

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CONTRIBUIÇÃO PARA A MELHORIA DO CONFORTO TÉRMICO DE HABITAÇÕES  
DE INTERESSE SOCIAL RESPEITANDO LIMITAÇÕES TÉCNICAS E DE CUSTOS

por

Mateus Coimbra Gus

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2019



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

CONTRIBUIÇÃO PARA A MELHORIA DO CONFORTO TÉRMICO DE HABITAÇÕES  
DE INTERESSE SOCIAL RESPEITANDO LIMITAÇÕES TÉCNICAS E DE CUSTOS

por

Mateus Coimbra Gus

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Paulo O. Beyer

Prof. Cirilo S. Bresolin

Prof. Volnei Borges

Porto Alegre, 21 de junho de 2019

“palavra puxa palavra  
uma ideia traz a outra  
assim se faz um livro  
um governo ou uma revolução...”

Machado de Assis

## AGRADECIMENTOS

Agradeço antes de tudo à Isabela, minha mãe, que nos seus rascunhos arquitetou dois filhos, de quem é não só mãe, mas também pai e amiga. Ao Márcio, meu pai, com quem divido rabiscos conflituosos tão preciosos na compreensão da vida.

Às várias famílias, de sangue ou não, obrigado, vocês são a fundação da construção que sou. Em especial ao Val e à Márcia, que não cabem nas prateleiras de descrições familiares.

Às amigas e amigos, que comigo descobrem o traço do concreto e do abstrato.

Ao Paralelo, Leta, JPÉE, B2P e às minhas professoras e professores que reconheceram que o aprendizado só não é opressor quando as posições de professor e aluno se confundem e invertem. Obrigado por me ajudarem a encontrar as chaves certas para cada porta.

Ao Paulo, meu orientador, agradeço pela atenção, apoio e sinceridade. Nossas conversas foram estruturantes nesta empreitada.

Aos companheiros e companheiras de luta, em especial ao EMÁV e ao Coletivo Ambiente Crítico, que comigo constroem janelas, para que paredes não virem muros.

À COCEARGS, cujo trabalho é tão importante, e especialmente à Fê, agradeço por terem me recebido e aberto o caminho para um TCC que se comunica diretamente com uma demanda popular.

À Alessandra, que me ajuda a entender como usar as cortinas.

E à Cons, que comigo divide os (in)cômodos mais íntimos, transformando até o dia mais cinzento em um libertador passeio de bicicleta, meu agradecimento mais profundo. Teus trabalhos me abrem portas como tu não imaginas.

GUS, M. C. **Contribuição para a melhoria do conforto térmico de habitações de interesse social respeitando limitações técnicas e de custos.** 2019. 19f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

## RESUMO

No Brasil, os projetos de habitação de interesse social são vinculados a um controle muito grande de custos, que se traduz no uso de materiais de baixa qualidade e de tecnologias de baixo custo. O objetivo deste trabalho é propor soluções de projeto para habitações de interesse social envolvendo materiais, revestimentos e geometria. O método utilizado compreende a metodologia estatística de projeto de experimentos (DoE) e o uso do software de simulação termo energética de edificações *EnergyPlus*, para um estudo de caso real de uma edificação unifamiliar térrea localizada na zona rural de Bagé (RS). Foram utilizados dois métodos para a avaliação de conforto térmico da edificação. O primeiro é aquele prescrito pela NBR15575 e o segundo se baseia no cálculo de graus-hora de resfriamento e aquecimento. Foram variados os seguintes parâmetros da edificação: cor das paredes externas e do telhado, orientação solar e uso de isolamento no forro. Foram obtidas equações para modelar os valores de temperatura e graus-hora dos ambientes da edificação. Os indicadores estatísticos encontrados confirmam a relevância dos parâmetros estudados e sua independência linear. Através do projeto de experimentos, foi possível compreender de que forma os parâmetros influenciam uns aos outros no efeito que exercem sobre a resposta estudada. Os resultados do procedimento da norma NBR15575 sugerem estratégias para priorizar o conforto térmico no verão. Os resultados de número de graus-hora indicam que o inverno é mais severo na edificação em comparação ao verão. Ambas as metodologias sugerem que é possível melhorar o conforto térmico do projeto atual com decisões que não impactam no custo da edificação. O uso de isolamento no forro, que aumenta o custo da edificação, é a única solução que traz melhorias em conforto térmico para inverno e verão simultaneamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Habitação de interesse social, Conforto térmico, Projeto de experimentos.

GUS, M. C. **Contribution for the improvement of thermal comfort in social housing respecting technical and costs limitations.** 2019. 19f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

#### ABSTRACT

In Brazil, social housing is connected to significant cost restrictions, resulting in the use of low-quality material and low-cost technologies. The objective of this work is to propose design solutions involving materials and geometry for social housing. The methodology includes a design of experiments (DoE) approach and the use of *EnergyPlus* simulation software for a real case of study of a single-family house located in the suburbs of Bagé (RS). Two methods were used to evaluate thermal comfort on the building. The first one is prescribed by the Brazilian standard of building performance NBR15575 and the second one uses cooling and heating degree-hours. The following parameters were studied: color of exterior wall, color of the roof, solar orientation and the utilization of insulation on the ceiling. Nonlinear regression was used to obtain equations for modeling the temperature and degree-hour values of the building. The statistical indicators found confirm the relevance of the studied parameters and their linear independence. Through the DoE methodology, it was possible to understand how the parameters influence each other in the effect they have on the studied response. The results of the procedure of NBR15575 standard suggest strategies to prioritize thermal comfort in the summer. The results of number of degree-hours indicate that the winter is more severe for the building compared to the summer. Both methodologies suggest that it is possible to improve the thermal comfort of the current project with decisions that do not impact on the cost of the building. The use of insulation in the ceiling, which increases the cost of building, is the only solution that improves comfort of winter and summer simultaneously.

**KEYWORDS:** Social housing, Thermal comfort, Design of experiments

LISTA DE FIGURAS	Pág.
Figura 3.1 Fluxograma de planejamento do trabalho (baseado em Stoecker, 1989) .....	5
Figura 3.2 Fluxograma das etapas do trabalho .....	5
Figura 4.1 Planta baixa da casa. Fonte: COCEARGS.....	6
Figura 4.2 Modelo da casa no <i>GoogleSketchup</i> .....	6
Figura 5.1 Gráfico de Pareto da resposta SC-NBR-V.....	10
Figura 5.2 Exemplo de curvas de efeito de interação.....	10
Figura 5.3 Diagrama de varredura para as respostas de TBS <sub>i</sub> extremas, período frio.....	12

LISTA DE TABELAS		Pág.
Tabela 2.1	Definição de propriedades termo físicas de materiais e componentes (NBR 15220) .....	2
Tabela 4.1	Relação de materiais construtivos e suas propriedades termo físicas .....	7
Tabela 4.2	Critérios de avaliação de desempenho térmico generalizados para a Zona Bioclimática 2 e para a cidade de Bagé .....	7
Tabela 4.3	Códigos e símbolos utilizados na apresentação dos resultados .....	8
Tabela 4.4	Faixas de fatores controláveis .....	8
Tabela 4.5	Respostas estudadas .....	9
Tabela 5.1	Resultados de $TBS_i$ para o cenário base, de acordo com a NBR15575 .....	9
Tabela 5.2	Classificação das respostas dos casos simulados, de acordo com os níveis de desempenho previstos na NBR 15575.....	9
Tabela 5.3	Relevância estatística das variáveis na equação da temperatura crítica para o critério da NBR 15575 e $R^2$ .....	10
Tabela 5.4	Resumo dos resultados de GH .....	11
Tabela 5.5	Relevância estatística das variáveis na equação de GH .....	11
Tabela 5.6	Resumo das melhores configurações encontradas para cada resposta .....	12
Tabela 5.7	Orçamento da casa subdividido por categorias de custos. Fonte: COCEARGS. ....	13
Tabela 5.8	Indicador econômico e variação com relação ao caso base das respostas em termos de $\Delta TBS_i$ e $\Delta GH$ das melhores configurações encontradas .....	13
Tabela A.1	Temperatura de bulbo seco (TBS) dos dias típicos para a análise de desempenho da NBR15575 (frequência de ocorrência de 5%) .....	16
Tabela B.1	Casos obtidos para uma malha central composta de face centrada .....	17
Tabela C.1	Termos das equações encontradas por regressão não-linear para a determinação da temperatura máxima/mínima do típico no ambiente .....	18
Tabela C.2	Termos das equações encontradas por regressão não-linear para a determinação dos GHA e GHR .....	18
Tabela D.1	Casos com melhores indicadores econômicos para os critérios da NBR 15575 .....	19
Tabela D.2	Casos com melhores indicadores econômicos para os critérios de GHA e GHR .....	19

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

DoE	Projeto de experimentos ( <i>design of experiments</i> )
EP	<i>EnergyPlus</i>
ZB 2	Zona Bioclimática Brasileira 2
TBS <sub>i</sub>	Temperatura de bulbo seco interna ao ambiente
TBS <sub>e</sub>	Temperatura de bulbo seco do meio externo
RPP	Recinto de permanência prolongada
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
GH	Graus-hora
GH <sub>R</sub>	Graus-hora de resfriamento
GH <sub>A</sub>	Graus-hora de aquecimento
T <sub>op</sub>	Temperatura operativa
T <sub>op,h</sub>	Temperatura operativa horária
T <sub>B</sub>	Temperatura de base
T <sub>r</sub>	Temperatura média radiante
$\alpha_p$	Absortância à radiação solar das paredes externas
$\varphi$	Orientação solar da edificação
$\alpha_t$	Absortância à radiação solar do telhado
I	Isolamento no forro
MCMV	Programa Minha Casa Minha Vida
COCEARGS	Cooperativa Central dos Assentamentos do Rio Grande do Sul
MST	Movimento dos Trabalhadores Rurais sem Terra
D1	Ambiente Dormitório 1
D2	Ambiente Dormitório 2
SC	Ambiente Sala-Cozinha

SUMÁRIO	Pág.
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Revisão Bibliográfica .....	1
1.2. Objetivos.....	2
2. FUNDAMENTOS.....	2
2.1. Propriedades termo físicas dos materiais.....	2
2.2. Análise térmica de edificações.....	3
2.3. Simulação termo energética de edificações .....	4
2.4. Projeto de experimentos .....	4
3. METODOLOGIA.....	4
4. ESTUDO DE CASO.....	6
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	9
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
Apêndice A – Dias típicos de projeto para Bagé (RS). .....	16
Apêndice B – Casos obtidos para uma malha central composta de face centrada.....	17
Apêndice C – Termos das equações.....	18
Apêndice D – Indicadores econômicos.....	19

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo a Fundação João Pinheiro, 2012, o déficit habitacional, em 2009, era de 6 milhões de pessoas no Brasil e de 225 mil no Rio Grande do Sul. Em 2009, o Governo Lula lançou o Minha Casa Minha Vida (MCMV), programa que visava reduzir estes números no país inteiro. Em 2019, a Caixa Econômica Federal informou que mais de 16,3 milhões de pessoas (7,7% da população do país) compraram um imóvel com o programa (Caixa Econômica Federal, 2019). Os grandes investimentos no MCMV beneficiaram, portanto, não somente a população em situação de déficit habitacional.

