

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CARLOS HENRIQUE DIEDRICH

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA PASSIVO DE
CLIMATIZAÇÃO UTILIZANDO O SOLO COMO TROCADOR DE
CALOR**

PONTA GROSSA

2023

CARLOS HENRIQUE DIEDRICH

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA PASSIVO DE
CLIMATIZAÇÃO UTILIZANDO O SOLO COMO TROCADOR DE
CALOR**

**EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A PASSIVE HVAC SYSTEM USING
SOIL AS A HEAT EXCHANGER (EAHE)**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. Thiago Antonini Alves

PONTA GROSSA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade
Tecnológica Federal do
Paraná Campus Ponta
Grossa**



CARLOS HENRIQUE DIEDRICH

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA PASSIVO DE CLIMATIZAÇÃO
UTILIZANDO O SOLO COMO TROCADOR DE CALOR**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Térmica E Fluidos.

Data de aprovação: 24 de Maio de 2023

Dr. Gerson Henrique Dos Santos, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Dr. Luis Mauro Moura, Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Pucpr)

Dr. Luiz Eduardo Melo Lima, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 24/05/2023.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me proporcionado a oportunidade de estar realizando este trabalho com todo suporte ao lado de pessoas incríveis.

Aos meus pais *Bady* e *Carlos* pelo incentivo a sempre estudar. O apoio foi fundamental para a conquista e realização deste trabalho.

A minha namorada *Vitória*, pelo incentivo, companheirismo, apoio, e compreensão em todos os momentos.

Aos meus amigos, por toda ajuda durante a realização deste trabalho, em especial ao *Douglas*, companheiro de todas as tardes, em todas as atividades e pelo grande incentivo, ao *Victor* companheiro de trabalho e de laboratório, ao *Pedro*, ao *Guilherme* ao *Felipe* ao *Luis* pela grande ajuda em todos os momentos, pelas publicações, congressos, e pelas risadas juntos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. *Gerson Henrique dos Santos* e ao meu coorientador Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves*, pela sabedoria ajuda e compreensão durante a realização deste trabalho.

A todos os funcionários e terceiros da UTFPR que sempre prontamente ajudaram em todas as etapas e com todo tipo de ajuda. Em especial ao *Éder* pela ajuda, empregando seu time para realização das atividades e ao técnico de laboratório *Eriel* pela ajuda, pelas dicas e direcionamentos durante o experimento.

À todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

À Secretaria do Curso por todo apoio, UTFPR e CAPES pela bolsa do programa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

As edificações são responsáveis por uma parcela significativa do consumo de energia no Brasil, correspondendo a 52% do total. Grande parte desse consumo está relacionada aos sistemas de climatização, utilizados tanto para aquecimento quanto para resfriamento do ar. Uma abordagem promissora para mitigar essa demanda energética é a adoção da climatização passiva, e os trocadores de calor solo-ar se destacam nesse contexto. Devido à alta inércia térmica do solo, ele pode ser utilizado como um reservatório capaz de aquecer ou resfriar o ar, dependendo das condições climáticas. Esses trocadores apresentam uma construção simples e econômica, consistindo principalmente em tubos de policloreto de vinila e um ventilador. O ar que circula pelos tubos do trocador é direcionado para o ambiente, impactando sua temperatura e o conforto térmico dos usuários. Este estudo experimental tem como objetivo principal a construção e a análise térmica de um trocador de calor solo-ar. O sistema foi implementado para climatizar o ar de um ambiente localizado no Bloco J1, no campus Ponta Grossa da UTFPR. Diversos termopares tipo K foram instalados ao longo da tubulação e no solo para possibilitar a análise das trocas térmicas ocorridas. Além disso, foram realizadas comparações com um ambiente não climatizado, localizado no mesmo bloco e com dimensões semelhantes. Os resultados obtidos demonstraram um bom desempenho do trocador de calor, que permitiu reduzir a temperatura do ar até a temperatura do solo a 1,5 m de profundidade ao longo de aproximadamente 45 metros de tubulação. Comparando as temperaturas dos dois ambientes, observou-se que o trocador de calor solo-ar proporcionou temperaturas mais amenas e com menor variação térmica no ambiente climatizado. No entanto, em relação ao coeficiente de desempenho (COP), verificou-se que o trocador de calor solo-ar não alcançou valores elevados em comparação com outros estudos da literatura. Isso se deve, principalmente, ao alto consumo de energia decorrente da potência do ventilador utilizado no experimento (ventilador radial de 2 cv). Desta forma, conclui-se que o trocador de calor solo-ar pode ser uma alternativa viável para melhorar o conforto térmico, especialmente em temperaturas externas mais altas.

Palavras-chave: trocador de calor solo-ar; sistema passivo; análise experimental; eficiência energética.

ABSTRACT

Buildings account for a significant portion of energy consumption in Brazil, representing 52% of the total. A large portion of this consumption is attributed to HVAC systems used for both heating and cooling purposes. A promising approach to mitigate this energy demand is the adoption of passive cooling, with earth air heat exchangers standing out in this context. Due to the high thermal inertia of the ground, it can be utilized as a reservoir capable of heating or cooling the air, depending on the climatic conditions. These heat exchangers feature a simple and cost-effective design, primarily consisting of polyvinyl chloride pipes and a fan. The air circulating through the pipes of the heat exchanger is directed into the environment, thereby impacting its temperature and the thermal comfort of the occupants. The main objective of this experimental study is to construct and thermally analyze an earth air heat exchanger. The system was implemented to condition the air in a specific environment located in Block J1, at the Ponta Grossa campus of UTFPR. Multiple type K thermocouples were installed along the piping and in the ground to enable analysis of the thermal exchanges taking place. Additionally, comparisons were made with a non-conditioned environment located in the same block with similar dimensions. The obtained results demonstrated a good performance of the heat exchanger, as it enabled the reduction of the air temperature down to the ground temperature at a depth of 1.5 meters along approximately 45 meters of piping. When comparing the temperatures of the two environments, it was observed that the earth air heat exchanger provided milder temperatures and reduced thermal variation in the conditioned environment. However, in terms of the coefficient of performance (COP), it was found that the earth air heat exchanger did not reach high values compared to other studies in the literature. This can be primarily attributed to the high energy consumption resulting from the power of the fan used in the experiment (a 2 hp radial fan). Therefore, it is concluded that the heat exchanger can be a viable alternative for improving thermal comfort, especially in higher external temperatures.

Keywords: heat exchanger soil-air; passive system; experimental analysis; energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema com circuito aberto (a) e Sistema com circuito fechado (b)	16
Figura 2 - Distribuições da tubulação.	17
Figura 3 - Regime térmico do solo.....	23
Figura 4 - Projeto trocador de calor solo ar	26
Figura 5 - Indicação localização trocador de calor Fonte: Autoria própria (2023)	27
Figura 6 - Captação de ar.....	28
Figura 7 - Tubulação isolada em aço galvanizado	29
Figura 8 - Tubulação em aço galvanizado ligada ao ventilador	30
Figura 9 - Componentes do sistema de ventilação	31
Figura 10 - Inversor de frequência e painel elétrico.....	32
Figura 11 - Área para instalação do trocar de calor	32
Figura 12 - Montagem da tubulação do trocador de calor.....	33
Figura 13 - Montagem tubulação trocador de calor	34
Figura 14 - Tubos de acesso para os sensores	35
Figura 15 - Aparato experimental.....	36
Figura 16 - Distribuição aparato experimental externo.....	36
Figura 17 - Estação meteorológica	37
Figura 18 - Sensor para captação do regime térmico do solo	37
Figura 19 - Local de instalação dos sensores do solo	38
Figura 20 - Temperaturas e radiação total para os dias 23, 24, 25 e 26 de janeiro de 2022.	40
Figura 21 - Distribuição de temperatura ao longo do dia 25.	41
Figura 22 - Distribuição de temperatura ao longo dos dias 23, 24 e 25 de janeiro, às 18h	42
Figura 23 - Projeto da placa de orifício.....	54
Figura 24 - Soldagem de termopares	56
Figura 25 - Calibração de termopares	57
Figura 26 - Exemplo de resultado de calibração	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores das propriedades para diferentes tipos de solo.....	22
Tabela 2 - Resultado otimizados obtidos por Vasconcellos (2019).....	25
Tabela 3 - Parâmetros geométricos do projeto	26
Tabela 4 - Dimensões da escavação	33
Tabela 5 - Dimensões das tubulações do trocador de calor	34
Tabela 6 - Dimensões entre tubos presentes no primeiro passo	35
Tabela 7 - Temperaturas dos ambientes internos.....	43
Tabela 8 - Valores obtidos para os 3 dias do mês de janeiro de 2022.....	46
Tabela 9 - Valores obtidos para os 2 dias do mês de outubro de 2022	46

LISTA DE SIGLAS

COP	Coeficiente de Desempenho
EDP	Equação Diferencial Parcial
DAMEC	Departamento Acadêmico de Mecânica
LabCT	Laboratório de Controle térmico
MME	Ministério de Minas e Energia
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PIB	Produto Interno Bruto
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia
PVC	Policloreto de Vinila
TCSA	Trocador de Calor Solo-AR

LISTA DE SÍMBOLOS

C_p	Calor específico	J/(kg.K)
d	Diâmetro	m
ρ	Massa específica do ar	kg/m ³
V	Velocidade do ar	m/s
\dot{m}	Vazão mássica do ar	kg/s
T	Temperatura	°C
Q	Taxa de transferência de calor	W
W	Potência	W

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa.....	14
1.2 Objetivo geral	14
1.2.1 Objetivos específicos.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Resfriamento passivo e trocadores de calor	15
2.2 Comportamento térmico do solo	22
2.3 Equações para cálculo de desempenho	23
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	25
3.1 Projeto	25
3.1.1 Localização	26
3.2 Montagem	27
3.2.1 Montagem da tubulação de aço galvanizado	27
3.2.2 Montagem do sistema de ventilação	30
3.2.3 Montagem da tubulação em PVC.....	32
3.2.4 Montagem da tubulação para aquisição de dados	34
3.3 Aquisição de dados	35
3.4 Incertezas de medição	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1 Comportamento climático	40
4.2 Comportamento térmico diário do TCSA	41
4.3 Ambientes internos	43
4.4 Coeficiente de desempenho	46
5 CONCLUSÃO.....	48
5.1 Sugestão para trabalhos futuros	49
REFERÊNCIAS.....	50
APÊNDICE A– Projeto da placa de orifício.....	53
APÊNDICE B – Montagem dos termopares.....	55

1 INTRODUÇÃO

Devido à crise energética desencadeada pela alta do preço do petróleo ocorrida na década de 70, além da crescente preocupação com a disponibilidade dos recursos naturais, a busca por novas formas de geração de energia e alternativas para reduzir o seu consumo, tornaram-se inevitáveis. Nesse contexto, segundo o Balanço Energético Nacional de 2021 (BEN 2021), as edificações (comerciais, residências, de serviço e públicas) foram responsáveis por grande parte do consumo de energia elétrica em nosso país (52% do total). Com o intuito de promover o uso eficiente de energia elétrica e evitar o seu desperdício, o Governo Brasileiro criou em 1985 o PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica). Entre as áreas de atuação do programa encontra-se a das edificações, a qual incentiva a certificação, a etiquetagem e a criação de normas que regulamentam níveis de desempenho térmico, de qualidade do ar e de conforto térmico em ambientes.

Entre as formas de se obter um bom desempenho termo-energético nas edificações, destaca-se a climatização passiva. Utilizando-se de baixo custo energético, estes sistemas utilizam-se das potencialidades do clima local e das características do envoltório da edificação para promover o conforto térmico dos ocupantes. Entre os sistemas passivos de climatização, podem-se citar os Trocadores de Calor Solo-Ar (TCSA). Neste sistema, o ar ambiente circula através de uma tubulação enterrada a uma certa profundidade do solo, fazendo com que o mesmo esquente ou esfrie, dependendo das condições climáticas. Estes efeitos são possíveis devido à alta inércia térmica que mantém o solo a uma temperatura quase constante, a determinadas profundidades, mesmo com as altas amplitudes térmicas externas.

Ao longo dos anos, diversos estudos foram realizados sobre o uso do solo como meio para troca de calor com o ambiente construído (HACINI *et al.*, 2021; YANG *et al.*, 2021; ELMINSHAWY *et al.*, 2017; VAZ *et al.*, 2014). Estes trabalhos exploraram as diferentes configurações e características dos sistemas, do solo e dos materiais e buscaram a maior eficiência do trocador e dos métodos de construção.

