INVESTIGAÇÃO DA CARGA TÉRMICA DE RESFRIAMENTO DE UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL MULTIFAMILIAR POR DIFERENTES ALGORITMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Wesley Cecilio Silva (1); Matheus de Andrade Duarte (2); Raquel Diniz Oliveira (3); Frederico Romagnoli Silveira Lima (4)

(1) Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, wesleycecis@gmail.com

(2) Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, matduart95@gmail.com

(3) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, raqueldiniz@cefetmg.br

(4) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Mecânica, fredericoromagnoli@gmail.com

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Tel.: (31) 3319 7000, Departamento de Engenharia Civil, Tel.: (31) 3319-6810, Av. Amazonas, 7675. Gameleira, Belo Horizonte MG, 30510-000.

RESUMO

O consumo de eletricidade referente ao ar condicionado tem relação direta com a carga de calor a ser retirada conforme a capacidade de refrigeração definida para um local específico. Neste contexto, os algoritmos de transferência de calor empregados na estimativa de carga térmica de edifícios são relevantes para auxiliar a definição do sistema de climatização de ambientes. Este estudo objetivou investigar a variabilidade da potência de resfriamento de edificações residenciais, por meio da aplicação de diferentes combinações de algoritmos disponíveis na biblioteca do programa ©Energy Plus, para cálculo da convecção interna/externa e balanço de energia. Foram possíveis trinta combinações que foram organizadas em três grupos de acordo com os algoritmos de convecção interna. Para a verificação dos resultados realizou-se a Análise de Variância (ANOVA) e o teste de Kruskal Wallis afim de identificar diferenças significativas nos dados obtidos. Por meio dos resultados dos testes conclui-se que existe entre os grupos organizados pelo menos uma diferença significativa. Complementarmente, realizou-se também o teste de PostHoc para avaliar em quais grupos as diferenças divergiam mais. Desta forma, a escolha do método numérico mostrou influência significativa na definição dos sistemas de climatização artificial das edificações. Em suma, como contribuição, o presente trabalho buscou demonstrar o peso da escolha de diferentes combinações de algoritmos na estimativa da carga térmica de resfriamento como forma de auxiliar o processo de tomada de decisão ao se definir os seus inputs de simulação.

Palavras-chave: Carga térmica; Simulação numérica, ANOVA, Kruskal Wallis; Condicionadores de ar.

ABSTRACT

The heat load generated by cooling system's capacity settings plays an important role in electricity consumption. Thus, the numerical methods for its definition are crucial for HVAC system design. The present study aims at investigating the cooling power variability of residential buildings through different algorithm combinations available in the E + library used for internal / external convection calculation and the energy balance. ANOVA and Kruskal Wallis test were carried out to verify significant differences in simulation results. Through the statistical analyses, it can be concluded that there is at least one significant difference between the organized groups. The PostHoc addition test was also performed to assess which groups differed most. Therefore, the numerical method choice can significantly influence the artificial air conditioning systems definition in buildings. Thus, as a contribution, the present work sought to pointed out the choice weight of different algorithms combinations in cooling thermal load estimation as a way to assist the decision-making process on simulation inputs settings.

Keywords: Thermal load; Numerical simulation, ANOVA, Kruskal Wallis; Air conditioning.

1. INTRODUÇÃO

Os edifícios são responsáveis por 73% do consumo total de eletricidade nos Estados Unidos. Este consumo total de energia ao longo do ano é aproximadamente igual à carga de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC) de edifícios residenciais e comerciais, sendo responsável por cerca de metade do seu consumo de energia (OLAMA *et al*., 2018). Na Arábia Saudita verifica-se também um consumo relevante de eletricidade, principalmente durante os meses de verão devido às intensas demandas de ar condicionado. Os prédios residenciais consomem mais da metade da eletricidade usada na Arábia Saudita, com a carga do ar condicionado sendo responsável por 70% desse uso (ALABOUD; GADI, 2020). O setor residencial brasileiro consome 21,4% da energia elétrica produzida, sendo o segundo setor que mais consome eletricidade no país (ENERGÉTICO, 2018). Nesse contexto, estimativas indicaram que o consumo de energia elétrica devido ao uso de condicionadores de ar pelo setor residencial triplicou entre 2005 e 2017 (EPE, 2018).

Diante desse cenário, fica evidente a necessidade de estudos que viabilizem medidas sustentáveis e eficientes energeticamente para climatização artificial de residências. Tais estudos podem ser realizados por meio de modelos termo energéticos em *softwares* de simulação numérica computacional como o ©Energy Plus.

Rasul e Doring (2017) modelaram e analisaram o desempenho do sistema de ar condicionado dessecante em um edifício institucional em clima subtropical semelhante ao da região central de Queensland - Austrália. A análise envolveu a modelagem do edifício de referência usando o ©Open Studio para determinar seus requisitos de refrigeração / aquecimento. Posteriormente fez-se a avaliação de desempenho do sistema HVAC existente do tipo fluxo refrigerante variável (VRF), instalado em um edifício de referência, por meio do desenvolvimento e simulação de um modelo numérico no © Energy Plus (E+).

A instalação e operação de sistemas de climatização artificial nas edificações tem como etapa fundamental a estimativa da carga térmica circundante nos ambientes internos. Essa avaliação por meio de modelos numéricos exige uma análise detalhada dos fenômenos de transferência de calor, visto que o balanço térmico é equacionado pelas trocas de calor que ocorrem na envoltória, juntamente com àquelas ocorridas em razão do uso dos equipamentos elétricos e da rotina dos ocupantes (BATISTA; LAMBERTS; GÜTHS, 2011). Essas trocas térmicas dependem diretamente da natureza das superfícies na qual elas ocorrem e de suas interações com o ambiente, pois são esses fatores que determinam os coeficientes convectivos e condutivos. Nesse sentido, o ©Energy Plus possui um conjunto de algoritmos categorizados por mecanismos de troca de calor empíricos para caracterizar o balanço térmico: BIGLADDER (2020).