Os grandes empreendimentos de habitação social são cercados de questões como especulação imobiliária, difícil adaptação das famílias àquela organização do espaço, distanciamento dos centros empregatícios, dentre outros. Apesar dos números expressivos, os projetos de habitação social são caracterizados por investimentos muito baixos por beneficiário. Segundo Benetti, 2012, apud Marroquim e Barbirato, 2016, no projeto da habitação social, “qualquer gesto pressupõe um controle muito grande de custos, que infelizmente traduz-se numa pobreza de propostas muito grave”. A pobreza de recursos se reflete não somente na localização geográfica dos empreendimentos, como também nas tecnologias de projeto, técnicas construtivas, materiais e mão de obra utilizados.

Este trabalho utiliza conhecimentos técnicos para contribuir com a qualificação da habitação de interesse popular. O trabalho realizado em uma Universidade rompe com a barreira de custos que torna inviável a incorporação de ferramentas tecnológicas, tais como a simulação numérica, neste tipo de projeto. Assim se manifesta a importância da Universidade como ente de interesse público.

### 1.1. Revisão Bibliográfica

Sorgato, 2009, investigou as influências do envoltório no desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares. O estudo foi realizado através de simulação termo energética de edificações (*EnergyPlus*) e utilizou o parâmetro de graus-hora de resfriamento para a avaliação. As propriedades radiantes da cobertura e das paredes apresentaram influência significativa no desempenho das edificações de interesse social estudadas.

Soares et al., 2014, analisaram e avaliaram a pertinência dos limites estabelecidos pela NBR 15575, para a Zona Bioclimática 2 (ZB 2), através da simulação termo energética de edificações, utilizando uma edificação térrea de interesse social. Os autores concluíram que o método de simulação é incoerente com as determinações do método simplificado previsto pela norma, que estabelece características mínimas para os materiais da edificação. Além disso, concluíram que a análise anual do parâmetro graus-hora de desconforto tem resultados mais coerentes com aqueles do método simplificado.

A incerteza do método de simulação da NBR 15575 para a avaliação do desempenho térmico de edificações é discutida por Silva et al., 2015. Através da simulação computacional no programa *EnergyPlus*, analisou-se variáveis não consideradas pela norma em questão, tais como velocidade do vento, algoritmo de cálculo da irradiação solar e tipo de céu. Foi utilizado projeto de experimento estatístico com para determinar a incerteza dos resultados e a sensibilidade das variáveis no nível de classificação de desempenho. Concluiu-se que as variáveis desconsideradas pela NBR 15575 na criação de um dia típico exercem considerável influência sobre o resultado de desempenho, gerando imprecisão nos resultados.

Alguns trabalhos citados criticam o método de simulação da norma NBR 15575. O uso de dias típicos, a forma como são obtidos e os dados considerados por eles, além dos níveis de desempenho, são questionados. O presente trabalho se baseou em uma edificação de interesse social, térrea e unifamiliar, também para a Zona Bioclimática 2.

As referências citadas variaram as propriedades termo físicas de seus componentes sem as vincular a materiais existentes de um projeto real. Por exemplo, a capacidade térmica e o coeficiente global de transferência de calor de uma parede são consequências dos materiais utilizados, que estão disponíveis dentro das gamas comerciais existentes. Estas propriedades

não possuem, portanto, um espectro de variação contínuo. No entanto, a contribuição dos trabalhos citados não pode ser negligenciada. Eles fornecem conclusões importantes e podem servir como referencial para outros trabalhos.

Não foi encontrado estudo que utilize a metodologia de Projeto de Experimentos na avaliação dos parâmetros da edificação, abordagem que pode ser interessante para melhor compreender de que forma os parâmetros influenciam uns aos outros e que será utilizada neste trabalho.

## 1.2. Objetivos

A questão de pesquisa do presente trabalho é: “O que é possível fazer para melhorar a habitabilidade de habitações de interesse popular, buscando maior conforto térmico e respeitando limitações de custos e capacidades construtivas?”

Com base nesta questão, define-se o objetivo como: “Propor soluções de projeto envolvendo materiais, revestimentos e geometria para habitações de interesse social, através da simulação termo energética de edificações”.

Os objetivos específicos do trabalho são:

a) Analisar soluções propostas combinando as análises de temperatura da NBR15575, de graus-hora de resfriamento e aquecimento e critérios econômicos.

b) Investigar a influência dos fatores mais relevantes para o comportamento da edificação empregando-se a metodologia de projeto de experimentos.

## 2. FUNDAMENTOS

### 2.1. Propriedades termo físicas dos materiais

A Tabela 2.1 mostra a definição de propriedades termo físicas de materiais e componentes (NBR 15220).

Tabela 2.1 - Definição de propriedades termo físicas de materiais e componentes (NBR 15220).

Propriedades	Símbolo	Definição	Unidade
Resistência térmica total	Rt	Somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais interna e externa.	(m <sup>2</sup> K)/W
Coeficiente global de transferência de calor	U	Inverso da resistência térmica total.	W/(m <sup>2</sup> K)
Capacidade térmica	C	Quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema	J/K
Capacidade térmica de componentes	Ct	Quociente da capacidade térmica de um componente pela sua área.	J/(m <sup>2</sup> K)
Absortância à radiação solar*	α	Quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície.	adim.
Emissividade à radiação solar**	ε	Quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura.	adim.
Fator solar de elementos transparentes ou translúcidos	FSt	Quociente da taxa de radiação solar diretamente transmitida através de um componente transparente ou translúcido, sob determinado ângulo de incidência, mais a parcela absorvida e posteriormente retransmitida para o interior, pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo.	adim.

\* Chamada simplesmente de “absortância” no desenvolvimento do trabalho.

\*\* Chamada simplesmente de “emitância” no desenvolvimento do trabalho.

O uso do termo “absortância” pela NBR15220 provoca divergências. Incropera et al., 2007, define absortividade como “uma propriedade que determina a fração da irradiação que é absorvida por uma superfície”. A absortividade total para radiação solar é a absortividade considerando-se todas as direções e o espectro de luz equivalente àquele de um corpo negro a 5800 K. Serão utilizados os termos “absortância” e “emitância” como na NBR15575.

## 2.2. Análise térmica de edificações

A norma de desempenho NBR15575 estabelece exigências de desempenho térmico para edificações em cada zona bioclimática brasileira. A avaliação é realizada através de um procedimento chamado de simplificado (normativo), que estabelece parâmetros mínimos para as propriedades dos materiais da edificação. Quando o resultado for insatisfatório, fica prescrito o uso de simulação computacional.

A NBR15575 prevê a determinação de dois dias típicos, um para inverno e outro para verão, nos quais a simulação deve ser rodada. O método de determinação dos dias típicos não é determinado pela norma de forma clara. Uma vez determinados os dias típicos, avalia-se o desempenho no inverno a partir da comparação da mínima temperatura de bulbo seco interna (TBS<sub>i</sub>) com a mínima temperatura de bulbo seco externa (TBS<sub>e</sub>). Para o verão, se comparam as máximas TBS<sub>i</sub> e TBS<sub>e</sub>. As condições devem ser atendidas para todos os recintos de permanência prolongada (RPP), como dormitórios e sala.

Outro método de avaliação térmica de edificações é definido pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) e consiste na determinação dos graus-hora (GH) de resfriamento (GH<sub>R</sub>). Este parâmetro é definido como o somatório da diferença entre a temperatura operativa horária (T<sub>op,h</sub>) e a temperatura de base (T<sub>B</sub>), quando a primeira está acima da temperatura de base. O conceito será utilizado de forma análoga para os graus-hora de aquecimento (GH<sub>A</sub>).

A temperatura operativa (T<sub>op</sub>) é uma média ponderada em função da velocidade do ar no ambiente. Na ausência de dados de velocidade do ar no ambiente, caso deste trabalho, a T<sub>op</sub> é apresentada pela Equação 1 (RTQ-R).

$$T_{op} = \frac{T_r + T_a}{2} \quad (2.1)$$

onde  $T_r$  é a temperatura média radiante (°C) e  $T_a$  é a temperatura de bulbo seco do ar (°C) no ambiente.

A temperatura de base é obtida pelos critérios de conforto para T<sub>op</sub> da ISO 7730/2005 (apud Sorgato, 2009), para atividades leves (70 W/m<sup>2</sup>). A faixa de T<sub>op</sub> para conforto em condição de inverno é de 18°C a 22°C e em condição de verão é de 23°C a 26°C. A T<sub>B</sub> é, portanto, de 26 °C para resfriamento e de 18 °C para aquecimento. As equações 2 e 3 descrevem o cálculo de GH.

$$GH_R = \sum_{h=1}^{nr} (T_{op,h} - 26) \quad (2.2)$$

$$GH_A = \sum_{h=1}^{na} (18 - T_{op,h}) \quad (2.3)$$

onde  $T_{op,h}$  é a temperatura operativa horária (°C),  $nr$  é o número de horas de resfriamento (h) e  $na$  é o número de horas de aquecimento (h).

