



Otimização experimental do desempenho térmico de uma edificação residencial

Mariana Tonini de Araújo¹, Suellen Tonatto Ferrazzo¹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
CEP 90035-190 – Porto Alegre – RS – Brasil

{marianatonini93@hotmail.com, suellenferrazzo@hotmail.com}

Abstract. *This work presents an experimental optimization of the thermal performance of a dwelling. The experimental 2^k design contemplates five controllable factors, absorbance, thermal conductivity, ventilation rate, number of residents and equipments; and four response variables, air temperature on summer and winter and air relative humidity on summer and winter. Methodology was based in a computer simulation. The objective was to evaluate the influence of the controllable factors and their interactions over the response variable. The ventilation rate was the one that influenced more summer and winter temperature and winter air humidity, while air humidity in summer was affected mainly by the number of equipment and absorbance.*

Resumo. *Este trabalho apresenta a otimização experimental do desempenho térmico de uma edificação. O design experimental 2^k contemplou cinco fatores controláveis, absorvância, condutividade térmica, taxa de ventilação, número de moradores e equipamentos; e quatro variáveis de resposta, temperatura do ar no verão e inverno e umidade relativa do ar no verão e inverno. A metodologia baseou-se em uma simulação computacional. Objetivou-se avaliar a influência dos fatores controláveis e interações na variável de resposta. A taxa de ventilação foi a que mais influenciou a temperatura no verão e inverno e a umidade do ar no inverno, enquanto a umidade do ar no verão foi afetada principalmente pelo número de equipamento e absorvância.*

1. Introdução

O desempenho térmico de um ambiente construído afeta diretamente o conforto do usuário e os gastos energéticos da habitação. Entretanto, não há uma estrutura geral consolidada para avaliá-lo em um edifício, com ambientes para as mais diversas funções, como por exemplo, residência, comércio, hospital e aeroporto. Isso ocorre devido a desafios na definição dos fatores a serem considerados, aos relacionados ao processo de avaliação, e aos objetivos e desejos das partes envolvidas (De Wilde, 2019). Ainda, conforme Aldawi *et al.* (2012), a maioria das pesquisas está concentrada na economia de energia durante o processo de execução da obra, e poucas estão voltadas a performance térmica em função de melhorias nos sistemas e materiais de construção ainda na fase pré-operacional.



Perante este cenário, identifica-se a escassez de estudos que abordam o uso de ferramentas estatísticas para avaliar a influência das variáveis que afetam significativamente o desempenho térmico de um ambiente, bem como o efeito das interações entre estas variáveis. Acredita-se que a otimização experimental do comportamento térmico de uma edificação possibilite a obtenção rápida de informações que possam auxiliar na tomada de decisões ainda na fase de projeto. Esta abordagem difere das convencionais que avaliam a quantidade de energia necessária para manutenção do conforto térmico ou do desempenho térmico por meio do estudo univariado dos fatores de controle do sistema. Um estudo univariado, por exemplo, consistiria na análise do impacto da variação da densidade de um material utilizado na construção da parede no conforto térmico dos moradores, mantendo as demais propriedades termofísicas dos materiais que compõem a parede constantes.

Em todas áreas do conhecimento a investigação de um determinado processo, produto ou sistema requer a realização de experimentos, que consistem em uma série de testes, onde variáveis (fatores) de entrada do processo/sistema são alteradas com o objetivo de avaliar como influenciam na variável de resposta. Em geral, visa-se desenvolver processos ou sistemas robustos, os quais são afetados significativamente por diferentes fontes de variabilidade (Montgomery, 2017).

A realização de um estudo univariado, ou seja, variando um fator e fixando os demais, pode resultar em um grande número de experimentos, e conseqüentemente no dispêndio de mais recursos, tais como materiais, energia, mão de obra e tempo. Além disso, esta metodologia não permite identificar o efeito da interação entre os fatores de influência e nem identificar a condição ótima do sistema. O melhor meio para estudar o comportamento do sistema em função dos seus fatores é por meio de um projeto experimental, uma estratégia em que a influência das variáveis de entrada sob a resposta é observada com a alteração de todos os fatores simultaneamente (multivariada) e não de forma individual (univariada) (Montgomery, 2017).

Quando as relações entre os fatores são significativas, a melhor condição indicada por estudos univariados difere das condições de otimização por estudos multivariados, sendo que, quanto maiores forem esses efeitos, maior é a diferença na otimização obtida por metodologias uni e multivariada. Dessa forma, a estratégia univariada pode apresentar falhas quando o efeito de um fator depende dos níveis dos demais fatores envolvidos no processo de otimização. Por este motivo, as metodologias de otimização multivariada são projetadas para os níveis de todos os fatores serem alterados simultaneamente (Ferreira *et al.*, 2007).

Sendo assim, deve-se utilizar tempo e esforço necessários para desenvolver um planejamento de experimentos adequado, com a finalidade de se obter a quantidade de dados confiáveis suficiente para responder às questões de interesse de forma mais eficiente. Para tanto, pode-se utilizar a ferramenta de *Design of Experiments* (DOE) ou Planejamento Experimental, a qual auxilia na condução de experimentos confiáveis, sob a influência da oscilação de diversos fatores, reduzindo a variabilidade dos resultados (Ramachandran e Tsokos, 2015; Tajsoliman *et al.*, 2017). O design experimental possibilita a otimização simultânea dos parâmetros de um processo, produto ou sistema com a redução do número de experimentos que necessitam ser executados, reduz o consumo de materiais, tempo de trabalho e custos, bem como permite a rápida obtenção



e organização de informações e a melhoria da qualidade de bens e serviços (Ferreira *et al.*, 2007; Ramachandran e Tsokos, 2015).

Posterior a definição do DOE e execução dos experimentos, realiza-se a otimização do sistema por meio da Análise de Variância (ANOVA), em que se avalia, simultaneamente, os efeitos dos fatores controláveis (variáveis de entrada) e interações que podem afetar suas características (variável de saída). Segundo Naik e Reddy (2018), a partir de um planejamento experimental, a ANOVA permite identificar as variáveis que afetam de forma significativa e, conseqüentemente obter a combinação dos níveis dos fatores que otimizam a variável resposta. Esta análise estatística é uma ferramenta de auxílio na tomada de decisões, pois possibilita encontrar o valor ótimo para a característica de interesse do sistema.

Nesse sentido, este trabalho objetivou avaliar a influência dos fatores controláveis e suas interações na variável de resposta em análise, para a otimização do desempenho térmico de uma edificação residencial. Avaliou-se as variações de temperatura e umidade relativa do ar no ambiente térmico, para um dia típico de projeto de verão e de inverno, por meio das ferramentas de Design experimental, ANOVA e Otimização.

2. Materiais e Métodos

Neste trabalho, a influência das variáveis sobre a performance térmica de um ambiente construído é avaliada por meio de um estudo multivariado. Esta abordagem compreendeu a definição de um planejamento experimental, execução dos experimentos por simulação computacional e análise de variância dos resultados.

A metodologia do trabalho divide-se em duas partes. A primeira parte descreve os dados de entrada da habitação, necessários para a realização da simulação computacional do modelo de edificação analisado. Na segunda parte, descreve-se o planejamento experimental para o modelo. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio de um software estatístico.

2.1. Análise do Desempenho Térmico

A análise do comportamento térmico e/ou eficiência energética de edificações residenciais foram realizadas obedecendo as recomendações da NBR 15220 (2003), que estabelece um Zoneamento Bioclimático Brasileiro e recomenda diretrizes de construção e estratégias de condicionamento térmico passivo, baseadas em parâmetros e condições de contorno fixas, bem como as diretrizes da NBR 15575 (2013), que dispõe sobre os procedimentos para a avaliação do comportamento térmico de edificações.

As análises térmicas foram mensuradas através de simulações realizadas por intermédio do *software EnergyPlus*, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos e amplamente difundido e utilizado por engenheiros e arquitetos.

2.2. Definição do Modelo e dados de entrada

O modelo habitacional analisado se caracteriza pela simplicidade, com foco na análise estatística, retirando a complexidade de uma edificação composta por inúmeras paredes, cômodos e aberturas. Neste contexto, a análise consiste na avaliação da influência dos

parâmetros em estudo na variável de resposta, e não, por exemplo, no conforto do usuário, o que justifica a análise em termos de um único cômodo, constituído por paredes de concreto revestidas de argamassa, método construtivo muito presente em casas do programa Minha Casa Minha Vida.

Os dados de entrada necessários para as simulações no EnergyPlus foram definidos com base na NBR 15220 (2003), quando da escolha das propriedades termofísicas dos materiais que compõem a habitação; no Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais - RTQ-R (INMETRO, 2012), para definição de rotinas de uso e ocupação do ambiente; bem como na NBR 15575 (2013), para a definição dos dias típicos de verão e inverno.