1.1 Justificativa

Com o aumento da demanda energética e a crescente preocupação com a disponibilidade dos recursos naturais, pesquisas ligadas ao uso racional de energia cresceram nas últimas décadas. Neste contexto, por serem responsáveis por grande parte do consumo de energia elétrica no Brasil (cerca de 50%), cresceu também a importância e o enfoque a temas relacionados à melhoria da eficiência energética nas edificações, bem como a utilização de soluções passivas para projetos arquitetônicos.

Diante disto, o TCSA apresenta-se como uma importante alternativa para suprir as demandas atuais voltadas aos aspectos ambientais e econômicos. Utilizando-se de energias renováveis, o TCSA pode manter o conforto e a estabilidade térmica de um ambiente por meio da troca de calor do ar através de tubos enterrados no solo.

Assim, o sul do Brasil, por possuir um clima predominante subtropical, caracterizado por estações bem definidas, proporciona condições favoráveis para a instalação de um TCSA, em mais de uma estação ao longo do ano.

1.2 Objetivo geral

Analisar experimentalmente o desempenho térmico de um trocador de calor solo-ar, do ambiente resfriado e a eficiência energética do sistema.

1.2.1 Objetivos específicos

Definir os parâmetros do projeto e construir um trocador de calor solo-ar (TCSA) baseado nas dimensões otimizadas obtidas no trabalho numérico de Vasconcellos (2019);

- Verificar o desempenho do TCSA como sistema para resfriamento de ambientes;

- Comparar o desempenho do TCSA através do monitoramento de temperatura de dois ambientes idênticos (climatizado e não climatizado), localizados no bloco J1, na UTFPR, campus Ponta Grossa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, abordam-se os modelos teóricos e experimentais sobre trocadores de calor solo-ar, seus princípios de funcionamento, suas variações construtivas, bem como os avanços obtidos nas pesquisas recentes.

2.1 Resfriamento passivo e trocadores de calor

Com intuito de promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício, ainda na década de 80 foram criados no Brasil alguns programas, como o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) e o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). No início, o PROCEL somente disponibilizava publicações para diversos setores da sociedade sobre o tema, mas atualmente, trabalha também no controle de inflações e ajuste de tarifas para a energia e combustíveis. No caso do PBE, este é aplicado para todos os equipamentos que consomem energia, atribuindo uma etiqueta que varia de A, para maior eficiência, até E, de menor eficiência (PROCEL, 2019).

Em 2003, foi criado o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações (PROCEL EDIFICA), que atua de forma conjunta entre o Ministério de Minas e Energia (MME), universidades e centros de pesquisa. Este programa promove o uso de energia elétrica em edificações e incentiva o uso de sistemas de climatização passivos nas edificações, com o intuito de reduzir os impactos negativos sobre a natureza (PROCEL, 2019).

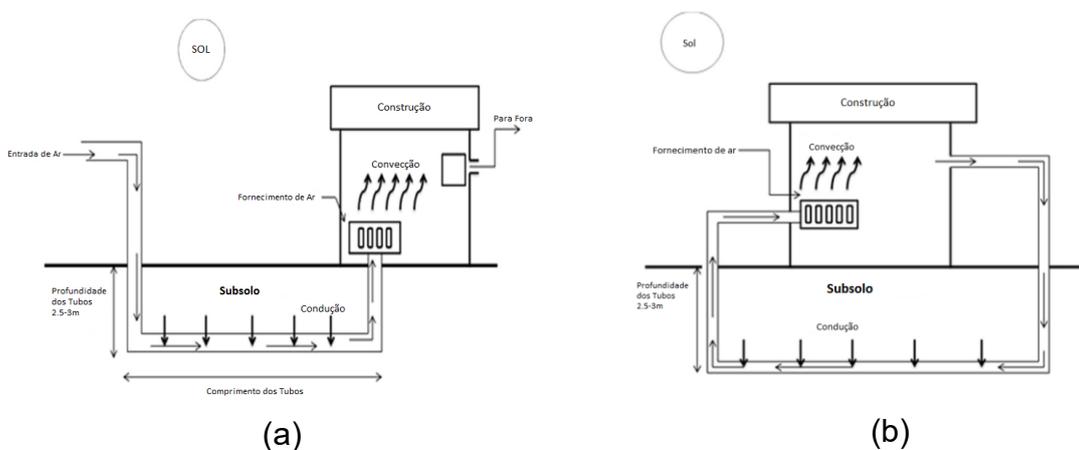
Em 2014, foi criada a Etiqueta PROCEL para Edificações, que trouxe a mesma ideia da etiquetagem presente nos equipamentos que consomem energia, para as edificações residenciais, comerciais e públicas (MASSUCCI, 2014). Com isso, surgiu um mecanismo que promove a eficiência energética de edificações, comparando as de elevado desempenho com o mínimo obrigatório pela Instrução Normativa SLTI n.º 2/2014 (CASALS, 2006).

Neste contexto, a utilização de climatização passiva apresenta-se como uma das possíveis formas de aumentar a eficiência energética das edificações, reduzindo o consumo de energia elétrica pelos equipamentos de aquecimento ou resfriamento do ar. Entre estes sistemas, destaca-se o trocador de calor solo-ar (Rodrigues *et al*,

2017). O TCSA consiste em tubos enterrados no solo, de policloreto de vinila (PVC), em que o ar é transportado por um ventilador, absorvendo ou perdendo calor, dependendo das condições do ambiente a ser climatizado. Estes trocadores podem ser construídos de três formas diferentes: sistema com circuito aberto, sistema com circuito fechado e sistema híbrido (BORDOLOI *et al.*, 2018).

No sistema com circuito aberto, como mostrado na Figura 1 (a), o ar oriundo do ambiente externo passa pelo tubo enterrado no solo para pré-aquecer ou pré-resfriar, podendo (ou não) entrar em um sistema convencional de climatização de ambientes. Esse sistema possui algumas vantagens, como uma construção relativamente mais simples e a redução do consumo de energia em relação a sistemas convencionais. Suas desvantagens são o não atingimento de uma temperatura uniforme ao longo da tubulação, a possível condensação e o crescimento de microrganismos nos tubos, além da dependência direta das condições ambientais externas (BORDOLOI *et al.*, 2018).

Figura 1 - Sistema com circuito aberto (a) e Sistema com circuito fechado (b)



Fonte: Bordoloi *et al.*, (2018)

O sistema com circuito fechado, mostrado na Figura 1 (b), caracteriza-se pelo retorno do ar ao ambiente interno. Os tubos podem estar enterrados na vertical ou na horizontal, no qual, segundo Bordoloi *et al.* (2018), o sistema na horizontal possui maior custo para construção; porém, é mais eficiente devido a tubulação toda ficar na mesma profundidade, possui menos problemas com a umidade, e com o crescimento de microrganismos na tubulação.

A literatura também apresenta o chamado sistema híbrido, que é o acoplamento de um trocador de calor solo-ar a um equipamento de aquecimento ou

resfriamento. Esta configuração possui elevada eficiência e proporciona um maior conforto térmico em relação aos outros sistemas.

Em sua revisão sobre os sistemas, modelos e aplicações dos trocadores de calor com o solo, Florides e Kalogirou (2007) analisaram algumas distribuições da tubulação para o sistema fechado, como conexões em série, em paralelo, e em forma de trincheira, apresentados na

Figura 2.

Segundo os autores, estas são as configurações mais viáveis quando existe espaço no ambiente para cavar as valas necessárias à construção. Muito utilizada nos Estados Unidos, Florides e Kalogirou (2007) também apresentaram uma variação do modelo de trincheira, realizada com mangueiras que podem ser enroladas reduzindo assim o espaço necessário para a construção.



A respeito das configurações de projetos do trocador de calor solo-ar, Mavroyanopoulos e Kyritsis (1983) construíram um trocador de calor com 20 tubos de alumínio de 15 m de comprimento e 20 cm de diâmetro, enterrados a 2 m de profundidade embaixo de uma estufa, na Grécia. O fluxo de ar foi mantido por um ventilador e a média de temperatura no interior da estufa ficou em 8 °C, enquanto a temperatura média do ar externo à estufa era de -0,8 °C.

Nos anos 80, Goswami e Dhaliwal (1985) efetuaram testes experimentais em uma tubulação de 0,3 m de diâmetro e 25 m de comprimento, enterrados entre 2,1 e 2,4 m de profundidade, com medições de temperatura espaçadas. Os autores obtiveram uma concordância razoavelmente boa entre o modelo analítico e o experimento para uma análise de 24 horas, mas destacam que seria necessária uma análise de 2 a 4 semanas do experimento para conclusões sobre longos períodos.

Bansal *et al.* (2009) realizaram uma análise experimental na cidade de Ajmer (Índia). Nesta análise, concluiu-se que o aumento da velocidade do ar resultou em

menores gradientes de temperatura no trocador, e verificou-se que o material do tubo não afetou o desempenho do sistema de forma significativa.

Ozgener (2010) realizou uma análise exérgica e econômica de um trocador de calor para resfriar uma estufa. O experimento foi construído no Solar Energy Institute of Ege University em Izmir, com tubos de aço galvanizado de 0,56 m de diâmetro e 47 m de comprimento, enterrados a 3 m profundidade da superfície do solo. Observou-se uma diferença máxima de temperatura entre a entrada e a saída do trocador de 278,5 K, enquanto a capacidade máxima de resfriamento obtida foi de 8,72 kW.

Outro trabalho a ser destacado foi realizado por Vaz *et al.* (2011) na cidade de Viamão-RS, onde se apresentou uma comparação numérico-experimental de um TCSA. Os resultados obtidos mostraram que o solo teve um potencial maior para aquecer do que para resfriar o ar ambiente para a condição climática local. Observou-se que para o aquecimento, o potencial foi de 8 K, enquanto para o resfriamento, o potencial foi de 4 K.

Em outro estudo experimental, Ozgener e Tester (2013) realizaram a verificação de um trocador de calor, no intuito de prever as variações de temperatura do solo em função da profundidade e do tempo, analiticamente. Concluíram que o modelo simplificado que foi desenvolvido pode ser usado para predição de perfis de temperatura do solo de maneira a atender as necessidades elencadas durante o experimento.

Bansal *et al.* (2012) testaram o desempenho do trocador de calor solo-ar, acoplado na saída de um resfriador evaporativo, durante o período de um ano. O sistema teve uma melhora significativa com o uso do resfriador integrado e, com os dados obtidos, foi verificado que o sistema conseguiu manter o ar a uma temperatura confortável durante todas as estações do ano.

Bansal *et al.* (2013) também propuseram um novo termo chamado “fator de deterioração”, que avalia a queda de desempenho de um trocador de calor solo-ar sob uma condição de operação em regime transiente. A análise concluiu que quanto maior a condutividade térmica do solo, maior o desempenho térmico do sistema, além de que o desempenho térmico é deteriorado após longo período de operação, saturando o solo termicamente.

Vaz *et al.* (2014) também realizaram um estudo em que foi avaliado o potencial térmico do TCSA para três dutos independentes enterrados no solo, a fim

de obter o comportamento transitório dos campos de temperatura para o ar, para o solo e para os dutos. Os resultados mostraram que os meses de fevereiro e de maio foram os melhores para aquecer e resfriar o ar nos dutos do trocador de calor, respectivamente. Também foi possível desenvolver um banco de dados sobre as temperaturas transitórias do solo ao longo do período.

Li *et al.* (2014) investigaram um TCSA acoplado a um sistema com coletores solares e uma chaminé solar. O sistema se baseia em aquecer o ar dos coletores solares de forma que migrem para chaminé, criando uma diferença de pressão no ambiente e conduzindo ar externo através da extremidade do trocador solo ar para o interior do ambiente. O trocador de calor possuía 57 m de comprimento e 0,45 m de diâmetro, enterrado a 3 m de profundidade. Os autores verificaram que o aumento da temperatura do ar externo e dos níveis de irradiação solar resultou no aumento do fluxo de ar para o edifício, aumentando por sua vez a capacidade de resfriamento.

Benhammou e Draoui (2015) criaram um modelo unidimensional transiente para estudar o desempenho térmico dos TCSA no verão do Saara na Argélia. Concluíram que a eficiência média melhora quando o comprimento do tubo é aumentado, mas diminui se a área da seção transversal da tubulação ou a velocidade do ar são aumentadas. Também verificam que, sobre condições transitórias, o fator de deterioração (Bansal *et al.*, 2013) sofre menor influência do diâmetro do tubo e da velocidade do ar, do que da variação do tempo de operação do sistema.

