



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS JOINVILLE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE SISTEMAS  
ELETRÔNICOS

Victor Noster Kürschner

**Avaliação da geração de energia termoeétrica associada a tubos de calor para  
monitoramento de condições climáticas em rodovias**

Joinville

2022

Victor Noster Kürschner

**Avaliação da geração de energia termoelétrica associada a tubos de calor para  
monitoramento de condições climáticas em rodovias**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

Orientador: Prof. Kleber Vieira de Paiva, Dr.

Coorientador: Prof. Anderson Wedderhoff Spengler, Dr.

Joinville

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Kürschner, Victor Noster

Avaliação da geração de energia termoelétrica associada a tubos de calor para monitoramento de condições climáticas em rodovias / Victor Noster Kürschner ; orientador, Kleber Vieira de Paiva, coorientador, Anderson Wedderhoff Spengler, 2022.

156 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Joinville, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Sistemas Eletrônicos. 2. Geradores termoelétricos. 3. Tubos de calor. 4. LoRaWAN. 5. Monitoramento de autoestradas. I. Paiva, Kleber Vieira de . II. Spengler, Anderson Wedderhoff . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos. IV. Título.

Victor Noster Kürschner

**Avaliação da geração de energia termoeétrica associada a tubos de calor para monitoramento de condições climáticas em rodovias**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Kleber Vieira de Paiva, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Luís Fernando Caparroz Duarte, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.(a) Flávio José de Oliveira Morais, Dr.(a)  
Universidade Estadual Paulista

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Kleber Vieira de Paiva, Dr.  
Orientador

---

Prof. Anderson Wedderhoff Spengler, Dr.  
Coorientador

Joinville, 2022.

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe e aos meus queridos pais.

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe Neide e meu irmão Raul, pelos ensinamentos e pela minha educação. Agradeço pelo incentivo nos momentos difíceis e amparo que possibilitaram a realização deste trabalho.

À minha namorada Anaísa, por sua paciência, apoio e compreensão durante todo o período deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas pelo apoio e incentivo.

Ao professor Kleber Vieira de Paiva por sua orientação, pela oportunidade que me concedeu em realizar uma pós graduação de qualidade e pelo amparo necessário para realização dos trabalhos.

Aos professor Anderson Wedderhoff Spengler pela coorientação e compartilhamento de suas experiências no tema, que foram de grande relevância para conclusão deste trabalho.

A todos os professores do mestrado que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Para todos os colegas de mestrado que tive o prazer de conhecer. Aos amigos que tive a oportunidade de compartilhar o mesmo espaço nos laboratórios LISHA e T2F que acompanharam de perto o desenvolvimento do trabalho.

À UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina por meio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos (PPGESE), pelo suporte indispensável para a execução deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo suporte financeiro e auxílio durante o desenvolvimento do trabalho.

Enfim, a todas as pessoas e instituições que de alguma forma contribuíram com a realização deste trabalho.

“Se algum homem procura por grandeza, permita que ele esqueça a grandeza e pergunte pela verdade, e ele encontrará ambas.”  
(Horace Man, 1796-1859)

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo para alimentar um sistema autônomo de monitoramento de condições climáticas em autoestradas, empregando energia termoelétrica. Este protótipo é responsável por gerar, converter, gerenciar e armazenar a energia gerada a partir da energia térmica solar, do calor absorvido pela malha asfáltica e pelo solo. O trabalho propõe algumas abordagens para investigar o melhor funcionamento do gerador termoelétrico, como a utilização do solo como sumidouro de calor e utilização de dispositivos passivos de controle térmico como tubos de calor e materiais que mudam de fase. O circuito conversor deve ser capaz de realizar a conversão de maneira eficiente e com baixo consumo de energia, para isso, analisou-se três topologias de conversores comerciais, os modelos LTC3108, LTC3109 e um circuito conjunto entre os modelos EM8900 e BQ25570. O sistema de monitoramento proposto é capaz de realizar leituras de sensores que adquiram grandezas físicas pertinentes ao monitoramento climático de uma rodovia, como temperatura, umidade e pressão atmosférica. Além disso, estes sensores devem possuir características *ultra-low power* para melhorar a eficiência do sistema de geração. Todos estes dados adquiridos pelo sistema foram enviados pela tecnologia LoRa para um servidor onde os dados foram tratados e analisados. Como resultado principal, o protótipo gerou 286,24 Joules para um gradiente de temperatura máximo no TEG de 4,00 °C pico. O custo energético de transmissão pelo módulo LoRaWAN utilizado, transmitindo uma mensagem de 40 *bytes*, é de 0,625 Joules. O circuito proposto para aquisição dos dados climáticos possui um consumo teórico de 17,69 Joules. Foram realizados testes práticos com o conversor de modelo LTC3108, disponível no laboratório. Associado a este conversor foi utilizado um supercapacitor de 0,22 F, capaz de armazenar 2,60 J com um tempo para a primeira carga de 6240 s. Com uma carga completa, o supercapacitor pode realizar a transmissão de dados com o sistema LoRaWAN duas vezes. O presente trabalho obteve êxito em seu objetivo proporcionando uma boa base para futuros estudos voltados ao aproveitamento de energia termoelétrica em autoestradas. O trabalho resultou em um protótipo completo que pode ser aplicado em situações reais de rodovias.

**Palavras-chave:** Geradores termoelétricos. Tubos de calor. LoRaWAN. Monitoramento de autoestradas.



## ABSTRACT

This work aims to develop a prototype to power an autonomous system for monitoring highway weather conditions using thermoelectric energy. This prototype is employed for generating, converting, managing, and storing the energy generated from solar thermal energy, the heat absorbed by the asphalt and the soil. The work proposes some approaches to investigate the best functioning of the thermoelectric generator, such as using soil as a heat sink and using passive thermal control devices such as heat pipes. The converter circuit must perform the conversion efficiently and with low energy consumption. For this, three topologies of commercial converters were analyzed, models LTC3108, LTC3109, and a joint circuit between models EM8900 and BQ25570. The proposed monitoring system is able to perform readings from sensors that acquire physical quantities relevant to the climate monitoring of a highway, such as temperatures, atmospheric pressure and humidity. In addition, these sensors must have ultra-low power characteristics to improve the efficiency of the generation system. All these data acquired by the system must be sent by LoRa technology to a server where the data will be processed and analyzed. As a main result, the prototype generated 286.24 Joules for a maximum temperature gradient in the TEG of 4.25 °C. The energy cost of transmission by the LoRaWAN module, transmitting a message of 40 bytes, is 0.625 Joules. The circuit proposed for acquiring climate data has a theoretical consumption of 17.69 Joules. Experimental tests were carried out with the LTC3108 model converter available in the laboratory. A 0.22 F supercapacitor was associated with this converter, capable of storing 2.60 J with the first charging time of 6240 s. From these values, it was possible to carry out the data transmission with the LoRaWAN system twice. The present work successfully provided a reasonable basis for future studies on the use of thermoelectric energy on highways. The work resulted in a complete prototype that can be applied in real road situations.

**Keywords:** Thermoelectric generators. Heat Pipes. LoRaWAN. Highway monitoring.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Funcionamento dos componentes termoelétricos. (A) Efeito Seebeck. (B) Efeito Peltier. (C) Funcionamento real do gerador termoelétrico. ....	25
Figura 2 - Esquema de um módulo gerador termoelétrico - TEG. ....	26
Figura 3 - Esquema de funcionamento de um tubo de calor. ....	29
Figura 4 - Faixa de temperatura de operação de fluidos comumente utilizados. ....	30
Figura 5 - Número de mérito de fluidos de trabalho em função da temperatura de trabalho...	31
Figura 6 - Sistema proposto utilizando tubo de calor e dissipadores de calor para geração de energia termoelétrica a partir do solo e do ar. ....	34
Figura 7 - Potência estimada para o protótipo proposto por Lawrence; Snyder, (2002). ....	34
Figura 8 - Sistema proposto na literatura para coleta de energia termoelétrica com uso de tubos de calor. ....	35
Figura 9 - Protótipo proposto para utilização do solo como dissipador de um TEG. ....	36
Figura 10 - Proposta para coleta de energia térmica em fumarolas para monitoramento de vulcões. ....	37
Figura 11 - Protótipo proposto para recuperação de energia térmica utilizando tubos de calor, testado em laboratório. ....	38
Figura 12 - Protótipo de geração termoelétrica a partir de pavimento asfáltico com o auxílio de PCM. ....	39
Figura 13 - Classificação dos materiais de mudança de fase. ....	41
Figura 14 - Comparação da distância vs. largura de banda necessária da LPWAN com outras tecnologias. ....	45
Figura 15 - Ilustração da arquitetura de uma rede LoRaWAN. ....	46
Figura 16 - Estruturas das mensagens da camada física, (a) <i>uplink</i> e (b) <i>downlink</i> . ....	47
Figura 17 - Janela de <i>downlink</i> para dispositivos da classe A. ....	48
Figura 18 - Comparação entre vida útil da bateria e latência da comunicação de <i>downlink</i> do servidor entre as classes de dispositivos do protocolo LoRa. ....	49
Figura 19 - Esquema idealizado para instalação do sistema para captação da energia solar utilizando o solo e tubos de calor. ....	51
Figura 20 - Montagem do aparato experimenta, em que 1 são os tubos de calor, 2 as chapas de alumínio para fixação dos tubos e 3 a fixação dos tubos junto as placas. ....	51
Figura 21 - Esquema de fixação dos TEGs com uma chapa de alumínio junto aos tubos de calor. ....	52

Figura 22 - Placa de circuito impresso responsável pela leitura dos dados de temperatura do experimento. ....	54
Figura 23 - Placa de circuito impresso responsável pela coleta dos dados de temperatura e tensão e envio para o banco de dados pelo módulo LoRa. ....	55
Figura 24 - Circuito de interface utilizando Ampop para medição de tensões negativas do gerador termoelétrico. ....	55
Figura 25 - Circuito para aquisição da corrente elétrica do sistema de transmissão LoRa para levantamento de consumo energético do sistema. ....	57
Figura 26 - Módulo LoRaWAN, modelo RD49C da Radioenge. ....	58
Figura 27 - Esquema de ligação entre o RaspBerry Pi 2B e o módulo RHF0M301, com alteração no pino de <i>reset</i> para a GPIO 21 (pino físico número 40 do Raspberry Pi). ....	59
Figura 28 - Aparato desenvolvido para testes em laboratório. ....	63
Figura 29 - Posição dos termopares para coleta dos dados do experimento instalado em laboratório. ....	65
Figura 30 - Configurações testadas em campo para obter melhor eficiência na geração de energia termoelétrica. ....	66
Figura 31 - Posição dos termopares para as configurações instaladas em campo. (a) Posição dos termopares para as Configurações 01 e 02. (b) Posição dos termopares para as Configurações 03 e 04. (c) Posição dos termopares para as Configurações 05 e 06. ....	67
Figura 32 - Sistema instalado em campo, em (a) aparato na configuração 03 e em (b) na configuração 05. ....	68
Figura 33 - Bancada utilizada para testes com material de mudança de fase (cera de coco). ..	70
Figura 34 - Circuito do conversor LTC3108 utilizado nos testes. ....	71
Figura 35 - Temperaturas máximas ao longo dos tubos para o conjunto nos testes de laboratório em relação a potência inserida no sistema. Experimento instalado na horizontal. ....	74
Figura 36 - Temperaturas máximas ao longo dos tubos para o conjunto nos testes de laboratório em relação a potência inserida no sistema. Inclinação em 26 graus com evaporadores embaixo. ....	75
Figura 37 - Temperaturas máximas ao longo dos tubos para o conjunto nos testes de laboratório em relação a potência inserida no sistema. Inclinação em 26 graus com evaporadores em cima. ....	76

