



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MATEUS VERAS MENDES

**DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL: ESTUDO
NO SEMIÁRIDO NORDESTINO**

CRATEÚS
2019

MATEUS VERAS MENDES

DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL: ESTUDO NO
SEMIÁRIDO NORDESTINO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito à obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Luis Felipe Cândido.

CRATEÚS

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M492d Mendes, Mateus Veras.
Desempenho térmico de habitações de interesse social : estudo no semiárido nordestino
/ Mateus Veras Mendes. – 2019.
93 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus
de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2019.
Orientação: Prof. Me. Luis Felipe Cândido.
1. Conforto térmico. 2. NBR 15575. 3. Habitação . 4. Desempenho Residencial. I. Título.
CDD 620
-

ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS: ESTUDO
NO SEMIÁRIDO NORDESTINO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito à obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Luis Felipe Cândido
Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus de Crateús (Orientador)

Prof. Dr. Sandro Vagner de Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus de Crateús

Prof. Me. Antônio Arthur Fortaleza Neves
Centro Universitário Estácio do Ceará (ESTÁCIO), Unidade Via Corpv

A Deus.

Aos meus pais, José Gonçalves e Francisca de Assis.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Gonçalves e Francisca de Assis, pelo incentivo, dedicação e amor que apresentaram ao longo de toda a vida, sobretudo nos momentos mais difíceis.

As minhas irmãs, pelos bons momentos de diversão.

Ao Prof. Me. Luis Felipe Cândido, pela confiança depositada ao longo do projeto, além da excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Me. Antônio Arthur Fortaleza Neves e Prof. Dr. Sandro Vagner de Lima pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos meus amigos de graduação, pela colaboração nos estudos, pelos momentos de descontração nas horas vagas e sobrecarregadas e pelos vínculos criados, cujo pretendo levar por toda a vida.

“Acredito que as coisas podem ser feitas de
outra maneira e que vale a pena tentar.”

Zaha Hadid

RESUMO

A qualidade do ambiente construído depende de inúmeros fatores relacionados ao seu espaço e funcionalidade, bem como do seu conforto (acústico, térmico, dentre outros). Em face à realidade climática do semiárido nordestino, caracterizado por elevadas temperaturas e baixa umidade, o conforto térmico torna-se uma questão premente, principalmente por causa do baixo poder aquisitivo das famílias da região que inviabiliza o uso de refrigeração mecânica. Assim, este trabalho teve por objetivo analisar o desempenho térmico de Habitações de Interesse Social (HIS) no semiárido nordestino. Para tal, foi modelada e analisada uma HIS típica, localizada na cidade de Crateús, leste do estado do Ceará, conforme o método simplificado e simulação computacional prescritas nas normas ABNT NBR 15575-1 e ABNT NBR 15220-3. Constatou-se o não atendimento dos critérios mínimos de conforto térmico, o que suscitou a proposição de alternativas de baixo custo para melhorar o conforto térmico da edificação. Verificou-se que os principais mecanismos de dissipação térmica sugeridos pelas normas brasileiras, como o aumento da ventilação e do sombreamento, não foram capazes de prover conforto térmico para o critério mínimo de desempenho. Mudanças mais substanciais como o tipo e/ou espessura de revestimentos internos ou de fachadas foram então sugeridas e se mostraram meritosas. As melhorias propostas podem implicar em redução de custos de operação da edificação com a diminuição do uso de ventiladores e ar condicionados, servindo de referência para a comunidade local modificar suas habitações e futuros projetos e assim aumentar sua qualidade de vida.

Palavras-chave: Conforto térmico. NBR 15575. Habitação. Desempenho Residencial.

ABSTRACT

The quality of a built environment depends of many factors related with its space and functionality, as well its comfort (acoustic, thermal, among other). In face of the climatic of semiarid region at northeast of Brazil, characterized by highs temperatures and low humidity, the thermal comfort becomes crucial. This is reinforced by the low purchasing power of families from this region, which makes the use of mechanical refrigeration unfeasible. Thus, this paper is aimed to analyzes the thermal performance of social housing projects at the semiarid region of northeast of Brazil. For that, a building of a social housing project located at city of Crateús, east of state of Ceará, was modeled and analyzed according to simplified and computer simulation methods of thermal performance prescribed by Brazilians standards NBR 15575-1 and NBR 15220-3. It was evidenced that the building does not attend the performance criteria for the minimum level, which led to the proposition of low-cost alternatives to the building design that would improve its thermal performance. The main strategies of thermal dissipation suggested by the Brazilian standard, as increasing the ventilation and shading, were insufficient to improve the thermal performance to minimum level. More substantial changes in the building design, as types and wall cladding thickness, were suggested and its costs were estimated. The low-cost improvements proposed can imply in cost reduction of building operations, through the reduction of mechanical refrigeration, as well as serves as reference to the local community to design or modify its buildings aiming a better life quality.

Keywords: Thermal Comfort. NBR 15575. Housing. Housing Performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico da umidade relativa do ar mensal em Crateús	21
Figura 2 - Zoneamento bioclimático brasileiro	23
Figura 3 - Efeito chaminé em habitações	32
Figura 4 - Apresentação de estratégias de ventilação natural numa mesma edificação	33
Figura 5 - Delineamento da pesquisa	35
Figura 6 - Localização do Residencial Dom Fragoso I e II.....	36
Figura 7 - Habitações do programa Minha Casa Minha Vida em Crateús	37
Figura 8 - Planta baixa da HIS	37
Figura 9 - Modelagem das unidades habitacionais.....	39
Figura 10 - Ilustração da posição para insolação solar nas HIS	41
Figura 11 - Divisão das zonas térmicas das HIS no <i>EnergyPlus</i>	42
Figura 12 - Modelagem das HIS no <i>Sketchup</i>	43
Figura 13 - Zonas térmicas da HIS	47
Figura 14 - Esquema das paredes da HIS	49
Figura 15 - Corte longitudinal da HIS	56
Figura 16 - Cobertura sob o Quarto 01	56
Figura 17 - Dimensões da cobertura.....	57
Figura 18 - Modelo equivalente do telhado.....	57
Figura 19 - Maiores temperaturas mensais das cozinhas da HIS-A e HIS-B	64
Figura 20 - Maiores temperaturas mensais das salas da HIS-A e HIS-B	64
Figura 21 - Maiores temperaturas mensais dos quartos de solteiro da HIS-A e HIS-B	65
Figura 22 - Maiores temperaturas mensais dos quartos de casal da HIS-A e HIS-B	66
Figura 23 - Comparação dos ambientes da HIS-B com situação insatisfatória.....	67
Figura 24 - Ambientes da HIS-B submetidos a estratégia de ventilação	68
Figura 25 - Ambientes da HIS-B submetidos a estratégia de sombreamento	69
Figura 26 - Ambientes da HIS-B submetidos a estratégia de ventilação e sombreamento	70
Figura 27 - Cobertura exclusiva na janela do quarto de casal	72
Figura 28 - Maiores temperaturas mensais da cozinha B	73
Figura 29 - Maiores temperaturas mensais da sala B	73
Figura 30 - Maiores temperaturas mensais do quarto B	74
Figura 31 - Maiores temperaturas mensais do quarto de casal B	74
Figura 32 - Comparação do comportamento térmico dos ambientes da HIS-B	75
Figura 33 - Ambientes da HIS-B submetidos a estratégia de ventilação	76

Figura 34 - Ambientes da HIS-B submetidos a estratégia de sombreamento	76
Figura 35 - Ambientes da HIS-B submetidos a estratégia de ventilação e sombreamento	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão	24
Tabela 2 - Transmitância térmica e absorvância de paredes externas	26
Tabela 3 - Capacidade térmica de paredes externas	26
Tabela 4 - Área mínima de ventilação em dormitórios e salas de estar.....	26
Tabela 5 - Transmitância térmica e absorvância de coberturas	27
Tabela 6 - Propriedades térmicas dos materiais recomendados para a ZB7.....	31
Tabela 7 – Temperatura média do solo para a cidade de Crateús	41
Tabela 8 - Propriedades térmicas dos materiais construtivos	43
Tabela 9 - Elementos construtivos da habitação.....	44
Tabela 10 - Critérios de avaliação de desempenho térmico	44
Tabela 11 - Avaliação das aberturas de ventilação	48
Tabela 12 - Características dos materiais da parede empregados na residência.....	49
Tabela 13 - Verificação de desempenho térmico da parede.....	53
Tabela 14 – Propriedade térmicas da parede (calculado versus recomendado).....	55
Tabela 15 - Propriedades térmicas dos elementos da coberta	58
Tabela 16 - Verificação de desempenho térmico da cobertura	61
Tabela 17 - Propriedade térmicas da cobertura (calculado versus recomendado).....	63
Tabela 18 - Temperaturas encontradas pelo processo de simulação computacional na HIS-B	70
Tabela 19 - Propriedades térmicas dos materiais da cobertura.....	72
Tabela 20 - Elementos construtivos da habitação.....	72
Tabela 21 - Temperaturas encontradas pelo processo de simulação computacional na HIS-B	78
Tabela 22 - Temperaturas obtidas para o MB e o MA.....	78
Tabela 23 - Comparativo de custo entre o MB e o MA.....	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros do desempenho térmico.....	25
Quadro 2 - Estratégias de condicionamento térmico passivo para a zona bioclimática 7.....	30
Quadro 3 - Esquadrias utilizadas na HIS.....	38
Quadro 4 - Materiais construtivos da residência	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEF	Caixa Econômica Federal
CE	Ceará
DOE	Department of Energy
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GHR	Graus-hora de resfriamento
HIS	Habitação de Interesse Social
HFC	Hidrofluorcarbono
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISO	International Organization for Standardization
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
MG	Minas Gerais
MA	Modelo Alterado
MB	Modelo Base
I	Nível de Desempenho Térmico Intermediário
M	Nível de Desempenho Térmico Mínimo
S	Nível de Desempenho Térmico Superior
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PI	Piauí
PVC	Policloreto de Vinila
PEI	Porcelain Enamel Institute
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
PMCMV	Programa Minha Casa Minha Vida
SP	São Paulo
SEINFRA	Secretaria da Infraestrutura do Estado do Ceará
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
SVVIE	Sistemas de Vedações Verticais Internas e Externas
UFC	Universidade Federal do Ceará

UFSC Universidade Federal de Santa Catarina
ZT Zona Térmica

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Abertura de ventilação
h	Abertura dos beirais da cobertura
α	Absortância térmica solar
A_A	Área da abertura de ventilação de um ambiente
A_c	Área da cobertura
S	Área de ventilação da coberta
S	Área de ventilação na cobertura
A_p	Área do piso
A_2	Área lateral da seção S_c
A_1	Área lateral da seção S_b
φ	Atraso térmico
c	Calor específico
CT	Capacidade Térmica
C	Celsius
cm	Centímetro
λ	Condutibilidade térmica
ρ	Densidade
E_a	Espessura da argamassa entre blocos cerâmicos
e	Espessura da camada de um material
E_{ac}	Espessura da câmara de ar da cobertura
E_t	Espessura da telha de barro
E_2	Espessura das câmaras de ar
E_1	Espessura do bloco cerâmico da seção do tijolo
e_f	Espessura do forro
E_r	Espessura do reboco
FT	Fator de correção da transmitância térmica
FV	Fator de ventilação
FS_o	Fator solar
$^\circ$	Graus
J	Janela
J	Joule

<i>K</i>	Kelvin
<i>k</i>	Kilo
<i>Ec</i>	Largura do bloco cerâmico
<i>Ec</i>	Largura do bloco cerâmico
<i>L</i>	Carga térmica atuante sobre o corpo
<i>Ma</i>	Atividade desempenhada pelo indivíduo
<i>m</i>	Metro
<i>mm</i>	Milímetros
<i>N</i>	Norte
<i>%</i>	Porcentagem
<i>P</i>	Porta
<i>R\$</i>	Reais
<i>ren</i>	Renovação do volume de ar
<i>R</i>	Resistência térmica
<i>Rtc</i>	Resistência térmica da cobertura
<i>Rt</i>	Resistência térmica da parede
<i>Rar</i>	Resistência térmica do ar
<i>Rtijolo</i>	Resistência térmica do tijolo
<i>Rse</i>	Resistência térmica superficial externa
<i>Rsi</i>	Resistência térmica superficial interna
<i>R_T</i>	Resistência Térmica Total
<i>RT</i>	Resistência térmica total da parede
<i>Sa</i>	Seção de argamassa
<i>Sb</i>	Seção de reboco e tijolo
<i>Sc</i>	Seção de reboco, tijolo e câmara de ar
<i>S1</i>	Seção do tijolo
<i>S2</i>	Seção do tijolo com câmaras de ar
<i>Sb</i>	Seção total do tijolo
<i>U</i>	Transmitância Térmica
<i>Tn</i>	Temperatura neutra
<i>Tm</i>	Temperatura média do ar
<i>T_{e,max}</i>	Valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação
<i>T_{i,max}</i>	Valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação

$T_{e,min}$	Valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação
$T_{i,min}$	Valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação
W	Watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Questão de pesquisa	15
1.3	Objetivos.....	15
1.4	Justificativa	16
1.5	Delimitação do estudo	16
1.6	Roteiro temático provisório	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Conforto térmico	18
2.2	Clima do semiárido	20
2.3	Análise do Desempenho térmico de edificações.....	22
2.3.1	<i>Crítérios de desempenho térmico</i>	24
2.3.2	<i>Método simplificado da NBR 15.575</i>	25
2.3.2.1	Sistema de Vedação Verticais Internas e Externas (SVVIE)	26
2.3.2.2	Sistema de cobertura	27
2.3.3	<i>Simulação computacional com o Energy Plus.....</i>	27
2.4	Estudos sobre conforto térmico em edificações	28
2.5	Estratégias de condicionamento térmico passivo	30
3	MÉTODO DE PESQUISA	35
3.1	Delineamento da pesquisa.....	35
3.2	Caracterização da HIS	36
3.3	Procedimentos para análise de desempenho térmico.....	38
3.3.1	<i>Método simplificado</i>	38
3.3.2	<i>Método por simulação computacional.....</i>	39
3.3.2.1	Modelo base da HIS	39
3.3.2.2	Parâmetros de simulação	40
3.3.2.3	Definição das zonas térmicas	42
3.3.2.4	Materiais construtivos do modelo base (MB)	43
3.3.2.5	Crítérios de avaliação de desempenho térmico para as habitações de Crateús	44
3.4	Proposição de melhorias e análise de custo.....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	Análise conforme o método simplificado da ABNT NBR 15.220 (2003)	46
4.1.1	<i>Análise das aberturas de ventilação.....</i>	47

4.1.2	<i>Análise do desempenho térmico dos sistemas de vedação verticais</i>	48
4.1.2.1	Cálculo da resistência térmica do tijolo	50
4.1.2.2	Cálculo da resistência térmica da parede.....	50
4.1.2.3	Resistência térmica total da parede (<i>RT</i>)	51
4.1.2.4	Capacidade térmica da parede (<i>CT</i>)	52
4.1.2.5	Atraso térmico (φ).....	54
4.1.2.6	Fator solar (<i>FS0</i>)	54
4.1.3	<i>Análise do desempenho térmico do sistema de cobertura</i>	55
4.1.3.1	Cálculo da resistência térmica da cobertura	59
4.1.3.2	Cálculo da resistência térmica total da cobertura	60
4.1.3.3	Cálculo da transmitância térmica	60
4.1.3.4	Cálculo da capacidade térmica	60
4.1.3.5	Atraso térmica (φ).....	62
4.1.3.6	Fator solar (<i>FS0</i>)	63
4.2	<i>Análise conforme o método de simulação computacional</i>	63
4.2.1	<i>Ventilação</i>	67
4.2.2	<i>Sombreamento</i>	68
4.2.3	<i>Ventilação e sombreamento</i>	69
4.2.4	<i>Comparação das estratégias do Modelo Base</i>	70
4.3	<i>Modelo alterado (MA)</i>	71
4.3.1	<i>Materiais construtivos do modelo alterado (MA)</i>	72
4.3.2	<i>Simulação do MA</i>	73
4.3.2.1	Ventilação	75
4.3.2.2	Sombreamento	76
4.3.2.3	Ventilação e sombreamento.....	77
4.3.2.4	Comparação das estratégias do MA	78
4.4	<i>Comparação entre o MB e o MA</i>	78
4.5	<i>Análise de custo entre o MB e o MA</i>	79
5	<i>CONCLUSÃO</i>	80
	<i>REFERÊNCIAS</i>	82
	<i>ANEXO A – COMPOSIÇÕES DE CUSTO UTILZADAS NA ANÁLISE</i>	86

1 INTRODUÇÃO

Esta seção apresenta o contexto e o problema de pesquisa, bem como o objetivo, a justificativa, a delimitação e a estrutura do estudo.

1.1 Contextualização

O setor da construção civil representa um dos principais mecanismos do desenvolvimento econômico nacional, impactando diretamente sobre outras áreas relativas ao meio ambiente e a sociedade (SILVA; FORTE, 2016). Entretanto, a geração de renda, ocasionada pelo desenvolvimento de empregos e do comércio, esbarra com a elevada degradação ambiental observadas em todas as etapas da cadeia produtiva da construção, principalmente pelo excesso do consumo de matérias-primas, de emissão de gás carbônico (CO₂) e ao consumo de energia durante a vida útil da edificação (LARUCCIA, 2014).

Tal panorama encontra-se em um contexto de desenvolvimento urbano que tem mudado significativamente o ambiente natural, transformando-o em construído. Estima-se que em 2050, 86% da população em regiões mais desenvolvidas e 64% em regiões menos desenvolvidas irão viver em centros urbanos (HÖJER; WANGEL, 2014), o que é um desafio em todos os aspectos e, em especial, a qualidade de vida dos cidadãos, seja na escala de cidade ou de qualidade de habitação.

O aumento da demanda por habitações resultou no crescente desenvolvimento de projetos padronizados, como ocorre com parte significativa dos empreendimentos produzidos por programas sociais. Entretanto, este tipo de modelo pode resultar na perda de qualidade das construções, já que estas, por vezes, são produzidas visando o aumento nos lucros em detrimento da qualidade.

Nesse contexto, um dos requisitos mais prementes a qualidade de vida, intrinsecamente ligado ao ambiente construído, é o seu conforto térmico, seja para dissipar energia térmica (em regiões mais quentes) ou conservá-la (em regiões mais frias). A preocupação acerca do conforto térmico infringe diretamente sobre o bem-estar e rendimento em trabalho (LAMBERTS *et al* (2013), tornando fundamental a análise bioclimática para atender às condições de conforto dos usuários e a eficiência energética nas residências.

Tal análise é preconizada pela norma de desempenho brasileira NBR 15575 (ABNT, 2013) que, ao evocar a norma NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005), apresenta critérios necessários à análise deste desempenho para diferentes elementos e

diferentes situações de exposição da edificação.

Isto se torna ainda mais relevante no contexto das regiões semiáridas, como no nordeste brasileiro, onde se realizou o presente estudo. Essa região tem média pluviométrica anual igual ou inferior a 800 mm, índice de déficit hídrico igual ou superior a 60% e índice de Aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50 (SUDENE, 2017) e engloba os nove estados da região Nordeste e Minas Gerais, região sudeste, agregando 1262 municípios. Em Crateús, cidade representativa deste estudo, registra-se a pluviosidade média anual de 738,4 mm durante o período de 1981 a 2010 (INMET, 2018).

Além dos ciclos de seca, a região apresenta forte desequilíbrio socioeconômico. Estes fatores contribuem para o baixo poder aquisitivo da população, refletindo na carência de habitações adequadas à região. Uma construção sem o devido planejamento energético gera um acréscimo de uso de refrigeração (ventilador e ar condicionado) que impactam na elevação dos custos nas residências (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014), elementos contraproducentes para famílias carentes.

1.2 Questão de pesquisa

A partir do contexto apresentado questiona-se:

As Habitações de Interesse Social de regiões semiáridas provêm conforto térmico para seus habitantes?

1.3 Objetivos

A partir do questionamento exposto, traçou-se como objetivo geral:

Analisar o desempenho térmico de Habitações de Interesse Social do semiárido.

Especificamente pretende-se:

- a) Caracterizar uma tipologia construtiva de interesse social (HIS);
- b) Verificar o desempenho térmico da HIS pelo procedimento normativo da NBR 15.575 (2013);
- c) Propor alternativas de baixo custo que auxiliem na melhoria do conforto térmico da residência.
- d) Analisar o custo das melhorias no projeto proposto.

1.4 Justificativa

Inicialmente, destaca-se a originalidade do trabalho, devido à escassez de estudos de análise bioclimática na região semiárida do nordeste brasileiro e, em especial, a inexistência de estudos no sertão de Crateús, interior do estado do Ceará, onde se realizou a presente pesquisa.

Com a relação à relevância do estudo, destaca-se sua contribuição social, econômica e ambiental. Do ponto de vista social, este estudo é relevante, pois se investiga se as tipologias construtivas de uma região de clima tão inóspito atendem aos critérios de desempenho da NBR 15.575 (2013). Isto pode levar a reflexões sobre a forma como as edificações são construídas na região e promover melhorias que levem à qualidade de vida dos habitantes. Do ponto de vista econômico, o estudo buscará alternativas de baixo custo, sejam elas de projeto ou de sistema construtivo, que favoreçam ao conforto térmico, reduzindo a necessidade de equipamentos de ventilação e refrigeração impactando, desta forma, na redução dos custos de operação da edificação.

Por fim, do ponto de vista ambiental, salienta-se que ao reduzir o consumo energético reduz-se a demanda pela geração de energia que, no Brasil, é gerada essencialmente por hidrelétricas. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) do Ministério de Minas e Energia, no ano de 2018, o consumo de energia elétrica residencial alcançou 136,02 TWh. Além disso, estima-se que a posse de ar condicionado pelas famílias tenha mais que duplicado entre 2005 e 2017 (EPE, 2018). Ao reduzir a demanda por equipamentos de ar condicionado, diminui-se, também, a geração de gases do efeito estufa por ele emitido, como o gás hidrofluorcarbono (HFC).

1.5 Delimitação do estudo

Este estudo delimitou-se a projetos residenciais da cidade de Crateús-CE, baseado no critério de representatividade, já que a cidade se encontra na região do semiárido. Quanto a tipologia, selecionou-se uma Habitação de Interesse Social (HIS) – implantada na cidade no âmbito do projeto Minha Casa Minha Vida.

1.6 Roteiro temático provisório

O presente estudo foi subdividido em cinco seções, incluindo esta introdução. A seguir, na seção dois, apresenta-se o referencial teórico que enfoca a análise do conforto térmico, segundo a norma de desempenho brasileira, bem como estudos sobre conforto térmico

a partir dos quais são observadas alternativas de baixo custo para melhorar o desempenho das edificações no referido tema.

Na seção três é apresentado o método de pesquisa, que consistiu em um levantamento de campo e de uma modelagem e simulação computacional do conforto térmico. Na seção quarta apresentam-se os resultados do estudo e suas implicações à luz do referencial teórico.

Por fim, na seção quinta, apresenta-se a conclusão do trabalho, enfatizando as contribuições e a sugestão de novos estudos, seguida das referências, apêndices e anexos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta o referencial teórico que enfoca a análise do conforto térmico, segundo a norma de desempenho ABNT NBR 15575, bem como estudos sobre conforto térmico a partir dos quais são observadas alternativas de baixo custo para melhorar o desempenho das edificações no referido tema.

2.1 Conforto térmico

Nesta pesquisa, buscou-se compreender as variáveis do conforto térmico e as relações entre o homem e o ambiente construído. A norma NBR 15575 (ABNT, 2013), aponta os treze requisitos relativos ao desempenho de uma edificação, tais como segurança estrutural, estanqueidade, isolamento acústico, dentre outros, a destacar o isolamento térmico, foco deste estudo.