2.3. Descrição do Modelo Analisado

O sistema do presente estudo consiste em uma residência de um cômodo com área de $25,0 \text{ m}^2$ e pé-direito de $2,8 \text{ m}$, a qual possui uma janela ($1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$) voltada para o Oeste e uma parede exposta voltada para o Norte, o que configura a situação mais crítica para a performance da habitação no período do verão, conforme a norma NBR 15575 (2013). Apresenta-se na Figura 1a uma representação tridimensional do modelo supracitado esboçado no software *SketchUp Make 2017* e na Figura 1b, a planta baixa do modelo.

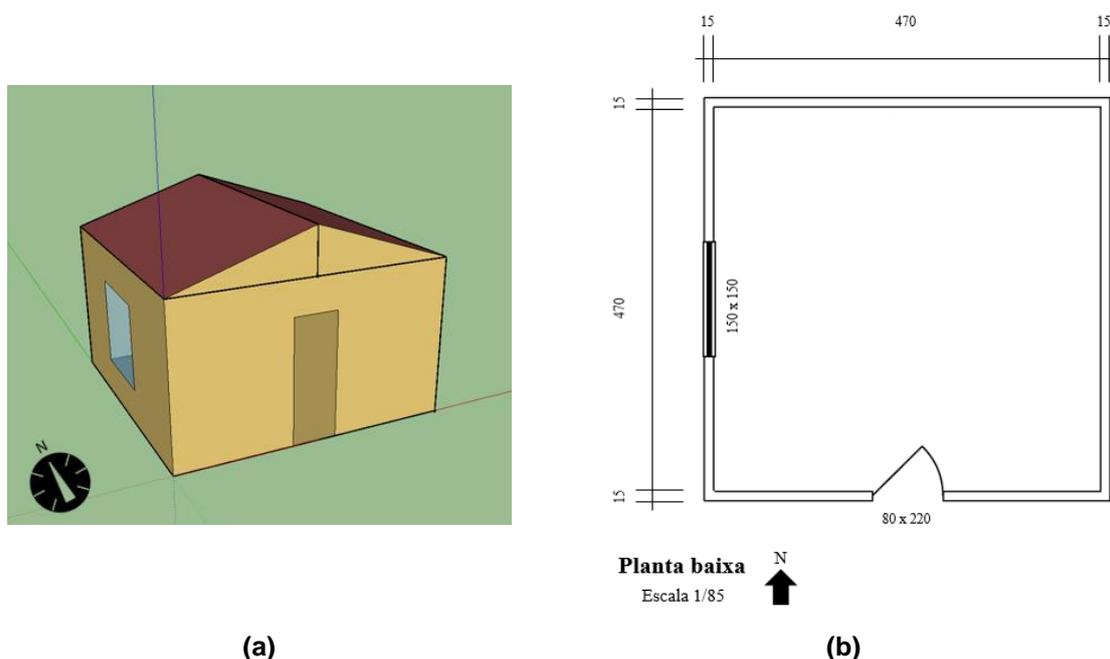


Figura 1. Representação tridimensional da edificação simulada (a) e Planta baixa do modelo usado na simulação (b)

A localização do modelo em estudo (Figura 1), para efeito de simulação, foi considerado na cidade de Porto Alegre – RS, a qual pertence a Zona Bioclimática 3, conforme a norma NBR 15220 (2003), sendo composta por uma única zona térmica (Zona Térmica 1), e com suas propriedades definidas considerando tratar-se do ambiente residencial sala.

Para o modelo foi analisado a taxa de ventilação do ambiente de 1 renovação/hora ou 5 renovações/horas (ren/h), valores em acordo com o descrito pela norma NBR 15220 (2003) para avaliação de edificações em fase de projeto. Considera-se que o piso está em contato com o solo, o qual está a uma temperatura de 18 °C, valor padrão para a temperatura de um solo no programa *EnergyPlus*.

2.4. Caracterização dos Materiais Utilizados

As paredes externas da habitação são configuradas com argamassa comum de 2,5 cm de espessura e concreto com pozolana e finos de 14,0 cm. O concreto com pozolana foi escolhido para o fechamento por possuir dois valores de condutividade térmica (0,44 e 0,52 W/mK) para a mesma densidade (1400 kg/m³).

Complementarmente foram feitas as seguintes considerações: piso constituído de concreto lastro com 10,0 cm de espessura e cerâmica de 1,0 cm, laje de cobertura composta por concreto normal com 7,0 cm de espessura, telhas cerâmicas do telhado com espessura de 1,0 cm, esquadria de vidro com 0,3 cm de espessura e porta de compensado com 3,5 cm de espessura. A Tabela 1 apresenta as propriedades termofísicas dos materiais utilizados (NBR 15220, 2003 e DOE, 2017a), com exceção do compensado e do vidro, materiais cujas propriedades foram retiradas da base de dados do *EnergyPlus*.

Tabela 1. Características termofísicas dos materiais simulados

Material	Espessura (m)	Densidade ρ (kg/m ³)	Calor específico c (J/kg.K)	Condutividade térmica λ (W/mK)	Absortância solar α
Argamassa comum	0,025	1915	1000	1,15	0,3/0,5
Compensado	0,035	530	2300	0,15	0,7
Concreto cobertura	0,07	2300	1000	1,75	0,8
Concreto fechamento	0,14	1400	1000	0,44/0,52	0,8
Concreto piso	0,1	2300	1000	1,75	0,8
Piso cerâmico	0,01	2000	920	1,05	0,8
Telha cerâmica	0,01	2000	920	1,05	0,8

Fonte: NBR 15220 (2003); DOE (2017a)

2.5. Rotinas de Uso e Ocupação do Ambiente

Os ocupantes da edificação, os equipamentos em funcionamento e o sistema de iluminação geram cargas térmicas internas que devem ser contabilizadas. Assim, por meio do objeto *Schedule* do *EnergyPlus*, foram definidas rotinas de uso e ocupação da habitação. A rotina de ocupação dos moradores da habitação e as rotinas de uso do sistema de iluminação e de equipamentos foram retiradas do RTQ-R (INMETRO, 2012).

Para a ocupação da zona térmica, considerou-se os moradores (2 ou 4 moradores dependendo da simulação) sentados ou assistindo TV, liberando cada um, uma taxa de calor de 108 W, segundo o RTQ-R (INMETRO, 2012). A parcela radiante adotada foi de 30% (default do *EnergyPlus*). Conforme descrito no RTQ-R (INMETRO, 2012), a ocupação da sala durante os dias de semana é de 25% dos moradores das 14h às 19h,



100% dos moradores as 19h e 50% dos moradores das 21h às 22h. Para os finais de semana a ocupação é de 25% dos moradores as 11h, 75% dos moradores as 12h e 14h, 50% dos moradores das 15h às 17h, 25% dos moradores as 18h e 19h e 50% dos moradores as 20h e 21h.

Para o sistema de iluminação foi considerado uso de lâmpada fluorescente compacta 3U com potência de 26 W. Segundo o *EnergyPlus*, para lâmpadas deste tipo a fração radiante é 0,09 e a visível é 0,13 (DOE, 2017b). Ainda, conforme descrito no RTQ-R (INMETRO, 2012), o padrão de uso da iluminação durante os dias de semana é de 100% de uso do sistema de iluminação das 17h às 21h e para os finais de semana é de 100% de uso do sistema de iluminação das 11h às 12h e das 17h às 21h.

Para os ganhos internos de calor foi contabilizado ainda o uso de equipamentos que, no caso, foi uma ou duas televisões LED de 40" com potência de 83 W (PROCELINFO, 2019), fração latente nula e fração radiante de 0,5. O período de utilização dos equipamentos para a simulação do ambiente foi de 24h conforme recomendação do RTQ-R (INMETRO, 2012).

2.6. Definição dos Dias Típicos

A localização geográfica de Porto Alegre, bem como os dados climáticos correspondentes aos dias típicos de projeto de verão e de inverno para a cidade, conforme Tabela 2, foram obtidos da NBR 15575 (2013). O dia típico foi definido como um dia real correspondente ao dia mais quente (para o verão) ou mais frio (para o inverno) do ano, segundo a média do período dos últimos dez anos.