Batista, Lamberts e Güths (2011) avaliaram a influência dos algoritmos de condução e convecção do E+ sobre os resultados de simulações do comportamento térmico da Casa Eficiente, localizada em Florianópolis, SC. Para a condução, os ganhos de calor simulados superestimaram as medições em até 4,4 vezes utilizando o método das diferenças finitas. Com o algoritmo *Conduction Transfer Function*, os ganhos foram subestimados em até 90%. Por meio da análise, os algoritmos de condução e convecção puderam ser selecionados com precisão, reduzindo efetivamente a imprecisão da simulação do ambiente estudado.

Tabares-Velasco e Griffith (2012) analisaram algoritmos de transferência de calor por condução do E+ e como eles se relacionam com as condições de contorno das edificações. Os autores verificaram que o algoritmo *CondFD* apresentou problemas de estabilidade, erros na avaliação da condutividade térmica quando ela assume valores variáveis além de erros na atualização de termos transientes.

Shen *et al.* (2019) acoplaram *Computational Fluid Dynamics (CFD)* a uma simulação de forma a possibilitar as iterações de parâmetros de projeto de vizinhança bem como geração de modelo de simulação no ©Energy Plus. Neste estudo, além de usar o método CFD acoplado para prever o coeficiente de transferência de calor (CHTC) por convecção externa de construção, todos os cinco algoritmos de transferência de calor disponíveis no E+ foram usados e comparados. O CHTC calculado pelos algoritmos *Adaptive Convection* e *Simple Combined* foi o mais próximo do método proposto em seu estudo.

Devido à variabilidade dos algoritmos de transferência de calor disponível na biblioteca do © Energy Plus, é relevante realizar um estudo comparativo para analisar o comportamento de cada grupo de algoritmos na simulação de sistemas de climatização artificial de edifícios residenciais brasileiros. Este trabalho investiga, portanto, os efeitos da utilização de diferentes algoritmos na simulação numérica de cargas de resfriamento para viabilizar a adoção de sistemas artificiais de alta eficiência em edifícios residenciais brasileiros construídos pelo programa Minha Casa e Minha Vida, em regiões de clima tropical.

2. OBJETIVO

Buscou-se avaliar diferenças significativas na estimativa da potência de resfriamento por combinações de algoritmos de transferência de calor disponível no 'software' *EnergyPlus* v.9.3 de uma residência, localizada no Rio de Janeiro, RJ.

3. MÉTODO

O potencial de resfriamento de um estudo de caso de edifício residencial foi avaliado por meio de diferentes algoritmos de transferência de calor para a cidade do Rio de Janeiro - RJ. A edificação adotada como referência baseou-se em estudos anteriores (OLIVEIRA, 2019). Desta forma, este trabalho está dividido em seis etapas metodológicas: Apresentação do objeto de estudo; Modelagem virtual do objeto de estudo; Combinação dos algoritmos para simulação; pressupostos da simulação e Análise estatística.

3.1. Apresentação do objeto de estudo

O objeto deste estudo consiste em um bloco de apartamentos com unidades de 2 quartos (43,95 m²) que compõem um conjunto habitacional localizado no Rio de Janeiro-RJ, construído pelo programa Minha Casa e Minha Vida. As paredes externas do edifício são formadas por concreto maciço (10cm) revestido por pintura texturizada alternando entre as cores verde, branco e marrom com os valores de absorbâncias equivalentes a 0.9, 0.3 e 0.9 respectivamente. As paredes internas são compostas por paredes maciças de concreto (10cm) revestidas com pintura branca. O piso entre andares consiste em uma laje de concreto maciço (10cm) com revestimento cerâmico e a cobertura da edificação é composta por telha de fibrocimento (6mm), câmara de ar não ventilada com resistência térmica equivalente a 0,2100 m^2 K/W. O valor do coeficiente convectivo usado para o cálculo de resistência térmica foi corrigido conforme metodologia apresenta pelo capitulo 19 da ASHRAE (2009). As portas externas e internas são de madeira (3cm) e as janelas de vidro comum incolor (4 mm). A Tabela 1 apresenta as propriedades térmicas e físicas dos materiais utilizados na envoltória da edificação. A calibração do modelo foi realizada de forma estatística por meio dos dados de consumo de eletricidade conforme descrito por Oliveira (2019) em conformidade com a ASHRAE (2009).

Tabela 1 – Propriedades dos elementos construtivos da edificação

Propriedades	Concreto	Fibrocimento	Cerâmica	Vidro
Espessura [m]	0,1	0,006	0,008	0,004
Condutividade [W/m.K]	1,75	0,95	0,9	0,9
Densidade [kg/m3]	2.400	1800	1.300	2500
Calor Específico [J/kg.K]	1.000	840	920	840
Absortância	0.9	0.9	0.7	0.8

Fonte: Adaptado de NBR 15220 (ABNT, 2005)

3.2. Modelagem virtual do objeto de estudo

O modelo numérico foi construído com as mesmas características da edificação real no que se refere a envoltória, materiais construtivos, rotina de uso, aberturas, orientação solar e volumetria. Cada apartamento foi modelado como uma única zona térmica com auxílio do software ©*Sketch Up Make 2017*. Considerou-se tal situação visto que o projeto arquitetônico orientava um dispositivo de controle de temperatura por apartamento, corroborando com as recomendações estabelecidas na NBR 16401 (ABNT, 2008). O comportamento da carga térmica foi simulado no *software* ©*Energy Plus versão 9.3.0*, com o auxílio do *plugin* ©*Open Studio*. Na Figura1 (a) é mostrada edificação modelada e geolocalizada. Na Figura 1 (b) a imagem caracteriza a classificação das zonas térmicas.

