

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE DIFERENTES ELEMENTOS CONSTRUTIVOS NO
COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UMA EDIFICAÇÃO CONTÊINER AVALIADA
ATRAVÉS DE DOE: FATORIAL COMPLETO E BOX-BEHNKEN

por

Francisco Andre Simon

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, outubro de 2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Simon, Francisco Andre
INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE DIFERENTES ELEMENTOS
CONSTRUTIVOS NO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UMA
EDIFICAÇÃO CONTÊINER AVALIADA ATRAVÉS DE DOE: FATORIAL
COMPLETO E BOX-BEHNKEN / Francisco Andre Simon. --
2022.

21 f.

Orientador: Letícia Jenisch Rodrigues.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. EnergyPlus. 2. Fatorial Completo. 3.
Box-Behnken. 4. Casa Contêiner. 5. Materiais
Construtivos. I. Rodrigues, Letícia Jenisch, orient.
II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Francisco Andre Simon

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE DIFERENTES ELEMENTOS CONSTRUTIVOS NO
COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UMA EDIFICAÇÃO CONTÊINER AVALIADA
ATRAVÉS DE DOE: FATORIAL COMPLETO E BOX-BEHNKEN

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
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Escolher uma das áreas de concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof^ª. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof^ª. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, outubro de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, que mesmo de longe sempre me apoiaram, incentivaram e nunca mediram esforços para que eu pudesse completar minha graduação. A minha família e amigos, que compreenderam minha ausência enquanto dedicava o meu tempo aos estudos. A UFRGS, por me proporcionar um ensino gratuito e de qualidade. E a todos que participaram, direta ou indiretamente da minha formação acadêmica, enriquecendo meu processo de aprendizado.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2022

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE DIFERENTES ELEMENTOS
CONSTRUTIVOS NO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UMA
EDIFICAÇÃO CONTÊINER AVALIADA ATRAVÉS DE DOE: FATORIAL
COMPLETO E BOX-BEHNKEN

Simon, Francisco Andre

francisco.simon@ufrgs.br

Resumo. Este trabalho avalia a variação de diferentes elementos construtivos no comportamento térmico de uma casa contêiner. Os parâmetros avaliados são: espessura de isolamento térmico nas paredes, cor das paredes externas e área total de janelas. Os cenários, avaliando os parâmetros separadamente e suas combinações, são simulados por meio do software EnergyPlus. São utilizados dois métodos de design de experimentos diferentes: Fatorial Completo e Box-Behnken. São avaliadas as cargas térmicas consumidas pela edificação para aquecimento e resfriamento durante o ano, e as horas de desconforto térmico. Verifica-se que os parâmetros espessura de isolamento térmico e área total de janelas têm um grande impacto na energia gasta em climatização artificial pela residência e na quantidade de horas em desconforto térmico. A cor externa também impactou na carga térmica de resfriamento e no desconforto térmico, porém de maneira menos significativa e sem gerar alterações na carga térmica de aquecimento.

Palavras-chave: EnergyPlus, Fatorial Completo, Box-Behnken, Casa Contêiner, Materiais Construtivos

**THE INFLUENCE OF VARYING CONSTRUCTION ELEMENTS ON THE THERMAL
BEHAVIOR OF A TINY HOUSE USING DOE: FULL FACTORIAL AND BOX-
BEHNKEN**

Abstract. This work evaluates the variation of different constructive elements in the thermal behavior of a container house. The parameters evaluated are the thickness of thermal insulation on the walls, the color of the external walls, and the total area of windows. The scenarios, evaluating the parameters separately and their combinations, are simulated using the EnergyPlus software. Two different experiment design methods are used: Full Factorial and Box-Behnken. The thermal loads consumed by the building for heating and cooling during the year and the hours of thermal discomfort are evaluated. It is verified that the parameters of the thickness of thermal insulation and the total area of windows significantly impact the energy spent on artificial air conditioning and the number of hours in thermal discomfort. The exterior color also impacted the thermal load of cooling and thermal discomfort, but in a less significant way and without generating changes in the thermal load of heating.

Keywords: EnergyPlus, Full Factorial, Box-Behnken, Tiny House, Construction Materials

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
2	EnergyPlus	2
2.1	Balanco de Energia nas Superfícies	2
2.2	Balanco de Energia entre Zonas Térmicas.....	2
2.3	Condução através de paredes	3
2.4	Balanco de Energia em Janelas	3
3	Metodologia	4
3.1	Arquivo Climático	4
3.2	Experimento Fatorial Completo.....	5
3.3	Box-Behnken	5
4	Estudo de Caso	7
5	Análise dos Resultados.....	7
5.1	Carga Térmica de Resfriamento	7
5.2	Carga Térmica de Aquecimento	10
5.3	Desconforto Térmico	12
6	Conclusões	14
	Referências	15

1 Introdução

Este trabalho foi realizado com o intuito de analisar o comportamento térmico de uma pequena edificação estruturada em um contêiner diante da alteração de alguns de seus parâmetros construtivos. Por meio desta variação, visou-se diminuir o consumo de energia proveniente de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado ao longo de um ano climático típico para a cidade de Florianópolis, Brasil, e diminuir a quantidade de horas em desconforto térmico para os ocupantes da residência. O estudo buscou também realizar uma comparação entre 2 modelos de *Desing of Experiments* (DOE), Experimento Fatorial Completo e Box-Behnken, analisando a diferença dos resultados obtidos levando em consideração as vantagens e limitações de cada experimento. A base desse estudo é o modelo desenvolvido por Alberti (2022), que avaliou soluções passivas para redução do consumo de energia e aumento do conforto térmico dos ocupantes para a edificação em questão.

Conforme Occhi e de Almeida (2016), a utilização de contêineres na construção civil teve início na década de 90, como uma forma de redução de custos e reaproveitamento de materiais descartados. No entanto, para torná-lo habitável, são necessárias diversas adaptações construtivas. O uso de isolamento térmico e acústico é indispensável, uma vez que o contêiner é construído em material metálico, que é um bom condutor térmico.

O uso de isolamento térmico em contêineres foi objeto de estudo de Viana (2018), que utilizou o software Energy Plus (ENERGYPLUS, 2022a) para analisar a contribuição de diferentes tipos de isolamento no desempenho térmico de uma edificação. Em seu estudo, concluiu que o uso de isolamentos térmicos aliado a algum tipo de cobertura os torna ainda mais eficientes na obtenção de temperaturas mais próximas a condições de conforto térmico ao longo do ano.

Amaral et al. (2016) demonstraram como o tamanho de janelas e aberturas tem um impacto significativo na performance térmica de uma edificação. O estudo demonstrou que um mesmo tamanho de abertura pode apresentar diferentes comportamentos térmicos ao longo do ano. O tamanho ideal de janela, para o maior desempenho térmico, tende a ser o maior possível no inverno, enquanto no verão a própria existência da janela é dispensável.

