XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Análise de cluster aplicada ao estudo do desempenho térmico de uma residência

Cluster analysis applied to residential thermal performance study

Letícia Gabriela Eli
UFSC | Florianópolis-SC | Brasil | leticia.eli@posgrad.ufsc.br
Amanda Fraga Krelling
UFSC | Florianópolis-SC | Brasil | amanda.krelling@posgrad.ufsc.br
Vanessa Aparecida Caieiro da Costa
Saint-Gobain Research Brasil | Capivari-SP | Brasil | vanessa.costa@saint-gobain.com
Ana Paula Melo
UFSC | Florianópolis-SC | Brasil | a.p.melo@ufsc.br
Roberto Lamberts
UFSC | Florianópolis-SC | Brasil | roberto.lamberts@ufsc.br

Resumo
A análise de desempenho térmico de edificações pode envolver a simulação de vários casos com sistemas construtivos que diferem em composição, mas que apresentam desempenho similares. Dessa forma, não é necessária a simulação de todos os sistemas construtivos, mas somente dos representativos. Este estudo usa a clusterização *por* k-medoids *para a determinação de coberturas e paredes externas representativas a partir de um banco de dados. Os resultados mostram desempenho térmico similar para casos em um mesmo* cluster*. A variação entre o caso representativo e os demais foi menor do que 5% na maioria do* clusters.

Palavras-chave: Simulação computacional. Desempenho térmico. Análise de cluster.

Abstract
Building thermal performance analysis may involve simulation of several cases with constructive systems within different composition, but similar performance. Thus, it is not necessary simulation of all constructive systems, but just the representative cases. This study uses a k-medoids clustering method to determine representative roofs and representative external walls from a data base. The results show a similar thermal performance for cases in the same cluster. The variation between the representative case and other cases was less than 5% for most clusters.

Keywords: Computational simulation. Thermal performance. Cluster analysis.

Como citar:
ELI, L. G.; KRELLING, A. F.; COSTA, V. A. C.; MELO, A.P.; LAMBERTS, R. Análise de cluster aplicada ao estudo do desempenho térmico de uma residência. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1-10.

INTRODUÇÃO

Análises de desempenho térmico de edificações podem incluir o estudo de várias estratégias construtivas, a fim de verificar aquelas que melhor se adequam a determinado clima e modo de uso [1–4]. Tais estudos, frequentemente, são realizados por meio de simulações computacionais, e na literatura, é comum encontrar trabalhos que testaram diversas configurações, gerando um alto número de casos simulados e de resultados. Entretanto, testar diversas estratégias pode ser custoso do ponto de vista operacional e da análise de dados, o que muitas vezes exige a redução do número de combinações a serem testadas. Para o estudo do desempenho térmico frente a variações na parede externa, por exemplo, se essas variações incluem elementos construtivos com propriedades térmicas similares, os resultados da simulação computacional também tendem a ser similares. Dessa forma, as paredes externas a serem simuladas podem ser reduzidas a casos representativos.

Técnicas de agrupamento, também conhecidas como *clusterização* ou métodos de *cluster*, podem ser utilizadas para a divisão de um determinado banco de dados em grupos de casos similares [5]. Na análise de desempenho térmico e energético de edificações, métodos de *cluster* são utilizados para definição de arquétipos de edificações [6], zoneamento bioclimático [7,8], definição de grupos de edificações com resultados de indicadores de desempenho térmico e energético similares [9,10], dentre outras situações em que são necessários definir grupos ou casos representativos em um banco de dados.

Os distintos métodos de *clusterização* podem ser divididos em duas classes principais: hierárquicos e de particionamento [11]. As técnicas hierárquicas, como o nome sugere, dividem o banco de dados em grupos de maneira hierárquica, podendo resultar em diversas combinações e um mesmo elemento pode fazer parte de mais de um *cluster*. Nas técnicas de particionamento, a divisão ocorre a partir da definição do número “k” de *clusters* que o banco de dados será dividido, sem que haja hierarquia entre os casos, mas sim similaridade com o ponto central do *cluster*. O cálculo da similaridade nos métodos particionados pode ser realizado de diversas formas, sendo a distância Euclidiana a mais aplicada. Exemplos de métodos de *clusterização* por particionamento são o *k-means* e sua derivação, chamada de *k-medoids*. A diferença principal entre os dois métodos é a maneira como o ponto central de cada *cluster* são escolhidos e como a base de dados é dividida [12]. O ponto central do *cluster*, também conhecido como *medoid*, é o caso em que as dissimilaridades entre os seus valores e os valores dos demais casos é a menor possível dentro do *cluster*. Pelo método de *k-means*, os *medoids* não precisam necessariamente fazer parte da base de dados e a divisão de *cluster* é realizada de forma a minimizar o erro quadrado total. Pelo método de *k-medoids*, os *medoids* necessariamente fazem parte da base de dados que está sendo analisada e os demais pontos do *cluster* são escolhidos de forma a minimizar a soma de dissimilaridades entre os pontos do *cluster* e seu *medoid*. Essa particularidade na divisão do *cluster* torna a técnica por *k-medoids* mais robusta.