Tabela 2. Características dos dias típicos de verão e inverno para a cidade de Porto Alegre - RS

Cidade de Porto Alegre (Latitude 30,02S e Longitude 51,22º)	Dia típico	
	Verão	Inverno
Temperatura diária máxima (°C)	35,9	-
Temperatura diária mínima (°C)	-	4,3
Amplitude de temperatura diária (°C)	9,6	8,6
Temperatura de bulbo úmido (°C)	23,9	12,1
Nebulosidade (décimos)	5	6

Fonte: NBR 15575 (2013)

2.7. Design experimental

Para a otimização do desempenho térmico da habitação, inicialmente definiu-se as variáveis de entrada (fatores controláveis) e de saída do sistema a serem consideradas no design experimental do tipo 2^k completo. Projetos fatoriais do tipo 2^k consistem em um design com k fatores, cada um deles com dois níveis, alto (+1) e baixo (-1), podendo estes serem qualitativos ou quantitativos. Já a variável de resposta deve ser quantitativa. Neste design considerou-se as seguintes suposições: os fatores são a níveis fixos; os projetos são completamente aleatorizados, e as hipóteses de normalidade dos resíduos são satisfeitas (Montgomery, 2017). As etapas para definição do planejamento experimental e otimização do sistema de estudo estão esquematizadas na Figura 2.

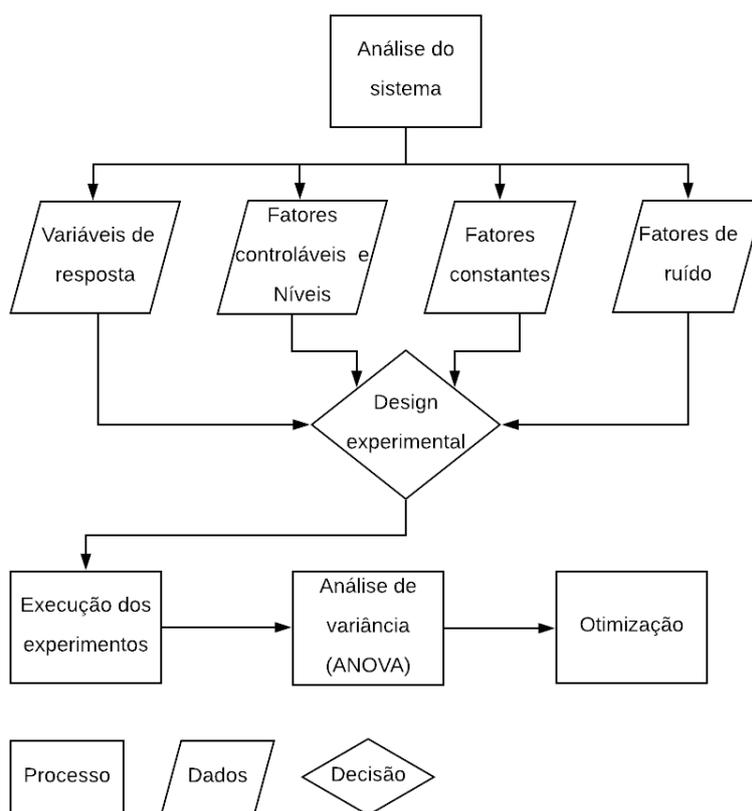


Figura 2. Fluxograma das etapas da pesquisa

As variáveis de resposta (VR) adotadas foram: temperatura e umidade relativa do ar (UR), ambos no verão e inverno. Essas variáveis têm limites máximos e mínimos estabelecidos nas normas NBR 15575 (2013), no caso da temperatura, e NBR 16401-2 (2008), no caso da umidade; por essa razão, foram escolhidas. Baseando-se nas normas NBR 15220 (2003) e NBR 15575 (2013), foram selecionados 5 fatores controláveis (FC): absorvância solar, condutividade térmica, taxa de ventilação, número de moradores e número de equipamento (eletrodoméstico).

As VR e respectivas classificações e limites de especificações estão apresentados na Tabela 3. Nesta tabela o termo “tipo” refere-se ao resultado ótimo para a variável de resposta, por exemplo, se o tipo é menor-é-melhor, quanto menor for o valor retornado após a simulação, maior a aproximação a um resultado esperado, ótimo. Os FC e os níveis codificados em -1 (nível baixo) e +1 (nível alto) estão apresentados na Tabela 4. A codificação dos valores reais dos FC foi realizada devido a ferramenta de DOE fundamentar-se na ortogonalidade (pontos equidistantes).

Tabela 3. Variáveis de resposta e respectivos alvos e especificações

Variáveis de Resposta	Tipo	Alvo (unidade)	Especificações	
			Mín. (LIE)	Máx. (LSE)
Temperatura (verão)	Menor-é-melhor	24 °C*	-	35,9**
Temperatura (inverno)	Maior-é-melhor	24 °C*	7,3**	-
UR (verão)	Nominal-é-melhor	50%	35***	65***
UR (inverno)	Nominal-é-melhor	45%	30***	60***

*RTQ-R (INMETRO, 2012); **NBR 15575 (2013); ***NBR 16401-2 (2008)

Tabela 4. Fatores controláveis e níveis do planejamento fatorial

Fatores controláveis	Símbolo	Níveis	
		Baixo (-1)	Alto (+1)
Absortância solar	A	0,3*	0,5*
Condutividade térmica (W/mK)	B	0,44*	0,52*
Taxa de ventilação (ren/h)	C	1*	5**
Número de moradores	D	2	4
Número de Equipamento (TV 83W)	E	1	2

*NBR 15220 (2003); **NBR 15575 (2013)

Para a análise estatística proposta, também foram definidos os fatores que não seriam investigados, mas mantidos constantes durante a execução dos experimentos para não causarem inflação do termo do erro ou variabilidade experimental. Os referidos fatores e respectivos níveis fixados estão expostos na Tabela 5. Além disso, faz-se necessário tomar conhecimento dos fatores de ruído presentes no sistema, os quais não podem ser controlados e são responsáveis pelo erro experimental. Neste estudo, os fatores de ruído da experimentação são: habilidade e cansaço do programador. Vale ressaltar que todos os experimentos foram executados por um único operador no mesmo sistema.

Tabela 5. Fatores mantidos constantes durante a execução experimental

Fatores constantes	Níveis fixos	Referência
Calor específico	1 kJ/(kg.K)	NBR 15220 (2003)
Área do cômodo	25 m ²	Adotado
Janela	1 (1,50 m x 1,50 m)	Adotado
Vidro da janela	Vidro (3 mm)	DOE (2017a)
Lâmpada	1 (36 W)	DOE (2017b)
Porta	Compensado	DOE (2017a)
Piso	Cerâmica e Concreto	NBR 15220 (2003)
Cobertura	Laje de concreto	NBR 15220 (2003)
Telhado	Telha cerâmica	NBR 15220 (2003)
Revestimento	Argamassa	NBR 15220 (2003)
Localização geográfica (norte)	Janela voltada para oeste e outra parede exposta voltada para norte	NBR 15220 (2003)
Cidade	Porto Alegre	Adotado
Clima	Zona Bioclimática 3	NBR 15220 (2003)
Velocidade do vento	6 m/s (média anual)	Secretaria de Energia, Minas e Comunicações - SEMC (2012)
Pressão atmosférica	101,0 kPa	INMET (2019)



2.8. Execução dos experimentos

Definidos os fatores controláveis e constantes foi possível atribuir valores ao design experimental e, a seguir, rodar as simulações no *EnergyPlus*. Neste estudo, utilizou-se um DOE 2^5 que corresponde a 5 fatores controláveis avaliados em dois níveis. Um total de 32 experimentos foram realizados de forma blocada: 2 blocos homogêneos de 16 experimentos, cada bloco correspondendo a um dia distinto para execução dos ensaios. Em projetos experimentais com 4 ou mais fatores não é necessário fazer repetição, ou seja, repetir o experimento mais de uma vez. Dessa forma, o termo do erro pode ser estimado usando as interações supostamente com efeitos não significativos. Sendo assim, no DOE 2^5 deste estudo, composto por 5 fatores controláveis em análise, as interações de 4 fatores (ABCD, ABCE, BCDE, ACDE) foram aglutinadas para fazer uma estimativa do erro experimental.

2.9. Análise de variância (ANOVA) e otimização

Os resultados da otimização são apresentados por meio da ANOVA e gráfico de Pareto referente à cada uma das VR. Para tanto, no teste de hipótese 'F' (distribuição F), considerou-se um nível de confiança de 95%, ou seja, probabilidade de errar na conclusão inferior a 5% ($\alpha = 0,05$). O F-tabelado é obtido na tabela F (inclusa no *software* estatístico) com um nível de confiança de 95% e com os graus de liberdade da regressão e do resíduo. Na distribuição F, se o F-calculado for superior ao F-tabelado, o p-valor é menor que 0,05, mostrando que determinado efeito é significativo (Dean *et al.*, 2017; Montgomery, 2017).