É esperado que a cor da superfície exterior de uma edificação influencie significativamente na performance térmica, uma vez que determina a quantidade de irradiância solar absorvida e a sua transmissibilidade para dentro da estrutura. Bansal et al. (1992) simularam em seus estudos o efeito da cor da superfície externa na temperatura interior. Constataram, por meio deste estudo, que um cômodo de tamanho normal de cor branca apresentou uma temperatura de 6°C inferior nos meses de verão quando comparado ao cômodo similar na cor preta, enquanto nos meses de inverno a diferença ficou em 4°C.

Henninger et al. (2004) realizaram uma comparação entre os resultados obtidos pelas versões de lançamento do software EnergyPlus com outros sete softwares de simulação térmica de construções para catorze casos diferentes. Os resultados também foram comparados com três soluções analíticas. De maneira geral, os resultados obtidos pelo software divergiram em menos de 1% dos resultados analíticos, com exceção para a taxa de umidade da zona, que divergiu em menos de 3%. Desta maneira, os autores constataram que o software é confiável e pode ser utilizado como ferramenta para predição de carga térmica, cargas de resfriamento, consumo de energia de sistemas de resfriamento e condições de ambiente resultantes para as zonas climáticas.

2 EnergyPlus

Neste capítulo são apresentados os métodos que o software *EnergyPlus* utiliza para realizar a modelagem do consumo energético de uma edificação. O programa, gratuito e de código aberto, é desenvolvido pelo Escritório de Tecnologias em Edificações (BTO – *Building Technologies Office*) do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE). Nele, é possível modelar e simular o gasto energético de uma edificação completa durante um ano climático típico da escolha do usuário. O software possui uma solução baseada no equilíbrio térmico dos efeitos radiante e convectivos, também consegue realizar a combinação entre modelos de transferência de calor e massa para o movimento de ar entre as zonas e possui um modelo avançado que consegue estimar a energia solar absorvida por janelas e aberturas.

2.1 Balanço de Energia nas Superfícies

O balanço de energia, geralmente, é modelado com quatro grupos de transferência de calor distintos, sendo eles condução pelo elemento de construção, convecção, absorção e refletância de radiação de onda curta e troca radiante de ondas longas. A radiação de onda curta provém da radiação solar, entrando na zona térmica por meio das janelas e aberturas. As emissões de ondas longas estão associadas à presença de fontes de calor internas, como iluminação artificial, equipamentos e pessoas, cuja temperatura é próxima da temperatura ambiente. Assim, o balanço de energia na superfície interior de uma zona térmica pode ser descrito por

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (1)$$

sendo q''_{LWX} o fluxo líquido radiante de onda longa entre as superfícies em uma zona ou grupo de zonas (W/m^2), q''_{SW} o fluxo líquido radiante da iluminação para a superfície (W/m^2), q''_{LWS} fluxo líquido radiante de onda longa proveniente dos equipamentos da zona (W/m^2), q''_{ki} fluxo de calor por condução através parede (W/m^2), q''_{sol} fluxo radiante oriundo da radiação solar transmitido através das aberturas que foi absorvido na superfície (W/m^2) e q''_{conv} é o fluxo de calor por convecção para o ar da zona (W/m^2).

Similarmente, podemos obter o balanço de energia na superfície exterior

$$q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (2)$$

na qual $q''_{\alpha sol}$ é o fluxo de calor associado à radiação solar direta e difusa absorvida (W/m^2), q''_{LWR} é o fluxo radiante, de onda longa, oriundo da troca de calor entre o ar e os arredores (W/m^2), q''_{conv} é o fluxo de calor por convecção trocado com o ar externo (W/m^2) e q''_{ko} é o fluxo de calor por condução no interior da parede (W/m^2).

2.2 Balanço de Energia entre Zonas Térmicas

A solução para a integração entre a zona e o sistema de ar é aplicar balanço de energia e de massa para a zona, e resolver as equações diferenciais ordinárias resultantes. O balanço de energia para a zona é calculado conforme

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{zi} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (3)$$

sendo $C_Z \frac{dT_Z}{dt}$ a taxa de energia armazenada no ar da zona térmica, $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ o somatório das cargas convectivas internas, $\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{zi} - T_Z)$ o calor transferido pelas superfícies da zona, $\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_Z)$ a transferência de calor devida à mistura de ar entre zonas, $\dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_Z)$ a transferência de calor devida à infiltração de ar exterior e \dot{Q}_{sys} a saída de ar do sistema.

2.3 Condução através de paredes

A solução por série temporal mais básica para descrever a condução de calor em uma superfície é a equação que correlaciona o fluxo de calor de um elemento a uma série infinita de temperaturas, ou seja

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (4)$$

na qual q'' é o fluxo de calor (W/m^2), T é a temperatura do elemento (K), i indica os elementos internos da edificação, o indica os elementos externos da edificação, t é o passo de tempo, X e Y são os coeficientes de resposta.

Embora os termos na série geralmente decaiam rapidamente, uma quantidade infinita de termos, para se obter uma resposta exata, é inviável. Para contornar isso, o software utiliza elementos chamados funções de transferência por condução (CTF), as quais substituem os termos de alta ordem da equação original. O equacionamento utilizando CTF, para fluxo de calor interno e externo, respectivamente, é dado por

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nz} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (5)$$

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nz} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (6)$$

sendo X_j o coeficiente CTF exterior, Y_j o coeficiente CTF cruzado, Z_j o coeficiente CTF interno, Φ_j o coeficiente CTF para o fluxo de calor, T_i a temperatura de face interna (K), T_o a temperatura de face externa (K), q''_{ko} o fluxo de calor por condução na superfície externa (W/m^2) e q'' o fluxo de calor por condução na superfície interna (W/m^2).

2.4 Balanço de Energia em Janelas

A temperatura da superfície das janelas é determinada resolvendo as equações de balanço de energia para os dois lados a cada passo de tempo. As hipóteses abaixo são assumidas ao derivar as equações do balanço de energia:

1. As camadas de vidro são finas o suficiente para que o armazenamento de calor dentro do vidro possa ser negligenciado. Dessa maneira, não há termos relativos a capacidade térmica nas equações;
2. O fluxo de calor é perpendicular às superfícies do vidro e é unidimensional;
3. As camadas de vidro são opacas para a radiação infravermelha;
4. As superfícies são consideradas isotermas;

5. A radiação de onda curta absorvida numa camada de vidro pode ser considerada como absorvida igualmente entre as duas superfícies do vidro, isto é, a absorptância não varia com a espessura.