### 2.3. Simulação termo energética de edificações

Utilizou-se o programa simulador *EnergyPlus* (EP) versão 8.7, desenvolvido pelo DOE (Departamento de Energia dos Estados Unidos). O programa realiza balanço de massa e energia em volumes de controle (zonas térmicas) em regime transiente. O detalhamento da modelagem física do programa é disponível em Input Output Reference (*EnergyPlus*, 2008). Para o desenho da edificação, foi utilizado o programa *GoogleSketchup 2017* com o plug-in *Euclid 0.9.3*, que cria a interface que permite a compatibilidade entre *GoogleSketchup* e EP.

O uso do EP permite a atribuição de cada parede como a condição de contorno da parede vizinha, de modo que o comportamento de cada zona é influenciado pelo das zonas adjacentes e vice-versa, formando uma simulação termicamente acoplada. O EP permite a discretização do problema transiente em até 60 passos de tempo por hora.

### 2.4. Projeto de experimentos

“Projeto de experimentos refere-se ao processo de planejamento do experimento de forma que os dados apropriados sejam coletados e analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas” (adaptado de Montgomery, 2013).

Cada parâmetro de entrada é chamado de fator controlável. Cada variável de saída é chamada de resposta, como por exemplo a TBS de um ambiente. Cada combinação de fatores controláveis é chamada de um caso.

Como descrito no manual do *Minitab*<sup>1</sup> 18, 2019, os parâmetros estatísticos valor-t e valor-p são utilizados para determinar a validade da hipótese nula para um intervalo de confiança. Pode-se utilizar o conceito, por exemplo, no caso de regressões lineares ou não lineares para definir se cada termo é significativo ou não. O valor-t consiste na divisão entre o coeficiente do termo em questão e seu erro-padrão. O erro-padrão representa a distância média entre os valores observados e a curva de regressão.

Desejabilidade é definido por Houaiss, 2001, como “qualidade, condição ou característica de desejável”. No contexto deste trabalho, indica quão próximo o valor de um fator está do seu “valor mais desejado”, de acordo com o objetivo que se tem para a resposta (maximização ou minimização). Por exemplo, se é desejável maximizar a resposta, a desejabilidade de um fator é 100% quando ele a maximiza e de 0% quando a minimiza. O conceito se aplica da mesma forma para uma combinação de fatores que influenciam na resposta. Se uma resposta se encontra no valor médio entre seu máximo e mínimo, a desejabilidade da respectiva combinação de fatores é de 50%. A desejabilidade de um fator com relação a mais de uma resposta simultânea consiste na média harmônica da desejabilidade para cada resposta isolada, dado um objetivo para cada uma delas (maximização ou minimização).

## 3. METODOLOGIA

O fluxograma da Figura 3.1 apresenta o planejamento do trabalho, inspirado na metodologia de projeto proposta por Stoecker, 1989.

---

<sup>1</sup> [www.minitab.com](http://www.minitab.com) acesso em 16/04/2019.

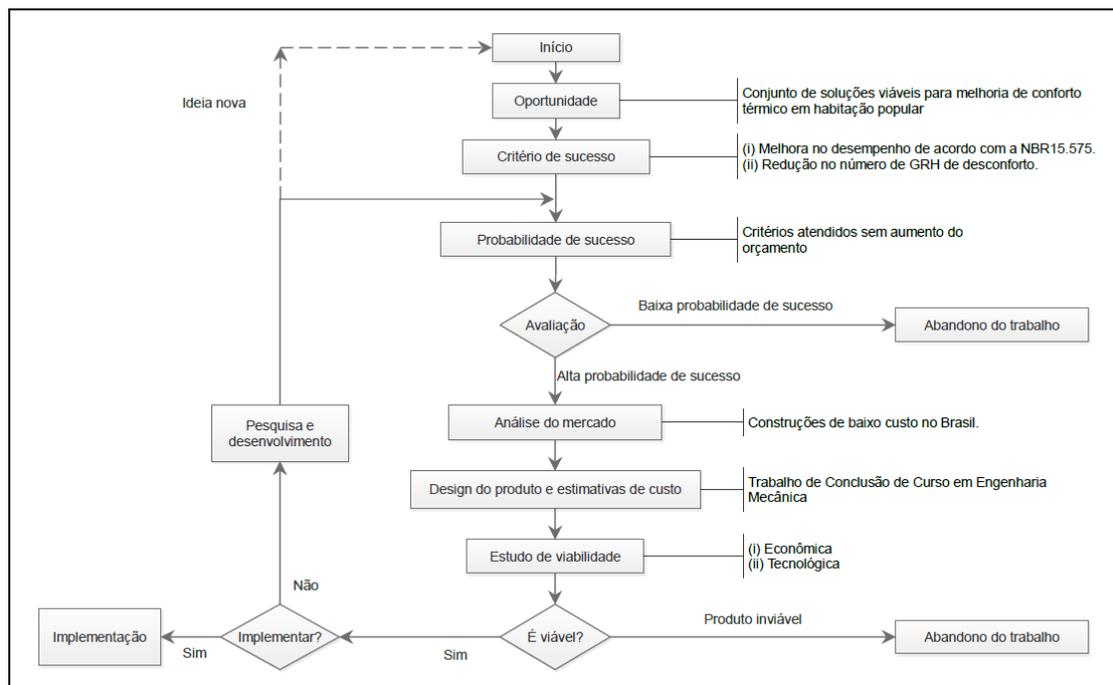


Figura 3.1 – Fluxograma de planejamento do trabalho (inspirado em Stoecker, 1989).

Um ponto de atenção é a análise de probabilidade de sucesso. Segundo Dos Santos et al, 2015, a orientação solar da edificação é um parâmetro determinante no comportamento térmico dos seus ambientes. De acordo com Sorgato, 2009, as propriedades radiantes das paredes externas influenciam significativamente o desempenho das edificações de interesse social. No caso deste trabalho, a orientação dos quartos varia de Oeste a Leste e a absorvância das paredes de 0,3 a 0,7 e ambos os parâmetros não impactam em custos, o que torna alta a probabilidade de melhorar o conforto térmico sem aumento de custo da edificação.

O fluxograma da Figura 3.2 apresenta as etapas da execução do trabalho, correspondendo à etapa de “Design do produto e estimativas de custo” da Figura 3.1.

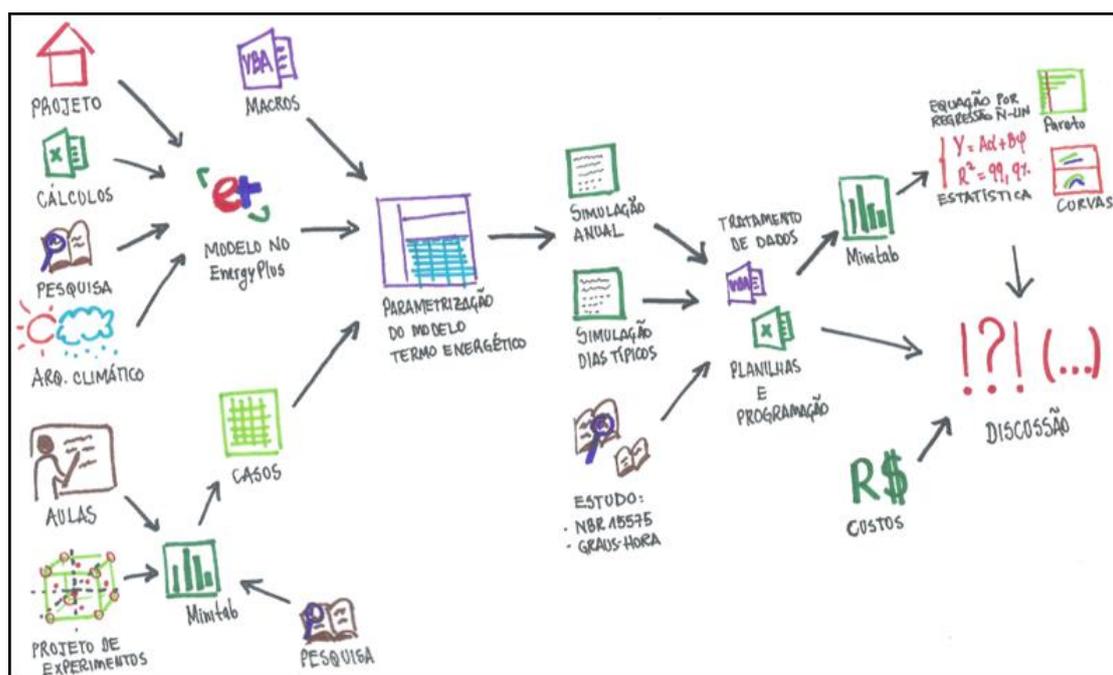


Figura 3.2 – Fluxograma das etapas do trabalho.

Como apresentado na figura 3.2, o modelo termo energético foi realizado a partir das informações de projeto, do arquivo climático e da consulta em normas (NBR15575, NBR 15220). Utilizou-se a ferramenta de simulação paramétrica do *EnergyPlus* e, para apoio na geração dos objetos, planilhas Excel com automatização por Macro. Definiu-se os casos a partir da metodologia de projeto de experimento, com o auxílio do programa *Minitab 18*.

A figura 3.2 esquematiza os passos seguintes: Para as simulações de dia típico, tratou-se o arquivo climático de Bagé e obteve-se os dias típicos de período quente e período frio, para uma frequência de ocorrência de 5%. Estas simulações geraram resultados de  $T_{op,h}$  dos ambientes para os dois dias. As simulações anuais geraram resultados de TBS dos ambientes, hora a hora, para 365 dias. O tratamento dos arquivos gerados nas simulações, contendo milhares de linhas de informações, deu-se através de uma rotina programada em Visual Basic com o uso de *Macros* no programa *Excel*. Os resultados foram inseridos no *Minitab 18*, onde obteve-se as equações de modelagem dos resultados e estudou-se parâmetros estatísticos. Por último, com os custos das soluções estudadas, discutiu-se os resultados.