Khabbaz *et al.* (2015) desenvolveram um estudo experimental e numérico sobre o desempenho de um trocador de calor com o solo em Marraquexe, composto de tubos de PVC em paralelo medindo 72 metros de comprimento e 15 cm de diâmetro, enterrados de 2,2 m a 3,2 m de profundidade. Realizaram a validação das simulações após 38 dias de monitoramento do trocador, no qual observou-se uma redução na temperatura em até 288,15 K, em relação ao ambiente externo.

Serageldin, Abdelrahman e Ookawara (2016) validaram um modelo analítico-experimental, onde se observou que o aumento do diâmetro do tubo do trocador em uma polegada, diminuiu a temperatura de saída do ar de 20 °C para 18,7 °C, enquanto um aumento no comprimento do tubo em 1,45 m, elevou-se em 0,1 K a temperatura de saída do ar, não causando grande impacto. A mudança do material do tubo de PVC para aço ou cobre não alterou a eficiência do trocador, sendo mais vantajoso neste caso, o uso do material de menor custo (PVC).

Bulut e Yunus (2016) realizaram a análise de um sistema de ventilação no solo para um clima quente e úmido. Utilizaram na confecção do trocador, tubos de aço galvanizado de 0,13 m de diâmetro e 20 m de comprimento, enterrados a uma profundidade de 2 m na universidade de Harran em Şanlıurfa, Turquia. O sistema foi responsável por manter constante a temperatura interna do ambiente verificado, tendo sua capacidade de resfriamento melhorada com o aumento da velocidade do ar.

Brum (2016) avaliou o desempenho térmico dos TCSA em função dos projetos estruturais aplicando o método do *Design Construtal*, o qual é baseado na lei Construtal de Bejan, 1997. Desta forma, variando parâmetros de construção e inserindo mais tubulações, foram avaliados dois modelos numéricos. Obtiveram-se melhorias nos rendimentos anuais de até 80%, ao variar o diâmetro e o fluxo de ar. Melhorias significativas foram obtidas com o aumento no número de tubulações e com a redução de espaçamentos.

Elminshawy *et al.* (2017) verificaram o desempenho de um TCSA para três diferentes níveis de compactação do solo. O estudo mostrou que o trocador de calor é altamente dependente da compactação do solo e que este fator deve ser considerado no projeto. Com o solo mais compactado foi obtida uma variação de temperatura maior entre a entrada e saída de ar.

Motivados pela necessidade de reduzir o espaço de instalação para sua utilização em países densamente povoados, Mathur *et al.* (2017) compararam o desempenho térmico de um TCSA em espiral com um tradicional na horizontal em linha. Para a análise experimental e numérica utilizaram o COP (coeficiente de desempenho) como parâmetro e concluíram que o coeficiente de desempenho de ambos é comparável, sendo possível assim uma redução considerável da área de instalação.

Menhoudj *et al.* (2018) avaliaram numericamente e experimentalmente o desempenho de um TCSA e a influência do material do tubo no processo. Para a análise do material (PVC e zinco), dois trocadores foram construídos e ligados a dois ambientes com as mesmas dimensões. Concluíram que o material foi pouco significativo nas trocas térmicas com o solo. Nesse trabalho, eles obtiveram como parâmetros otimizados, um comprimento de 25 m para a tubulação, uma profundidade de aterramento de 3 m a 5 m e um diâmetro de 120 mm.

Lin *et al.* (2018) estudaram como a umidade afeta as propriedades térmicas do solo e a eficiência do trocador de calor. Nesse caso, a umidade do solo causou um

impacto muito pequeno quando a velocidade de circulação do ar no duto foi baixa. No entanto, quando o escoamento era turbulento, totalmente desenvolvido, obteve-se uma diferença na troca de calor de até 40%.

Morshed *et al.* (2018) avaliaram o desempenho de um trocador de calor no Iraque. Neste trabalho, os autores verificaram a diferença entre o solo seco e o umedecido artificialmente. O estudo mostrou que o coeficiente de desempenho global do trocador de calor tornou-se maior quando o solo estava úmido, e que as temperaturas nos horários mais quentes do dia, em média, também foram reduzidas.

Vasconcellos (2019) verificou o desempenho térmico de um trocador de calor de forma numérica, utilizando o programa computacional comercial Ansys/Fluent®. A partir da análise da influência do diâmetro, da velocidade do ar e das propriedades do solo, investigou-se a melhor configuração da tubulação para a instalação do trocador. O melhor desempenho foi obtido para um diâmetro de 10 cm com velocidade do ar de 2,5 m/s. Para a instalação dos tubos no formato de serpentina, concluiu-se que seria necessária uma distância mínima de 0,5 m entre os centros dos tubos.

Sakhri *et al.* (2020) compararam a eficiência do trocador de calor com tubos de PVC e de aço em função da profundidade de aterramento e do comprimento. Concluíram que a diferença no desempenho entre os materiais foi pequena, sendo mais relevante neste caso, considerar as características de custo e manuseio.

Díaz-Hernández *et al.* (2020) monitoraram as temperaturas e o comportamento de um TCSA, enterrado a 2,5 m de profundidade. Neste trabalho concluíram que a variação de temperatura em seis meses a 2,5 m foi pequena, e que foi possível resfriar o fluxo de ar sob um clima quente e úmido.

Rosa *et al.* (2020) validaram os resultados de sua pesquisa numérica com um trabalho experimental e um modelo analítico, realizado em Portugal. Concluíram que quanto maior a velocidade, menor foi o desempenho térmico do sistema para o resfriamento e dependendo desta velocidade, a distância entre os passos da serpentina poderia ser reduzida pela metade, esse efeito era causado pela velocidade da saturação térmica do solo em sua maioria.

Greco e Masselli (2020) propuseram a otimização do desempenho térmico de um TCSA para um sistema de condicionamento de ar, por meio de um estudo numérico bidimensional. Neste trabalho concluíram que para um aterramento superior a 1,5 m de profundidade para a tubulação, este não afetava a temperatura de saída do ar. Por outro lado, o desempenho aumentou com o aumento do comprimento da

tubulação até certo limite, e quanto menor o diâmetro dos tubos, mais próximas foram as temperaturas de saída do ar, comparadas com a do solo.

Por fim, Hacini *et al.* (2021) realizaram a avaliação do desempenho térmico de um TCSA para três regiões diferentes da Argélia, comparando resultados experimentais com modelos numéricos. O modelo usado apresentou boa concordância com os resultados experimentais e concluíram que o trocador de calor pode ser uma importante fonte de redução de energia, especialmente em climas áridos como do sul da Argélia.

2.2 Comportamento térmico do solo

Sabe-se que o desempenho térmico de um TCSA depende diretamente das características e propriedades térmicas do solo. Estas propriedades dependem, em sua maioria, das frações volumétricas de água, de ar e de sólidos no solo. Alguns valores podem ser encontrados na literatura, como em Oke (1987), sendo apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores das propriedades para diferentes tipos de solo

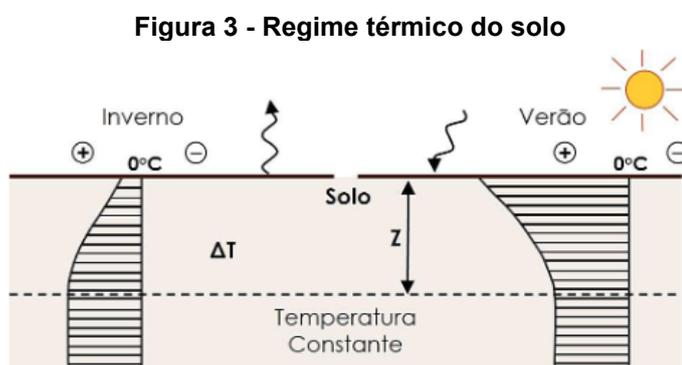
Tipos de solo	Massa específica [kg/m ³]	Condutividade Térmica [W/(m.K)]	Calor específico [J/(kg.K)]	Difusividade térmica [m ² /s]	Capacidade térmica [J/(m ³ .K)]
Arenoso	1600-2000	0,30-2,20	800-1480	0,24-0,74	1,28-2,96
Argiloso	1600-2000	0,25-1,58	890-1550	0,18-0,51	1,42-3,10
Turfa (orgânico)	300-1100	0,06-0,50	1920-3650	0,10-0,12	0,48-4,02

Fonte: Adaptada Oke (1987)

Considerou-se neste trabalho o solo sendo como silto-arenoso, por ser um dos tipos mais comuns encontrados na região, no qual apresenta os valores das propriedades térmicas variando entre o arenoso e argiloso. As propriedades higrótérmicas deste tipo de solo pode ser obtidas em Oliveira *et al.* (1993).

Outros fatores, como o aquecimento da superfície pela radiação solar e o transporte do calor para as camadas inferiores por condução, são fundamentais para determinar o regime térmico do solo. Ao receber a radiação solar, o solo leva longos períodos para aquecer e resfriar devido a sua inércia térmica. Desta forma, como

pode-se perceber na Figura 3, as camadas superficiais possuem maior amplitude térmica devido as alterações climáticas, de maneira que quanto mais profundo, maior é o atraso térmico, (COSTA, 2017).



Fonte: Adaptada Costa (2017)

A temperatura do solo também pode variar em função da altitude e das construções vizinhas. Chow *et al.* (2011) realizaram um estudo analisando a temperatura do solo para Hong Kong em profundidades de até 3 m e verificaram que a temperatura do solo está diretamente relacionada com a temperatura de bulbo seco do ar.

Yusof *et al.* (2014) analisaram a temperatura do solo na Malásia, para a implementação de um TCSA e verificaram que abaixo de 2 m de profundidade o sistema pode obter um bom desempenho. Os autores citam que entre 2,5 m e 4 m de profundidade obtém-se o melhor desempenho do trocador, além de recomendar a instalação em solos com difusividade térmica inferior a 0,006 m²/dia.

2.3 Equações para cálculo de desempenho

Para calcular o desempenho de um trocador de calor, necessita-se relacionar o calor removido ou absorvido (taxa de transferência de calor) com as temperaturas de entrada e saída do ar. Essa relação pode ser obtida com a aplicação de um balanço de energia no fluido. Como o ar não passa por mudança de fase e os calores específicos podem ser considerados constantes, a taxa de transferência de calor (W) pode ser determinada pela Equação 1:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ar} C_p (T_{entrada} - T_{saída}) \quad (1)$$

onde as temperaturas, na expressão, podem ser consideradas as temperaturas médias de entrada ($T_{entrada}$) e saída ($T_{saída}$) em °C no trocador, \dot{m}_{ar} é a vazão mássica de ar em kg/s, e C_p é o calor específico a pressão constante do ar em J/(kg.K).

A vazão mássica pode ser determinada pela Equação. (2) como:

$$\dot{m}_{ar} = \frac{\rho_{ar} \pi d^2 V}{4} \quad (2)$$

onde ρ_{ar} é a massa específica do ar (kg/m³), V a velocidade média do ar (m/s) e d o diâmetro do tubo (m). Valores de $C_p = 1,01$ (kJ/kg.K) e $\rho_{ar} = 1,2$ kg/m³ foram utilizados nos cálculos.

Deste modo, determinou-se a eficiência do TCSA através do quociente entre a taxa de calor trocada pelo ar (Q) e a potência (\dot{W}) gasto para a circulação do ar (ventilador) como:

$$COP = \frac{Q}{\dot{W}} \quad (3)$$

Os dados da potência (\dot{W}) foram obtidos por meio do inversor de frequência que controla o ventilador radial. Através de um comando exibido na tela a cada frequência definida para o trocador de calor o resultado de potência correspondente era exibido.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Nesta seção, são apresentados os procedimentos de projeto, a montagem do trocador de calor e do sistema de aquisição de dados.

O trocador de calor e os aparatos experimentais utilizados neste trabalho foram construídos e testados experimentalmente no Laboratório de Controle Térmico (LabCT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Ponta Grossa.