O balanço de energia é adaptado conforme a quantidade de camadas de vidro existentes na janela. As Equações abaixo mostram o equacionamento para vidros duplos (N=2). O equacionamento para N=1, N=3 e N=4 pode ser analogamente deduzido,

$$E_o \varepsilon_1 - \varepsilon_1 \sigma \theta_1^4 + k_1(\theta_2 - \theta_1) + h_o(T_o - \theta_1) + S_1 = 0 \quad (7)$$

$$k_1(\theta_1 - \theta_2) + h_1(\theta_3 - \theta_2) + \sigma \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} (\theta_3^4 - \theta_2^4) + S_2 = 0 \quad (8)$$

$$h_1(\theta_2 - \theta_3) + k_2(\theta_4 - \theta_3) + \sigma \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} (\theta_2^4 - \theta_3^4) + S_3 = 0 \quad (9)$$

$$E_i \varepsilon_4 - \varepsilon_4 \sigma \theta_4^4 + k_2(\theta_3 - \theta_4) + h_i(T_i - \theta_4) + S_4 = 0 \quad (10)$$

nas quais E_o e E_i representam o fluxo de radiação de onda longa (W/m²) incidente na janela exterior e interior, respectivamente, ε_i é a emissividade da superfície i (adimensional), k_i a condutância da camada de vidro i (W/m²K), θ_i a temperatura da superfície i (K), σ é a constante de Stefan-Boltzmann (W/m²K⁴), h_j a condutância convectiva do filme de ar entre vidros (W/m²K), h_i e h_o a condutância convectiva do filme de ar interior e exterior (W/m²K), T_i e T_o as temperaturas interna e externa (K) e S_i representa a radiação de onda curta e onda longa proveniente das zonas térmicas absorvidas pela superfície i (W/m²).

3 Metodologia

Com a proposta de analisar a influência da variação de diferentes elementos construtivos no comportamento térmico de uma edificação frente a um ano climático típico, foram realizadas simulações computacionais utilizando um modelo de edificação já existente, com variações na espessura do isolamento térmico das paredes, na cor das paredes externas e no tamanho das janelas. As cargas térmicas internas e sistema de ar-condicionado possuem as mesmas configurações entre todas as simulações.

3.1 Arquivo Climático

O arquivo climático consiste numa base de dados meteorológicos para uma localização específica. Para a concepção dos arquivos climáticos, são necessários no mínimo 10 anos de coleta de diversos dados como temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade relativa, radiação global horizontal extraterrestre e radiação direta normal extraterrestre. Com base nessas medições, é possível selecionar um ano climático típico, sendo esse considerado o ano que melhor representa o clima de um determinado local, excluindo-se os anos que apresentaram temperaturas extremas.

O software *EnergyPlus* utiliza como dados de entrada para as simulações arquivos do tipo EPW, ou TMY. Para este trabalho, o arquivo climático para a cidade de Florianópolis foi obtido por meio do *website* do LABEEE-UFSC (LABEEE, 2022).

3.2 Experimento Fatorial Completo

Para este estudo, foram analisadas as variáveis espessura do isolamento térmico das paredes, cor de parede externa e razão entre janelas e área de fachada. Os valores utilizados podem ser conferidos na Tabela 3.1. Foram utilizadas combinações de todas as variáveis entre si, totalizando 216 simulações numérico-computacionais diferentes. Procurou-se utilizar dimensões de janelas disponíveis no mercado, definindo-se, assim, seis possíveis variações. Para manter a proporcionalidade do experimento, foram igualmente definidos seis parâmetros para a absorvância térmica e para espessura de isolamento.

Tabela 3.1 - Valores utilizados para simulação.

Parâmetro	Valor 1	Valor 2	Valor 3	Valor 4	Valor 5	Valor 6
Alpha [-]	0,100	0,200	0,300	0,500	0,700	1,000
Espessura Isolamento [m]	0,010	0,025	0,050	0,075	0,100	0,200
Área das Janelas [%]	9,0%	12,0%	14,4%	18,0%	24,6%	33,0%

O parâmetro Alpha representa o valor utilizado para a absorvância térmica das paredes externas. A espessura do isolamento indica o tamanho da camada de isolamento utilizada em cada parede. Para o campo área das janelas, utilizou-se como referência a área total de fachada do modelo, sendo a área total das janelas dividida pela área total de fachada para obter-se o percentual da área de fachada ocupada pelas aberturas.

Devido às limitações geométricas, perfil arquitetônico e medidas comerciais, as áreas das janelas não puderam ser variadas proporcionalmente entre si. Com base nisso, a Tabela 3.2 expõe os valores utilizados em cada iteração para o tamanho de cada janela, bem como a área total ocupada pelo conjunto.

Tabela 3.2 - Área das Janelas por Iteração.

Parâmetro	Iteração 1	Iteração 2	Iteração 3	Iteração 4	Iteração 5	Iteração 6
Banho [m ²]	0,18	0,24	0,29	0,36	0,72	0,80
NorteQuarto [m ²]	1,00	1,33	1,60	2,00	4,00	4,44
SulQuarto [m ²]	1,00	1,33	1,60	2,00	4,00	4,44
NorteSala [m ²]	2,42	3,23	3,87	4,84	4,84	10,74
Cozinha [m ²]	0,60	0,80	0,96	1,20	2,40	2,66
OesteSala [m ²]	2,42	3,23	3,87	4,84	4,84	4,84
Área Total [m ²]	7,62	10,16	12,19	15,24	20,80	27,93

Para a análise dos resultados obtidos, foi utilizado o software Minitab (MINITAB, 2022), no qual, por meio de uma Análise de Variância (ANOVA), foram traçados gráficos que possibilitam determinar o grau de influência de cada um dos parâmetros, individualmente e combinados, na performance térmica da edificação. Os valores obtidos para o efeito de cada parâmetro foram conectados entre si por meio de uma reta (comportamento linear).

3.3 Box-Behnken

O *design* do experimento Box-Behnken foi projetado com o auxílio do software Minitab. Nele foram inseridos os mesmos valores máximos e mínimos para cada parâmetro

utilizados no experimento fatorial e, com base nisso, o programa definiu uma série de 15 experimentos. A Tabela 3.3 expõem os valores utilizados para cada simulação.

Tabela 3.3 - Valores utilizados por experimento.

Experimento	% Janelas	Cor Externa	Espessura Isolamento [m]
1	21%	0,545	0,105
2	33%	0,545	0,010
3	21%	0,545	0,105
4	9%	0,100	0,105
5	21%	0,545	0,105
6	33%	0,100	0,105
7	33%	0,545	0,200
8	33%	0,990	0,105
9	21%	0,990	0,200
10	9%	0,990	0,105
11	9%	0,545	0,010
12	21%	0,990	0,010
13	21%	0,100	0,010
14	21%	0,100	0,200
15	9%	0,545	0,200

Foram necessárias alterações nos valores para ser possível utilizar o mesmos máximos e mínimos entre os experimentos. Tendo em vista a necessidade de utilizar os valores médios de cada parâmetro no experimento Box-Behnken, foi necessária a criação de uma nova configuração de janelas e aberturas correspondendo a 21% da área de fachada. Valor, este, que não estava presente no experimento Fatorial Completo visto que havia a liberdade para escolher os valores intermediários do experimento e buscou-se utilizar valores comerciais. Os valores individuais utilizados para a área de cada janela são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Área das Janelas Utilizadas nos Experimentos Box-Behnken.