#### 4. ESTUDO DE CASO

A edificação simulada neste trabalho é um projeto real, desenvolvido pela COCEARGS<sup>2</sup> para assentamentos da reforma agrária organizados pelo MST<sup>3</sup> no estado do Rio Grande do Sul. Este projeto responde especificamente a editais do programa Minha Casa Minha Vida (MCMV), do Governo Federal. A COCEARGS já executou casas deste modelo em diversas regiões do estado e ainda há casas em fase de execução. A Cooperativa aguarda ainda a liberação de verba para o início de novas obras e afirma que ainda podem haver mudanças no projeto. A planta baixa da casa e seu modelo tridimensional são apresentadas na Figura 1.

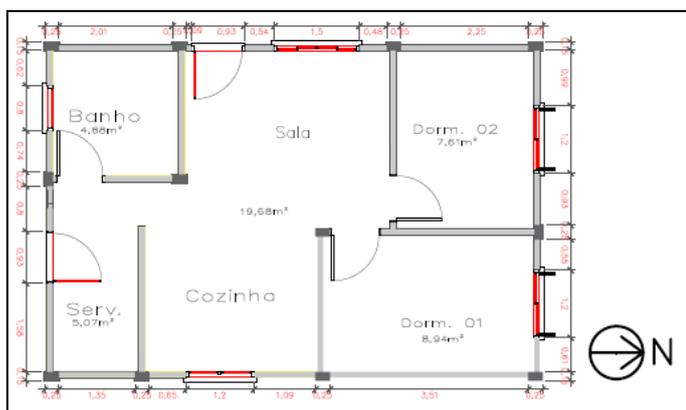


Figura 4.1 – Planta baixa da casa

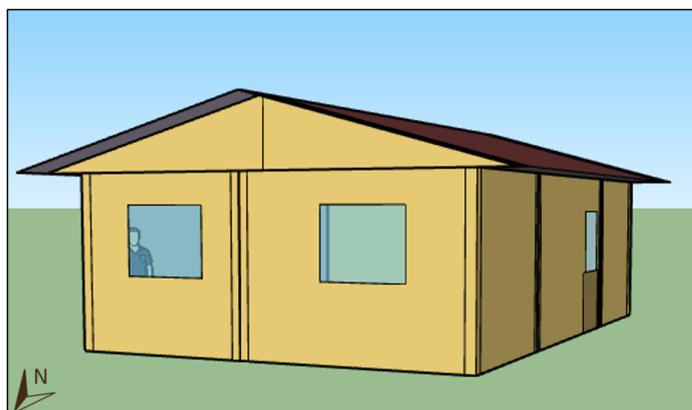


Figura 4.2 – Modelo da casa no *GoogleSketchup*

A casa possui 52,1 m<sup>2</sup> divididos em dois dormitórios, sala e cozinhas integrados, um banheiro e uma área de serviço. A casa possui forro e telhado em duas águas. Dividiu-se a casa em 6 zonas térmicas: Dormitório 1 (D1), Dormitório 2 (D2), Sala-Cozinha (SC), Serviço, Banheiro e Ático. O projeto original define que os quartos tenham a fachada direcionada para o Norte. As casas são construídas pela mão de obra contratada e pelos futuros moradores, que decidem a posição no terreno, cor das paredes, entre outros parâmetros.

Os materiais construtivos do caso base são os mesmos do projeto original e estão descritos na Tabela 4.1. Suas propriedades termo físicas foram obtidas da NBR15220.

<sup>2</sup> Cooperativa Central dos Assentamentos do RS LTDA

<sup>3</sup> Movimento dos Trabalhadores Rurais sem Terra (<http://www.mst.org.br/>, acesso em 10/06/2019)

Tabela 4.1 - Relação de materiais construtivos e suas propriedades termo físicas

Construção	Composição	U W/(m <sup>2</sup> K)	C <sub>t</sub> kJ/(m <sup>2</sup> K)	α (adim.)	ε (adim.)
Fundação e piso	Areia (30cm) + brita (5 cm) + contrapiso (5 cm)	1,95	1088	0,5	0,9
Forro	PVC (0,8 cm)	4,76	10	0,3	0,9
Cobertura	Fibrocimento (6 mm)	5,58	8	0,7	0,9
Parede interna	Reboco (1,5 cm) + tijolo* + Reboco (1,5 cm)	2,56	100	0,5	0,9
Parede externa	Reboco (2 cm) + tijolo* + Reboco (1,5 cm)	2,53	110	0,5	0,9
Pilares	Concreto (15 cm)	3,91	345	0,5	0,9
Portas externas	Alumínio pintado de cor branca (2 cm)	5,88	48	0,3	0,9
Janela	Vidro simples incolor (3 mm)	5,89	-	-	0,9
		FS <sub>t</sub> (SHGC) = 86,1%			0,9

\*Tijolos 6 furos de cutelo (9x14x19 cm)

A NBR15575 prevê taxa de infiltração de ar nos ambientes de 1 volume de renovação por hora, inclusive para o ático. Este valor foi utilizado para todas as simulações.

Optou-se pela realização do estudo na cidade de Bagé (RS), por tratar-se do local onde há o maior número de casas em fase inicial ou até preliminar de construção. Considerou-se que é neste local onde tem-se a maior chance de aplicabilidade das soluções propostas.

O método de determinação da evolução horária dos parâmetros climáticos necessários para a simulação dos dias típicos da NBR15575 não é claro. Utilizou-se o procedimento descrito por Siqueira (SIQUEIRA et al., 2007) para a determinação dos dias típicos de inverno e verão de Bagé. Recomenda-se o uso de arquivos climáticos com 15 anos de dados acumulados para a determinação de dias típicos (AKUTSU, 1998, apud Siqueira et Al., 2007). No entanto, não se encontrou este tipo de arquivo. Utilizou-se o arquivo climático com dados básicos registrados pelo INMET<sup>4</sup> entre 2001 e 2010 e disponibilizado pelo LABEEE<sup>5</sup>. A cidade de Bagé encontra-se na Zona Bioclimática 2 (ZB 2), de acordo com a norma de desempenho térmico de edificações NBR15220. A Tabela A.1 descreve a TBS hora a hora dos dias típicos. A Tabela 4.2 apresenta os critérios de avaliação de desempenho térmico para a ZB 2 e para Bagé, onde T<sub>i</sub> e T<sub>e</sub> correspondem à temperatura interna e externa, respectivamente.

Tabela 4.2 – Critérios de avaliação de desempenho térmico generalizados para a Zona Bioclimática 2 e para a cidade de Bagé

Nível de desempenho	Condição para a T <sub>i, max</sub> no verão		Condição para a T <sub>i, min</sub> no inverno	
	ZB 2	Bagé	ZB 2	Bagé
<b>Não atingiu (NA)</b>	> T <sub>e, max</sub>	> 34,8 °C	< T <sub>e, min</sub> + 3 °C	< 6,1 °C
<b>Mínimo (M)</b>	≤ T <sub>e, max</sub>	≤ 34,8 °C	≥ T <sub>e, min</sub> + 3 °C	≥ 6,1 °C
<b>Intermediário (I)</b>	≤ T <sub>e, max</sub> - 2°C	≤ 32,8 °C	≥ T <sub>e, min</sub> + 5 °C	≥ 8,1 °C
<b>Superior (S)</b>	≤ T <sub>e, max</sub> - 4°C	≤ 30,8 °C	≥ T <sub>e, min</sub> + 7 °C	≥ 10,1 °C

Para a definição dos casos, foi utilizada uma malha central composta de face centrada. Esta configuração (Montgomery, 2013) prevê combinações dos valores extremos dos fatores, diferente da malha de Box-Behnken, e não extrapola essas faixas, como acontece na malha central composta. Uma vez simulados os casos da malha (descritos na tabela B.1), obtêm-se através do método de regressão não linear equações que modelam as respostas do experimento. Após obtidas as equações, foi utilizada uma série de ferramentas estatísticas para sua análise.

<sup>4</sup> Instituto Nacional de Meteorologia (<http://www.inmet.gov.br>, acesso em 08/05/2019).

<sup>5</sup> Laboratório de Eficiência Energética em Edificações ([www.labeee.ufsc.br](http://www.labeee.ufsc.br), acesso em 02/06/2019).

Os fatores controláveis são diferentes cores de pintura das paredes externas, variação na orientação da casa no terreno, pintura do telhado com diferentes cores e isolamento do forro com folhas de alumínio adesivas. A Tabela 4.3 descreve os códigos e símbolos utilizados.

Tabela 4.3 - Códigos e símbolos utilizados na apresentação dos resultados.

Código do termo da eq.	A	B	C	D
Símbolo	$\alpha_p$	$\varphi$	$\alpha_t$	I
Fator	Absortância das paredes externas	Orientação Solar	Absortância do telhado	Isolamento no forro

A Equação 4.1 apresenta a forma genérica das equações que modelam a resposta em função dos fatores controláveis.

$$y = K_1 + A_1 \cdot \alpha_p + B_1 \cdot \varphi + C_1 \cdot \alpha_t + D \cdot I + AA \cdot \alpha_p^2 + BB \cdot \varphi^2 + CC \cdot \alpha_t^2 + AB \cdot \alpha_p \cdot \varphi + AC \cdot \alpha_p \cdot \alpha_t + AD \cdot \alpha_p \cdot I + BC \cdot \varphi \cdot \alpha_t + BD \cdot \varphi \cdot I + CD \cdot \alpha_t \cdot I \quad (4.1)$$

onde  $y$  é a resposta,  $K_1$  é constante,  $A_1$ ,  $B_1$  e  $C_1$  são os coeficientes do termo principal dos fatores, AA, BB e CC são os coeficientes dos termos quadráticos dos fatores, AB, AC, AD, BC, BD e CD são os coeficientes dos termos cruzados entre dois fatores e os símbolos  $\alpha_p$ ,  $\varphi$ ,  $\alpha_t$  e I são os fatores controláveis, como descrito na Tabela 4.3.