Já o gráfico de Pareto corresponde a uma representação gráfica das informações dos efeitos, onde: as barras horizontais são os efeitos de cada fator controlável e a linha vertical tracejada é exatamente a delimitação da confiança de 95%. Logo, as barras que ultrapassam essa linha correspondem aos FC que apresentaram efeitos significativos sob a VR. Na sequência, são apresentados os gráficos dos efeitos dos FC sobre cada VR para visualização e identificação da condição otimizada.

3. Resultados e Discussão

3.1. Matriz do Design experimental

Na Tabela 6 está apresentada a matriz com valores reais dos fatores e respectivos resultados das variáveis de resposta. Na sequência deste estudo são apresentadas a ANOVA dos fatores e interações para cada variável. Cabe ressaltar que as interações que não constam nas tabelas de resultados da ANOVA apresentaram F-valor pouco expressivo e, portanto, foram automaticamente inseridos ao termo do erro.

Tabela 6. Matriz do design experimental 2⁵ para as variáveis resposta

Fatores (níveis reais)					Variáveis de resposta			
A	B	C	D	E	Temperatura verão (°C)	Temperatura inverno (°C)	UR verão (%)	UR inverno (%)
0,3	0,44	1	2	1	32,3	11,9	98,5	70,5
0,5	0,52	1	2	1	33,1	11,8	97,8	70,1
0,5	0,44	5	2	1	33,5	9,9	97,7	77,3
0,3	0,52	5	2	1	33,3	9,7	98,1	78,3
0,5	0,44	1	4	1	32,8	12,0	97,9	69,6
0,3	0,52	1	4	1	32,5	11,7	98,4	71,0
0,3	0,44	5	4	1	33,2	9,9	98,3	77,5
0,5	0,52	5	4	1	33,7	9,8	97,5	77,1
0,5	0,44	1	2	2	33,1	12,2	97,1	68,6
0,3	0,52	1	2	2	32,8	11,9	97,7	70,0
0,3	0,44	5	2	2	33,4	10,0	97,7	77,1
0,5	0,52	5	2	2	33,9	10,0	96,9	76,7
0,3	0,44	1	4	2	32,6	12,1	97,8	69,4
0,5	0,52	1	4	2	33,4	12,0	97,1	69,0
0,5	0,44	5	4	2	33,7	10,1	97,2	75,9
0,3	0,52	5	4	2	33,6	9,9	97,6	77,0
0,5	0,44	1	2	1	32,8	12,0	97,9	69,6
0,3	0,52	1	2	1	32,5	11,7	98,4	71,1
0,3	0,44	5	2	1	33,2	9,9	98,3	78,0
0,5	0,52	5	2	1	33,7	9,8	97,5	77,6
0,3	0,44	1	4	1	32,3	11,9	98,5	70,4
0,5	0,52	1	4	1	33,1	11,8	97,8	70,0
0,5	0,44	5	4	1	33,5	9,9	97,7	76,8
0,3	0,52	5	4	1	33,3	9,7	98,2	77,9
0,3	0,44	1	2	2	32,6	12,1	97,8	69,4
0,5	0,52	1	2	2	33,4	12,0	97,0	69,0
0,5	0,44	5	2	2	33,7	10,1	97,1	76,4
0,3	0,52	5	2	2	33,5	9,9	97,6	77,4
0,5	0,44	1	4	2	33,2	12,2	97,2	68,5
0,3	0,52	1	4	2	32,9	11,9	97,7	69,9
0,3	0,44	5	4	2	33,4	10,1	97,7	76,6
0,5	0,52	5	4	2	33,9	10,0	97,0	76,2

3.1.1. Temperatura Interna do Ar no Verão

Na Tabela 7 pode ser observada a ANOVA para a temperatura do ar no verão, em que os fatores e interações que apresentaram efeito significativo sobre esta variável resposta estão destacados (p-valor < 0,05).

Tabela 7. ANOVA dos fatores e interações para a Temperatura no verão

Fontes de variação	Graus de Liberdade (GL)	Soma dos Quadrados (SQ)	Média quadrada (QM)	F-valor	p-valor
A	1	1,57531	1,57531	3287,61	0,000
B	1	0,34031	0,34031	710,22	0,000
C	1	3,85031	3,85031	8035,43	0,000
D	1	0,00281	0,00281	5,87	0,029
E	1	0,57781	0,57781	1205,87	0,000
A*B	1	0,00781	0,00781	16,3	0,001
A*C	1	0,09031	0,09031	188,48	0,000
A*D	1	0,00031	0,00031	0,65	0,432
A*E	1	0,00031	0,00031	0,65	0,432
B*C	1	0,01531	0,01531	31,96	0,000
B*D	1	0,00031	0,00031	0,65	0,432
B*E	1	0,00031	0,00031	0,65	0,432
C*E	1	0,02531	0,02531	52,83	0,000
D*E	1	0,00281	0,00281	5,87	0,029
A*B*D	1	0,00281	0,00281	5,87	0,029
A*B*E	1	0,00281	0,00281	5,87	0,029
Erro	15	0,00719	0,00048		
Total	31	6,50219			

A Figura 3 apresenta os efeitos dos fatores e das interações sobre a temperatura do ar no verão. Pode-se observar que a variável resposta é afetada de forma significativa, da maior a menor influência, por: Taxa de ventilação; Absortância solar; Número de equipamento; Condutividade térmica; Absortância solar*Taxa de ventilação; Taxa de ventilação*Número de Equipamento; Condutividade térmica*Taxa de ventilação; Absortância solar*Condutividade térmica; Absortância solar*Condutividade térmica*Número de Equipamento; Número de moradores*Número de Equipamento; Número de Equipamento; Absortância solar*Condutividade térmica*Número de moradores.

Esses resultados mostraram que, levando-se em consideração a temperatura do ar do cômodo no verão, a variação da taxa de ventilação da casa, da absortância solar dos fechamentos e do número de equipamentos no ambiente, são os três fatores que causam maior impacto nos valores de temperatura obtidos por meio do *EnergyPlus*. Dessa forma, ao se alterar quaisquer desses fatores foi possível obter temperaturas maiores ou menores para o ambiente, adequando-o aos limites máximos e mínimos estabelecidos pelas normativas brasileiras de desempenho térmico de habitações. Ressalta-se que o eixo das abscissas na Figura 3 representa a proporção em que o fator em análise ultrapassou o valor de *F-test*, no caso, 1,52. Quanto maior a abscissa da variável e suas interações, maior seu impacto no resultado. O *F-test* é um valor estatístico tabelado e indica que valores acima do *F-test* afetam de forma significativa a variável de resposta.

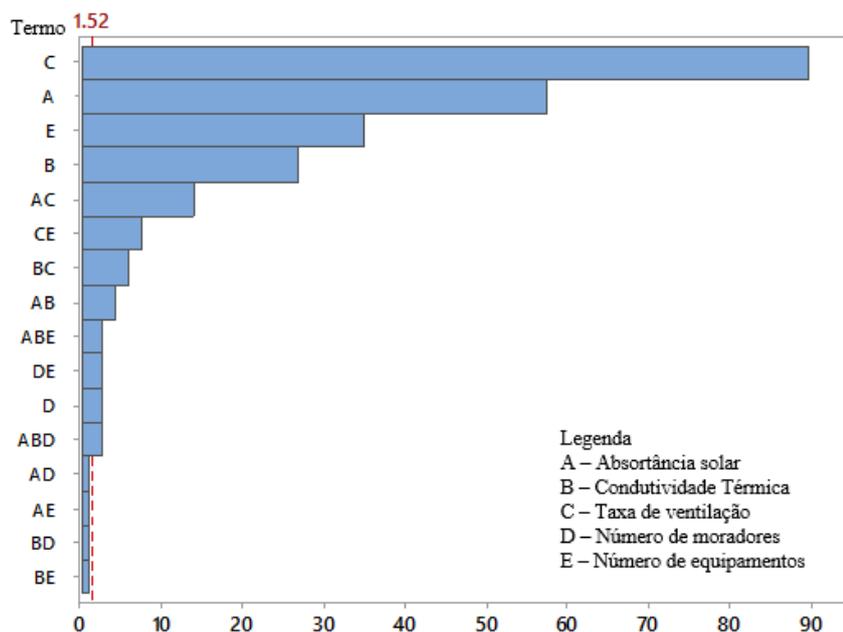


Figura 3. Gráfico de Pareto do DOE 2⁵ para a Temperatura no verão

Considerando-se que a temperatura do ar no verão é do tipo Menor-é-melhor, pode-se observar nas Figuras 4 e 5 que o ajuste ótimo desta variável resposta pode ser obtido com a seguinte combinação de níveis dos fatores: Absortância solar 0,3 (nível baixo); Conductividade térmica 0,44 (nível baixo); Taxa de ventilação 1 (nível baixo); Número de moradores 2 (nível baixo) e Número de Equipamento 1 (nível baixo).