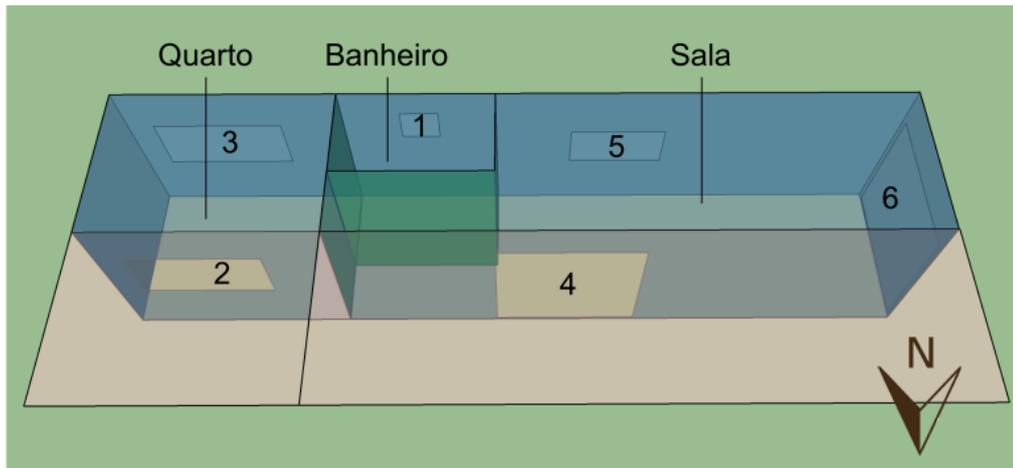
Projeto Box - Behnken			
Percentual	9%	21%	33%
Banho [m ²]	0,18	0,42	0,80
NorteQuarto [m ²]	1,00	2,50	4,44
SulQuarto [m ²]	1,00	2,50	4,44
NorteSala [m ²]	2,42	6,00	10,74
Cozinha [m ²]	0,60	1,50	2,66
OesteSala [m ²]	2,42	4,84	4,84

Este *design* deve ser suficiente para ajustar um modelo quadrático de resposta. Utilizou-se o software Minitab para realizar a análise de variância (ANOVA), determinando o grau de influência dos parâmetros estudados na performance térmica da edificação.

4 Estudo de Caso

Para a realização desse estudo, utilizou-se o modelo desenvolvido por Alberti (2022) de uma casa contêiner. O projeto utiliza um contêiner *High Cube*, onde o diferencial para os demais contêineres é sua altura de 2,90 metros. A casa conta com 29,26 m² e foi dividida em 3 zonas térmicas, sendo elas quarto, banheiro e sala. A Figura 4.1 ilustra a orientação do modelo, a divisão das zonas térmicas e as janelas e aberturas numeradas de 1 a 6, sendo denominadas: 1- Banho; 2- NorteQuarto; 3- SulQuarto; 4- NorteSala; 5 -Cozinha; e 6- OesteSala.

Figura 4.1 - Modelo de casa contêiner elaborado por Alberti (2022).



A casa está situada na cidade de Florianópolis, Brasil. Conta com 84,62m² de área de fachada e possui um brise de 2,5 m de largura na fachada norte. A residência possui também uma cobertura verde, que por sua vez conta com várias camadas, com funções de impermeabilização, drenagem, substrato e vegetação. Para a camada de vegetação foi utilizada a função *RoofVegetation* disponível no software EnergyPlus, com uma altura total de 20 cm.

5 Análise dos Resultados

As estratégias propostas visaram determinar o grau de influência dos parâmetros cor externa, espessura do isolamento nas paredes e razão de proporção de aberturas no comportamento energético da edificação em estudo conforme dois métodos de *Design of Experiments*, Fatorial Completo e Box-Behnken. Os resultados analisados foram a carga térmica de resfriamento e aquecimento utilizada por toda a edificação durante o ano e a soma da quantidade de horas de desconforto térmico dos cômodos “Quarto” e “Sala” da casa contêiner. Por último, salienta-se que o software utilizado não permitiu variações nas escalas dos gráficos, nem na sua aparência final. Sugere-se, portanto, atenção na leitura dos mesmos.

5.1 Carga Térmica de Resfriamento

Os resultados para a influência dos parâmetros em estudo para a carga térmica de resfriamento da edificação ao longo do ano, conforme os experimentos Box-Behnken e Fatorial Completo, são mostrados, respectivamente, nas Figuras 5.1 e 5.2.

Figura 5.1 - Resultado para a carga térmica de resfriamento pelo experimento Box-Behnken.

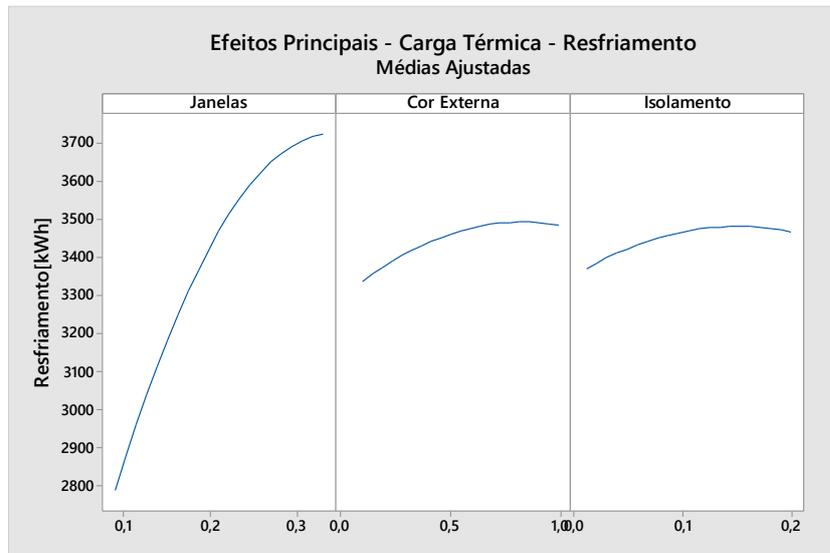
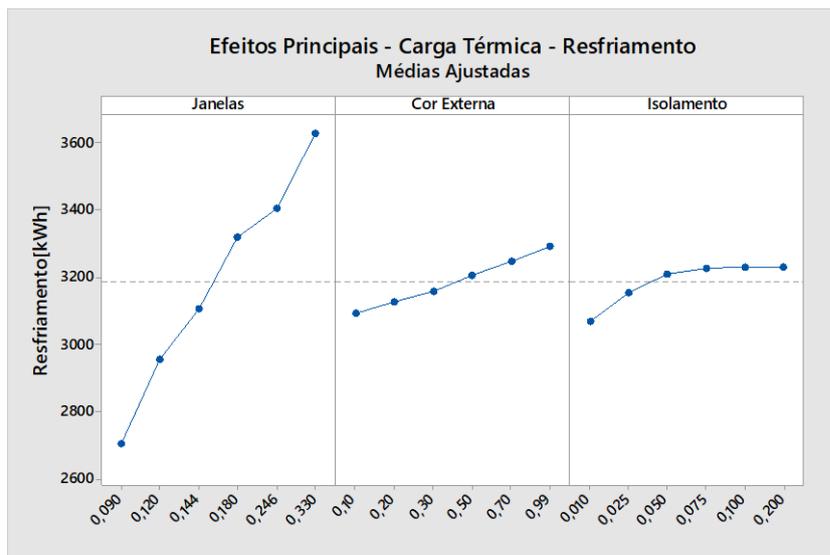