Para a operacionalização do requisito de isolamento térmico, a norma de desempenho evoca a NBR 15220-1 (ABNT, 2003) que define o conforto térmico como o estado da mente que expressa satisfação do indivíduo com as condições térmicas do ambiente que o circunda. Assim, tem-se condições subjetivas de conforto térmico para cada habitante, considerando as condições fisiológicas, vestimentas, idade, sexo e condições psicológicas, além das características da habitação, como o tipo de atividades desenvolvidas no interior do imóvel, quantidade de mobília e número de ocupantes (CBIC, 2013).

Devido ao conceito de conforto térmico apresentar características subjetivas, foram desenvolvidos modelos baseados nos índices de conforto térmico, onde busca-se a caracterização do conforto térmico a partir das variáveis ambientais somados ao nível de satisfação dos usuários (FROTA; SCHIFFER, 2006). Os índices de conforto térmico abrangem índices biofísicos, fisiológicos e subjetivos (baseado nas sensações dos usuários). Dentre os principais modelos desenvolvidos para averiguar o conforto térmico tem-se o Modelo Estático e o Modelo Adaptativo.

O Modelo Estático, desenvolvido por Ole Fanger (1970), baseia-se no *Predicted Mean Vote* ou PMV (Voto Médio Predito), que prevê um valor médio de sensação térmica de um número significativo de pessoas para determinadas condições de ambientais. O método considera particularidades como a idade, sexo e nacionalidade.

A escala utilizada para o cálculo do PMV representa as sensações térmicas das pessoas, podendo ser obtido pela Equação (1). O valor produzido é traduzido pela escala de 7 pontos, sendo o conforto térmico é representado pelo número zero, o frio é indicado pelos

números negativos (-1 a -3) e o calor pelos números positivos (1 a 3). Conforme a Norma ISO 7730 (2005), são aceitáveis os valores de PMV de -0,5 a +0,5.

$$PMV = (0,303e^{-0,036Ma} + 0,028).L \quad (1)$$

Em que:

- PMV = Voto médio estimado, ou voto de sensação de conforto
- Ma = Atividade desempenhada pelo indivíduo
- L = Carga térmica atuante sobre o corpo

O Modelo Estático introduz, ainda, o parâmetro do *Predicted Percentage of Dissatisfied* ou PPD (Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas) por considerar impossível que todos os ocupantes de um ambiente se sintam termicamente confortáveis ao mesmo tempo. Deste modo o PPD apresentará uma porcentagem da população analisada que não se sente confortável na temperatura ambiente. Ambos PMV e PPD englobam diversas variáveis, como taxa metabólica, trabalho mecânico, resistência térmica das roupas, entre outras, e determinam categorias (A, B e C) de conforto térmico para o local.

O Modelo Adaptativo, desenvolvido a partir do conceito de Temperatura Neutra de Humphreys (1975, *apud* LAMBERTS, 2011) é utilizado pela norma americana ASHRAE Standart 55 (2010). Ele se difere do método de Fanger por considerar o fator de aclimatização das pessoas frente a determinado ambiente, relacionando a temperatura de conforto térmico com a temperatura média do local em estudo. Este modelo considera que em situações de desconforto térmico as pessoas tendem a reagir de maneira a restaurar o conforto através de ajustes comportamentais, fisiológicos e psicológicos. A Equação (2) apresenta o cálculo da temperatura neutra.

$$Tn = 2,6 + (0,831.Tm) \quad (2)$$

Em que:

- Tn = Temperatura neutra em °C
- Tm = Temperatura média do ar em °C (no período em análise)

Neste contexto, destaca-se o conceito de neutralidade térmica, que difere do conceito de conforto térmico (FANGER, 1970). Para o autor, a neutralidade térmica é a condição na qual a pessoa não prefira nem mais calor nem mais frio no ambiente ao seu redor. Fisicamente, representa a condição no qual todo calor gerado pelo organismo é trocado na mesma proporção com o ambiente ao redor, não havendo perda ou acúmulo de calor.

Entretanto, esta definição não considera a interferência de desconfortos localizados por assimetria de radiação, diferença na temperatura do ar no sentido vertical e correntes de ar,

possibilitando que o indivíduo não se sinta confortável, mesmo em temperatura adequada (FANGER, 1970). Portanto, a neutralidade térmica não necessariamente representa um estado de conforto térmico, mas representa uma condição para se alcançar o conforto térmico.

Um dos mecanismos para proporcionar conforto térmico passa pela adequação do projeto arquitetônico a necessidade térmica da sua localidade (GRAÇA; KOWALTOWSKI, 2004) necessitando-se, portanto, de uma metodologia de avaliação de projeto com base na otimização de parâmetros de conforto ambiental em escolas, o que é previsto pela norma brasileira de desempenho térmico de edificações NBR 15220-3 (ABNT, 2003).

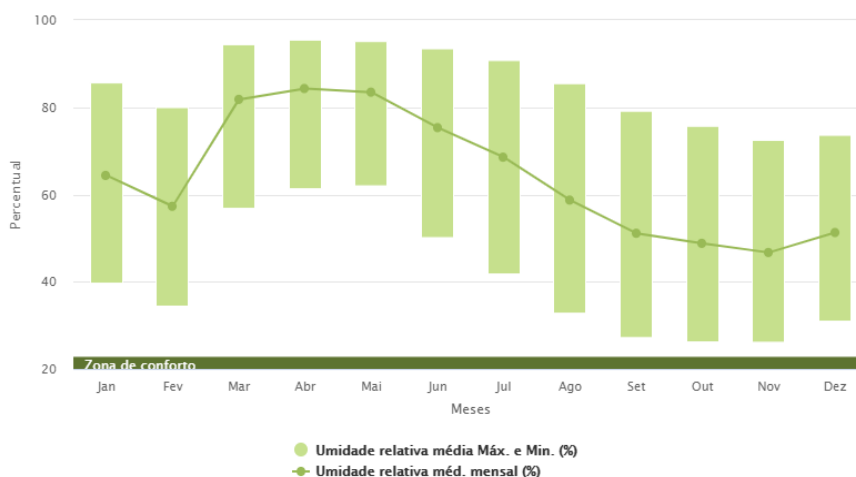
A NBR 15220-3 (ABNT, 2003) apresenta estratégias de condicionamento térmico com a finalidade de amenizar o desconforto térmico, conforme detalhado a seguir.

2.2 Clima do semiárido

Conforme a Secretária de Políticas de Desenvolvimento Regional (2005), a região do semiárido nordestino engloba uma área de 974.752 km² na região do nordeste, apresentando chuvas irregulares e escassas, com grande potencial torrencial, devido ao fato de se concentrarem em curtos períodos estacionários, durando de 3 a 5 meses. O predomínio da vegetação é a caatinga, salve às áreas de serras cujo possuem microclima específico devido a elevada altitude.

O clima semiárido é marcado pelas altas temperaturas e a baixa umidade relativa do ar, definindo o clima como seco. Registra-se a menor ocorrência de temperaturas extremas (mínimas e máximas) durante a quadra chuvosa, devido à grande diferenciação que o grau de umidade relativa do ar acarreta nas condições climáticas de um local. A Figura 1 apresenta as variações mensais da umidade para a cidade de Crateús-CE.

Figura 1 - Gráfico da umidade relativa do ar mensal em Crateús



Fonte: PROJETEER (2016). Disponível em: <<http://projeteer.mma.gov.br/sobre-o-projeteer>>

Os maiores valores de umidade são registrados nos meses entre março e julho, meses pertencentes a quadra chuvosa. Nota-se que a menor variação da umidade também ocorre nesse período. Assim, a maior variação da umidade ocorre nos meses mais secos, com destaque para os meses de outubro a dezembro, além de fevereiro, o que impacta diretamente na temperatura ambiente e na sensação térmica dos habitantes.

As partículas de água dispersas no ar são capazes de absorver o calor proveniente da radiação solar, resultando no aumento da temperatura. As áreas litorâneas apresentam uma menor variação de temperatura quando comparada com áreas do sertão, devido a umidade constante advinda do mar, cujo mantém parte do calor retida nas partículas de água durante a noite. No sertão, devido à baixa umidade, o calor tende a se dissipar mais rapidamente durante a noite.

Nesse sentido, um solo em clima mais seco recebe mais radiação solar direta que em um clima mais úmido (FROTA; SCHIFFER, 2001). À noite, a temperatura do ar é mais baixa do que a do solo, e este, então, tenderá a entrar em equilíbrio térmico dissipando o calor armazenado durante o dia. Se o ar for úmido, aquelas partículas de água em suspensão que de dia armazenaram calor vão também devolver ao ar o calor retido, além de dificultar a dissipação do calor do solo.

Ainda, Frota e Shiffer (2001) afirmam que em um clima quente seco, o solo pode perder, à noite, esse calor armazenado durante o dia com muito mais facilidade, pois não terá muitas partículas de água em suspensão agindo como barreira térmica. Do mesmo modo, o calor adicional transmitido por essas partículas de água no período noturno também não será significativo. Isto vai tornar, em climas secos, a temperatura diurna bastante afastada da

noturna, ou seja, com uma grande amplitude térmica.

Deste modo, as habitações pertencentes a climas secos devem possuir particularidades quanto ao tratamento das variantes climáticas. Em períodos de alta umidade, como na quadra chuvosa, a estimulação da circulação do ar seria proveitosa, já que a renovação do ar interno da residência iria remover as partículas de água aquecidas.

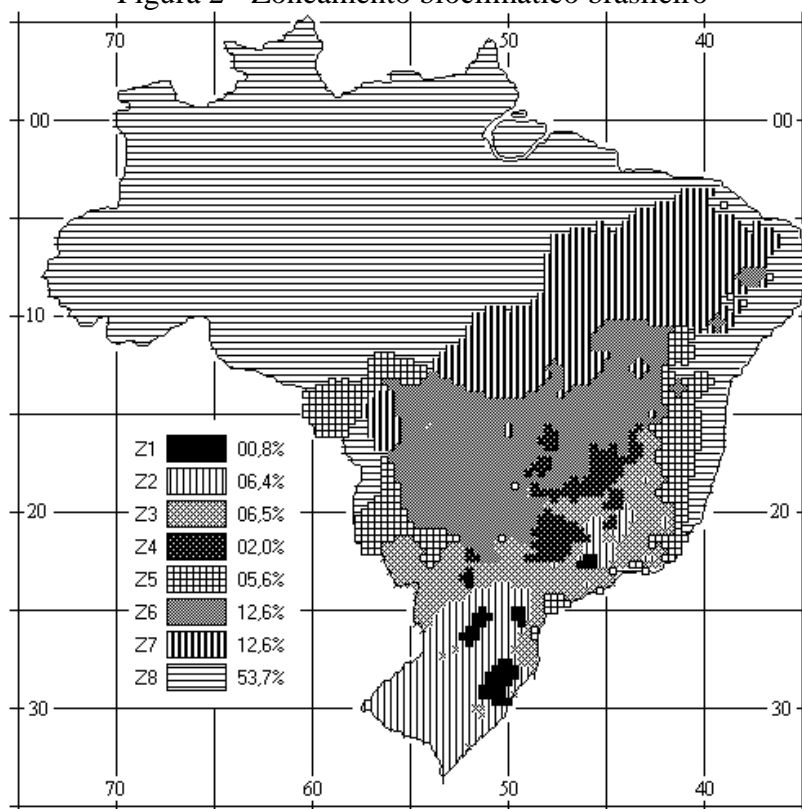
Entretanto, nos períodos mais secos, parte significativa do ano, a ventilação não seria desejada pois o vento externo estaria, mais frio (durante a noite) ou mais quente (durante o dia) que a temperatura do ar interno, gerando desconfortos aos moradores.

2.3 Análise do Desempenho térmico de edificações

O desempenho térmico é um dos parâmetros utilizados por normas, especialmente a ABNT NBR 15.575 e ABNT NBR 15.220, para avaliar e regulamentar as edificações, de modo a garantir um padrão mínimo de qualidade (SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2014). Ainda, a adequação de um projeto às particularidades típicas da sua realidade climática proporciona conforto para todos os residentes (RIBEIRO, 2018).

Conforme a ABNT NBR 15.220-3 (2003), a residência deve reunir características que atendam às exigências para desempenho térmico de acordo com oito zonas bioclimáticas (Figura 2), classificadas de acordo com as características climáticas de cada região. A região de estudo, semiárido, está representado na Zona Bioclimática 7.

Figura 2 - Zoneamento bioclimático brasileiro



Fonte: ABNT NBR 15220-3 (2003, p.3).

A NBR 15.575 (ABTN, 2013) apresenta dois procedimentos para determinação do desempenho térmico: Simplificado (normativo) e Medição (informativo). O procedimento 1 – Simplificado (normativo), engloba os requisitos e critérios para os sistemas de vedação e coberturas, normatizados pela NBR 15.575-4 (ABNT, 2013) e NBR 15.575-5 (ABNT, 2013). Caso a edificação apresente desempenho térmico insatisfatório é necessário realizar a simulação computacional de toda a edificação. Já o procedimento 2 – Medição (informativo), trata de medições em campo, sendo seus resultados considerados somente como caráter informativo.

Este trabalho busca verificar as edificações escolhidas através do procedimento 1 com verificação pelo método de simulação computacional para todos os casos, mesmos para os objetos que apresentem desempenho térmico acima do mínimo. A simulação computacional, descrito no item 11.2 da NBR 15.575-1 (ABNT, 2013), prescreve o uso dos dados climáticos da cidade correspondendo aos dias típicos de projeto de verão e de inverno.

A seguir, apresenta-se os critérios definidos pela norma de desempenho, assim como os métodos utilizados para análise e os estudos desenvolvidos na área.

2.3.1 Critérios de desempenho térmico

A norma de desempenho, NBR 15.575-1 (ABNT, 2013), apresenta as especificações quantitativas dos requisitos de desempenho de uma edificação e seus sistemas, tendo como base as exigências do usuário, independentemente da forma ou dos materiais constituintes na habitação. A norma prevê três níveis de desempenho; mínimo (*M*), intermediário (*I*) e superior (*S*), sendo necessária a simulação computacional para averiguação dos níveis intermediário e superior.

O Anexo E da norma NBR 15.575-1 (ABNT, 2013) apresenta os valores de temperatura como critério para caracterização do desempenho térmico. É estudado o valor máximo e mínimo diário da temperatura do ar da residência, sem a interferência de fontes internas de calor (lâmpadas e eletrodomésticos em geral).

Os critérios de avaliação se alteram conforme a zona bioclimática onde se localiza a edificação, conforme apresentado na Tabela 1, de acordo com a ABNT NBR 15.220-3.

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	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^\circ \text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 1^\circ \text{C})$
S	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4^\circ \text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^\circ \text{C})$ $T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 1^\circ \text{C})$

Legenda:

$T_{i,max}$ 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;

Fonte: Norma ABNT NBR 15.575-1 (2013, p. 52).

Conforme a norma de desempenho, não é necessário realizar a avaliação do desempenho térmico para condições de inverno nas zonas bioclimáticas 6, 7 e 8.

Para determinação do desempenho térmico faz-se uso dos parâmetros de medição, cujo retratam as características térmicas dos materiais empregados na edificação. Os principais parâmetros são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Parâmetros do desempenho térmico

Característica térmica	Definição	Símbolo	Unidade
Resistência térmica total	É o somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais interna e externa	R_T	$\frac{m^2K}{W}$
Transmitância térmica	É o inverso da Resistência Térmica, representando a quantidade de calor por segundo que atravessa um metro quadrado de um dado objeto.	U	$\frac{W}{m^2K}$
Capacidade térmica	Quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema.	CT	$\frac{kJ}{m^2K}$
Absortância térmica solar	Quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície.	α	-
Atraso térmico	Tempo necessário para que uma diferença térmica ocorrida em uma face da parede ou cobertura se manifesta na face oposta.	φ	horas
Fator solar	Representa a fração de ganho térmico devido à radiação solar que uma superfície transmite para o interior da edificação.	FS _o	%
Abertura de ventilação	É a área de abertura das esquadrias (A_A) dos ambientes de longa permanência (dormitórios e sala de estar), descontado a interferência dos perfis, dividida pela Área de Piso (A_P) em porcentagem. [$A = \frac{A_A}{A_P}$].	A	%

Fonte: Norma ABNT NBR 15.220-1 (2003).

Uma vez que o estudo propõe a avaliação do desempenho térmico de uma habitação de interesse social da cidade de Crateús, deve-se analisá-las pelo método simplificado e computacional. Vale ressaltar que o método de análise computacional será realizada mesmo que a HIS atenda os critérios de desempenho térmico da NBR 15.575. A seguir apresentam-se os métodos a serem utilizados.

2.3.2 Método simplificado da NBR 15.575

A norma de desempenho NBR 15.575 (ABNT, 2013) apresenta o método simplificado de análise de desempenho térmico especificando critérios para os sistemas de vedação e cobertura, como detalhados a seguir.

2.3.2.1 Sistema de Vedação Verticais Internas e Externas (SVVIE)

O item 11 da NBR 15.575-4 (ABNT, 2013) estabelece os critérios de desempenho térmico para os sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE), segundo os valores máximos obtidos para a transmitância térmica (U) e absorvância (α^a) de paredes externas (Tabela 2).

Tabela 2 - Transmitância térmica e absorvância de paredes externas

Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 8	
$U \leq 2,5$	$\alpha^a \leq 0,6$	$\alpha^a > 0,6$
	$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$

Legenda:

U é a transmitância térmica em W/m^2K

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

Fonte: Norma ABNT NBR 15.575-4 (2013).

Ainda no sistema SVVIE, a norma apresenta os valores mínimos admissíveis para a capacidade térmica, conforme tabela 3.

Tabela 3 - Capacidade térmica de paredes externas

Zona	8	1 a 7
Capacidade térmica (CT) em $\frac{kJ}{m^2K}$	Sem exigência	≥ 130

Fonte: Norma ABNT NBR 15.575-4 (2013).

A norma de desempenho também apresenta requisitos para as aberturas de ventilação, sendo empregado apenas nos ambientes de longa permanência, como salas, cozinhas e dormitórios. Cabe ressaltar que as aberturas para ventilação devem atender à legislação específica do local da obra, e na ausência desses documentos, devem ser adotados os valores estabelecidos na Tabela 4.

Tabela 4 - 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) $A \geq 8\%$ da área de piso (Região Nordeste e Sudeste)

Nota: Nas zonas de 1 a 6 as áreas de ventilação devem ser passíveis de serem vedadas durante o período de frio
Fonte: Norma ABNT NBR 15.575-4 (2013)

O método de avaliação consiste na determinação da relação entre as áreas das aberturas de ventilação (A_A) e a área do piso (A_P), conforme a Equação (3).

$$A = 100 \cdot \frac{A_A}{A_P} (\%) \quad (3)$$

2.3.2.2 Sistema de cobertura

A norma NBR 15575-5 (ABNT, 2013) apresenta os critérios de desempenho térmico para as coberturas das edificações. As características térmicas relevantes na análise são a transmitância térmica e a absorvância à radiação solar. A Tabela 5 apresenta os valores de desempenho mínimo para estas grandezas. Para o município de Crateús devem constar os valores atribuídos a zona bioclimática 7.

Tabela 5 - Transmitância térmica e absorvância de coberturas

Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8	
$U \leq 2,30$	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$
	$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$	$U \leq 2,3 FV$	$U \leq 1,5 FV$

Legenda:

U é a transmitância térmica em W/m^2K

α^a é a absorvância à radiação solar da superfície externa do elemento

FV é o fator de ventilação estabelecido na NBR 15.220-2 (ABNT, 2003)

Fonte: Norma ABNT NBR 15.575-5 (2013).

2.3.3 Simulação computacional com o Energy Plus

A simulação da edificação torna possível entender o comportamento térmico da mesma ainda em fase de projeto, identificando pontos críticos e possibilitando alterações em projetos a um custo inferior, quando comparado a projetos já em execução. Em edificações já executadas, além de servir como um método de classificação, a simulação pode auxiliar em estratégias que visem o conforto térmico.

O procedimento normativo de avaliação de desempenho térmico da NBR 15.575 (ABNT, 2013) faz menção direta ao *software Energy Plus* para averiguação dos níveis de desempenho intermediário e superior. O *software Energy Plus* é um programa computacional de simulação de energia em edifícios desenvolvido Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) por meio da fusão dos softwares BLAST, capaz de comparar sequências significativas de dados, e DOE-2, realiza simulação termoenergética de edificações (ENERGYPLUS, 2013).

Através da modelagem, o programa possibilita quantificar o consumo de energia gerado pelo sistema HVAC (aquecimento, resfriamento, ventilação e consumo de água). O programa integra diversos módulos possibilitando avaliação do edifício em diferentes

condições ambientais e operacionais (MELO; WESTPHAL; MATOS, 2009). Contudo, para análise do desempenho térmico pelos critérios da norma ABNT NBR 15.575, não foi simulado o uso de aparelhos de refrigeração. Atendo os resultados apenas para os valores de temperatura interna dos ambientes para o ano climático de referência (2018).

Os arquivos climáticos foram obtidos do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), cujo adapta os dados produzidos pelo INMET, realizando o tratamento dos dados e convertendo-os ao software EnergyPlus. São utilizados oito variáveis principais; Temperatura do ar, umidade relativa, temperatura do ponto de orvalho, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, pluviosidade e irradiância global sobre o plano horizontal.

Para auxiliar e facilitar o processo de modelagem, pode-se utilizar o *software Sketchup* para exportação da geometria da residência, já que a interface do *EnergyPlus* é complexa e permite a importação de arquivos dessa plataforma através do *plug-in Euclid*.

O software possui ainda capacidade de simulação diferenciada, como o *time-step* (intervalo de tempo) de cálculo menor que uma hora, que torna a execução dos cálculos mais rápida. Além disto, os arquivos de entrada e saída incluem condições ambientais horárias e apresenta recursos de solução integrada e simultânea das condições da zona térmica e da resposta do sistema HVAC.

Neste estudo o processo de simulação computacional será desenvolvido no *software EnergyPlus* devido as características citadas. Assim, a inserção da habitação ao *EnergyPlus* ocorre através da modelagem via *Sketchup*, o *plug-in Euclid* será o mecanismo de exportação das coordenadas do projeto entre os programas. No *EnergyPlus* será inserido os materiais e as características térmicas ambientais.

2.4 Estudos sobre conforto térmico em edificações

A preocupação acerca do conforto térmico em residências vem se tornando cada vez mais preeminente no Brasil, sobretudo para habitações para a população de baixa renda. Visto que o país possui grandes dimensões e diversos regimes climáticos, diversos estudos vêm sendo feitos para analisar o comportamento térmico das HIS em diferentes zonas bioclimáticas.

Destaca-se a importância do atendimento dos projetos residenciais aos critérios da norma de desempenho NBR 15575 (ANBT, 2013) para amenização de desconfortos térmicos.

Neste sentido, Barbosa *et al.* (2016) analisaram o desempenho térmico para duas HIS, ambas localizadas em Alagoas, zona bioclimática 8, sendo uma situada próxima ao litoral e a outra no sertão do estado. As variáveis climáticas do litoral e do sertão foram representadas através dos dados climáticos utilizados no software EnergyPlus. Estas habitações estavam em

desacordo com a NBR 15575 (ANBT, 2013), sendo necessário desenvolver um modelo adaptado, vigente aos critérios da norma, para realizar um comparativo de desempenho térmico. Assim, verificou-se reduções no somatório de graus-hora de resfriamento (GHR) de 16% na HIS situada no sertão e acima de 60% na HIS situada no litoral.