Figura 38 - Resistencia térmica dos tubos nos testes de laboratório pela potência. (a) Inclinação em 0 grau. (b) Inclinação em 26 graus com condensador em cima. (c) Inclinação em 26 graus com evaporador em cima.....	77
Figura 39 - Curva da temperatura da cera de coco ao ser aquecida até uma temperatura de 65 °C. ....	78
Figura 40 - Radiação solar na cidade de Itapoá-SC, medidas pela estação meterológica do INMET nos dias de testes para cada configuração.....	80
Figura 41 - Comparação das temperaturas ao longo do tubo de calor na Configuração 01, juntamente com as temperaturas do solo e ambiente. Dados da cidade de Joinville-SC no dia 16 de dezembro de 2021, em um dia de sol.....	82
Figura 42 - Comparação das temperaturas ao longo do tubo de calor na Configuração 03, juntamente com as temperaturas do solo e ambiente. Dados da cidade de Joinville-SC no dia 02 de fevereiro de 2022, em um dia de sol. ....	83
Figura 43 - Temperaturas ao longo do tubo, no solo e na aleta de alumínio para a configuração 04. Instalação dem Joinville-SC. ....	84
Figura 44 - Temperaturas das placas superior e inferior (lado quente e lado frio do TEG, respectivamente) para as cofigurações de 01 a 04 do sistema instalado em Joinville - SC. ....	85
Figura 45 - Temperaturas adiabáticas médias do tubo de calor instalado em 2 dias de condições climáticas distintas na cidade de Joinville-SC. Sistema instalado na Configuração 03. ....	87
Figura 46 - Temperaturas nas faces do geradore termoelétrico em condições climáticas distintas para a configuração 03, sistema instalado na cidade de Joinville - SC. ....	88
Figura 47 - Temperaturas do asfalto, ao longo do tubo e da aleta de alumínio para a configuração 05. Instalado em Joinville-SC.....	89
Figura 48 - Temperaturas do asfalto, ao longo do tubo e na aleta de alumínio para a configuração 06, em um dia de céu limpo e sol. Instalado em Joinville -SC, dados do dia 17/03/2022. ....	90
Figura 49 - Temperaturas das placas do lado quente e lado frio do TEG, para as cofigurações de 05 e 06 do sistema instalado em Joinville - SC. ....	91
Figura 50 - Radiação solar na cidade de Cruz Alta-RS, medidas pela estação meterológica do INMET nos dias de testes das configurações 01, 02 e 03. ....	92
Figura 51 - Comparação das temperaturas ao longo do tubo de calor na Configuração 01, juntamente com as temperaturas do solo e ambiente. Dados da cidade de Ijuí-RS no dia 11 de janeiro de 2022, em um dia de sol. ....	93

Figura 52 - Comparação das temperaturas ao longo do tubo de calor na Configuração 03, juntamente com as temperaturas do solo e ambiente. Dados da cidade de Ijuí-RS no dia 19 de janeiro de 2022, em um dia de sol. ....	94
Figura 53 - Temperaturas das placas superior e inferior (lado quente e lado frio do TEG, respectivamente) para as configurações de 01 a 03 do sistema instalado em Ijuí - RS.....	95
Figura 54 - Temperaturas nas faces do geradore termoelétrico em condições climáticas distintas para a configuração 03, sistema instalado na cidade de Ijuí - RS. ....	96
Figura 55 - Temperturas no interior do solo em duas profundidades diferentes, medições na cidade de Joinville - SC e Ijuí - RS. ....	97
Figura 56 - Temperaturas de referencia e de entrada para o controle via LabView do experimento instalado em laboratório. ....	99
Figura 57 - Temperaturas ao longo do tubo para o teste da configuração 06 com PCM realizado em laboratório.....	100
Figura 58 - Temperaturas nas faces do gerador termoelétrico para o sistema instalado na configuração 06 com PCM. ....	101
Figura 59 - Resistencia elétrica pela temperatura média no TEG com a linearização para obter equação da resistencia elétrica interna do gerador. ....	102
Figura 60 - Tensão em aberto nos terminais dos geradores termoelétricos para a configuração 01, instalado dia 16 de dezembro de 2021 em Joinville - SC.....	104
Figura 61 - Tensão em aberto nos terminais dos geradores termoelétricos para a configuração 03, instalado dia 02 de fevereiro de 2022 em Joinville - SC.....	105
Figura 62 - Tensão em aberto nos terminais dos geradores termoelétricos para a configuração 04, instalado no dia 24 de fevereiro em Joinville - SC.....	106
Figura 63 - Tensão em aberto nos terminais do TEG para as configurações 5 e 6. Sistema instalado em Joinville - SC.....	107
Figura 64 - Comparação para condições climáticas diferentes paro sistema instalado na Configuração 03. (a) Dia de sol com inicio de pancadas de chuva próximo às 13h (03/02/2022). (b) Dia de sol com nuvens (16/02/2022). (c) Dia de sol com poucas nuvens (02/02/2022). .	108
Figura 65 - Curva de potência pelo tempo para cada configuração testada em Joinville - SC. ....	110
Figura 66 - Tensões em aberto do gerador termoelétrico para as configurações 01, 02 e 03 para o aparato instalado em Ijuí - RS. ....	113
Figura 67 - Curva das potencias para as configurações 01, 02 e 03 instaladas em Ijuí - RS.	115

Figura 68 - Curva de potência elétrica durante um intervalo de 30 segundos de transmissão do sistema LoRa, enviando 40 bytes de dados. ....	117
Figura 69 - Funcionamento do conversor LTC3108 durante um dia de testes na configuração 03 em Joinville-SC no dia 16/02/2022. ....	123
Figura 70 - Menu de configuração do <i>gateway</i> do ChirpStack OS. ....	136
Figura 71 - Seleção do concentrador do <i>gateway</i> . ....	137
Figura 72 - Configuração do bloco de canais a ser utilizado. ....	137
Figura 73 - Configuração do ID do <i>gateway</i> e pino de reset utilizado. ....	138
Figura 74 - Monitoramento do status de cada componente do <i>gateway</i> LoRa. ....	138
Figura 75 - Criando network-server no Application Server do Chirpstack OS. ....	139
Figura 76 - Tela de criação do Service-profile no Application-server. ....	140
Figura 77 - Configurações do Device-profile utilizado. ....	140
Figura 78 - Página de informações gerais após criação do <i>gateway</i> no Application-server. .	141
Figura 79 - Cadastramento do dispositivo final no Application-server. ....	142
Figura 80 - Integração da aplicação criada no Chirpstack OS com o banco de dados InfluxDB. ....	143
Figura 81 - Exemplo do <i>dashboard</i> criado com o InfluxDB para coleta dos dados experimentais. ....	144
Figura 82 - Temperaturas ao longo do tubo para a configuração 02 testada em Joinville -SC. ....	146
Figura 83 - Tensão em aberto nos terminais dos geradores termoelétricos para a configuração 02 em Joinville - SC. ....	147
Figura 84 - Temperaturas ao longo do tubo para a configuração dois testada em Ijuí - RS. .	147
Figura 85 - Incertezas associadas a medição de potência do TEG para os testes com a Configuração 03. ....	150
Figura 86 - Incertezas associadas a medição de potência do sistema LoRaWAN. ....	151

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais recomendados para construção do tubo de calor para cada tipo de fluido de trabalho. ....	32
Tabela 2 - Especificações do <i>datasheet</i> para o modelo da TEGpro. ....	53
Tabela 3 - Comparação dos parâmetros da Configuração 03 para dias com diferentes condições climáticas, dados referentes a um dia completo. ....	109
Tabela 4 - Energia gerada em um dia pelos TEGs para cada configuração instalada em campo para condições climáticas onde o sol é predominante. ....	111
Tabela 5 - Energia gerada em um dia pelos TEGs para as configurações 01, 02 e 03 instaladas em campo para condições climáticas onde o sol é predominante. Sistema instalado em Ijuí -RS. ....	116
Tabela 6 - Energia consumida em 1 hora para cada configuração testada do sistema de aquisição de dados e transmissão utilizando protocolo LoRaWAN. ....	118
Tabela 7 - Número de transmissões possíveis da payload de 40 bytes para diferentes valores de supercapacitores. ....	119
Tabela 8 - Comparação dos conversores aplicados a <i>harvesting</i> , passíveis a serem utilizados no sistema proposto, com suas principais características de funcionamento. ....	120
Tabela 9 - Consumo de energia do circuito proposto para monitoramento climático de rodovias em comparação com a energia gerada pelo sistema de <i>harvesting</i> em um dia, coletando dados e enviando a cada 1h. ....	120
Tabela 10 - Consumo de corrente dos conversores quando não estão convertendo energia. .	121
Tabela 11 - Dados coletados experimentalmente do conversor LTC3108. ....	124
Tabela 12 - Geração de energia de <i>harvesting</i> aplicada a autoestradas de outros trabalhos. .	126

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
AmpOp	Amplificador Operacional
BW	<i>Bandwidht</i> (Largura de Banda)
CI	Circuito Integrado
CR	<i>Code Rate</i> (Taxa de Codificação)
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> (Verificação De Redundância Cíclica)
D/A	Digital/Analógico
LabView	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i> (Bancada de Engenharia de Instrumentos Virtuais de Laboratório)
LDO	<i>Low Dropout Linear Regulator</i> (Regulador Linear De Baixa Queda)
LoRa	<i>Long Range</i> (Longa Distância)
PCM	<i>Phase Change Material</i> (Material de Mudança de Fase)
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
SF	<i>Spread Factor</i> (Fator de Espalhamento)
SNR	<i>Signal-Noise Rate</i> (Relação Sinal-Ruído)
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> (Interface Serial Periférica)
SO	Sistema Operacional
TEG	<i>Thermoelectric Generator</i> (Gerador Termoelétrico)
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> (Transmissor/Receptor Assíncrono Universal)
ULP	<i>Ultra Low Power</i> (Ultra Baixo Consumo)
WAN	<i>Wide Area Network</i> (Rede de Longa Distância)



## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_{nom}$	Capacitância nominal	[F]
$E_{cap}$	Energia armazenada no supercapacitor	[J]
$P_{int}$	Potência Instantânea	[W]
$R_{in}$	Resistência Interna do TEG	[ $\Omega$ ]
$R_{t,ex}$	Resistência térmica experimental	[ $^{\circ}C/W$ ]
$R_L$	Resistência elétrica de carga	[ $\Omega$ ]
$S$	Coefficiente de Seebeck	[V/K]
$T$	Temperatura	[ $^{\circ}C$ ]
$\bar{T}$	Temperatura média	[ $^{\circ}C$ ]
$V_{cap}$	Tensão no Supercapacitor	[V]
$V_{out}$	Tensão de saída do TEG	[V]
$\Delta$	Varição de quantidade finita associada a incertezas e tolerâncias	[-]
$\Delta T$	Diferença de Temperatura	[ $^{\circ}C$ ]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1	OBJETIVOS .....	23
1.1.1	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>23</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>24</b>
2.1	GERAÇÃO DE ENERGIA TERMOELÉTRICA.....	24
2.1.1	<b>Efeito Seebeck, Peltier e Thomson .....</b>	<b>24</b>
2.1.2	<b>Gerador termoeletrico.....</b>	<b>26</b>
2.1.2.1	<i>Aplicações da geração de energia termoeletrica .....</i>	<i>27</i>
2.2	TUBOS DE CALOR .....	28
2.2.1	<b>Princípios de funcionamento .....</b>	<b>28</b>
2.2.2	<b>Componentes fundamentais dos tubos de calor .....</b>	<b>29</b>
2.2.2.1	<i>Invólucro.....</i>	<i>29</i>
2.2.2.2	<i>Fluidos de trabalho.....</i>	<i>30</i>
2.2.3	<b>Número de mérito .....</b>	<b>31</b>
2.2.4	<b>Compatibilidade.....</b>	<b>32</b>
2.2.5	<b>Limites operacionais.....</b>	<b>32</b>
2.2.6	<b>Aplicações de controle térmico passivo em tecnologias de <i>harvesting</i> termoeletrico .....</b>	<b>33</b>
2.3	MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCMs).....	39
2.4	CONVERSORES DC-DC APLICADOS A <i>HARVESTING</i> .....	41
2.4.1	<b>Conversores <i>Ultra-Low Power</i> .....</b>	<b>43</b>
2.5	A TECNOLOGIA LORA.....	43
2.5.1	<b>O protocolo LoRaWAN.....</b>	<b>45</b>
2.5.1.1	<i>Largura de banda/Taxa de dados e tipos de mensagens.....</i>	<i>46</i>
2.5.1.2	<i>Classes de dispositivos finais .....</i>	<i>47</i>

<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>50</b>
3.1	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO .....	50
<b>3.1.1</b>	<b>Componentes do protótipo</b> .....	<b>50</b>
3.1.1.1	<i>Gerador termoelétrico</i> .....	52
<b>3.1.2</b>	<b>Sistema de aquisição de dados</b> .....	<b>53</b>
3.1.2.1	<i>Desenvolvimento da rede LoRa</i> .....	57
<b>3.1.3</b>	<b>Circuito proposto para aquisição de dados meteorológicos</b> .....	<b>60</b>
3.2	CONFIGURAÇÕES DE TESTE .....	62
<b>3.2.1</b>	<b>Testes em laboratório</b> .....	<b>62</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Testes em campo</b> .....	<b>65</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Teste com material de mudança de fase</b> .....	<b>69</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Teste com circuito conversor de energia modelo LTC3108</b> .....	<b>70</b>
3.3	ANÁLISE DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS.....	71
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>73</b>
4.1	RESULTADOS DOS TESTES EM BANCADA DOS TUBOS DE CALOR .....	73
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE (PCM) .....	78
4.3	RESULTADOS DOS TESTES DE CAMPO.....	78
<b>4.3.1</b>	<b>Testes em campo: temperaturas</b> .....	<b>79</b>
4.3.1.1	<i>Análise das temperaturas em Joinville - SC</i> .....	79
4.3.1.2	<i>Análise das temperaturas em Ijuí - RS</i> .....	91
4.3.1.3	<i>Temperaturas do solo</i> .....	96
4.3.1.4	<i>Temperaturas do material de mudança de fase</i> .....	98
<b>4.3.2</b>	<b>Análise da potência teórica nos TEGs utilizados</b> .....	<b>101</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Testes em campo: geração de energia</b> .....	<b>103</b>
4.3.3.1	<i>Geração de energia em Joinville - SC</i> .....	103
4.3.3.2	<i>Geração de energia em Ijuí – RS</i> .....	112
<b>4.3.4</b>	<b>Avaliação do consumo da transmissão LoRa</b> .....	<b>116</b>

4.3.5	Consumo teórico do circuito de aquisição e transmissão de dados proposto.....	119
4.3.6	Avaliação dos resultados do conversor LTC3108.....	123
4.4	COMPARAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS COM A LITERATURA	125
5	CONCLUSÃO.....	128
5.1	TRABALHOS FUTUROS .....	130
	REFERÊNCIAS .....	131
	Apêndice A - CONFIGURAÇÃO DO CHIRPSTACK OS .....	136
	Apêndice B - APLICAÇÃO EM LINGUAGEM GO PARA INTEGRAÇÃO COM O BANCO DE DADOS INFLUXDB .....	145
	Apêndice C - DADOS ENCONTRADOS PARA A CONFIGURAÇÃO 02 .....	146
	Apêndice D - ANÁLISE DE INCERTEZAS .....	148
	Apêndice E - ESQUEMÁTICO COMPLETO DO CIRCUITO PROPOSTO DO MÓDULO HARVESTING.....	152
	Anexo A - FOLHA DE DADOS DO GERADOR TERMOELÉTRICO TE-MOD-22W-7V-56.....	154

## 1 INTRODUÇÃO

O monitoramento climático em rodovias é fundamental para o controle de tráfego e seguranças dos condutores de veículos. Como boa parte delas está distante da habitação humana é difícil fornecer energia elétrica para sensores de monitoramento, devido, principalmente, a indisponibilidade de uma malha elétrica e o seu custo de implantação ser elevado. Além disso, o emprego de baterias é limitado, pois elas devem ser trocadas ou recarregadas em intervalos regulares, o que exige manutenção recorrente. Para contornar este problema e aumentar o tempo de funcionamento destes dispositivos, fontes de energia alternativas vêm sendo pesquisadas para substituir as baterias. Chamada de colheita de energia (*energy harvesting*), que tem como desafio coletar a energia do meio ambiente e convertê-la em eletricidade utilizável (LI et al., 2018). O termo *energy harvesting* é utilizado para explicar o processo de captação de energia do ambiente, também pode ser apresentado como *power harvesting*. Possui diferentes formas de ser obtida como: vibrações, mecânicas, eletromagnéticas, luz, ondas acústicas, fluxo de ar, fluxo de calor ou variações de temperatura, representando uma fonte infinita de energia limpa disponível (YILDIZ, 2009).

Tratando-se de *energy harvesting* com emprego de energia térmica do ambiente tem-se, por exemplo: geração termoelétrica, termoacústica, heliotérmica, termomagnética e termiônica. O gerador termoelétrico (sigla em inglês, TEG) é capaz de converter gradientes de temperatura em energia elétrica, se tornando alternativa popular para alimentar pequenos dispositivos eletrônicos (ISHIYAMA; YAMADA, 2012).

Tecnologias de armazenamento de energia evoluíram significativamente, no entanto, esse progresso não tem sido capaz de equiparar-se com o desenvolvimento de sistemas microprocessados e microcontrolados, armazenamento de memória e tecnologias sem fio. Por exemplo, redes de sensores sem fio, sensores alimentados por bateria e módulos de longa duração (YILDIZ, 2009). Os sistemas de *harvesting*, em contrapartida, são uma solução para sistemas que operam em locais remotos e de difícil acesso, pois essas fontes, quando projetadas e instaladas corretamente, dispensam manutenção e podem alimentar o sistema durante toda vida útil de aplicação.

A seleção da fonte geradora deve ser considerada de acordo com as características da aplicação, portanto, para aplicações em rodovias, deve-se levar em conta as condições ambientais circunvizinhas, como por exemplo, vibrações mecânicas, temperatura da malha asfáltica, temperatura no interior do solo e a própria irradiação solar.

Geração de energia através de geradores termoelétricos é usualmente explorada em situações em que o gradiente de temperatura é alto, como em motores a combustão, fornos e tubulações industriais. Um caso específico, onde o gradiente de temperatura é criado unicamente para a geração termoelétrica, são os TEGs de radioisótopos aplicados em alguns satélites e sondas espaciais, em que isótopos radioativos são utilizados para gerar calor e converter em energia elétrica através do efeito Seebeck (CARVALHAES-DIAS; CABOT; SIQUEIRA DIAS, 2018).

Em aplicações em que o objetivo seja explorar o recurso do ambiente, onde a diferença de temperatura entre superfícies é baixa, o desempenho do sistema de captação/dissipação é crucial para o bom funcionamento do sistema termoelétrico (LAWRENCE; SNYDER, 2002). No trabalho de Fleurial et al. (1999), os autores propõem, por exemplo, o emprego de tubos de calor como forma de melhorar a transferência de calor do solo para o TEG. Os tubos de calor são dispositivos com elevada condutividade térmica que transportam o calor através de um mecanismo de mudança de fase utilizando um fluido, como a água. Estes dispositivos são utilizados em diversas aplicações, uma delas é a espacial, devido a seu funcionamento não depender da força gravitacional e por possuir massa reduzida em comparação a outros sistemas de controle passivo. Sua maior aplicação está relacionada com o resfriamento de componentes eletrônicos de computadores (REAY; KEW, 2006).

A coleta de energia do ambiente não seria viável sem a sua devida conversão para níveis de tensão adequados de utilização pelos circuitos eletrônicos e sistemas de armazenamento. Existem diversas formas de conversão, que dependem do tipo de sistema de geração utilizada. Para a geração termoelétrica que fornecem tensões com amplitudes baixas (*i.e.*, milivolts), pode-se aplicar circuitos integrados de conversores CC-CC elevadores e sistemas *ultra-low power* (ULP) de gerenciamento de energia (MARTINS, 2019).

