

# ANÁLISE DO CONFORTO TÉRMICO DO ENVOLTÓRIO DA EDIFICAÇÃO COM O USO DE TROCADORES DE CALOR SOLO-AR

Michele Soares Netto<sup>1</sup>, Cesar Antonio Oropesa Avellaneda<sup>2</sup>, Ruth da Silva Brum<sup>3</sup>,  
Joseane da Silva Porto<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, [michelenetto@live.com](mailto:michelenetto@live.com);

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, [cesaravellaneda@gmail.com](mailto:cesaravellaneda@gmail.com);

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, [ruthdasilvabrum@gmail.com](mailto:ruthdasilvabrum@gmail.com);

<sup>4</sup>Universidade Federal de Pelotas, Instituto de Física e Matemática, [joseaneclmd@gmail.com](mailto:joseaneclmd@gmail.com).

**RESUMO:** Os elementos construtivos de uma edificação influenciam na demanda de energia elétrica, as decisões ideais podem ser avaliadas com o apoio de softwares que medem esta demanda de um edifício com maior precisão. O objetivo desta pesquisa é avaliar o comportamento térmico de uma habitação residencial pertencente à zona bioclimática 3 na região sul do Brasil, buscando fontes de energia que auxiliem no melhoramento do conforto térmico, utilizando os parâmetros que diminuam a demanda térmica de resfriamento e aquecimento, com a instalação do trocador de calor solo-ar (TCSA) em dois ambientes da edificação (sala e dormitório). Os resultados, obtidos no software *Energy-Plus*, mostram que o conforto adaptativo do modelo com o TCSA comparado ao sem, reduz 27% do desconforto por frio e aumenta 21% no conforto térmico na edificação. Analisando as temperaturas anuais dos ambientes com o TCSA, observa-se que a temperatura da saída do duto do TCSA se mantém na média de 23,6°C e 23,8°C, para a sala e o dormitório, respectivamente. Do ponto de vista energético, o consumo de energia elétrica da edificação teve uma redução de 84,5% na edificação sem o TCSA. Este estudo possibilita realizar trabalhos que melhorem o padrão construtivo utilizado em todo o país..

**Palavras-chave:** EnergyPlus; Parâmetros; Simulação numérica; Trocador de calor solo-ar.

## 1. INTRODUÇÃO

Os principais motivos para o aumento da pobreza de energia elétrica em todo o mundo são o aumento dos preços da energia elétrica e os efeitos das mudanças climáticas. Recentemente, de acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2022), 75 milhões de pessoas que ganharam acesso à energia não conseguem arcar com o custo dela. Isso indica que os serviços essenciais estão se tornando privativos, como aquecer e resfriar alimentos, estão se tornando privilégios para uso individual e coletivo, evidenciando a pobreza energética (GONZÁLEZ *et al.*, 2015).

As principais causas do alto consumo de energia elétrica em residências vêm dos equipamentos de ar condicionado; ineficiência de aparelhos domésticos e de iluminação; falta de isolamento térmico; o alto nível de infiltração por aberturas, mas parte dessas causas também é devido a cultura da sociedade (SIMÕES *et al.*, 2022).

Para melhorar esse cenário, medidas de eficiência energética são necessárias em todo o mundo, a fim de reduzir os impactos da pobreza energética. Em 2021, os edifícios foram responsáveis por 30% do consumo da energia total e 15% das emissões de gases de efeito estufa. No setor da construção civil, as emissões têm aumentado devido ao crescimento da demanda por energia elétrica. De acordo com o *World Energy Outlook 2022*, espera-se que o setor apresente um aumento de 20% na área construída até 2030 (IEA, 2022).

Considerando a composição do consumo final de eletricidade no Brasil, o setor industrial consome 37,4%, 26,4% nos edifícios residenciais, e 15,7% nos prédios comerciais. Ou seja, as edificações consomem 42,1% da energia gerada no país. Para o setor residencial, o consumo de eletricidade deverá aumentar 3,9% entre 2018 e 2029 devido as demandas de energia e conforto térmico (IEA, 2022). Somado esses setores, nos últimos cinco anos, o custo da eletricidade aumentou 47%.