Com base no que foi exposto, este estudo tem por objetivo apresentar um método para definição de coberturas e paredes externas representativas, tendo como base um

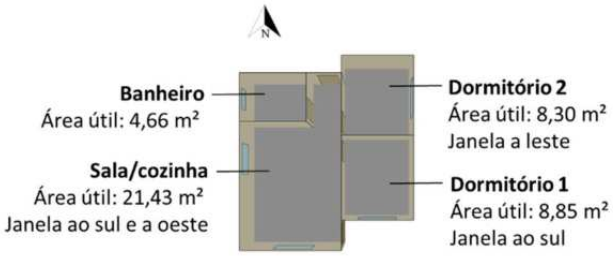
banco de dados pré-determinado. Para a definição dos elementos construtivos representativos foi aplicada a técnica de *clusterização* de *k-medoids* nos resultados de desempenho térmico de uma edificação residencial.

MÉTODO

TIPOLOGIA E CLIMA

Foi utilizado o *software EnergyPlus* na versão 9.0 [14] para a modelagem da tipologia a ser estudada. A edificação adotada foi uma residência unifamiliar térrea de interesse social, composta por dois dormitórios, um banheiro e uma sala com cozinha conjugada [15], conforme planta baixa presente na Figura 1. Esta tipologia é representativa dos programas de habitação de interesse social, conforme estudo de Triana, Lamberts e Sassi [15]. As cargas internas e a modelagem da climatização da residência foram adotadas conforme procedimento de simulação para a análise de desempenho térmico da NBR 15575-1:2021 [16]. De acordo com a normativa, foi considerada ocupação na sala durante 14h00 e 21h59 e nos dormitórios durante o período de 22h00 e 7h59. Para a climatização, a normativa indica dois tipos de modelagem: com ventilação natural e sem ventilação natural, mas com o cálculo da carga térmica ideal. Todos os critérios adotados são os definidos na normativa.

Figura 1 - Tipologia residencial adotada



Fonte: Adaptado de Triana, Lamberts e Sassi [15].

A área de elementos transparentes de cada ambiente de permanência prolongada (APP) e as características do piso da unidade habitacional (UH) também foram definidos conforme a edificação de referência da NBR 15575-1:2021. As paredes internas são compostas por placas de gesso com lã de vidro de 7 cm. As demais características são apresentadas nas próximas seções.

Para o clima, foi adotada a cidade de Santa Maria (RS), que pertence à zona bioclimática 2 [17] e possui temperatura externa média anual de bulbo seco (TBS_m) de 19,0 ^oC, conforme arquivo climático disponibilizado pelo ABNT TR 15575-1-1 [18]. Conforme determina a NBR 15575-1:2021, as simulações foram anuais.

SISTEMAS CONSTRUTIVOS

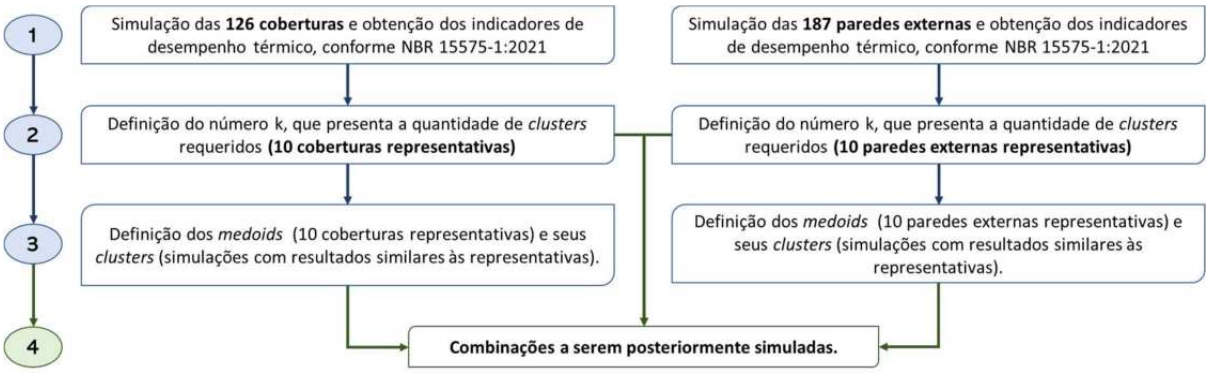
Foram definidos 126 coberturas e 187 paredes externas para serem utilizadas na análise de desempenho térmico. Esses sistemas englobaram tanto soluções já utilizadas no setor da construção civil quanto soluções inovadoras. Alguns exemplos de componentes utilizados e que foram combinados para a definição dos sistemas