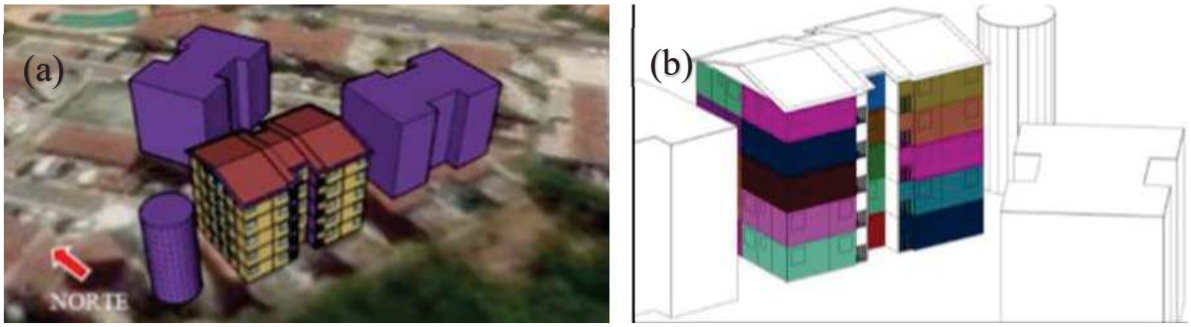

Figura 1 – Modelo geolocalizado e categorizado por zonas térmicas

Nota-se na Figura 1(a), (b) objetos circundantes à edificação de estudo, esses elementos vizinhos foram inseridos com o intuito de aproximar os resultados de simulação as condições reais de regime de vento e incidência de radiação solar. De acordo com Shen *et al.* (2019), a forma da vizinhança exerce uma influência

complexa no microclima local. Se o microclima da vizinhança for ignorado, erros no cálculo do desempenho energético do edifício poderão ser observados.

3.3. Combinação dos algoritmos para simulação

No presente trabalho, buscou-se combinar diferentes algoritmos afim de se avaliar possíveis distorções no dimensionamento da carga de resfriamento obtido por meio de simulação numérica. Desta forma obteve-se 30 combinações possíveis entre os algoritmos conforme apresentado na Tabela 2. As combinações foram dividias em três grupos. As divisões se fundamentaram nos três tipos de algoritmos de convecção de superfícies interna. Para cada grupo de combinação, variaram-se os algoritmos de convecção de superfície externa e condução. Essa estratégia foi adotada afim de se realizar a análise de variâncias.

Tabela 2 – Algoritmos para cálculos de transferência de calor e balanço de massa

Fenômeno a ser analisado	**Algoritmos do ©Energy Plus**
Convecção em superfícies internas	Simple, Tarp e *Adaptative Convection Algorithm*.
Convecção em superfícies externas	Tarp, DOE -2, *Adaptative Convection Algorithm*, Simple Combined e MoWitt.
Condução	*Conduction Transfer Function* e *Conduction Finite Difference*.

Fonte: Adaptado de BIGLADDER (2020).

3.4. Pressupostos da simulação

Para o presente trabalho, a título de simplificação, optou-se por realizar simulações no primeiro, terceiro e quinto pavimento. As características dos apartamentos localizados no segundo e quarto pavimento eram semelhantes àqueles do terceiro (sem contato com o piso e/ou cobertura) e, por isto, foram suprimidos. Cada pavimento possui 4 unidades residenciais denominados apartamentos 101, 301, 501 com orientações geográficas voltadas a norte e leste, os apartamentos 104, 304 e 504, possuem suas fachadas voltadas para o norte e oeste, os apartamentos 102, 302 e 502 apresentam orientações com fachadas a sul e a leste e os apartamentos 103, 303 e 503 com faces voltadas para o sul e oeste.

Como *input* da simulação utilizou-se um arquivo climático do tipo *SWERA*[1], para o Aeroporto de Santos Dumont-RJ. A escolha de tal formato se deve ao fato do mesmo ser o único que representa a localidade mais próxima do objeto deste estudo. Também foram atribuídos o arquivo *Desing Day* presente no arquivo climático, afim de se avaliar os extremos de temperatura para a localidade abordada. Sabe-se que a temperatura do solo possui grande influência nas simulações devidas as intensas trocas de energia com o ambiente interno (BATISTA; LAMBERTS; GÜTHS, 2011). Para determinar com maior precisão a temperatura do solo, utilizou-se o programa SLAB para realizar o ajuste de temperatura do solo mensal conforme procedimento realizado por Oliveira (2019).

A temperatura de projeto do ambiente condicionado foi estabelecida conforme a Tabela 3 da ABNT NBR 16655-3 (2018), sendo escolhida a condição 1, em que se considera o valor de temperatura de bulbo seco equivalente a 24ºC com uma umidade relativa de 50% a uma pressão atmosférica de 100,73 kPa, umidade absoluta de 0,0094 kg_{Vapor}/kg_{ar} seco a um volume específico de 0,860 m3/kg e entalpia de 47,92 kJ/kg. Essas características foram definidas para a estação de verão. Os recintos adjacentes não condicionados analisados na edificação consistem nos corredores (área comum), dessa forma foi considerado 3ºC a mais na temperatura de bulbo seco do ar externo para esses espaços. A parcela não controlada da infiltração e ventilação externa ficou em função do valor mínimo recomendado pela norma ABNT NBR 16655-3, 3,6 $m^3/h.m^2$.