Assim, por meio da análise das Figuras 4 e 5 ficam definidos quais valores das variáveis estudadas, A a E, quando analisadas separadamente (Figura 4) ou combinadas (Figura 5), permitem a obtenção do resultado desejado para a temperatura do ar no verão. Nesse caso, os valores definidos no parágrafo anterior para cada variável ocasionam um menor valor de temperatura do ar para o cômodo analisado, no verão.

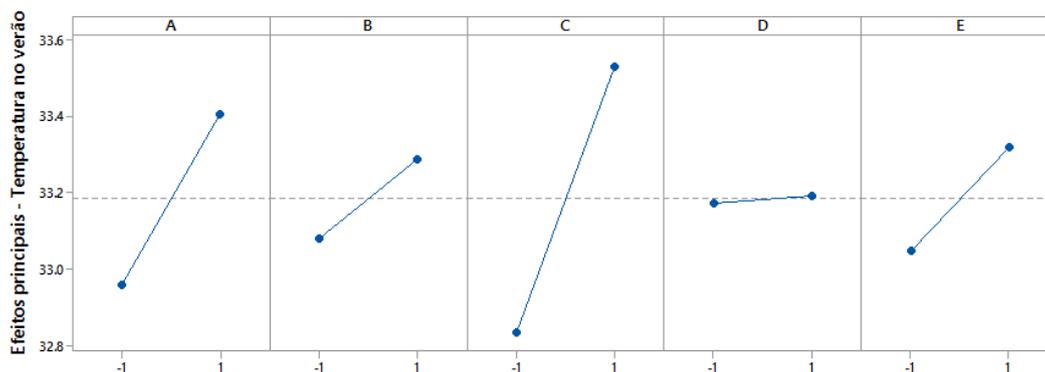


Figura 4. Efeitos principais (dos fatores) na Temperatura no verão

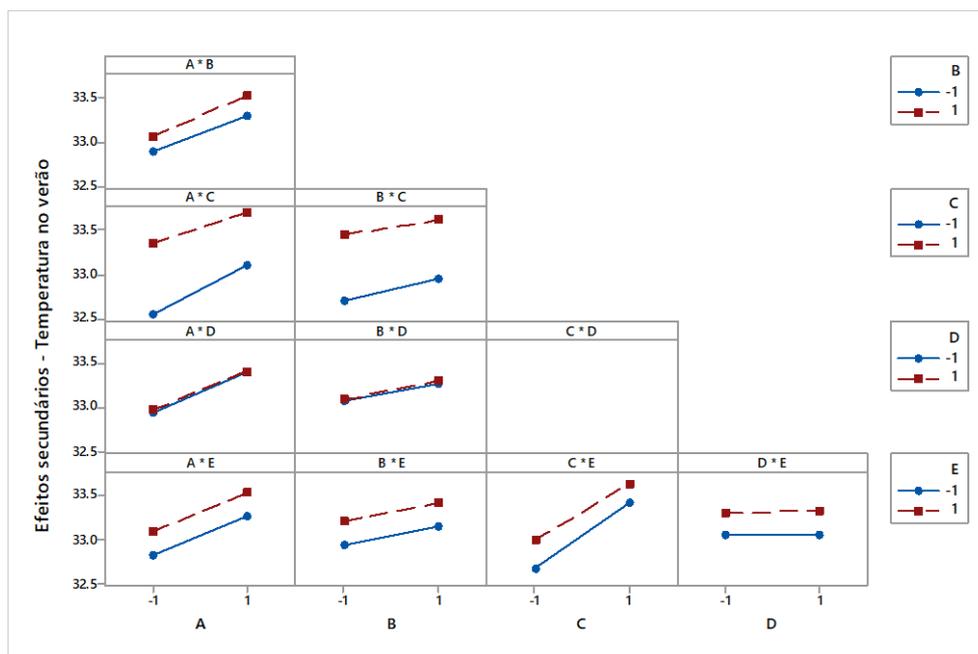


Figura 5. Efeitos secundários (interações entre fatores) na Temperatura no verão

3.1.2. Temperatura Interna do Ar no Inverno

Em relação a temperatura do ar no inverno, na Tabela 8 pode ser observada a ANOVA para esta variável resposta, onde os fatores e interações que apresentaram efeito significativo sobre ela estão destacados (p-valor < 0,05).

Tabela 8. ANOVA dos fatores e interações para a Temperatura no inverno

Fontes de variação	Graus de Liberdade (GL)	Soma dos Quadrados (SQ)	Média quadrada (QM)	F-valor	p-valor
A	1	0,0528	0,0528	169	0,000
B	1	0,2278	0,2278	729	0,000
C	1	33,0078	33,0078	105625	0,000
E	1	0,3003	0,3003	961	0,000
A*B	1	0,0028	0,0028	9	0,006
A*C	1	0,0028	0,0028	9	0,006
B*C	1	0,0078	0,0078	25	0,000
A*B*C	1	0,0028	0,0028	9	0,006
Erro	23	0,0072	0,0003		
Total	31	33,6122			

Na Figura 6 pode-se observar o gráfico de Pareto com efeitos dos fatores e das interações sobre a temperatura do ar no inverno. Verifica-se que a temperatura no inverno é significativamente afetada, da maior a menor influência, por: Taxa de ventilação; Número de equipamento; Condutividade térmica; Absortância solar; Condutividade térmica*Taxa de ventilação; Absortância solar*Condutividade térmica; Absortância solar*Taxa de ventilação e Absortância solar*Condutividade térmica*Taxa de ventilação. Além disso, observa-se que o Número de moradores (fator D) não exerce influência sobre a VR, conseqüentemente, não é considerado na análise dos efeitos.

Esses resultados demonstram que, levando-se em consideração a temperatura do ar do cômodo no inverno, a variação da taxa de ventilação da casa, do número de equipamentos no ambiente e da condutividade térmica dos fechamentos são os três fatores que causam maior impacto nos valores de temperatura obtidos por meio do *EnergyPlus*.

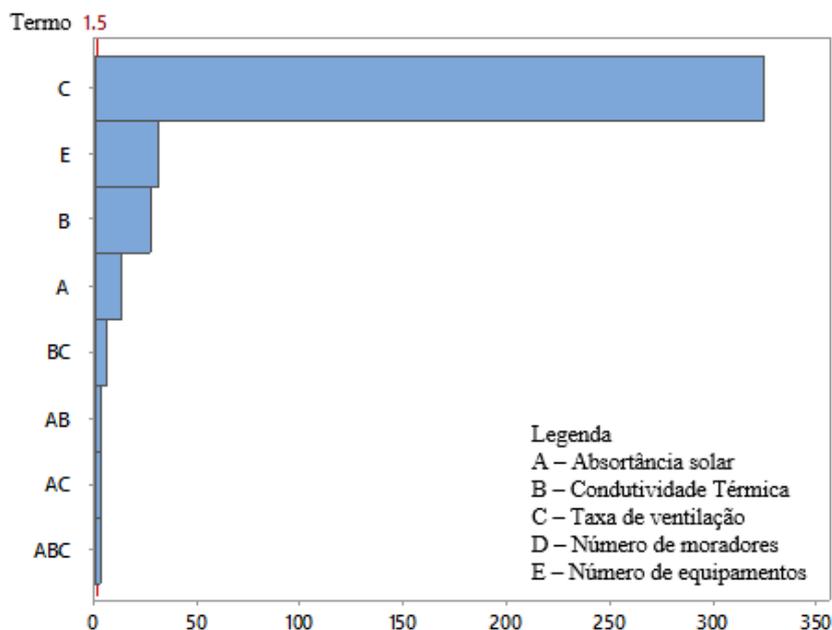


Figura 6. Gráfico de Pareto do DOE 2⁵ para a Temperatura no inverno

A temperatura do ar no inverno, considerada do tipo Maior-é-melhor, permitiu observar, nas Figura 7 e 8, que o ajuste ótimo desta variável resposta pode ser obtido com a combinação de níveis dos FC: Absortância solar 0,5 (nível alto); Condutividade térmica 0,44 (nível baixo); Taxa de ventilação 1 (nível baixo) e Número de equipamentos 2 (nível alto). Por meio da visualização das Figuras 7 e 8 ficam definidos quais valores das variáveis estudadas permitem a obtenção do resultado desejado para a temperatura do ar no inverno. Nesse caso, os valores definidos no parágrafo anterior para cada variável ocasionam um maior valor de temperatura do ar para o cômodo analisado, no inverno.

