preta. Em seu arquivo de dados climáticos, valores reais medidos ao longo do ano, é possível perceber que a temperatura do dia característico de verão e inverno não é atingida, pois elas representam situações extremas. Com esses valores é possível analisar as temperaturas anuais da edificação para assim determinar como se comporta em uma exposição prolongada ao clima. Na simulação pode ser observado uma amplitude térmica de aproximadamente 18°C

ao longo do ano, com temperaturas entre 29,5°C e 11,5°C na zona da suíte, observadas na figura 23.

Para essa simulação os dados foram computados diariamente devido à dificuldade de leitura quando esses são representados por hora. É possível observar o padrão seguido pela residência ao longo do ano, além disso, os dados da simulação anual servem como uma futura fonte de informações para seguintes simulações, que envolvem a utilização de sistemas mecânicos de controle de temperatura.

Figura 23 – Valores de temperatura para simulação anual original



(fonte : elaborado pelo autor)

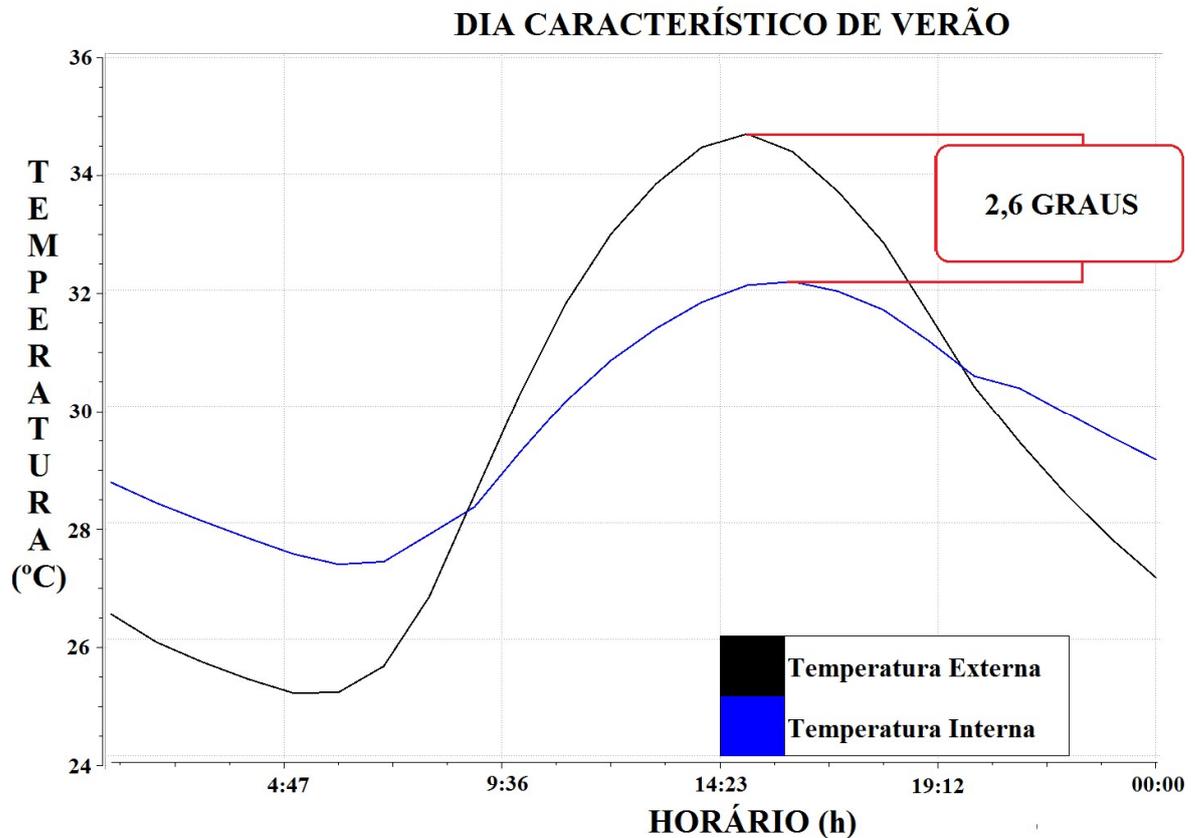
4.4 SIMULAÇÃO COM VIDROS DE LÂMINAS DUPLAS

Não foi possível notar grande diferença de rendimento quando os itens são analisados independentemente, com base somente nas temperaturas dos dias específicos. Poderá ser observado em futuras simulações que a taxa de renovação sugerida na NBR 15575-1 de cinco renovações por hora, influencia negativamente o rendimento das zonas quando há a necessidade de que os materiais que compõem seus limites isolem o ambiente interno do externo, assim o aumento de desempenho que é adicionado pelas janelas é perdido, como pode ser visto nos resultados.

Na simulação do dia característico de verão é possível ver uma modificação na temperatura interna de pico da simulação, porém ela acaba se tornando irrelevante devido ao seu valor. Considerando a temperatura da unidade habitacional original em 32,3°C, com janelas de vidro, duplo, o valor atingido é de 32,1°C, o que representa apenas uma redução de 0,2°C, ou seja, um aumento de desempenho menor do que 1%.

A curva de temperatura do dia característico de verão para essa simulação pode ser observada na figura 24. Comparando os dois gráficos é possível ver uma pequena diferença na curva de temperatura no decorrer do dia, mas como antes mencionado os valores são muito pequenos, não chegando a causar grandes variações na temperatura.

Figura 24 – Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com presença de vidro duplo

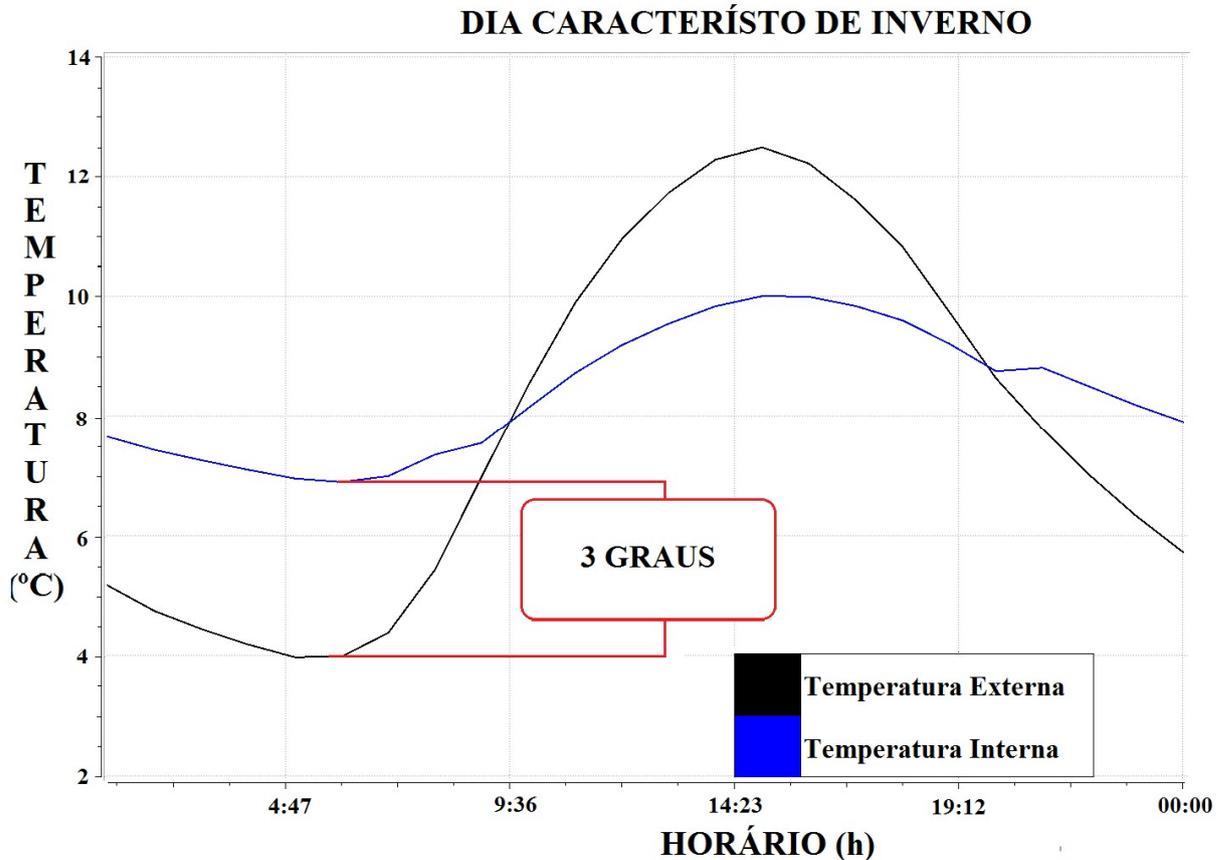


(fonte : elaborado pelo autor)

Durante a simulação do dia característico de inverno não foi possível identificar diferenças expressivas de rendimento, como antes mencionado, o fluxo de ar disposto na NBR 15575-1 para uma melhor alternativa acaba diminuindo a eficiência do que poderia ser adicionada por uma janela com vidro duplo. Porém é possível visualizar uma redução de variações na temperatura interna da edificação com o máximo ainda igual, assim como ocorreu no gráfico de temperaturas ao longo do dia de verão característico.

Na figura 25 podem ser observados os valores obtidos para as variações de temperatura ao longo do dia característico de inverno. Devido à ineficiência da alteração individual, pouca mudança pode ser notada no gráfico.

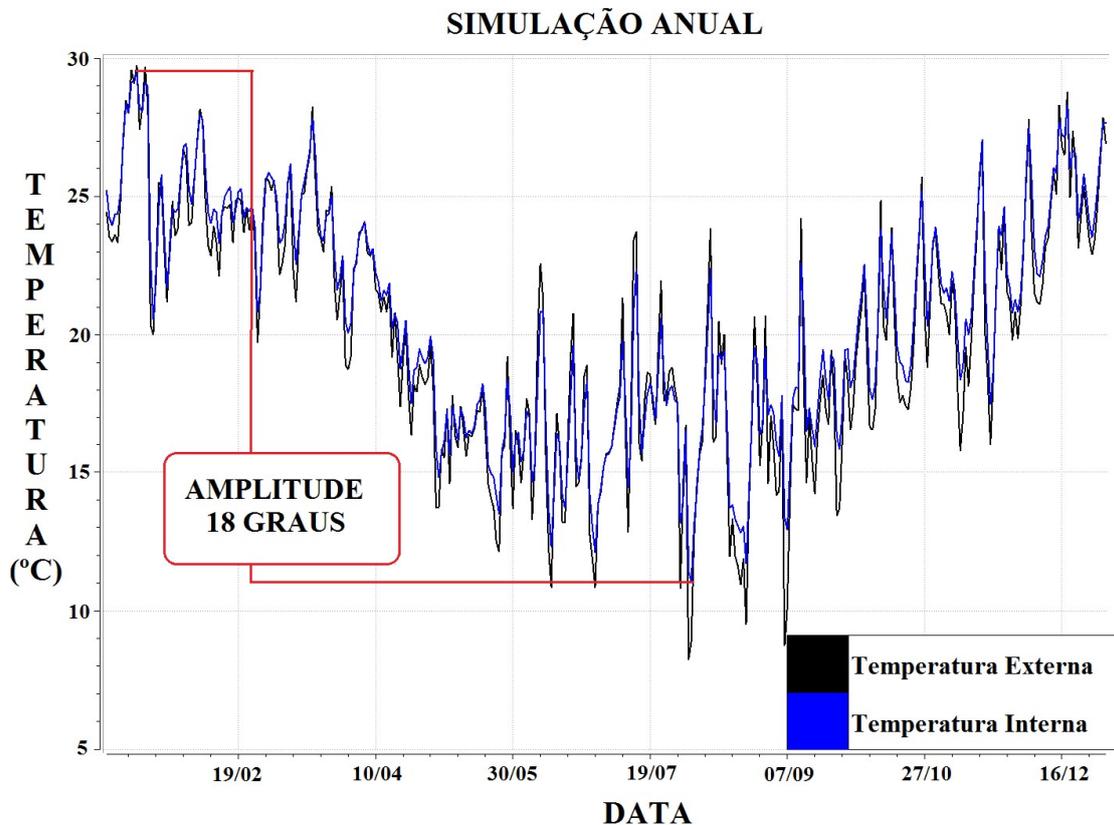
Figura 25 – Valores de temperatura para dia característico de inverno da simulação computacional com presença de vidro duplo



(fonte : elaborado pelo autor)

Nos resultados gerados em uma simulação anual as diferenças se tornam imperceptíveis devido à escala do gráfico, podendo ser observado na figura 26, com valores aproximados ao da simulação inicial expostos no item 4.3.3. Assim, um método diferenciado é necessário para analisar as diferenças, levando em conta outros fatores, além da temperatura dos dias característicos, o que será apresentado em outras simulações presentes nesta monografia.