Como o fator I é em um fator categórico, deve-se obter uma equação para cada tipo de I. A Equação 4.2 apresenta a forma genérica das equações simplificadas para cada tipo de I.

$$y = K_2 + A_2 \cdot \alpha_p + B_2 \cdot \varphi + C_2 \cdot \alpha_t + AA \cdot \alpha_p^2 + BB \cdot \varphi^2 + CC \cdot \alpha_t^2 + AB \cdot \alpha_p \cdot \varphi + AC \cdot \alpha_p \cdot \alpha_t + BC \cdot \varphi \cdot \alpha_t \quad (4.2)$$

onde  $y$  é a resposta,  $K_2$  é constante,  $A_2$ ,  $B_2$  e  $C_2$  são os coeficientes do termo principal dos fatores, AA, BB e CC são os coeficientes dos termos quadráticos dos fatores, AB, AC e BC são os coeficientes dos termos cruzados entre dois fatores e os símbolos  $\alpha_p$ ,  $\varphi$ , e  $\alpha_t$  são os fatores controláveis, como descrito na Tabela 4.3.

As faixas de fatores controláveis são descritas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Faixas de fatores controláveis

Fator Controlável	Mínimo da faixa		Máximo da faixa	
	Valor	Correspondência física	Valor	Correspondência física
$\alpha_p$	0,3	cor clara	0,7	cor escura
$\varphi$	-90°	quartos fachada Oeste	90°	quartos fachada Leste
$\alpha_t$	0,3	cor clara	0,7	cor escura
I	Sem isolamento no forro		Com isolamento no forro	

Inicialmente pretendeu-se incluir o tipo de telha como um fator controlável. No entanto, ao pintar-se o telhado para alterar  $\alpha_t$ , também se alteram as propriedades da telha (absortância e emitância). Desta forma, os fatores tipo de telha e absortância da telha não são independentes. Optou-se por manter a pintura do telhado, removendo o tipo de telha do estudo, pois a segunda solução é mais cara e requer alteração do projeto estrutural do telhado.

Além das propriedades apresentadas na Tabela 4.1, o caso base não possui isolamento no forro e tem orientação Norte para os quartos. A orientação solar original do projeto, com os quartos orientados ao Norte, é tomada como ponto de referência. A possibilidade de se orientar os quartos para o Sul foi descartada para garantir que haja incidência de radiação solar direta nos mesmos. O material isolante consiste em uma folha de alumínio de 1 mm de espessura, adesiva, que é colada no forro de PVC antes da instalação do mesmo, ficando voltada para o lado do ático. O conjunto é conhecido comercialmente como *termo-forro*. Utilizou-se as

propriedades termo físicas de “chapa de alumínio oxidado”, de acordo com a NBR15220, para o material isolante.

A Tabela 4.5 descreve as respostas estudadas.

Tabela 4.5 – Respostas estudadas

	Inverno/ aquecimento			Verão/ resfriamento		
	Dormitório 1	Dormitório 2	Sala/ cozinha	Dormitório 1	Dormitório 2	Sala/ cozinha
NBR 15220 (°C)	D1-NBR-I	D2-NBR-I	SC-NBR-I	D1-NBR-V	D2-NBR-V	SC-NBR-V
GH (°C.h)	D1-GH-A	D2-GH-A	SC-GH-A	D1-GH-R	D2-GH-R	SC-GH-R

As respostas para o critério da NBR 15220 são a TBS extrema dos períodos frio e quente, em graus Celsius (°C). As respostas para o critério de GH de desconforto térmico são obtidas a partir da temperatura operativa e possuem unidade de graus Celsius x hora (°C.h).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado para os dias típicos de inverno e verão do caso base é apresentado na Tabela 5.1. Os valores são de TBS<sub>i</sub> (°C) extrema.

Tabela 5.1 – Resultados de TBS<sub>i</sub> para o cenário base, de acordo com a NBR15575.

Inverno	D1-NBR-I	D2-NBR-I	SC-NBR-I	Verão	D1-NBR-V	D2-NBR-V	SC-NBR-V
Atingiu o Mínimo	7.3 °C	7.2 °C	7.4 °C	Não atingiu	38.2 °C	38.3 °C	38.6 °C

O resultado indica que a construção atinge desempenho mínimo para o inverno e fica mais de 3°C distante de atingir a exigência mínima no verão, para todos os ambientes, que é de 34,8°C. Esta informação isolada sugere a priorização das soluções para o verão, em detrimento do inverno

A Tabela 5.2 resume as respostas dos 30 casos, classificando as TBS<sub>i</sub> extremas, para cada período, nos níveis de desempenho previstos pela NBR 15575. Para uma resposta, o número de casos que se enquadrou em cada nível de desempenho é verificado na linha correspondente ao nível.

Tabela 5.2 – Classificação das respostas dos casos simulados, de acordo com os níveis de desempenho previstos na NBR 15575

Classificação	T(°C)		D1-NBR-I	D2-NBR-I	SC-NBR-I	T(°C)		D1-NBR-V	D2-NBR-V	SC-NBR-V
	-	<6,1				>34,8	-			
Não Atingiu	-	<6,1	0	0	0	>34,8	-	12	18	13
Mínimo	≥6,1	<8,1	30	30	30	>32,8	≤34,8	11	5	10
Intermediário	≥8,1	<10,1	0	0	0	>30,8	≤32,8	7	7	7
Superior	≥10,1	-	0	0	0	-	≤30,8	0	0	0

Todos os casos apresentaram desempenho mínimo no inverno. Mais da metade dos casos não alcançou desempenho mínimo no verão em pelo menos um RPP. Este resultado sugere que o projeto deva priorizar soluções para melhorar o desempenho no verão, já que qualquer combinação de fatores resulta no mesmo nível de desempenho para o inverno.

A verificação dos termos estatisticamente significativos da equação pode ser realizada analisando-se um diagrama de Pareto do efeito padronizado, ou valor-t, dos termos. A Figura 5.1 apresenta o diagrama de Pareto para a resposta SC-NBR-I. Foi utilizado um intervalo de significância de  $\alpha = 0,05$  (que equivale, em termos de valor-t, a 2,06).

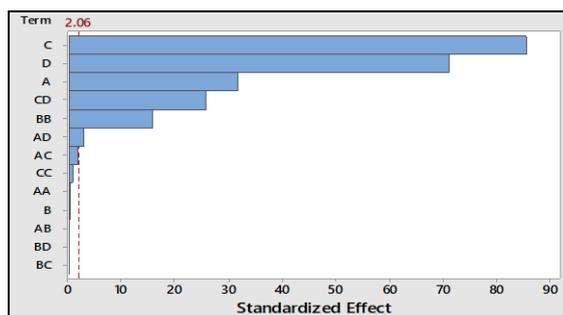


Figura 5.1 - Gráfico de Pareto da resposta SC-NBR-V.

Os termos BC, BD, AB, B, AA e CC não são estatisticamente significativos para a Equação. Os demais termos são significativos e apresentam, de baixo para cima, cada qual maior significância do que o anterior. Realizou-se a análise do diagrama de Pareto para cada resposta e a Tabela 5.3 resume estas análises. O valor “1” significa que o termo é estatisticamente relevante e o valor “0” indica a sua irrelevância. O fator “I” não faz parte do modelo da resposta, pois “I” é um fator categórico.

Tabela 5.3 – Relevância estatística das variáveis na equação da temperatura crítica para o critério da NBR 15575 e  $R^2$

Resposta	$R^2$	Variável da equação												
		$\alpha_p$	$\varphi$	$\alpha_t$	I	$\alpha_p^2$	$\varphi^2$	$\alpha_t^2$	$\alpha_p\varphi$	$\alpha_p\alpha_t$	$\alpha_p I$	$\varphi\alpha_t$	$\varphi I$	$\alpha_t I$
D1-NBR-I	99.95%	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1
D2-NBR-I	99.95%	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1
SC-NBR-I	99.99%	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1
D1-NBR-V	99.87%	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
D2-NBR-V	99.86%	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
SC-NBR-V	99.73%	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1

Os coeficientes das equações estão dispostos na Tabela C.1. As equações encontradas possuem valores de  $R^2$  superiores a 99,5%, indicando que se aproximam muito dos valores obtidos através da simulação. Não é possível tirar conclusões generalizadas a respeito da relevância dos termos das equações. Confirma-se que todos os fatores controláveis são relevantes na determinação de todas as respostas, tendo pelo menos um de seus termos de primeira ou segunda ordem estatisticamente relevantes.

Os gráficos de efeitos de interação entre os termos do modelo permitem identificar se a variação de um fator influencia a forma como outro fator altera uma resposta. Na Figura 5.2, este gráfico ajuda a entender como a presença ou ausência de isolamento no forro interfere nos outros parâmetros. O eixo das ordenadas possui unidade de temperatura e o eixo das abscissas tem a unidade de cada parâmetro.

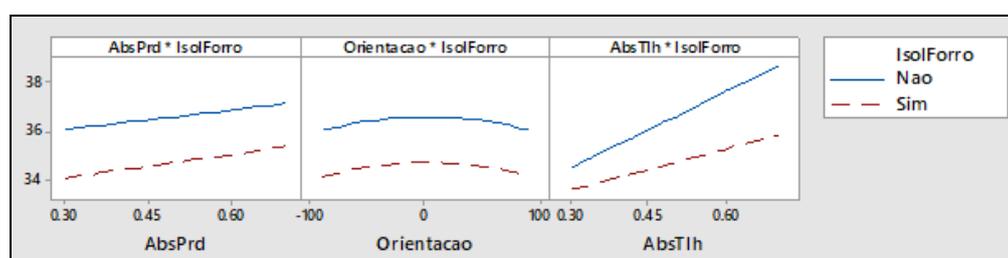


Figura 5.2 – Exemplo de curvas de efeito de interação.