construtivos são: a parede de concreto, a telha cerâmica, a telha de fibrocimento, telha metálica, o forro de gesso, a laje de concreto, isolamentos como lã de vidro, lã de rocha e poliestireno expandido, e o sistema *light steel frame* como um todo.

ANÁLISE DE CLUSTER

Para a determinação dos componentes construtivos representativos foi aplicada a análise de cluster por *k-medoids*, através do uso da linguagem computacional R [19] através do pacote Cluster [20]. Ao todo foram executadas quatro etapas, conforme é possível visualizar na Figura 2. Seguindo o procedimento da NBR 15575-1:2021 [16], cada caso foi simulado duas vezes, considerando as condições de uso com e sem ventilação natural. Para a condição de uso sem ventilação natural, foi modelado um sistema ideal para o cálculo da carga térmica, assim como determina a NBR 15575-1:2021.

Figura 2 – Etapas da análise de clusters.



Fonte: Os autores.

A primeira etapa consistiu na simulação de 313 casos, totalizando 626 simulações. Os 313 casos correspondem à simulação da residência considerando as 126 variações na cobertura e as 187 variações nas paredes externas. Para isolar a representatividade de cada componente construtivo no desempenho térmico da residência, o agrupamento foi realizado de maneira separada para as coberturas e para as paredes externas. Para o agrupamento das coberturas, foi adotada uma parede externa fixa com absortância de 0,58, transmitância térmica de 0,49 W/(m².K) e capacidade térmica 28,19 kJ/(m².K). Para o agrupamento das paredes externas, foi adotada uma cobertura fixa com absortância de 0,73, transmitância térmica de 0,59 W/(m².K) e capacidade térmica de 24,21 kJ/(m².K). Esses sistemas construtivos têm como características térmicas serem leves e isolados, assim como a maior parte dos elementos presentes no banco de dados. Além disso, adotar esses sistemas construtivos como fixos permite reduzir as trocas de calor por esses componentes e potencializar as trocas pelo elemento que está sendo variado. É importante destacar que as demais características da unidade habitacional foram mantidas conforme o exposto na seção anterior, tipologia e clima.

Ainda na primeira etapa, para cada caso simulado, foram extraídos os indicadores de desempenho térmico da UH, conforme NBR 15575-1:2021 [16]. Os indicadores são: percentual de horas ocupadas dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), temperaturas operativas anuais máxima (Tomáx) e mínima (Tomín), carga térmica de

refrigeração (CgTR) e de aquecimento (CgTA). A análise de *cluster* foi executada considerando o resultado da simulação, dessa forma foi possível agrupar os sistemas construtivos considerando seu impacto direto no desempenho térmico da residência.