O presente trabalho tem como objetivo principal a avaliação do emprego de energia termoelétrica em ambientes rodoviários, buscando encontrar o arranjo de instalação que apresente maior eficiência em termos de energia gerada em um dia, a partir de testes experimentais.

Também procura-se identificar o melhor circuito conversor a ser aplicado para a melhor condição encontrada e realizar uma análise teórica do melhor circuito de gerenciamento e conversão de energia, propondo um circuito autônomo capaz de converter e armazenar a energia gerada, além de adquirir sinais de sensores e transmitir estes dados utilizando comunicação sem fio baseado na tecnologia *Long Range* (LoRa).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Análise experimental do emprego de geradores termoelétricos associados a tubos de calor para alimentação de rede de sensores sem fio para monitoramento de condições climáticas de rodovias.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal é necessário concluir os seguintes objetivos específicos:

- Análise experimental em laboratório dos tubos de calor para avaliar seus limites de operação;
- Avaliar experimentalmente o comportamento térmico do tubo de calor e TEG nas condições de autoestrada;
- Desenvolvimento de protótipos conceituas de geração termoelétrica para aplicação em campo;
- Desenvolver rede LoRaWAN para transmissão dos dados coletados das condições de funcionamento do protótipo;
- Avaliar o consumo energético da transmissão LoRaWAN dos dados coletados experimentalmente;
- Calcular o consumo teórico do circuito de sensoriamento proposto;
- Comparar a eficiência do protótipo com a bibliografia.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre geradores termoelétricos, tubos de calor e uma breve explicação de seus componentes e funcionamento. Além disso, é apresentada uma revisão sobre conversores de potência aplicados a sistemas de *harvesting* e, por fim, uma revisão sobre a tecnologia LoRa e o protocolo LoRaWAN.

### 2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA TERMOELÉTRICA

Nesta seção serão apresentados tópicos relacionados aos efeitos termoelétricos, como ocorre a conversão de energia térmica em elétrica e quais componentes são utilizados para isso.

#### 2.1.1 Efeito Seebeck, Peltier e Thomson

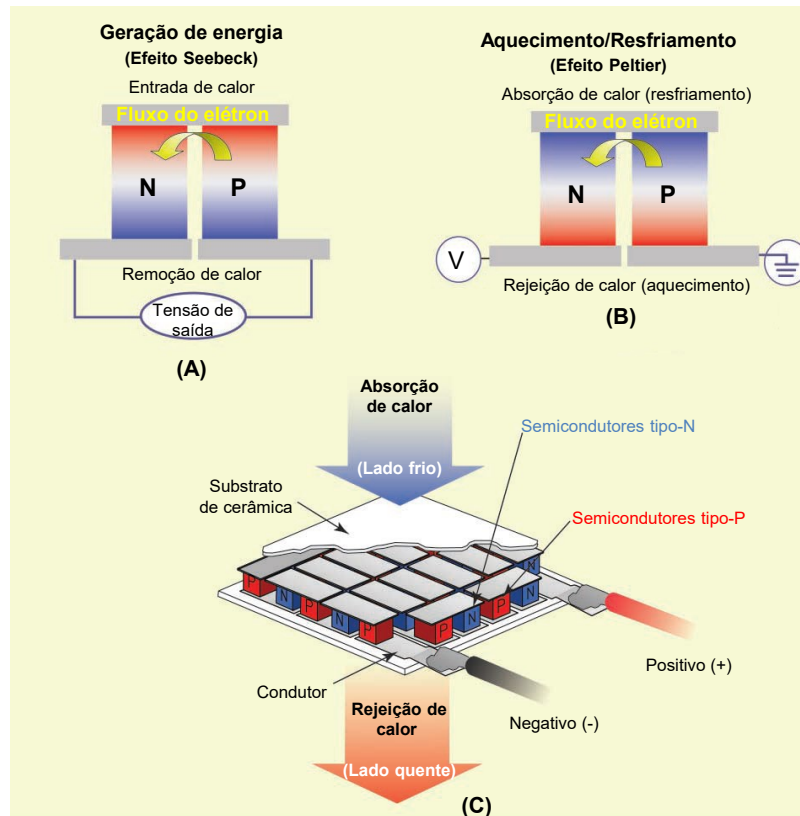
O estudo no campo da termoeletricidade tem como pioneiro Alessandro Volta, que realizou estudos em torno de 1794, tendo como objetivo descobrir a força termoelétrica originária de uma diferença de temperatura. Porém, foi só em 1821 que Thomas Johann Seebeck concluiu que a corrente induzida por uma diferença de temperatura era originária da força termoelétrica, o que hoje é conhecido como efeito Seebeck.

No experimento, Seebeck notou que uma agulha de bússola era desviada na presença de metais diferentes, ligados eletricamente em série e termicamente em paralelo e expostos a um gradiente de temperatura. Esse efeito observado é a base da geração termoelétrica, como visto na Figura 1a. Se a junção superior é aquecida e a inferior é resfriada pares de elétrons/lacunas são criadas na parte quente e absorvem calor no processo. As lacunas recombinam-se e dissipam o calor na parte fria. A partir da diferença de temperatura nas extremidades dos elementos termoelétricos, um potencial elétrico é criado, chamado de tensão de Seebeck, que direciona o fluxo de elétrons (BELL, 2008).

Em 1834, Peltier observou que se uma corrente for aplicada através de uma junção de dois materiais condutores, tanto o aquecimento quanto resfriamento ocorrem na junção. Quando a corrente é invertida, o efeito oposto é observado. A Figura 1b mostra o funcionamento deste princípio. Pode-se notar que o efeito Peltier é o oposto do efeito Seebeck (BELL, 2008).



Figura 1 - Funcionamento dos componentes termoeétricos. (A) Efeito Seebeck. (B) Efeito Peltier. (C) Funcionamento real do gerador termoeétrico.



Fonte: Adaptado de Bell (2008).

Anos mais tarde, William Thomson (Lord Kelvin) realizou um estudo relacionando os efeitos Seebeck e Peltier, constatando que o coeficiente de Peltier seria simplesmente o Seebeck vezes coeficiente de temperatura absoluta, assim, o efeito Thomson surgiu. Neste efeito, o calor é absorvido ou produzido quando a corrente flui em um material com uma diferena de temperatura. O calor é proporcional a intensidade de corrente elétrica e ao gradiente de temperatura, essa constante de proporcionalidade é chamada de coeficiente Thomson e é relacionada pela termodinâmica ao coeficiente de Seebeck (NORTHWESTERN UNIVERSITY, 2021).

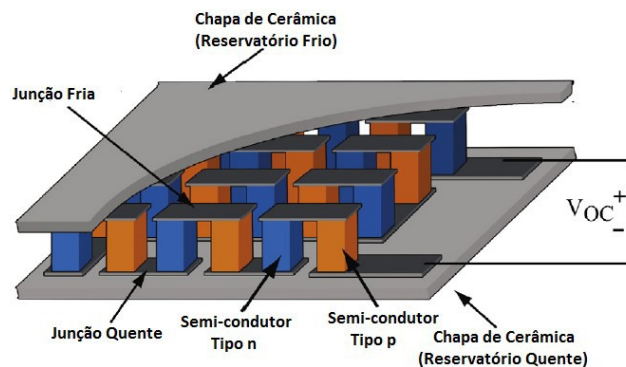
Estes efeitos são gerados em dispositivos termoeétricos como, por exemplo, o termopar, constituído por dois metais unidos de forma a construir uma junção. O termopar apresentado a seguir é chamado Gerador Termoeétrico (TEG).

### 2.1.2 Gerador termoelétrico

Um gerador termoelétrico é constituído de diferentes elementos semicondutores conectados entre si. O módulo é composto por elementos semicondutores do tipo N (elétrons livres) e do tipo P (lacunas de elétrons). Esses elementos são conectados termicamente em paralelo e eletricamente em série, fixados por placas de cerâmica soldadas que isolam e protegem a estrutura, como mostrado na Figura 2 (LEE, 2017).

Os geradores termoelétricos são utilizados na conversão de energia térmica em energia elétrica, podendo ser empregados em diversas aplicações que exijam baixo consumo de potência, geralmente atrelados ao conceito de *harvesting* de energia.

Figura 2 - Esquema de um módulo gerador termoelétrico - TEG.



Fonte: Martins (2019).

Uma forma básica de dimensionar o potencial elétrico nos terminais do gerador é por meio da Equação (1), que relaciona o coeficiente de Seebeck com o gradiente de temperatura, (PRIYA; INMAN, 2009).

$$V_o = \alpha(T_2 - T_1) \quad (1)$$

onde  $\alpha$  representa o coeficiente de Seebeck do gerador termoelétrico,  $T_2$  e  $T_1$  são as temperaturas do lado quente e lado frio em suas faces, respectivamente.

O desempenho de um dispositivo termoelétrico pode ser medido através do Número de Mérito  $Z$ , cuja unidade é  $1/K$ . Para determiná-lo, segundo Lee (2017), pode-se usar a Equação (2):

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho k} = \frac{\alpha \sigma}{k} \quad (2)$$

em que:  $\alpha$  é o coeficiente de Seebeck, em  $\mu V/K$ ;

$\rho$  a resistividade elétrica, em  $\Omega \cdot cm$ ;

$\sigma = 1/\rho$  é a condutividade elétrica, em  $(\Omega \cdot cm)^{-1}$ ;

$k$  é a condutividade térmica, dada em  $W/mK$ .

Para o Número de Mérito adimensional, definido por  $ZT$ , não existe nenhum limite teórico, porém, por décadas seu valor permaneceu próximo a 1 nos dispositivos existentes.

Os TEGs podem ser divididos em gerações, por exemplo, a primeira geração destes dispositivos surgiu nas décadas de 1950 e 1960, que possuíam aproximadamente 5% de eficiência na conversão de energia e seu valor de  $ZT \sim 1$ . Já na década de 1990, surgiram várias pesquisas após um longo tempo de estagnação. Após avanços experimentais foi possível, por meio da diminuição da condutividade térmica do dispositivo, aumentar seu Número de Mérito para valores de  $ZT \sim 1,3 - 1,7$ , o que por sua vez possibilitou a fabricação de dispositivos com uma eficiência de conversão de 11-15%. Esses dispositivos foram chamados de a segunda geração de TEGs (LEE, 2017).

A terceira geração dos dispositivos termoelétricos vem sendo desenvolvida recentemente. Esta terceira geração possui elevados valores de  $ZT$ , que variam de 1,8 a 2,2, dependendo do gradiente de temperatura em que o dispositivo é submetido, o que pode gerar uma eficiência de conversão entre 15-20% (LEE, 2017).