A realidade da habitação social no Brasil precisa ser melhorada, a maioria das unidades habitacionais utilizam sistemas de ventilação natural, onde o usuário abre as janelas sem considerar a temperatura externa. Em grande parte são construídos em alvenaria ou concreto, utilizando materiais de baixa qualidade, e sem isolamento térmico, com alta capacidade térmica ou transmitância alta, janelas de baixa qualidade, problemas consideráveis de infiltração, e vidros simples, dificilmente são considerados o contexto climático quando se baseia em modelos arquitetônicos replicados, e normalmente são construídos por mão de obra não qualificada (MORAIS *et al.*, 2017).

Nesse cenário, é preciso melhorar a qualidade da habitação social, em termos de conforto e desempenho térmico, para reduzir o consumo energético, diminuindo os impactos das mudanças climáticas (SIMÕES *et al.*, 2022). Buscar estratégias de otimização da demanda de energia de baixo custo de acordo com o clima, considerando a construção de habitações adaptadas à realidade do país, é uma forma de incentivar a replicação dessas técnicas adotadas.

A estratégia utilizada aqui é baseada em condicionamento térmico, que é o trocador de calor solo-ar (TCSA), no qual o ar circula por dutos enterrados, capaz de resfriar ou aquecer, trocando de calor com o solo. A habilidade de resfriar ou aquecer deste dispositivo se relaciona com a versatilidade térmica da localização da edificação, portanto o clima é de suma importância para o bom funcionamento do TCSA (LUND *et al.*, 2004). Outros parâmetros também são relevantes na eficiência do TCSA, como a profundidade, comprimento dos dutos, tipo de solo e a velocidade do ar. Em Rodrigues *et al.* (2017), observaram que, o TCSA apresenta melhor desempenho térmico comparando uma instalação em solo arenoso com o solo argi-

loso. Em Pakari *et al.* (2021) notaram que o comprimento do TCSA teve um efeito considerável na sua temperatura de saída.

O objetivo deste artigo é analisar o conforto térmico de um TCSA, para resfriamento e aquecimento, utilizando parâmetros de otimização da envoltória da edificação, afim de buscar estratégias que fomentem a eficiência energética em edificações.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este artigo utiliza o simulador computacional *EnergyPlus* (versão 9.6), validado pelo padrão ASHRAE, atende aos critérios estabelecidos pela NBR 15575 e Normativa do Inmetro Instrução para Classificação de Eficiência Energética de Edificação Residencial RTQ-R. A modelagem foi realizada no *SketchUp* utilizando o *plugin Euclid* (Versão 0.9.4.4) que transfere todos os dados de construção do modelo para o *EnergyPlus*.

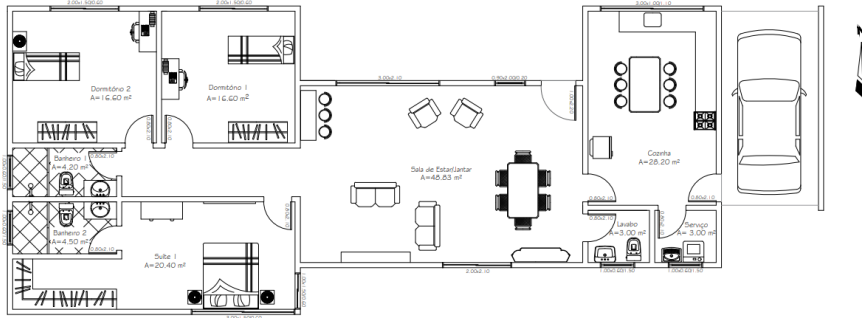
Esta pesquisa simula o comportamento térmico de uma habitação residencial unifamiliar no contexto climático da cidade de Pelotas/RS, zona bioclimática 3 (ZB3). Buscaram-se os parâmetros ideais que diminua a demanda térmica de resfriamento e aquecimento.

### 2.1. Objeto de estudo

No estudo de Pouey (2011) foi desenvolvido um projeto arquitetônico de edificação residencial, estabelecido através das estratégias bioclimáticas de condicionamento passivo recomendadas para Pelotas-RS, de modo a otimizar o desempenho térmico e energético, obtendo resultados significativos. Em Dalbem *et al.* (2015) este projeto foi aperfeiçoado atendendo a padrões da Passivhaus, onde o desempenho térmico foi avaliado utilizando um software PHPP e verificaram que a edificação atendeu aos requisitos da certificação.