Nos dois gráficos mais à esquerda, as curvas são paralelas, o que indica que o fator “ $\alpha_p$ ” interfere na resposta da mesma maneira, independentemente do valor de “I”. O mesmo é

constatado para “ $\varphi$ ”. Já no diagrama mais à direita, a presença de isolamento no forro torna menos importante a influência de “ $\alpha_t$ ”.

Quando as curvas não são paralelas, como no último caso, tem-se um indício de que o valor de um fator interfere na forma como outro fator muda a resposta. Se as curvas se cruzam, é porque a variação de um fator inverte o efeito que o outro fator provoca na resposta. Em nenhuma resposta as curvas se cruzaram. Mais de 80% das curvas são paralelas e apenas sob influência do fator “I” houve alguma diferença entre inclinações.

Na Tabela 5.4 os valores de  $GHR$ ,  $GHA$  e da soma dos dois são apresentados. A Tabela 5 apresenta ainda a diferença do caso base com relação ao melhor e pior caso, além da diferença para a média. Na última coluna, pode-se observar o número de cenários cujo desempenho, em termos de GH, supera o cenário base.

Tabela 5.4 - Resumo dos resultados de GH.

	D1-GH-A	D2-GH-A	SC-GH-A	TOTAL $GHA$	D1-GRH-R	D2-GRH-R	SC-GRH-R	TOTAL $GHR$
<b>GH caso Base</b>	14583 °C.h	14566 °C.h	14775 °C.h	43924 °C.h	4345 °C.h	4471 °C.h	4173 °C.h	12990 °C.h
<b>Diferença para o melhor</b>	6%	6%	7%	5%	70%	68%	77%	72%
<b>Diferença para o pior</b>	-17%	-18%	-13%	-15%	-19%	-20%	-8%	-14%
<b>Diferença para a média</b>	-4%	-4%	-2%	-3%	35%	33%	43%	37%

O número de  $GHR$  é em torno de 70% menor do que o número de  $GHA$ , para cada RPP ou somando-se o valor de todos eles. Esta informação sugere estratégias que priorizem o conforto térmico no inverno, conclusão oposta àquela obtida para o critério da NBR15575. Os demais resultados da Tabela 5.4 não permitem conclusões óbvias. O caso base está mais bem colocado entre os 30 casos simulados com relação a  $GHA$  do que a  $GHR$ , indicando-se que existem menos possibilidades para a melhoria no conforto para inverno do que para verão.

A análise de gráfico de Pareto foi também realizada para as respostas de GH. Na Tabela 5.5 pode-se verificar os termos relevantes (“1”) e irrelevantes (“0”) das equações.

Tabela 5.5 - Relevância estatística das variáveis na equação de GH

Resposta	$R^2$	Variável da equação												
		$\alpha_p$	$\varphi$	$\alpha_t$	I	$\alpha_p^2$	$\varphi^2$	$\alpha_t^2$	$\alpha_p\varphi$	$\alpha_p\alpha_t$	$\alpha_p I$	$\varphi\alpha_t$	$\varphi I$	$\alpha_t I$
D1-GH-A	99.84%	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
D2-GH-A	99.87%	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1
SC-GH-A	99.84%	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1
D1-GH-R	99.77%	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1
D2-GH-R	99.74%	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
SC-GH-R	99.91%	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1

Os valores de  $R^2$  são altos, indicando que as equações se aproximam muito dos resultados das simulações. Confirma-se que todos os fatores controláveis são relevantes na determinação de todas as respostas. Os coeficientes das equações estão dispostos na Tabela C.2.

A análise de efeitos de interação mostrou que em nenhum caso as curvas se cruzaram. Mais de 80% das curvas são paralelas e apenas no caso do fator “I” houve alguma diferença entre inclinações, resultado similar àquela para a NBR15575.

O software *Minitab* possui uma função de varredura do valor dos fatores, permitindo visualizar como isto afeta a influência de todos os outros fatores, simultaneamente. A função também sugere, para os fatores, valores para maximização ou minimização da resposta.

A Figura 5.3 apresenta a ferramenta de varredura para as respostas de TBSi extremas para o período frio. A linhas 1-3 representam as respostas D1-NBR-I, D2-NBR-I e SC-NBR-I e o eixo das ordenadas possui unidade de °C. A última linha representa a combinação entre as três respostas e o eixo das ordenadas possui unidade de desejabilidade (%). Em cada coluna,

um fator controlável é mostrado e pode-se alterar seu valor. Na última coluna, em cada linha, As linhas verticais vermelhas mostram este valor. Tem-se um valor de desejabilidade para as respostas isoladas (d) e outro para a desejabilidade da combinação das respostas (D).

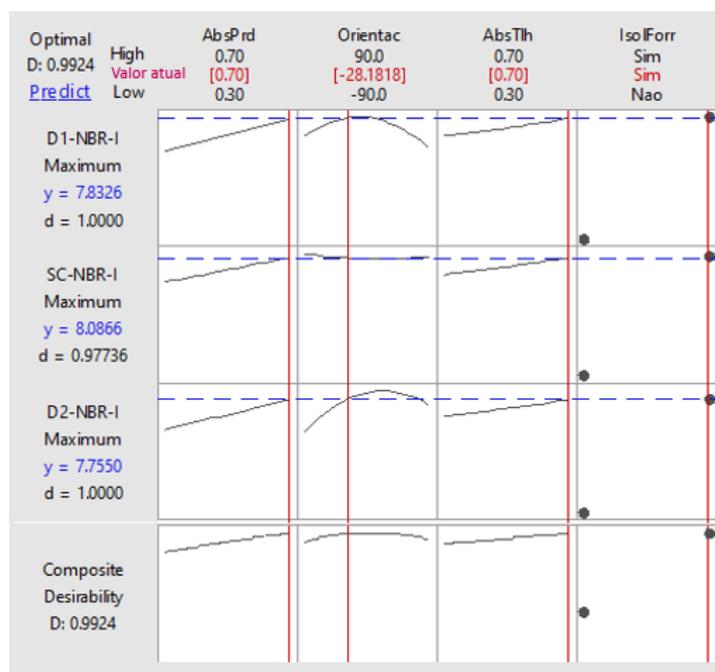


Figura 5.3 – Diagrama de varredura para as respostas de TBS<sub>i</sub> extremas, período frio.

A ferramenta de varredura foi utilizada para todas as respostas de período frio juntas, o mesmo para o período quente e por último ambos simultaneamente. O mesmo procedimento foi realizado para o critério de GH<sub>A</sub>, GH<sub>R</sub> e ambos simultaneamente. A Tabela 5.6 mostra as melhores configurações encontradas para inverno, verão e para os dois simultaneamente, tanto para o procedimento da NBR 15575 quanto para o estudo de GH<sub>A</sub> e GH<sub>R</sub>. Atribuiu-se um código para cada configuração, para facilitar a discussão.

Tabela 5.6 – Resumo das melhores configurações encontradas para cada resposta.

Resposta	Código	Desejabilidade	$\alpha_p$	$\varphi$	$\alpha_t$	I
NBR-I	1	99,2%	0,7	-28°	0,7	Sim
NBR-V	2	99,9%	0,3	90°	0,3	Sim
NBR-I e NBR-V	3	86,5%	0,35	15°	0,3	Sim
GH <sub>A</sub>	4	98,6%	0,7	-40°	0,7	Sim
GH <sub>R</sub>	5	99,7%	0,3	-90°	0,3	Sim
GH <sub>A</sub> e GH <sub>R</sub>	6	76,6%	0,7	6°	0,3	Sim

Se a estratégia for melhorar a habitabilidade no inverno, deve-se pintar as paredes externas com cor escura e manter a cor natural do fibrocimento, material do telhado, que já é escura. Deve-se também buscar uma orientação entre Noroeste e Norte para os quartos.

Se a estratégia for melhorar a habitabilidade no verão, deve-se pintar as paredes e telhado de cores claras e orientar a casa, no seu sentido mais longo, paralela ao eixo Leste-Oeste. Se a preferência é por maior incidência solar na sala, os quartos devem estar orientados para o Leste. Se a preferência é por maior incidência solar na cozinha, deve-se orientar os quartos para o Oeste. Para contemplar inverno e verão de forma simultânea, as duas análises (NBR e GH) sugerem que se pinte a cobertura de cor clara, pois ela possui maior influência sobre o verão. Nos critérios da NBR, a cor das paredes influencia mais o desempenho no verão, enquanto nos critérios de GH, este fator influencia mais o comportamento no inverno. A desejabilidade nos casos combinados é significativamente reduzida, indicando que a busca por melhor conforto no verão faz perder-se conforto no

inverno e vice-versa. O isolamento do forro é o único fator que melhora o conforto tanto para o verão quanto para o inverno.

A COCEARGS disponibilizou o orçamento do modelo de casa estudado. O custo de cada uma das soluções empregadas foi obtido através de uma pesquisa com fornecedores dos materiais. A Tabela 5.7 apresenta estes valores.

Tabela 5.7 – Orçamento da casa subdividido por categorias de custos. Fonte: COCEARGS.

Item	Proj. Original	Isol. do forro	Pintura do telhado
Infraestrutura	R\$ 2.332	R\$ 2.332	R\$ 2.332
Supraestrutura	R\$ 2.616	R\$ 2.616	R\$ 2.616
Paredes e painéis	R\$ 8.279	R\$ 8.279	R\$ 8.279
Coberturas e proteções	R\$ 2.870	R\$ 3.122	R\$ 2.870
Revest., elementos dec. e pintura	R\$ 6.183	R\$ 6.183	R\$ 6.562
Pavimentação	R\$ 2.998	R\$ 2.998	R\$ 2.998
Instalações e aparelhos	R\$ 2.421	R\$ 2.421	R\$ 2.421
Complementação da obra	R\$ 8.000	R\$ 8.000	R\$ 8.000
Custo total	R\$ 35.700	R\$ 35.952	R\$ 36.079
Aumento relativo (%)	-	0,7%	1,1%
Aumento absoluto (R\$)	-	R\$ 252	R\$ 379

Criou-se um índice econômico como ferramenta de análise para cada cenário. No caso da NBR 15575, o índice mede quanto custa, em reais, cada grau Celsius reduzido no verão e aumentado no inverno, com relação ao projeto padrão atualmente empregado. No caso da análise de GH, o índice mede quanto custa, em reais, cada  $GH_A$  ou  $GH_R$ . A Tabela D.1 apresenta os 5 casos com melhor indicador econômico para período frio e quente da NBR e a Tabela D.2 apresenta os 5 casos com melhor indicador econômico para  $GH_A$  e para  $GH_R$ .