#### 2.1.2.1 Aplicações da geração de energia termoelétrica

Pode-se citar algumas aplicações de dispositivos termoelétricos, por exemplo: monitoramento de desempenho automotivo, segurança militar, biomedicina, agricultura, dispositivos remotos, entre outros (YILDIZ, 2009).

Sua principal vantagem é a condição de operação quase perpétua que o torna excelente para aplicações em locais remotos ou de difícil acesso. Sendo assim, pode-se aplicar geradores

termoelétricos para alimentar sensores e dispositivos eletrônicos em diversas condições, além de ser uma boa prática no uso de energias limpas.

Rowe (1995) enfatiza sobre as condições de pouca ou nenhuma manutenção e longa vida útil dos TEGs, sendo a maioria deles possuindo vida útil maior de 8000 horas. Como exemplo, o autor cita dispositivos que operam desde a década de 1960 e só necessitaram passar por vistorias e atualizações em seu sistema eletrônico na década de 1990.

Porém, devido sua baixa eficiência e potencial elétrico nos seus terminais, faz-se necessário a utilização de conversores de micropotência, responsável por converter a energia captada e armazenar em supercapacitores ou em baterias (MARTINS, 2019).

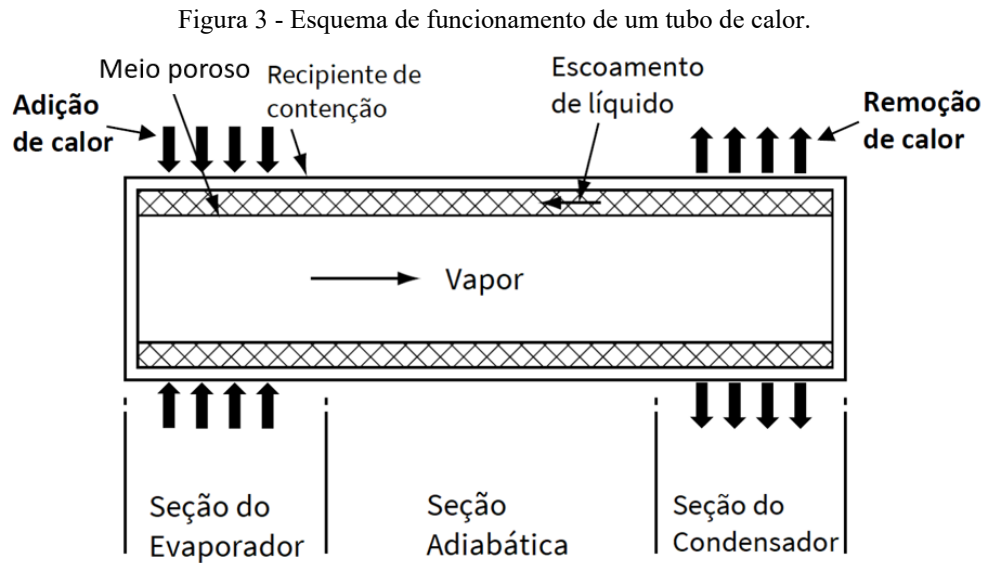
## 2.2 TUBOS DE CALOR

Nesta seção será descrito os princípios de funcionamento dos tubos de calor e seus limites operacionais. O tubo de calor será associado ao gerador termoelétrico, potencializando a geração elétrica.

### 2.2.1 Princípios de funcionamento

Existem diversos tipos de tubo de calor, porém para todos os casos, o mecanismo de funcionamento é semelhante; ou seja, na presença de uma mínima carga térmica, o fluido de trabalho irá circular ao longo do tubo.

Um tubo de calor consiste tipicamente de um invólucro – geralmente um tubo cilíndrico – com as extremidades seladas e com uma estrutura capilar em seu interior. O tubo é evacuado e preenchido com um fluido de trabalho saturando por completo a estrutura capilar. Um tubo de calor possui três regiões: o evaporador, o condensado e a seção adiabática. Quando o evaporador é exposto ao calor, o fluido na estrutura capilar é aquecido até vaporizar, ocasionando o aumento da pressão de vapor nesta seção, portanto, o vapor escoar em direção ao condensador. Nesta região, a remoção de calor faz com que o fluido condense, liberando calor latente de vaporização. As forças capilares existentes na estrutura capilar fazem com que o fluido condensado volte ao evaporador, fechando assim um ciclo de trabalho (PAIVA, 2007). A Figura 3 mostra o princípio de funcionamento do tubo de calor.



Fonte: Adaptado de Reay e Kew (2006).

## 2.2.2 Componentes fundamentais dos tubos de calor

Os tubos de calor são constituídos fundamentalmente por duas partes: o invólucro e o fluido de trabalho. Nesta seção serão abordados os diferentes tipos e a função de cada componente citado.

### 2.2.2.1 Invólucro

O invólucro é o material que irá conter o fluido de trabalho, por isso, deve seguir alguns critérios de escolha. O material que o tubo será construído deve resistir à pressão do vapor no interior do tubo, possuir temperatura de fusão maior que as temperaturas de operação e ser estável mecanicamente nestas faixas de operação. Além disso, deve possuir alta condutividade térmica para promover um eficiente transporte de calor entre os meios interno e externo. Também é válido observar se o material possui resistência a corrosão e é maleável o suficiente para ser trabalhado quando se necessita de tamanhos e formas diferentes (SANTO, 2017).

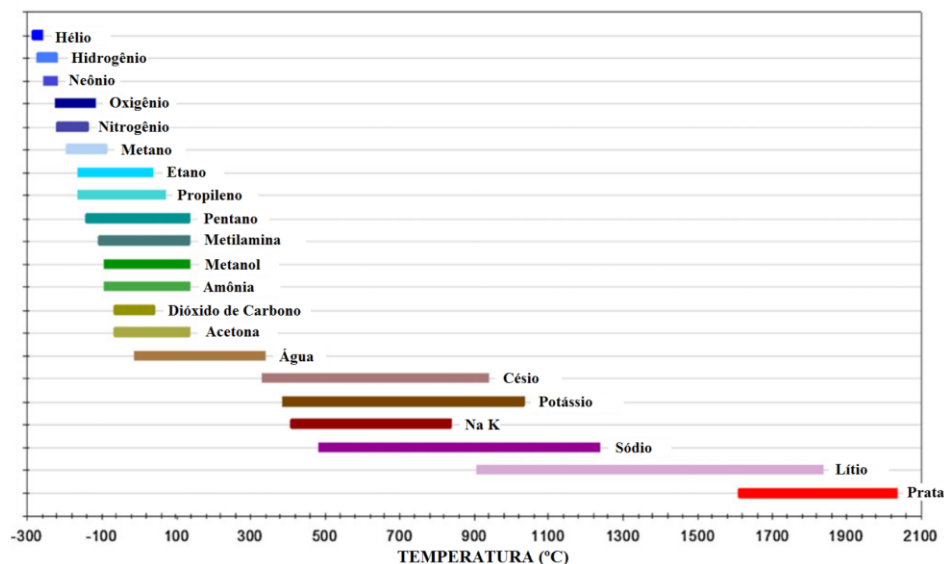
A escolha do material do tubo de calor depende da escolha do fluido de trabalho, pois cada fluido exercerá uma pressão de vapor diferente, portanto, quanto maiores as pressões de vapor, maior a espessura das paredes do tubo. Os materiais mais comuns são: cobre, alumínio, titânio, aço inoxidável, superligas, ligas fundidas e carboneto de silício à nitrato (SANTO, 2017).

### 2.2.2.2 Fluidos de trabalho

A escolha dos fluidos de trabalho é o primeiro passo para se projetar um tubo de calor, além de ser muito importante, sua escolha depende de certos fatores predefinidos, como por exemplo, a faixa de operação onde o tubo será utilizado na realidade. Na área aeroespacial, por exemplo, os fluidos mais comuns são a amônia, acetona e o metanol, pois possuem propriedades que auxiliam na permeabilidade através do meio poroso, além de suportar temperaturas negativas sem mudar para o estado sólido (VIESSER, 2018).

Para escolher o fluido de trabalho de um tubo de calor é importante observar alguns parâmetros, como a faixa de temperatura operacional, pressão de vapor, estabilidade, toxicidade, condutividade térmica e a compatibilidade química entre o fluido de trabalho e o material do invólucro do tubo. A faixa de temperatura de operação é um ponto importante no projeto de um tubo de calor, pois o fluido de trabalho deve ser utilizado entre as temperaturas críticas e de estado triplo. Portanto, cada fluido possui um intervalo de temperatura de operação, como apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Faixa de temperatura de operação de fluidos comumente utilizados.



Fonte: Nishida (2016).

Os tubos de calor construídos de cobre, normalmente, contêm como fluido de trabalho a água, tubos que usam prata como fluido, são feitos de tungstênio e tubos que utilizam amônia são feitos de aço inoxidável ou alumínio (FAGHRI, 1995).

### 2.2.3 Número de mérito

Para a escolha de um fluido de trabalho, geralmente, analisa-se dois fatores: a pressão do vapor e o número de mérito. A pressão que o vapor exercerá é uma variável que depende intimamente do valor da temperatura, já o número de mérito pode ser determinado, com algumas simplificações, pela Equação (3), de Kreith (2003),

$$M = \frac{\rho_1 \sigma_1 \lambda}{\mu_1} \quad (3)$$

em que:  $M$  = número de mérito,  $W/m^2$ ;

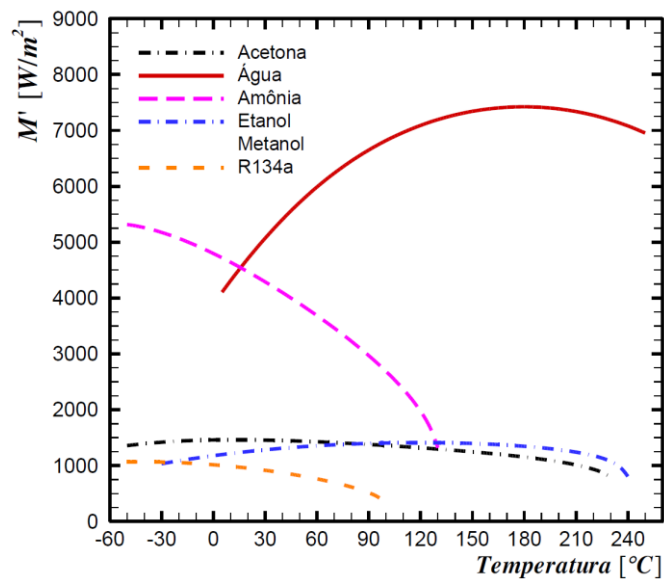
$\rho_1$  = densidade do fluido,  $kg/m^3$ ;

$\sigma_1$  = tensão superficial do líquido,  $N/m$ ;

$\lambda$  = calor de vaporização do líquido (calor latente),  $Pa \cdot s (kg/m \cdot s)$ .