3.5. Análise estatística

Visando alcançar o objetivo desta pesquisa, elaborou-se a seguinte pergunta, "A estimativa da carga de resfriamento sofre influência significante devido a utilização de diferentes combinações de algoritmos na sua simulação numérica?". Para responder essa pergunta, foi necessário a realização de uma análise de variância em que se formulou-se uma hipótese nula considerando as médias dos grupos equivalentes se o valor de p for maior que 0,05 e uma hipótese alternativa em que existe pelo menos uma diferença entre as médias dos grupos se o valor de p for equivalente a 0,05 ou menor. Essas hipóteses contaram com um intervalo de confiança

[1] *Solar and Wind Energy Resource Assessment* disponível no Website do ©Energy Plus (DOE; NREL, [2015]).

equivalente a 95%. Para a realização da ANOVA é necessário que os dados apresentem as seguintes idealidades: Os dados devem apresentar normalidade, homogeneidade e a inexistência de outliers extremos (STOCHERO; JACOBI; LÚCIO, 2020). Utilizou-se o Excel para a organização dos dados e para realizar a conversão do arquivo para o formato .CSV. Os dados foram importados no Rstudio como banco de dados. Para a realização da análise de variância foi necessário a utilização da biblioteca2 disponíveis no software.

Optou-se também em realizar o teste não paramétrico de *Kruskal Wallis*, visto que os dados não atenderam alguns dos pressupostos necessários para a realização da ANOVA (RIBOLDI *et al*., 2014). A realização do teste ocorreu no ambiente do Rstudio e utilizou-se as mesmas bibliotecas carregadas anteriormente. Formulou-se também uma hipótese nula em que os valores das medianas dos grupos são equivalentes se p for maior que 0,05 e uma hipótese alternativa considerando que existe pelo menos uma diferença significativa entre as medianas dos grupos se p for equivalente a 0,05 ou menor (OSTERTAGOVA; OSTERTAG; KOVÁČ, 2014). Para a realização do teste de Post Hoc utilizou-se o teste de Duncan com adaptação de p utilizando o método de Bonferroni. Optou-se em utilizar esse método devido ao seu caráter mais conservador (GIRARDI; CARGNELUTTI FILHO; STORCK, 2009).

Para a realização dos testes de *PostHoc* contou-se também com uma avaliação do grau de significância [SG] que é composto por caracteres especiais, em que [*] apresenta um grau de diferença baixo, [**] grau da diferença médio, [***] grau da diferença elevado e [****] grau da diferença muito elevado. Os demais caracteres especiais representam que não existe grau de diferença considerável.

4. RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta os valores de médias e medianas obtidos como saída na simulação com os grupos de combinações mostradas na Tabela 2. Os valores apresentados na Tabela 3 correspondem a soma de calor sensível instantâneo, atrasado e calor latente, totalizando o calor total a ser retirado dos ambientes.

De acordo com as Tabela 3 nota-se que os apartamentos com as faces voltadas para norte apresentam maiores cargas térmicas quando comparado as médias dos grupos de algoritmos. Observa-se também uma tendência no aumento da carga térmica em relação a altitude que o apartamento está localizado. Esse aumento pode ser observado comparando as médias das residências 101, 301 e 501, o mesmo ocorre para as residências 102, 302 502, 103, 303 e 503 e também para o 104, 304 e 504, exceto para a grupo do algoritmo *TARP*[3], mais especificamente entre as residências 304 e 504.

Tabela 3 – Carga térmica

Residências	TARP		SIMPLE		ADAPTATIVE CONVECTION	
	Média	Mediana	Média	Mediana	Média	Mediana
101	3,98	4,02	4,16	4,19	3,86	3,89
102	3,21	3,20	3,39	3,38	3,13	3,13
103	3,47	3,49	3,62	3,62	3,38	3,41
104	4,53	4,59	4,62	4,67	4,37	4,43
301	4,47	4,49	4,66	4,68	4,33	4,35
302	3,52	3,52	3,74	3,73	3,42	3,43
303	4,04	4,05	4,20	4,22	3,92	3,92
304	4,82	4,85	4,94	4,96	4,67	4,70
501	4,06	4,07	4,35	4,37	3,96	3,97
502	3,79	3,80	4,07	4,07	3,70	3,72
503	4,73	4,76	4,98	5,00	4,68	4,71
504	4,80	4,79	5,05	5,07	4,74	4,78

Fonte: Autores

[2] "RVAideMemoire" para avaliar a normalidade dos dados por meio do teste de Shapiro- Wilk, carregou-se também a biblioteca "DescTools" afim de se avaliar a homogeneidade dos dados por meio do teste de Levene e também para realização do teste de PostHoc- Tukey HSD. Utilizou-se a biblioteca "Car" para a análise de *outliers* por meio do *boxplot*. Carregou-se também o pacote "rstatix" para realizar o teste de variância. As bibliotecas "dplyr" e "psych" foram carregadas para realizar a manipulação de dados e para disponibilizar alguns grupos de funções respectivamente (CHAMBERS, 2008).

[3] O algoritmo *TARP* para convecção externa combina convecção natural (h_n) e a convecção forçada (h_f) por meio de correlações obtidas em testes de laboratório em superfícies planas (BIGLADDER, 2020).