Figura 5.2 - Resultado para a carga térmica de resfriamento pelo experimento Fatorial Completo.



Percebe-se, por ambos os métodos, que quanto maior o percentual de área de fachada ocupada por janelas, maior será a carga de resfriamento necessária ao longo do ano, sendo esse o efeito mais significativo entre os parâmetros estudados.

O comportamento para a cor externa e isolamento mostrou-se muito semelhante e de menor significância. Observa-se que uma maior espessura de isolamento diminui a quantidade de calor que entra na edificação nos dias quentes. Por outro lado, ela dificulta a saída de calor proveniente das cargas térmicas internas, como iluminação e equipamentos domésticos. Assim, exige o funcionamento do sistema HVAC para manter as condições de conforto térmico. Percebe-se, também, que ambos os métodos indicam que isolamentos acima de 0,05 m não possuem efeito significativo na carga térmica, sendo esse um possível parâmetro de economia na hora de projeto da edificação. As Figuras 5.3 e 5.4 ilustram, respectivamente, o resultado obtido para a interação entre os parâmetros estudados utilizando-se os métodos Box-Behnken e Fatorial Completo.

Figura 5.3 - Resultado para a interação entre fatores na carga térmica de resfriamento pelo experimento Box-Behnken.

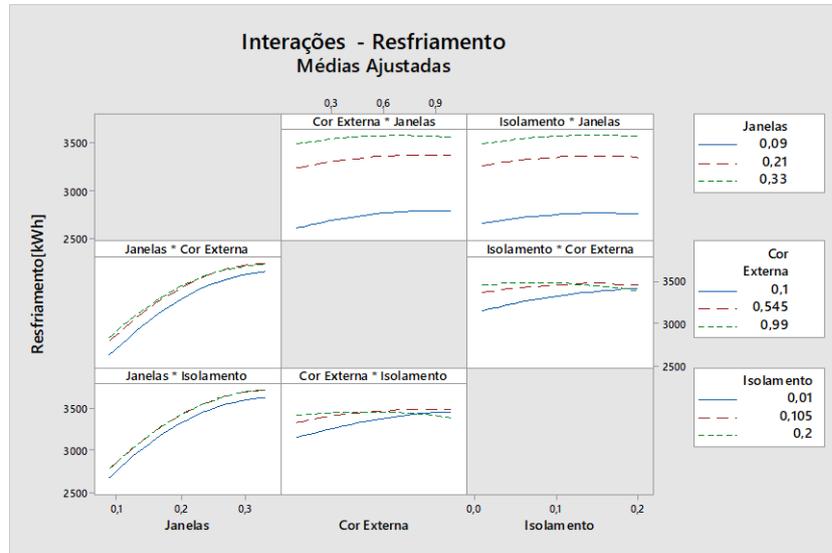
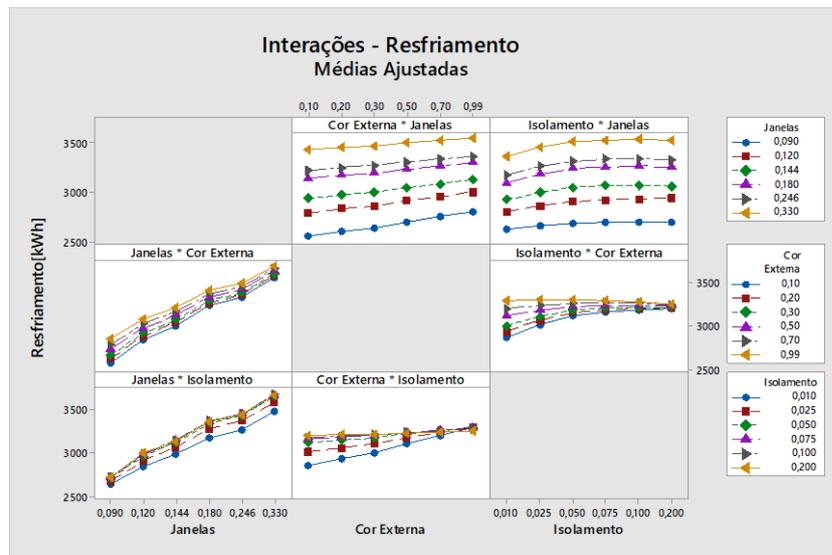


Figura 5.4 - Resultado para a interação entre fatores na carga térmica de resfriamento pelo experimento Fatorial Completo.



Os gráficos não mostram uma correlação significativa entre os fatores para a carga térmica de resfriamento, sendo os efeitos principais os de maior significância. Embora os parâmetros se modifiquem, as curvas continuam apresentando o mesmo comportamento. Isto evidencia que não há interação entre os efeitos para a carga térmica de resfriamento, ou seja, a alteração de um parâmetro não alterará o efeito ocasionado por outro.

Era prevista uma divergência entre os resultados dos experimentos, principalmente próximo aos níveis extremos dos parâmetros analisados, visto que o experimento Box-Behnken evita situações experimentais extremas, onde os três fatores estão no nível máximo ou mínimo. No entanto, essa diferença não ocorreu e os dois métodos de análise apresentaram respostas parecidas entre si.

5.2 Carga Térmica de Aquecimento

Os resultados para a influência dos parâmetros em estudo para a carga térmica de aquecimento da edificação ao longo do ano, conforme os experimentos Box-Behnken e Fatorial Completo, são mostrados, respectivamente, nas Figuras 5.5 e 5.6.

Figura 5.5 - Resultado para a carga térmica de aquecimento pelo experimento Box-Behnken.