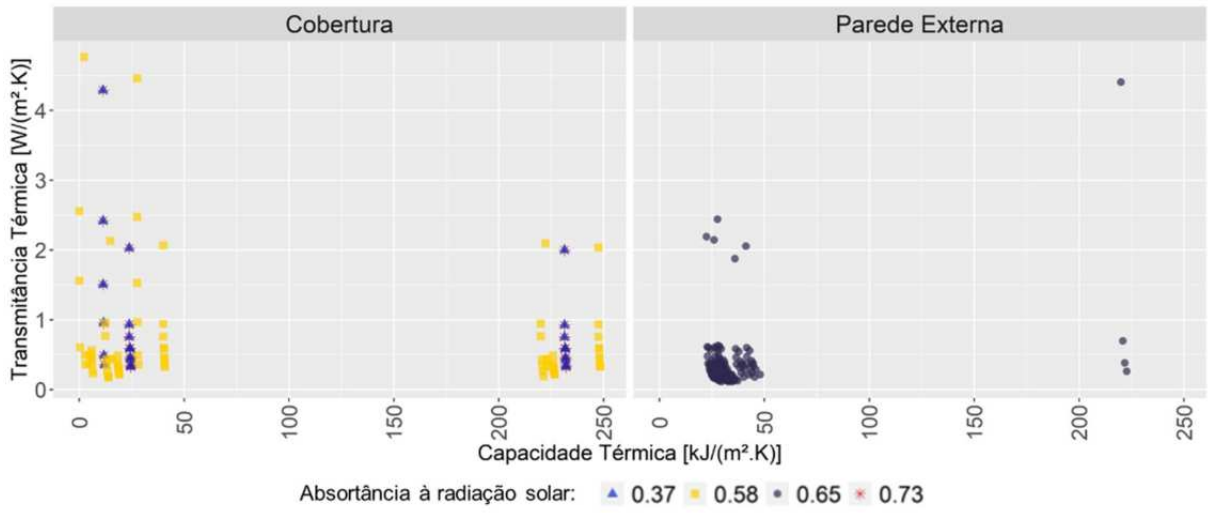
Com a obtenção dos indicadores de desempenho térmico dos 313 casos, na segunda etapa foi definido o valor de "k", que representa a quantidade de *clusters* que existem entre 126 casos simulados para as diferentes coberturas e entre os 187 casos simulados com as variações na parede externa. Definido o valor de k, o algoritmo entra na etapa três, que é a determinação dos *clusters* a partir dos *medoids*. Para a verificação de similaridade dos demais casos com o seu *cluster*, foi utilizada a distância euclidiana, que representa uma medida amplamente difundida em análises de *cluster* [21].

Os *medoids* são as coberturas e as paredes externas representativas. De maneira simplificada, para os 126 casos simulados variando a cobertura, os *medoids* dessas simulações serão os "k" casos em que os indicadores de desempenho térmico foram mais distintos entre os 126 casos. A partir da definição dos *medoids* os demais casos (126-k) variando a cobertura serão agrupados naqueles *clusters* com resultado mais próximo. Assim é possível definir as coberturas representativas, ou seja, a cobertura que terá um resultado de desempenho térmico que represente as demais coberturas do *cluster*. Para os 187 casos simulados variando as paredes externas foi executada a mesma análise.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 3 é possível visualizar a variação nos valores de transmitância térmica, capacidade térmica e absortância à radiação solar para cada sistema construtivo adotado na base de dados. A partir desses sistemas construtivos, foram simulados os casos a serem utilizados para a *clusterização*.

Figura 3 - Variação da transmitância e capacidade térmica dos elementos construtivos



Fonte: Os autores.

Após a simulação desses casos, conforme a etapa 1 descrita no método, na etapa 2 foi definido o valor de k=10, ou seja, os resultados para as paredes externas foi divido em 10 *clusters* e os resultados para as coberturas também foi dividido em 10 *clusters* na terceira etapa. Com esse número de coberturas e paredes externas representativas é possível reduzir as combinações a serem analisadas de 23.562 casos (126 coberturas x 187 paredes externas) para 100 casos (10 coberturas x 10 paredes externas). Nas Figura 4 e Figura 5, são apresentados os diferentes *clusters* para as paredes externas e coberturas, respectivamente, assim como o valor dos indicadores de desempenho térmico para a unidade habitacional em cada caso.