Figura 26 – Valores de temperatura para simulação anual original com presença de vidro duplo



(fonte : elaborado pelo autor)

4.5 SIMULAÇÃO COM ALTERAÇÃO NAS PAREDES EXTERNAS

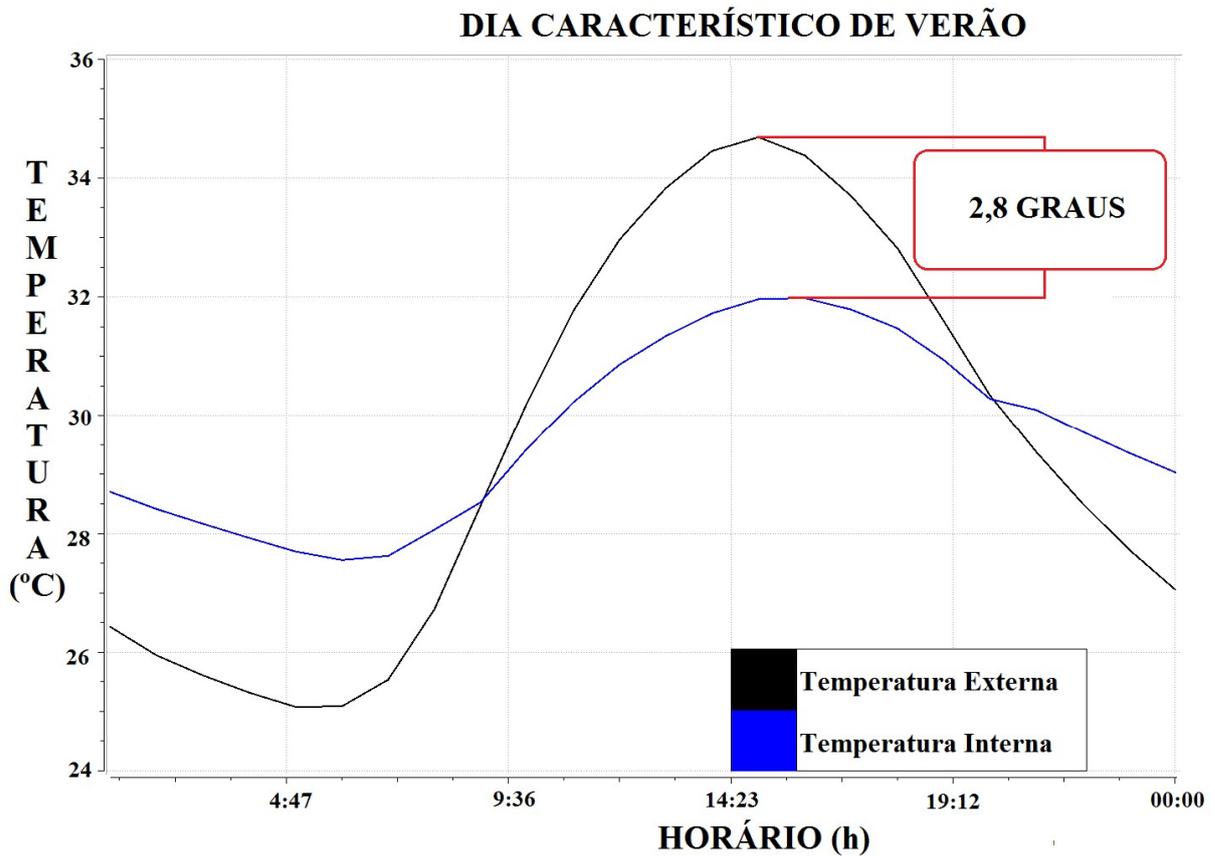
O mesmo problema foi observado na simulação anterior sobre o fluxo de ar elevado, sugerido na NBR 15575-1 como alternativa para melhor desempenho. Isto acaba diminuindo o impacto das modificações.

O fechamento vertical funciona como um emissor de calor no inverno, e no verão absorve uma parte da energia térmica contida no ar, fatores positivos, enquanto sua função primária, que deveria ser a de gerar um isolamento do ambiente externo em relação ao interno, não é ocorre.

A temperatura interna da zona analisada atingiu 31,9°C no pico de temperatura do dia característico de verão, o que representa um aumento de rendimento em 0,4°C, quando comparado à simulação original. A mudança de desempenho foi pequena, podendo ser

observada na figura 27. Pelos motivos expostos anteriormente, considerando apenas essa simulação, tornaria a modificação desnecessária.

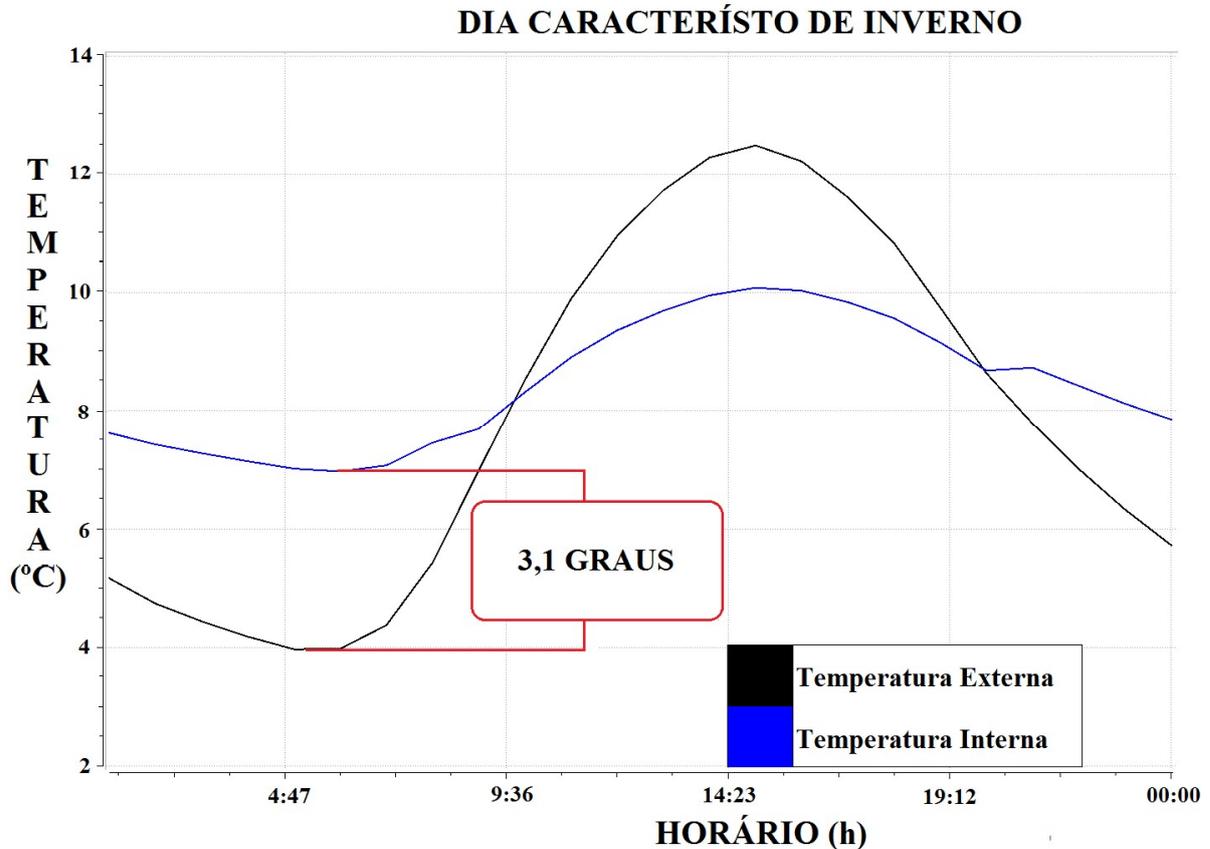
Figura 27 – Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com alteração de paredes externas



(fonte : elaborado pelo autor)

O dia característico de inverno apresenta um aumento de desempenho quase desprezível, pois a temperatura mínima registrada foi de 7°C, um aumento de 0,1°C em relação à temperatura da simulação original, essas informações podem ser observadas na figura 28. Assim como no dia característico de verão, não justifica a mudança que seria necessária para esse aumento de rendimento nas paredes externas.

Figura 28 – Valores de temperatura para dia característico de inverno da simulação computacional com alteração de paredes externas

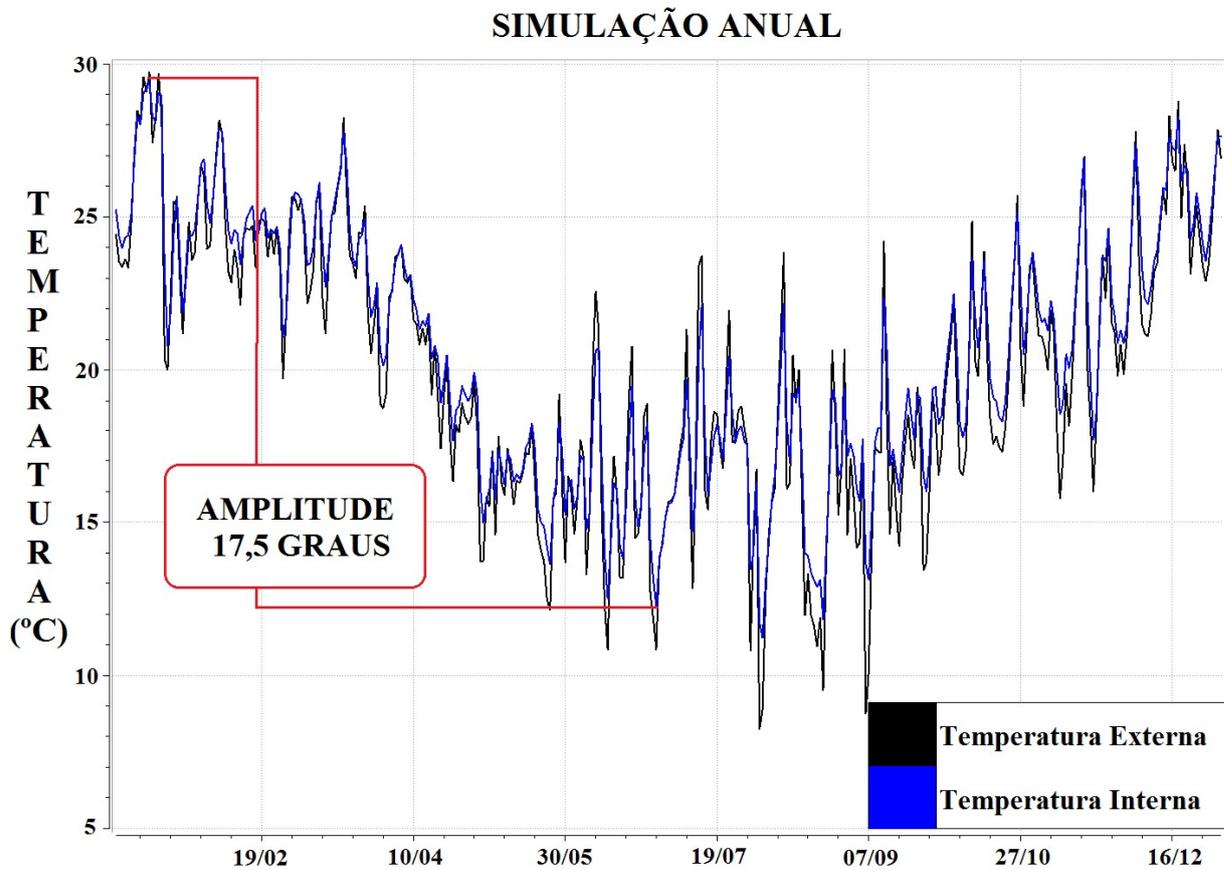


(fonte : elaborado pelo autor)

Devido ao aumento da inércia térmica da edificação como um bloco, é possível observar algumas mudanças no gráfico anual, principalmente nos períodos das estações, porque com uma maior capacidade de armazenamento de energia da estrutura da residência unifamiliar a temperatura interna varia mais lenta. Entretanto, devido ao seu escopo, é de difícil percepção na escala anual, podendo ser observada uma amplitude térmica de aproximadamente 17,5°C, sendo 0,5°C a menos que a simulação original, com temperaturas variando de 29,3°C a 11,8°C.

A repetição anual nessa simulação pode ser analisada na figura 29, servindo para geração de dados a ser utilizados em outras, assim como a simulação da figura 26, que requer um método de análise diferente, conforme já mencionado anteriormente.

Figura 29 – Valores de temperatura para simulação anual original com alteração de paredes externas



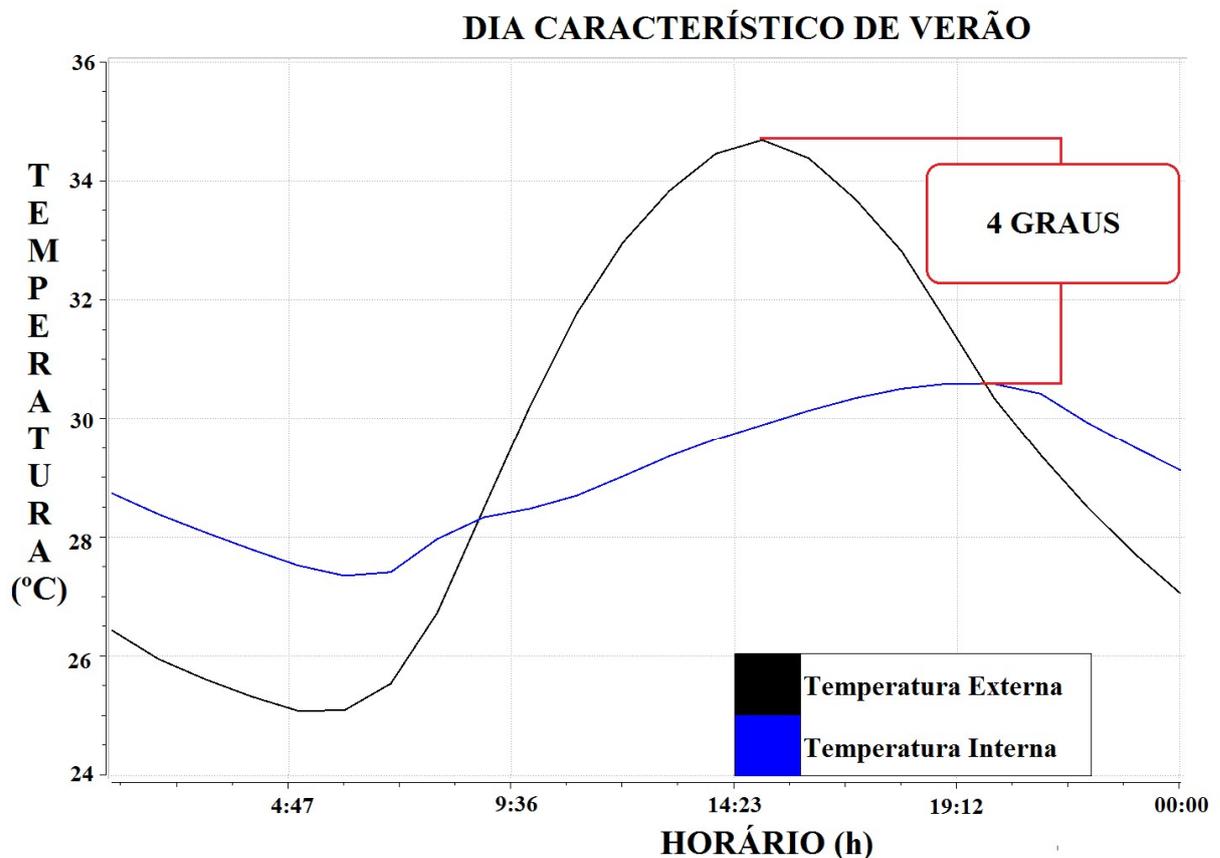
4.6 SIMULAÇÃO COM CONTROLE DE FLUXO DE AR DE ENTRADA

Diferente das simulações anteriores, essa propõe uma mudança no modo de funcionamento da edificação. Para tal, foi realizada uma alteração na condição de entrada de ar do exterior, modificando como funciona sua renovação. A troca de ar foi condicionada às temperaturas internas e externas ao invés de manter-se em um fluxo constante durante todo ano. Foi determinado que a faixa de temperatura na área interior da edificação esteja compreendida entre 20 e 25°C, selecionada anteriormente em função da carta de Givoni, e que só ocorreria troca de ar caso isso beneficie o desempenho da edificação.