Para o teste de normalidade, assumiu-se duas hipóteses. A hipótese nula, em que os valores são normais se os valores de p forem maiores que 0,05 e a hipótese alternativa em que os valores são anormais se os valores de p forem iguais ou menores que 0,05. Por meio da Tabela 4 observa-se que os resultados para as residências 101, 103, 104 e 303 apresentam valores de p menor que 0,05. A partir dessa observação assumiu-se a hipótese alternativa para esses dados, ou seja os resultados para estes apartamentos apresentam características anormais. Os resultados para os demais apartamentos apresentaram dados normais, visto que o valor de p é maior que o grau de significância assumido, 0,05. Para esta condição assumiu-se a hipótese nula. Ainda na Tabela 4 é mostrado o valor de [w], considerado um valor estatístico que mede a normalidade dos dados. Quando mais próximo de 1, maiores as chances de os dados serem normais.

Tabela 4 – Teste de normalidade

Residências	TARP		SIMPLE		ADAPTATIVE CONVECTION	
	W	P	W	P	W	P
101	0,82	0,03	0,81	0,02	0,82	0,00
102	0,94	0,54	0,85	0,06	0,94	0,53
103	0,75	0,00	0,88	0,13	0,74	0,00
104	0,83	0,03	0,82	0,03	0,83	0,03
301	0,90	0,24	0,88	0,13	0,90	0,24
302	0,89	0,18	0,94	0,54	0,86	0,07
303	0,83	0,03	0,81	0,02	0,83	0,03
304	0,90	0,24	0,90	0,24	0,90	0,23
501	0,92	0,32	0,92	0,39	0,91	0,28
502	0,92	0,32	0,92	0,37	0,90	0,23
503	0,91	0,27	0,92	0,32	0,91	0,27
504	0,93	0,43	0,93	0,47	0,93	0,42

Fonte: Autores

Na Tabela 5 é mostrado o resultado do teste de *Levene*, em que [f] é o valor estatístico, [df] é o grau de liberdade e [p] é o valor significativo.

Assumiu-se também duas hipóteses. Hipótese nula quando as variâncias dos grupos são homogêneas se p for maior que 0,05 e hipótese alternativa, quando as variâncias dos grupos não são homogêneas se p for menor ou igual a 0,05. Para este teste levou-se em conta a média, visto que a análise de variância leva em conta a diferença dos valores em relação à média e não a mediana. Por meio da Tabela 5 analisou-se os resultados de todos os apartamentos e assumiu-se a hipótese nula, visto que todos os valores de p foram maiores que 0, 05, ou seja, os dados são homogêneos.

Tabela 5 – Teste hogeneidade

Residências	df	f	P
101	2//27	0,127	0,881
102	2//27	0,017	0,983
103	2//27	0,214	0,809
104	2//27	0,197	0,822
301	2//27	0,407	0,67
302	2//27	0,015	0,986
303	2//27	0,111	0,896
304	2//27	0,452	0,641
501	2//27	0,026	0,974
502	2//27	0,049	0,952
503	2//27	1,643	0,212
504	2//27	1,166	0,327

Fonte: Autores

Observa-se na Figura 2 a presença de 02 *outliers* por grupo de algoritmos para os apartamentos 101, 103, 104, 303 e 501. Para a avaliação de *outliers* extremos foi considerado um limite de 1,5 vezes a amplitude interquartil.

Os resultados da análise de variância foram apresentados na Tabela 6. Considerou-se novamente duas hipóteses. A primeira hipótese consiste em que a média dos três grupos são equivalentes se o valor de p for maior que 0,05. A segunda hipótese considera que há pelo menos uma diferença entre as médias dos grupos se p for menor ou igual a 0,05. Na Tabela 6 também é apresentado o teste de *Kruskal Wallis*, visto que os pressupostos não apresentaram condições ideias para a realização da ANOVA. Para o teste não paramétrico, considerou-se a hipótese nula em que as medianas dos grupos são equivalentes se p for maior 0,05 e como hipótese alternativa, as medianas apresenta pelo menos uma diferença se p for menor ou igual a 0,05.

Por meio da Tabela 6 observa-se que os resultados para todos os apartamentos apresentaram valor de p menor que 0,05 tanto para o teste paramétrico quanto para o teste não paramétrico. Mediante a essa condição

assumiu-se a hipótese alternativa, ou seja, existe pelo menos uma diferença significativa entre as médias e as medianas dos grupos.

Sabendo que existe pelo menos uma diferença significante dos grupos por meio dos resultados da Tabela 5, buscou-se localizar especificamente quais grupos se divergiam um dos outros. Avaliando o grau de significância (SG), que são representados por caracteres especiais, pode-se concluir quais grupos são mais diferentes. Avaliando os resultados presente na Tabela 7, observa-se que todos os grupos quando comparados entre si apresentaram graus de diferença que variaram de baixo a muito elevado, para os dois testes de *PostHoc,* exceto para os grupos de algoritmos [*TARP ~ Adaptive concevtion*[4]] que apresentaram diferenças insignificantes quando analisados todas as residências se tratando do teste de Duncan. Avaliando pelo teste *Tukey-HSD*, o mesmo grupo de algoritmos apresentam diferenças insignificantes para as residências 101, 104, 301, 304, 503 e 504.