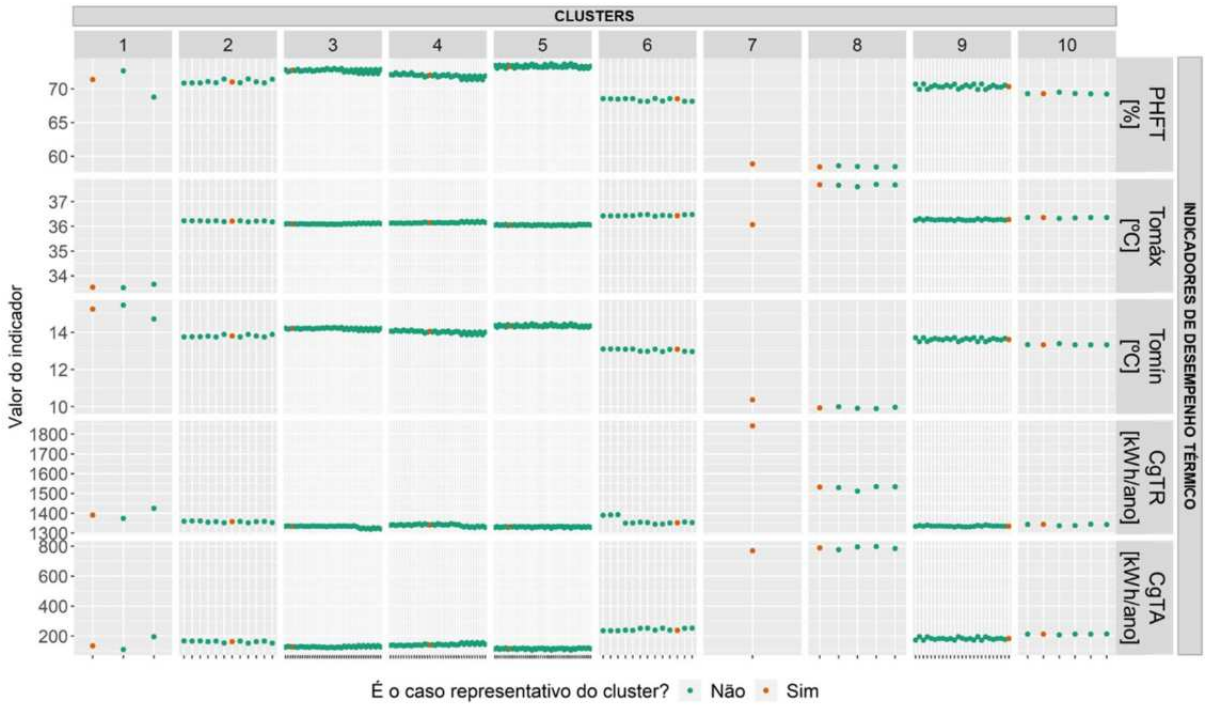
Nas Figura 4 e Figura 5 os *clusters* são divididos em dez colunas e os indicadores são divididos nas cinco linhas. Na Figura 4, os pontos alaranjados representam o valor obtido para os indicadores do caso simulado com a parede externa representativa de cada *cluster,* os pontos verdes são os casos simulados com as demais paredes externas que obtiveram o valor dos indicadores similar ao caso representativo. A Figura 5 tem a mesma configuração da Figura 4, porém para a *clusterização* das coberturas.

Entre os grupos definidos pelo algoritmo, é possível observar que há *clusters* com um número maior de casos e outros com apenas um caso, como o *cluster* 7 das paredes externas. Quando ao valor dos indicadores entre os casos de um mesmo *cluster*, é possível verificar que os resultados permaneceram próximos, principalmente para o agrupamento das paredes externas presente na Figura 4. Para as paredes externas, o *cluster* com maior variação foi o 1. Para esse grupo é possível observar que há um caso que o valor dos indicadores variou mais com relação ao representativo. Para o PHFT, o representativo obteve valor de 71,6% e o caso com a maior variação obteve 68,8%, para a CgTR a maior diferença entre o caso representativo e os demais casos foi de 34 kWh/ano e para a CgTA foi 61 kWh/ano. Para a Tomáx e Tomín a diferença encontrada foi de 0,1 ^{o}C e 0,5 ^{o}C, respectivamente.

Para o agrupamento das coberturas, presente na Figura 5, houve maior variação entre o valor dos indicadores de desempenho térmico. Esse comportamento indica que o desempenho térmico da residência é mais sensível à mudança do sistema construtivo da cobertura do que da parede externa. As maiores variações entre os casos de um mesmo *cluster* ocorreram no agrupamento 4. No *cluster* 4, para o PHFT, o caso representativo obteve valor de 59,5% enquanto o caso com o valor mais distante obteve 52,6%. Para a CgTR e CgTA, a maior diferença entre o caso representativo e os demais casos foi de 143,2 kWh/ano e 776,7 kWh/ano, respectivamente. Para a Tomáx e Tomín as diferenças foram de 2,9 ^{o}C e 2,5 ^{o}C, respectivamente. Nesse caso, com diferenças significativas entre os valores, seria recomendado retirar os elementos que tiveram resultados mais discrepantes e admiti-los como casos representativos.