Bosa (2017) atribuiu a perda de desempenho térmico das HIS e a geração de desconforto dos moradores à padronização de projetos. Para o autor, replicam-se projetos sem os devidos cuidados de adaptação a realidade climática dos locais. Seu estudo consistiu na análise de seis unidades habitacionais vinculadas ao Programa Minha Casa Minha Vida, fazendo comparativo entre o desempenho das habitações após modificações simples na escolha de materiais, cor, aberturas e sombreamento. Verificou-se que as residências poderiam ter seu desempenho melhorado em 51% do seu estado inicial.

Grigoletti e Linck (2014) analisaram o desempenho térmico de cinco tipos de HIS na zona bioclimática 2, na cidade de Santa Maria – RS. O estudo baseou-se na norma NBR 15220 (ABNT, 2005) e no levantamento da opinião dos usuários, tendo-se averiguado o baixo desempenho térmico da edificação quanto ao clima e maior insatisfação dos moradores durante a estação de verão.

Dorfler e Kruger (2016) analisaram o desempenho térmico de uma HIS para quatro zonas bioclimáticas (ZB1, ZB3, ZB7 e ZB8). Na zona bioclimática 7, a cidade em análise é Picos (PI). Segundo os autores, a estratégia mais eficiente para redução na demanda por resfriamento seria o acréscimo na espessura do revestimento externo das paredes externas da residência que possibilitou melhora de 10% da demanda de resfriamento. Destaca-se que outras interferências construtivas não geraram valores significativos de redução. Ainda, o estudo excluiu as simulações de ventilação natural, uma vez que uma inadequada implantação do conjunto habitacional poderia gerar impacto significativo na disponibilidade de movimentos de ar para a ventilação interna, e até mesmo piorar o desempenho térmico da habitação, visto que a região apresenta baixa umidade de ar nos períodos mais quentes do ano.

Outro fator complacente no desempenho térmico de habitações é a coloração das superfícies externas. Castro (2003), através de análise espectral de cores de tintas, observou que os efeitos de ganho de calor solar são maiores nas cores escuras por apresentarem refletância menor dos que as cores mais claras. Assim, em situações onde há necessidade de dissipar energia, deve-se evitar cores de tonalidade escura na fachada.

Arantes (2013) analisou conjuntos habitacionais na cidade de Bauru (SP), hemisfério sul e verificou, por meio de simulação computacional, que a prática construtiva de conjuntos habitacionais de padrão único de moradia localizados em terrenos com fachadas

voltadas à diferentes orientações solares resulta em más condições de habitabilidade e conforto térmico. Constatou-se que as habitações orientadas para o sul apresentam melhores condições térmicas, atribuindo-se a este resultado, o fato que essa orientação promove menor insolação solar na residência e incidência solar nula nas janelas dos dormitórios.

A orientação das residências perante a radiação solar representa um fator determinante no modo como a edificação reagirá, podendo sofrer efeito estufa (aquecimento) ou dissipar a energia. Para as habitações localizadas próximas ao equador, como as residências em estudo, planeja-se que os ambientes de longa permanência (como dormitórios, salas e cozinhas) recebam menor incidência solar, principalmente durante o período da tarde. Em casos onde este planejamento não seja aplicável, recorre-se as estratégias de sombreamento e ventilação.

2.5 Estratégias de condicionamento térmico passivo

A busca para alcançar o conforto térmico em edificações, sem uso de sistemas artificiais (estratégias de condicionamento térmico ativo), exige que o projetista realize a análise bioclimática da edificação, englobando parâmetros essenciais como a geometria e os materiais construtivos utilizados na residência, além da região onde se localiza o edifício.

A NBR 15.220-3 (ABNT, 2003) apresenta as estratégias de condicionamento térmico para habitações unifamiliares de interesse social com até três pavimentos. A região de interesse está situada na zona bioclimática 7. O Quadro 2 apresenta as recomendações construtivas de condicionamento térmico passivo conforme a norma.

Quadro 2 - Estratégias de condicionamento térmico passivo para a zona bioclimática 7

Sistema	Estratégia	Efeito esperado
Abertura de ventilação	Menor tamanho das aberturas de ventilação e maior uso de sombreamento	Proporcionar a ventilação seletiva nos períodos quentes, onde a temperatura interna seja superior à externa
Vedações externas (coberturas e paredes)	Uso de materiais de maior massa térmica (pesados)	O calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite, quando as temperaturas externas diminuem

Fonte: ABNT NBR 15.220-3 (2003).

As aberturas de ventilação, conforme o Quadro 2 são caracterizadas como pequenas, devendo possuir área de abertura entre 10% e 15% da área do piso do ambiente (A). A massa térmica relaciona-se com a inércia térmica, onde representa a capacidade de absorver calor.

O resfriamento evaporativo, também é reconhecido pela norma como uma

estratégia de condicionamento térmico passivo. Entretanto, essa alternativa não foi adotada neste trabalho, visto que, além do acréscimo financeiro ao projeto, também faz-se necessário prever fontes de umidade contínua para a residência, o que não se aplica à região do estudo.

A cerca dos materiais, deve-se levar em consideração as propriedades térmicas relativas a transmitância térmica (U), atraso térmico (φ) e o fator solar (FS_0). A Tabela 6 apresenta os valores adequados para a zona bioclimática da região.

Tabela 6 - Propriedades térmicas dos materiais recomendados para a ZB7

Sistema	Tipo	Transmitância térmica ($\frac{W}{m^2.K}$)	Atraso térmico (horas)	Fator solar (%)
Vedações externas	Pesada	$U \leq 2,20$	$\varphi \geq 6,5$	$FS_0 \leq 3,5$
Coberturas	Pesada	$U \leq 2,00$	$\varphi \geq 6,5$	$FS_0 \leq 6,5$

Fonte: ABNT NBR 15.220-3 (2003).

A tipologia aplicada sobre os sistemas da habitação (vedações e coberturas) relaciona-se com a intensidade da inércia térmica. Um elemento é classificado como ‘pesada’ quando possui uma alta inércia térmica, cujo resulta em materiais de significativa densidade e com boa absorção de energia.

A inércia térmica representa a tendência do material de resistir a mudanças de temperaturas. Por conta disto, o uso de materiais com alta inércia térmica (como o concreto e as cerâmicas) tendem a proporcionar uma diminuição das amplitudes térmicas internas de uma habitação. Este recurso é particularmente benéfico para as regiões de clima seco, onde há grande diferença entre as temperaturas diurnas e noturnas (PROJETEEE, 2019).

Para a zona bioclimática 7, estes elementos pesados trabalham absorvendo energia térmica durante o dia e liberando-a quando houver queda da temperatura, possibilitando a manutenção da temperatura da habitação, através do resfriamento. É comum que estes elementos possuam espessuras grandes, conferindo maior absorção e menos propagação de energia para o interior da residência.

Recomenda-se que os valores de atraso térmico sejam maiores para as edificações localizadas em climas quentes e secos, devido às altas temperaturas, como ocorre na zona bioclimática 7. Para os valores de transmitância térmica e fator solar, recomenda-se trabalhar com materiais que auxiliem na redução dos valores destes parâmetros, por estes estarem relacionados com ganhos térmicos na habitação.

A ventilação natural, pode se tornar um instrumento de melhora do conforto ambiental da residência quando utilizada corretamente e em períodos termicamente favoráveis, como na quadra chuvosa, permitindo a renovação da umidade e de alternância de massas de ar,

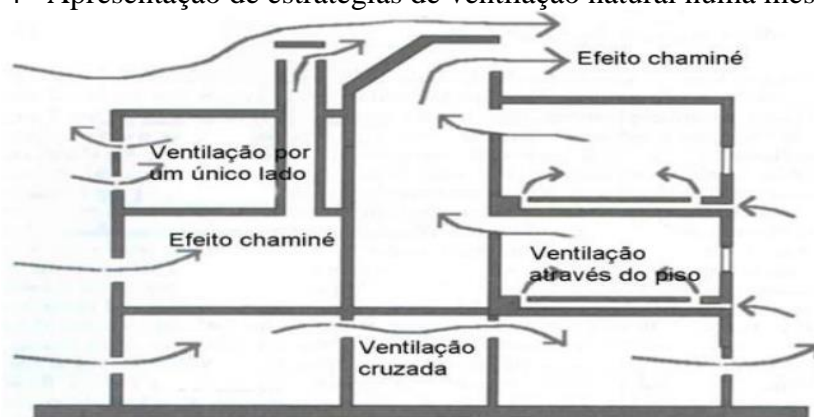
climática do município de Viçosa (MG), onde há a existência de duas estações climáticas bem definidas. Como resultado, verificaram que no edifício com fachada dupla, a oscilação de temperatura foi inferior ao modelo de residência sem fachada dupla, tanto para os casos de dias de verão quanto para os caso de dias de inverno.

Entretanto, ainda há poucos estudos quando a aplicação do dispositivo de fachadas duplas em outras realidades climáticas, como no semiárido. Também, os recursos financeiros para implementação desse sistema podem deixar o projeto oneroso, o que vai na contramão do proposto por este trabalho.

É válido salientar que os mecanismos de resfriamento passivo da residência devem atuar de modo integrado. É possível obter um aumento de até 91% na vazão volumétrica da chaminé, quando comparado os casos de residências localizadas em ambientes com ventos e de ambientes com ventilação baixa ou nula (NEVES; RONIS, 2012).

A ventilação natural na residência é dita unilateral quando a circulação do ar se dá através de aberturas situadas em um mesmo lado de um ambiente, passando a ser ventilação cruzada quando a circulação do ar se dá por aberturas em lados opostos de um ambiente. A circulação de ar promove a renovação do ar, propiciando trocas térmicas e redução da temperatura interna da edificação. A Figura 4 apresenta o esquema de ventilação natural numa mesma edificação.

Figura 4 - Apresentação de estratégias de ventilação natural numa mesma edificação



Fonte: Lamberts e Triana (apud GHIAUS, ROULET 2005, p.146)

Souza e Rodrigues (2012) utilizaram o método dos elementos finitos para comparar o desempenho na distribuição de temperatura e fluxos de ar entre os sistemas de ventilação cruzada e unilateral, averiguando a eficiência da ventilação cruzada em cerca de 3,5 vezes superior a eficiência da ventilação unilateral. Como estratégia de melhoria do conforto térmico, pode-se optar por uso de esquadrias em faces opostas de ambientes termicamente

desconfortáveis.

Além disto, a promoção da ventilação cruzada auxilia na regulação da temperatura das dependências da edificação durante os períodos quentes e menos quentes da zona bioclimática 7, devido ao uso de mais de uma esquadria de ventilação. Em virtude da ventilação piorar a situação da habitação nos períodos quentes, onde há predomínio de massas de ar secas, pode-se limitar a ventilação uma das esquadrias, tornando a ventilação unilateral. Já nos períodos da quadra chuvosa, pode-se fomentar a ventilação cruzada devido a melhora da umidade.

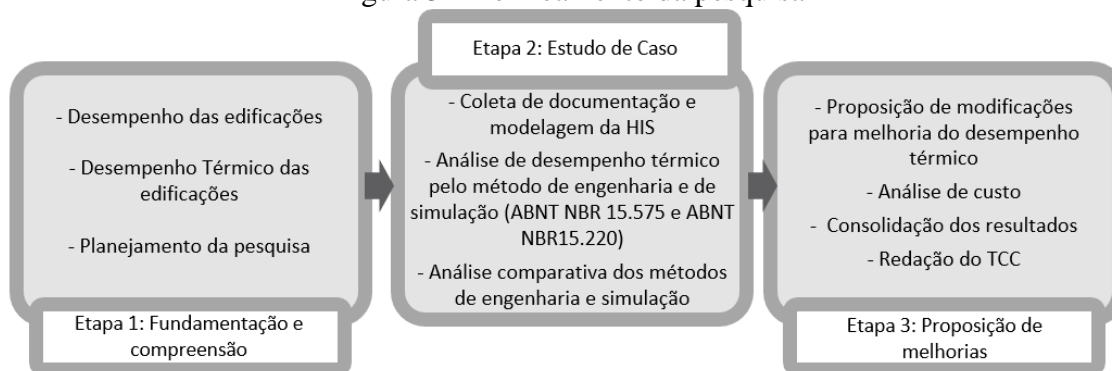
3 MÉTODO DE PESQUISA

Esta seção apresenta o método de pesquisa, onde são detalhados os procedimentos adotados para realização dos estudos, desde o planejamento das atividades – envolvendo o levantamento de informações teóricas, relativas aos estudos realizados na área, à coleta de dados e simulações realizadas.

3.1 Delineamento da pesquisa

A pesquisa foi dividida em três etapas, conforme a Figura 5, detalhadas a seguir.

Figura 5 - Delineamento da pesquisa



Fonte: Autor

A pesquisa foi realizada por meio de um estudo de caso (YIN, 2010) de natureza exploratória e descritiva (COLLIS; HUSSEY, 2005). Isto significa que a pesquisa não tem a intenção de realizar generalizações estatísticas, mas apresentar um fenômeno em detalhes que permita entender o fenômeno em outras realidades, principalmente por possuir pouco ou nenhum conhecimento sobre este (natureza exploratória) (COOPER; SCHINDLER, 2016).

Tomou-se uma Habitação de Interesse Social (HIS) – implantado no âmbito do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) do governo Federal, da cidade de Crateús-CE, devido ao contexto climático do município se assemelhar a realidade climática das demais cidades do semiárido nordestino e pelo PMCMV ter construído mais de 600 mil habitações somente no nordeste brasileiro sendo, portanto, representativo.

Vale salientar que o Crateús contempla um dos 330 municípios utilizados como amostra para caracterização das zonas bioclimáticas. No Anexo A da ABNT NBR 15.220 a cidade de Crateús é classificada na Zona Bioclimática 7, havendo recomendações de condicionamento térmico para as edificações da cidade.

O estudo de caso se deu através da modelagem do projeto (para extração de quantitativos e elaboração de orçamento), bem como para extrair as áreas necessárias à

verificação do desempenho térmico, conforme o método da ABNT NBR 15.220 (2003) e pelo método computacional, utilizado para a extração de dados relativos a temperatura do ar nos ambientes da edificação.

Na última etapa desenvolveu-se propostas de modificação de baixo custo para os projetos apresentados de modo a melhorar o conforto térmico. Assim, além da modelagem do projeto e verificação do desempenho térmico, foram analisados os custos buscando relacionar o custo com a melhoria do desempenho térmico durante os períodos termicamente mais desfavoráveis do ano.

3.2 Caracterização da HIS

Nesta seção o projeto residencial analisado é apresentado, enfatizando-se a sua geometria e os materiais utilizados na construção. A partir da apresentação destes parâmetros a habitação foi submetida a análise do desempenho térmico.

Com a pretensão de representa as residências de padrão popular da região, optou-se pelo modelo de HIS, vinculado ao programa Minha Casa Minha Vida do Governo Federal. Assim, tomou-se uma habitação pertence ao conjunto Residencial Dom Fragoso I e II, localizado no bairro 'Cidade 2000' em Crateús. O conjunto conta com 620 casas com um investimento de R\$ 39,13 milhões, sendo R\$ 2,55 milhões de contrapartida do Estado.

A Figura 7 apresenta uma visão da localização do projeto às margens da CE-189.

Figura 6 - Localização do Residencial Dom Fragoso I e II



Fonte: Google Earth.

O projeto consiste em casas geminadas com 2 quartos, 1 banheiro, sala de

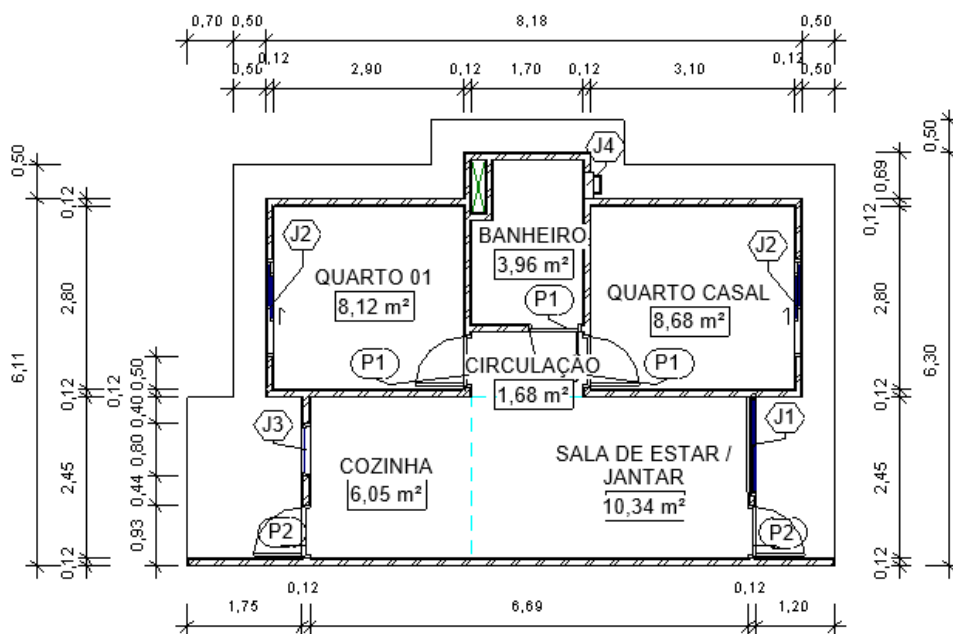
estar/jantar e uma pequena área de circulação, cuja Figura 7 apresenta uma foto unidade conjugada e a Figura 8 a sua planta baixa.

Figura 7 - Habitações do programa Minha Casa Minha Vida em Crateús



Fonte: O Autor.

Figura 8 - Planta baixa da HIS



Fonte: O autor

Note-se que a Figura 8 apresenta apenas uma unidade padrão do conjunto habitacional, onde a parede inferior (lado sul) é compartilhada entre as duas residências. No processo de análise de desempenho térmico considerou-se a parede geminada entre as residências como uma estrutura de sombreamento.

O Quadro 3 apresenta o quadro de esquadrias da HIS.

Quadro 3 - Esquadrias utilizadas na HIS

Cód	TIPO	Folhas por esq.	Abertura			Material		Qtde
			Larg.	Altura	Peitoril	Tipo	Forramento	
PORTAS								
P1	De abrir	01	0,80 m	2,10 m	-	Paraná	Madeira	03
P2	De abrir	01	0,80 m	2,10 m	-	Veneziana	Alumínio	02
JANELAS								
J1	De correr	02	1,45 m	1,40 m	0,70 m	Vidro e gradil	Alumínio	01
J2	De correr	02	1,50 m	1,00 m	1,10 m	Vidro e gradil	Alumínio	02
J3	Maximar	01	0,80 m	0,40 m	0,90 m	Vidro (4mm)	Alumínio	01
J4	Basculante	01	0,40 m	0,40 m	1,70 m	Vidro (4mm)	Alumínio	01

Fonte: documentação fornecida.

Cabe salientar que o *Energy Plus* desconsidera as aberturas de portas no processo de simulação térmica.

A edificação foi construída em concreto armado com paredes de 12 cm de largura, e revestimento de 1,5 cm em cada face das alvenarias, não havendo distinção entre as paredes internas e externas. O Quadro 4 apresenta os materiais utilizados, cujo propriedades influem no desempenho térmico da edificação.

Quadro 4 - Materiais construtivos da residência

Alvenarias	Ambiente	Descrição
Chapisco	Todas as alvenarias	Argamassa de cimento e areia no traço 1:3
Emboço	Todas as alvenarias	Argamassa de cimento e areia no traço 1:4
Reboco	Todas as alvenarias	Argamassa de cimento e areia no traço 1:6
Cerâmica	Banheiro, cozinha e área de serviço (até 1,50 m)	Cerâmica esmaltada branca 46x46 cm, PEI \geq 4
Pintura	Todas as alvenarias sem revestimento cerâmico	Pintura texturizada acrílica
Forro	Ambiente	Descrição
Forro	Todas as dependências	Material de PVC
Pisos	Ambiente	Descrição
Cerâmica	Todas as dependências	Cerâmica esmaltada branca 46x46 cm, PEI \geq 4

Fonte: O Autor, a partir da documentação fornecida.

3.3 Procedimentos para análise de desempenho térmico

Os procedimentos de análise de desempenho térmico para o método simplificado da ABNT NBR 15.220 (2003) e de simulação são detalhados a seguir.

3.3.1 Método simplificado

O método de análise do desempenho térmico é apresentado pela ABNT NBR 15.220-2 (2003) – Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica e do fator solar de elementos e componentes de edificações. A norma ABNT NBR 15.575-4 – Desempenho Parte 4: Sistemas de vedações

verticais internas e externas (SVVIE), contribui com especificações de requisitos e critérios de desempenho.

Foram realizados todos os procedimentos para a averiguação de desempenho térmico para os materiais de construção dos sistemas de vedações, cobertura e aberturas de ventilação da HIS, como detalhado na seção 4.1.

3.3.2 Método por simulação computacional

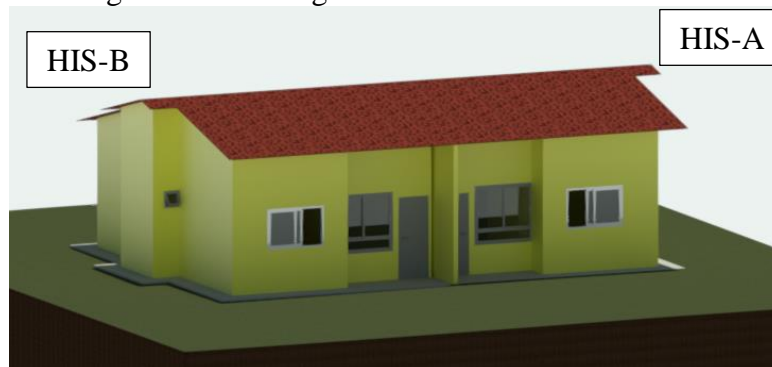
A análise de desempenho térmico ocorreu mediante o *software* Energy Plus. Considerou-se a ação da distribuição solar nas porções externas e internas das habitações. Os dados climáticos utilizados remetem a cidade de Crateús-CE, cujo clima se assemelha às demais cidades do semiárido nordestino. Conforme orientação da ABNR NBR 15.575-1, analisou-se apenas o desempenho térmico das residências para as condições de verão na zona bioclimática em estudo.

3.3.2.1 Modelo base da HIS

Como já apresentado, a HIS representa uma casa do programa do Minha Casa Minha Vida do Governo Federal. Devido a unidade habitacional ser confeccionada em pares, as habitações possuem uma parede geminada ao longo de todo comprimento das dependências da sala e cozinha.

Na realização da simulação, optou-se por modelar as duas habitações, conforme a Figura 9, por considerar que a análise isolada de uma única habitação não corresponderá a realidade da mesma, além dessa configuração permitir a comparação dos resultados de temperatura entre a residência mais exposta a radiação solar durante a tarde e a residência mais exposta a radiação solar pela manhã.

Figura 9 - Modelagem das unidades habitacionais



Fonte: O autor

Na figura apresenta-se as duas habitações, com o cômodo da sala e quarto do casal, sendo a HIS-A localizada à direita. Utilizou-se o *software* Revit para a extração dos quantitativos de materiais, necessário para a análise de custos. O modelo base (MB) será utilizado para comparar o resultado das simulações de desempenho térmico do modelo alterado (MA).

3.3.2.2 Parâmetros de simulação

O *EnergyPlus* realiza a simulação computacional da edificação de acordo com o clima e a localização geográfica. Os dados climáticos remetem a cidade de Crateús no ano de 2018 e, devido a compatibilidade com o *software*, foram utilizados os arquivos pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), cujo adapta os dados captados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) ao *EnergyPlus*.