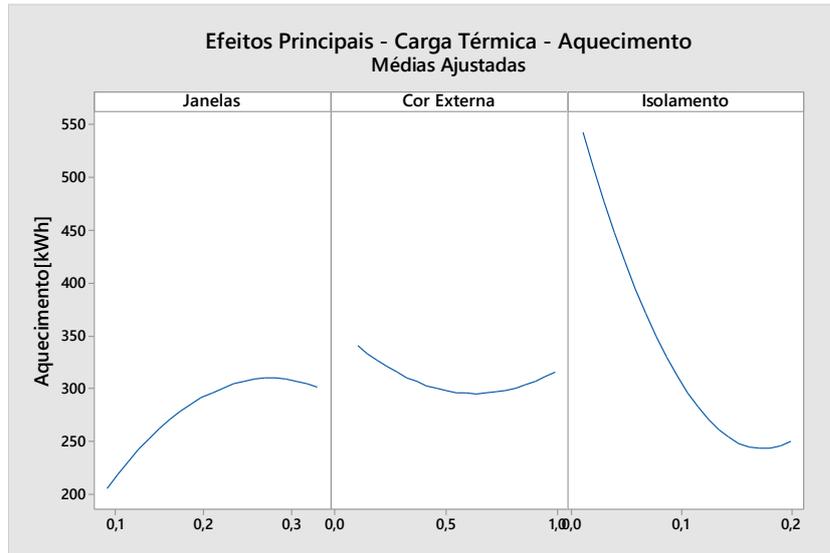
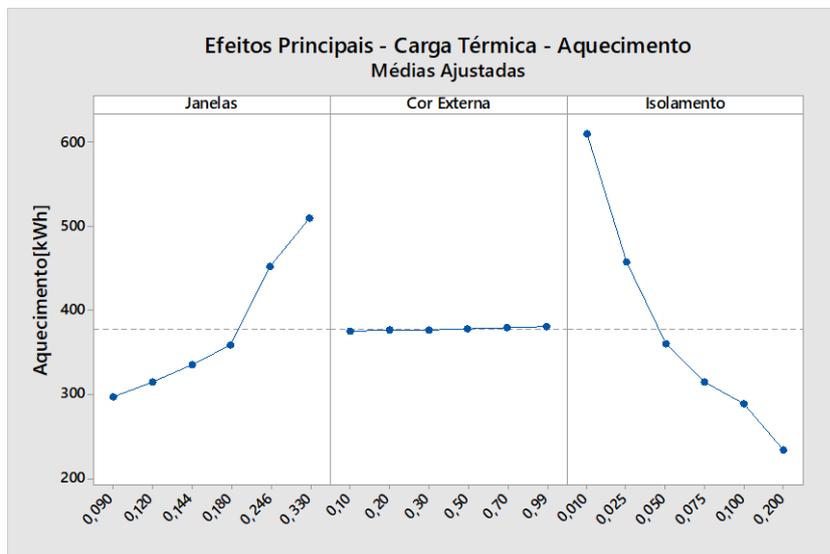


Figura 5.6 - Resultado para a carga térmica de aquecimento pelo experimento Fatorial Completo.



Os resultados mostram que a cor externa da edificação não tem efeito significativo sobre a carga térmica de aquecimento. Já o aumento da camada de isolamento contribuiu significativamente para a redução da carga de aquecimento necessária ao longo do ano, enquanto o aumento da área de janelas causou o aumento da necessidade de aquecimento.

Conclui-se que o aumento da espessura de isolamento contribuiu positivamente para evitar a perda do calor gerado pelas cargas internas durante os dias mais frios, resultando numa menor carga de aquecimento artificial. As janelas, por outro lado, contribuíram negativamente para este fenômeno, aumentando a energia despendida para este fim. Nesta edificação foram

utilizados vidros simples, que não proveem um isolamento térmico adequado. Fato, este, que contribuiu para a perda de calor das cargas internas para o meio externo nos dias mais frios, aumentando a necessidade de aquecimento artificial.

Quando os parâmetros analisados estavam em níveis próximos aos limites, os resultados para a carga de aquecimento mostraram-se significativamente diferentes entre os métodos. Isto resultou em curvas de comportamento distintos entre eles, evidenciando suas diferenças. Para valores intermediários, ambos os métodos apresentaram resultados semelhantes, enquanto nas extremidades as limitações do experimento Box-Behnken foram evidenciadas e os resultados divergiram consideravelmente para os efeitos de janelas e cor externa.

As Figuras 5.7 e 5.8 ilustram, respectivamente, o resultado obtido para a interação entre os parâmetros estudados utilizando-se os experimentos Box-Behnken e Fatorial Completo.

Figura 5.7 - Resultado para a interação entre fatores na carga térmica de aquecimento pelo experimento Box-Behnken.

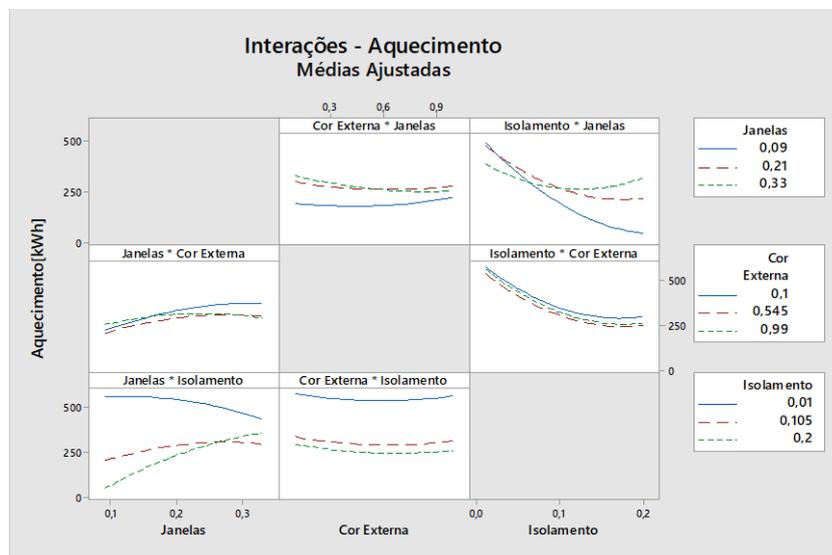
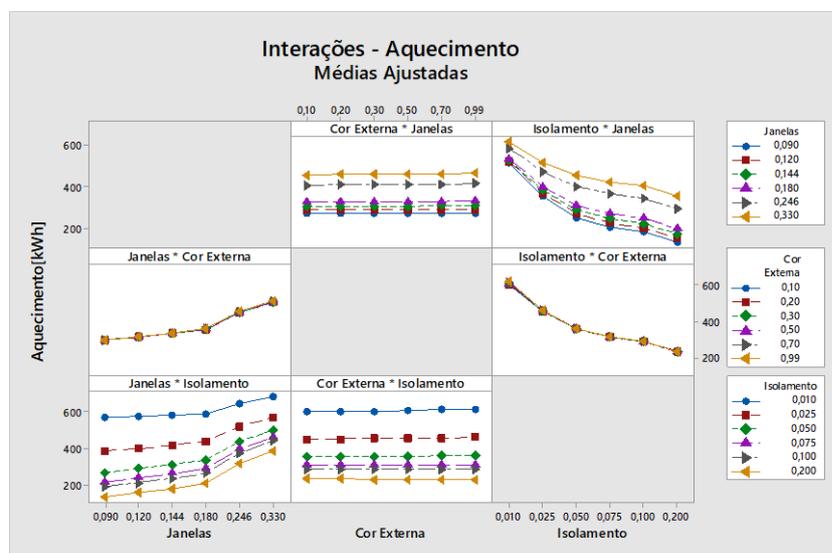


Figura 5.8 - Resultado para a interação entre fatores na carga térmica de aquecimento pelo experimento Fatorial Completo.