Na simulação do dia característico de verão é possível observar na figura 30 uma curva com menor variação, isso se deve ao fato do fluxo de ar ser controlado como descrito anteriormente. Assim a temperatura máxima registrada foi de 30,7°C, uma redução de 1,6°C

em relação à simulação original. Esse aumento de eficiência leva a uma melhora na caracterização da edificação, que apresentava um desempenho na faixa intermediária passando a superior, conforme na NBR 15575-1, que determina uma diferença de 4°C em relação a temperatura externa, valor atingido nessa simulação observado na figura 30. Qualquer simulação de dia característico de verão que apresentar uma diferença igual ou superior a 1,6°C quando comparada à simulação inicial se encontrará nessa faixa.

Figura 30 – Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com controle de fluxo de ar



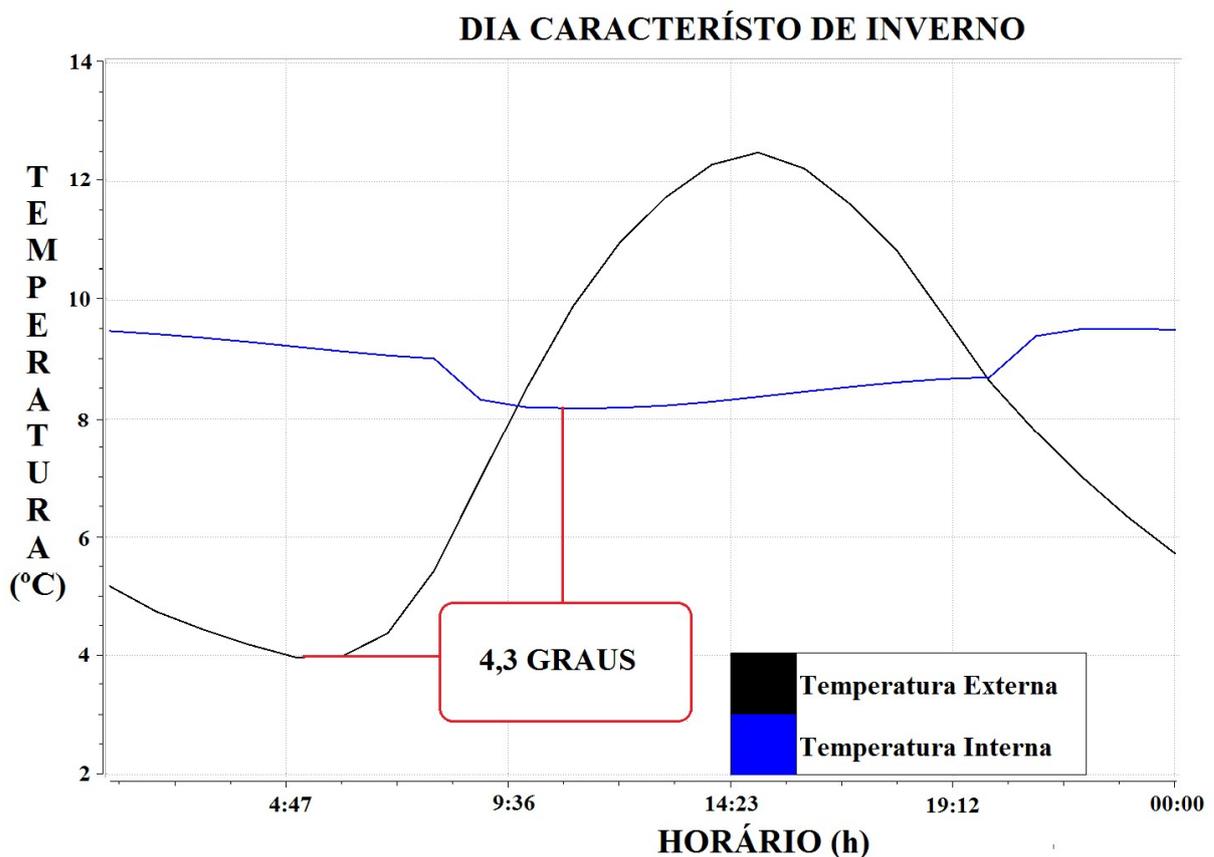
(fonte : elaborado pelo autor)

O resultado da repetição para o dia característico de inverno apresenta uma curva de desempenho térmico muito diferenciada. Controlando-se a entrada de ar na zona analisada é possível observar uma temperatura mínima de 8,2°C, o que representa uma melhora de 1,3°C no desempenho da zona em comparação à simulação original, equivalente a um aumento de temperatura de aproximadamente 16%, valor que pode ser considerado como

impactante quando comparado aos resultados anteriores. Entretanto ainda permanece na mesma faixa de desempenho segunda a NBR 15575-1.

Além da temperatura mínima também é possível notar na figura 31 uma curva com menos modificações de temperatura no transcorrer do dia, sendo mais suave e com menos extremos. Porém, devido a retirada da carga térmica, que simula a presença de usuários, é visível um comportamento, inicialmente, não compatível com as temperaturas externas. A queda de temperatura de aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$, que ocorre no começo da manhã, se dá por causa desse fator, explicando o comportamento não usual, conforme a figura a seguir.

Figura 31 – Valores de temperatura para dia característico de inverno da simulação computacional com controle de fluxo de ar

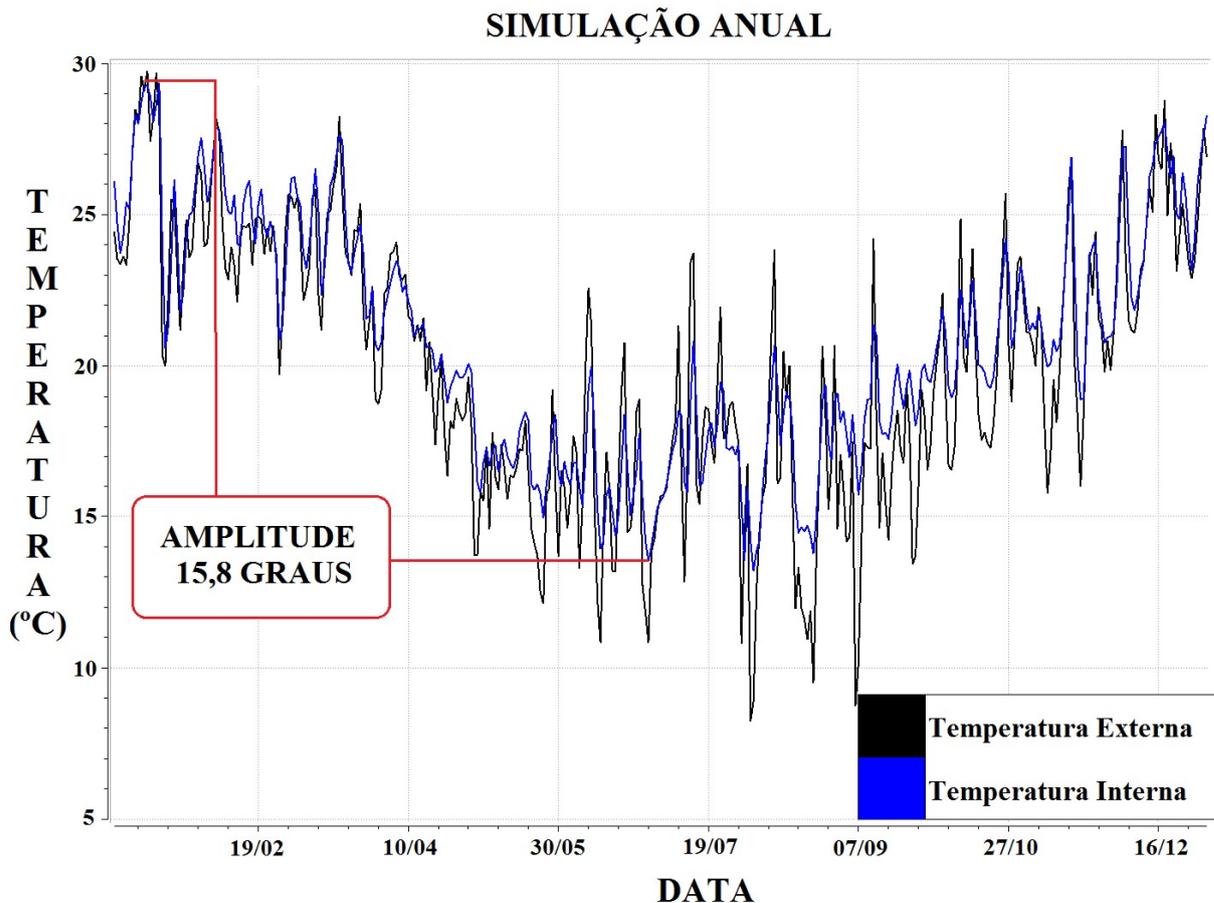


(fonte: elaborado pelo autor)

A simulação anual apresenta as maiores mudanças observáveis quando comparado com as simulações anteriores, podendo ser observado na figura 32. A curva anual apresenta temperaturas com menores amplitudes e menores extremos, sendo medidas temperaturas que

variam de 29,3°C a 13,5°C o que representa uma amplitude térmica de 15,8°C uma redução de 2,2°C quando comparado com a simulação original, causados pelo aumento de rendimento, ocasionado pelo controle na entrada de ar. Como as repetições anuais anteriores, essas também geram dados que serão utilizados em simulações futuras.

Figura 32 – Valores de temperatura para simulação anual original com controle de fluxo de ar



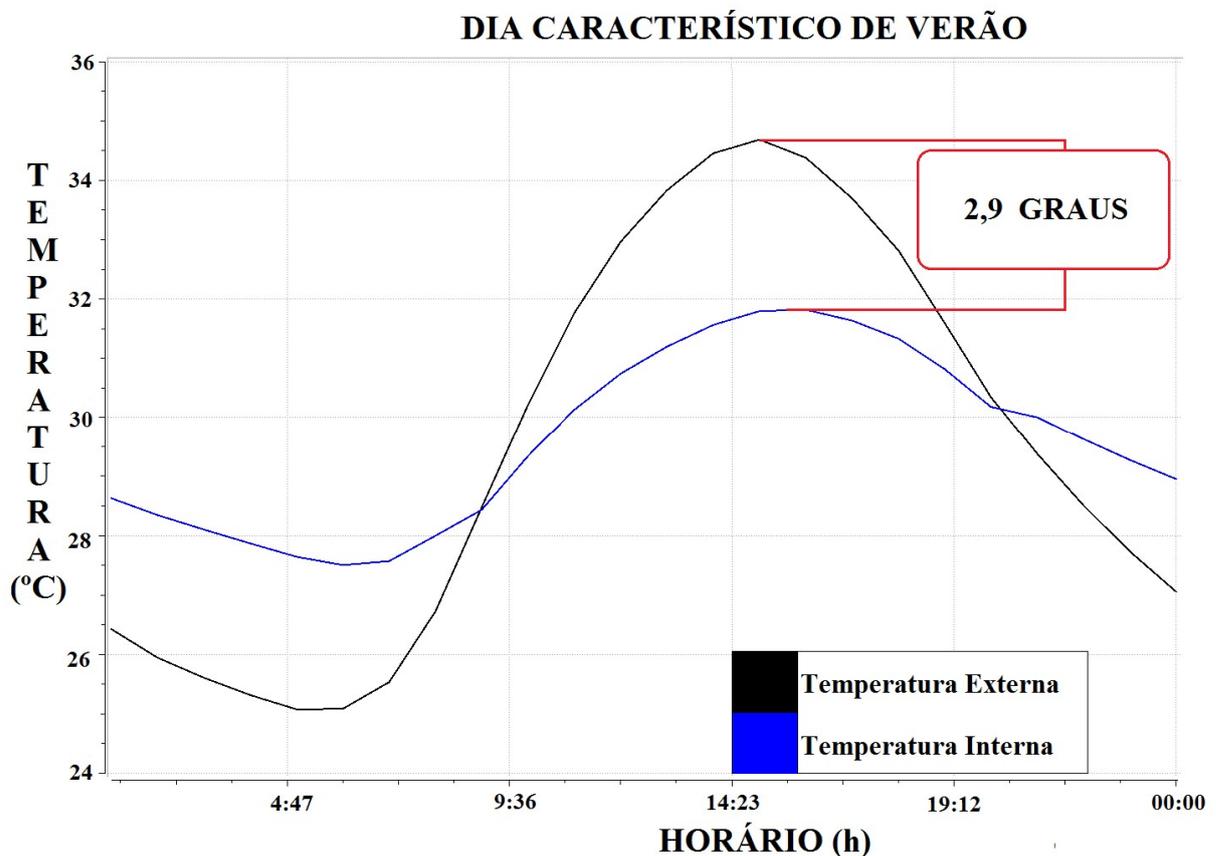
(fonte: elaborado pelo autor)

4.7 DESEMPENHO COM ALTERAÇÕES EM VIDROS E PAREDES

As simulações com mais de um fator modificado têm como propósito estabelecer se as alterações interagem entre elas, aumentando o rendimento ou apenas atuando independentemente sobre o desempenho da edificação. Para primeira simulação com duas alterações foram selecionadas as mudanças realizadas nos vidros, substituição de vidros simples por duplos, e a correção das paredes externas dos quartos.