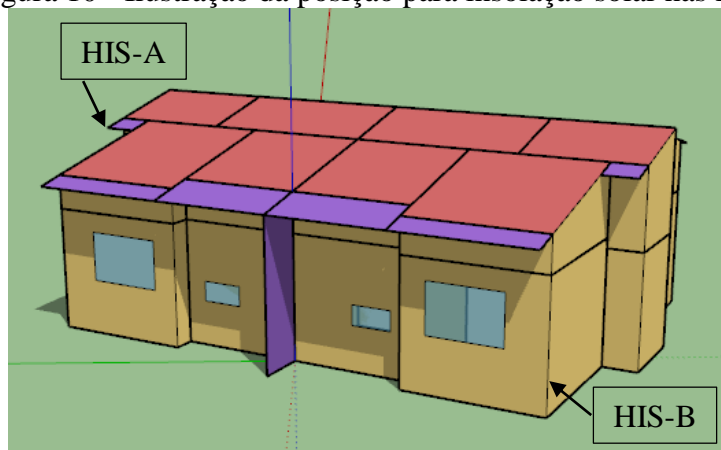
Inicialmente as coordenadas geográficas de Crateús para obtenção dos dados foram: Latitude: $-5,19^{\circ}$; Longitude: $-40,67^{\circ}$; Elevação: 291 metros. Ademais, os seguintes parâmetros, conforme a NBR 15.575-1 (2013):

- Taxa de ventilação dos ambientes igual a 1 renovação/hora. A mesma taxa é utilizada para ventilação da cobertura.
- Janelas sem sombreamento.

Como o objetivo de estudo trata-se de casas populares, é comum que haja diversas inclinações dessas habitações no terreno, o que influencia na emissão de radiação solar nas zonas térmicas. Para isso, a norma ABNT NBR 15.575-1 (2013) recomenda o uso da inclinação da residência onde ocorra as condições mais críticas de insolação solar, sendo considerada a inclinação de 30° N, atendendo a condição crítica do ponto de vista térmico para a estação de verão, onde as zonas térmicas possuem uma janela voltada para o oeste.

Considerando-se a inclinação de 30° N, a janela do quarto de casal irá receber insolação solar pela manhã e a janela do quarto de solteiro receberá insolação solar pela tarde. No *Sketchup*, fez-se uma análise acerca da insolação solar durante a residência para a inclinação de 30° N. Em geral, verifica-se que a HIS-A recebe maior insolação a tarde durante os meses menos quentes do ano (abril e agosto). Já a HIS-B recebe maior incidência solar durante os meses mais quentes. A Figura 10 ilustra esta situação de insolação solar durante a tarde, destacando-se a insolação sob os cômodos da cozinha e do quarto de solteiro.

Figura 10 - Ilustração da posição para insolação solar nas HIS



Fonte: O autor

Na figura, as paredes estão ilustradas com a cor amarelada, as telhas com a cor rósea e as extensões da habitação (muro de divisória e extensão do telhado) na cor lilás. Para contribuição térmica do solo, foram utilizados os valores das temperaturas mensais do solo apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Temperatura média do solo para a cidade de Crateús

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
°C	28,29	28,59	28,51	28,23	27,35	26,56	25,95	25,63	25,72	26,18	26,9	27,66

Fonte: INMET (2018).

Note-se que as temperaturas do solo variam de 25,63°C a 28,59°C, sendo as maiores temperaturas registradas durante a estação chuvosa (dezembro a maio), com máxima registrada em fevereiro. Os demais dados climáticos relativos a temperatura do ar estão incluídos nas simulações da edificação, registrando uma temperatura por hora, totalizando cerca de 8760 horas no ano.

Cabe destacar que a edificação apresenta sombreamento natural por extensões físicas da própria residência, que foram consideradas em todas as simulações. A cor definida em projeto remete a uma tonalidade de cor verde claro, sendo utilizada o valor de absorvância solar igual a 0,4 em todas as simulações do modelo base.

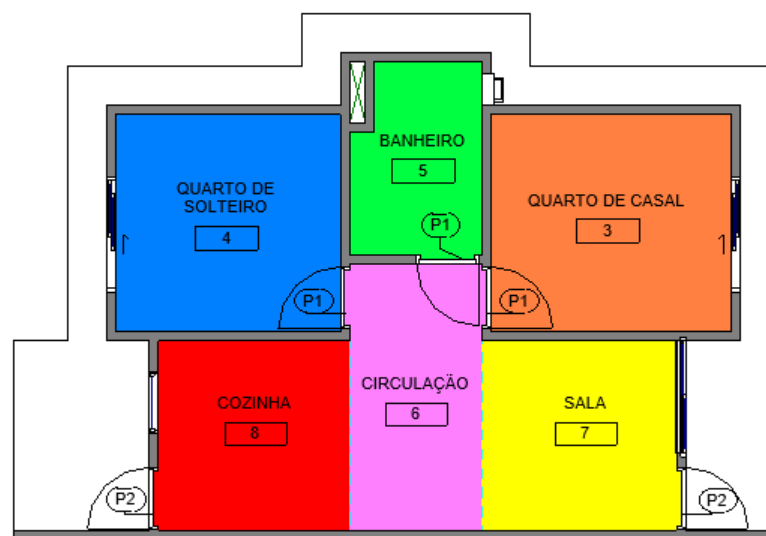
A análise das temperaturas consistiu em identificar a maior temperatura registrada por mês, de janeiro a dezembro, para averiguar seu desempenho com base nos critérios apresentados na Tabela 10. Desse modo, pode-se identificar o desempenho térmico da edificação ao longo do ano.

Ainda, devido a simulação contemplar as duas habitações (HIS-A e HIS-B), pode-se comparar o desempenho térmico dos ambientes, através da análise das temperaturas internas obtidas, averiguando o comportamento térmico de ambas em diferentes épocas do ano.

3.3.2.3 Definição das zonas térmicas

A Figura 11 apresenta a divisão das zonas térmicas das HIS no *EnergyPlus*. Salienta-se que as duas residências (HIS-A e HIS-B) possuem as mesmas nomenclaturas das zonas térmicas. A divisão destas zonas foi feita com base nas dependências da HIS, já que a simulação computacional permite a representação de cada zona térmica (mesmo em ambientes sem limitações físicas), obtendo temperaturas particulares a cada zona.

Figura 11 - Divisão das zonas térmicas das HIS no *EnergyPlus*



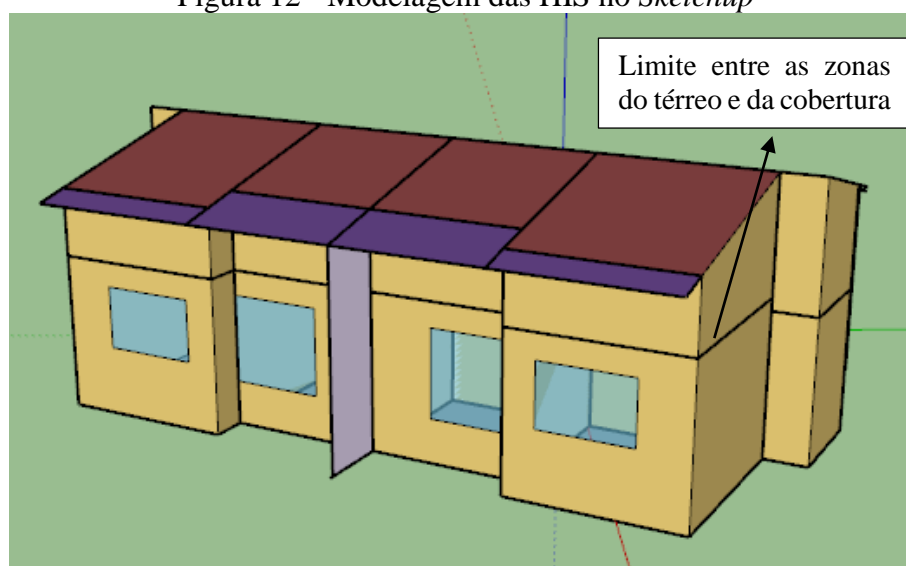
Fonte: O autor

Além das zonas térmicas que demarcam os ambientes, deve-se incluir as zonas térmicas relativas à cobertura, apresentando as dimensões em planta das zonas térmicas do térreo, localizando-se exatamente sob estas. Desse modo, há em cada edificação doze zonas térmicas (seis dos ambientes do térreo e seis dos ambientes da cobertura). Contudo, a norma de desempenho brasileira ABNT NBR 15.575-1 (2013) apresenta critérios apenas para os ambientes de longa permanência.

Assim, analisaram-se as quatro zonas térmicas de cada residência: (1) Cozinha; (2) Sala; (3) Quarto de Solteiro; e (4) Quarto do Casal.

A geometria da residência foi modelada no *software SketchUp* e exportada ao *EnergyPlus* por meio da extensão *Euclid*. Esse processo de análise computacional considera apenas as janelas como mecanismos de ventilação, descartando as portas. A Figura 12 apresenta a modelagem das habitações.

Figura 12 - Modelagem das HIS no Sketchup



Fonte: O autor

Na figura pode-se identificar o limite entre as zonas térmicas do térreo e cobertura, sendo este limite definido pelo forro das zonas térmicas. As janelas apresentam tonalidade transparente e as telhas possuem tonalidade avermelhada. Ainda, nota-se um sombreamento natural da edificação (tonalidade roxa), promovido tanto pela extensão do telhado, quanto pela parede de divisão existente entre as casas.

3.3.2.4 Materiais construtivos do modelo base (MB)

No processo de simulação computacional todos os materiais construtivos da edificação devem ser considerados, conforme sumarizado na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades térmicas dos materiais construtivos

Material	Condutividade $\left(\frac{W}{mK}\right)$	Densidade $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Calor específico $\left(\frac{J}{kg K}\right)$	Absortância solar (α)
Argamassa comum	1,15	2100	1000	0,3
Bloco cerâmico	0,9	1800	920	0,8
Cerâmica clara	1,05	1950	920	0,2
Argamassa colante	1,15	2100	1000	0,8
Contrapiso	1,75	2300	1000	0,8
Pedra britada	0,7	1250	800	0,8
Forro PVC	0,2	1200	1000	0,2
Telha cerâmica	0,9	1600	1600	0,7

Fonte: Tabela B.3 do ANEXO B da NBR 15.220-2 (2003) (adaptada)

Para a cobertura (espaço entre o forro e o telhado), utilizou-se a mesma resistência térmica do ar para a câmara de ar; $R_{ar} = 0,21 \frac{m^2K}{W}$. O vidro considerado tem as propriedades

térmicas padrão, com espessura de 6 mm e condutividade térmica de $0,9 \frac{W}{mK}$, e transmitância solar de 0,775. Destaca-se que os materiais de sombreamento natural têm características térmicas de alta reflexão, assim como orienta a norma de desempenho.

A partir dos materiais da Tabela 8 pode-se compor os elementos construtivos da residência, totalizando oito elementos, conforme Tabela 9.

Tabela 9 - Elementos construtivos da habitação

Elemento	Composição	Espessura	Espessura total
Parede com cerâmica	Cerâmica clara	0,5 cm	13,0 cm
	Argamassa colante	0,5 cm	
	Argamassa comum	1,0 cm	
	Bloco cerâmico	9,0 cm	
	Argamassa comum	1,0 cm	
	Argamassa colante	0,5 cm	
Parede 1 face com cerâmica	Cerâmica clara	0,5 cm	12,0 cm
	Argamassa comum	1,0 cm	
	Bloco cerâmico	9,0 cm	
	Argamassa comum	1,0 cm	
	Argamassa colante	0,5 cm	
Parede sem cerâmica	Cerâmica clara	0,5 cm	12,0 cm
	Argamassa comum	1,5 cm	
	Bloco cerâmico	9,0 cm	
Piso	Argamassa comum	1,5 cm	21,0 cm
	Cerâmica clara	0,5 cm	
	Argamassa colante	0,5 cm	
	Contrapiso	5,0 cm	
	Pedra britada	15,0 cm	
Teto	Forro de PVC	1,0 cm	1,0 cm
Janela	Vidro	0,6 cm	0,6 cm

Fonte: O autor

3.3.2.5 Critérios de avaliação de desempenho térmico para as habitações de Crateús

Como citado, os critérios térmicos analisados neste estudo pertencem a condição de verão. Segundo o INMET, Crateús apresenta uma temperatura máxima média de 33,6 °C, sendo esta temperatura utilizada como o valor máximo diário de temperatura do ar no exterior à edificação. Assim, a partir da Tabela 1 pode-se definir os limites de desempenho térmico da HIS, que foram apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Critérios de avaliação de desempenho térmico

Nível de desempenho	Critério	
Mínimo (M)	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq 33,6^{\circ}C$
Intermediário (I)	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ}C)$	$T_{i,max} \leq 31,6^{\circ}C$
Superior (S)	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4^{\circ}C)$	$T_{i,max} \leq 29,6^{\circ}C$

Fonte: O autor

Vale destacar que as zonas térmicas (dependências) da habitação podem apresentar diferentes níveis de desempenho de acordo com a as aberturas de ventilação, insolação solar e outros fatores, as quais estão submetidas às zonas.

3.4 Proposição de melhorias e análise de custo

Após a análise de desempenho térmico, para as situações que o desempenho mínimo requerido não foi atingido, propôs-se modificações no projeto de modo a melhoria. Como o projeto analisado consiste em uma Habitação de Interesse Social, as modificações foram orçadas de modo a associar a melhoria do conforto térmico aos incrementos de custos necessários.

Assim, os custos foram feitos de acordo com a Relatório de Insumos e Composições do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) – Set/19 – sem desoneração, publicado em 15 de outubro de 2019 pela Caixa Econômica Federal (CEF, 2019) que possuem os custos de referência adotados pela Caixa Econômica Federal na contratação desse tipo de habitação. Complementarmente utilizaram-se a Tabela 026 sem desoneração da Secretaria da Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA-CE, 2018). Todas as composições as composições utilizadas para fins comparativos foram reproduzidas no Anexo A.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise conforme o método simplificado da ABNT NBR 15.220 (2003)

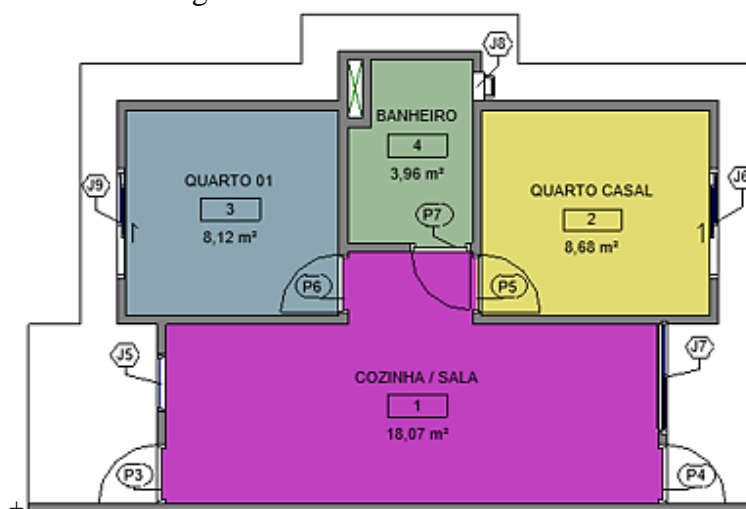
O método de análise do desempenho térmico é apresentado pela ABNT NBR 15.220-2:2005 – Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica e do fator solar de elementos e componentes de edificações. A norma ABNT NBR 15.575-4:2013 – Desempenho Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE), contribui com especificações de requisitos e critérios de desempenho.

Foram realizados todos os procedimentos para a averiguação de desempenho térmico para os materiais de construção dos sistemas de vedações, cobertura e aberturas de ventilação da HIS.

A análise de desempenho térmico, seja pelo método simplificado da ABNT NBR 15.220 ou pela simulação computacional, exige uma nova configuração dos ambientes da residência, a fim redistribuir os espaços em zonas térmicas. Essa redistribuição das zonas é justificada devido ao método de cálculo utilizar variáveis mais genéricas para a análise (como a área do piso de ambientes), sendo necessário considerar uma zona térmica com limitações físicas (uso de paredes). Já no método de simulação computacional pode-se subdividir um único ambiente em diversas zonas com o uso de paredes adiabáticas, obtendo valores de temperatura individuais a cada zona criada.

A partir da análise dos ambientes da Figura 8 tem-se o reenquadramento dos ambientes da cozinha, sala e hall para uma única zona térmica, denominada por cozinha/sala. Os demais ambientes (quartos e banheiro) continuam com os mesmos nomes nas zonas térmicas, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Zonas térmicas da HIS



Fonte: do autor.

Destaca-se que essa configuração das zonas térmicas difere da utilizada no procedimento de simulação computacional, devido ao processo de modelagem possibilitar a caracterização da temperatura nos ambientes independentes. A temperatura só pode ser averiguada através da simulação, sendo o processo de cálculo capaz de analisar apenas os parâmetros térmicos relativos as propriedades térmicas dos materiais, sem intercalar com outras variáveis, como a geometria da residência.

4.1.1 Análise das aberturas de ventilação

Conforme critérios da norma ABNT NBR 15.575 (2013) as aberturas de ventilação das edificações pertencentes a zona bioclimática 7 devem ter área igual ou superior a 7% da área do piso do ambiente, conforme Tabela 4. Para análise, considerou-se somente as esquadrias de janelas, apresentado no Quadro 3. Destaca-se que as portas não são consideradas aberturas de ventilação e não foi analisado as janelas do ambiente do banheiro, por este não ser uma dependência de longa permanência.

Pode-se calcular as áreas de aberturas de ventilação da habitação através da relação $A = \frac{A_A}{A_P}$, como apresentado na Tabela 11. Destaca-se que as janelas J1 e J2 são do tipo correr, oferecendo menos da metade da sua área total como área efetiva de ventilação.

Tabela 11 - Avaliação das aberturas de ventilação

Zonas térmicas	Área das zonas térmicas ($A_p: m^2$)	Esquadrias		Relação (A)
		Tipos de esquadria	Área ($A_A: m^2$)	
Quarto casal	8,68	J2	0,70	8,06%
Quarto 01	8,12	J2	0,70	8,62%
Cozinha/Sala	18,07	J1	1,00	7,08%
		J3	0,28	
TOTAL	34,87	-	2,68	7,68%

Fonte: O autor

Por meio da tabela, pode-se averiguar que as esquadrias da residência atendem ao requisito mínimo da norma ABNT NBR 15.575 (2013) em todas as dependências, onde as áreas das esquadrias superam 7,0% a área do piso. Na habitação, como um todo, a relação da área das esquadrias pela área de piso é de 7,68%.

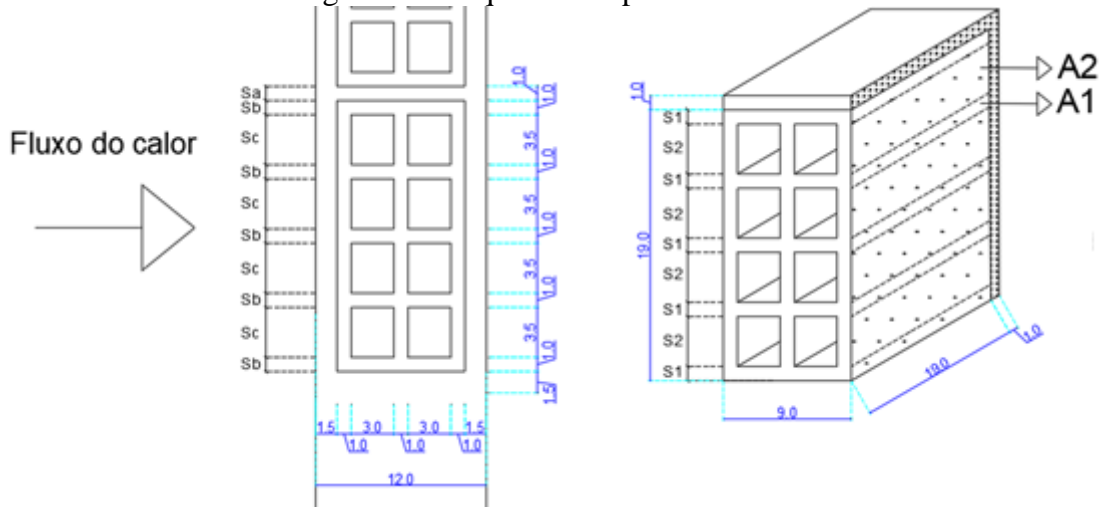
Embora a edificação atenda ao requisito de desempenho mínimo para as aberturas, o Anexo C da ABNT NBR 15.220 traz algumas recomendações de caráter informativo para as residências. Na zona bioclimática 7 recomenda-se aberturas pequenas, de 10% a 15% da área do piso, sendo recomendável aumentar as dimensões das esquadrias ou até introduzir outras na edificação. Verifica-se que a norma ABNT NBR 15.220 (2003) apresenta recomendações mais brandas para as aberturas de ventilação do que a norma de desempenho ABNT NBR 15.575 (2013).

4.1.2 Análise do desempenho térmico dos sistemas de vedação verticais

Os sistemas de vedação englobam as paredes internas e externas da residência. Para a análise procedeu-se o procedimento de cálculo da ABNT NBR 15.220 (2003). Inicialmente são calculadas as propriedades térmicas do bloco cerâmico seguidas das camadas de revestimento.

De acordo com o memorial descritivo da HIS, as paredes possuem largura de 12,0 cm (internas ou externas). Considerou-se o uso do tijolo de 8 furos (9,0 x 19,0 x 19,0 cm), mais utilizado em obras na região, com espessura de reboco igual a 1,5cm e espessura da argamassa entre os tijolos de 1,0 cm. Para cálculo nos sistemas de vedações utiliza-se o fluxo do calor na direção horizontal. A parede em questão corresponde a das dependências dos quartos (ambientes de longa permanência), cujo revestimento é de argamassa em ambas as faces, conforme apresenta a Figura 14.

Figura 14 - Esquema das paredes da HIS



Legenda: *Sa* - seção de reboco e argamassa; *Sb* - seção de reboco e tijolo; *Sc* - seção de reboco e tijolo com câmara de ar; *S1* - seção do tijolo; *S2* - seção de tijolo com câmaras de ar; *A1* - área lateral da seção *Sb*; *A2* - área lateral da seção *Sc*; *Aa* - área de reboco na argamassa; *Ab* - área de reboco na no tijolo.

Fonte: O autor

A

Tabela 12 detalha as propriedades dos materiais da parede necessárias a análise térmica.

Tabela 12 - Características dos materiais da parede empregados na residência

Materiais	Bloco cerâmico	Argamassa/Reboco
Dimensões (cm)	9 x 19 x 19	1,50
Densidade (ρ : kg/m ³)	1800	2100
Condutibilidade térmica (λ : W/m.K)	0,90	1,15
Calor específico (c : kJ/(kg.K)	0,92	1,00

Fonte: ABNT NBR 15.220-2 (Tabela B.3 do Anexo C).

Ainda, para cálculo da transmitância (*U*) e capacidade térmica (*CT*), tem-se:

- Largura do bloco cerâmico (E_c) = 9,0 cm;
- Espessura do bloco cerâmico (E_1 , Seção *S1*) = 1,0 cm;
- Espessura das câmaras de ar (E_2 , Seção *S2*) = 3,0 cm;
- Espessura do reboco (E_r) = 1,5 cm;
- Espessura da argamassa entre blocos cerâmicos (E_a) = 1,0 cm;
- Resistência térmica do ar das câmaras de ar não ventiladas (R_{ar}) = $0,16 \frac{m^2K}{W}$;
- Resistência térmica superficial interna (R_{si}) = $0,13 \frac{m^2K}{W}$;
- Resistência térmica superficial externa (R_{se}) = $0,04 \frac{m^2K}{W}$.