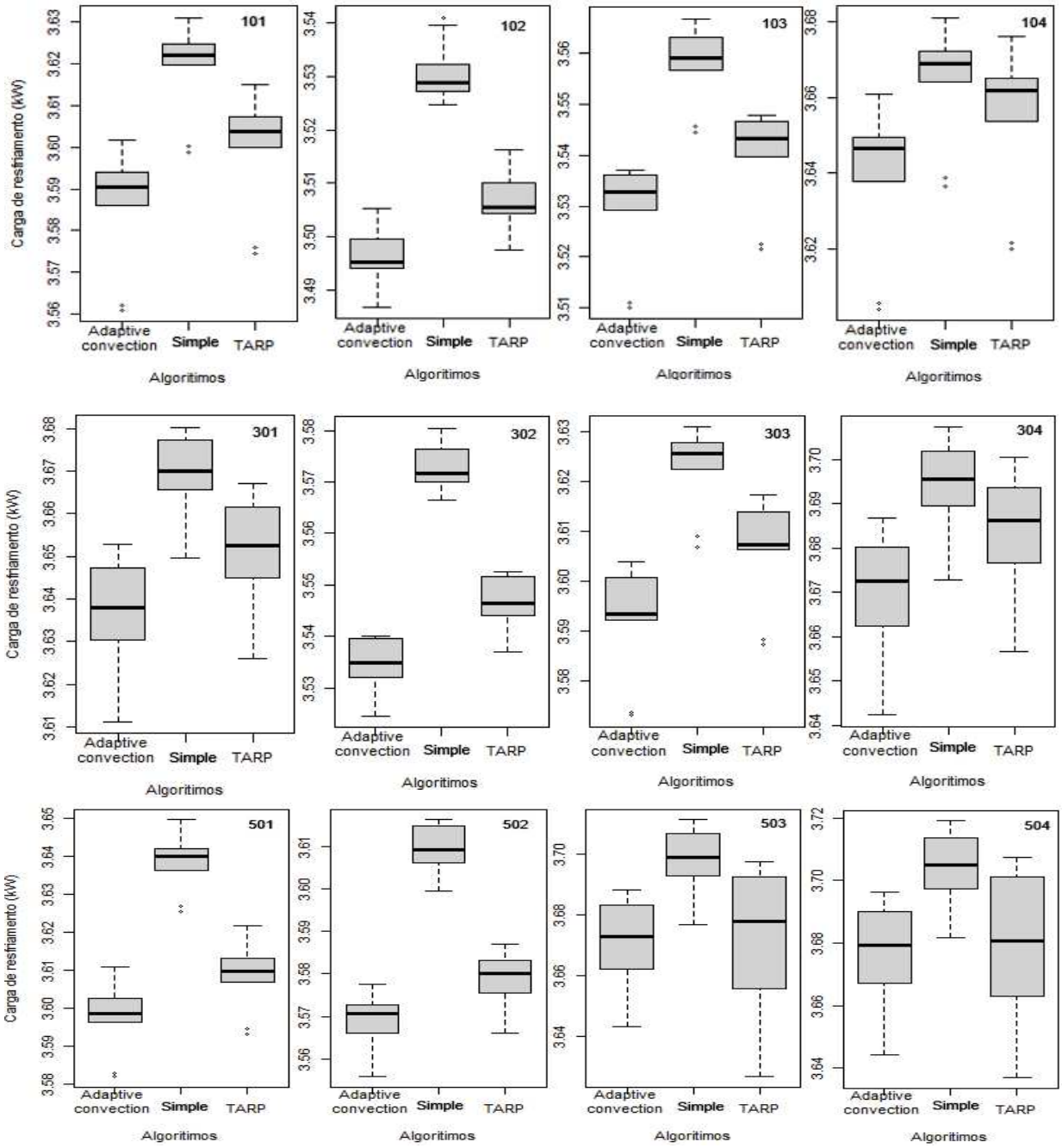

Figura 2 – *Boxplot* – análise de *outliers*

[4] É um algoritmo dinâmico que reconhece uma variedade de modelos para cálculo do coeficiente convectivo e seleciona aquele que melhor se aplica dada as condições do fluxo de calor (BIGLADDER, 2020).

Observa-se também que o grupo de algoritmo *TARP ~ SIMPLE* [5]apresentam diferenças insignificantes para os apartamentos 104 e 304, considerando o teste *Tukey-HSD*. Considerando o teste *Duncan*, os apartamentos 101, 104, 301 e 304 também apresentam diferenças insignificantes quando analisados os dois grupos.

Tabela 6 – Testes de variâncias

	TESTE ANOVA						TESTE KRUSKAL WALLIS		
Residências	Valores	Df	Soma dos Quadrados	Média dos quadrados	F	p	Df	Chi^2	p
101	cod	2	455355,00	227677,00	16,43	$2{,}15E^{-05}$	2	16,74	$2{,}32E^{-04}$
	Residuais	27	374248,00	13861,00					
102	cod	2	355528,00	177764,00	88,81	$1{,}34E^{-12}$	2	23,28	$8{,}81E^{-06}$
	Residuais	27	54043,00	2002,00					
103	cod	2	278146,00	139073,00	25,98	$5{,}11E^{-07}$	2	20,11	$4{,}30E^{-05}$
	Residuais	27	144521,00	5353,00					
104	cod	2	336320,00	168160,00	4,94	$1{,}48E^{-02}$	2	9,60	$8{,}22E^{-03}$
	Residuais	27	918723,00	34027,00					
301	cod	2	574471,00	287235,00	15,19	$3{,}81E^{-05}$	2	15,73	$3{,}83E^{-04}$
	Residuais	27	510666,00	18914,00					
302	cod	2	534670,00	267335,00	135,20	$8{,}61E^{-15}$	2	23,91	$6{,}43E^{-06}$
	Residuais	27	53404,00	1978,00					
303	cod	2	397291,00	198645,00	23,50	$1{,}22E^{-06}$	2	19,60	$5{,}54E^{-05}$
	Residuais	27	228185,00	8451,00					
304	cod	2	367624,00	183812,00	7,38	$2{,}78E^{-03}$	2	10,60	$4{,}99E^{-03}$
	Residuais	27	672762,00	24917,00					
501	cod	2	824024,00	412012,00	58,30	$1{,}59E^{-10}$	2	21,24	$2{,}45E^{-05}$
	Residuais	27	190811,00	7067,00					
502	cod	2	721818,00	360909,00	101,50	$2{,}47E^{-13}$	2	22,34	$1{,}41E^{-05}$
	Residuais	27	95962,00	3554,00					
503	cod	2	533392,00	266696,00	7,55	$2{,}48E^{-03}$	2	12,55	$1{,}88E^{-03}$
	Residuais	27	953452,00	35313,00					
504	cod	2	537508,00	268754,00	6,68	$4{,}41E^{-03}$	2	11,18	$3{,}74E^{-03}$
	Residuais	27	1086877,00	40255,00					