3.1 Projeto

Primeiramente, para a execução dos testes experimentais envolvendo o trocador de calor solo-ar, necessitou-se desenvolver um projeto para um sistema de circulação de ar fechado. Utilizaram-se como referência, os parâmetros geométricos otimizados obtidos por Vasconcellos (2019) para a cidade de Ponta Grossa, descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultado otimizados obtidos por Vasconcellos (2019)

Número de passos	Distância entre tubos (m)	Profundidade (m)	Diâmetro externo (m)	Comprimento total (m)
4	0,5	1,5	0,1	40

Fonte: Adaptada de Vasconcellos (2023)

No entanto, para se utilizar os mesmos parâmetros geométricos de Vasconcellos (2019), seria necessária a abertura de uma vala comprida e estreita, uma vez que o número de passos da serpentina seria pequeno. Devido às limitações do espaço cedido pela universidade, e para que fosse atingido um comprimento próximo ao estudado por Vasconcellos (2019), necessitou-se aumentar o número de passos da serpentina de 4 para 8, aumentando também o comprimento total para 48,2 m. Dessa forma, mantiveram-se as distâncias entre os passos de 0,5 m, a profundidade de 1,5 m e o diâmetro externo da tubulação de 0,1 m, como descritos na Tabela 3.

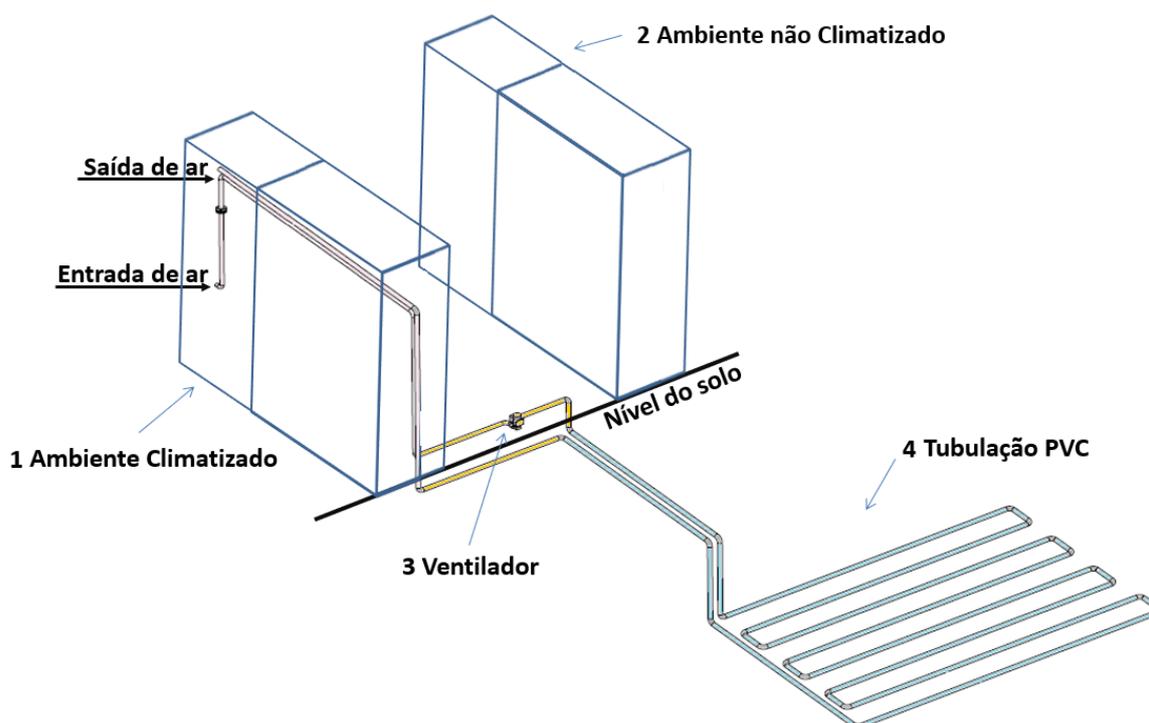
Tabela 3 - Parâmetros geométricos do projeto

Número de passos	Distância entre tubos (m)	Profundidade (m)	Diâmetro externo (m)	Comprimento total (m)
8	0,5	1,5	0,1	48,2

Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 4 apresenta um diagrama tridimensional de como foram posicionados os principais componentes do sistema.

Figura 4 - Projeto trocador de calor solo ar



Fonte: Autoria própria (2023)

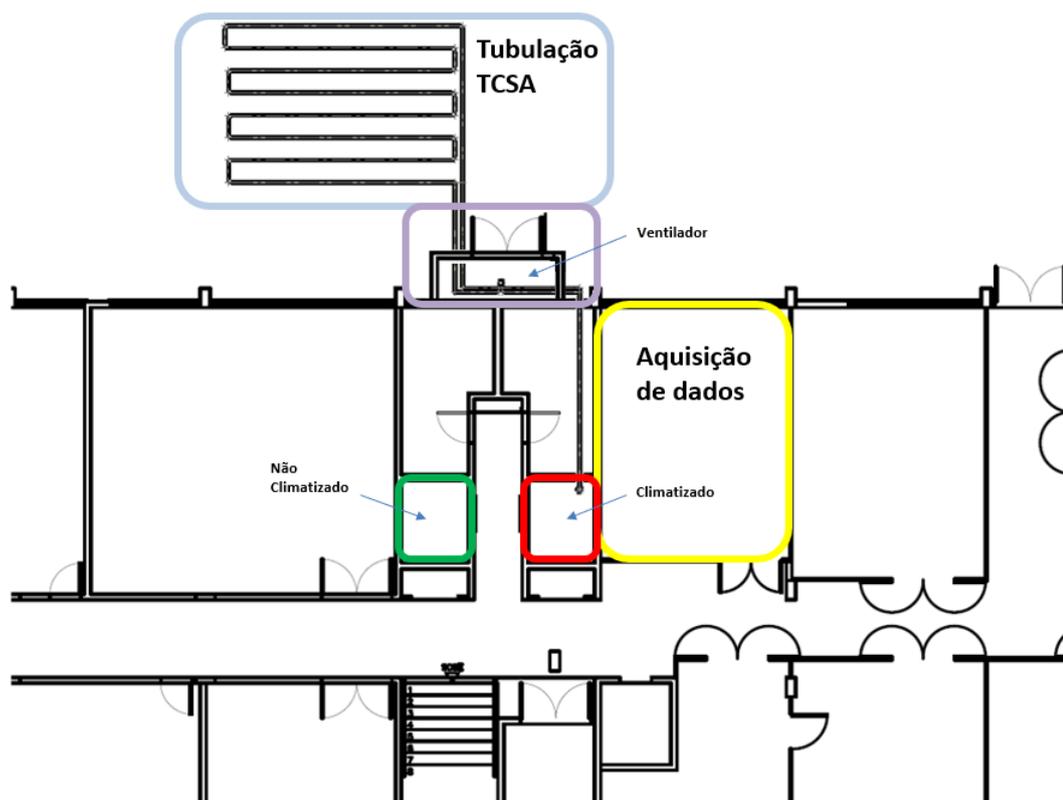
Representadas pela Figura 4, estão posicionadas as seguintes partes do projeto: (1) Ambiente climatizado, composto por entrada e saída de ar, placa de orifício e tubulações isoladas com lã de rocha de aço galvanizado, (2) Ambiente não climatizado, (3) Ventilador Radial e tubulações, (4) Tubulações enterradas de PVC.

3.1.1 Localização

No interior do bloco J1 do campus Ponta Grossa da UTFPR, indicada em amarelo na Figura 5, instalaram-se os equipamentos para controle e aquisição de

dados. Em vermelho encontram-se as tubulações de entrada e saída de ar do ambiente a ser climatizado e em verde, o ambiente tido como referência, sem climatização. Na região externa ao bloco, indicado em roxo, apresenta-se o ventilador para circulação do ar e a tubulação do trocador de calor, em azul.

Figura 5 - Indicação localização trocador de calor



Fonte: Autoria própria (2023)

3.2 Montagem

Primeiramente nesta seção, descreve-se a região do sistema formada pela tubulação de aço galvanizado. Depois, apresentam-se o ventilador e suas conexões, e na sequência, descreve-se a região onde se encontram a tubulação de PVC e os sensores para aquisição de dados.

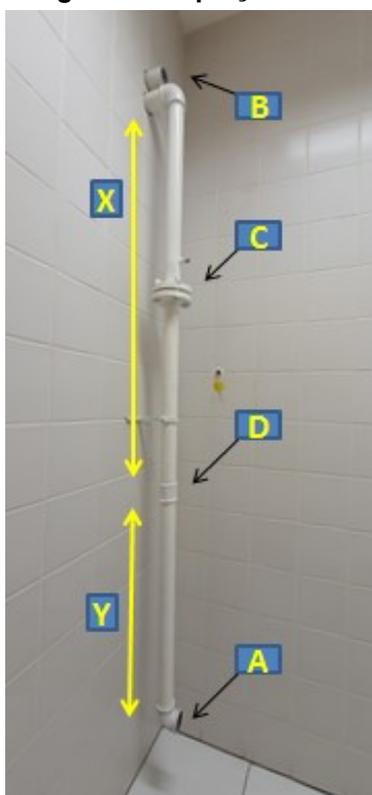
3.2.1 Montagem da tubulação de aço galvanizado

A tubulação de aço galvanizado é responsável pela ligação entre a captação do ar do ambiente a ser condicionado e o ventilador, localizado na região externa do

bloco. Esta tubulação também tem a função de devolver ao ambiente interno, o ar após passagem pelo trocador de calor. Uma placa de orifício também foi instalada para a determinação da vazão de ar no sistema.

A Figura 6 apresenta o posicionamento dos equipamentos após a montagem: (A) entrada de ar para o sistema, (B) tubo de retorno do ar ao ambiente, (C) placa de orifício e (D) luva de aço galvanizado para extensão do tubo de dimensões X e Y são 2,2 m e 0,6 m, respectivamente.

Figura 6 - Captação de ar



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 7, observa-se a tubulação isolada com aproximadamente 4,6 m, conduzindo o ar captado no ambiente climatizado (que possui 2,12 m de largura por 3,30 m de comprimento e 2,76 m de altura), ao ventilador, localizado no ambiente externo.

Figura 7 - Tubulação isolada em aço galvanizado



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 8 apresenta a conexão do tubo ao ventilador, destacando-se os seguintes elementos: conexão de entrada e saída do ventilador radial (A), tubulação de retorno do trocador tubulação de captação do ar (X), e tubulação de entrada no trocador após passagem pelo ventilador (w).

Figura 8 - Tubulação em aço galvanizado ligada ao ventilador



Fonte: Autoria própria (2023)

3.2.2 Montagem do sistema de ventilação

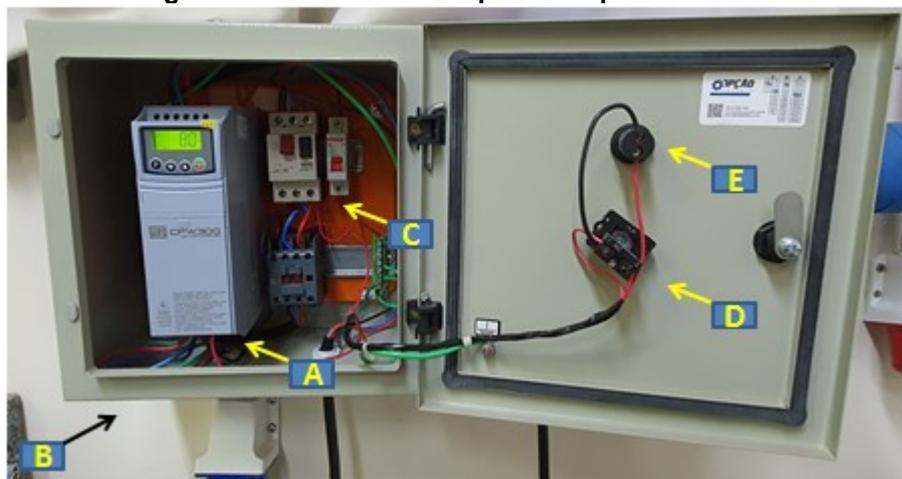
O sistema de ventilação, observado na Figura 9, é composto pela tubulação de captação do ar (A), por um ventilador radial modelo Cre-03 da marca AeroMack de potência 2 cv e vazão máxima de 3,2 m³/min (C), pela tubulação de saída do ventilador (B), pelo suporte de perfil de alumínio estrutural de 40 mm por 40 mm (D) e pelo cabo de alimentação do ventilador (E). O ventilador e a tubulação extra (F) não foram utilizados neste trabalho.