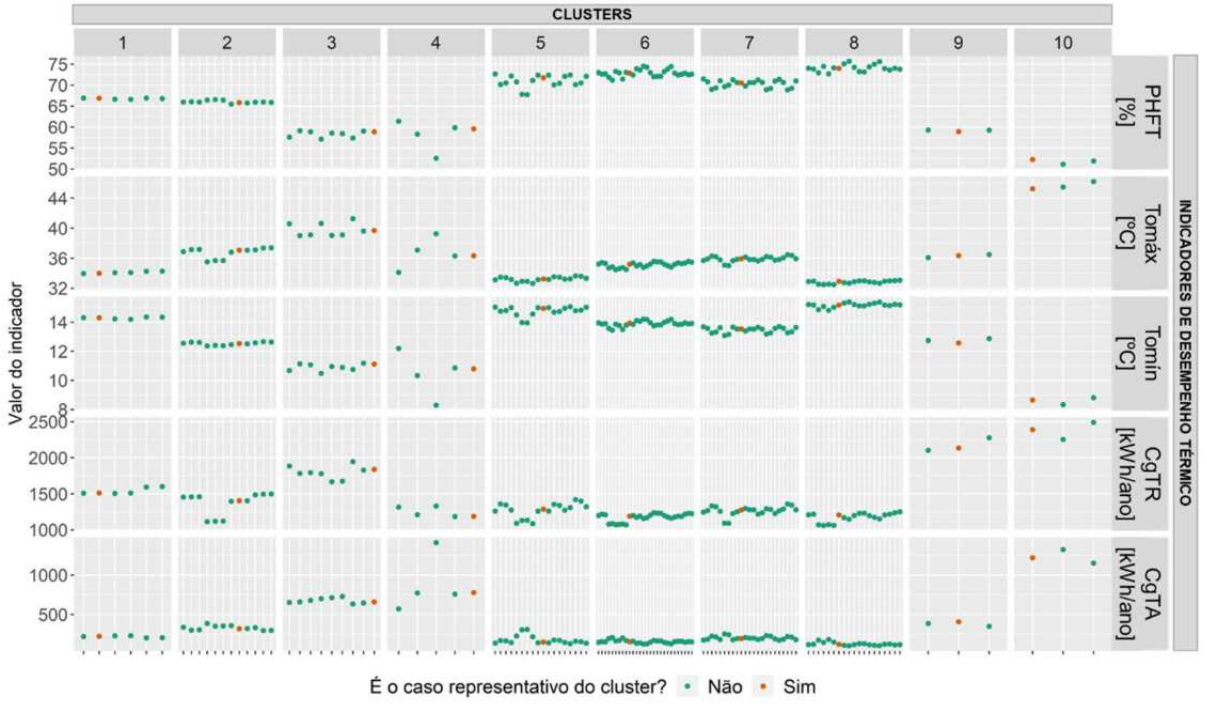
Por mais que alguns *clusters* tenham apresentado casos com variações significativas nos indicadores de desempenho térmico, é possível verificar que a divisão foi satisfatória, pois, na maioria dos *clusters* a variação encontrada entre o valor dos indicadores de desempenho do *medoid* e dos demais casos foi menor do que 5%.

Figura 4: Agrupamento para as paredes externas.



Fonte: Os autores.

Figura 5 - Agrupamento para as coberturas.