Fonte: Autores

Tabela 7 – Testes de PostHoc

Residência	$cod	Tukey -HSD		Duncan - Bonferroni		
		pval	SG	p	p.adj p.	SG
AP 101	SIMPLE-Adaptive convection	$1.4E^{-05}$	***	$4{,}32E^{-05}$	$1{,}30E^{-04}$	***

[5] A metodologia *Simple* aplica coeficientes convectivos (h) constantes que são dependentes da inclinação da superfície (BIGLADDER, 2020). Para superfícies verticais h = 3, 076 $[W/m^2K]$; para superfícies horizontais com convecção reduzida h = 0, 948 $[W/m^2K]$; para superfícies horizontais com convecção intensa h = 4, 404 $[W/m^2K]$; para superfícies inclinadas com con- vecção reduzida h = 2, 281 $[W/m^2K]$; para superfícies inclinadas com convecção intensa h = 3, 870 $[W/m^2K]$; para superfícies inclinadas com convecção (ASHRAE, 2005).

	TARP-Adaptive convection	$6,85E^{-02}$	.	$5,36E^{-02}$	$1,61E^{-01}$	ns
	TARP-SIMPLE	$6,20E^{+01}$	**	$3,08E^{-02}$	$9,25E^{-02}$	ns
	SIMPLE-Adaptive convection	$1,20E^{-12}$	***	$1,58E^{-06}$	$4,75E^{-06}$	****
AP 102	TARP-Adaptive convection	$1,70E^{-03}$	**	$4,76E^{-02}$	$1,43E^{-01}$	ns
	TARP-SIMPLE	$3,00E^{-09}$	***	$4,81E^{-03}$	$1,44E^{-02}$	*
	SIMPLE-Adaptive convection	$3,40E^{-07}$	***	$7,81E^{-06}$	$2,34E^{-05}$	****
AP 103	TARP-Adaptive convection	$3,38E^{-02}$	*	$5,36E^{-02}$	$1,61E^{-01}$	ns
	TARP-SIMPLE	$3,60E^{-04}$	***	$1,11E^{-02}$	$3,33E^{-02}$	*
	SIMPLE-Adaptive convection	$1,17E^{-02}$	*	$2,12E^{-03}$	$6,35E^{-03}$	**
AP 104	TARP-Adaptive convection	$1,49E^{-01}$		$6,02E^{-02}$	$1,80E^{-01}$	ns
	TARP-SIMPLE	$4,75E^{-01}$		$2,33E^{-01}$	$6,98E^{-01}$	ns
	SIMPLE-Adaptive convection	$2,40E^{-05}$	***	$8,25E^{-05}$	$2,48E^{-02}$	***
AP 301	TARP-Adaptive convection	$6,15E^{-02}$	.	$1,21E^{-01}$	$3,64E^{-01}$	ns
	TARP-SIMPLE	$1,17E^{-02}$	*	$1,70E^{-02}$	$5,09E^{-02}$	ns
	SIMPLE-Adaptive convection	$1,20E^{-14}$	***	$1,08E^{-06}$	$3,23E^{-06}$	****
AP 302	TARP-Adaptive convection	$1,30E^{-04}$	***	$3,29E^{-02}$	$9,86E^{-02}$	ns
	TARP-SIMPLE	$3,70E^{-11}$	***	$6,08E^{-03}$	$1,83E^{-02}$	*
	SIMPLE-Adaptive convection	$7,00E^{-07}$	***	$9,89E^{-06}$	$2,97E^{-05}$	****
AP 303	TARP-Adaptive convection	$1,30E^{-02}$	*	$4,76E^{-02}$	$1,43E^{-01}$	ns
	TARP-SIMPLE	$2,20E^{-03}$	**	$1,48E^{-02}$	$4,43E^{-02}$	*
	SIMPLE-Adaptive convection	$1,90E^{-03}$	**	$1,15E^{-03}$	$3,45E^{-03}$	**
AP 304	TARP-Adaptive convection	$9,84E^{-02}$	.	$7,54E^{-02}$	$2,26E^{-01}$	ns
	TARP-SIMPLE	$2,31E^{-01}$		$1,41E^{-01}$	$4,22E^{-01}$	ns
	SIMPLE-Adaptive convection	$1,80E^{-10}$	***	$6,93E^{-06}$	$2,08E^{-05}$	****
AP 501	TARP-Adaptive convection	$3,20E^{-02}$	*	$1,70E^{-01}$	$5,11E^{-01}$	ns
	TARP-SIMPLE	$7,90E^{-08}$	***	$1,78E^{-03}$	$5,35E^{-03}$	**
	SIMPLE-Adaptive convection	$4,00E^{-13}$	***	$2,96E^{-06}$	$8,88E^{-06}$	****
AP 502	TARP-Adaptive convection	$1,01E^{-02}$	*	$8,41E^{-02}$	$2,52E^{-01}$	ns
	TARP-SIMPLE	$1,60E^{-10}$	***	$3,21E^{-03}$	$9,64E^{-03}$	**
	SIMPLE-Adaptive convection	$3,40E^{-03}$	**	$8,00E^{-04}$	$2,40E^{-03}$	**
AP 503	TARP-Adaptive convection	$8,45E^{-01}$		$4,93E^{-01}$	$1,00E^{+00}$	ns
	TARP-SIMPLE	$1,35E^{-02}$	*	$7,65E^{-03}$	$2,30E^{-02}$	*
	SIMPLE-Adaptive convection	$5,10E^{-03}$	**	$1,37E^{-03}$	$4,12E^{-03}$	**
AP 504	TARP-Adaptive convection	$7,72E^{-01}$		$4,46E^{-01}$	$1,00E^{+00}$	ns
	TARP-SIMPLE	$2,66E^{-02}$	*	$1,48E^{-02}$	$4,43E^{-02}$	*