Figura 9 - Componentes do sistema de ventilação

Fonte: Autoria própria (2023)

A fim de reduzir vibrações, as conexões entre os tubos de aço galvanizado e o ventilador radial foram feitas por meio de mangueiras flexíveis presas com abraçadeiras de metal nas extremidades. Para variar a velocidade de rotação do ventilador, utilizou-se um inversor de frequência, conforme ilustrado na Figura 10. Desta forma, o controle do ventilador é composto por um sistema contendo um inversor de frequência da marca Weg™ modelo CFW 300 para 2 cv, 220 V e 10 Amperes (A), uma caixa de montagem de painel elétrico nas dimensões 30 cm x 30 cm x 20 cm (B), um disjuntor unipolar e um disjuntor tripolar (C), um botão de emergência (D) e um led de indicação de funcionamento (E).

Figura 10 - Inversor de frequência e painel elétrico



Fonte: Autoria própria (2023)

3.2.3 Montagem da tubulação em PVC

Primeiramente, antes da construção e montagem das tubulações em PVC, realizou-se a escavação do solo com a ajuda de uma retroescavadeira, conforme observado na Figura 11.

Figura 11 - Área para instalação do trocar de calor



Fonte: Autoria própria (2023)

As dimensões da escavação são apresentadas na Tabela 4.

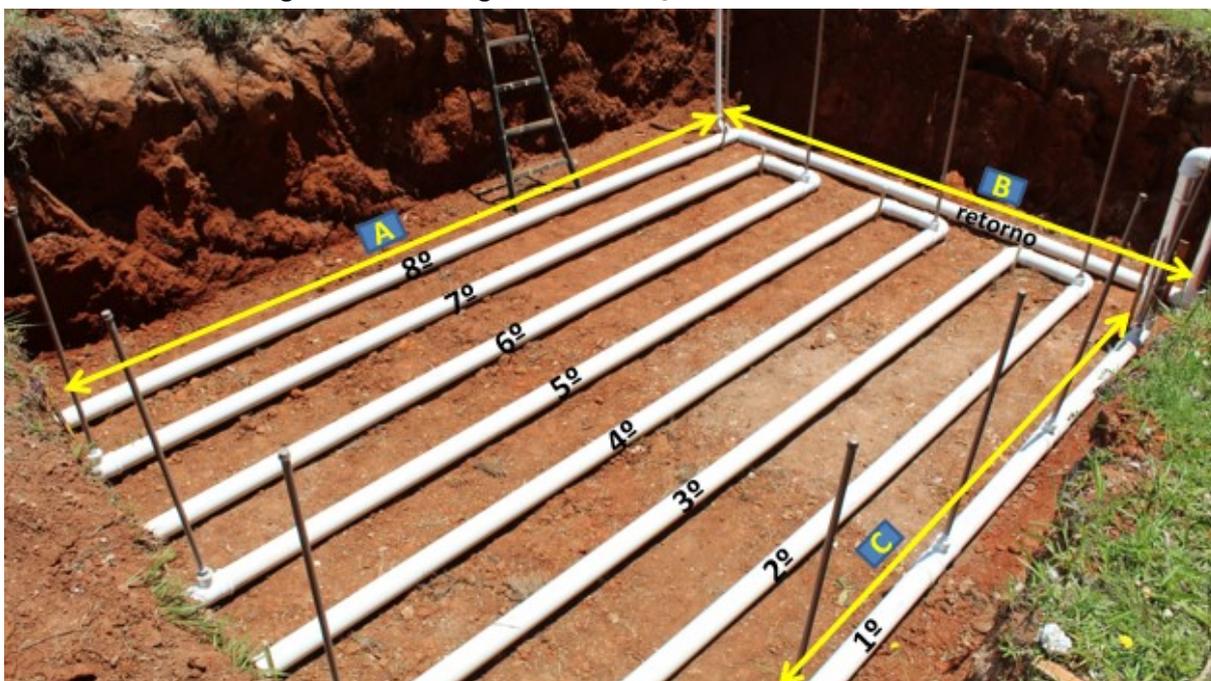
Tabela 4 - Dimensões da escavação

Cotas	Comprimento (m)
X	6
Y	1,5
Z	5

Fonte: Autoria própria (2023)

As Figura 12 e 13 apresentam a montagem da tubulação de PVC.

Figura 12 - Montagem da tubulação do trocador de calor



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 13 - Montagem tubulação trocador de calor



Fonte: Autoria própria (2023)

Já, a Tabela 5 informa as dimensões detalhadas das tubulações.

Tabela 5 - Dimensões das tubulações do trocador de calor

Cotas	Comprimento (m)
A	5,50
B	3,55
C	4,85
D	5,15
E	0,50
F	1,30
G	3,10

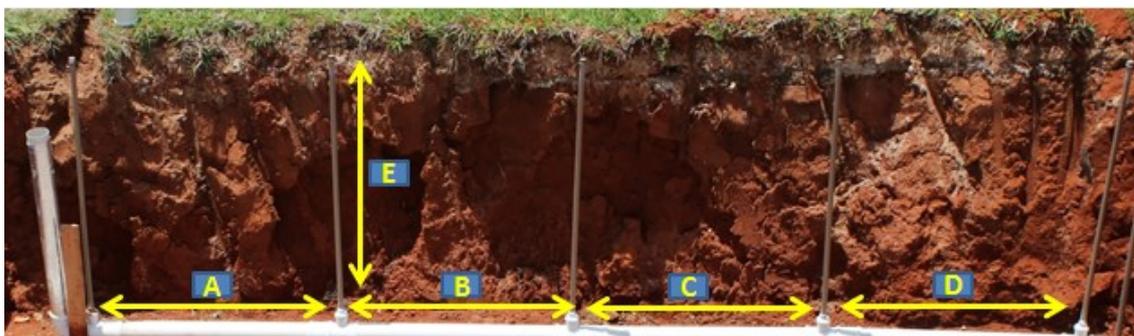
Fonte: Autoria própria (2023)

3.2.4 Montagem da tubulação para aquisição de dados

Para o posicionamento dos termopares ao longo da tubulação, instalaram-se tubos de menor diâmetro ligando a superfície ao trocador de calor, por meio de

conexões em T. Estes tubos possuem espaçamento menor no primeiro passo, conforme ilustrado na Figura 14 e especificados na Tabela 6, devido aos maiores gradientes de temperatura do ar no início da tubulação. Após o segundo passo, os espaçamentos tornam-se constantes, em cinco metros, por toda a extensão do trocador de calor.

Figura 14 - Tubos de acesso para os sensores



Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 6 - Dimensões entre tubos presentes no primeiro passo

Cotas	Comprimento (m)
A	1,20
B	1,20
C	1,10
D	1,20
E	1,40

Fonte: Autoria própria (2023)

3.3 Aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é dividido em dois ambientes: o ambiente interno, ilustrado pela Figura 15, composto pelo aparato experimental para captação de dados, e o ambiente externo, ilustrado pela Figura 16, composto pelos 18 sensores instalados no sistema.

O aparato experimental presente no ambiente interno é composto por um sistema de aquisição de dados Keysight™ DAQ970 (A), dois multiplexadores Keysight™ de

22 canais (B), um computador Intel™ Core i7-7600 de 3,5 GHz e 16 gb de memória ram (C) e um *nobreak* NHS™ 1200 VA (D).

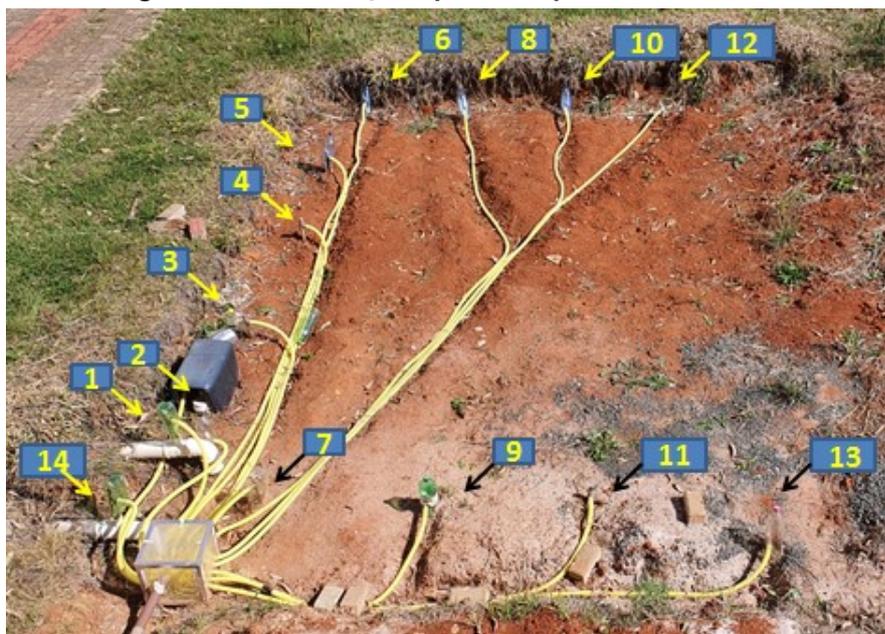
Figura 15 - Aparato experimental



Fonte: Autoria própria (2023)

No ambiente externo, um total de quatorze termopares tipo K foram distribuídos ao longo do trocador de calor, como indicados na Figura 16: no início do trocador de calor (1), ao longo do primeiro passo (2 ao 6), no segundo passo (7), terceiro passo (8), quarto passo (9), quinto passo (10), sexto passo (11), sétimo passo (12), oitavo passo (13) e na saída do trocador (14). A montagem e a calibração dos termopares são apresentadas no Anexo B.

Figura 16 - Distribuição aparato experimental externo



Fonte: Autoria própria (2023)

Para a coleta dos dados climáticos, instalou-se próximo ao trocador uma estação meteorológica modelo WT 1081 mostrado na Figura 17, para a obtenção da temperatura, índice pluviométrico, velocidade do vento e umidade local.

Os dados da radiação solar foram obtidos a partir do piranômetro marca Dipp and Zonem modelo CMP3 instalado na usina de energia solar da UTFPR em parceria com a COPEL energia.

Figura 17 - Estação meteorológica



Fonte: Autoria própria (2023)

Para a caracterização higrotérmica do solo, em parceria com a Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), foram cedidos quatro sensores da marca DECAGON™ modelo EM30, conforme a Figura 18.

Figura 18 - Sensor para captação do regime térmico do solo



Fonte: Autoria própria (2023)

Os sensores foram posicionados nas profundidades de 1,5 m, 1 m e 0,5 m da superfície, segundo a Figura 19, captando os dados de temperatura e umidade do

solo. Neste trabalho, os efeitos da umidade do solo no desempenho do TCSA não foram analisados (trabalhos futuros).

Figura 19 - Local de instalação dos sensores do solo



Fonte: Autoria própria (2023)

3.4 Incertezas de medição

Dada a natureza do experimento, uma análise de incertezas com base no erro atribuído as medidas se fazem necessárias. Para realizar a análise de incertezas foi utilizado Método de Propagação de Incertezas descrito em Taylor e Kuyatt (1994), e associado ao princípio de combinação de certezas foi utilizado o software EES™ (*Engineering Equation Solver™*) para a propagação das incertezas. A incerteza ΔR é o resultado de $R = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ sendo que as medidas (x_1, x_2, \dots, x_n) são expressas pela Equação 4.

$$\Delta R = \sqrt{\left\{ \left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \partial x_1 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \partial x_n \right)^2 \right\}} \quad (4)$$

O Quadro 1 apresenta os valores considerados para cada parâmetro utilizado na realização dos cálculos descritos, sendo que para instrumentos comerciais são considerados as informações presentes na literatura ou em catálogos técnicos fornecidos pelos fabricantes. No caso de dispositivos calibrados no laboratório, como

nos termopares do tipo K, em que a calibração possui precisão de $\pm 1,25$ C, seu erro é comparado ao equipamento utilizado para calibração apresenta uma incerteza de $\pm 0,25$ °C.