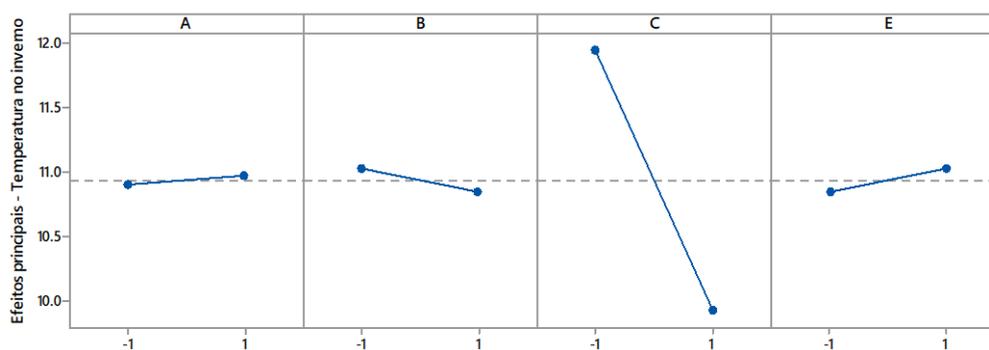


Figura 7. Efeitos principais (dos fatores) na Temperatura no inverno

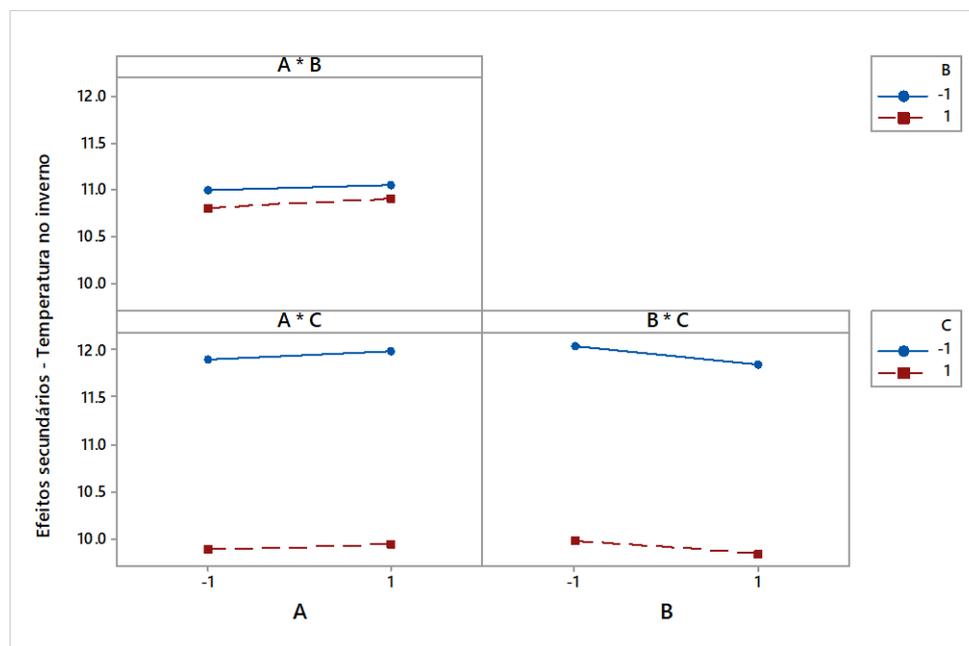


Figura 8. Efeitos secundários (interações entre fatores) na Temperatura no inverno

3.1.3. Umidade Relativa do Ar no Verão

Na Tabela 9 é exposta a ANOVA considerando a umidade relativa do ar no verão. A partir do p-valor inferior a 0,05, é notório os fatores e interações que afetam significativamente esta variável resposta.

Tabela 9. ANOVA dos fatores e interações para a Umidade relativa do ar no verão

Fontes de variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Média quadrada (QM)	F-valor	p-valor
A	1	3,06281	3,06281	9801	0,000
B	1	0,13781	0,13781	441	0,000
C	1	0,19531	0,19531	625	0,000
D	1	0,00781	0,00781	25	0,000
E	1	3,31531	3,31531	10609	0,000
A*B	1	0,00281	0,00281	9	0,008
A*C	1	0,00031	0,00031	1	0,332
A*D	1	0,00281	0,00281	9	0,008
A*E	1	0,00031	0,00031	1	0,332
B*C	1	0,00781	0,00781	25	0,000
C*E	1	0,05281	0,05281	169	0,000
D*E	1	0,00281	0,00281	9	0,008
A*B*C	1	0,00281	0,00281	9	0,008
A*C*E	1	0,00281	0,00281	9	0,008
A*D*E	1	0,00781	0,00781	25	0,000
Erro	16	0,005	0,00031		
Total	31	6,80719			

Na Figura 9 observa-se o gráfico de Pareto com os efeitos dos fatores e das interações sobre a umidade relativa do ar no verão. É notório que esta variável resposta é afetada de forma significativa, da maior a menor influência, por: Número de equipamento; Absortância solar; Taxa de ventilação; Condutividade térmica; Taxa de ventilação*Número de Equipamento; Número de moradores; Condutividade térmica*Taxa de ventilação; Absortância solar*Número de moradores*Número de Equipamento; Absortância solar*Condutividade térmica; Absortância solar*Número de moradores; Absortância solar*Taxa de ventilação* Número de Equipamento; Número de moradores*Número de Equipamento e Absortância solar*Condutividade térmica* Taxa de ventilação.

Esses resultados demonstram que, levando-se em consideração a umidade relativa do ar do cômodo no verão, a variação do número de equipamentos, da absortância solar dos fechamentos e da taxa de ventilação são os três fatores que causam maior impacto nos valores de umidade obtidos por meio do *EnergyPlus*.

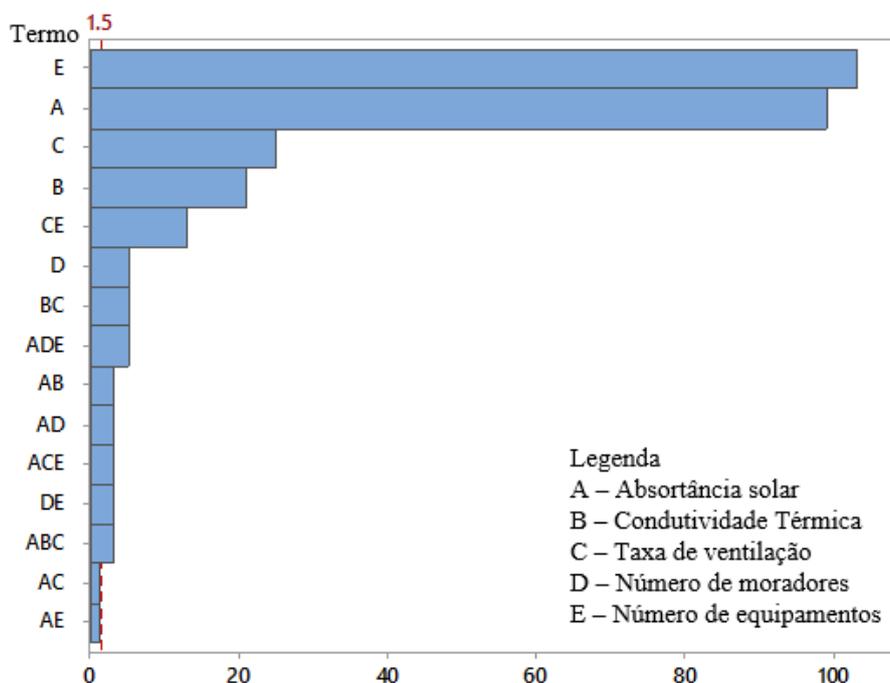


Figura 9. Gráfico de Pareto do DOE 2⁵ para a Umidade relativa do ar no verão

Sendo a umidade relativa do ar no verão do tipo Nominal-é-melhor, valor alvo de 50%, pode-se observar nas Figuras 10 e 11 que o ajuste ótimo desta variável resposta é obtido pela seguinte combinação de níveis dos fatores: Absortância solar 0,5 (nível alto); Condutividade térmica 0,52 (nível alto); Taxa de ventilação 5 (nível alto); Número de moradores 2 (nível baixo) e Número de Equipamento 2 (nível alto).

Observando-se as Figuras 10 e 11 foi possível definir os valores das variáveis estudadas, A a E, que permitem a obtenção do valor mais próximo desejado, 50%, para a umidade relativa do ar no verão. Nesse caso, os valores definidos no parágrafo anterior para cada variável ocasionam um menor valor de umidade relativa do ar para o cômodo analisado, no verão.