Na simulação do dia característico de verão foi constatado um melhor desempenho, quando comparado com ambas as simulações individuais, por mais que não seja uma mudança expressiva. No pico de temperatura o ar interno da residência unifamiliar na zona da suíte atingiu 31,8°C, o que representa 0,5°C a menos que na situação original. Em contrapartida, as simulações individuais haviam apresentado resultados com melhora de desempenho de 0,4°C, com alteração das paredes externas, e 0,2°C, com mudança dos vidros. Os resultados observados na figura 33 não apresentaram aumento de desempenho aditivos, ainda não possibilitam gerar conclusões, necessitando mais simulações.

Figura 33 – Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com alterações nos vidros e paredes

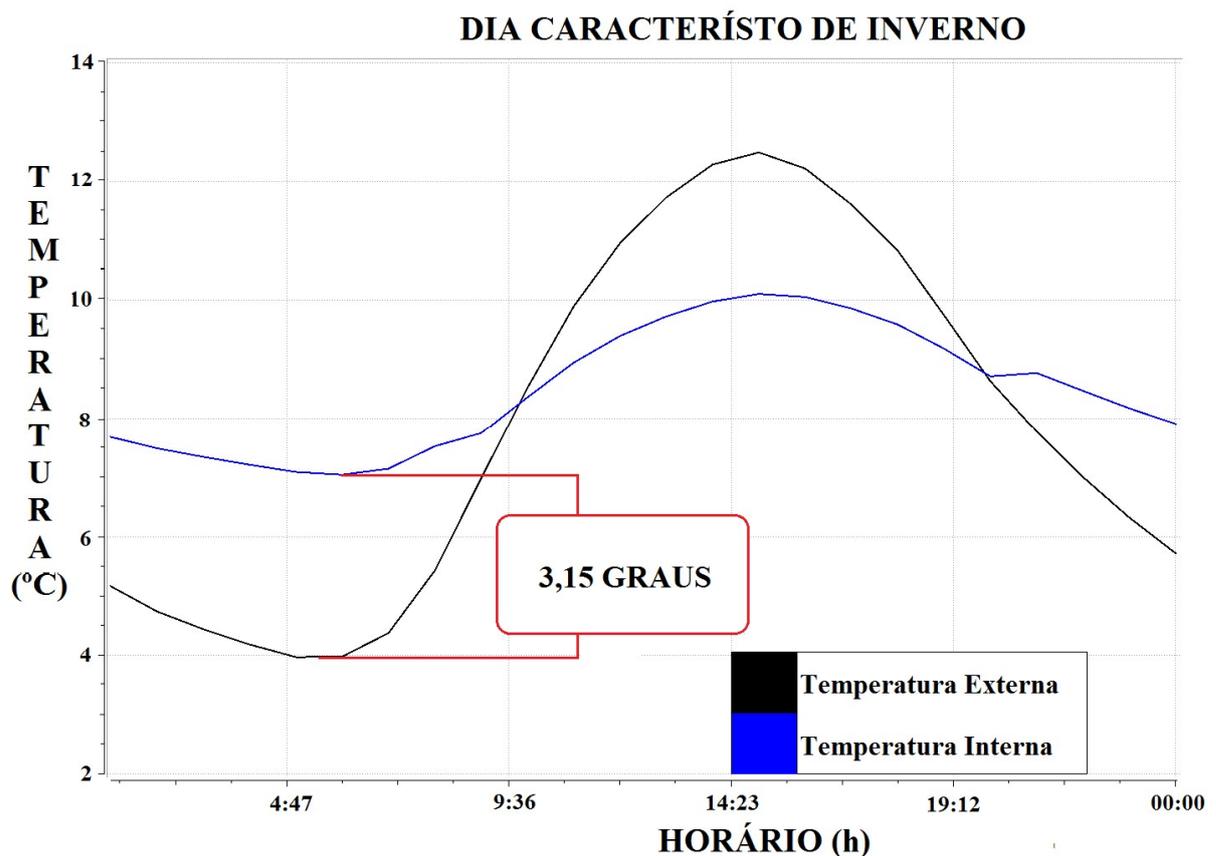


(fonte : elaborado pelo autor)

Os resultados da simulação do dia característico de inverno apresentaram valores próximos aos antes atingidos, como mencionado anteriormente, e já verificado na simulação do item 4.7, o fluxo de ar estipulado em norma diminuiu os efeitos que poderiam ser observados pelas mudanças em estruturas da edificação.

Na figura 34 é possível observar os resultados obtidos. Esses registram uma temperatura mínima igual a 7,05°C, um aumento de temperatura de 0,15°C em relação à simulação inicial. Comparando esse valor com os obtidos nas simulações com vidros duplos, que houve aumento de 0,05°C de temperatura registrado em relação a original, e na simulação com mudanças de estrutura das paredes externas, que houve melhora de 0,10°C na temperatura, notamos um padrão aditivo de desempenho. Entretanto, essa hipótese não pode ser provada devido ao fato que na mesma simulação, para o dia característico de verão, os valores não foram aditivos, todavia, tendo em vista que foi uma pequena variação ainda é inconclusivo determinar a fundo a relação entre as modificações. Assim são necessárias mais simulações para determinar o comportamento da edificação frente as modificações.

Figura 34 – Valores de temperatura para dia característico de inverno da simulação computacional com alterações nos vidros e paredes



(fonte: elaborado pelo autor)

O resultado da simulação anual foi obtido e será utilizado para a comparação de desempenho futuro, entretanto não foi necessário sua inclusão gráfica pois apresenta poucas modificações,

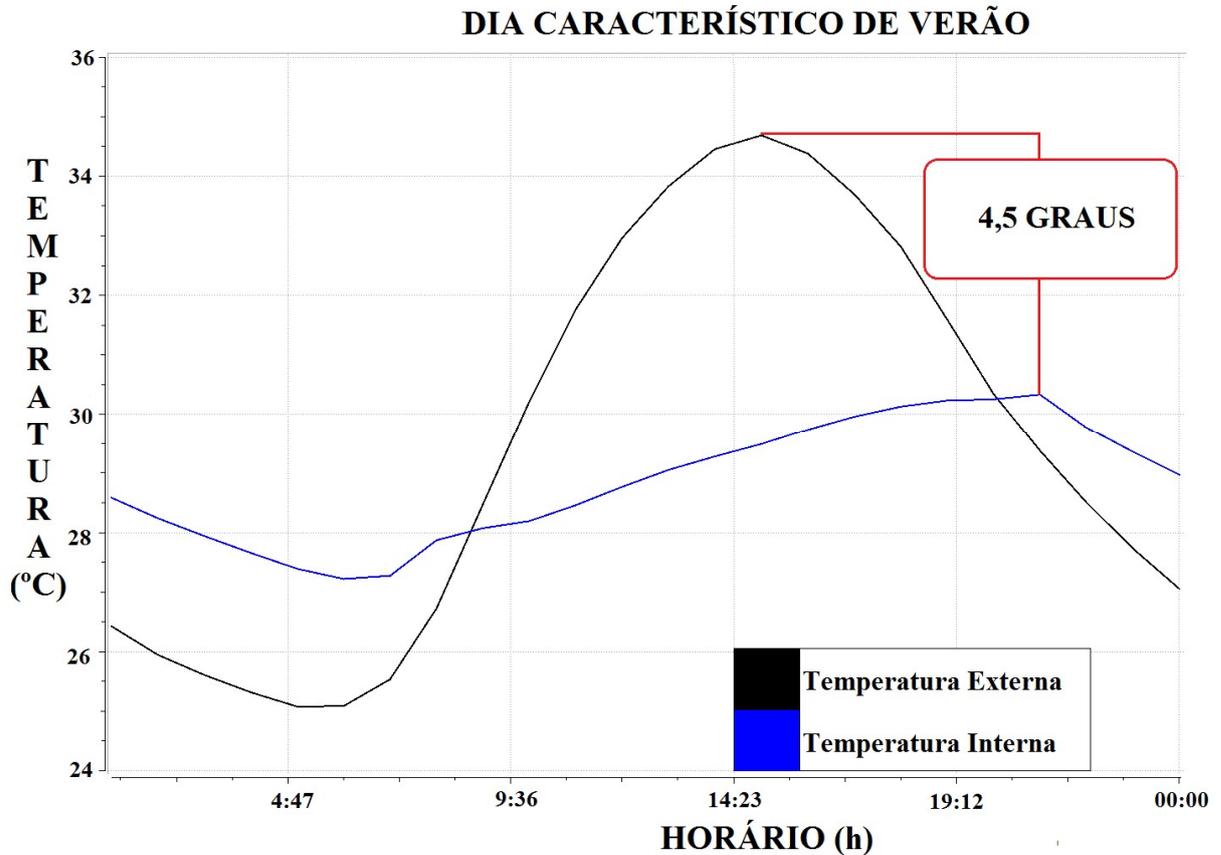
assim podendo ser observado no apêndice A caso necessário. Esse critério será utilizado nos próximos descritivos presentes nessa monografia.

4.8 DESEMPENHO COM CONTROLE DE FLUXO DE AR E VIDROS DUPLOS

Conforme descrito no item anterior essa simulação também tem a presença de duas modificações. Entretanto, diferente da simulação anterior, foram realizadas mudanças físicas, colocação de vidros duplos nas aberturas, e também de funcionamento, como controle do fluxo de entrada de ar. Assim como anteriormente procura-se a relação das simulações, se elas não interagem, ação independente e assim aditiva, ou se há interação entre as simulações, o que causa aumento de rendimento interrelacionado entre as mudanças.

Nos resultados da simulação para o dia característico de verão a redução de temperatura máxima verificada no gráfico da figura 35. O máximo registrado no dia foi 30,2°C, uma redução de 2,1°C em relação a simulação original. Assim como a simulação do item 4.7, essa também está classificada com desempenho superior quando referido ao dia característico de verão segundo a NBR 15575-1. Comparando as simulações com mudanças individuais que compõe esta; controle de fluxo de ar, que apresenta uma redução de temperatura de 1,6°C em relação a original; e vidros duplos, com desempenho melhorado em 0,2°C quando também comparada a original, nessa simulação há uma relação entre elas, pois, como é visto, a melhora de rendimento não é aditiva nesse caso, assim é possível deduzir que o controle do fluxo de ar influencia no quanto é efetiva a adição de vidros duplos nas aberturas da unidade habitacional.

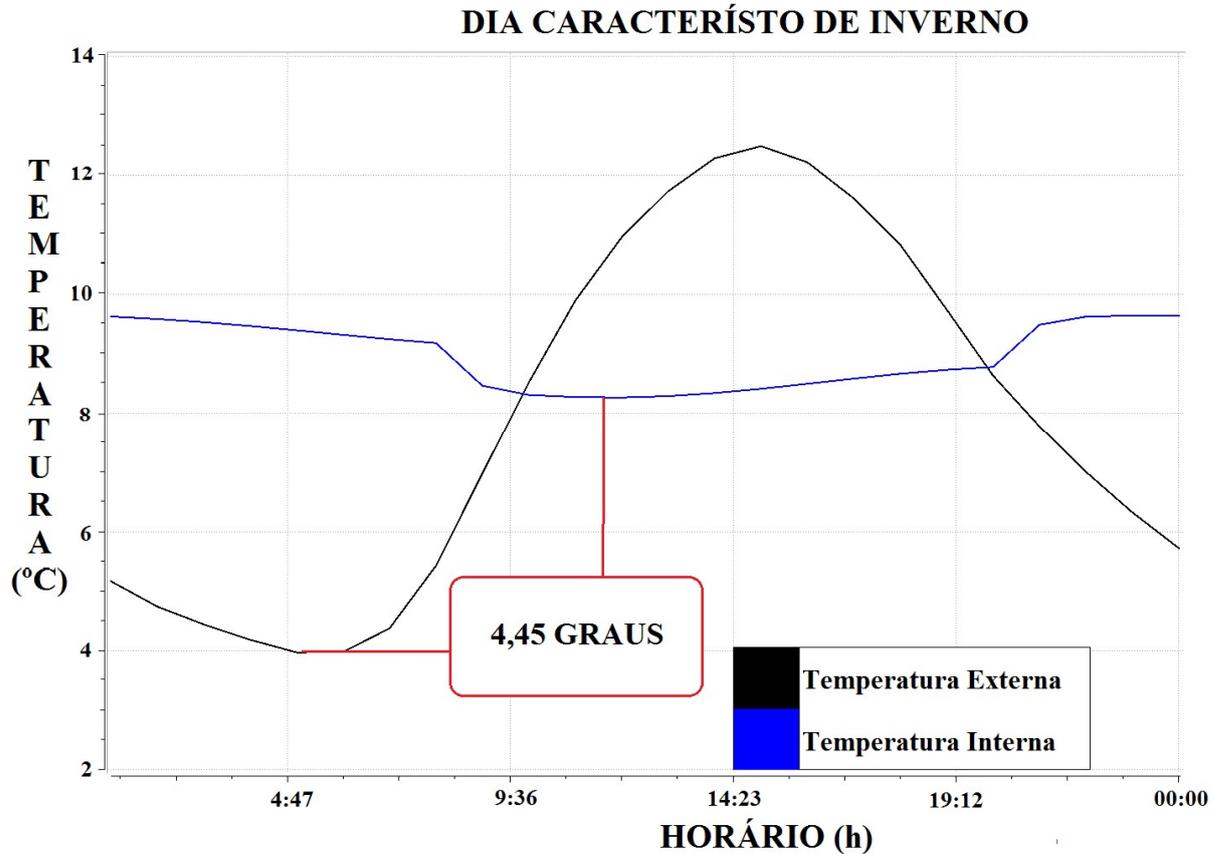
Figura 35 – Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com alterações nos vidros e controle de fluxo de ar



(fonte : elaborado pelo autor)

Na simulação do dia característico de inverno a conclusão antes feita de que os fatores dessa simulação são dependentes, em que a adição de um altera o efeito do outro, é ratificada, pois é possível observar na figura 36, que a temperatura mínima medida é 8,35°C; ou seja, 1,45°C acima da temperatura obtida na simulação original, enquanto as simulações com fluxo controlado e vidro duplo apresentam temperaturas 1,2°C e 0,05°C, respectivamente, acima da temperatura atingida originalmente. Entretanto devido aos valores observados na simulação descrita no item 4.8 não é possível determinar se essa conclusão pode ser aplicada em todas as simulações.