Quadro 1 - Incertezas de medição

Parâmetro	Instrumento	Incerteza	Unidade
Radiação	Piranômetro	$\pm 3\%$	W/m ²
Temperatura	Termopar do Tipo K	$\pm 0,25$	K
Velocidade do ar	Anemômetro digital	$\pm 0,3\%$	m/s
Potência	Sistema de aquisição de dados	$\pm 1,0\%$	W
Diâmetro	Paquímetro	0,025	mm

Fonte: Autoria própria (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

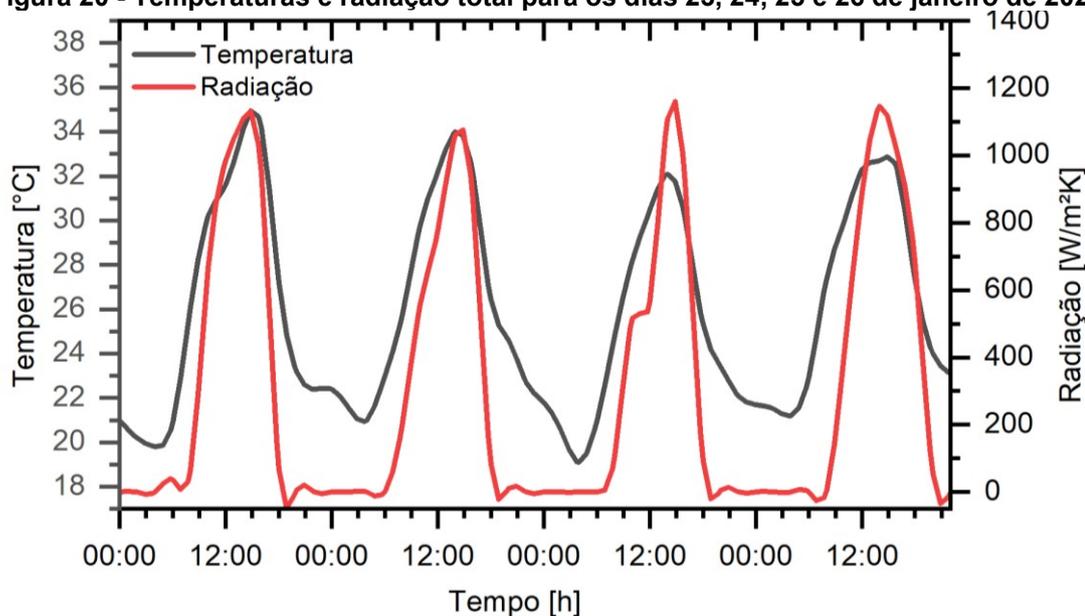
Neste capítulo são apresentados os resultados, obtidos por meio do acompanhamento realizado na etapa experimental do estudo. As análises estão relacionadas ao monitoramento da temperatura do trocador de calor, do solo, do ambiente externo e do ambiente interno estudado.

4.1 Comportamento climático

Como já citado anteriormente, os dados do clima foram obtidos pela estação meteorológica instalada ao lado do TCSA. Estes valores foram captados para todo o mês de janeiro de 2022, sendo os dias 23, 24 e 25 analisados neste trabalho, por serem os dias mais quentes do mês. Para todos os casos analisados, a vazão mássica de ar utilizada foi de 0,00729 kg/s, correspondente a uma velocidade de 3 m/s na tubulação onde foi instalada a placa de orifício.

A Figura 20, apresenta a distribuição das temperaturas externas e da radiação solar total nos três dias estudados em janeiro, em função do tempo, em horas.

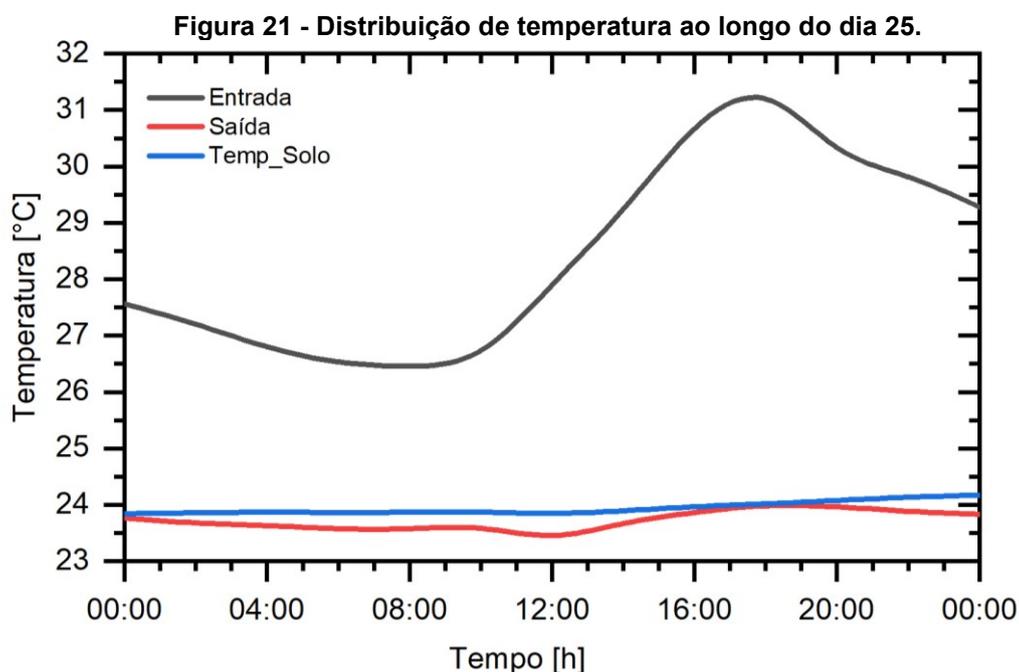
Figura 20 - Temperaturas e radiação total para os dias 23, 24, 25 e 26 de janeiro de 2022.



Fonte: Autoria própria (2023)

4.2 Comportamento térmico diário do TCSA

A Figura 21 apresenta as temperaturas do solo a 1,5 m de profundidade e de entrada e saída do TCSA, para o dia 25 de janeiro, no qual foram observadas as maiores variações de temperatura na entrada do trocador. A circulação de ar no trocador foi iniciada no dia 22 de janeiro, com uma velocidade de 3,5 m/s, para que o solo estivesse sob condições estáveis de temperatura no início da obtenção dos dados.



Fonte: Autoria própria (2023)

A partir da Figura 21, verificou-se a proximidade entre as temperaturas do solo (1,5 m de profundidade) com as temperaturas de saída do ar do TCSA. O ar quente (entrada) foi resfriado e devolvido ao ambiente interno (saída), em uma temperatura mais baixa, quase constante ao longo do dia. Observou-se também na Figura 21 que a temperatura máxima na entrada no trocador ocorreu por volta das 18 horas, período em que a radiação não se encontra no seu pico. Atribuiu-se este fato ao aquecimento do local de proteção onde foi instalado o ventilador. Exposto a radiação durante todo o dia, esta estrutura feita de concreto acumulou o calor durante o dia, gerando elevadas temperaturas internas, principalmente após às 16h. Associada ao superdimensionamento do ventilador radial, verificou-se um aumento de cerca de 7

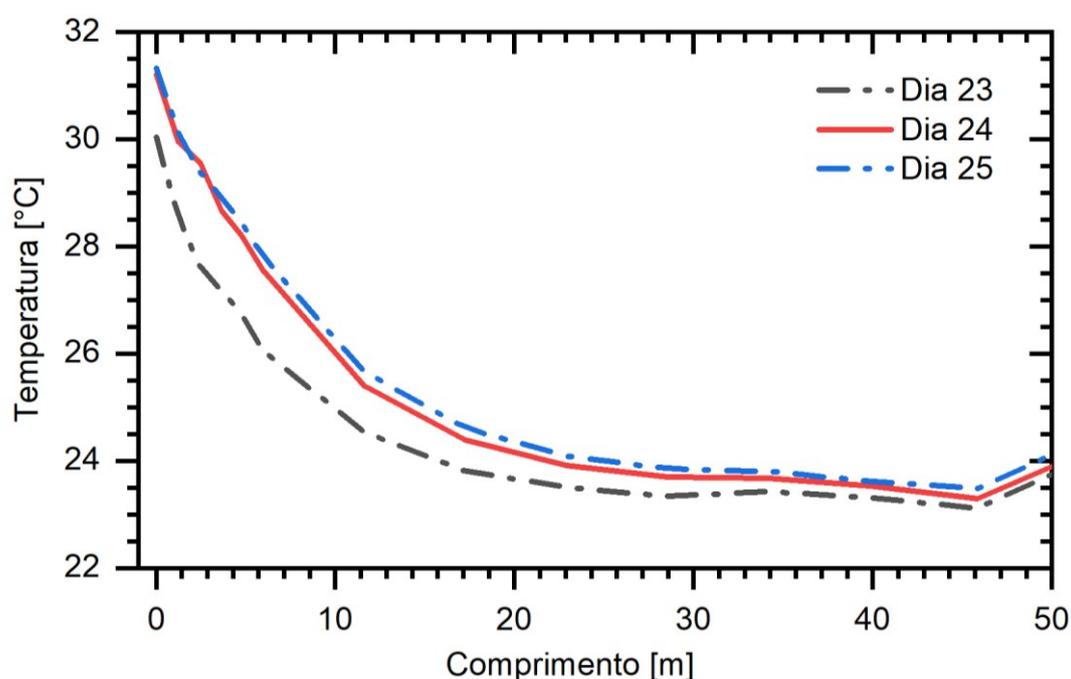
°C em relação a temperatura do ambiente interno climatizado (ar de retorno), para este período.

A análise do gráfico revela que a temperatura do solo se apresenta acima da temperatura do trocador de calor. Tal disparidade ocorre em virtude da localização do ponto de medição da temperatura do solo, uma vez que está posicionado próximo à entrada do trocador de calor. Neste ponto específico, a temperatura tende a ser mais elevada devido ao efeito contínuo de aquecimento do solo pelo trocador de calor.

Na sequência, examinou-se o comprimento do trocador necessário para que a temperatura do ar entrasse em equilíbrio térmico com o solo. Dessa forma, a Figura 22 apresenta a distribuição de temperaturas ao longo do trocador para o período em que a temperatura de entrada era a mais elevada (18 horas).

Observou-se que a partir de 30 metros, a temperatura do ar manteve-se praticamente constante, entre 23 °C e 24 °C. Atribui-se o aumento de 1 C apresentado nos últimos 2 m de tubulação, ao posicionamento do sensor na saída da tubulação, localizado próximo a superfície do solo.

Figura 22 - Distribuição de temperatura ao longo dos dias 23, 24 e 25 de janeiro, às 18h



Fonte: Autoria própria (2023)

4.3 Ambientes internos

Na sequência, avaliou-se a capacidade de resfriamento de um ambiente interno (2,12 m x 2,76 m x 3,30 m) do bloco J1 pelo trocador de calor, comparando o comportamento da temperatura interna do ar, ao de um ambiente idêntico, sem climatização, como identificado na Figura 5. Estes ambientes são dois banheiros para cadeirantes não utilizados no bloco, de alvenaria, sem janelas, com acesso através de portas de alumínio, mantendo-se fechadas durante o período de aquisição dos dados. Dois termopares tipo K foram posicionados em cada um dos ambientes, sendo a média destes termopares apresentados na Tabela 8 para os dias 23, 24 e 25 de janeiro, e na Figura 23 para o dia 24, por possuir o maior pico da temperatura de entrada.

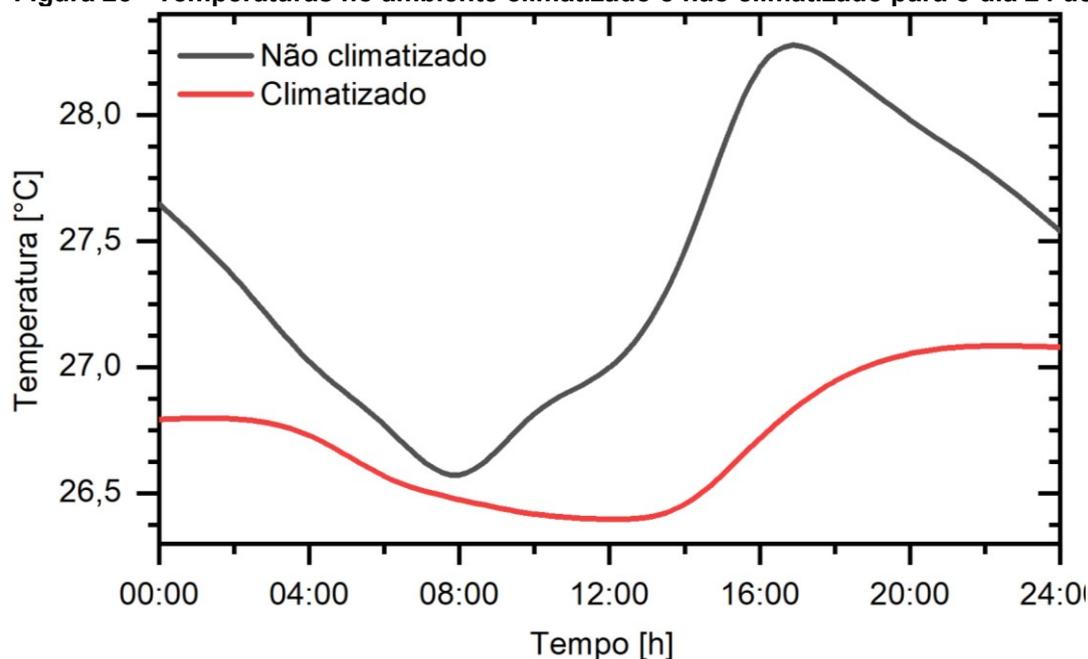
Tabela 7 - Temperaturas dos ambientes internos

	Dia 23		Dia 24		Dia 25	
	Não Climatizado	Climatizado	Não Climatizado	Climatizado	Não Climatizado	Climatizado
T Média (°C)	26,6 ± 0,25	25,6 ± 0,25	27,3 ± 0,25	26,1 ± 0,25	27,4 ± 0,25	26,7 ± 0,25
T Máx. (°C)	27,9 ± 0,25	25,9 ± 0,25	28,4 ± 0,25	26,8 ± 0,25	28,2 ± 0,25	27,1 ± 0,25
T Mín. (°C)	25,4 ± 0,25	25,7 ± 0,25	26,4 ± 0,25	25,5 ± 0,25	26,6 ± 0,25	26,4 ± 0,25

Fonte: Autoria própria (2023)

Na Tabela 8 e Figura 23 observa-se que o ambiente não climatizado apresentou temperaturas superiores e uma maior variação de temperatura diária (entre 1,6 °C e 2,5 °C). No caso do ambiente climatizado, este apresentou temperaturas mais estáveis e amenas, com valores médios 1°C menores, quando comparado ao ambiente não climatizado. Valor esse, próximo do valor da incerteza de medição.