A Tabela 5.8 apresenta para as configurações da Tabela 5.6 a variação da resposta com relação ao caso base. A Tabela 5.8 apresenta também o indicador econômico. A variação na resposta para a NBR15575 é calculada como a média das variações da  $TBS_i$  extrema ( $\Delta TBS_i$ ) das três RPP para inverno ( $\Delta TBS_{i,inv}$ ) e para verão ( $\Delta TBS_{i,ver}$ ). Para a resposta em termos de GH calculou-se a variação total no número de GH nos RPP ( $\Delta GH_A$  ou  $\Delta GH_R$ ).

Tabela 5.8 – Indicador econômico e variação com relação ao caso base das respostas em termos de  $\Delta TBS_i$  e  $\Delta GH$  das melhores configurações encontradas.

Resposta que se buscou melhorar	NBR-I	NBR-V	NBR-I e NBR-V	$GH_A$	$GH_R$	$GH_A$ e $GH_R$
Código da configuração	1	2	3	4	5	6
$\alpha_p$	0,7	0,3	0,35	0,7	0,3	0,7
$\varphi$	-28°	90°	15°	-40°	-90°	6°
$\alpha_t$	0,7	0,3	0,3	0,7	0,3	0,3
l	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Custo total	R\$ 252	R\$ 631	R\$ 631	R\$ 252	R\$ 631	R\$ 631
$\Delta TBS_{i,inv}$	0.6 °C	0.3 °C	0.4 °C	0.6 °C	0.3 °C	0.5 °C
$\Delta TBS_{i,ver}$	-1.5 °C	-5.5 °C	-5.2 °C	-1.4 °C	-5.1 °C	-3.5 °C
$\Delta GH_A$	-2604 °C.h	3896 °C.h	2336 °C.h	-2834 °C.h	4136 °C.h	-1104 °C.h
$\Delta GH_R$	-2245 °C.h	-9224 °C.h	-8723 °C.h	-2273 °C.h	-9294 °C.h	-6107 °C.h
Índice econômico NBR	124 R\$/°C	109 R\$/°C	112 R\$/°C	128 R\$/°C	117 R\$/°C	156 R\$/°C
Índice econômico GH	52 R\$/(1000°C.h)	118 R\$/(1000°C.h)	99 R\$/(1000°C.h)	49 R\$/(1000°C.h)	122 (R\$/1000°C.h)	88 (R\$/1000°C.h)

A otimização do problema visando melhorar o conforto térmico no inverno custa R\$ 252,00, o valor do material isolante, considerando-se zero custo com mão de obra, já que os moradores das casas ou seus vizinhos participam ativamente da construção e podem realizar a tarefa. A otimização do problema com objetivo de melhorar o conforto térmico no verão custa

R\$ 631,00, valor do material isolante e da tinta para o telhado, com a mesma consideração a respeito da mão de obra.

A relação entre os valores de  $\Delta TBS_{i,inv}$  e os valores de  $\Delta TBS_{i,ver}$  reforça a conclusão, a partir da NBR15575, de que o desempenho de inverno é pouco influenciado pelas alterações nos fatores. Ao comparar-se as respostas codificadas por 2, 3 e 5 com uma configuração voltada para melhor desempenho no inverno, como a número 1, há uma melhora significativa no valor de  $\Delta TBS_{i,ver}$ , com uma pequena piora no valor de  $\Delta TBS_{i,inv}$ . No entanto,  $\Delta GH_A$  é positivo nas configurações de código 2, 3 e 5, enquanto que é negativo na configuração 1. Conclui-se que as configurações 2, 3 e 5, mesmo apresentando melhora no desempenho de inverno pelo critério da NBR15575 (com relação ao caso base), aumentam o número de  $GH_A$ . Desta forma, uma decisão baseada na norma não garante maior conforto térmico à edificação.

Os índices econômicos da NBR e de GH indicam conclusões diferentes para cada um dos critérios. Enquanto o melhor índice econômico para o critério de desempenho da NBR15575 corresponde à configuração 2, esta apresentou o segundo pior índice econômico de GH.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises realizadas indicaram que os métodos comparados levam a conclusões diferentes para o caso estudado. Enquanto a análise de dias típicos da NBR15575 sugere a priorização de estratégias para melhorar o desempenho em dias quentes, a análise dos graus-hora não traz conclusões evidentes. Embora o número de  $GH_A$  seja aproximadamente 70% superior ao número de  $GH_R$ , tem-se maior potencial na redução dos  $GH_R$  (em termos relativos e absolutos).

A partir do presente trabalho, pode-se questionar a tomada de decisões de projeto com base na metodologia de desempenho térmico da NBR15575. Trata-se de uma norma já exigida para o financiamento de muitos empreendimentos de habitação de interesse social e que evolui na direção de ser cada vez mais exigida. Assim, seu questionamento e revisão devem ser cada vez mais discutidos. Ao exigir a qualidade e durabilidade dos projetos, a norma em questão traz benefícios para a construção civil do país e questioná-la não significa negar sua importância, pelo contrário, é uma forma de valorizar o tema.

Deve-se levar em consideração outros aspectos combinados aos números saídos de uma simulação computacional. Ao passar dos anos, os materiais se degradam, alterando suas propriedades. Telhados e paredes, com a umidade característica do inverno da região, vão escurecendo, aumentando seus valores de absorvância solar. O isolamento estudado, de baixa qualidade, se degrada, podendo por exemplo oxidar, tornando-se menos efetivo. A orientação solar não se altera ao longo do tempo, mas a presença ou ausência de sombras pode mudar com árvores e edificações vizinhas. Estes são elementos que tornam mais complexa a tomada de decisão e que podem ser determinantes no sucesso das escolhas.

O uso da simulação termo energética e da metodologia de projeto de experimentos mostrou-se de grande utilidade para a geração de informações, podendo trazer critérios objetivos às decisões de projeto. Não se pode, no entanto, realizar um projeto sem estar apropriado do contexto local (apropriar-se no sentido de entender e respeitar as especificidades locais) e sem a inclusão dos futuros usuários. Isto remete à importância da apresentação dos resultados do presente estudo para os futuros moradores, podendo assim incluí-los no debate. É de se esperar que habitantes da zona rural de Bagé conheçam muito bem, mesmo que de forma empírica, o clima da região e consigam trazer elementos importantes na análise dos resultados do estudo.

Sugere-se que a metodologia utilizada neste trabalho seja aplicada para edificações em outras Zonas Bioclimáticas. Também pode ser interessante estudar diferentes parâmetros da construção, tais como diferentes tipos de telhas, os materiais de paredes ou variações no projeto, propondo-se outras disposições para os ambientes da casa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.575**. Norma Brasileira de Edifícios habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

\_\_\_\_\_. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, RTQ-R**. Eletrobrás, 2010.

**Caixa entrega 1296 unidades do MCMV em Belém**. Disponível em: <<https://caixanoticias.caixa.gov.br/noticia/18999/caixa-e-governo-federal-entregam-1-296-unidades-do-minha-casa-minha-vida-em-belem>> Acesso em: 14/06/2019

Dos Santos, J. C. P. et al. **Comportamento térmico de fechamentos em alvenaria estrutural para a Zona Bioclimática 2 brasileira**. Revista Materia, 2015.

ENERGYPLUS. **Input Output Reference** – The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output. University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkley National Laboratory, 2008

Fundação João Pinheiro. Centro de Estatística e Informações. **Déficit habitacional no Brasil 2009**. Belo Horizonte, 2012.

Fundação João Pinheiro. Centro de Estatística e Informações. **Déficit habitacional no Brasil 2015**. Belo Horizonte, 2018.

Houaiss, Antônio. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro, Ed. Objetiva, 2001.

Incropera, F. P. et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition**. LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Marroquim, F. M. G.; Barbirato, G. M. **Inserção urbana e análise dimensional das habitações de interesse social em maceió-al entre os anos de 1964 e 2014**. 7º Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável, Maceió, 2016

Minitab. **Minitab 18 Support**. 2019. Disponível em: <<https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/coefficients-table/#t-value>> Acesso em: 27/05/2019.

Montgomery, D. C. **Design and Analysis of Experiments: Eight Edition**. John Wiley and Sons, Inc., 8th Edition, 2013.

Silva, A. S. et al. **Incerteza do método de simulação da NBR 15575-1 para a avaliação do desempenho térmico de habitações**. Ambiente Construído, 2015.

Siqueira, T. C. P. A. et al. **Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações**. Revista Escola de Minas, 2007.

Soares, M. M. et al. **Avaliação dos parâmetros de desempenho térmico da NBR15575/2013: Habitações de interesse social na Zona Bioclimática 2**, Dissertação, 2014

Sorgato, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. Dissertação, 2009.