A Figura 5 mostra o comportamento do número de mérito para alguns fluidos de trabalho, como água, metanol e acetona, entre outros, em uma faixa de temperatura de operação de -60 a 250°C. Quanto maior o número de mérito, maior será a capacidade de transporte de calor do fluido.

Figura 5 - Número de mérito de fluidos de trabalho em função da temperatura de trabalho.



Fonte: Nishida (2016).

## 2.2.4 Compatibilidade

A compatibilidade química entre o fluido e o invólucro é um ponto importante na fabricação de um tubo de calor. A escolha incorreta permitirá que ocorra geração de gases não condensáveis no interior do tubo, que prejudicam o desempenho térmico do tubo de calor. Na Tabela 1 são apresentadas algumas combinações de fluidos com o material do invólucro que são recomendadas.

Tabela 1 - Materiais recomendados para construção do tubo de calor para cada tipo de fluido de trabalho.

Fluidos de trabalho	Recomendado	Não recomendado
<b>Amônia</b>	Alumínio Aço carbono Níquel Aço Inoxidável	Cobre
<b>Acetona</b>	Cobre Sílica Alumínio Aço inoxidável	-
<b>Metanol</b>	Cobre Aço Inoxidável Sílica	Alumínio
<b>Água</b>	Cobre Monel Aço Inoxidável 347	Alumínio Sílica Inconel Níquel Aço carbono
<b>Potássio</b>	Aço Inoxidável Inconel	Titânio
<b>Sódio</b>	Aço Inoxidável Inconel	Titânio

Fonte: Adaptado de Reay e Kew (2006).

## 2.2.5 Limites operacionais

Os tubos de calor, que apesar de possuírem elevada eficiência de transferência de calor, possuem certos limites referente a esta troca de calor, chamados de limites operacionais. Os limites operacionais são: limite de arrasto, sônico, viscoso, de ebulição e capilar. Dentre todos, para os tubos de calor empregados neste estudo o limite capilar é o mais restritivo.

Conforme descrito por Reay e Kew (2006), o limite capilar, dentre todos os apresentados, é o que possui a maior restrição a tubos de calor para temperatura moderada, similar ao nível empregado neste estudo. Para o perfeito funcionamento do tubo de calor, a



estrutura capilar deve proporcionar ao dispositivo uma pressão capilar superior a todas as perdas de pressão que ocorrem ao longo do caminho do líquido e do escoamento de vapor, para que assim o fluido de trabalho possa retornar à seção do evaporador.

$$\Delta P_{c,\max} \geq \Delta P_l + \Delta P_v + \Delta P_g \quad (4)$$

onde:  $\Delta P_{c,\max}$ ,  $\Delta P_l$ ,  $\Delta P_v$ ,  $\Delta P_g$  são respectivamente: a pressão capilar máxima, a perda de pressão de líquido na estrutura capilar, a perda de pressão de vapor ao longo do tubo e a perda de pressão hidrostática devido a inclinação do tubo.

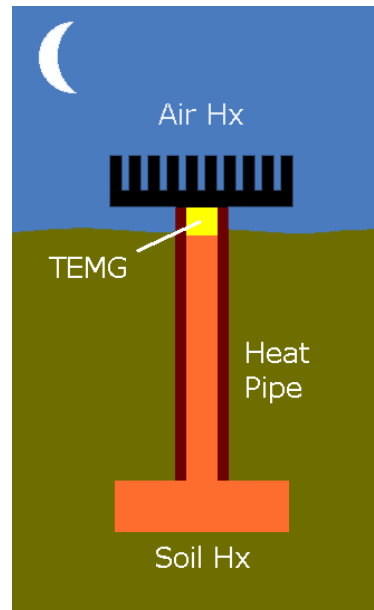
Durante a operação em regime permanente de um tubo de calor, a contínua evaporação no evaporador e a condensação no condensador fazem o fluido retroceder nas estruturas capilares do evaporador e inundar as do condensador. A combinação destes dois fenômenos gera a pressão capilar necessária para bombear o fluido de trabalho do condensador para o evaporador. Deste modo, a interface líquido-vapor varia continuamente ao longo do eixo axial do tubo de calor.

## 2.2.6 Aplicações de controle térmico passivo em tecnologias de *harvesting* termoeletrico

Nesta seção serão apresentadas as tecnologias de colheita de energia encontradas na literatura, que utilizem tubos de calor como forma de controle térmico passivo para as mais diversas fontes de energia térmica.

Uma aplicação relevante para os geradores termoeletricos é seu emprego em condições naturais de diferença de temperatura, i.e., entre o solo e o ar para gerar pequenas quantidades de energia elétrica. Portanto, sabendo da baixa eficiência dos TEGs, o desempenho dos dissipadores de calor para garantir o gradiente de temperatura ao longo dos lados do gerador é crucial. A partir disso, Lawrence e Snyder (2002) propõem um protótipo com um sistema passivo de dissipação de calor, mostrado na Figura 6, em um esquema simplificado do sistema proposto pelos autores.

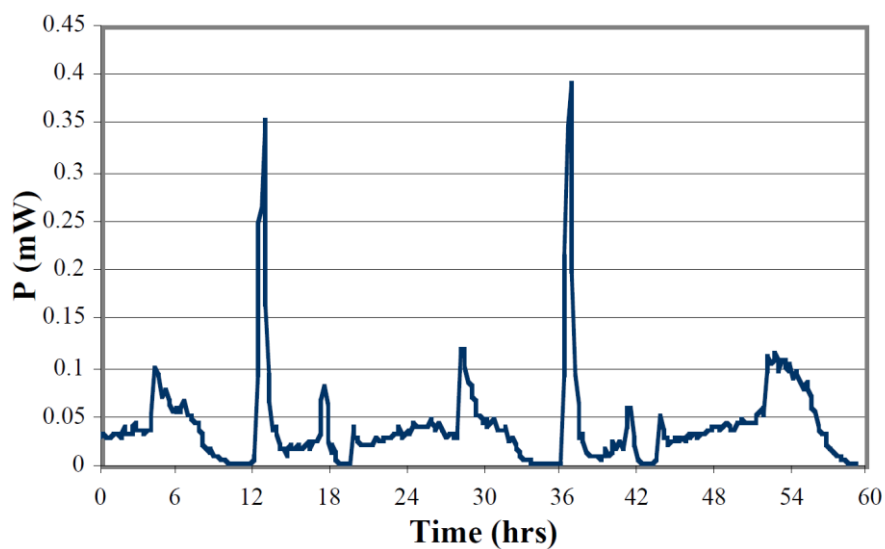
Figura 6 - Sistema proposto utilizando tubo de calor e dissipadores de calor para geração de energia termoelétrica a partir do solo e do ar.



Fonte: Lawrence e Snyder (2002).

O experimento foi enterrado verticalmente a 30 cm de profundidade. As temperaturas do dissipador de calor e do solo foram coletadas por 60 horas. Foi utilizado um tubo de calor a base de água de 30 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro. A partir de uma análise de fator de forma, os autores realizaram uma previsão da potência de saída do gerador termoelétrico do protótipo desenvolvido, mostrada na Figura 7, com um pico de potência próximo a 0,4 mW.

Figura 7 - Potência estimada para o protótipo proposto por Lawrence; Snyder, (2002).

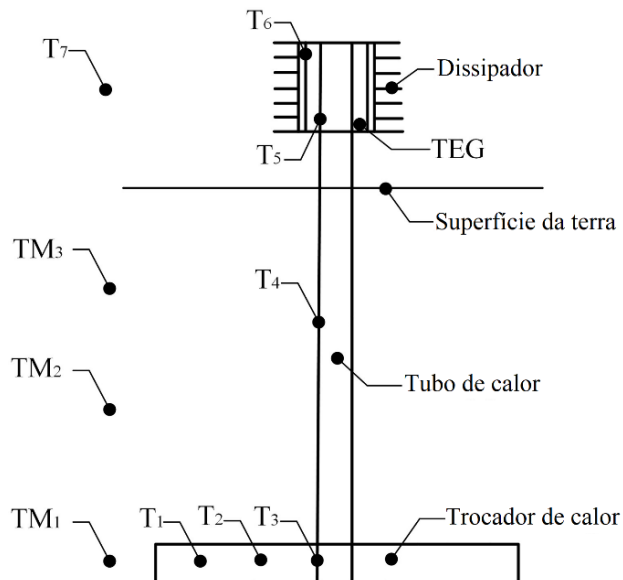


Fonte: Lawrence e Snyder (2002).

Huang et al. (2019) realizaram um trabalho com o objetivo de alimentar uma rede de sensores sem fio em áreas remotas de florestas. Os autores propuseram um sistema de coleta de energia utilizando geradores termoeletrônicos (TEG), com o auxílio de tubos de calor assistidos pela gravidade para transportar o calor da superfície do solo até profundidades inferiores, gerando um gradiente de temperatura entre o ar e o interior do solo aplicado sobre o TEG.

Durante 6 meses de experimento foram coletados até 128,74 J em um dia, e 5.509,92 J em um ciclo de geração. A Figura 8 mostra um esquema do experimento realizado, onde o tubo possui um diâmetro de 40 mm e um comprimento de 2,5 m, feito de aço inoxidável com fluido de trabalho composto de uma mistura de sal inorgânico.

Figura 8 - Sistema proposto na literatura para coleta de energia termoeletrica com uso de tubos de calor.



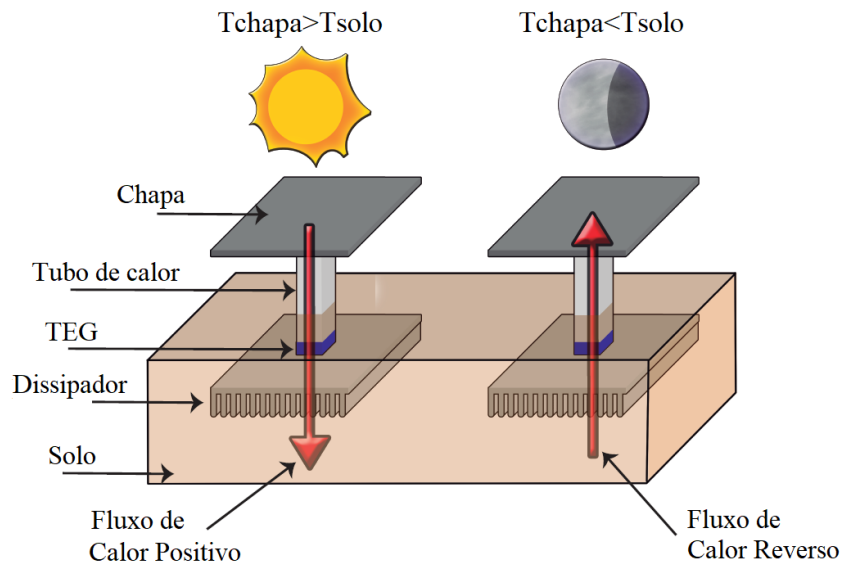
Fonte: Huang et al. (2019).