Figura 23 - Temperaturas no ambiente climatizado e não climatizado para o dia 24 de janeiro.



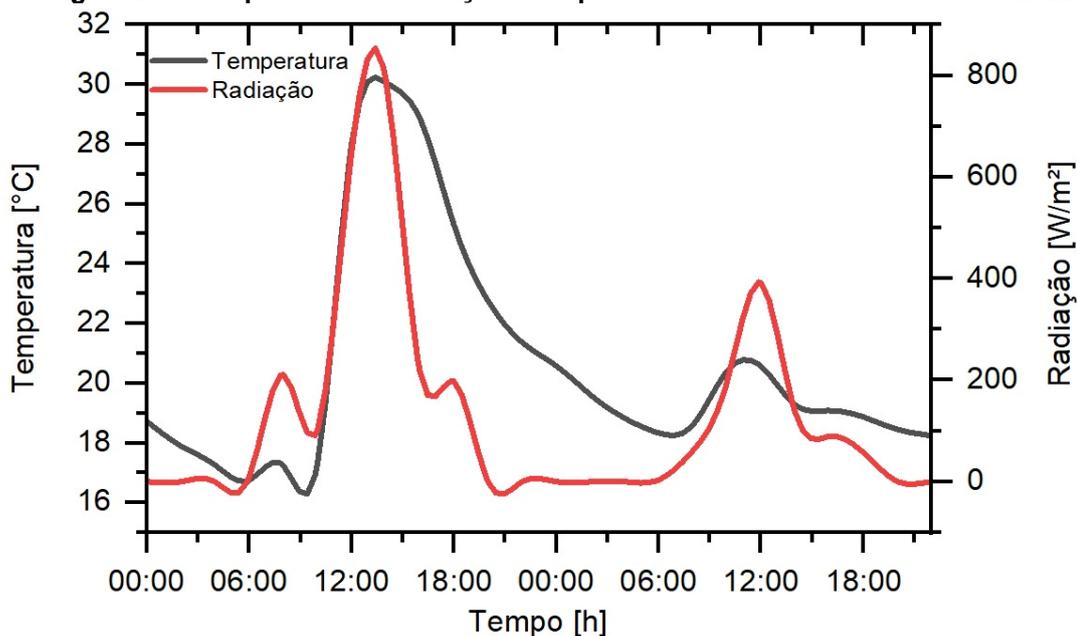
Fonte: Autoria própria (2023)

Atribui-se as diferenças de temperaturas não expressivas obtidas, as pequenas dimensões dos ambientes ($19,3 \text{ m}^3$) e as suas localizações (Figura 5), no interior do bloco, não sujeitas a uma grande fonte de calor direta, como seria o caso da radiação solar em suas paredes.

Para verificar o comportamento do trocador de calor em condições mais severas, submeteram-se os ambientes a uma carga de geração de calor de 1500 W, através de dois aquecedores elétricos (um para cada ambiente). Os dias 5 e 6 de outubro de 2022 foram os dias monitorados para esta comparação, onde os valores de temperaturas externas e radiação total são observadas na Figura 24.

A Figura 24 mostra a variação de temperaturas externas entre os dias 5 e 6 de outubro, em que os valores máximos tiveram uma diferença de aproximadamente $8 \text{ }^\circ\text{C}$ entre os dias, devido à ocorrência de chuva.

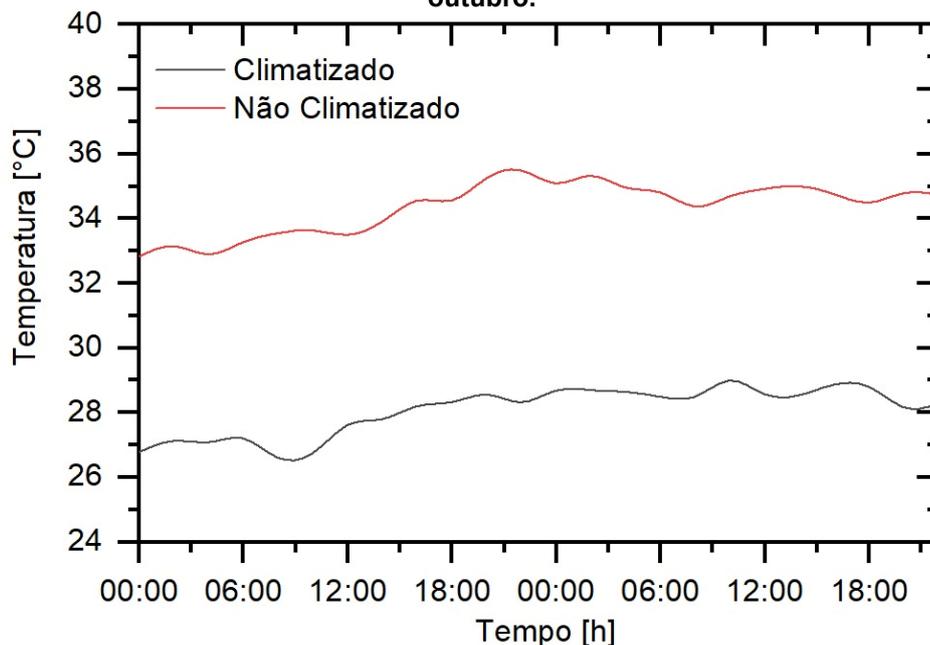
Figura 24 - Temperaturas e radiação total para os dias 4 e 5 de outubro de e 2022



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 25 apresenta as temperaturas internas dos ambientes climatizado e não climatizado, submetidos à geração interna de calor. Embora a diferença de temperatura externa tenha sido considerável, esta não influenciou o desempenho do TCSA, o qual proporcionou uma redução média de 6 °C no ambiente climatizado.

Figura 25 - Temperaturas no ambiente climatizado e não climatizado para os dias 5 e 6 de outubro.



Fonte: Autoria própria (2023)

4.4 Coeficiente de desempenho

Valores máximos para as variações de temperatura (Δt), as quantidades de calor retirados do ambiente (Q) e os coeficientes de desempenho (COP) calculado a partir da Equação 3, são apresentados na Tabela 9, para cada dia monitorado, para a velocidade de 3 m/s medida através da placa de orifício.

Tabela 8 - Valores obtidos para os 3 dias do mês de janeiro de 2022.

Dia	Δt_{max} (°C)	Q_{max} removido (kWh)	COP max
23	6,19 ± 0,35	1.090 ± 50,16	0,90 ± 0,35
24	7,21 ± 0,35	1.271 ± 52,08	1,05 ± 0,36
25	7,11 ± 0,35	2.087 ± 51,84	1,07 ± 0,36

Fonte: Autoria própria (2023)

Devido ao clima da região de Ponta Grossa não apresentar temperaturas muito elevadas para o período de janeiro, as variações entre as temperaturas de entrada e saída do TCSA foram pequenas, resultando em baixas taxas de calor retiradas do ambiente. Devendo-se ao fato do ventilador radial usado ter elevado consumo de energia, os coeficientes de desempenho não apresentaram resultados expressivos quando comparados a outros trabalhos encontrados na literatura (MATHUR *et al.* (2017) e ELMINSHAWY *et al.* 2017).

Para os valores do COP nas datas de 5 e 6 de outubro de 2022, mesmo com a elevada carga térmica acrescentada ao ambiente não foi possível elevar de maneira significativa a diferença de temperatura entre a entrada e saída do TCSA, como observa-se na Tabela 10.

Tabela 9 - Valores obtidos para os 2 dias do mês de outubro de 2022

Dia	Δt_{max} (°C)	Q_{max} removido (kWh)	COP max
5	6,81 ± 0,35	1.198 ± 51,36	0,99 ± 0,035
6	5,84 ± 0,35	1.035 ± 49,68	0,86 ± 0,034

Fonte: Autoria própria (2023)

Desta forma, os valores baixos do COP quando comparados a outros trabalhos acadêmicos podem ser explicados por diversos fatores. Entre eles estão a potência elevada do ventilador, as baixas temperaturas de entrada do ar devido à localização do ambiente estudado em uma área com grande troca de calor com o restante do bloco, a temperatura pouco elevada nos dias estudados e a carga térmica necessária para o ambiente ser pequena.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma verificação experimental do desempenho térmico de um trocador de calor solo-ar. Para isto, realizou-se a construção do trocador com 48,20 metros de comprimento, na forma de serpentina, na posição horizontal, a uma profundidade de 1,5 m, ao lado do bloco J1 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa.

O comportamento do TCSA foi analisado para o caso de resfriamento, durante os meses de janeiro e outubro de 2022, visto que durante o período de inverno, a região da cidade de Ponta Grossa apresentou valores de temperaturas amenas, com poucas exceções, reduzindo a necessidade do TCSA para promover a climatização para este ano.

Para uma melhor investigação do desempenho do TCSA, dois ambientes idênticos (com e sem climatização) localizados no bloco J1, foram monitorados em termos da temperatura.

A partir dos resultados, verificou-se o bom desempenho do sistema, resfriando o ar de entrada até a temperatura do solo, em todo o período de funcionamento. Um comprimento de 30 m para a tubulação apresentou-se como suficiente para o equilíbrio térmico entre o ar e o solo. No entanto, ressalta-se que para longos períodos de funcionamento contínuo do TCSA, provavelmente um comprimento adicional seria necessário para evitar a saturação térmica do solo.

Entre os principais problemas identificados na instalação do TCSA foi o superdimensionamento do ventilador radial (2 cv), ocasionando uma elevação de temperatura de até 6 °C, entre a sua entrada e saída. Este efeito poderia ser reduzido, utilizando-se um ventilador axial de menor potência.

Outro problema identificado foi a elevação de temperatura nos últimos 3 metros da saída do trocador, em cerca de 1 °C. Atribui-se este fato a esta região da tubulação, mesma isolada, encontrar-se próxima a superfície do solo, onde foram observadas temperaturas de pico de aproximadamente 45 °C, neste período.

Ao comparar o desempenho do trocar nos ambientes climatizado e não climatizado, observou-se uma redução significativa no ambiente onde foi instalado o TCSA, mesmo quando submetido a geração interna de calor.

Em relação aos valores para o coeficiente de desempenho obtidos serem relativamente baixos, quando comparados a outros trabalhos presentes na literatura,

atribui-se este fato ao superdimensionamento do ventilador radial utilizado, no qual influenciou diretamente o valor do COP.

Por fim, o TCSA mostrou-se tecnicamente promissor para promover a climatização passiva de ambientes. Embora este trabalho tenha focado no desempenho do trocador para o resfriamento do ar, comportamento semelhante também é esperado para o aquecimento de edificações, principalmente em regiões mais frias.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se avaliar os efeitos da umidade do solo no desempenho do TCSA. Como o conteúdo de água dentro dos poros influencia diretamente as propriedades termo físicas do solo, este pode ter um valor otimizado para promover a maior eficiência do TCSA.

Novas análises utilizando um ventilador axial no TCSA também são recomendadas, visto que a potência dele influencia diretamente no COP do sistema.