Baseado nestes estudos, foi desenvolvido como objeto de estudo um projeto arquitetônico de uma edificação residencial para a cidade de Pelotas/RS, apresentada na Figura 1. A edificação térrea possui  $126,45m^2$ , disposta de sala de estar, cozinha, dois dormitórios, uma suíte, dois banheiro, um lavabo e uma lavanderia.

A orientação do projeto é o eixo leste-oeste, com a fachada norte que aumenta os ganhos de radiação solar no inverno. As paredes são compostas por alvenaria cerâmica de 6 furos, nas quais as faces externas e internas são rebocadas e chapiscadas, contendo o isolamento térmico EPS. A cobertura é de telha de fibrocimento, laje de concreto, envoltos pela platibanda, os forros são de gesso acartonados. O



**Figura 1.** Modelagem computacional da edificação.  
Fonte: autor.

piso é de revestimento cerâmico e laje de concreto, e as esquadrias de vidro duplo de 6mm com uma camada de ar de 14mm. A porta externa é de madeira MDF composta de isolamento térmico, e as internas de compensado de madeira.

Adotando os parâmetros da NBR 15575, afim de atender o nível mínimo de desempenho, simulou-se um modelo real e um de referência, onde os parâmetros construtivos são mostrados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Materiais configurados no modelo referência e no modelo real.

Superfície	Constituição	Espessura (m)	Condutividade (W/m°C)
Paredes externas e internas	Argamassa de reboco externo	0,02	1,15
	Tijolo de 6 furos	0,10	1,75
	Isolamento térmico EPS	0,08	0,04
	Argamassa de reboco interno	0,02	1,15
Piso	Revestimento cerâmico	0,10	1,75
	Laje de concreto	0,02	1,75
Cobertura	Telha de fibrocimento	0,06	0,65
	Argamassa de reboco interno	0,02	1,15
	Isolamento térmico EPS	0,08	0,04
	Laje de concreto	0,02	1,75

Fonte: autor.

## 2.2. Modelagem computacional

Através do objeto de estudo de referência é realizado o modelo real, onde foram realizadas as seguintes simulações: do modelo real, com arquivo climático de cidade de Pelotas/RS (ZB3), sem o TCSA e com o TCSA em diferentes ambientes da edificação.

## 2.3. Trocador de calor solo-ar (TCSA)

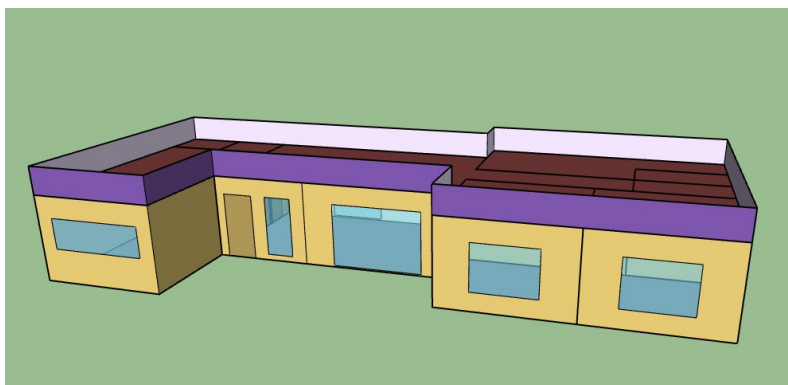
As propriedades termofísicas do solo foram obtidas por relatórios de ensaios de SPT, conforme Oke (2002) e Hermes *et al.* (2020). As características do TCSA

foram adotadas de acordo com Vaz (2011), o duto tem 110 mm de diâmetro, 34m de comprimento, e a velocidade de escoamento de 3,3m/s. A profundidade do duto foi obtida através dos resultados obtidos em Brum (2013) e Nóbrega (2021), com 3m enterrados.

## 2.4. Conforto térmico

O modelo real da edificação foi realizado adotando as exigências da NBR 15575/2021 para o desempenho térmico, já o modelo de referência foi adotado conforme as propriedades da NBR 15220, onde as características foram baseadas conforme em Dalbem et al. (2015).