Stoecker, W. F. **Design of termal systems**. McGraw-Hill Inc., New York, 1989

## Apêndice A – Dias típicos de projeto para Bagé (RS).

Tabela A.1 - Temperatura de bulbo seco (TBS) dos dias típicos para a análise de desempenho da NBR15575 (frequência de ocorrência de 5%)

	Dia típico de verão 08 / jan	Dia típico de inverno 01 / jun
Hora do dia	TBS (°C)	TBS (°C)
1	22.2	6.6
2	20.2	4.9
3	19.6	5.5
4	19.6	5.9
5	19.3	5.3
6	19.1	3.3
7	21.3	3.1
8	24.0	3.4
9	26.9	4.4
10	29.5	6.9
11	31.2	11.0
12	32.3	13.4
13	32.9	14.7
14	33.9	14.7
15	34.3	15.0
16	34.7	15.5
17	34.8	15.1
18	34.3	13.8
19	31.4	11.3
20	28.7	10.1
21	26.8	9.0
22	25.3	7.7
23	24.5	7.7
24	23.7	8.2

## Apêndice B – Casos obtidos para uma malha central composta de face centrada

Tabela B.1 - Casos obtidos para uma malha central composta de face centrada

	$\alpha_p$	$\phi$	$\alpha_t$	l
1	0.5	0 °	0.5	Com
2	0.3	90 °	0.7	Sem
3	0.3	-90 °	0.7	Sem
4	0.7	-90 °	0.3	Sem
5	0.7	0 °	0.5	Com
6	0.5	0 °	0.5	Sem
7	0.5	90 °	0.5	Sem
8	0.7	0 °	0.5	Sem
9	0.3	-90 °	0.3	Com
10	0.5	-90 °	0.5	Com
11	0.3	0 °	0.5	Com
12	0.5	90 °	0.5	Com
13	0.3	0 °	0.5	Sem
14	0.5	0 °	0.3	Sem
15	0.5	0 °	0.3	Com
16	0.3	90 °	0.3	Sem
17	0.3	90 °	0.3	Com
18	0.5	-90 °	0.5	Sem
19	0.7	-90 °	0.7	Sem
20	0.7	90 °	0.7	Sem
21	0.3	-90 °	0.7	Com
22	0.7	90 °	0.7	Com
23	0.3	-90 °	0.3	Sem
24	0.7	-90 °	0.3	Com
25	0.7	90 °	0.3	Sem
26	0.5	0 °	0.7	Com
27	0.7	90 °	0.3	Com
28	0.3	90 °	0.7	Com
29	0.7	-90 °	0.7	Com
30	0.5	0 °	0.7	Sem

## Apêndice C – Termos das equações

A Equação 4.1 possui a forma genérica das equações simplificadas que modelam a resposta em função dos fatores controláveis.

$$y = K_2 + A_2 \cdot \alpha_p + B_2 \cdot \varphi + C_2 \cdot \alpha_t + AA \cdot \alpha_p^2 + BB \cdot \varphi^2 + CC \cdot \alpha_t^2 + AB \cdot \alpha_p \cdot \varphi + AC \cdot \alpha_p \cdot \alpha_t + BC \cdot \varphi \cdot \alpha_t \quad (4.1)$$

onde  $y$  é a resposta,  $K_2$  é constante,  $A_2$ ,  $B_2$  e  $C_2$  são os coeficientes do termo principal dos fatores,  $AA$ ,  $BB$  e  $CC$  são os coeficientes dos termos quadráticos dos fatores,  $AB$ ,  $AC$  e  $BC$  são os coeficientes dos termos cruzados entre dois fatores e os símbolos  $\alpha_p$ ,  $\varphi$ , e  $\alpha_t$  são os fatores controláveis, como descrito na Tabela 4.3.

Tabela C.1 - Termos das equações encontradas por regressão não-linear para a determinação da temperatura máxima/mínima do típico no ambiente

Resposta	R <sup>2</sup>	Fator Categórico	Termo da equação									
		I	K <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	AA	BB	CC	AB	AC	BC
D1-NBR-I	99.96%	Não	6.96770	0.29070	-0.000005	0.18210	-0.01470	-0.0000120	0.10360	-0.0003360	-0.00230	0.0000000
		Sim	7.49120	0.34990	-0.000040	0.08020	-0.01470	-0.0000120	0.10360	-0.0003360	-0.00230	0.0000000
D2-NBR-I	99.96%	Não	6.93410	0.29170	0.0003170	0.17720	-0.01530	-0.0000130	0.10230	0.0003610	-0.00240	0.0000060
		Sim	7.44270	0.35010	0.0003700	0.07730	-0.01530	-0.0000130	0.10230	0.0003610	-0.00240	0.0000060
SC-NBR-I	99.98%	Não	7.10750	0.26150	-0.0000550	0.22000	-0.01150	0.0000020	0.10760	0.0000090	-0.00260	0.0000020
		Sim	7.73806	0.32310	-0.0000660	0.10510	-0.01150	0.0000020	0.10760	0.0000090	-0.00260	0.0000020
D1-NBR-V	99.74%	Não	29.82800	4.64600	-0.0013710	8.25600	0.16400	0.0000600	1.17600	-0.0045670	-1.08700	0.0036480
		Sim	29.89500	5.22100	-0.0024280	4.35900	0.16400	0.0000600	1.17600	-0.0045670	-1.08700	0.0036480
D2-NBR-V	99.75%	Não	29.97600	5.45900	-0.0020600	7.72900	-0.04400	0.0000620	1.34500	-0.0071560	-1.20900	0.0044980
		Sim	30.05200	6.15200	-0.0033900	4.07600	-0.04400	0.0000620	1.34500	-0.0071560	-1.20900	0.0044980
SC-NBR-V	99.57%	Não	30.09300	2.81900	0.0001430	10.14100	0.35400	-0.0000700	0.78100	-0.0001700	-0.90900	-0.000010
		Sim	30.34800	3.36300	0.0001360	5.30100	0.35400	-0.0000700	0.78100	-0.0001700	-0.90900	-0.000010

Tabela C.2 - Termos das equações encontradas por regressão não-linear para a determinação dos GH<sub>A</sub> e GH<sub>R</sub>

Resposta	R <sup>2</sup>	Fator Categórico	Termo da equação									
		I	K <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	AA	BB	CC	AB	AC	BC
D1-GH-A	99.74%	Não	18489.0	-4003.0	0.5130	-3714.0	662.0	0.074630	232.0	2.6920	973.0	-631.0
		Sim	17417.0	-4437.0	0.7620	-2489.0	662.0	0.074630	232.0	2.6920	973.0	-631.0
D2-GH-A	99.75%	Não	18441.0	-4137.0	-1.9120	-3589.0	752.0	0.083030	191.0	-2.8910	975.0	1.1460
		Sim	17383.0	-4558.0	-2.3780	-2391.0	752.0	0.083030	191.0	-2.8910	975.0	1.1460
SC-GH-A	99.57%	Não	18807.6	-2984.0	0.1850	-4485.0	286.0	-0.013090	475.0	-0.1090	881.0	0.0320
		Sim	17567.2	-3383.0	0.2220	-3084.0	286.0	-0.013090	475.0	-0.1090	881.0	0.0320
D1-GH-R	99.96%	Não	52.0	1093.0	0.8740	2875.0	1087.0	-0.006380	1549.0	-2.2460	1936.0	-0.8150
		Sim	569.0	1006.0	1.0140	291.0	1087.0	-0.006380	1549.0	-2.2460	1936.0	-0.8150
D2-GH-R	99.96%	Não	16.0	1274.0	-0.2070	2966.0	1263.0	0.002130	1438.0	1.0760	1959.0	0.4210
		Sim	523.0	1217.0	-0.2340	411.0	1263.0	0.002130	1438.0	1.0760	1959.0	0.4210
SC-GH-R	99.98%	Não	-1.0	681.0	0.0910	2982.0	537.0	-0.023050	2053.0	-0.0690	1682.0	0.0580
		Sim	597.0	549.0	0.0840	20.0	537.0	-0.023050	2053.0	-0.0690	1682.0	0.0580

## Apêndice D – Indicadores econômicos

Tabela D.1 – Casos com melhores indicadores econômicos para os critérios da NBR 15575.

NBR 15575	$\alpha_p$	$\varphi$	$\alpha_t$	I	Custo suplementar	$\overline{\Delta TBS}$	R\$/°C
Período frio	0.7	90	0.7	Sim	R\$ 252	0.52 °C	R\$ 487
	0.5	0	0.7	Sim	R\$ 252	0.51 °C	R\$ 490
	0.7	-90	0.7	Sim	R\$ 252	0.50 °C	R\$ 504
	0.3	90	0.7	Sim	R\$ 252	0.39 °C	R\$ 649
	0.3	-90	0.7	Sim	R\$ 252	0.37 °C	R\$ 679
Período quente	0.3	90	0.7	Não	R\$ 0,00	-0.55 °C	R\$ 0,00
	0.3	-90	0.7	Não	R\$ 0,00	-0.48 °C	R\$ 0,00
	0.3	90	0.7	Sim	R\$ 252	-3.28 °C	R\$ 69
	0.3	-90	0.7	Sim	R\$ 252	-3.05 °C	R\$ 74
	0.3	90	0.3	Não	R\$ 379	-4.51 °C	R\$ 88

Tabela D.2 - Casos com melhores indicadores econômicos para os critérios de GH<sub>A</sub> e GH<sub>R</sub>.

GH desconforto	$\alpha_p$	$\varphi$	$\alpha_t$	I	Custo total	$\Delta GH$	R\$/ (1000 GH)
Aquecimento	0.7	90	0.7	Sem	R\$ 0,00	-516 °C.h	R\$ 0,00
	0.7	-90	0.7	Sem	R\$ 0,00	-338 °C.h	R\$ 0,00
	0.7	90	0.7	Com	R\$ 252	-2056 °C.h	R\$ 123
	0.7	-90	0.7	Com	R\$ 252	-1829 °C.h	R\$ 138
	0.5	0	0.7	Com	R\$ 252	-1441 °C.h	R\$ 175
Resfriamento	0.3	90	0.7	Sem	R\$ 0,00	-2097 °C.h	R\$ 0,00
	0.3	-90	0.7	Sem	R\$ 0,00	-2149 °C.h	R\$ 0,00
	0.3	-90	0.7	Com	R\$ 252	-6266 °C.h	R\$ 40
	0.3	90	0.7	Com	R\$ 252	-6216 °C.h	R\$ 41
	0.3	-90	0.3	Sem	R\$ 379	-8258 °C.h	R\$ 46