Técnicas de otimização, como redes neurais, também estão sendo implementadas a partir deste trabalho, no intuito de se obter as melhores configurações para os TCSA para os diferentes climas encontrados no Brasil.

REFERÊNCIAS

- BANSAL, V. *et al.* Performance analysis of integrated earth–air-tunnel–evaporative cooling system in hot and dry climate. **Energy and Buildings**, v. 47, p. 525-532, 2012.
- BANSAL, V. *et al.* Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for winter heating. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 11, p. 1151-1154, 2009.
- BENHAMMOU, M; DRAOUI, B. Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 348-355, 2015.
- BORDOLOI, N. *et al.* An intense review on the latest advancements of Earth Air Heat Exchangers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 261-280, 2018
- BRUM, R. da S. **Teoria Construtal e desempenho térmico de trocadores de calor solo-ar**. 2016.
- BULUT, H. *et al.* Experimental analysis of an earth tube ventilation system under hot and dry climatic conditions. In: Proceedings of The 8th Mediterranean Congress of Heating Ventilation and Air-Conditioning-Climamed. 2015. p. 1-8 **Journal, International, Mechanical Engineering**, e Pahang Doi. 2014. Numerical Investigation of Ground Cooling Potential for. 10(December): 2081–90.
- CASALS, X. G. Analysis of building energy regulation and certification in Europe: Their role, limitations and differences. **Energy and Buildings** 38(5): 381–92, 2006
- CHOW, T.T. *et al.* Estimation of soil temperature profile in Hong Kong from climatic variables. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 12, p. 3568-3575, 2011.
- COSTA, V. A. C. **Trocas de calor entre edificações térreas e o solo e sua modelagem no pré-processador Slab**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- DÍAZ-HERNÁNDEZ, H. P. *et al.* Experimental study of an earth to air heat exchanger (EAHE) for warm humid climatic conditions. **Geothermics**, v. 84, p. 101741, 2020.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balço Energético Nacional (BEN) 2021**: Ano base 2021, 2021. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br> >. Acesso em mar/2021.
- ELMINSHAWY N. A. *et al.* Experimental investigation on the performance of earth-air pipe heat exchanger for different soil compaction levels. **Applied Thermal Engineering**, v. 124, p. 1319-1327, 2017..

FLORIDES, G.; KALOGIROU, S. Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications. **Renewable energy**, v. 32, n. 15, p. 2461-2478, 2007.

GRECO, A.; MASSELLI, C. The Optimization of the Thermal Performances of an Earth to Air Heat Exchanger for an Air Conditioning System: A Numerical Study. **Energies**, v. 13, n. 23, p. 6414, 2020.

GOSWAMI, D. Y.; Dhaliwal, A. S. 1985. Heat transfer analysis in environmental control using an underground air tunnel. **Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME** 107(2): 141–45.

HACINI, K. *et al.* Efficiency assessment of an earth-air heat exchanger system for passive cooling in three different regions: The Algerian case. **FME Transactions**, v. 49, n. 4, p. 1035-1046, 2021.

KHABBAZ, M. Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for buildings air refreshment in Marrakech. In: **BS2015, 14th International Conference of the International Building Performance Simulation Association**. 2015. Li, Haorong *et al.* 2014. Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat exchanger and solar chimney. *Renewable Energy* 62: 468–77.

LIN, J. *et al.* Impact of soil moisture on the long-term energy performance of an earth-air heat exchanger system. **Renewable Energy**, v. 147, p. 2676-2687, 2020.

MATHUR, A. *et al.* Comparative study of straight and spiral earth air tunnel heat exchanger system operated in cooling and heating modes. **Renewable Energy**, v. 108, p. 474-487, 2017 Mavroyanopoulos, G. N., e S. Kyritsis. 1983. “in-Ground Heat Exchangers”. *Agricultural and Forest Meteorology* 7(3): 265–78.

MENHOUDJ, S. *et al.* Study of the energy performance of an earth—Air heat exchanger for refreshing buildings in Algeria. **Energy and buildings**, v. 158, p. 1602-1612, 2018.

OZGENER, O.; OZGENER, L. Exergoeconomic analysis of an underground air tunnel system for greenhouse cooling system. **International Journal of Refrigeration**, v. 33, n. 5, p. 995-1005, 2010.

RODRIGUES, M. K. *et al.* Estudo do potencial térmico de trocador de calor solo-ar em dois tipos de solos no município de rio grande (RS). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 3, 2017.

ROSA, N. *et al.* Assessment of an earth-air heat exchanger (EAHE) system for residential buildings in warm-summer Mediterranean climate. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 38, p. 100649, 2020.

SAKHRI, N.; MENNI, Y.; AMEUR, H. Effect of the pipe material and burying depth on the thermal efficiency of earth-to-air heat exchangers. **Case Studies in Chemical**

and Environmental Engineering, v. 2, p. 100013, 2020.

TAYLOR, B. N. et al. **Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results**. Gaithersburg, MD: US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 1994.

SERAGELDIN, A. A.; ABDELRAHMAN, Ali K.; OOKAWARA, Shinichi. Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions: Experimental results, mathematical model, and Computational Fluid Dynamics simulation. **Energy Conversion and management**, v. 122, p. 25-38, 2016

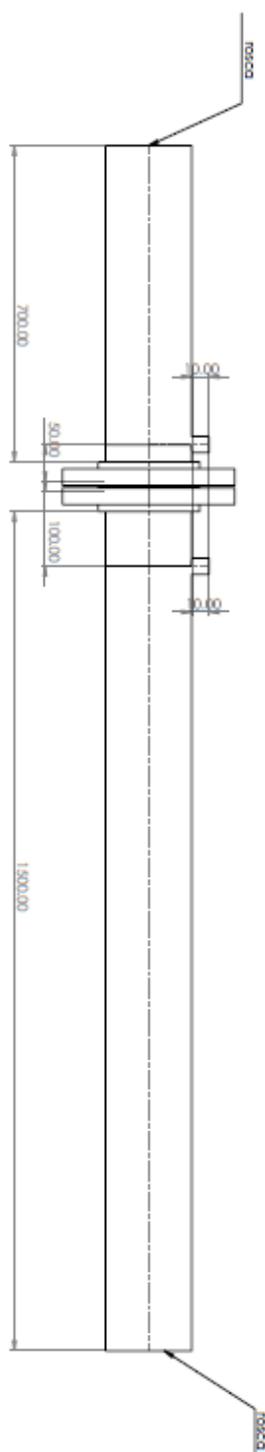
VASCONCELLOS, D. P. *et al.* **Análise numérica de um sistema passivo de climatização utilizando o solo como trocador de calor**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

VAZ, J. *et al.* An experimental study on the use of Earth-Air Heat Exchangers (EAHE). **Energy and buildings**, v. 72, p. 122-131, 2014.

VAZ, J. *et al.* Experimental and numerical analysis of an earth–air heat exchanger. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 9, p. 2476-2482, 2011.

APÊNDICE A– Projeto da placa de orifício

Figura 23 - Projeto da placa de orifício



Fonte: Autoria própria (2023)

APÊNDICE B – Montagem dos termopares

MONTAGEM DOS TERMOPARES

Devido à grande quantidade e à elevada extensão dos sensores, a solução mais viável economicamente foi a de realizar a compra do cabeamento e a posterior montagem e calibração dos sensores. Desta forma, utilizou-se termopares tipo K com bitola 24 awg, condutor positivo em CHROMEL, e negativo em ALUMEL com capa de PVC na cor amarela. Utilizou-se a Omega™ Fine Wire and Thermocouple Welder Figura 24 (a) para realizar a soldagem dos cabos.

Figura 24 - Soldagem de termopares

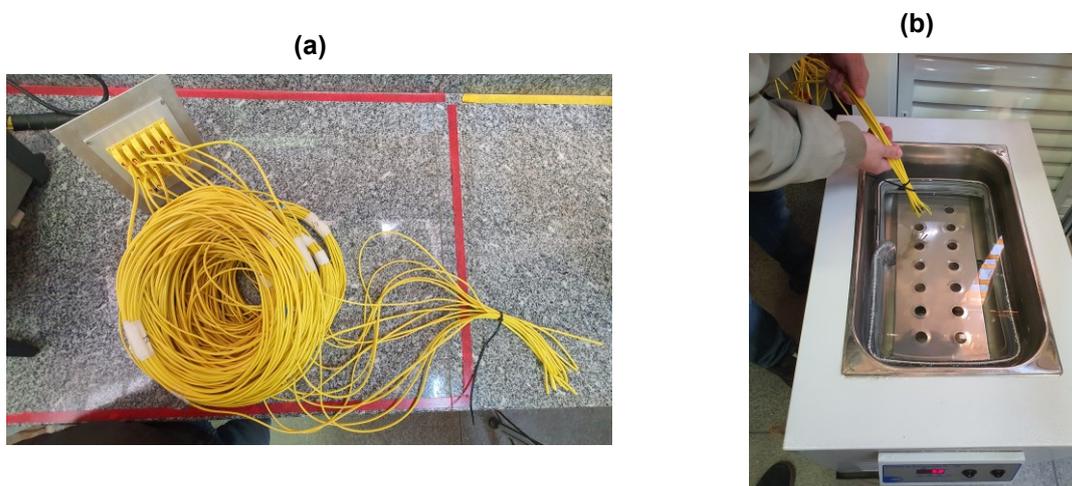


Fonte: Autoria própria (2023)

Após a soldagem, cada sensor tem sua continuidade testada com a utilização de um multímetro digital Minipa™ ET 2082-D para que a integridade do cabo e da solda seja verificada.

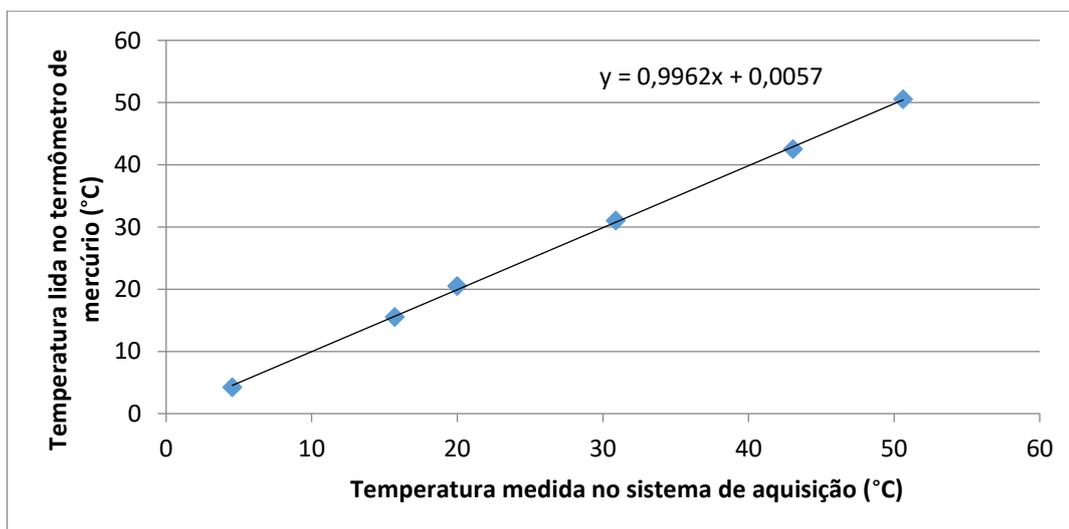
Um procedimento de calibração dos termopares foi realizado, permitindo assim, que a margem de erro seja conhecida e ajustada em cada caso no equipamento (Metrologia e a calibração de sensores de temperatura - Sensorweb, 2021).

Para esta calibração, os 17 sensores são agrupados e colocados em um banho Ultratestático Solab™ SL-130 (Figura 25 b). A temperatura então é obtida pelo sistema de aquisição de dados Keysight™ DAQ970, realizando oito medidas a cada variação de 10 graus indicada pelo termômetro de mercúrio Incoterm™ com incerteza de $\pm 0,5$ °C, começando em 5 °C indo até 55 °C.

Figura 25 - Calibração de termopares

Fonte: Autoria própria (2023)

Na sequência, um gráfico é montado para cada termopar, relacionando a média das leituras realizadas pelo sistema de aquisição de dados com as temperaturas medidas pelo termômetro de mercúrio. A substituição dos valores lidos pelo sistema de aquisição na equação ajustada do gráfico, fornece a leitura calibrada da temperatura medida, conforme a Figura 26.

Figura 26 - Exemplo de resultado de calibração

Fonte: Autoria própria (2023)