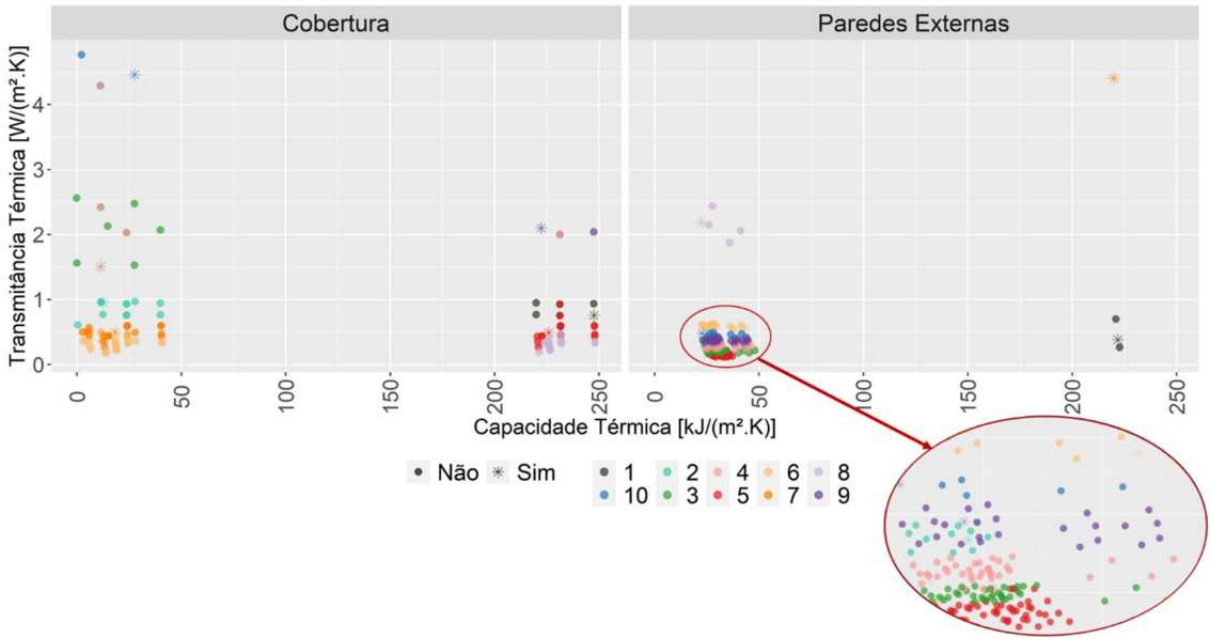


Fonte: Os autores.

Na Figura 6, onde são apresentados os agrupamentos e a transmitância térmica e a capacidade térmica de cada elemento, é possível verificar a necessidade de aplicar a *clusterização* no resultado de desempenho térmico ao invés da propriedade térmica do sistema construtivo.

Alguns sistemas construtivos, por mais que possuam propriedades térmicas similares, foram divididos em diferentes clusters, como por exemplo os clusters 6 e 7 para as coberturas. A cobertura representativa do cluster 6 tem transmitância térmica igual a 0,18 W/(m².K) e capacidade térmica de 13,9 kJ/(m².K), e a cobertura representativa do cluster 7 tem transmitância térmica de 0,49 W/(m².K) e capacidade térmica igual a 18,4 kJ/(m².K). Ambas as coberturas possuem a mesma absortância térmica. Ambas são coberturas com telha metálica sanduíche e forro de gesso, mas a principal diferença é que a cobertura 6 possui isolamento térmico acima do forro. Para as paredes externas, por existirem um grande número de sistemas com características similares, foi necessário expandir a visualização para os casos com transmitância térmica menor que 1 W/(m².K) e capacidade térmica menor que 50 kJ/(m².K), como é possível visualizar no lado direito da Figura 6. Na imagem é possível visualizar que as propriedades térmicas tiveram maior influência na divisão dos elementos construtivos, mas da mesma forma que para as coberturas, há elementos com propriedades térmicas similares que estão em *clusters* diferentes.

Figura 6 - Coberturas e paredes externas representativas e propriedades térmicas.



Fonte: Os autores.

CONCLUSÕES

Este estudo aplicou a técnica de *clusterização* por *k-medoids* para a definição de paredes externas e coberturas representativas para a análise de desempenho térmico de uma residência. A partir de um banco de dados de sistemas construtivos, definido preliminarmente, foram simulados 126 casos variando a cobertura e 187 casos variando as paredes externas. Com os resultados de desempenho térmico dos 313 casos, foram determinadas, através da técnica de *clusterização* por *k-medoids*, as dez coberturas e as dez paredes externas que representam termicamente os demais sistemas construtivos.

Pelos resultados, foi possível verificar que o agrupamento foi satisfatório tanto para as paredes externas quanto para as coberturas. Para a maioria dos *clusters*, os seus casos apresentaram variações menores de 5% entre os indicadores de desempenho térmico do caso representativo e os demais casos pertencentes ao *cluster*. Dessa forma foi possível reduzir significativamente o número de casos que seriam combinados parametricamente para a análise de desempenho térmico, passando de 23.562 casos (126 coberturas x 187 paredes externas) para 100 casos (10 coberturas x 10 paredes externas). Dessa maneira, o estudo preliminar dos casos representativos auxiliou na redução do custo computacional.