O TEG também pode coletar energia solar proveniente de painéis solares planos (fonte quente) e em diferentes configurações de dissipador de calor (fonte fria). Por exemplo, deixando o dissipador a temperatura ambiente ou através do uso de materiais de mudança de fase (PCMs) em contato com o elemento dissipador e com dissipadores enterrados no solo. Entre estas configurações, o uso do solo como o sumidouro de calor é interessante por possibilitar a geração durante o dia e a noite, sendo significativamente mais baratos que o uso de PCMs (CARVALHAES-DIAS; CABOT; SIQUEIRA DIAS, 2018).

O protótipo proposto pelos autores pode ser visto na Figura 9, onde a energia solar é coletada através de uma chapa de alumínio. Quando a temperatura da chapa está mais quente

que a temperatura do solo, o calor flui da superfície para o dissipador, porém, quando a temperatura do solo é maior, o calor flui no sentido contrário, indo do dissipador para a chapa na superfície. Para otimizar o desempenho do sistema, Lawrence e Snyder (2002) propôs o uso de tubos de calor como elemento responsável para realizar a transferência de calor entre a superfície até o solo. Porém, no trabalho de Carvalhaes-Dias; Cabot; Siqueira Dias (2018), foi utilizado uma barra de alumínio para realização dos testes, em substituição ao tubo de calor.

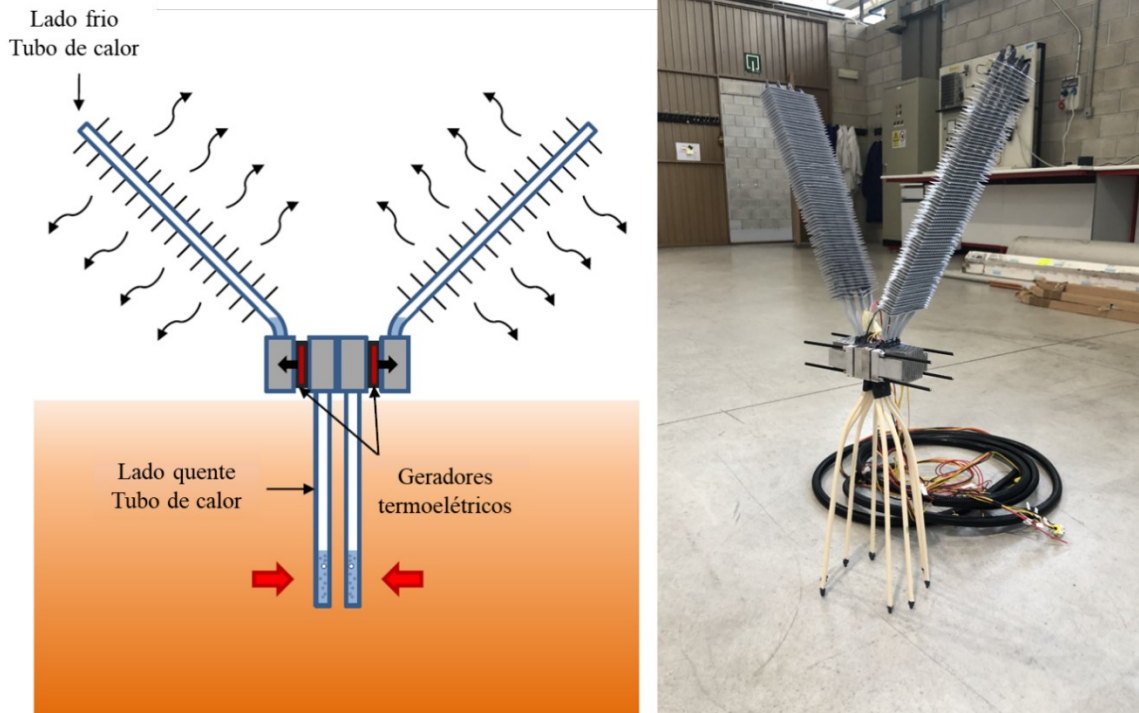
Figura 9 - Protótipo proposto para utilização do solo como dissipador de um TEG.



Fonte: Adaptado de Carvalhaes-Dias; Cabot; Siqueira Dias (2018).

A aplicação dos tubos de calor também foi utilizada por Catalan et al. (2020), ao aplicar a tecnologia em um sistema para coleta de energia para alimentar um sistema de monitoramento de vulcões. O sistema proposto é uma combinação de dissipadores de calor eficientes junto com tecnologias de IoT (*Internet of Things*). A solução foi testada em laboratório e em um vulcão real, situado nas Ilhas Canárias na Espanha. O sistema ficou instalado por 8 meses sem necessidade de manutenção, provando a robustez dos geradores termoeletricos. Como resultado, obteve uma geração média de 0,49 W e transmissão contínua via LoRa a 14 km de distância.

Figura 10 - Proposta para coleta de energia térmica em fumarolas para monitoramento de vulcões.

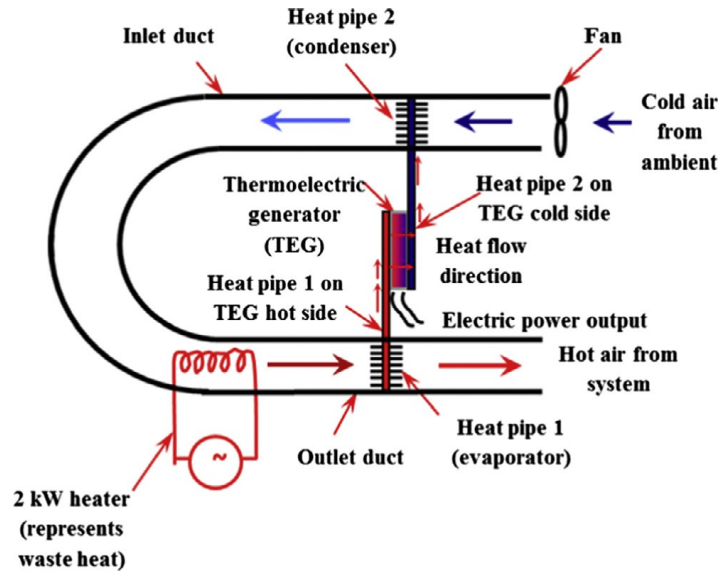


Fonte: Adaptado de Catalan et al. (2020).

Neste estudo, os autores utilizaram para cada módulo termoelétrico quatro tubos de calor de 450 mm de comprimento e 8 mm de diâmetro, conectados a uma chapa de alumínio para fixação. Para o lado frio, foi utilizado tubos de calor de 500 mm de comprimento que foram inseridos na base dos dissipadores de alumínio. Além disso, foi adicionado dezessete aletas corrugadas ao longo dos tubos para o aumento da dissipação de calor para o ambiente (CATALAN et al., 2020).

O uso de tubos de calor também está associado a recuperação de calor para geração de energia simultânea baseada em TEGs, como mostra o trabalho de Remeli et al. (2015). Neste estudo foram empregados dois tubos de calor para gerar um gradiente térmico entre duas tubulações, uma passando ar quente e outra ar ambiente. O sistema se propõe a aplicar os geradores termoelétricos como um método passivo de recuperação de energia térmica. A partir de 8 módulos geradores os autores foram capazes de recuperar 1,345 kW de energia térmica e gerar 10,39 W de energia elétrica. O protótipo testado é mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Protótipo proposto para recuperação de energia térmica utilizando tubos de calor, testado em laboratório.

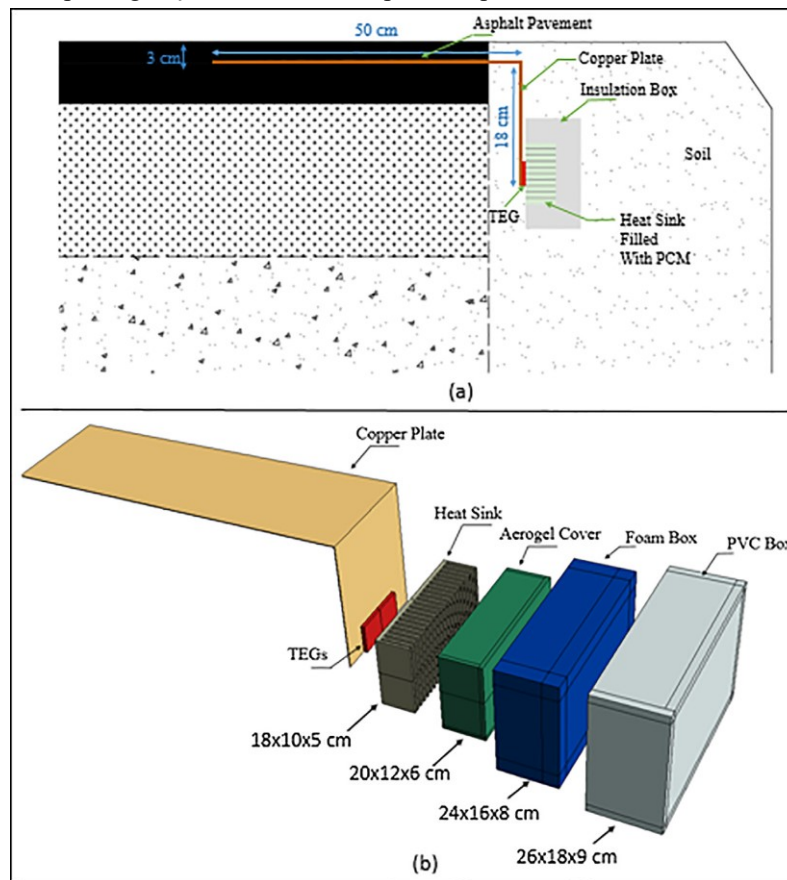


Fonte: Remeli et al. (2015).

O uso de controle térmico passivo em geração de energia termoelétrica também pode ser realizado utilizando PCMs (*Phase Change Materials*) ou, materiais de mudança de fase, como mostra Tahami et al. (2019). Os autores utilizaram dissipadores de calor preenchidos com um material de troca de fase para captação de energia térmica de rodovias. O sistema proposto é mostrado na Figura 12.