Continuação Tabela 7. Fonte: Autores

5. CONCLUSÕES

Por meio do modelo numérico calibrado observou-se uma variabilidade expressiva na adoção de diferentes algoritmos no cálculo da carga térmica dos apartamentos de uma edificação residencial localizada no Rio de Janeiro (RJ) bem como o seu impacto no dimensionamento da potência de resfriamento.

A estimativa da carga de resfriamento sofre influência significante devido a utilização de diferentes combinações de algoritmos tanto por meio de teste paramétricos quanto por testes não paramétricos. Contudo assumiu-se a hipótese alternativa para os dois testes, que existe pelo menos uma diferença significante entre as médias e medianas dos grupos levantando nessa pesquisa. Essas diferenças são mais significantes quando comparado os grupos [*SIMPLE ~ Adaptative convection*] e [*SIMPLE ~ TARP],* com uma diferença média percentual 6,99% e 4,56% respectivamente.

Enfim, sugere-se como estudos futuros uma análise de variâncias considerando grupos formados por algoritmos de convecção de superfície externa e grupos formados por algoritmos de condução. Recomenda-se também análises qualitativas da edificação em relação às funcionalidades lógicas apresentadas pelo *software*, visto que apresentam peculiaridades quanto ao balanço térmico, orientações e características das superfícies que compõem a edificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.

------ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR-16401. Instalações de ar condicionado - sistemas centrais e unitários - parte 1 (projeto da instalação), parte 2 (parâmetros de conforto térmico) e parte 3 (qualidade do ar interno). Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2008.

------ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS -NBR-16655-3. Instalação de sistemas de ar condicionado residenciais - split e compactos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2018.

ALABOUD, M.; GADI, M. The effect of thermal insulation on cooling load in residential buildings in makkah, saudi arabia. **Future Cities and Environment**, Ubiquity Press, v. 6, n. 1, 2020.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **2009 ASHRAE Handbook – Fundamentals**. p. 30.12. Atlanta, 2009.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. Influence of conduction algorithms and convince on simulation results of thermal building behavior. Ambiente Construído, v. 11, n. 4, p. 79–97, 2011.

BEAUSOLEIL-MORRISON, I. The adaptive simulation of convective heat transfer at internal building surfaces. **Building and Environment**, Elsevier, v. 37, n. 8-9, p. 791–806, 2002.

BIGLADDER. Engineering Reference. 9.4. ed. Denver, 2020. Disponível em: Acesso em: 27 jun. 2020.

CHAMBERS, J. Software for data analysis: programming with R. [s.l.] **Springer Science \& Business Media**, 2008.

ENERGÉTICO, E.-E. de P. National energy, 2019. **Relatório Síntese**, ano base, 2018.

EPE. Air conditioning use in the brazilian residential sector: Perspectives and contributions to advancing energy efficiency. Nota Técnica EPE 030/2018, Rio de Janeiro, 2018., EPE 030, 2018. Disponível em: Disponívelem:<https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/uso-de-ar-condicionado-no-setor-residencial-brasileiro-perspectivas-econtribuicoes-para-o-\ avanço-em-eficiência-energética>. Acesso em 05/03/2021.

GIRARDI, L. H.; CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L. ERRO TIPO IE PODER DE CINCO TESTES DE COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS. Rev. **Bras. Biom**, v. 27, n. 1, p. 23–36, 2009.

OLAMA, M. M. et al. Coordination and control of building hvac systems to provide frequency regulation to the electric grid. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 7, p. 1852, 2018.

OLIVEIRA, F. M. D. Impacto da adoção de estratégias bioclimáticas na eficiência energética de edificações residenciais condicionadas. 120 p. Dissertação (Master in Civil Engineering) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2019.

OSTERTAGOVA, E.; OSTERTAG, O.; KOVÁČ, J. Methodology and application of the Kruskal-Wallis test. **Applied Mechanics and Materials.** Anais...2014

RASUL, M. G.; DORING, C. Performance assessment of desiccant air conditioning system in an institutional building in subtropical climate. **Energy Procedia**, v. 110, p. 486–491, 2017.

RIBOLDI, J. et al. Precisão e poder de testes de homocedasticidade paramétricos e não-paramétricos avaliados por simulação. **Revista Brasileira de Biomedicina**, v. 32, n. 3, p. 334–344, 2014.

STOCHERO, E. L. M.; JACOBI, L. F.; LÚCIO, A. D. Imputation of data in analysis of variance in experiments in the Completely Randomized Design. **Ciência e Natura**, v. 42, p. 37, 2020.

SHEN, P. et al. Building heating and cooling load under different neighbourhood forms: Assessing the effect of external convective heat transfer. **Energy**, Elsevier, v. 173, p. 75–91, 2019.

TABARES-VELASCO, P. C.; GRIFFITH, B. Diagnostic test cases for verifying surface heat transfer algorithms and boundary conditions in building energy simulation programs. **Journal of Building Performance Simulation**, Taylor & Francis, v. 5, n. 5, p. 329–346, 2012.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio ao desenvolvimento deste trabalho.