Os resultados indicam que não houve interação entre os efeitos, o que foi evidenciado pelas linhas em paralelo e/ou sobrepostas nos gráficos referentes ao método Fatorial Completo. O método Box-Behnken apresentou comportamentos diferentes para as interações entre parâmetros aos do Fatorial Completo, principalmente quando estes estavam em próximos aos seus níveis extremos. Desse modo, as limitações do método Box-Behnken para representar valores limítrofes foram novamente evidenciadas e os resultados divergiram consideravelmente para as interações entre janelas/cor externa e janelas/isolamento.

5.3 Desconforto Térmico

Os resultados para a influência dos parâmetros em estudo para a quantidade de horas em desconforto térmico da edificação ao longo do ano e conforme os experimentos Box-Behnken e Fatorial Completo são mostrados, respectivamente, nas Figuras 5.9 e 5.10.

Figura 5.9 - Resultado para a quantidade de horas em desconforto térmico pelo experimento Box-Behnken.

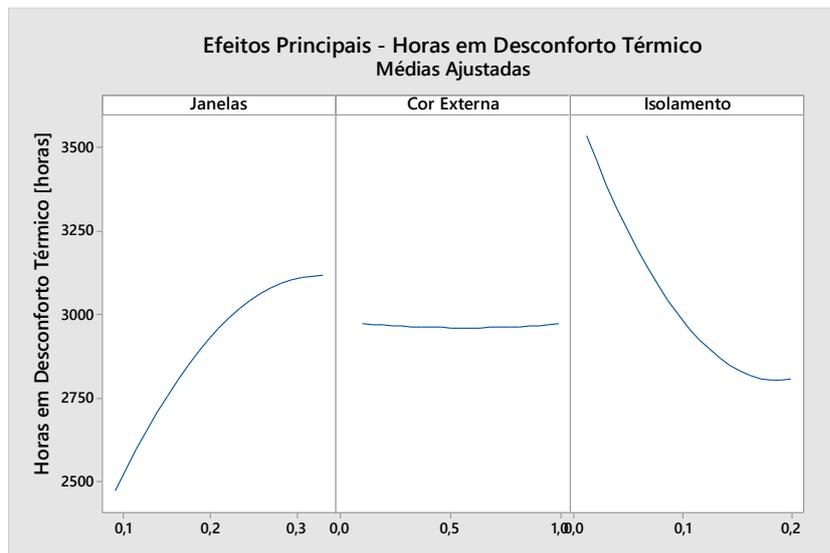
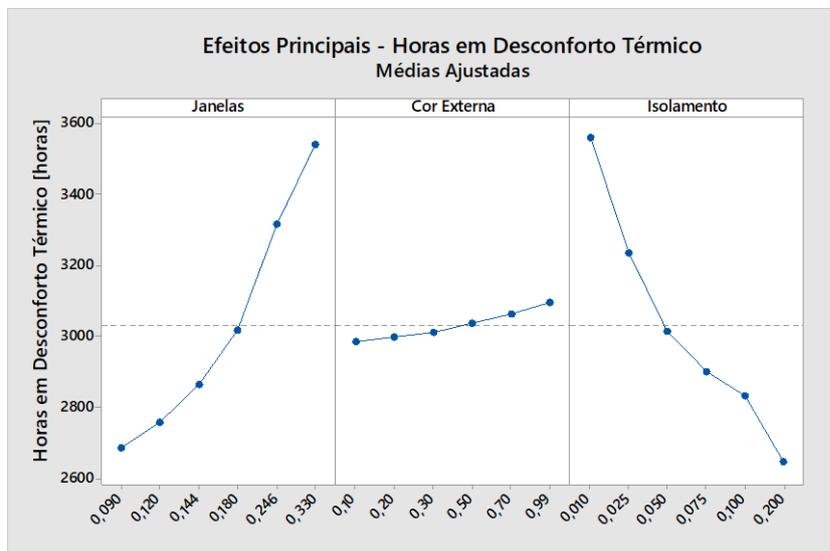


Figura 5.10 - Resultado para a quantidade de horas em desconforto térmico pelo experimento Fatorial Completo.



Os resultados mostram que o aumento da área total de janelas também aumentou a quantidade de horas em que a temperatura operativa da construção esteve fora da zona de conforto térmico. O aumento da área total de janelas pode tanto aumentar o ganho de energia no verão, como aumentar as perdas térmicas no inverno. O efeito contrário aconteceu com o aumento do Isolamento, que diminui a quantidade de horas em desconforto. O aumento do isolamento térmico diminui a quantidade de calor que entra na edificação durante os dias mais quentes, ao mesmo tempo que dificultou a saída de calor proveniente das cargas internas. A influência da Cor Externa mostrou-se novamente não significativa.

As Figuras 5.11 e 5.12 ilustram, respectivamente, o resultado obtido para a interação entre os parâmetros estudados utilizando-se os métodos Box-Behnken e Fatorial Completo.

Figura 5.11 - Resultado para a interação entre fatores na quantidade de horas em desconforto térmico pelo experimento Box-Behnken.