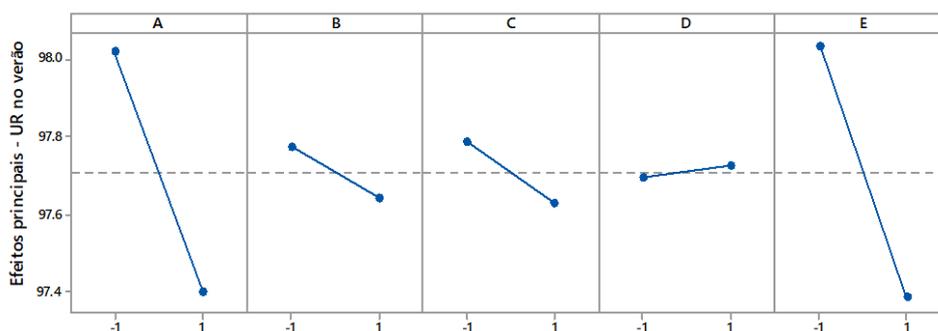


Figura 10. Efeitos principais (dos fatores) na Umidade relativa do ar no verão

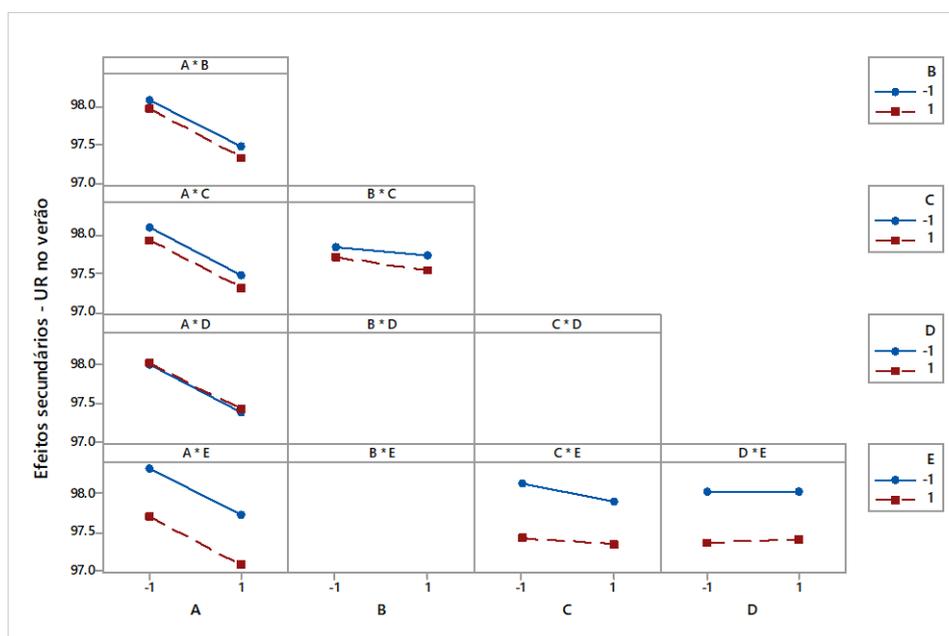


Figura 11. Efeitos secundários (interações entre fatores) na Umidade relativa do ar no verão

3.1.4. Umidade Relativa do Ar no Inverno

A Tabela 10 apresenta a ANOVA considerando-se a umidade relativa do ar no inverno. Verifica-se por meio do p-valor inferior a 0,05, quais os fatores e interações que afetam significativamente esta variável resposta, conforme células destacadas.

Tabela 10. ANOVA dos fatores e interações para Umidade relativa do ar no inverno

Fontes de variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Média quadrada (QM)	F-valor	p-valor
A	1	5,363	5,363	8303,71	0,000
B	1	1,403	1,403	2172,1	0,000
C	1	432,915	432,915	670320,5	0,000
D	1	0,578	0,578	894,68	0,000
E	1	7,703	7,703	11926,94	0,000
A*B	1	0,015	0,015	23,71	0,000
A*C	1	0,07	0,07	108,87	0,000
A*D	1	0,000	0,000	0,48	0,497
B*C	1	0,070	0,070	108,87	0,000
B*D	1	0,000	0,000	0,480	0,497
C*D	1	0,340	0,340	526,94	0,000
C*E	1	0,053	0,053	81,77	0,000
A*B*C	1	0,003	0,003	4,350	0,054
A*C*D	1	0,003	0,003	4,350	0,054
B*C*D	1	0,003	0,003	4,350	0,054
Erro	15	0,010	0,001		
Total	31	448,532			

Pode-se observar no gráfico de Pareto da Figura 12, que a umidade relativa do ar no inverno foi significativamente afetada, da maior a menor influência, por: Taxa de ventilação; Número de equipamento; Absortância solar; Condutividade térmica; Número de moradores; Taxa de ventilação* Número de moradores; Absortância solar*Taxa de ventilação; Condutividade térmica*Taxa de ventilação; Taxa de ventilação*Número de Equipamento e Absortância solar*Condutividade térmica.

Levando-se em consideração a umidade relativa do ar do cômodo no inverno, a variação da taxa de ventilação, número de equipamentos e absortância solar são os três fatores que causam maior impacto nos valores de umidade relativa do ar obtidos por meio do *EnergyPlus*.

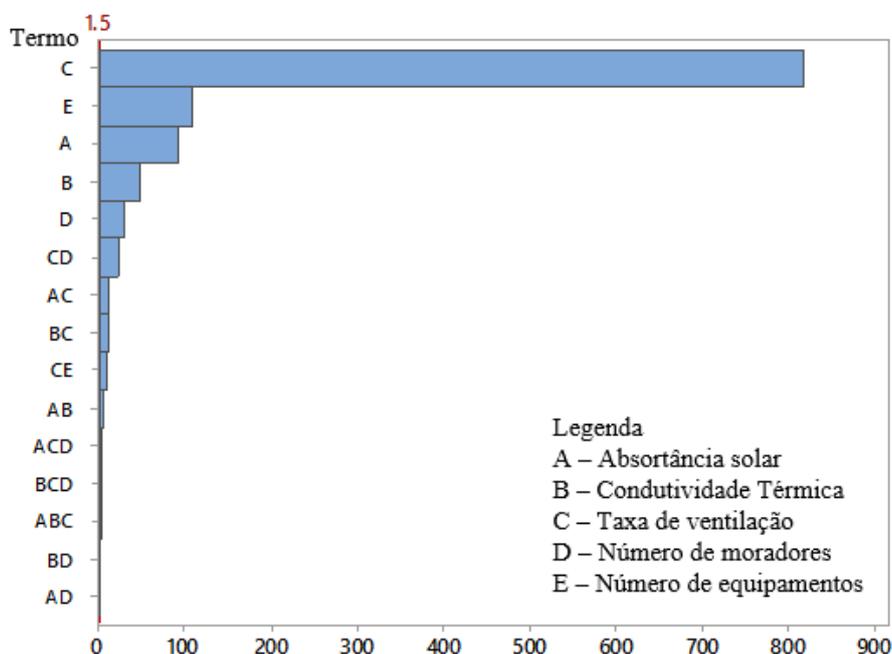


Figura 12. Gráfico de Pareto do DOE 2⁵ para a Umidade relativa do ar no inverno

Sendo a umidade relativa do ar do tipo Nominal-é-melhor, valor alvo de 45%, nas Figuras 13 e 14 pode-se observar que o ajuste ótimo desta variável resposta é obtido com a seguinte combinação de níveis dos fatores: Absortância solar 0,5 (nível alto); Condutividade térmica 0,44 (nível baixo); Taxa de ventilação 1 (nível baixo); Número de moradores 4 (nível alto) e Número de Equipamento 2 (nível alto).

Por intermédio das Figuras 13 e 14, foi possível definir os valores das variáveis estudadas, A a E, que permitiram a obtenção do valor mais próximo ao desejado, 45%, para a umidade relativa do ar no inverno. Nesse caso, os valores definidos no parágrafo anterior para cada variável ocasionam um menor valor de umidade relativa do ar para o cômodo analisado, no inverno.