O domínio computacional (Figura 2) foi realizada com o auxílio do software SketchUp, utilizando o plugin Euclid para desenvolver as zonas térmicas, inserindo os dados de entrada no software *EnergyPlus 9.6*.



**Figura 2.** Modelagem computacional da edificação.  
Fonte: autor.

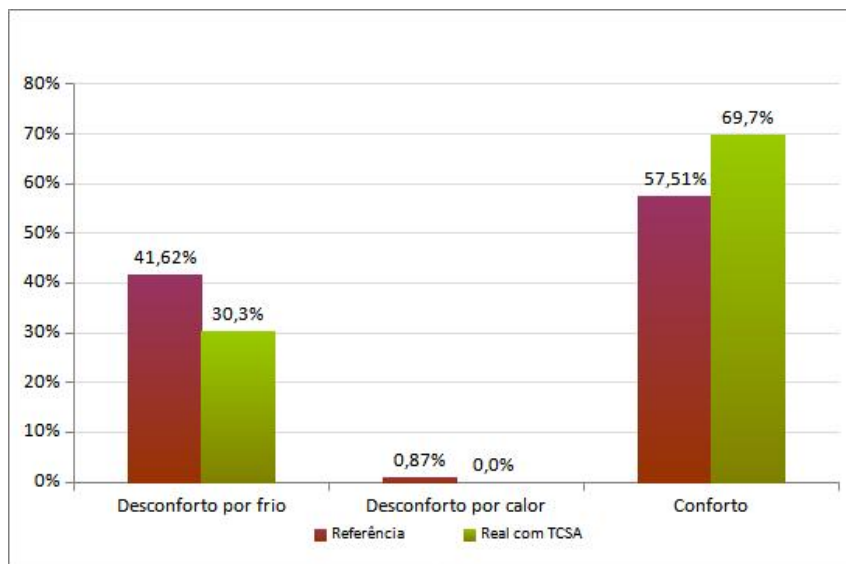
Para realizar as simulações, as características da edificação e o arquivo climático são utilizados como condições de contorno e configurados nos dados de entrada. O *EnergyPlus* calcula a energia necessária para manter cada zona a uma temperatura especificada para cada hora do dia. Cada ambiente da edificação é considerado uma zona térmica (ZT) e deve ser analisado separadamente. O programa calcula o balanço de energia de cada zona térmica, onde as equações são mostradas no manual Engineering Reference do software (EnergyPlus, 2022).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Análise térmica da edificação com o TCSA

Conforme a NBR 15575, o conforto adaptativo é considerado aceitável, pois a temperatura operativa está entre 18°C a 26°C para a ZB3, para que o ambiente esteja dentro dos limites de conforto térmico.

A análise dos resultados será da edificação, sendo que o TCSA será instalado somente na sala e em um dos dormitórios, na suíte. O conforto adaptativo (Figura 3) ao utilizar o TCSA teve uma redução de 11,32% no desconforto por frio, e 12,19% a mais de conforto térmico na edificação.

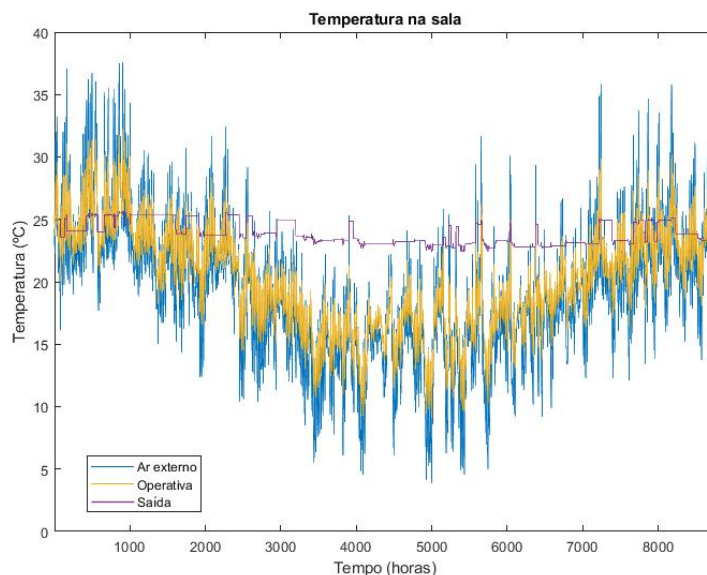


**Figura 3.** Conforto adaptativo da edificação.

Fonte: autor.