Os valores de resistência térmica superficial interna e externa são dados de acordo com a direção do fluxo de calor, ocorrendo na horizontal nas camadas de ar internas e externas, cujo valores são definidos pela ABNT NBR 15.220 (2003) de acordo com a direção do fluxo de calor. A seguir apresentam-se os cálculos das propriedades térmicas da parede.

4.1.2.1 Cálculo da resistência térmica do tijolo

A resistência térmica de um elemento pode ser dada em função de sua espessura da camada do material (e) e condutibilidade térmica (λ), conforme a Equação (4):

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (4)$$

Desta forma a resistência térmica do tijolo na seção S1 é; $R1 = 0,1 \frac{m^2K}{W}$. Já o cálculo da resistência térmica do tijolo R2 (seção horizontais ao fluxo de calor) é dada pela Equação (5):

$$R2 = \frac{E1}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{E1}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{E1}{\lambda_{cerâmica}} \quad (5)$$

Desta forma a resistência térmica do tijolo é $R2 = 0,3533 \frac{m^2K}{W}$.

Por fim, definidas as resistências térmicas das duas seções do tijolo, pode-se calcular a resistência total pela Equação (6):

$$R_{tijolo} = \frac{\frac{5A1}{R1} + \frac{4A2}{R2}}{\frac{5A1}{R1} + \frac{4A2}{R2}} \quad (6)$$

Em que:

- $A1 = E1 * Comprimento \ do \ tijolo = 0,01 * 0,19 = 0,0019m^2$
- $A2 = E2 * Comprimento \ do \ tijolo = 0,03 * 0,19 = 0,0057m^2$

Desta forma a resistência térmica do tijolo é $R_{tijolo} = 0,202 \frac{m^2K}{W}$.

4.1.2.2 Cálculo da resistência térmica da parede

A resistência térmica das camadas do tijolo (reboco + argamassa + reboco) é

calculada pela Equação (7):

$$Ra = \frac{Er}{\lambda_{reboco}} + \frac{Ea}{\lambda_{argamassa}} + \frac{Er}{\lambda_{reboco}} \quad (7)$$

$$\text{Desta forma } Ra = 0,1044 \frac{m^2K}{W}.$$

O Cálculo da resistência térmica da parede seção (Sb) pela Equação (8):

$$Rb = \frac{Er}{\lambda_{reboco}} + Rtijolo + \frac{Er}{\lambda_{reboco}} \quad (8)$$

$$\text{Desta forma } Rb = 0,2285 \frac{m^2K}{W}.$$

A resistência térmica da parede (Rt) é dada pela Equação (9).

$$Rt = \frac{Aa + Ab}{\frac{Aa}{Ra} + \frac{Ab}{Rb}} \quad (9)$$

Em que:

- $Aa = Ea * (Altura \text{ do tijolo} + Ea) + Ea * Comprimento \text{ do tijolo} = 0,01 * (0,19 + 0,01) + 0,01 * 0,19 = 0,0039 m^2$
- $Ab = Largura * Comprimento \text{ do tijolo} = 0,19 * 0,19 = 0,0361 m^2$

$$\text{Desta forma a resistência térmica do tijolo é } Rt = 0,2048 \frac{m^2K}{W}.$$

4.1.2.3 Resistência térmica total da parede (RT)

A resistência térmica total da parede será resultado da soma das resistências internas (Rsi) e externas (Rse) das superfícies da parede com a resistência térmica da parede (Rt), conforme a Equação (10):

$$RT = Rsi + Rt + Rse \quad (10)$$

Desta forma $RT = 0,3748 \frac{m^2K}{W}$. A transmitância térmica (U) é o inverso da resistência térmica total da parede Equação (11):

$$U = \frac{1}{RT} \quad (11)$$

$$\text{Desta forma } U = 2,66 \frac{W}{m^2K}.$$

4.1.2.4 Capacidade térmica da parede (CT)

O cálculo da capacidade térmica da seção A da parede (reboco + argamassa + reboco) segue a Equação (12):

$$CTa = \sum_{i=3}^3 e_i c_i p_i = (e \cdot c \cdot p)_{reboco} + (e \cdot c \cdot p)_{argamassa} + (e \cdot c \cdot p)_{reboco} \quad (12)$$

Em que:

- Espessura das camadas (e);
- Calor específico (c);
- Densidade dos materiais (p).

$$\text{Desta forma } CTa = 252 \frac{kJ}{m^2K}$$

O Cálculo da capacidade térmica da seção B da parede (reboco + tijolo + reboco) segue a Equação (13):

$$CTb = \sum_{i=3}^3 e_i c_i p_i = (e \cdot c \cdot p)_{reboco} + (e \cdot c \cdot p)_{cerâmica} + (e \cdot c \cdot p)_{reboco} \quad (13)$$

Em que:

- Espessura das camadas (e);
- Calor específico (c);
- Densidade dos materiais (p).

$$\text{Desta forma } CTb = 212,04 \frac{kJ}{m^2K}.$$

O Cálculo da capacidade térmica da seção C da parede (reboco + tijolo + câmara de ar + tijolo + câmara de ar + tijolo + reboco):

$$CTc = \sum_{i=7}^7 e_i c_i p_i = (e \cdot c \cdot p)_{reboco} + (e \cdot c \cdot p)_{cerâmica} + (e \cdot c \cdot p)_{câmara de ar} \quad (14)$$

$$+(e.c.p)_{cerâmica} + (e.c.p)_{câmara\ de\ ar} + (e.c.p)_{cerâmica} \\ +(e.c.p)_{reboco}$$

Desta forma $CTc = 112,68 \frac{kJ}{m^2K}$. Por fim, a capacidade térmica da parede será resultado da composição das capacidades térmicas nas seções A, B e C do tijolo, conforme a Equação (15):

$$CT = \frac{Aa + 5.Ab + 4.Ac}{\frac{Aa}{CTa} + 5.\frac{Ab}{CTb} + 4.\frac{Ac}{CTc}} \quad (15)$$

Em que:

$$- Ac = E2 * Comprimento\ do\ tijolo = 0,03 * 0,19 = 0,0057\ m^2$$

$$\text{Desta forma } CT = 193,81 \frac{kJ}{m^2K}$$

A Tabela 13 apresenta os requisitos de desempenho térmico mínimo da norma ABNT NBR 15.575 para a zona bioclimática 7.

Tabela 13 - Verificação de desempenho térmico da parede

Critério de desempenho	Valor calculado	Valor recomendado
$U \left(\frac{W}{m^2K} \right)$	2,66	$\alpha \leq 0,6 \leq 3,7$ $\alpha > 0,6 \leq 2,5$
$CT \left(\frac{kJ}{m^2K} \right)$	193,81	$\geq 130,0$

Fonte: do autor.

De acordo com os resultados, verifica-se que a edificação analisada atende ao desempenho mínimo da NBR 15.575. Cabe ressaltar que o critério de transmitância térmica está relacionado com os valores de absorvância térmica, refletindo os valores de absorvância da radiação externa da parede pela pintura. Dessa forma, a transmitância térmica só é atingida quando utilizado tintas claras na pintura externa da parede, como a tinta branca ($\alpha = 0,2$), amarela ($\alpha = 0,3$) e verde claro ($\alpha = 0,4$).

O uso de pinturas de tonalidade escura, como verde escuro ou vermelho, tornam o desempenho térmico da parede como insatisfatório. A partir dos parâmetros térmicos

encontrados, pode-se determinar o atraso térmico (φ) e o fator solar (FS_0) do elemento da parede.

4.1.2.5 Atraso térmico (φ)

Para cálculo do atraso térmico define-se os seguintes parâmetros deve-se calcular os parâmetros B_0 , B_1 e B_2 calculados pelas equações (16), (17) e (18) respectivamente:

$$B_0 = CT - Ct_{reboco} \quad (16)$$

Em que:

$$- Ct_{reboco} = er * c_{reboco} * p_{reboco}$$

$$B_1 = \frac{0,226B_0}{R_t} \quad (17)$$

$$B_2 = 0,205 \left(\frac{(\lambda.c.p)_{reboco}}{R_t} \right) \left(R_{reboco} - \frac{Rt - R_{reboco}}{10} \right) \quad (18)$$

Em que:

$$- R_{reboco} = \frac{er}{\lambda_{reboco}}$$

Desta forma, $B_0 = 162,31$, $B_1 = 179,12$ e $B_2 = -14,82$.

Deve-se considerar o parâmetro B_2 igual a zero por este resultar num valor negativo. Por fim, calcula-se o atraso térmico é por meio da Equação (19):

$$\varphi = 1,382 x Rt \sqrt{B_1 + B_2} \quad (19)$$

Desta forma tem-se $\varphi = 3,78$ horas.

4.1.2.6 Fator solar (FS_0)

O cálculo do fator solar (FS_0) é dado pela seguinte Equação (20):

$$FS_0 = 4U\alpha \quad (20)$$

Em que:

- α representa a absorvância à radiação solar sobre uma superfície.

No caso, considerou-se a parede revestida externamente com uma pintura de tonalidade amarelada ($\alpha = 0,3$). Assim $FS_0 = 3,20$ %.

O atraso térmico e o fator solar não são tratados como critérios de desempenho térmico, sendo utilizados apenas como valores recomendados para a edificação. A Tabela 14 apresenta uma comparação entre os parâmetros térmicos encontrados na parede da HIS e as recomendações da norma ABNT NBR 15.220 (2003).

Tabela 14 – Propriedade térmicas da parede (calculado versus recomendado)

Critério de desempenho	Valor calculado	Valor recomendado
$U \left(\frac{W}{m^2K} \right)$	2,66	$\leq 2,2$
φ (horas)	3,78	$\geq 6,5$
FS_0 (%)	3,20	$\leq 3,5$

Fonte: O autor

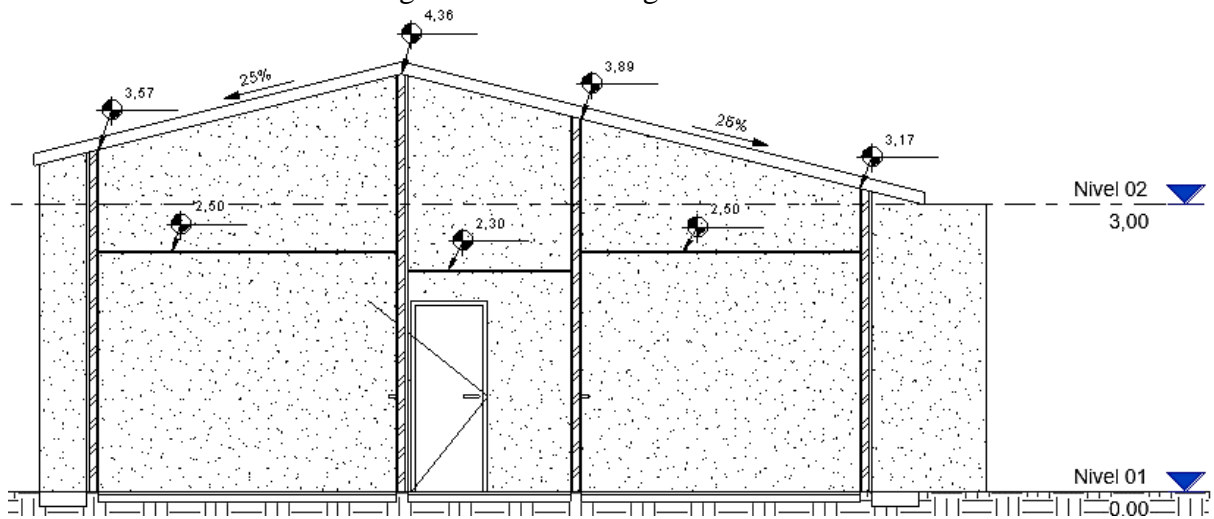
Verifica-se que a HIS, mesmo atendendo aos requisitos de desempenho térmico mínimo, possui os valores das propriedades térmicas fora dos limites dos valores recomendados por norma, com exceção do fator solar. Esta situação reflete um quadro de baixo desempenho térmico e conforto térmico mínimo aos usuários.

4.1.3 Análise do desempenho térmico do sistema de cobertura

Na zona bioclimática 7, a norma ABNT NBR 15.575 (2013) apresenta o parâmetro de transmitância térmica (U) atrelado aos valores de absorvância térmica (α) e fator de ventilação (FV) para à análise do desempenho térmico da cobertura.

Na edificação em estudo, a cobertura possui duas águas, sendo composto por telha cerâmica do tipo colonial e com inclinação de 25 %. A HIS possui forro do tipo PVC branco em todas as dependências da casa. A elevação do forro é de 2,30 m no banheiro e 2,50 m nos demais ambientes, conforme corte longitudinal apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Corte longitudinal da HIS

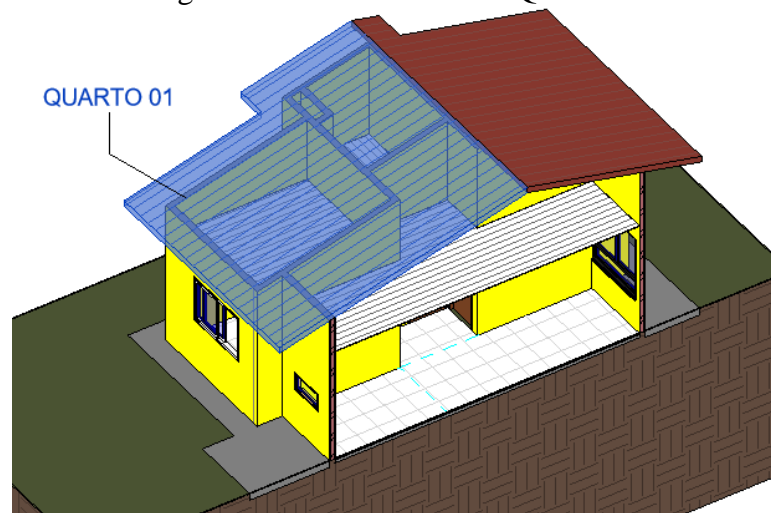


Fonte: O autor

Pode-se verificar que as paredes internas e externas da residência delimitam espaços, equivalentes às zonas térmicas, impedindo a livre circulação de ar dentro da cobertura. Assim, a análise do sistema de cobertura não foi aplicada para toda a estrutura do telhado, sendo feito apenas para a dependência mais vulnerável a promover aquecimento.

Desde modo, analisou-se o telhamento sob o quarto 01, que apresenta a menor distância entre cobertura e forro (menor câmara de ar) dentre as zonas térmicas, conforme destacado na Figura 16.

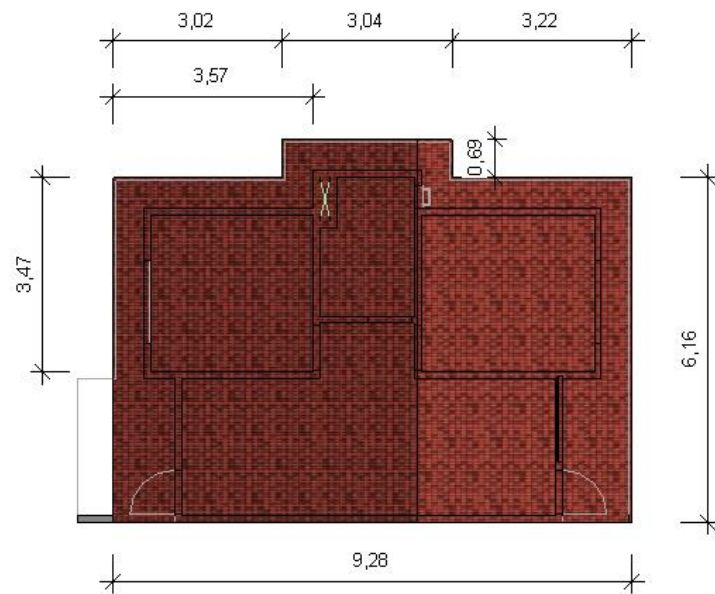
Figura 16 - Cobertura sob o Quarto 01



Fonte: do autor

A área total da cobertura é de 61,08 m² e as dimensões do telhado são dadas na Figura 17.

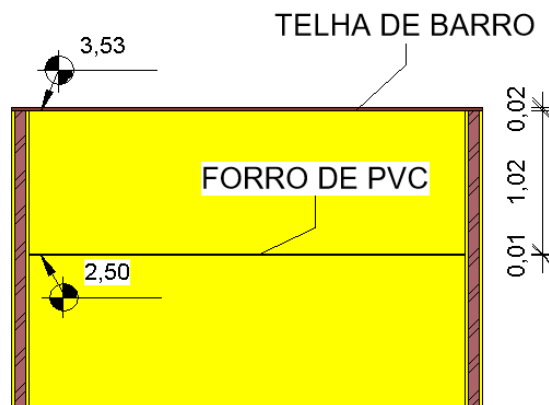
Figura 17 - Dimensões da cobertura



Fonte: do autor.

O processo de cálculo se assemelha ao utilizado nas paredes. Para o sistema de cobertura a ABNT NBR 15.220 (2003) prevê a adequação do telhado real a um modelo equivalente (simplificado). O modelo equivalente descreve formas geométricas simples, como o retângulo, permitindo uma distância constante entre o forro e as telhas, ao mesmo tempo em que a câmara de ar (ático) se torna uniforme, conforme modelo apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Modelo equivalente do telhado



Fonte: O autor

As espessuras dos materiais são dadas abaixo:

- Espessura da telha de barro (E_t) = 0,02 m
- Espessura da câmara de ar (E_{ac}) = 1,02 m
- Espessura do forro de PVC (E_f) = 0,01 m

A Tabela 15 apresenta as propriedades térmicas dos materiais que compõem a cobertura. Tanto no método de cálculo quanto na simulação computacional desconsidera-se a análise das ripas, terças e caibros.

Tabela 15 - Propriedades térmicas dos elementos da cobertura

	Telha de barro	Forro de PVC
Densidade (ρ : kg/m ³)	1600	1200
Condutibilidade térmica (λ : W/m.K)	0,90	0,20
Calor específico (c : kJ/(kg.K)	0,92	1,00

Fonte: ABNT NBR 15.220 (Tabela B.3).

As paredes da cobertura não participam do cálculo, sendo tratadas apenas como um limitador de ambiente. De acordo com o memorial descritivo, a estrutura do telhado é formada perfis metálicos com as seguintes dimensões:

- Ripas (em metalon): 2 cm x 2 cm
- Terças/Cumeeira: 10 cm x 10 cm
- Caibros: 10 cm x 7,5 cm (largura x altura)

A partir das dimensões dos materiais de sustentação das telhas, pode-se estimar as aberturas de ventilação dos dois beirais (norte e oeste) do telhado do quarto 01 (em contato com o ambiente externo). Os dois beirais possuem alturas de aberturas diferentes, devido ao posicionamento dos caibros e ripas. Já as terças estão alocadas dentro das alvenarias.

No beiral norte verifica-se apenas a interferência dos caibros sob a parede externa, enquanto as ripas estão distribuídas perpendiculares ao longo do telhado. Portanto o beiral norte terá abertura de ventilação igual à altura das ripas, de 2 cm por 2,90 m (comprimento do quarto). Para o beiral oeste, tem-se a interferência das ripas, localizadas sob a parede do quarto 01. A abertura de ventilação é igual à altura dos caibros, de 7,5 cm por 2,80 m (comprimento do quarto).

Para análise do desempenho térmico da cobertura deve-se averiguar as condições de ventilação do ático por meio da Equação (21):

$$Ventilação\ do\ ático = \frac{S}{Ac} \quad (21)$$

Em que:

- S é a área de ventilação da cobertura (em cm²);
- Ac é a área da cobertura (em m²).

Para a cobertura em questão tem-se $Ventilação\ do\ ático = 330\text{cm}^2/\text{m}^2$. De acordo com a norma, se $Ventilação\ do\ ático = \frac{S}{Ac} < 30$ o ativo é pouco ventilado e se $Ventilação\ do\ ático = \frac{S}{Ac} \geq 30$ o ativo é muito ventilado o que confere à cobertura a classificação de muito ventilada. Destaca-se que esta condição é desejável para regiões quentes, pois uma boa ventilação na cobertura proporciona aumento da resistência térmica da câmara de ar, consequentemente, reduzindo a transmitância térmica e os ganhos de calor.

Devido a estação de verão ser mais abrangente ao longo do ano, principalmente na região do semiárido, descartou-se a análise durante a estação de inverno, visto que a diminuição da temperatura climática não resulta em perdas relevantes de calor. A norma ABNT NBR 15.575 também descarta a verificação de desempenho térmico para a estação de inverno na zona bioclimática 7.

Na estação de verão considera-se que a resistência térmica da câmara de ar ventilada possui mesmo valor da resistência térmica da câmara de ar não ventilada. Considera-se, ainda, que o fluxo de calor descendente, quando o calor se propaga da face externa da cobertura até o seu interior.

As resistências térmicas superficiais interna (R_{si}) e externa (R_{se}) para este tipo de fluxo de calor são dadas:

- Resistência térmica superficial interna (R_{si}) = $0,17 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
- Resistência térmica superficial externa (R_{se}) = $0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$

A resistência térmica da câmara de ar é dada em função de sua espessura, do tipo de fluxo de ar e da emissividade da superfície da telha de barro. De acordo com as Tabelas B.1 e B.2 do Anexo B da norma ABNT NBR 15.220, a telha de barro é um material de superfície de alta emissividade (acima de 0,8) e, como a espessura da câmara de ar é 1,02 m (acima de 0,05 m), a resistência da câmara de ar é $R_{ar} = 0,21 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$.

4.1.3.1 Cálculo da resistência térmica da cobertura

Para cálculo da resistência térmica (R_{tc}) utiliza-se a Equação (22) para o sistema: telha de barro + câmara de ar + forro de PVC.

$$R_{tc} = \frac{Et}{\lambda_{telha}} + R_{ar} + \frac{Ef}{\lambda_{PVC}} \quad (22)$$

Em que:

- R_{tc} é a Resistência térmica da cobertura
- Et é a espessura da telha
- λ_{telha} é a condutividade térmica da telha de acordo com a Tabela 15;
- R_{ar} é a resistência da câmara de ar
- Ef é a espessura do forro
- λ_{PVC} é a condutividade térmica do PVC de acordo com a Tabela 15;

Desta forma $R_t = 0,282 \frac{m^2K}{W}$.

4.1.3.2 Cálculo da resistência térmica total da cobertura

Já a resistência térmica total (RT) é dada pela Equação (23):

$$RT = R_{si} + R_t + R_{se} \quad (23)$$

Desta forma $RT = 0,452 \frac{m^2K}{W}$.

4.1.3.3 Cálculo da transmitância térmica

Como a transmitância térmica (U) é o inverso resistência térmica total (RT), conforme equação (11, tem-se $U = 2,21 \frac{W}{m^2K}$.

4.1.3.4 Cálculo da capacidade térmica

A capacidade térmica é encontrada pela Equação (24):

$$CT = \sum_{i=3}^3 e_i c_i p_i = (e.c.p)_{telha} + (e.c.p)_{ar} + (e.c.p)_{forro} \quad (24)$$

Como a massa de ar é próxima a zero, a densidade do ar (p) é considerada zero no cálculo da capacidade térmica do ar e obtém-se $CT = 41,44 \frac{kJ}{m^2K}$.

A Tabela 13 apresenta a classificação de desempenho térmico pelos critérios da norma ABNT NBR 15.57 para a zona bioclimática 7.