Figura 36– Valores de temperatura para dia característico de inverno da simulação computacional com alterações nos vidros e controle de fluxo de ar



(fonte : elaborado pelo autor)

4.9 DESEMPENHO COM FLUXO DE AR CONTROLADO E PAREDES CORRIGIDAS

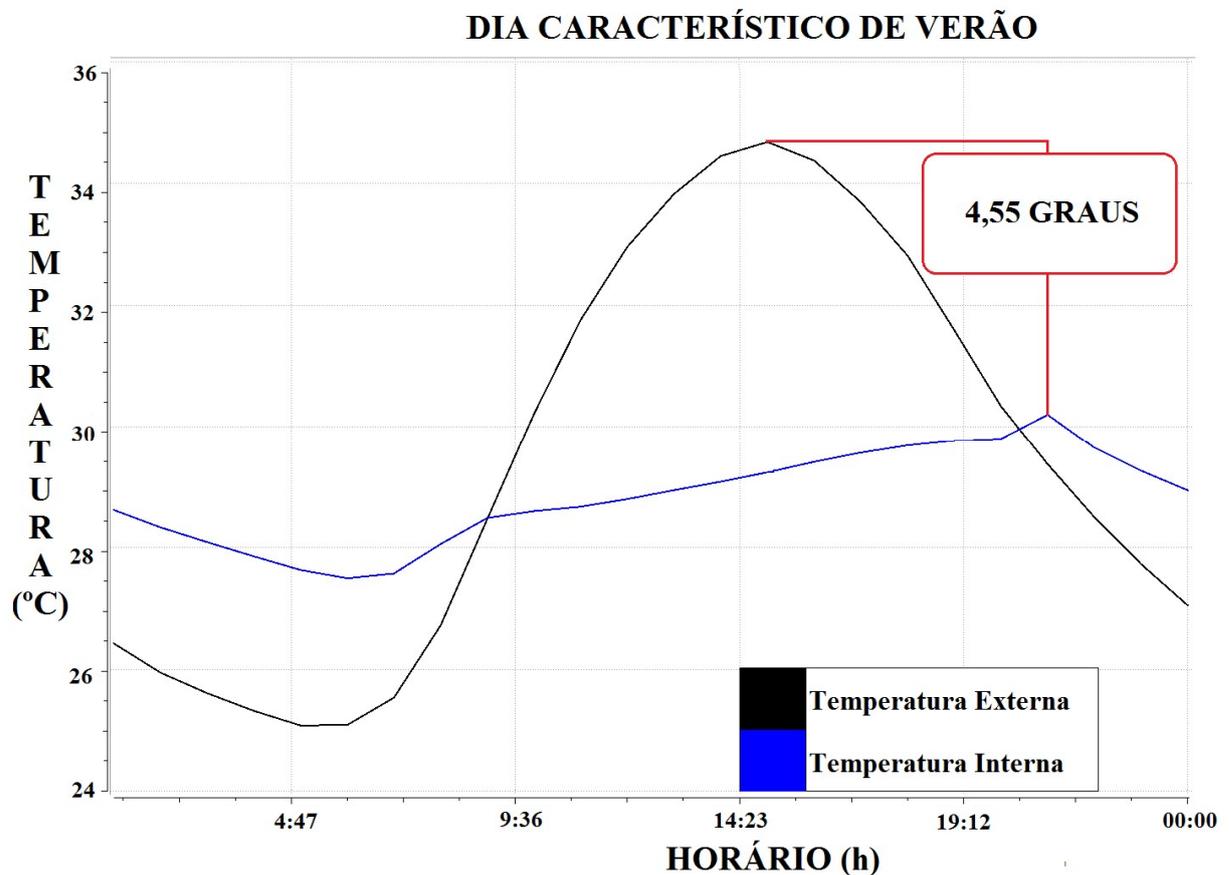
Igual as simulações descritas nos itens 4.7 e 4.8, essa também apresenta a inclusão de duas modificações para verificação da interação entre elas, e qual seu impacto no aumento de rendimento térmico da edificação, aqui sendo incluídas as modificações; física, correção na constituição das paredes externas nas zonas construídas em 1954, e de utilização, o controle do fluxo de ar como descrito no item 4.6.

Na figura 37 podemos acompanhar o desempenho observado ao longo do dia característico de verão. As 21:00 horas é visto um pico no gráfico, isso se deve ao fato da temperatura externa ainda não estar no intervalo necessário para atuar sobre o ambiente interno e, ao mesmo tempo, ocorrer a inserção da carga dos ocupantes da zona, gerando uma pequena irregularidade no gráfico, com temperatura máxima de 30,15°C, o que representa um aumento

de desempenho considerável quando comparado com a temperatura original, apresentando uma temperatura $2,15^{\circ}\text{C}$ inferior.

As alterações comparadas comprovam a hipótese levantada no item 4.9, pois as simulações com fluxo controlado e paredes alteradas apresentam temperaturas $1,6^{\circ}\text{C}$ e $0,4^{\circ}\text{C}$, respectivamente, menores quando comparados com a simulação original, assim é possível determinar que os fatores alterados nessa simulação são dependentes, o que implica que a introdução de um altera o desempenho do outro.

Figura 37 – Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com alteração nas paredes e controle de fluxo de ar

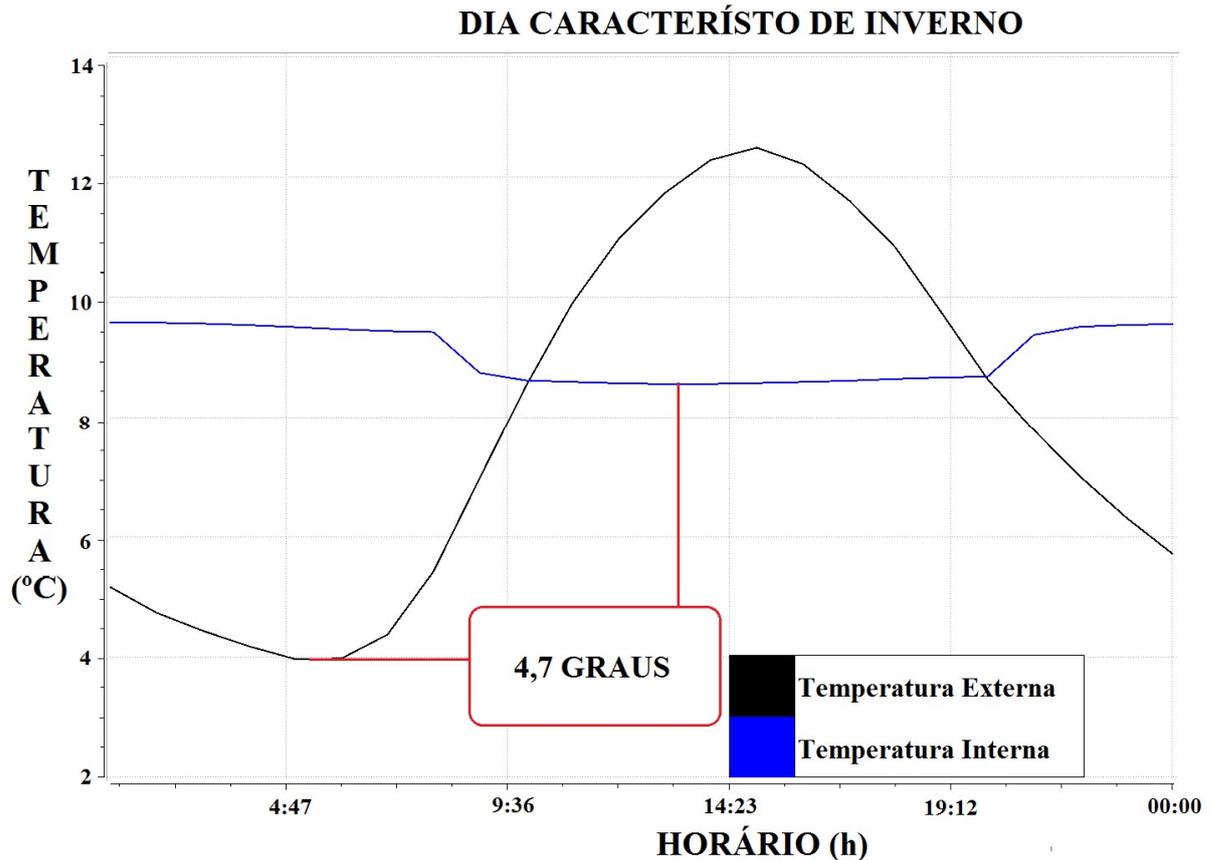


(fonte : elaborado pelo autor)

Na simulação do dia característico de inverno, que pode ser observada na figura 38, é possível notar um aumento considerável de temperatura no período mais crítico do dia, em que a temperatura mínima medida foi de $8,6^{\circ}\text{C}$, cerca $1,7^{\circ}\text{C}$ acima da temperatura mínimada simulação original. Já, quando comparado com as simulações relacionadas, que

apresentam desempenho térmico superior em 0,1°C e 1,2°C com as alterações de paredes e fluxo de ar, respectivamente, a simulação original, mais uma vez é comprovada a hipótese proposta no item 4.8.

Figura 38 – Valores de temperatura para dia característico de inverno da simulação computacional com alteração nas paredes e controle de fluxo de ar



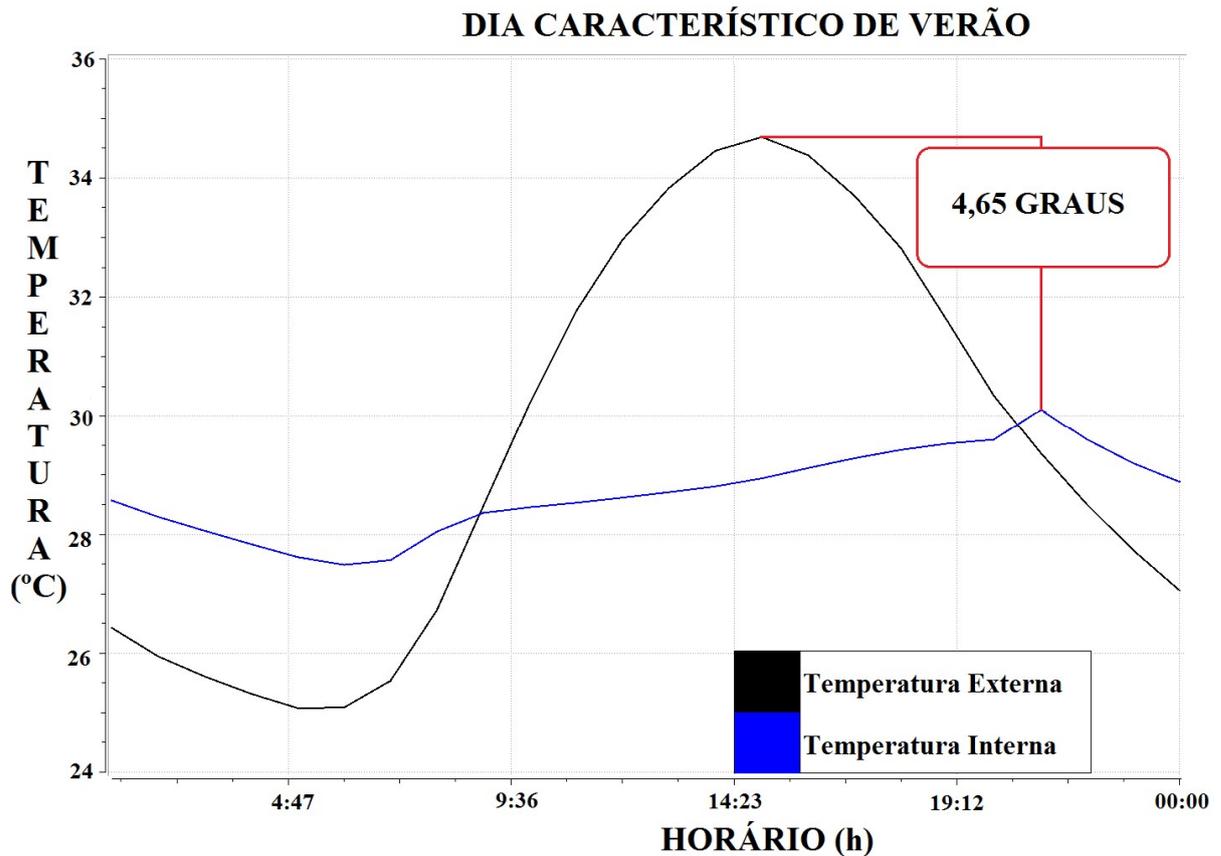
(fonte : elaborado pelo autor)

4.10 DESEMPENHO COM CONTROLE DE FLUXO DE AR, PAREDES CORRIGIDAS E VIDROS DUPLOS

Considerando todas as simulações anteriores, uma iteração com todas as modificações foi realizada, essa reuniu as mudanças de funcionamento: controle de fluxo de ar; e as físicas: vidros duplos e paredes externas alteradas. Os resultados obtidos foram dentro do esperado, apresentando o melhor desempenho entre todas as simulações.

Observamos na figura 39, que a menor temperatura registrada foi de 30,05°C, apresentando o mesmo pico de temperatura às 21:00 horas, pela mesma razão descrita na simulação 4.10. O desempenho, quando comparado com a simulação original foi superior em 2,25°C, com sua curva observada no gráfico a seguir.