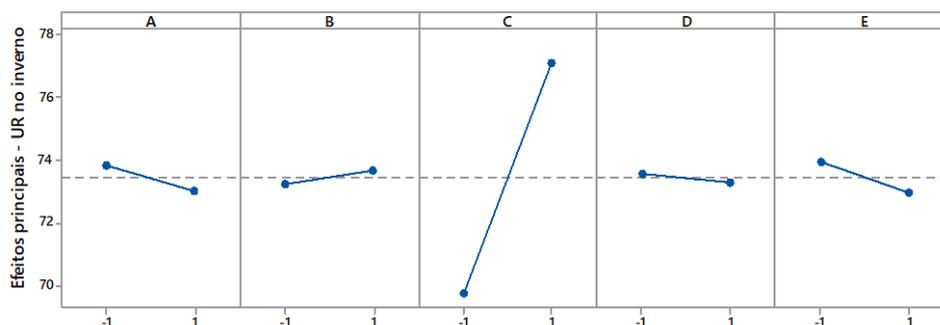


Figura 13. Efeitos principais (dos fatores) na Umidade relativa do ar no inverno

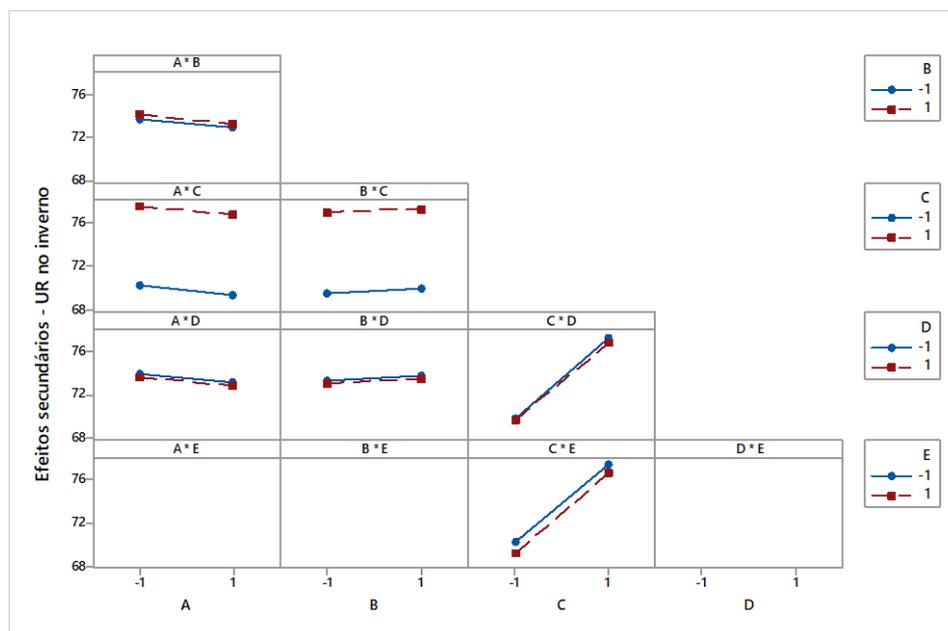


Figura 14. Efeitos secundários (interações entre fatores) na Umidade relativa do ar no inverno

4. Conclusões

Uma otimização experimental do comportamento térmico de uma edificação residencial foi realizada considerando cinco fatores controláveis e quatro variáveis de resposta. Este estudo permitiu identificar quais os fatores de controle e interações afetam significativamente a temperatura e umidade relativa do ar, no dia típico de verão e no dia típico de inverno. Verificou-se que os fatores de controle influenciam de forma distinta cada variável de resposta.

Para as variáveis de resposta temperatura interna do ar no inverno e umidade relativa do ar no inverno, os fatores controláveis que mais as afetaram significativamente foram a taxa de ventilação e o número de equipamentos. Já a temperatura interna do ar no verão foi influenciada de forma significativa principalmente pela taxa de ventilação e pela absorvância solar. Por último, verificou-se que a umidade relativa do ar no verão foi afetada principalmente pelo número de equipamentos e pela absorvância solar.

A partir destes resultados verificou-se que a taxa de ventilação tem grande impacto na temperatura da habitação simulada, tanto no inverno quanto no verão. Visto que esta taxa se relaciona a abertura e fechamento de portas e janelas pelos moradores, não foi possível prever, na fase de projeto, como isto ocorrerá na fase operacional da edificação.

O número de equipamentos causa aumento da temperatura interna da habitação no inverno, devido ao calor emitido pelos aparelhos, mas também não pode ser previsto na fase de projetos.

A absorvância solar, ou seja, a taxa de radiação absorvida por uma superfície, apresentou impacto bastante significativo na temperatura da habitação e na umidade



relativa do ar no verão (maior a absorvância solar, maiores as temperaturas e menores as umidades). Assim, materiais com menor absorvância, ou seja, tintas ou azulejos claros, podem ser escolhidos para compor as paredes e auxiliar na redução da temperatura interna da casa no verão, aumentando o conforto dos usuários.

Os resultados mostraram como uma simulação no *EnergyPlus*, aliada a análises estatísticas, podem prever melhorias na performance da edificação ainda na fase de projeto, quando modificações dos materiais a serem utilizados podem ser realizadas de forma mais simples, sem necessidade de reformas para substituição de materiais (o que seria necessário caso a moradia já estivesse finalizada).

Neste contexto, a simulação computacional, feita por intermédio do programa *EnergyPlus*, com materiais selecionados para compor a habitação, permite prever, ainda na fase de projeto, se a edificação irá atender aos requisitos mínimos de desempenho térmico (NBR 15575, 2013) para que haja conforto térmico do morador.

Para cada variável de resposta, a otimização experimental permite definir o melhor ajuste (ótimo) dos fatores controláveis. Esse ajuste pode ser utilizado na escolha dos materiais que irão compor a edificação, auxiliando no atendimento aos mínimos requisitos de desempenho térmico.

Neste estudo, o ambiente simulado compreendeu uma simples sala, de forma que combinações de propriedades termofísicas (condutividade térmica e absorvância solar ou AB) não tiveram impacto significativo na temperatura e umidade.

Em situações reais, essas combinações podem impactar significativamente, levando o projetista a escolher um material em detrimento do outro, ou um sistema construtivo em detrimento de outro (por exemplo, alvenaria de blocos cerâmicos ao invés de uma estrutura metálica).

Em pesquisas futuras sugere-se adotar uma simulação com valores climáticos anuais, no lugar da análise por dia típico, para se obter valores de umidade relativa do ar em diferentes dias no verão e no inverno. Também, podem ser alterados os fatores controláveis que permitam verificar a influência de outras propriedades termofísicas dos materiais que compõem a edificação, como o calor específico e a densidade, nas variáveis de resposta temperatura e umidade relativa do ar da zona térmica analisada.

No mesmo sentido, outras variáveis de resposta podem ser definidas, como a taxa de infiltração e ganhos internos de calor através da envoltória da edificação. Uma simulação que considere um real projeto de edificação seria ideal.

Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. NBR 15220 (2003) “Desempenho térmico de edificações”. Rio de Janeiro, 92 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. NBR 15575 (2013) “Edifícios habitacionais – Desempenho”. Rio de Janeiro, 381 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. NBR 16401-2 (2008) “Instalações de ar condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico”. Rio de Janeiro, 11 p.



- Aldawi, F., Alam, F., Date, A., Kumar, A., Rasul, M. (2012). Thermal performance modelling of residential house wall systems. *Procedia Engineering*, v. 49, p. 161-168.
- INMETRO. Instituto nacional de metrologia, qualidade e tecnologia. Portaria nº 18 (2012) “Regulamento Técnico da Qualidade para a Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R)”. Rio de Janeiro.
- Dean, A., Voss, D., Draguljic, D. (2017) “Design and Analysis of Experiments”. *Gewerbestrasse: Springer Nature*, 2. ed., p. 840.
- DOE - U.S. Department of Energy (2017a). *EnergyPlus* Version 8.8.0 Documentation: Engineering Reference.
- DOE - U.S. Department of Energy (2017b). *EnergyPlus* Version 8.8.0 Documentation: Input Output Reference.
- Ferreira, S. L. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brandão, G. C., Da Silva, E. G. P., Portugal, L. A., Dos Reis, P. S., Souza, A. S., Dos Santos, W. A. L. (2007). Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica Chimica Acta*, v. 597, p. 179-186.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia (2019) “Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática”. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 01 jul. 2019.
- Montgomery, D. C. (2017). “Design and analysis of experiments”. New York: John Wiley & Sons, 9. ed., p. 749.
- Naik, A. B., Reddy, A. C. (2019). Optimization of tensile strength in TIG welding using the Taguchi method and analysis of variance (ANOVA). *Thermal Science and Engineering Progress*, v. 8, p. 327-329.
- PROCELINFO, Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética (2019). “Dicas de Economia de Energia”. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BE6BC2A5F-E787-48AF-B485-439862B17000%7D>>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- Ramachandran, K. M. e Tsokos, C. (2015). Design of Experiments. *Mathematical Statistics with Applications in R*, ed. 2, p. 459-494.
- SEMC. Secretária de Energia, Minas e Comunicações (2002). “Atlas eólico: Rio Grande do Sul”. Porto Alegre: SEMC, 70 p.
- Tajsoleiman; T., Semenova, D., Fernandes, A. C., Huusom, J. K., Gernay, K. V., Krühne, U. (2017). An Efficient Experimental Design Strategy for Modelling and Characterization of Processes. *Computer Aided Chemical Engineering*, v. 40, p. 2827-2832.
- De Wilde, P. (2019). Ten questions concerning building performance analysis. *Building and Environment*, v. 153, p. 110-117.