Tabela 16 - Verificação de desempenho térmico da cobertura

Critério de desempenho	Valor calculado	Valor recomendado
$U \left(\frac{W}{m^2K} \right)$	2,21	$\alpha \leq 0,4 \quad U \leq 2,3FT$
		$\alpha > 0,4 \quad U \leq 1,5FT$
$CT \left(\frac{kJ}{m^2K} \right)$	41,44	$\geq 130,0$

Fonte: do autor.

Analisando-se os dois critérios, têm-se que a cobertura já apresenta desempenho insatisfatório quando verificado o critério da capacidade térmica, apresentando um valor bem inferior ao limite estabelecido. Para verificar o critério de transmitância térmica deve-se analisar a absorvância da telha de barro (camada mais externa da cobertura), cujo valor é superior a 0,4, devendo atender ao critério de transmitância; $U \leq 1,5 FT$. O parâmetro ‘FT’ corresponde ao fator de correção da transmitância térmica, dada pela Equação (25):

$$FT = 1,17 - 1,07xh^{-1,04} \quad (25)$$

Em que:

- h representa a abertura dos beirais para ventilação do ático.

A ventilação do ático do quarto é dada pelos beirais norte e oeste, expostos ao ambiente externo. Assim, a altura da abertura de ventilação (h) seria a média da abertura nestes dois beirais, sendo que no beiral norte; $h = 7,5 \text{ cm}$, num comprimento de $2,8 \text{ m}$, e no beiral oeste; $h = 2,0 \text{ cm}$, num comprimento de $2,9 \text{ m}$. Desde modo, a abertura média de ventilação seria; $h = 4,7 \text{ cm}$.

Definido a abertura de ventilação, tem-se que o parâmetro de correção da

transmitância térmica seria igual a 0,956. Por tanto o critério de desempenho mínimo exige um valor de transmitância térmica (U) inferior ou igual a $1,43 \frac{W}{m^2K}$. Como o valor de transmitância térmico encontrado é de $2,21 \frac{W}{m^2K}$, a cobertura não atinge ao requisito de desempenho mínimo, sendo necessário a realização de simulação computacional.

4.1.3.5 Atraso térmica (φ)

Definido os valores de resistência térmica e capacidade térmica, pode-se determinar o atraso térmico (φ) e o fator solar (FS_0) da cobertura, sendo estes utilizados apenas como parâmetros recomendados para a zona bioclimática, não sendo considerados requisitos de desempenho térmico.

Para cálculo do atraso térmico define-se os seguintes parâmetros deve-se calcular os parâmetros B_0 , B_1 e B_2 calculados pelas equações (26), (27) e (28) respectivamente:

$$B_0 = CT - Ct_{telha} \quad (26)$$

Em que:

$$- Ct_{telha} = (e.c.p)_{telha}$$

$$B_1 = \frac{0,226B_0}{Rt} \quad (27)$$

$$B_2 = 0,205 \left(\frac{(\lambda.c.p)_{telha}}{Rt} \right) \left(R_{telha} - \frac{Rt - R_{telha}}{10} \right) \quad (28)$$

Em que:

$$- R_{telha} = \frac{Er}{\lambda_{telha}}$$

Desta forma, $B_0 = 12$, $B_1 = 9,62$ e $B_2 = -3,54$.

Deve-se desconsiderar o parâmetro B_2 por ser negativo. Por fim, calcula-se o atraso térmico é por meio da Equação (29):

$$\varphi = 1,382 \times Rt \sqrt{B_1 + B_2} \quad (29)$$

Desta forma tem-se $\varphi = 1,21$ horas.

4.1.3.6 Fator solar (FS_0)

O cálculo do fator solar (FS_0) é dado pela seguinte Equação (30):

$$FS_0 = 4U\alpha \quad (30)$$

Em que:

- α representa a absorptância à radiação solar sobre uma superfície.

No caso, considerou-se a cobertura com telha sem revestimento ($\alpha = 0,75$). Desta forma, $FS_0 = 6,63\%$.

A Tabela 14 apresenta uma comparação entre os parâmetros térmicos encontrados para a coberta da HIS e as recomendações da norma ABNT NBR 15.220 (2003).

Tabela 17 - Propriedade térmicas da cobertura (calculado versus recomendado)

Critério de desempenho	Valor calculado	Valor recomendado
$U \left(\frac{W}{m^2K} \right)$	2,21	$\leq 2,0$
φ (horas)	1,21	$\geq 6,5$
FS_0 (%)	6,63	$\leq 6,5$

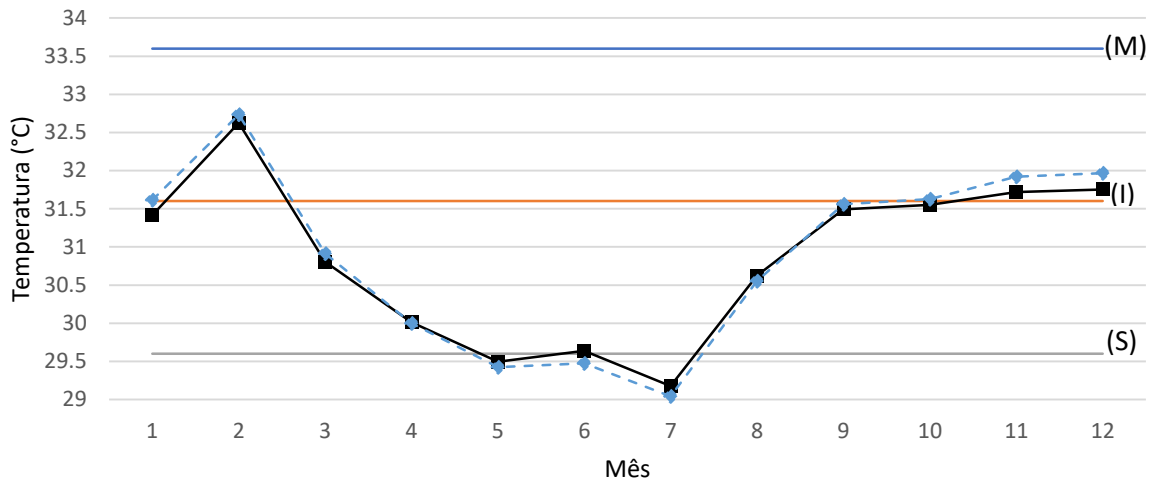
Fonte: O autor

Como esperado, a habitação não atinge nenhum parâmetro térmico, refletindo uma situação de baixo conforto térmico e promoção de aquecimento na cobertura. Destaca-se que os valores de transmitância térmica e fator solar encontram-se próximos dos limites estabelecidos, ao contrário do atraso térmico, que apresenta um valor muito menor do que o recomendado, o que pode ser explicado pela pouca espessura dos materiais utilizados na coberta.

4.2 Análise conforme o método de simulação computacional

A seguir apresenta-se os gráficos acerca das máximas temperaturas mensais obtidas através da simulação computacional no *EnergyPlus*, a Figura 19 apresenta o comportamento térmico das zonas térmicas das cozinhas.

Figura 19 - Maiores temperaturas mensais das cozinhas da HIS-A e HIS-B

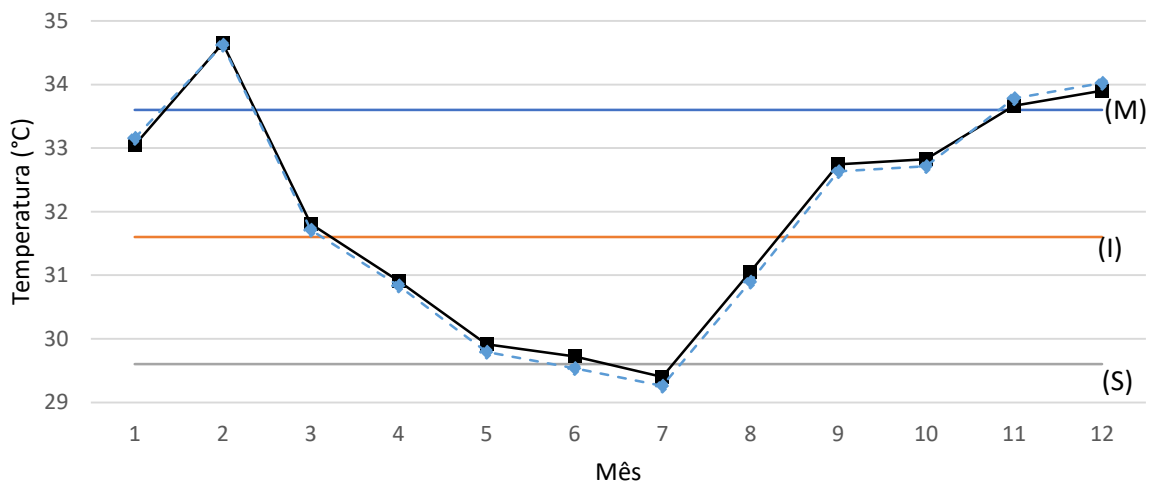


Legenda: (M) Mínimo; (I) Intermediário; (S) Superior; —■— Cozinha HIS-A; - -◆- - Cozinha HIS-B.
Fonte: O autor.

Observa-se que ambas as cozinhas apresentam desempenho térmico dentro dos limites de temperatura, oscilando em torno do desempenho intermediário ($T_{i,max} \leq 31,6^\circ C$) em boa parte do ano, sobretudo nos meses de março a agosto e apresentando desempenho superior ($T_{i,max} \leq 29,6^\circ C$) no mês de maio e julho. O desempenho térmico mínimo ($T_{i,max} \leq 33,6^\circ C$) é identificado nos meses de janeiro e fevereiro e entre os meses de outubro e dezembro.

Já quando as salas são analisadas, verifica-se uma oscilação maior da temperatura ao longo do ano, conforme demonstra a Figura 20.

Figura 20 - Maiores temperaturas mensais das salas da HIS-A e HIS-B



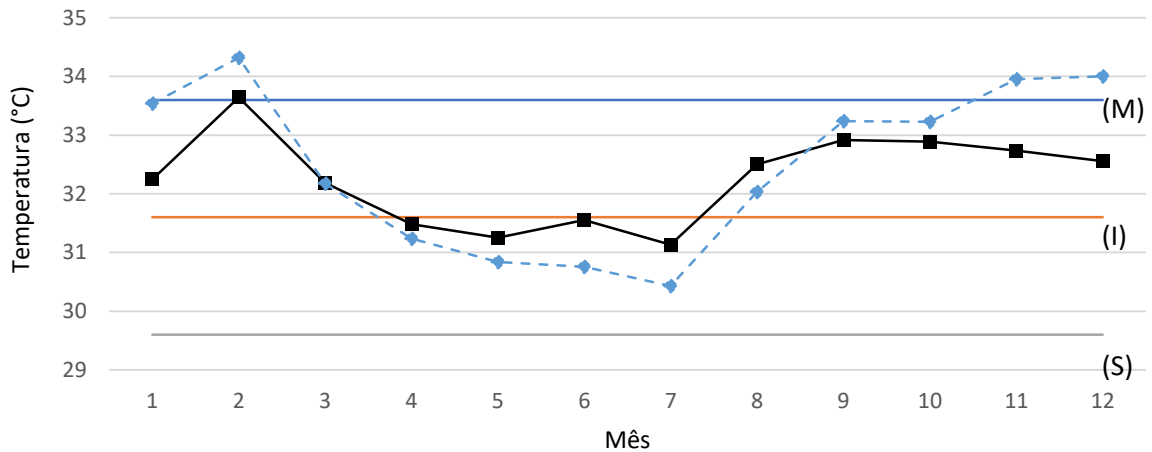
Legenda: (M) Mínimo; (I) Intermediário; (S) Superior; —■— Sala HIS-A; - -◆- - Sala HIS-B.
Fonte: O autor.

Verifica-se desempenho insatisfatório nos meses de fevereiro, novembro e dezembro, registrando temperaturas de $34,62^\circ C$, acima do critério de desempenho mínimo

$(T_{i,max} \leq 33,6^\circ \text{C})$.

A Figura 21 apresenta o comportamento térmico dos quartos de solteiro.

Figura 21 - Maiores temperaturas mensais dos quartos de solteiro da HIS-A e HIS-B

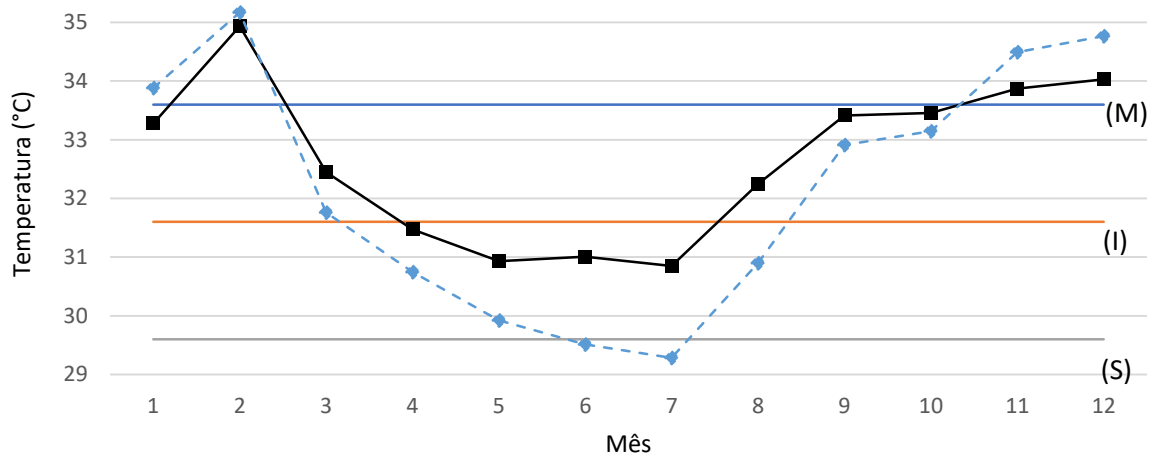


Legenda: (M) Mínimo; (I) Intermediário; (S) Superior; —■— Quarto HIS-A; - - - ◆ - - - Quarto HIS-B.
Fonte: O autor.

Observa-se que o comportamento térmico dos quartos de solteiro apresenta as mesmas tendências, porém o quarto de solteiro da HIS-B possui temperaturas mais elevadas. Isto ocorre nos meses mais quentes, devido a insolação solar durante o período da tarde ser maior no quarto de solteiro da HIS-B. Ainda, registra-se que o desempenho insatisfatório nos meses de fevereiro, novembro e dezembro no Quarto B. Ademais, o quarto de solteiro da HIS-A apresenta menor variação de temperatura durante o ano, possuindo desempenho térmico mínimo nos meses mais quentes, com exceção de fevereiro, onde registra-se desempenho térmico insatisfatório.

A Figura 22 apresenta o comportamento térmico dos quartos de casal.

Figura 22 - Maiores temperaturas mensais dos quartos de casal da HIS-A e HIS-B



Legenda:(M) Mínimo; (I) Intermediário; (S) Superior; —■— Quarto Casal HIS-A; - - -◆- - - Quarto Casal HIS-B.
Fonte: O autor.

Assim como as demais zonas, os quartos de casal apresentam condição térmica mais desfavoráveis nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, com desempenho abaixo do mínimo ($T_{i,max} \leq 33,6^\circ \text{C}$) com maior temperatura para o mês fevereiro com $35,16^\circ \text{C}$.

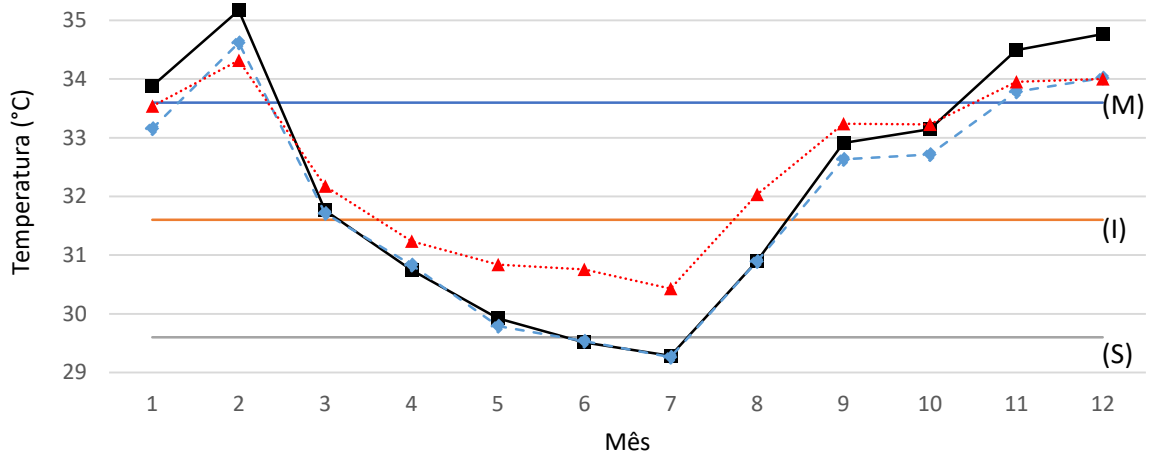
Assim, verifica-se que os meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, manifestam situações mais críticas termicamente nas habitações. O único ambiente que não apresentou nível insatisfatório durante todo o ano foi a cozinha, de ambas as habitações.

Nota-se, ainda, que a HIS-B apresenta as maiores variações de temperaturas ao longo do ano, quando comparado com a HIS-A. Isto pode ser explicado pela HIS-B receber mais insolação a tarde nos meses mais quentes do ano, e recebendo menos insolação durante os meses menos quentes, conforme orientação adotada (30°N).

Em geral, as melhores condições térmicas são alcançadas nos meses de junho e julho. Contudo, o registro do desempenho insatisfatório durante os meses mais quentes requer alterações no projeto. Assim, realizaram-se proposições de melhoria para o projeto simulando a HIS-B devido a esta apresentar a situação mais crítica termicamente do que a HIS-A.

A Figura 23 reúne o comportamento térmico dos ambientes com situação insatisfatória na HIS-B.

Figura 23 - Comparação dos ambientes da HIS-B com situação insatisfatória



Legenda: (M) Mínimo; (I) Intermediário; (S) Superior; —■— Quarto Casal HIS-B; - -◆- Sala HIS-B;▲..... Quarto HIS-B.

Fonte: O autor.

Devido ao não atendimento da edificação aos critérios estabelecidos para verão, a norma ABNT NBR 15.575-1 (2013) estabelece que seja feito uma nova simulação para os casos apresentados a seguir:

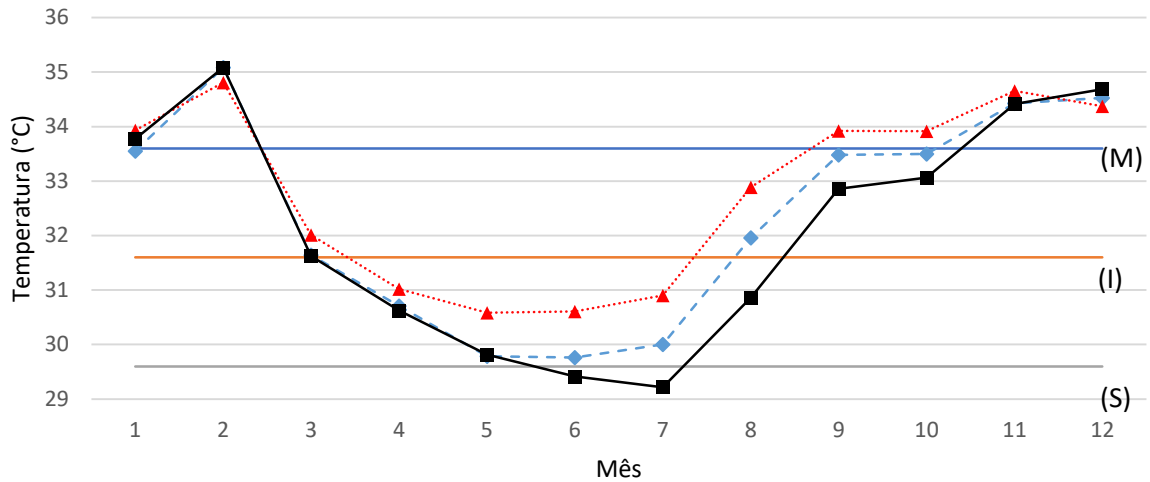
- Ventilação: Configuração da taxa de ventilação de cinco renovações do volume de ar do ambiente por hora (5,0 ren/h) e janelas sem sombreamento;
- Sombreamento: Inserção de proteção solar externa ou interna da esquadria externa com dispositivo capaz de cortar no mínimo 50% da radiação solar direta que 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.

Assim, fez-se a nova simulação recomendada pela norma para os ambientes cujo desempenho térmico foi insatisfatório, ou seja, somente a cozinha não foi incluída, cujos resultados são detalhados a seguir.

4.2.1 Ventilação

A Figura 24 apresenta a comparação do desempenho térmico dos ambientes da habitação B.

Figura 24 - Ambientes da HIS-B submetidos a estratégia de ventilação



Legenda: (M) Mínimo; (I) Intermediário; (S) Superior; —■— Quarto Casal HIS-B; - - - ◆ - - - Sala HIS-B; ▲ Quarto HIS-B.

Fonte: O autor.

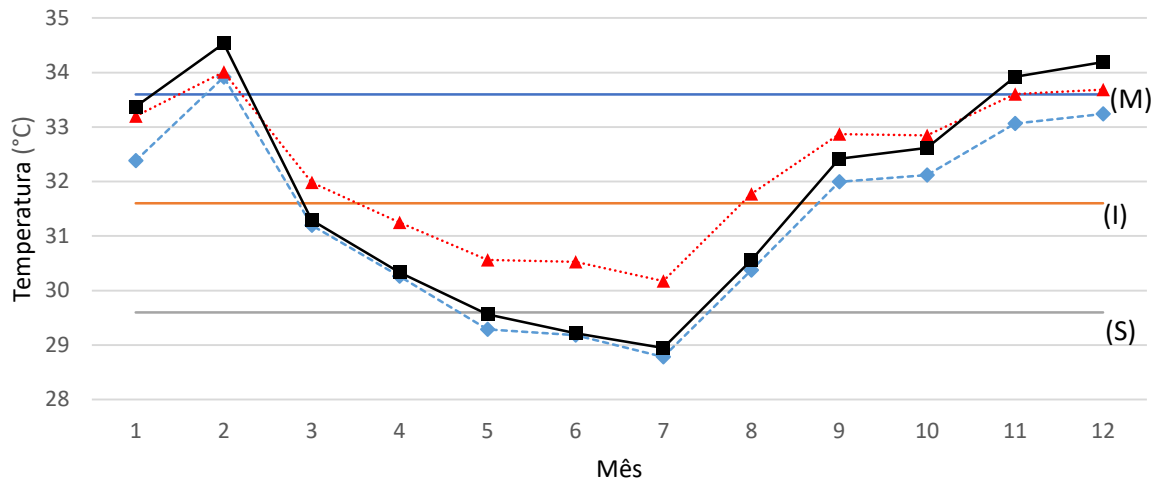
Verifica-se que a ventilação não proporcionou melhoria de desempenho para os ambientes, ou seja, o aumento da taxa de ventilação resultou em trocas térmicas desfavoráveis. Registra-se a temperatura máxima de 35,08° C, no ambiente da sala e quarto do casal, sendo superior a temperatura máxima da sala sob condição de ventilação de uma renovação de ar por hora, o que pode ser explicado devido à baixa umidade do ar exterior sobreaquecer os ambientes.

Essa situação mantém coerência com a recomendação da ABNT NBR 15.220 (2003), relativa as aberturas de ventilação para as edificações localizadas na zona bioclimática 7, evidenciando que a redução das janelas, diminuindo a entrada de ar quente, melhora o conforto térmico.