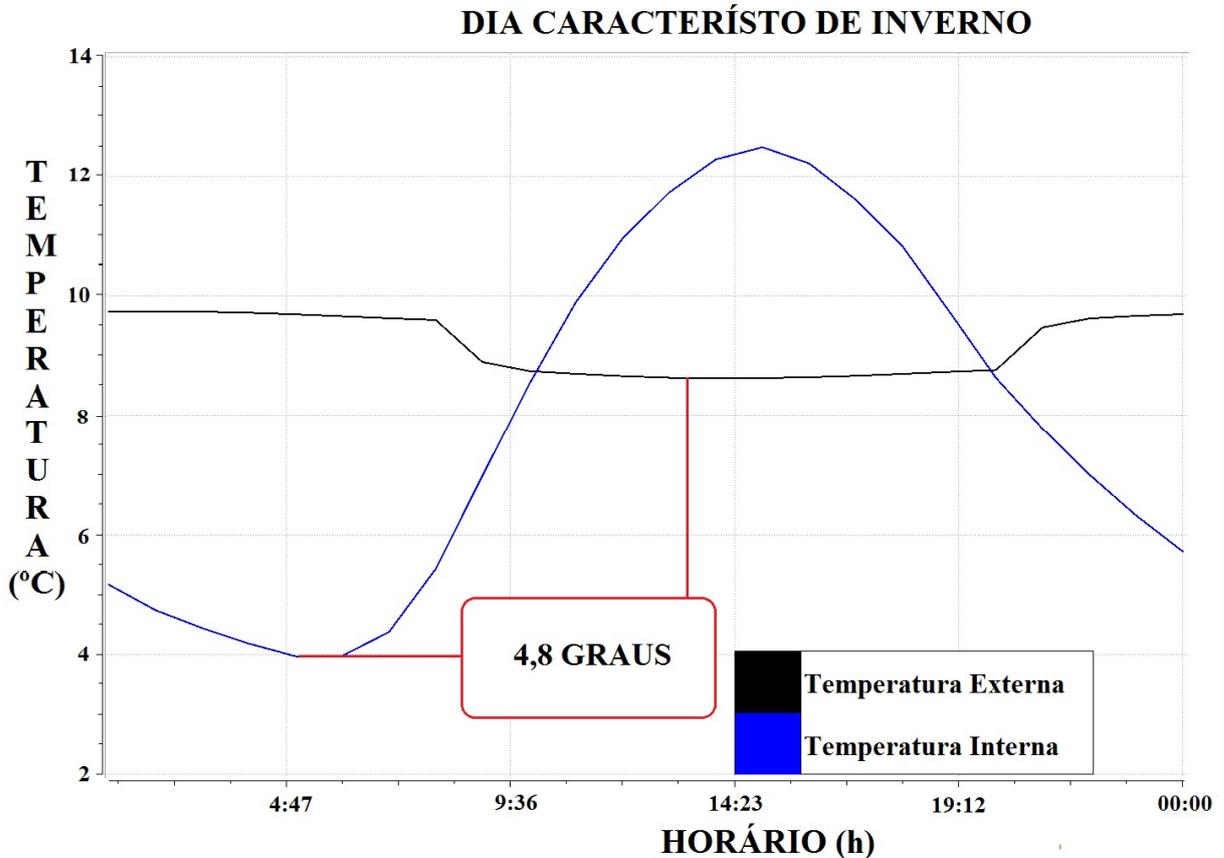
Figura 39 – Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com todas alterações



(fonte : elaborado pelo autor)

Na simulação referente ao dia característico de inverno o resultado, como esperado, foi similar ao do verão, podendo ser observado na figura 40, no que diz respeito ao melhor desempenho quando comparado as outras simulações. Foi registrada uma temperatura mínima de 8,7°C no período crítico do dia, o que corresponde a um aumento de 1,8°C em relação a simulação inicial.

Figura 40 – Valores de temperatura para dia característico de verão da simulação computacional com todas alterações



(fonte: elaborado pelo autor)

Devido a inclusão de todas as modificações é difícil assumir se há ou não correlação dos fatores envolvidos no desempenho da edificação. O que pode ser avaliado é que a diferença de temperatura registrada entre essa simulação e a do item 4.9 é de apenas 0,10°C, indicando que a adição de vidros duplos representa um baixo aumento de eficiência da zona.

4.11 COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS PARA OS DIAS ESPECÍFICOS

Pode ordenar-se quais modificações apresentam melhor aumento de desempenho com base nas simulações realizadas do item 4.3 ao 4.10, tomando como base o valor da simulação original. Assim é possível a elaboração de uma tabela comparativa do desempenho das diferentes simulações, observada na figura 41, para assim, pelos critérios da NBR 15575-1, determinar os melhores desempenhos.

Figura 41 – Tabela com temperaturas máximas e mínimas para os dias característicos de verão e inverno respectivamente

Critérios de Simulação	Temperatura (°C)	
	Dia Característico de Verão	Dia Característico de Inverno
Inicial	32,3	6,9
Vidro Duplo	32,1	6,95
Parede Externa Alt.	31,9	7
Fluxo de Ar Controlado	30,7	8,2
Vidro E Parede	31,8	7,05
Fluxo e Vidro	30,2	8,35
Fluxo e Parede	30,15	8,6
Fluxo Vidro e Parede	30,05	8,7

(fonte : elaborado pelo autor)

4.12 SIMULAÇÕES DE DESEMPENHO ENERGÉTICO E SEUS RESULTADOS

A simulação descrita no terceiro método de análise do item 3.4 gerou tabelas de utilização de energia elétrica ao longo do ano. Realizando diferentes reproduções é possível quantificar o quanto as mudanças, expostas, até então no item 4, afetam o desempenho da edificação.

Para avaliar esses diferentes desempenhos é mais prático transformar os consumos de energia elétrica em uma escala monetária. Assim na figura 42 pode ser observado o consumo de energia mensal da edificação em diferentes simulações, todas se encontram no apêndice A, possibilitando a comparação das mudanças propostas. É possível avaliar se ela apresenta um retorno positivo monetário em sua vida útil, conforme antes mencionado. Mudanças que aparentemente eram pequenas nas simulações de dias característicos aumentam de proporção, considerado todo o ano de utilização. Para determinar o preço da energia utilizada os custos foram estimados com base em uma calculadora de valores disponibilizada no site da CEEE, Companhia Estadual de Energia Elétrica, que apresenta um custo associado de R\$ 0,7433 por kW/h.¹

Esta informação pode ser acessada no site:

< <http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Component/Controller.aspx?CC=1248> >¹

Figura 42 – Tabela com gastos referentes as simulações

SIMULAÇÕES	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
INICIAL													
Aquecimento (kW/h)	14,22	12,08	84,36	384,08	2104,77	2363,97	1602,98	2347,12	1563	462,94	329,95	36,76	11306,23
Resfriamento (kW/h)	608,56	292,28	265,29	39,56	0,03	14,76	23,99	20,05	13,28	80,86	81,09	473,04	1912,79
Soma (kW/h)	622,78	304,36	349,65	423,64	2104,8	2378,73	1626,97	2367,17	1576,28	543,8	411,04	509,8	13219,02
Custo (R\$)	R\$ 462,93	R\$ 226,24	R\$ 259,91	R\$ 314,90	R\$ 1.564,56	R\$ 1.768,18	R\$ 1.209,38	R\$ 1.759,59	R\$ 1.171,70	R\$ 404,22	R\$ 305,54	R\$ 378,95	R\$ 9.826,09
Relação com Simulação Inicial	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
VIDRO													
Aquecimento (kW/h)	14,45	12,3	84,8	379,93	2070,08	2338,93	1585,6	2320,55	1531,21	458,48	327,89	37,2	11161,42
Resfriamento (kW/h)	595,22	283,89	257,7	39,34	0,03	14,76	23,95	20,03	13,25	79,85	79,28	460,88	1868,18
Soma (kW/h)	609,67	296,19	342,5	419,27	2070,11	2353,69	1609,55	2340,58	1544,46	538,33	407,17	498,08	13029,6
Custo (R\$)	R\$ 453,19	R\$ 220,17	R\$ 254,59	R\$ 311,66	R\$ 1.538,77	R\$ 1.749,57	R\$ 1.196,43	R\$ 1.739,82	R\$ 1.148,04	R\$ 400,16	R\$ 302,66	R\$ 370,24	R\$ 9.685,29
Relação com Simulação Inicial	97,89%	97,32%	97,96%	98,97%	98,35%	98,95%	98,93%	98,88%	97,98%	98,99%	99,06%	97,70%	98,57%
PAREDE													
Aquecimento (kW/h)	14,18	12,05	84,25	370,64	2030,77	2315,47	1565,16	2299,8	1490,7	449,79	322,75	36,73	10992,29
Resfriamento (kW/h)	587,32	270,83	247,2	39,25	0,03	14,75	23,98	20,05	13,28	78,04	75,28	446,48	1816,49
Soma (kW/h)	601,5	282,88	331,45	409,89	2030,8	2330,22	1589,14	2319,85	1503,98	527,83	398,03	483,21	12808,78
Custo (R\$)	R\$ 447,11	R\$ 210,27	R\$ 246,38	R\$ 304,68	R\$ 1.509,55	R\$ 1.732,12	R\$ 1.181,26	R\$ 1.724,41	R\$ 1.117,95	R\$ 392,35	R\$ 295,87	R\$ 359,18	R\$ 9.521,15
Relação com Simulação Inicial	96,58%	92,94%	94,79%	96,75%	96,48%	97,96%	97,67%	98,00%	95,41%	97,06%	96,83%	94,78%	96,90%
FLUXO CONTROLADO													
Aquecimento (kW/h)	0,07	0,04	18,07	155,13	1042,63	1165,76	873,92	1039,6	672,6	200,77	115,88	0,22	5284,69
Resfriamento (kW/h)	298,68	129,89	122,04	12,53	0,03	4,86	6,82	5,23	4,02	29,94	35,86	226,71	876,61
Soma (kW/h)	298,75	129,93	140,11	167,66	1042,66	1170,62	880,74	1044,83	676,62	230,71	151,74	226,93	6161,3
Custo (R\$)	R\$ 222,07	R\$ 96,58	R\$ 104,15	R\$ 124,63	R\$ 775,04	R\$ 870,16	R\$ 654,68	R\$ 776,65	R\$ 502,95	R\$ 171,49	R\$ 112,79	R\$ 168,68	R\$ 4.579,88
Relação com Simulação Inicial	47,97%	42,69%	40,07%	39,58%	49,54%	49,21%	54,13%	44,14%	42,93%	42,43%	36,92%	44,51%	46,61%

(fonte : elaborado pelo autor)

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho de conclusão de curso tratou de analisar as variações de desempenho térmico de uma residência unifamiliar em seu estado original e sugestões visando melhorias, por meio de simulações computacionais. A cada simulação, e diferentes parâmetros sendo adicionados, foi possível ver que a norma de desempenho, NBR 15575-1, possui exigências muito brandas e de fácil alcance.

Considerando o clima específico do nosso estado, desempenhos de temperaturas máximas no verão sendo iguais a temperatura externa, representam um valor muito abaixo do esperado, levamos em conta as temperaturas de até 41°C do nosso verão.

Avaliando nosso inverno, que atingetemperaturasde marcas negativas, uma exigência de mais 3°C em relação a temperatura externa é extremamente baixa, mesmo essa sendo a exigência mínima, considerando que as únicas simulações a atingiressa marca foram as demonstradas sem fluxo de entrada de ar controlado.

Com a análise dos resultados obtidos foi possível determinar uma melhora de rendimento a partir da aplicação do controle de fluxo de entrada de ar, isso demonstra a importância dos parâmetros de utilização de uma edificação. Além de aumentar o desempenho, quando implementado como única modificação, também foi possível notar o seu efeito sobre as outras modificações, essas noselementos da edificação, que tiveram seu impacto aumentado. Assim é possível concluir que a mudanças no modo de utilização e dos elementos da edificação tem uma relação dependente, em que a uso de ambas em uma mesma simulação afeta o resultado da outra.

Quando observada a simulação, com alteração dos elementos físicos, foi possível notar um comportamento diferente das outras simulações que incluíram alterações de funcionamento. Pode ser notado que os efeitos das modificações são meramente somados no resultado final, demonstrando sua independência de ação sobre o desempenho térmico da unidade habitacional. Como foi realizada apenas uma simulação com duas alterações de elementos, não foi possível determinar definitivamente essa conclusão, sendo necessárias futuras simulações para melhor caracterizar a interação entre alterações.

Como critérios para comparação entre as simulações foram utilizados dois métodos, o que possibilita diferentes interpretações dos resultados. Primeiramente foram comparadas as temperaturas obtidas nas simulações iniciais, podendo determinar quais simulações apresentaram um ganho suficiente para um aumento de classificação de desempenho, segundo a NBR 15575-1. Sendo observado nas simulações com alterações de funcionamento (fluxo de ar) um aumento de classificação, quanto ao seu desempenho térmico no período de verão.

Os resultados obtidos nas simulações não atingiram os aumentos de desempenho esperados seguindo as sugestões da NBR 15575-1. Talvez haja necessidade de aumentar o universo de simulações para ter uma amostragem mais representativa.

Com o intuito de gerar uma classificação entre as simulações, não somente quanto a temperatura dos dias específicos, visto que essas não apresentam valores de fácil visualização, foram realizadas simulações com sistemas mecânicos. Com os valores encontrados foi possível uma comparação em quantidade de energia elétrica necessária para as simulações atingirem uma faixa de temperatura determinada. Assim uma análise de desempenho diferenciada foi realizada, podendo ser analisados os resultados da comparação das simulações. Quando é usada o segundo método proposto para comparação é visto uma diferença de aproximadamente 50%, considerando o consumo de energia elétrica em valores que podem ser facilmente interpretados e até monetarizados.