A análise de *cluster* aplicada diretamente nos indicadores de desempenho térmico permitiu que os sistemas construtivos fossem agrupados de maneira a priorizar o seu impacto no desempenho térmico da residência. Pela análise executada ao final da *clusterização*, foi possível verificar que casos com propriedades térmicas similares foram agrupados em *clusters* distintos devido ao resultado de desempenho térmico obtido pela residência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Saint-Gobain Research Brasil pelos recursos financeiros aplicados no desenvolvimento desta pesquisa. Como também agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

[1] TRIANA, M. A.; LAMBERTS; R., SASSI, P. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures. **Energy and Buildings**. v. 158, p. 1379-1392, nov. 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.003

[2] MARSHALL, E.; STEINBERGER, J. K.; DUPONT, V.; FOXON, T. J. Combining energy efficiency measure approaches and occupancy patterns in building modelling in the UK residential context. **Energy and Buildings**. v. 111, p. 98-108, nov. 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.039

[3] ELI, L. G.; KRELLING, A. F.; OLINGER, M. S.; MELO, A. P; LAMBERTS, R. Thermal performance of residential building with mixed-mode and passive cooling strategies: The Brazilian context. **Energy and Buildings**. v. 244, Special Issue 111047, abr. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111047

[4] SORGATO, M. J.; MELO, A. P; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**. v. 133, p. 1-13, set. 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.059

[5] HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. **Multivariate Data Analysis**. 7. ed. London: Prentice Hall, 2010.

[6] BORGER, P.; TRAVESSET-BARO, O.; PAGES-RAMON, A. Hybrid approach to representative building archetypes development for urban models – A case study in Andorra. **Building**

and Environment. v. 215, 108958, mar. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.108958

[7] MAZZAFERRO, L.; MACHADO, R. M. S.; MELO, A. P; LAMBERTS, R. Do we need building performance data to propose a climatic zoning for building energy efficiency regulations? **Energy and Buildings**. v. 225, 110303, jul. 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.110303

[8] WALSH, A.; CÓSTOLA, D.; LABAKI, L. C. Review of methods for climatic zoning for building energy efficiency programs. **Building and Environment**. v. 112, 337-350, nov. 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2016.11.046

[9] JOTA, P. R. S.; SILVA, V. R. B.; JOTA, F. G. Building load management using cluster and statistical analyses. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**. v. 33, 1498-1505, jul. 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2011.06.034

[10] BIENVENIDO-HUERTAS, D.; SÁNCHEZ-GARCIA, D.; RUBIO-BELLIDO, C.; PULIDO-ARCAS, J. A. Analysing the inequitable energy framework for the implementation of nearly zero energy buildings (nZEB) in Spain. **Journal of Building Engineering**. v. 35, 102011, nov. 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.102011

[11] SAXENA, A.; PRASAD, M.; GUPTA, A.; BHARILL, N.; PATEL, O. P.; TIWARI, A.; ER, M. J.; DING, W.; LIN, C. A review of clustering techniques and developments. **Neurocomputing**. v. 267, 664-681, jul. 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2017.06.053

[12] MIRKES, E. M. **K-means and K-medoids applet**. University of Leicester. Disponível em: http://www.math.le.ac.uk/people/ag153/homepage/KmeansKmedoids/Kmeans_Kmedoids.html. Acesso em: 27 maio 2022.

[13] DOE, United States Department of Energy. **EnergyPlus 9.0**. Disponível em: https://github.com/NREL/EnergyPlus/releases/tag/v9.0.1. Acesso em: 27 maio 2022.

[14] TRIANA, M. A.; LAMBERTS; R., SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**. v. 87, p. 524-541, aug. 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.041

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Emenda de Desempenho Térmico da norma de Edificações Habitacionais – Desempenho (ABNT NBR 15575- Parte 1). Rio de Janeiro, 2020.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

[17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1-1:2021 Errata 1:2021**: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1-1: Base-padrão de arquivos climáticos para a avaliação do desempenho térmico por meio do procedimento de simulação computacional. Rio de Janeiro, 2021.

[18] CRAN – R. **The R Project for Statistical Computing** (2021). Disponível em: https://www.r-project.org/. Acesso em: 27 maio 2022.

[19] MAECHLER, M.; ROUSSEEUW, P.; STRUYF, A.; HUBERT, M.; HORNIK, K.; STUDER, M.; ROUDIER, P.; GONZALEZ, J.; KOZLOWSKI, K.; SCHUBERT, E. **Package Cluster.** CRAN. Disponível em: https://cran.r-project.org/web/packages/cluster/cluster.pdf. Acesso em: 27 maio 2022.

[20] JAIN, A. K.; MURTY, M. N.; FLYNN, P. J. Data clustering: a review. **ACM Computing Surveys**. v. 31, n 3, p. 264-323, set. 1999. DOI: https://doi.org/ 10.1145/331499.331504