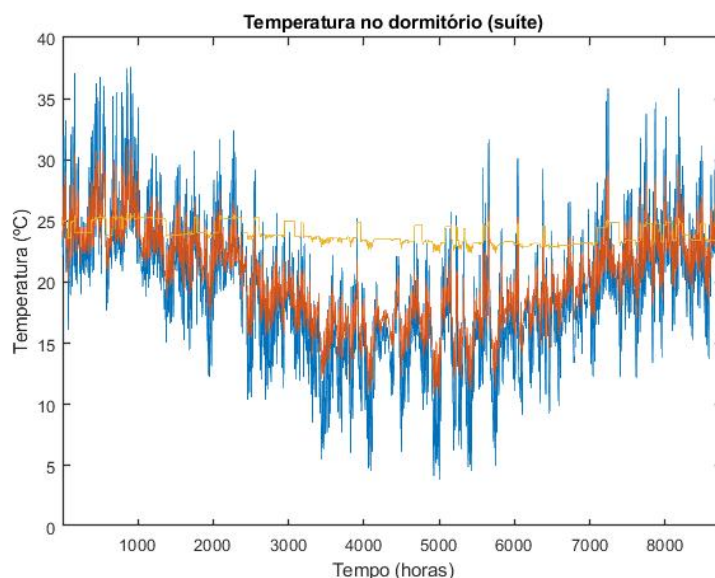
Comparando-se então os resultados da simulação do modelo real (com o TCSA) com o de referência (sem o TCSA) na ZB3 nota-se que o modelo real apresenta melhor conforto térmico do que o modelo de referência, também é possível observar, que o desconforto por frio reduz 27% na edificação com o TCSA, mostrando que os materiais que compõem o modelo referência impedem que o calor penetre nos ambientes, eles não absorvem tanto o calor, devido a isso buscou-se, no modelo real, além de utilizar o TCSA, buscar materiais que tenham maiores transmitâncias, ou seja, materiais com menores o valores de transmitância permitem um melhor desempenho térmico, com isso os ambientes se tornam com melhor conforto térmico ideal.

Analisando separadamente as temperaturas anuais dos ambientes contendo o TCSA instalado, observa-se na Figura 4, que na sala a temperatura externa é maior que a temperatura operativa do ambiente, ao analisar a temperatura da saída do duto do TCSA, ao longo do ano, se mantém constante, na média de 23,6°C.



**Figura 4.** Temperatura anual na sala.  
Fonte: autor.

Na temperatura anual do dormitório (suíte) o gráfico (Figura 5) mantém o mesmo comportamento, com a temperatura na saída do duto entre 23,0°C e 25,0°C, na média de 23,8°C, mostrando a eficiência deste dispositivo em manter uma temperatura confortável no ambiente, utilizando esta troca de calor com o solo.



**Figura 5.** Temperatura anual no dormitório (suíte).  
Fonte: autor.

De uma forma geral o modelo real apresentou um melhor desempenho térmico, comparado ao modelo de referência, atingindo limites aceitáveis de conforto térmico maior, visto que os materiais utilizados, com absorvância e transmitância menores obtiveram melhor desempenho neste modelo de edificação na ZB3.

### 3.2. Análise da eficiência energética da edificação

Do ponto de vista energético, analisando o consumo total da edificação mostrado na Tabela 2:

**Tabela 2.** Consumo de energia da edificação.

Simulação	Energia total ( <i>kWh</i> )
Sem o TCSA	3186
Com o TCSA	20559

Fonte: autor.

Podemos observar que consumo de energia elétrica da edificação teve um aumento de aproximadamente 6,5 vezes mais consumo com o TCSA, representando uma redução de 84,5% na edificação sem o TCSA.