4.2.2 Sombreamento

Para o sombreamento, optou-se pelo uso de persianas a uma inclinação de 45°, proporcionando 50% de sombreamento nas aberturas das janelas. A Figura 25 apresenta a comparação do desempenho térmico dos ambientes da habitação para a estratégia de sombreamento.

Figura 25 - Ambientes da HIS-B submetidos a estratégia de sombreamento



Legenda: (M) Mínimo; (I) Intermediário; (S) Superior; —■— Quarto Casal HIS-B; - -◆- Sala HIS-B;▲..... Quarto HIS-B.

Fonte: O autor.

Nota-se que a estratégia de sombreamento é mais eficaz na redução das temperaturas quando comparada a estratégia de ventilação. Registra-se uma melhora das temperaturas máximas dos ambientes. Entretanto, isso não é suficiente para atender ao desempenho mínimo para todas as zonas térmicas no mês de fevereiro.

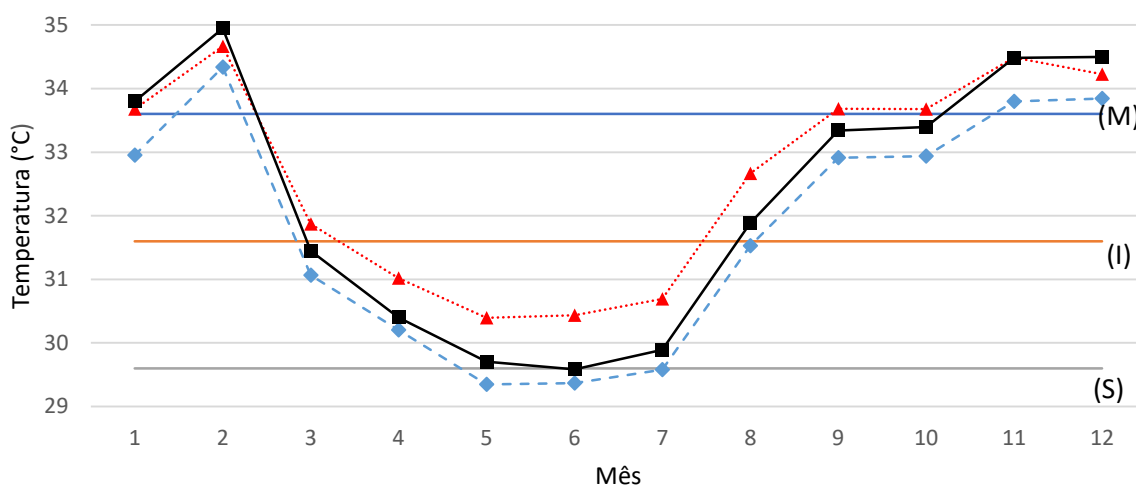
O quarto do casal ainda mantém a maior temperatura. Contudo, verifica-se uma redução de aproximadamente $0,6^{\circ}\text{C}$ no quarto do casal ($35,16^{\circ}\text{C}$ do modelo base para $34,53^{\circ}\text{C}$ no modelo base com sombreamento) apenas com uso de sombreamento em 50% da área da janela. Já a sala tem seu desempenho térmico melhorado de uma situação de insatisfação para mínimo nos meses de novembro e dezembro.

4.2.3 Ventilação e sombreamento

O sombreamento utilizado nesta estratégia é o mesmo adotado pela estratégia anterior com taxa de renovação do ar utilizada será de cinco renovação por hora, cujos resultados são apresentados na

Figura 26.

Figura 26 - Ambientes da HIS-B submetidos a estratégia de ventilação e sombreamento



Legenda: (M) Mínimo; (I) Intermediário; (S) Superior; —■— Quarto Casal HIS-B; - -◆- Sala HIS-B;▲..... Quarto HIS-B.

Fonte: O autor.

Nesta estratégia verifica-se uma melhora sutil do desempenho térmico. Nota-se que os ambientes apresentam um comportamento térmico mais semelhante. A temperatura máxima registrada continua pertencendo ao ambiente do quarto do casal, atingindo 35,09° C. Por fim, a estratégia de ventilação e sombreamento não foi suficiente para garantir o desempenho térmico mínimo nos ambientes analisados.

4.2.4 Comparação das estratégias do Modelo Base

A Tabela 18 apresenta a comparação das temperaturas encontradas nas simulações.

Tabela 18 - Temperaturas encontradas pelo processo de simulação computacional na HIS-B

Ambientes	Modelo base	Ventilado	Sombreado	Ventilado e somb.	Mês
Sala	34,62° C	35,08° C	33,91° C	34,33° C	Fev.
Quarto solt.	34,31° C	34,80° C	34,00° C	34,66° C	Fev.
Quarto casal	35,16° C	35,08° C	34,53° C	34,94° C	Fev.

Fonte: O autor

Dentre as estratégias analisadas pode-se afirmar que o sombreamento foi a alternativa mais eficiente. O pior cenário é o ventilado, com taxa de renovação do ar de 5 ren/h. Desse modo, a estratégia ‘ventilada e sombreada’ apresenta-se com eficácia intermediária entre as duas estratégias, possuindo valores de temperatura pouco vantajosas quando comparadas com o modelo base. Destaca-se que todos os valores de temperatura máxima foram obtidos no mês de fevereiro em todos os cenários.

Assim, devido ao critério de desempenho mínimo demandar temperaturas inferiores

a 33,60° C, pode-se definir que a habitação não obedece aos requisitos de desempenho térmico na condição de verão, necessitando a alteração do projeto. O quarto do casal apresenta a pior situação de desempenho térmico.

Desta forma, propôs-se alterações no projeto que possibilitassem atingir o desempenho térmico mínimo sem grandes acréscimos de custo, como detalhado a seguir.

4.3 Modelo alterado (MA)

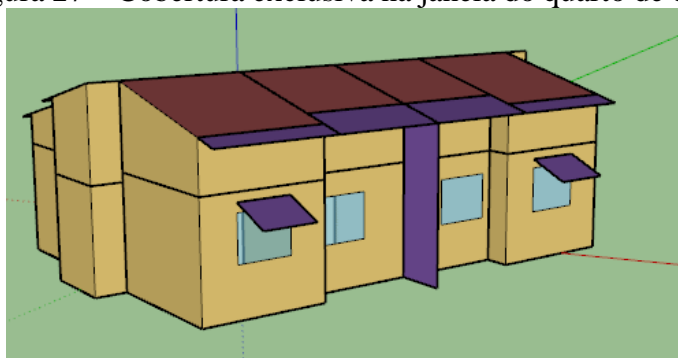
As alterações propostas visam a melhora do desempenho térmico da edificação a partir de alternativas de baixo impacto financeiro. Evitou-se alterações na geometria da habitação em virtude da limitação do espaço, do custo e da natureza do projeto (Minha Casa Minha Vida).

Através do procedimento de cálculo, verificou-se que a cobertura apresenta situação térmica insatisfatória, o que contribuiu para a geração de temperaturas elevadas na HIS. Desse modo, foi realizada a substituição dos materiais do forro (PVC) por outros termicamente mais eficientes, como o gesso. Também foi implementado a pintura branca nas telhas de barro, visando diminuir a absorvância solar (α).

Embora as paredes tenham atingido o nível de desempenho mínimo no procedimento de normativo de cálculo, foi feito o aumento da espessura das camadas de argamassa visando proporcionar maior capacitância térmica ao sistema de vedações verticais, e, conseqüentemente, contribuindo para a melhora do desempenho.

Também, a análise do modelo base demonstrou que a ventilação agrava o desconforto térmico. Baseado nisto, o modelo alterado (MA) apresenta uma redução no tamanho das janelas da sala e do quarto do casal. Nos demais cômodos optou-se por manter as dimensões das janelas em consideração a área mínima de abertura de ventilação definido por norma. Ainda, utilizou-se uma cobertura exclusiva para a janela do quarto do casal, demonstrado na Figura 27.

Figura 27 – Cobertura exclusiva na janela do quarto de casal



Fonte: O autor

4.3.1 Materiais construtivos do modelo alterado (MA)

A Tabela 19 apresenta as propriedades térmicas dos materiais utilizados na cobertura.

Tabela 19 - Propriedades térmicas dos materiais da cobertura

Material	Condutibilidade térmica $\left(\frac{W}{mK}\right)$	Densidade $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Calor específico $\left(\frac{J}{kg.K}\right)$	Absortância solar (α)
Gesso	0,2	1200	1000	0,2
Pintura branca	-	-	-	0,2

Fonte: O autor

A Tabela 20 apresenta os elementos construtivos do modelo alterado Tabela 9. O forro é único elemento em que houve alteração completa dos materiais.

Tabela 20 - Elementos construtivos da habitação

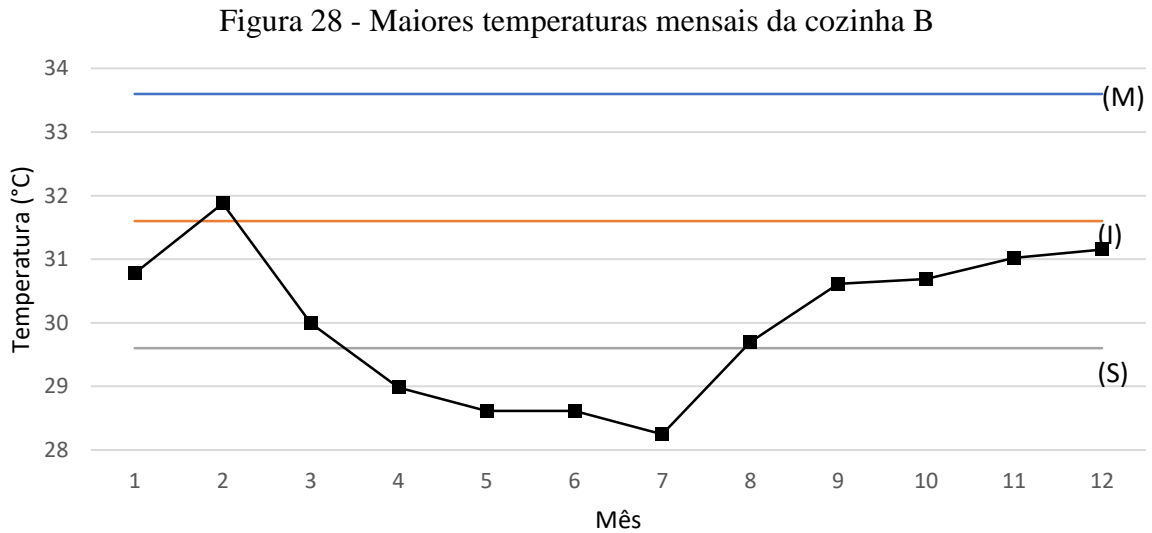
Parede com cerâmica	Espessura	Parede 1 face com cerâmica	Espessura
-	14,0 cm	-	13,0 cm
Parede sem cerâmica	Espessura	Piso	Espessura
-	14,0 cm	-	21,0 cm
Teto	Espessura	Janela	Espessura
Gesso	3,0 cm	Vidro	0,6 cm

Fonte: O autor

Destaca-se que os materiais dos pisos não sofreram substituição. As paredes tiveram um acréscimo na argamassa de 2,5 cm nas paredes sem cerâmica, e 1,5 cm nas paredes com cerâmica. A janela da sala teve redução de 1,45m x 1,40m para 1,20m x 1,00m e a janela do quarto do casal teve redução de 1,50 m x 1,00m para 1,20m x 1,00m.

4.3.2 Simulação do MA

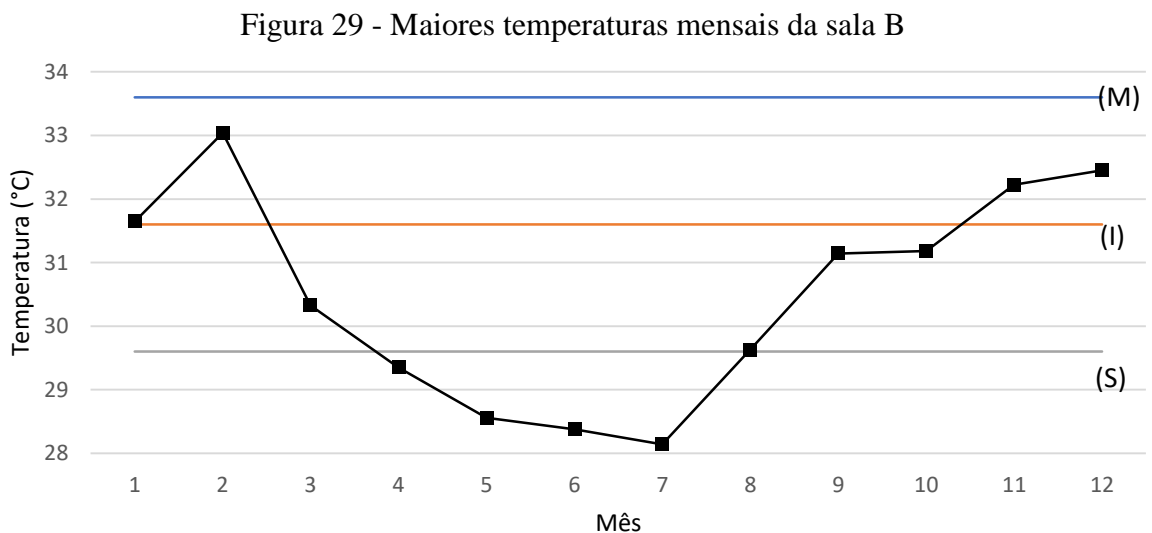
O Figura 28 apresenta o comportamento térmico da zona térmica da cozinha.



Legenda: (M) Mínimo; (I) Intermediário; (S) Superior; —■— COZINHA B
 Fonte: O autor.

Nota-se que o comportamento térmico da cozinha apresenta desempenho térmico intermediário nos meses mais quentes, com exceção do mês de fevereiro, onde apresenta desempenho mínimo (31,87° C). A

Figura 29 apresenta o comportamento térmico da sala B.

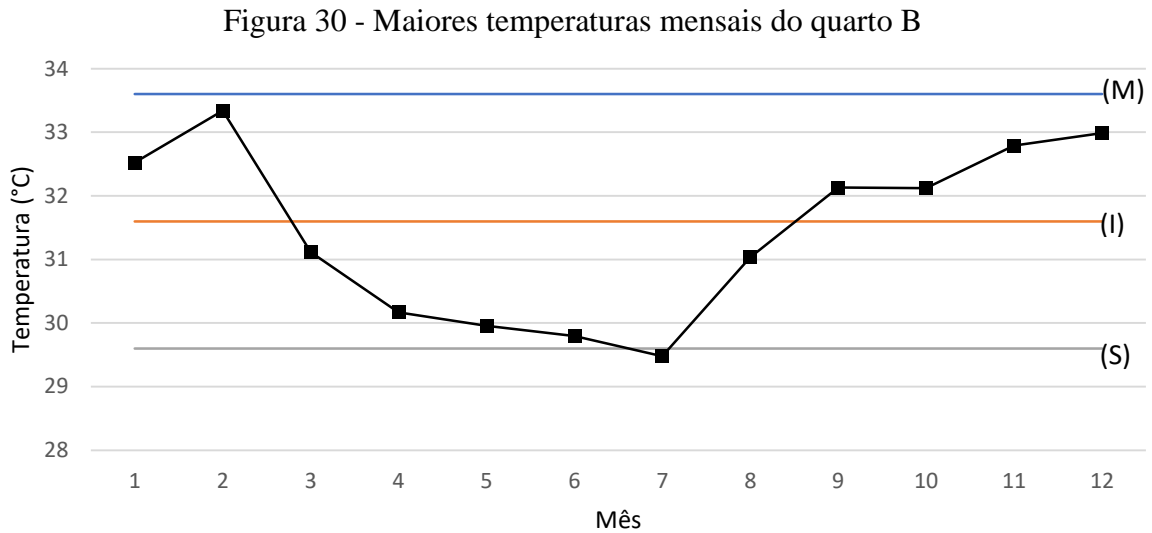


Legenda: (M) Mínimo; (I) Intermediário; (S) Superior; —■— SALA B
 Fonte: O autor.

A sala B apresentou uma melhora significativa no desempenho térmico em todos os meses do ano, possuindo desempenho térmico mínimo durante os meses mais quentes e

registrando a temperatura mais elevada em fevereiro, atingindo $33,03^{\circ}\text{C}$. O desempenho superior é alcançado nos meses entre abril e julho.

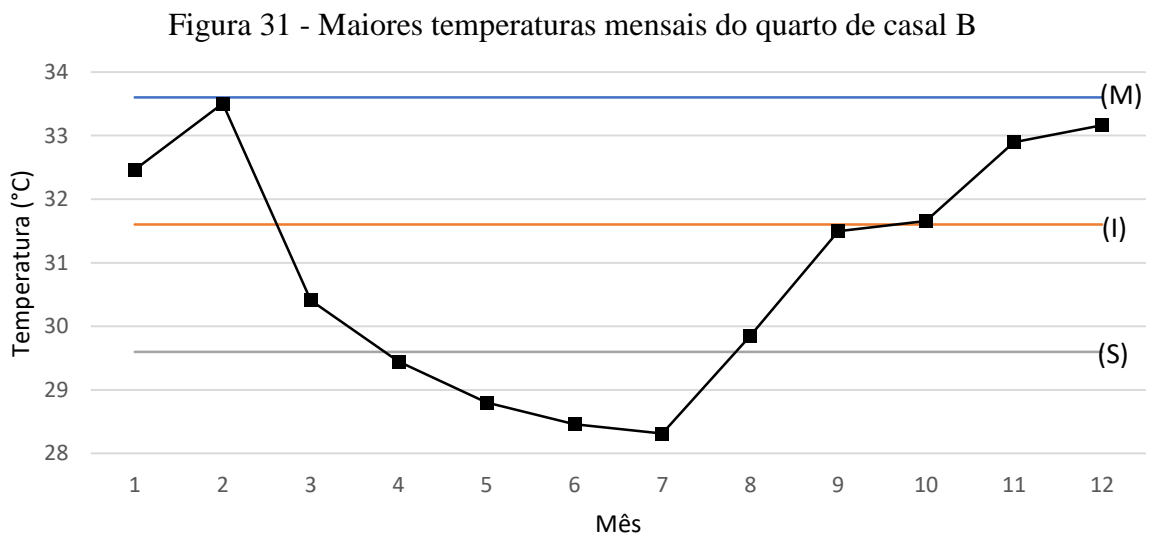
A Figura 30 apresenta o comportamento térmico do quarto B.



Legenda: (M) Mínimo; (I) Intermediário; (S) Superior; —■— QUARTO (SOLTEIRO) B
Fonte: O autor.

Assim como a sala B, o quarto apresenta desempenho térmico mínimo durante os meses mais quentes, sendo registrado a temperatura máxima no mês de fevereiro, em torno de $33,33^{\circ}\text{C}$.

O Figura 31 apresenta o comportamento térmico do quarto de casal.



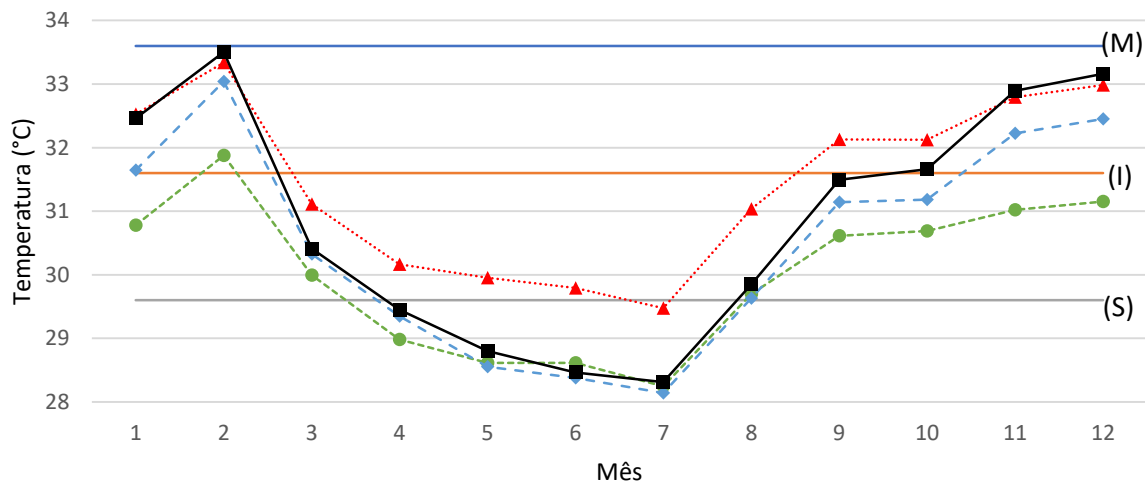
Legenda: (M) Mínimo; (I) Intermediário; (S) Superior; —■— QUARTO DE CASAL B
Fonte: O autor.

Assim como as demais zonas, o quarto de casal apresenta temperatura mais alta no mês de fevereiro, chegando a $33,50^{\circ}\text{C}$, atendendo ao requisito de desempenho térmico mínimo

durante os meses mais críticos do ano.

A Figura 32 reúne o comportamento térmico dos ambientes da HIS-B.

Figura 32 - Comparação do comportamento térmico dos ambientes da HIS-B



Legenda: (M) Mínimo; (I) Intermediário; (S) Superior; —■— Quarto Casal HIS-B; - - - ◆ - - - Sala HIS-B; - - - ▲ - - - Quarto HIS-B; - - - ● - - - Cozinha HIS-B.

Fonte: O autor.

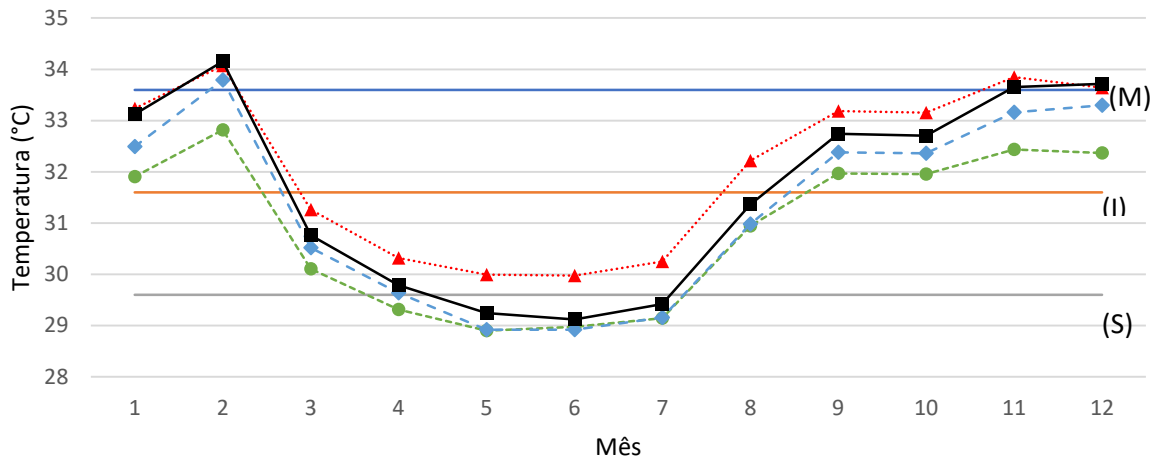
Destaca-se que o modelo alterado (MA) possibilitou o atendimento da edificação aos critérios de desempenho térmico exigido pela NBR 15.575-1 (2013). Registra-se que durante os meses mais quentes (janeiro, fevereiro, novembro e dezembro) a habitação apresenta desempenho térmico mínimo. Destaca-se, também, a melhora do desempenho durante os meses menos quentes, atingindo a condição de desempenho superior nos meses de abril a julho, nos cômodos do quarto do casal, sala e cozinha.