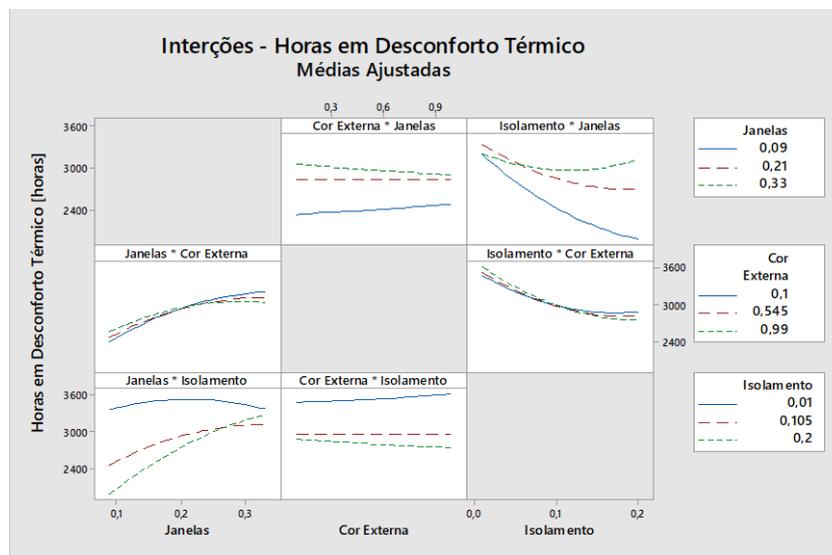
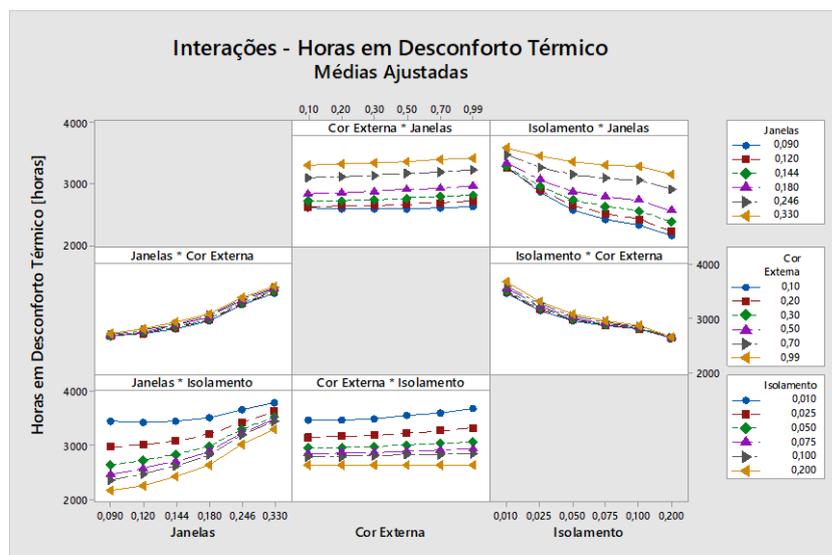


Figura 5.12 - Resultado para a interação entre fatores na quantidade de horas em desconforto térmico pelo experimento Fatorial Completo.



Não foi possível identificar nenhuma interação entre os efeitos. Fato esse comprovado pela presença de linhas de curvatura semelhante e paralelas entre si ao analisar-se a Figura 5.12.

Os modelos quadráticos do método Box-Behnken apresentaram diferentes comportamentos para interação entre efeitos dos apresentados pelo Fatorial Completo. Novamente os resultados obtidos para os parâmetros a níveis intermediários foram semelhantes entre os métodos. Para valores a níveis extremos a diferença foi mais considerável, resultando em curvaturas diferentes entre os métodos. Os resultados divergiram significativamente para a interação entre janelas/isolamento.

6 Conclusões

Neste trabalho buscou-se analisar a influência dos parâmetros construtivos (cor externa, espessura de isolamento térmico e área total de janelas) no comportamento térmico e energético de uma edificação estruturada em um contêiner. Para tal, utilizou-se dois métodos estatísticos de *Design of Experiments*, Fatorial Completo e Box-Behnken, comparando os resultados apresentados entre eles.

O trabalho teve como objetivo utilizar dois *Design of Experiments* para realizar a análise energética de uma edificação em contêiner. Tal ideia surge da necessidade de reaproveitamento de milhares de contêineres que chegam ao final de sua vida útil todos os anos, sendo a construção de casas uma alternativa barata, rápida e eficiente para este problema. Aliado a isso também está a crescente demanda energética mundial, sendo necessária a utilização de estratégias que possibilitem a manutenção das condições de conforto térmico da maneira mais eficiente possível.

O aumento do isolamento térmico mostrou-se significativamente impactante no comportamento térmico da edificação. Aumentou as cargas de resfriamento e diminuiu as cargas de aquecimento e a quantidade de horas de desconforto térmico da edificação. Observa-se que o aumento da espessura dificultou a perda de calor proveniente das cargas internas para o ambiente externo, resultando, assim, numa maior necessidade de resfriamento, e menor de aquecimento. Já o aumento da área de janelas e aberturas teve um impacto na carga térmica de aquecimento e resfriamento. Além disso, aumentou as horas de desconforto térmico na edificação. Verifica-se que janelas comuns de vidros simples não propiciam um isolamento térmico adequado, aumentando o ganho de calor no verão e as perdas térmicas no inverno.

A utilização de cores externas mais escuras, com maior coeficiente de absorvidade solar, resultou num aumento na carga térmica de resfriamento e na quantidade de horas em desconforto térmico. Para a carga térmica de aquecimento, o efeito mostrou-se muito reduzido, podendo ser desconsiderado. Explica-se este efeito devido ao aumento da absorção de calor por meio da superfície com o aumento da absorvidade de ondas curtas (energia solar), fato relevante principalmente nos meses de verão e de altas temperaturas externas.

Para trabalhos futuros sugere-se avaliar a utilização de janelas com mais de uma camada de vidro, a fim de aumentar o isolamento térmico fornecido para a edificação. É sugerida, também, a simulação da mesma edificação para outras cidades, avaliando a influência da latitude e de diferentes climas nos parâmetros testados.

Referências

Alberti, L. H. **Análise termoenergética de uma casa contêiner utilizando soluções passivas e climatização artificial**. Trabalho de conclusão de curso, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 23f. 2022. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/241191/001142961.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14 ago. 2022.

Amaral, A. R.; Rodrigues, E.; Gaspar, A. R.; Gomes, Á. **A thermal performance parametric study of window type, orientation, size and shadowing effect**. Sustainable Cities and Society, vol 26, páginas 456-465, out. 2016.

Bansal, N. K.; Garg, S. N.; Kothari, S. **Effect of Exterior Surface Colour on the Thermal Performance of Buildings**. Building and Environment, vol 27, páginas 31-37, jan. 1992.

ENERGYPLUS. **Version 8.7**. U.S. Department of Energy's (DOE), 2017. Disponível em: <https://energyplus.net/downloads>. Acesso em: 14 ago. 2022a.

ENERGYPLUS, U.S. D. of E. **Engineering Reference**. [s1], p.1518, 2022. Disponível em: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v22.1.0/EngineeringReference.pdf. Acessado em: 17 set. 2022b.

Henninger, R. H.; Witte, M. J.; Crawley, D. B. **Analytical and comparative testing of EnergyPlus using IEA HVAC BESTEST E100-E200 test suite**. Energy and Buildings, vol 36, páginas 855-863, ago. 2004.

LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos Climáticos**. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>. Acesso em: 14 ago. 2022

MINITAB. **Versão 17**. Minitab, 2022. Disponível em: <https://www.minitab.com/pt-br/>. Acesso em : 17 set. 2022.

Occhi, T.; De Almeida, C. C. O. **Uso de containers na construção civil: Viabilidade construtiva e percepção dos moradores de Passo Fundo -RS**. Revista de Arquitetura IMED, 2016.

Viana, F. S. **Análise de Desempenho Térmico em Módulo de Contêiner Marítimo**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais, 95f. 2018.