## 4. CONCLUSÕES

Através dos resultados apresentados conclui-se que o modelo computacional desenvolvido com o acoplamento do TCSA à edificação intensificou o desempenho térmico dos ambientes, melhorando consideravelmente o conforto térmico, tanto dos ambientes analisados individualmente, como da edificação como um todo.

Assim sendo, contata-se que esse estudo exerceu o objetivo de analisar o desempenho térmico do TCSA em uma edificação na ZB3, onde as estratégias utilizadas, otimizando os parâmetros da envoltória da edificação, trouxeram um aumento de 21% no conforto térmico da edificação, já na análise do consumo energético observa-se que esse sistema traz um alto consumo.

## AGRADECIMENTOS

Michele Soares Netto agradece aos revisores, colaboradores e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado.

## REFERÊNCIAS

- Brum, R. “Modelagem Computacional de Trocadores de Calor Solo-Ar”. Dissertação de Mestrado. Instituto de Matemática, Estatística e Física, Universidade Federal do Rio Grande, Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional, 2013.
- Dalbem, R., Freitas, J. M. R., Cunha, E. G., “Conceito Passivhaus Aplicado ao Clima Brasileiro”. Em: **Revista de Arquitetura IMED** 4 (2015), pp. 26–36. DOI: 10.18256/2318-1109/arqimed.v4n1p26-36.
- EnergyPlus. Site oficial da Documentação do EnergyPlus. Online. Acessado em 23/01/2023, <https://energyplus.net/documentation>. [balanco-energeticonacional-2021](#).

- González-Eguino, M., “Energy poverty: An overview”. Em: **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 47 (2015), pp. 377–385. DOI: 10.1016/j.rser.2015.03.01.
- Hermes, V. F., Ramalho, J. V. A., Rocha, L. A. O., Santos, E. D., Marques, W. C., Costi, J., Rodrigues, M. K., Isoldi, L. A., “Further realistic annual simulations of earth-air heat exchangers installations in a coastal city”. Em: **Sustainable Energy Technologies and Assessments** 37 (2020). DOI: 10.1016/j.seta.2019.100603.
- IEA. Site oficial do World Energy Outlook 2022. Online. Acessado em 14/02/2023, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.
- Lund, J., Sanner, B., Rybach, L., Curtis, R., Hellstrom, G., “Geothermal (Ground-source) heat pumps - A world overview”. Em: **Geo-Heat Center Quart Bulletin** 25 (2004).
- Morais, J. M., Labaki, L. C., “CFD como ferramenta para simular ventilação natural interna por ação dos ventos: estudos de caso em tipologias verticais do Programa Minha Casa, Minha Vida”. Em: **Ambiente Construído** 17 (2017), pp. 223–244. DOI: 10.1590/s1678-86212017000100133.
- Nóbrega, E. S. B. “Abordagem analítica para análise térmica dos trocadores de calor solo-ar na cidade de Pelotas/RS”. Dissertação de Mestrado. Instituto de física e matemática, Universidade Federal de Pelotas, Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática, 2021.
- Oke, T. R. **Boundary layer climates**, 2nd ed. Routledge, 1988. ISBN: 978-0415043199.
- Pakari, A., Ghani, S., “Numerical evaluation of the thermal performance of a near-surface earth-to-air heat exchanger with short-grass ground cover: A parametric study”. Em: **International Journal of Refrigeration** 125 (2021), pp. 25–33. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2020.12.034.
- Pouey, J. A. “Projeto de Edificação Residencial Unifamiliar Para a Zona Bioclimática 2 Com Avaliação TermoEnergética Por Simulação Computacional”. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2011.
- Rodrigues, M. K., Coswig, F. S., Camargo, K. R., Brum, R. S., Rocha, L. A. O., Vaz, J., Santos, E. D.; Isoldi, L. A., “Estudo do Potencial Térmico de Trocador de Calor Solo-Ar em dois tipos de solos no município de Rio Grande (RS)”. Em: **Revista Brasileira de Energias Renováveis** 6 (2017), pp. 489–506. DOI: 10.5380/rber.v6i3.52994.
- Simões, G. M. F., Leder, S. M., “Energy poverty: The paradox between low income and increasing household energy consumption in Brazil”. Em: **Energy and Buildings** 268 (2022). DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112234.
- Vaz, J. “Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificados”. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2011.