Apesar do modelo proposto já atingir aos parâmetros de desempenho térmico, optou-se por analisar o comportamento desta edificação sob as estratégias de sombreamento e ventilação adotadas no modelo base (MB) para realização de comparações.

4.3.2.1 Ventilação

A Figura 33 apresenta a comparação do desempenho térmico dos ambientes da habitação B considerando a renovação do volume de ar igual a cinco renovações por hora.

Figura 33 - Ambientes da HIS-B submetidos a estratégia de ventilação



Legenda: (M) Mínimo; (I) Intermediário; (S) Superior; —■— Quarto Casal HIS-B; - - - ◆ - - - Sala HIS-B;
 ▲ Quarto HIS-B; - - - ● - - - Cozinha HIS-B.

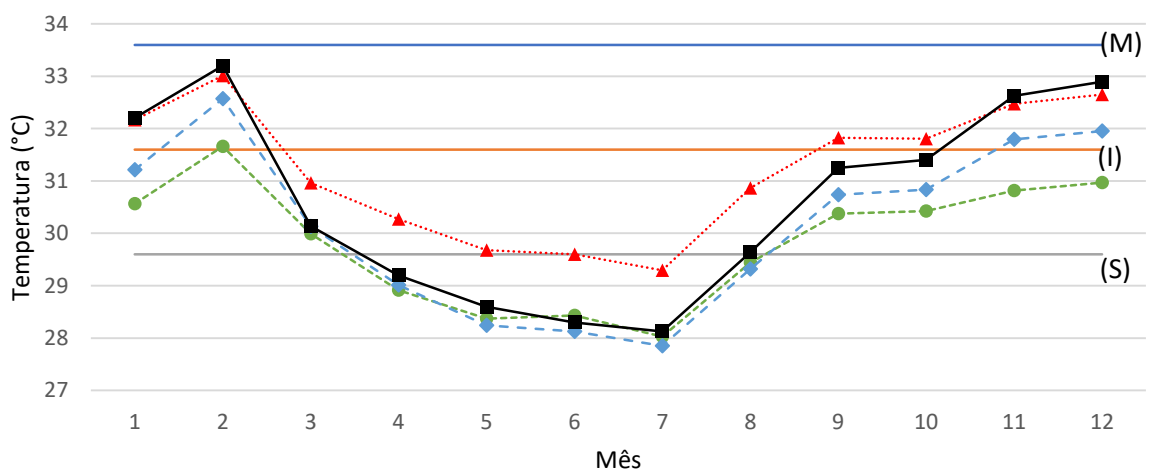
Fonte: O autor.

Como esperado, esta estratégia não proporcionou melhora do desempenho térmico para os ambientes, registrando-se a temperatura máxima de $34,15^{\circ}\text{C}$ no ambiente do quarto do casal. Com exceção da cozinha, o desempenho térmico insatisfatório é registrado nos meses de fevereiro, novembro e dezembro.

4.3.2.2 Sombreamento

A Figura 34 apresenta a comparação do desempenho térmico dos ambientes da habitação para a estratégia de sombreamento de 50% da abertura das janelas com uso de persiana.

Figura 34 - Ambientes da HIS-B submetidos a estratégia de sombreamento



Legenda: (M) Mínimo; (I) Intermediário; (S) Superior; —■— Quarto Casal HIS-B; - - - ◆ - - - Sala HIS-B;
 ▲ Quarto HIS-B; - - - ● - - - Cozinha HIS-B.

Fonte: O autor.

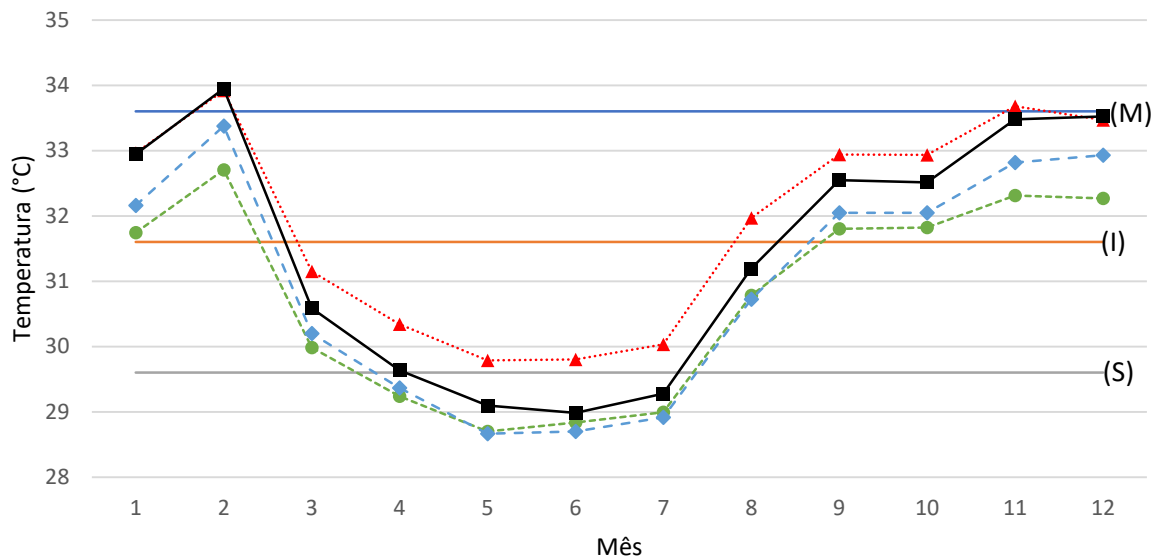
Nota-se que a estratégia de sombreamento proporcionou melhora significativa do desempenho térmico dos ambientes. A maior temperatura registrada ocorre no quarto de casal, registrando 33,20° C. As melhores condições ocorrem nos meses de abril a julho, onde os ambientes do quarto de solteiro, cozinha e o quarto de casal alcançam desempenho térmico superior.

4.3.2.3 Ventilação e sombreamento

O sombreamento utilizado nesta estratégia é o mesmo adotado pela estratégia anterior. A taxa de renovação do ar utilizada será de cinco renovação por hora. A

Figura 35 apresenta o comportamento térmico dos ambientes da edificação.

Figura 35 - Ambientes da HIS-B submetidos a estratégia de ventilação e sombreamento



Legenda: (M) Mínimo; (I) Intermediário; (S) Superior; —■— Quarto Casal HIS-B; - - - ◆ - - - Sala HIS-B; ▲ Quarto HIS-B; - - - ● - - - Cozinha HIS-B.

Fonte: O autor.

Por conta do aumento da taxa de renovação do ar, verifica-se que as temperaturas insatisfatórias ocorrem nos meses de fevereiro e novembro. A sala e a cozinha não registram condição insatisfatória.

4.3.2.4 Comparação das estratégias do MA

A Tabela 21 apresenta a comparação das temperaturas encontradas nas simulações.

Tabela 21 - Temperaturas encontradas pelo processo de simulação computacional na HIS-B

Ambientes	Modelo alterado	Ventilado	Sombreado	Ventilado e somb.	Mês
Sala	33,03° C	33,79° C	32,57° C	33,37° C	Fev.
Quarto solt.	33,33° C	34,07° C	33,01° C	33,92° C	Fev.
Quarto casal	33,50° C	34,15° C	33,20° C	33,94° C	Fev.
Cozinha	31,87° C	32,81° C	31,66° C	32,70° C	Fev.

Fonte: O autor

Dentre as situações apresentadas, o melhor cenário ocorre com o uso do sombreamento. O aumento da ventilação piora todos os cenários, sendo necessário aos moradores reduzirem os mecanismos de ventilação da residência durante os períodos mais quentes do ano, através do controle das aberturas nas janelas. O mês de fevereiro registra as maiores temperaturas na habitação.

O uso da cobertura externa no quarto do casal deve ser permanente na estrutura, visto que a habitação só atinge o desempenho mínimo com este mecanismo, registrando 33,50° C em condições normais. A cozinha é o único ambiente que não apresenta situação insatisfatória dentre as estratégias analisadas.

4.4 Comparação entre o MB e o MA

A Tabela 22 compara as temperaturas obtidas pela simulação computacional. Apresentam-se apenas as dependências de longa permanência com comportamento insatisfatório na análise do MB.

Tabela 22 - Temperaturas obtidas para o MB e o MA

Simulações	MB			MA		
	Sala	Quarto solt.	Quarto casal	Sala	Quarto solt.	Quarto casal
Normal	34,62° C	34,31° C	35,16° C	33,03° C	33,33° C	33,50° C
Ventilado	35,08° C	34,80° C	35,08° C	33,79° C	34,07° C	34,15° C
Sombreado	33,91° C	34,00° C	34,53° C	32,57° C	33,01° C	33,20° C
Ventilado e somb.	34,33° C	34,66° C	34,94° C	33,37° C	33,92° C	33,94° C

Fonte: O autor.

Dentre os modelos, o MA apresenta vantagens em todos os cenários analisados, sendo a estratégia de sombreamento mais eficaz na redução das temperaturas, registrando 32,57° C na dependência da sala. A maior diferença de temperatura entre o cenário normal (sem uso das estratégias) do MB e o MA, chega a 1,66° C no ambiente do quarto do casal. Este resultado evidencia a eficiência das combinações do uso do toldo junto com a redução da janela

no quarto do casal.

Cabe destacar que o MA atende aos requisitos de desempenho térmico da NBR 15.575-1 (2013). Dentre as estratégias, o sombreamento é a única que melhora o desempenho térmico, não apresentando situações críticas. Assim, a ventilação deve ser controlada na habitação durante os períodos mais quentes do ano a fim de evitar condições térmicas insatisfatórias.

Ainda, ressalta-se que a melhora do desempenho foi alcançada por meio de alterações simples nos materiais construtivos, seguindo o objetivo social do estudo, propondo alternativas viáveis financeiramente para os moradores. A seguir é apresentado a análise de custo entre o MB e o MA.

4.5 Análise de custo entre o MB e o MA

A análise de custo foi realizada apenas para o sistema do modelo base (casa como construída) e do modelo alterado (proposições de mudança em sistemas específicos), conforme apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 - Comparativo de custo entre o MB e o MA

Sistema	Modelo Base (MB)		Modelo alterado (MA)		Diferença	
	Material	Custo	Material	Custo	R\$	%
Forro	PVC	R\$ 1587,98	Gesso	R\$ 1552,69	-R\$ 35,29	2%
Janelas	Vidro e alumínio	R\$ 1488,47	Vidro e alumínio	R\$ 1011,99	-R\$ 476,48	32%
Paredes	Emboço; esp. 1,5 cm	R\$ 4315,15	Emboço; esp. 2,0 cm	R\$ 6445,23	R\$ 2.130,08	49%
Pintura Telhas	-	-	Tinta branca	R\$ 578,72	R\$ 578,72	100%
Toldo	-	-	Telha e madeira	RS 144,00	R\$ 144,00	100%
TOTAL		R\$ 7391,60		R\$ 9732,63	R\$ 2.341,03	32%

Verifica-se que o modelo alterado implicaria em um aumento de custo de cerca de R\$ 2341,03 para que a residência fique nos valores de desempenho térmico exigidos por norma. Comparando-se a eficiência térmica, têm-se a redução próxima a 1,6° C na sala e no quarto de casal.

Apesar de um acréscimo aparentemente alto, o conforto térmico produzido por uma edificação vai além de ganhos econômicos medidos imediatamente, ao proporcionar mais qualidade de vida, redução de uso de ventiladores que podem provocar doenças no sistema respiratório, entre outros benefícios.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo analisar o desempenho térmico de Habitações de Interesse Social (HIS) no semiárido nordestino. Para tal, caracterizou-se uma HIS típica, executada pelo projeto minha casa minha vida e localizada na cidade de Crateús, oeste do estado do Ceará, objetivo específico a).

Conforme o método simplificado e de simulação computacional prescritas nas normas ABNT NBR 15575-1 (2003) e ABNT NBR 15220-3 (2005), constatou-se o não atendimento dos critérios mínimos de conforto térmico, objetivo específico b), o que suscitou a proposição de alternativas de baixo custo para melhorar o conforto térmico da edificação, objetivo específico c).

Verificou-se no método de simulação computacional que os principais mecanismos de dissipação térmica sugeridos pelas norma ABNT NBR 15.575, como o aumento da ventilação e o sombreamento, não foram capazes de prover conforto térmico para a edificação de modo a garantir o critério de desempenho mínimo. Assim, mudanças mais substanciais como a espessura de revestimentos internos, a mudança do tipo de forro, pintura das telhas e a utilização de toldos de telha cerâmica se mostraram alternativas meritosas.

Estas mudanças propiciaram reduções de temperatura de até 1,6°C na edificação sem o uso de equipamentos mecânicos, tendo-se verificado o baixo custo de implementação, cerca de R\$ 2341,03, cuja análise estava prevista no objetivo específico c). Desta foram, pode-se concluir que as Habitações de Interesse Social de regiões semiáridas não provêm conforto térmico para seus habitantes.

As melhorias propostas podem implicar em redução de custos de operação da edificação com a diminuição do uso de ventiladores e ar condicionados, servindo de referência para a comunidade local modificar suas habitações e futuros projetos e assim aumentar sua qualidade de vida.

Como limitações, é válido salientar a própria natureza da pesquisa que consistiu de um estudo de caso único e exploratório da zona bioclimática 7. Este tipo de pesquisa não intende realizar generalizações estatísticas, mas apresentar um fenômeno em detalhes que permita entender o fenômeno em outras realidades. Ao tomar uma HIS do Programa Minha Casa Minha Vida, o estudo torna-se consistente, devido à sua representatividade das construções que foram implantadas no âmbito do programa com mais de 600 mil unidades entregues somente no Nordeste.

Para estudos futuros recomenda-se:

- a) Analisar outras tipologias construtivas da região do semiárido nordestino variando, inclusive, o padrão da residência (popular, normal e alto);
- b) Analisar a percepção de conforto térmico, por meio de um estudo de campo com os moradores dos Residenciais Dom Fragoso I e II para auferir se a sensação de conforto térmico está em consonância do estudo realizado;
- c) Realizar medições de temperatura no campo para comparar com os dados de simulação;

REFERÊNCIAS

ABREU, A. *et al.* **Análise Comparativa dos Procedimentos de Desempenho Térmico da NBR 15.575 em Edificação multifamiliar.** In: XIV ENCONTRO NACIONAL E X LATINO-AMERICANO DE CONFORTO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Balneário Camboriu, 2017. Anais... Balneário Camboriu: ENCAC/ELACAC, 2017.

ASHRAE. “Standard 55: thermal environment conditions for human occupancy”. Atlanta: **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers**, 2004.

ARANTES, B. **Conforto térmico em habitações de interesse social – um estudo de caso.** 2013. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Bauru, Bauru, 2013.

BARBOSA, G. *et al.* Desempenho térmico de habitações populares em Alagoas: uma aplicação da NBR 15575. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

BARBOSA, S. A. *et al.* I. B. B. E. Método de utilização do programa Energyplus para verificação de desempenho térmico de ambientes com fachadas duplas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 121-134, jul./set. 2013.

BOSA, A. **Análise de eficiência energética de projetos de residências do Programa Minha Casa Minha Vida.** 2017. 83f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CASTRO, A. *et al.* Medidas de refletância de cores de tintas através da análise espectral. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.3,n. 2, p.69-76, abr./jun. 2003.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013.** 2 ed. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

COLLIS, J.; HUSSEY, R. **Pesquisa em administração:** um guia prático para alunos de graduação e pós-graduação. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

COOPER, D.; SCHINDLER, P. **Métodos de Pesquisa em administração.** 12 ed., Porto Alegre: Amgh Editora, 2016.

DÖRFLER, Marianna; KRÜGER, Eduardo. Simulações de desempenho térmico de moradias do PMCMV em diferentes zonas bioclimáticas quanto aos aspectos de implantação, materialidade e sombreamento de aberturas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

ENERGYPLUS. **Getting Started with EnergyPlus Basic Concepts Manual** - Essential Information you Need about Running EnergyPlus. Outubro de 2013. Disponível em: < https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/GettingStarted.pdf > Acessado em: 25 nov. 2019.

- FANGER, P. O. **Thermal Comfort: analysis and applications in environmental engineering**. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970. 244p.
- FROTA, A.; SCHIFFER, S. **Manual de Conforto Térmico**. 5 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.
- FROTA, A.; SCHIFFER, S. **Manual de Conforto Térmico**. 7 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2006.
- GRAÇA, V. A. C. da; KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; Petreche, J. R. “Metodologia de avaliação de conforto ambiental de projetos escolares usando o conceito de otimização multicritério”. **Ambiente Construído**, 2004, v. 4, p. 19-35.
- GRIGOLETTI, G. de C.; LINCK, G. I. Análise de comportamento térmico de HIS térreas unifamiliares em Santa Maria, RS. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 109-123, abr./jun. 2014.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais climáticas do Brasil. 2018. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em: 09 dez. 2019.
- HÖJER, M.; WANGEL, J. Smart sustainable cities: Definition and challenges. In: HILTY, L. M.; AEBISCHER, B. (Ed.). **ICT Innovations for sustainability**. New York: Springer International Publishing, 2014. p. 333–349.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730; 2005. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of the thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. Geneva, Switzerland. Disponível em <<http://www.iso.ch>>, acesso em agosto/2019.
- LAMBERTS, R. **Conforto e Stress Térmico**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LabEEE (UFSC), junho de 2011.
- LAMBERTS, R.; CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R.; DE VECCHI, R. **Towards a Brazilian Standard on Thermal Comfort**. Research Report, Florianópolis. 2013. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/RP_Towards_a_Brazilian_Standard_Complete_Version.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2019.
- LAMBERTS, R. Desempenho térmica de edificações. Aula 03: Arquitetura e Clima. Disciplina ECV 5161 - UFSC. Florianópolis, 2016. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Aula-Arquitetura%20e%20Clima_0.pdf>. Acesso em: 12 de dez. 2019.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3 ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2014.
- LARUCCIA, M. Sustentabilidade e Impactos Ambientais da Construção Civil. **Revista ENIAC Pesquisa**, Guarulhos, , v. 3, n. 1, p. 69-84, jan-jun. 2014.

RIBEIRO, M. As normativas de desempenho térmico e o conforto do cliente. AGÊNCIA CBIC, 2018. Disponível em: <https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2018/11/CBIC_newsletter_166.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2019.

MELO, A.; WESTPHAL, F.; MATOS, M. **Apostilha do Curso Básico do Programa EnergyPlus**. Laboratório de Eficiência Energética em Edifícios – LabEEE (UFSC). Florianópolis, setembro de 2009. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202_Apostila_EnergyPlus_0.pdf> Acessado em: 25 nov. 2019.

NEVES, L. de O.; da SILVA, F. M. da. Análise paramétrica de chaminés solares visando à otimização de desempenho em climas típicos do território brasileiro. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 163-182, jan./mar. 2017.

NEVES, L de O.; RONIZ, M. Procedimentos estimativos do potencial de uso de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 177-192, jan./mar. 2012

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Nova Delimitação do Semi-árido Brasileiro**. Brasília, 2005. Disponível em: <<http://www.integracao.gov.br/desenvolvimentoregional/publicacoes/delimitacao.asp>> Acessado em: 12 de dez. 2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro**: Perspectivas e contribuições em eficiência energética. Brasília, 2018. Disponível em: < http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT%20EPE%20030_2018_18Dez2018.pdf > Acessado em: 25 nov. 2019.

PROJETEE. Dados climáticos - Crateús. Disponível em: <http://projeteee.mma.gov.br/dados-climaticos/?cidade=CE++Crate%C3%BA&id_cidade=bra_ce_crateus.818300_inmet> Acessado em: 12 de dez. 2019.

PROJETEE. Inércia térmica para aquecimento. Disponível em: <<http://projeteee.mma.gov.br/estrategia/inercia-termica-para-aquecimento/>> Acessado em: 12 de dez. 2019.

SILVA, M.; FORTE, S. Estratégias de Criação de Valor Compartilhado a Serem Adotadas diante de Cenários Prospectados para a Indústria da Construção Civil no Ceará. **Future Journal**, São Paulo, v.8, n. 3, p. 227-254, set-dez. 2016.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. Conselho deliberativo. Resolução N° 107/2017, de 20 de julho de 2017. **Estabelece critérios técnicos e científicos para a delimitação do Semiárido Brasileiro e procedimentos para revisão de sua abrangência**. Recife, 27 de julho de 2017.

SORGATO, M.; MELO, A.; LAMBERTS, R. **Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15575**. In: XII ENCONTRO NACIONAL E VII LATINOAMERICANO DE CONFORTO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Brasília, 2013. Paranoá, Brasília, n° 12, p13-22, 2014.

SOUZA, H.; RODRIGUES, L. Ventilação natural como estratégia para o conforto térmico em edificações. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, vol. 65, n. 2, p. 189-194, abr-jun. 2012.

WONG, P.C.; PRASAD, D.; BEHNIA, M. A New Type of Double-Skin Façade Configuration for the Hot and Humid Climate. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 40, p. 1941-1945, 2008.

YIN, R. K. **Estudo de caso**. 2. ed., Porto Alegre: Bookman, 2010.

ANEXO A – COMPOSIÇÕES DE CUSTO UTILIZADAS NA ANÁLISE

CÓDIGO	DISCRIMINAÇÃO DOS SERVIÇOS	UNID.	PREÇO UNIT. S/ BDI	PREÇO UNIT. C/ BDI
	ESQUADRIAS E FERRAGENS			
94570 (SINAPI)	JANELA DE ALUMÍNIO DE CORRER, 2 FOLHAS, FIXAÇÃO COM PARAFUSO SOBRE CONTRAMARCO (EXCLUSIVE CONTRAMARCO), COM VIDROS PADRONIZADA. AF_07/2016	M2	R\$ 333,33	R\$ 421,66
	PAREDES			
87529 (SINAPI)	MASSA ÚNICA, PARA RECEBIMENTO DE PINTURA, EM ARGAMASSA TRAÇO 1:2:8, PR EPARO MECÂNICO COM BETONEIRA 400L, APLICADA MANUALMENTE EM FACES INTERNAS DE PAREDES, ESPESSURA DE 20MM, COM EXECUÇÃO DE TALISCAS. AF_06/2014	M2	R\$22,27	R\$ 28,17
87543 (SINAPI)	MASSA ÚNICA, PARA RECEBIMENTO DE PINTURA OU CERÂMICA, EM ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA, PREPARO MECÂNICO, APLICADO COM EQUIPAMENTO DE MISTURA E PROJEÇÃO DE 1,5 M3/H DE ARGAMASSA EM FACES INTERNAS DE PAREDES, ESPESSURA DE 5MM, SEM EXECUÇÃO DE TALISCAS. AF_06/2014	M2	R\$ 228,79	R\$ 14,91
	FORRO			
C4285 (SEINFRA)	FORRO DE GESSO ACARTONADO ARAMADO - FORNECIMENTO E MONTAGEM	M2	R\$ 35,20	R\$ 44,53
C4468 (SEINFRA)	FORRO PVC - LAMBRI (100x6000 OU 200x6000)mm - FORNECIMENTO E MONTAGEM	M2	R\$ 34,87	R\$ 36,00
	PINTURA			
84651 (SINAPI)	PINTURA COM TINTA IMPERMEAVEL MINERAL EM PO, DUAS DEMASOS	M2	R\$ 7,49	R\$ 9,47

Obs. 01: As composições das paredes referem-se a camada do emboço, sendo a única camada a variar de espessura, visto que o chapisco e reboco se mantêm constantes nas diversas paredes.

Obs. 02: O toldo da janela do quarto do casal teve sua composição de custo equivalente cobertura de telha cerâmica do SEINFRA, cód. C4466, de aproximadamente R\$ 75,00/ m².

Obs. 03: O BDI utilizado corresponde a 26,5%.