Como possíveis sugestões para futuras pesquisas seria necessária a simulação em escala reduzida para confirmação dos resultados obtidos, pois mesmo *softwares* atuais possuem suas limitações, como por exemplo a falta de inclusão de temperaturas diferenciadas em casos de brisas. Os *softwares* consideram a temperatura do ar externo como singular, sendo a mesma indiferente de variações de vento, algo que não é preciso, pois o ar possui temperatura variada, quando considerados a velocidade do vento e sua direção. Ainda maior é o impacto em regiões próximas a grandes massas de água. Os *softwares* simplifica o vento considerando-o como fator para determinar a troca de calor com o ambiente, ventos maiores aumentam a velocidade de troca de calor, mas com temperatura estável.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-1**: desempenho térmico de edificações – parte 1: definição, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005a.
- _____. **NBR 15.220-2**: desempenho térmico de edificações – parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmico, da capacidade térmico, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005b.
- _____. **NBR 15.220-3**: desempenho térmico de edificações – parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005c.
- _____. **NBR 15.575-1**: edificações habitacionais – desempenho – parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013a.
- _____. **NBR 15.575-4**: edificações habitacionais – desempenho – parte 4: sistemas de vedações verticais externas e internas. Rio de Janeiro, 2013b.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, INC. **Standard 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2010a.
- CALIFORNIA. CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. (Org.). **Building Energy Efficiency Standards - Reference Ace**. Sacramento, 2013. Disponível em: <<https://energycodeace.com/site/custom/public/reference-ace-2013/index.html#!Documents/22thermalzoneshvaczonesandspacefunctions.htm>>. Acesso em: 21 jun. 2017.
- COLORADO. National Laboratory Of The U.s. Department Of Energy. Office Of Energy Efficiency And Renewable Energy (Org.). **OPENSTUDIO**. Golden: Openstudio, 2017. Disponível em: <<https://www.openstudio.net/>>. Acesso em: 21 jun. 2017.
- FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. **Manual de Conforto Térmico**. 5. ed. São Paulo: Estudio Nobel, 2001. 243 p.
- GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. Energy and building: Lausanne, v. 18, Julho 1992
- GOOGLE (Porto Alegre) (Comp.). **Localização por Satélite**. 2017. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-30.1007801,-51.2638329,48m/data=!3m1!1e3?hl=en>>. Acesso em: 21 jul. 2016.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R.. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elétrabras/procel, 2014. 366 p.

LIBERALI, Ricciano. **SIMULAÇÃO PARA ESTUDO DO ENVOLTÓRIO DE UM PRÉDIO**. 2010. 21 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.,

MILAN, Victoria Bottini. **DESEMPENHO TÉRMICO: ANÁLISE DE UMA EDIFICAÇÃO ESCOLAR PADRÃO PROINFÂNCIA INSTALADA NO MUNICÍPIO DE CAMAQUÃ**. 2015. 106 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SORGATO, Márcio José; MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. **Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15.575**. 2013. 21 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

ANEXO A – Tabelas Adicionais NBR 15575

Tabela 11.1 — Métodos de medição de propriedades térmicas de materiais e elementos construtivos

Propriedade	Determinação
Condutividade térmica	ASTM C 518 ou ASTM C 177 ou ISO 8302
Calor específico	Medição ASTM C 351 – 92b
Densidade de massa aparente	1.1 Medição conforme método de ensaio preferencialmente normalizado, 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 E903-96
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 E903-96
Características fotoenergética (vidros)	EN 410 – 1998/ EN 12898

Tabela 15 - Área mínima de ventilação em dormitórios e salas de estar

Nível de desempenho	Aberturas para Ventilação (A)	
	Zonas 1 a 7 Aberturas médias	Zona 8 Aberturas grandes
Mínimo	$A \geq 7\%$ da área de piso	$A \geq 12\%$ da área de piso REGIÃO NORTE DO BRASIL $A \geq 8\%$ da área de piso REGIÃO NORDESTE E SUDESTE DO BRASIL

Nota: nas zonas de 1 a 6 as áreas de ventilação devem ser passíveis de serem vedadas durante o período de frio.

APÊNDICE A – Resultados Adicionais

Figura – Características dos Componentes

Parede Externa 28cm	Espessura (cm)	$\lambda(W/(m^*K))$	$\rho(kg/m^3)$	$C(kj/(kg^*K))$	$R((m^2^*K)/W)$	$RT((m^2^*K)/W)$	$U(W/(m^2^*K))$	$CT(kj/(m^2^*K))$
Argamassa Externa	3	1,15	2100	1	0,026086957	0,196086957	5,099778271	63
Argmassa Interna	3	1,15	1800	1	0,004347826	0,174347826	5,735660848	9
cerâmica	22	1	1800	0,92	0,22	0,39	2,564102564	364,32
Conjunto Completo	-	-	-	-	-	0,439728572	2,274130144	485,82
Parede Externa 18cm								
Argamassa Externa	3	1,15	2100	1	0,026086957	0,196086957	5,099778271	63
Argmassa Interna	3	1,15	1800	1	0,004347826	0,174347826	5,735660848	9
cerâmica	12	1	1800	0,92	0,12	0,29	3,448275862	198,72
Conjunto Completo	-	-	-	-	-	0,25135735	3,978399681	279,72
Laje de Uso								
Laje Concreto	15	1,75	2200	1	0,085714286	0,295714286	3,381642512	330
Laje Coberta								
Laje Forro Concreto	12	1,75	2200	1	0,068571429	0,108571429	9,210526316	264
Telha Portuguesa	1,5	1,05	2000	0,92	0,014285714	0,014285714	70	27,6
Conjunto Completo Camada de ar >5cm	-	-	-	-	-	0,542857143	1,842105263	291,6

Figura – Simulação Anual 4.7

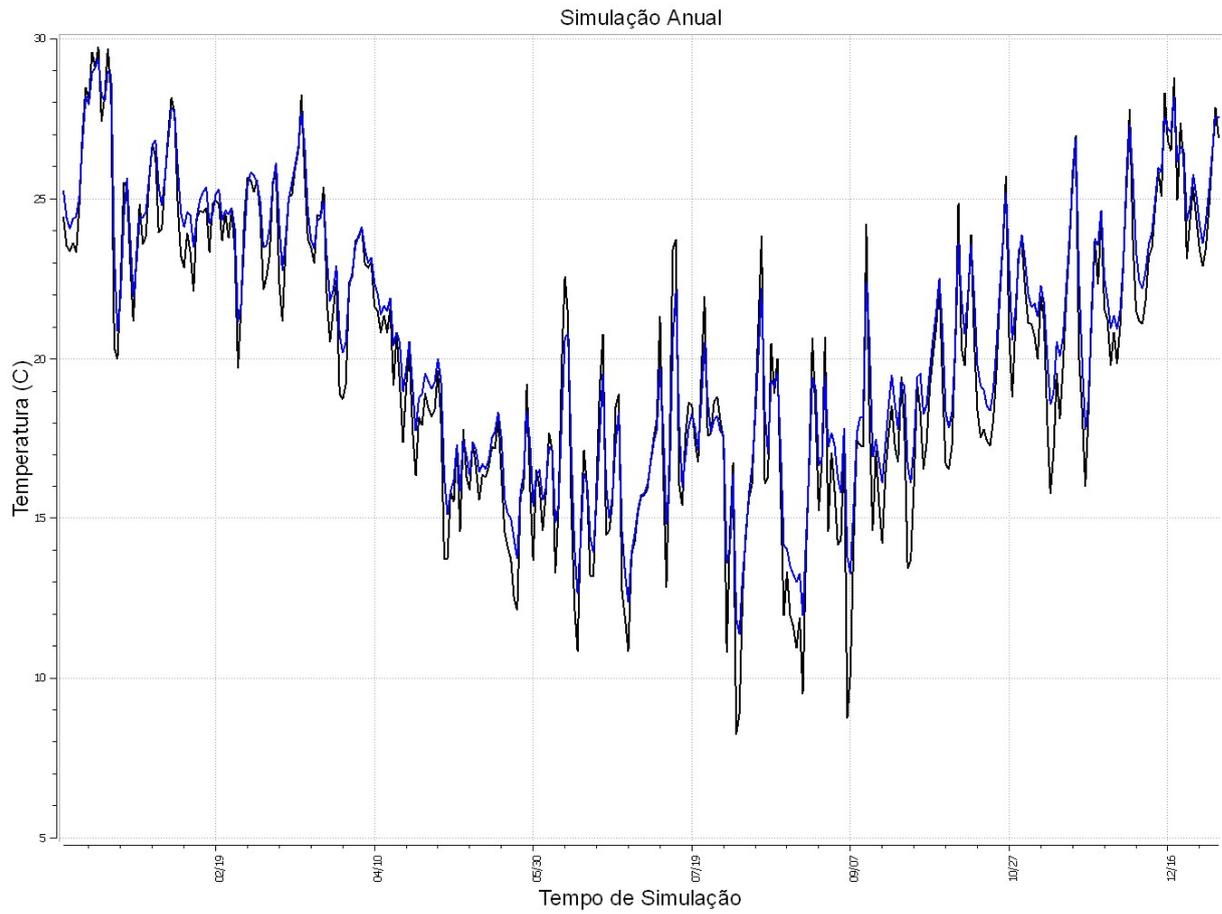


Figura – Simulação Anual 4.8

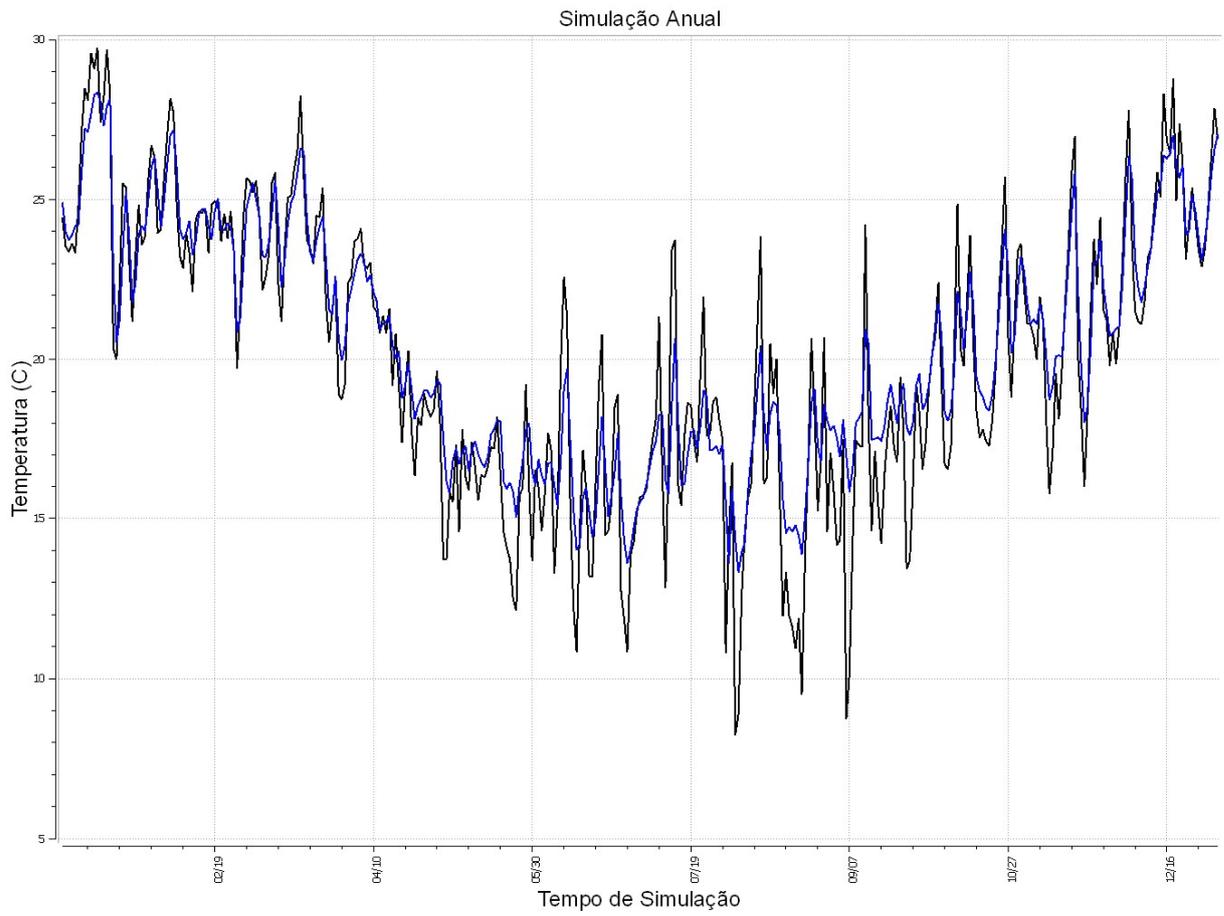


Figura – Simulação Anual 4.9
Simulação Anual

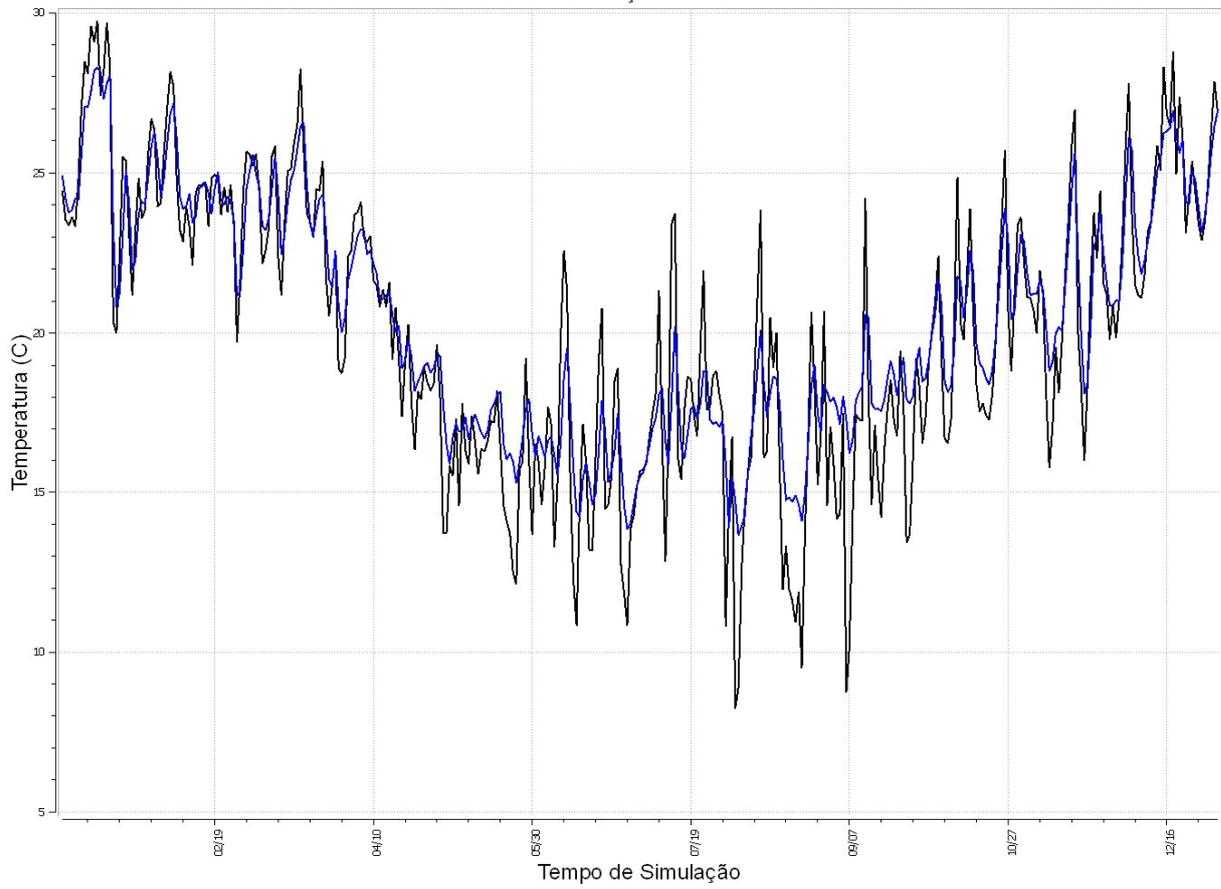


Figura – Simulação Anual 4.10

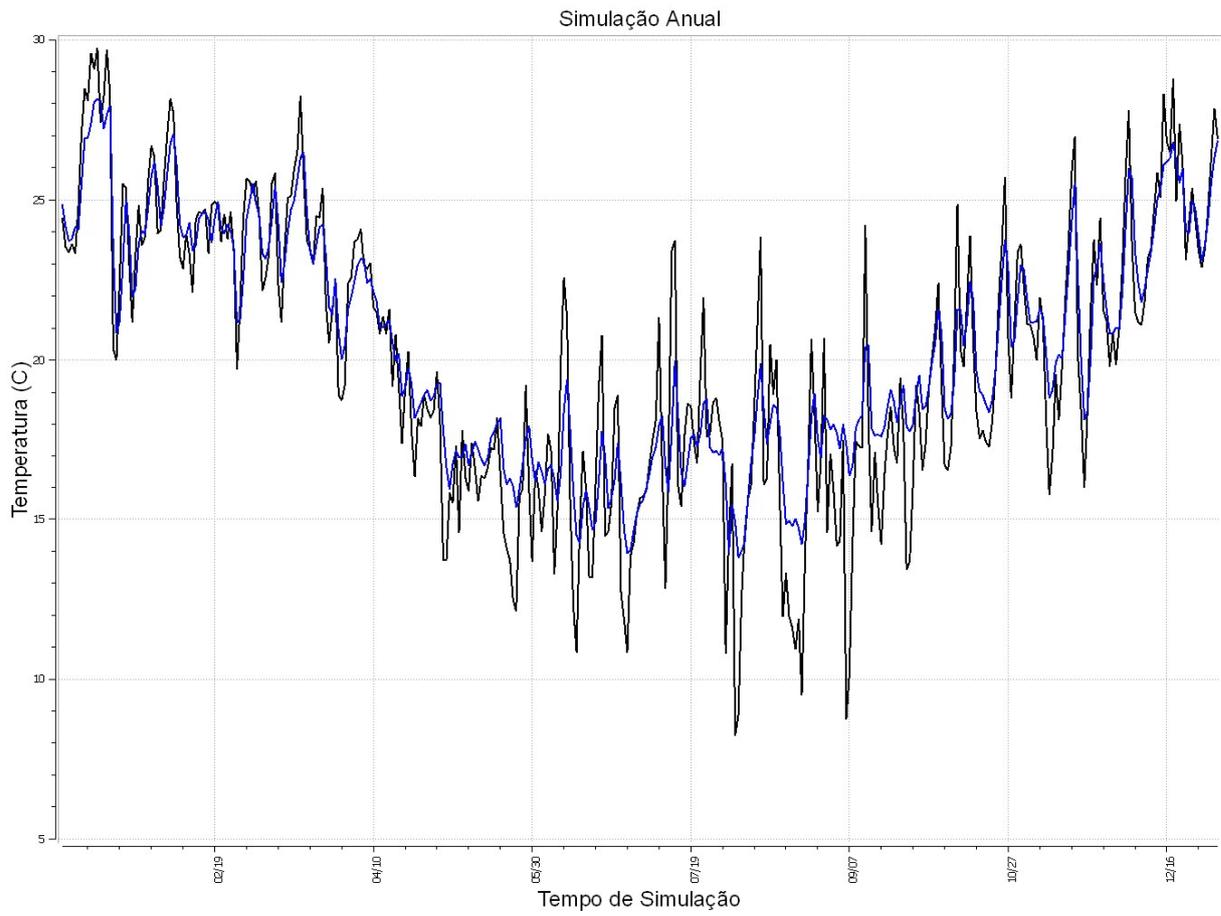


Figura – Tabela com consumo de simulações com sistemas mecânicos 1

SIMULAÇÕES	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
INICIAL													
Aquecimento (kW/h)	14,22	12,08	84,36	384,08	2104,77	2363,97	1602,98	2347,12	1563	462,94	329,95	36,76	11306,23
Resfriamento (kW/h)	608,56	292,28	265,29	39,56	0,03	14,76	23,99	20,05	13,28	80,86	81,09	473,04	1912,79
Soma (kW/h)	622,78	304,36	349,65	423,64	2104,8	2378,73	1626,97	2367,17	1576,28	543,8	411,04	509,8	13219,02
Custo (R\$)	R\$ 462,93	R\$ 226,24	R\$ 259,91	R\$ 314,90	R\$ 1.564,56	R\$ 1.768,18	R\$ 1.209,38	R\$ 1.759,59	R\$ 1.171,70	R\$ 404,22	R\$ 305,54	R\$ 378,95	R\$ 9.826,09
Relação com Simulação Inicial	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
VIDRO													
Aquecimento (kW/h)	14,45	12,3	84,8	379,93	2070,08	2338,93	1585,6	2320,55	1531,21	458,48	327,89	37,2	11161,42
Resfriamento (kW/h)	595,22	283,89	257,7	39,34	0,03	14,76	23,95	20,03	13,25	79,85	79,28	460,88	1868,18
Soma (kW/h)	609,67	296,19	342,5	419,27	2070,11	2353,69	1609,55	2340,58	1544,46	538,33	407,17	498,08	13029,6
Custo (R\$)	R\$ 453,19	R\$ 220,17	R\$ 254,59	R\$ 311,66	R\$ 1.538,77	R\$ 1.749,57	R\$ 1.196,43	R\$ 1.739,82	R\$ 1.148,04	R\$ 400,16	R\$ 302,66	R\$ 370,24	R\$ 9.685,29
Relação com Simulação Inicial	97,89%	97,32%	97,96%	98,97%	98,35%	98,95%	98,93%	98,88%	97,98%	98,99%	99,06%	97,70%	98,57%
PAREDE													
Aquecimento (kW/h)	14,18	12,05	84,25	370,64	2030,77	2315,47	1565,16	2299,8	1490,7	449,79	322,75	36,73	10992,29
Resfriamento (kW/h)	587,32	270,83	247,2	39,25	0,03	14,75	23,98	20,05	13,28	78,04	75,28	446,48	1816,49
Soma (kW/h)	601,5	282,88	331,45	409,89	2030,8	2330,22	1589,14	2319,85	1503,98	527,83	398,03	483,21	12808,78
Custo (R\$)	R\$ 447,11	R\$ 210,27	R\$ 246,38	R\$ 304,68	R\$ 1.509,55	R\$ 1.732,12	R\$ 1.181,26	R\$ 1.724,41	R\$ 1.117,95	R\$ 392,35	R\$ 295,87	R\$ 359,18	R\$ 9.521,15
Relação com Simulação Inicial	96,58%	92,94%	94,79%	96,75%	96,48%	97,96%	97,67%	98,00%	95,41%	97,06%	96,83%	94,78%	96,90%
FLUXO CONTROLADO													
Aquecimento (kW/h)	0,07	0,04	18,07	155,13	1042,63	1165,76	873,92	1039,6	672,6	200,77	115,88	0,22	5284,69
Resfriamento (kW/h)	298,68	129,89	122,04	12,53	0,03	4,86	6,82	5,23	4,02	29,94	35,86	226,71	876,61
Soma (kW/h)	298,75	129,93	140,11	167,66	1042,66	1170,62	880,74	1044,83	676,62	230,71	151,74	226,93	6161,3
Custo (R\$)	R\$ 222,07	R\$ 96,58	R\$ 104,15	R\$ 124,63	R\$ 775,04	R\$ 870,16	R\$ 654,68	R\$ 776,65	R\$ 502,95	R\$ 171,49	R\$ 112,79	R\$ 168,68	R\$ 4.579,88
Relação com Simulação Inicial	47,97%	42,69%	40,07%	39,58%	49,54%	49,21%	54,13%	44,14%	42,93%	42,43%	36,92%	44,51%	46,61%

Figura – Tabela de consumo de simulações com sistemas mecânicos parte 2

SIMULAÇÕES	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
FLUXO CONTROLADO													
Aquecimento (kW/h)	0,07	0,04	18,07	155,13	1042,63	1165,76	873,92	1039,6	672,6	200,77	115,88	0,22	5284,69
Resfriamento (kW/h)	298,68	129,89	122,04	12,53	0,03	4,86	6,82	5,23	4,02	29,94	35,86	226,71	876,61
Soma (kW/h)	298,75	129,93	140,11	167,66	1042,66	1170,62	880,74	1044,83	676,62	230,71	151,74	226,93	6161,3
Custo (R\$)	R\$ 222,07	R\$ 96,58	R\$ 104,15	R\$ 124,63	R\$ 775,04	R\$ 870,16	R\$ 654,68	R\$ 776,65	R\$ 502,95	R\$ 171,49	R\$ 112,79	R\$ 168,68	R\$ 4.579,88
Relação com Simulação Inicial	47,97%	42,69%	40,07%	39,58%	49,54%	49,21%	54,13%	44,14%	42,93%	42,43%	36,92%	44,51%	46,61%
PAREDE E VIDRO													
Aquecimento (kW/h)	14,44	12,29	84,77	369,05	1997	2286,17	1547,31	2268,49	1467,32	449,06	322,46	37,19	10855,55
Resfriamento (kW/h)	572,19	263,64	240	39,16	0,03	14,76	23,95	20,02	13,24	77,45	74	433,58	1772,02
Soma (kW/h)	586,63	275,93	324,77	408,21	1997,03	2300,93	1571,26	2288,51	1480,56	526,51	396,46	470,77	12627,57
Custo (R\$)	R\$ 436,06	R\$ 205,11	R\$ 241,41	R\$ 303,43	R\$ 1.484,45	R\$ 1.710,35	R\$ 1.167,96	R\$ 1.701,12	R\$ 1.100,54	R\$ 391,37	R\$ 294,70	R\$ 349,94	R\$ 9.386,45
Relação com Simulação Inicial	94,20%	90,66%	92,88%	96,36%	94,88%	96,73%	96,58%	96,68%	93,93%	96,82%	96,45%	92,34%	95,53%
FLUXO CONTROLADO E VIDRO													
Aquecimento (kW/h)	0,07	0,04	17,03	150,19	1006,19	1128,28	849,86	1000,25	646,73	196,53	112,87	0,25	5108,29
Resfriamento (kW/h)	283,3	120,79	113,59	11,66	0,02	4,61	6,48	4,96	3,7	27,46	33,11	213,36	823,02
Soma (kW/h)	283,37	120,83	130,62	161,85	1006,19	1132,89	856,34	1005,21	650,43	223,99	145,98	213,61	5931,31
Custo (R\$)	R\$ 210,64	R\$ 89,82	R\$ 97,09	R\$ 120,31	R\$ 747,93	R\$ 842,11	R\$ 636,54	R\$ 747,20	R\$ 483,48	R\$ 166,50	R\$ 108,51	R\$ 158,78	R\$ 4.408,92
Relação com Simulação Inicial	45,50%	39,70%	37,36%	38,20%	47,80%	47,63%	52,63%	42,46%	41,26%	41,19%	35,51%	41,90%	44,87%
FLUXO CONTROLADO E PAREDES													
Aquecimento (kW/h)	0,07	0,03	15,17	150,44	1032,44	1156,85	886,19	1018,02	641,54	197,38	113,44	0,15	5211,72
Resfriamento (kW/h)	287,95	116,52	110,75	11,8	0,02	4,65	6,54	5,01	3,73	26,53	31,06	212,1	816,64
Soma (kW/h)	288,02	116,55	125,92	162,24	1032,44	1161,5	892,73	1023,03	645,27	223,91	144,5	212,25	6028,36
Custo (R\$)	R\$ 214,09	R\$ 86,64	R\$ 93,60	R\$ 120,60	R\$ 767,44	R\$ 863,38	R\$ 663,59	R\$ 760,45	R\$ 479,65	R\$ 166,44	R\$ 107,41	R\$ 157,77	R\$ 4.481,06
Relação com Simulação Inicial	46,25%	38,29%	36,01%	38,30%	49,05%	48,83%	54,87%	43,22%	40,94%	41,18%	35,15%	41,63%	45,60%
TODAS MODIFICAÇÕES													
Aquecimento (kW/h)	0,06	0,03	14,05	145,95	982,09	1107,21	851,83	971,98	610,39	190,19	107,68	0,16	4981,62
Resfriamento (kW/h)	269,55	107,23	101,23	11,03	0,02	4,4	6,2	4,75	3,43	24,36	28,5	195,89	756,59
Soma (kW/h)	269,61	107,26	115,28	156,98	982,11	1111,61	858,03	976,73	613,82	214,55	136,18	196,05	5738,21
Custo (R\$)	R\$ 200,41	R\$ 79,73	R\$ 85,69	R\$ 116,69	R\$ 730,03	R\$ 826,29	R\$ 637,80	R\$ 726,03	R\$ 456,27	R\$ 159,48	R\$ 101,23	R\$ 145,73	R\$ 4.265,38
Relação com Simulação Inicial	43,29%	35,24%	32,97%	37,06%	46,66%	46,73%	52,74%	41,26%	38,94%	39,45%	33,13%	38,46%	43,41%

Análise de adaptação de uma edificação habitada para atendimento ao desempenho térmico visando economia de energia elétrica