O protótipo foi instalado em *San Antonio*, Texas, e foi capaz de gerar gradientes térmicos de até 16 °C nas extremidades do TEG, fornecendo uma potência média de saída de 29 mW e gerando aproximadamente 835 J em 8 h por dia, em uma área de 0,5 m por 0,2 m.

Figura 12 - Protótipo de geração termoeétrica a partir de pavimento asfáltico com o auxílio de PCM.



Fonte: Tahami et al. (2019).

### 2.3 MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCMS)

Em geral, os métodos de armazenamento térmico são classificados como dois tipos pela literatura, os ATCL (Armazenamento Térmico De Calor Latente) e os ATCS (Armazenamento Térmico De Calor Sensível). Segundo Monteiro (2018), os ATCS armazenam energia térmica por meio da variação de temperatura e a efetividade deste material depende principalmente do calor específico e da densidade do material.

A água é um dos materiais mais utilizados como material ATCS devido ao baixo custo e elevado calor específico, porém, acima de 100 °C, geralmente utilizam-se óleos, sais fundidos e metais líquidos.

O método ATCL se dá pela absorção e liberação de calor quando um material muda de fase. Esses tipos de materiais possuem algumas vantagens, como: dimensões reduzidas e baixa quantidade de material para uma dada capacidade de armazenamento (SHARMA et al., 2009).

Esses materiais são denominados materiais de mudança de fase, ou PCM – *Phase Change Material*. Os PCMs absorvem energia enquanto esquentam e também podem fornecer esta energia armazenada no processo de resfriamento (PIELICHOWSKA; PIELICHOWSKI, 2014). Pesquisas mostram que os PCMs podem armazenar até 4 vezes mais energia que sistemas de armazenamento por calor sensível, entretanto, sua baixa condutividade térmica e variação da densidade em diferentes estados do material são algumas das maiores dificuldades ao utilizar-se PCMs (SHARMA et al., 2015).

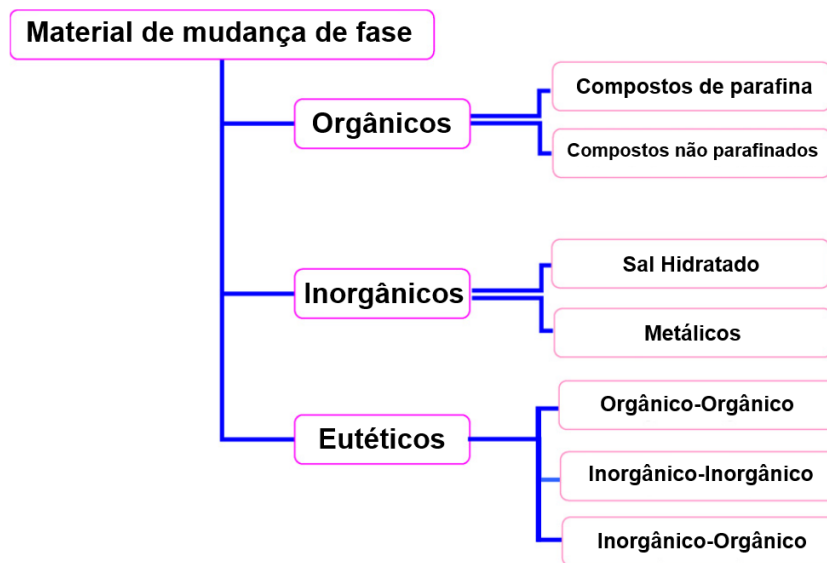
De acordo com Pielichowska e Pielichowski (2014), os PCMs podem ser classificados em três grupos baseados em sua temperatura de fusão. O primeiro grupo é dos materiais que operam em baixas temperaturas, em que a mudança de fase ocorre em torno de 15 °C, sendo utilizados em ar condicionados e indústria alimentícia. O segundo grupo são os PCMs de média temperatura, sua faixa de operação está entre 15 e 90 °C, são materiais mais populares e possuem aplicações nas áreas de energia solar, médica, têxtil e eletrônica. Por fim, o terceiro grupo são de materiais de alta temperatura, acima de 90 °C e sua aplicação se dá principalmente na indústria, usinas heliotérmicas e aplicações espaciais.

Contudo, na literatura, os materiais de mudança de fase comumente são classificados em inorgânicos, eutéticos e orgânicos, como mostra a Figura 13. O grupo de PCMs inorgânicos é composto de sais hidratados e materiais metálicos, os eutéticos são compostos por dois materiais de origem orgânica ou inorgânica (SHARMA et al., 2015).

Os materiais orgânicos possuem duas classes: parafínicos e não-parafínicos. As parafinas são encontradas em uma larga escala de temperatura e são consideradas seguras, confiáveis, não corrosivas e mais baratas. Além de serem inertes e possuírem pouca variação de volume ao trocar de fase. Os materiais orgânicos possuem uma maior estabilidade térmica e química em um elevado número de ciclos térmicos em relação aos materiais inorgânicos (SHARMA et al., 2009).



Figura 13 - Classificação dos materiais de mudança de fase.



Fonte: Adaptado de Sharma et al. (2009).

As ceras parafínicas são ótimas escolhas para serem usadas como materiais de mudança de fase devido ao seu elevado calor latente de fusão, estabilidade e inércia química. O calor específico e a entalpia de fusão destes materiais são relativamente elevados em relação aos materiais orgânicos, assim, se tornam um material de potencial interesse. No entanto, a parafina é um derivado do petróleo, significando que o uso da parafina como material de mudança de fase se torna semelhante ao uso de combustíveis fósseis. A parafina não é um material renovável, porém, as ceras naturais, que são extraídas a partir de frutas, nozes, sementes e plantas possuem vantagens do ponto de vista ambiental e sustentável, o que a torna interessante como substituta de materiais parafínicos (HU; YU, 2014).

#### 2.4 CONVERSORES DC-DC APLICADOS A *HARVESTING*

O emprego dos conversores é necessário devido à baixa tensão de saída fornecida pelos geradores termoelétricos, portanto, técnicas eficientes de conversão CC-CC são necessárias (MARTINS, 2019).

A eletrônica de potência é essencial para um sistema de *harvesting*. O uso de energia renovável para gerar energia em pequena ou grande escala, associado com o aumento da eficiência da transmissão e consumo de eletricidade são os pilares da sustentabilidade (MOHAN, 2014).

Em sua maioria, os equipamentos eletrônicos utilizados atualmente, como computadores pessoais e sistema de entretenimento, são alimentados pela rede elétrica (corrente alternada) e necessitam, internamente, tensões contínuas reguladas. Logo, estes dispositivos carecem da eletrônica de potência para conversão de corrente alternada para contínua, geralmente valores baixos de tensão CC. Outro exemplo de aplicação da eletrônica de potência é em dispositivos alimentados por bateria. Segundo Mohan (2014), diversos dispositivos operam com tensões baixas de bateria, como por exemplo, telefones celulares. Contudo, seus circuitos internos necessitam de tensões maiores para correto funcionamento, exigindo um conversor elevador de tensão (*boost*) para regular a tensão da bateria em níveis maiores.

Os conversores CC-CC podem ser vistos como abaixadores e/ou elevadores de tensão. Conversores abaixadores são conhecidos como *buck* e conversores elevadores como *boost*, são tidos como topologias básicas de conversores não-isolados. As demais topologias não-isoladas de conversores são: *Buck-boost*, Cúk, Zeta e SEPIC e são derivadas da associação das duas topologias básicas. Já as topologias isoladas são: *Forward* (conversor *buck* isolado), *Flyback* (conversor *Buck-boost* isolado), *Push-pull*, meia ponte (*Half-bridge*) e Ponte completa (*Full bridge*) (MARTINS, 2019).

No geral, as aplicações de *harvesting* de baixa energia empregam conversores do tipo *boost*, porém, segundo Richelli, Colalongo e Kovacs-Vajna (2016) existem três métodos fundamentais que podem ser utilizados para alcançar a conversão CC-CC:

- Conversão LDO (*low drop-out*): neste tipo de conversão utiliza-se a conversão linear de divisores resistivos para baixar a tensão de saída.
- *Step-up* e *step-down*: este tipo de conversor utiliza um interruptor de carga comutada para realizar a conversão elevadora e abaixadora. Há de capacitores que armazenam a energia e possuem chaveamento.
- Conversores chaveados: estes conversores utilizam a combinação de indutor e capacitor, juntamente com um circuito comutador. O seu princípio de operação é semelhante ao segundo método.

Comumente nas aplicações de *harvesting*, onde a tensão fornecida é baixa, são aplicados conversores CC-CC do tipo *Boost* (elevadores de tensão). Algumas empresas, como a *Texas Instruments* e a *Linear Technology*, fornecem uma série de conversores com diferentes topologias para diversos tipos de aplicação. Os conversores são apresentados em formas de Circuitos Integrados (CIs) de *ultra-low power*. As aplicações variam, pode-se citar alguns

exemplos, como: rede de sensores sem fio (RSSF), baterias solares, dispositivos de saúde portátil, *harvesting* de energia, entre outros (TEXAS INSTRUMENTS, 2019).

Tensões na faixa de 5 V podem ser alcançadas por conversores comerciais para *harvesting*, porém, segundo Richelli, Colalongo e Kovacs-Vajna (2016), na maioria dos casos precisa-se de ao menos 1 V na tensão de entrada e uma potência mínima para iniciar sua conversão. Em geral, os transdutores de *harvesting* fornecem uma tensão elétrica abaixo de 1V e uma potência em torno de 1 mW. Arquiteturas específicas são necessárias para estas aplicações, tendo isto em vista, diversas topologias de baixa tensão e potência tem surgido nos últimos anos, tanto na indústria como no meio acadêmico (ADAMI et al., 2012).

#### 2.4.1 Conversores *Ultra-Low Power*

Os conversores ULP podem ser divididos em três categorias, segundo Richelli, Colalongo e Kovacs-Vajna (2016):

- Conversores capacitivos (*Charge pump*);
- Conversores indutivos;
- Híbridos (Indutivo + capacitivo).

Segundo os autores, os conversores mais eficientes e que possuem maior faixa de tensão de entrada e saída são os modelos indutivos, porém, deve se observar quais são os princípios de operação e as fontes energéticas utilizadas. Além da eficiência geral, deve-se observar outros parâmetros antes de definir o conversor a ser utilizado, como a tensão mínima de partida a frio, a capacidade de fornecimento de tensão regulada, capacidade de reconfiguração, a capacidade de ser integrado totalmente em um *chip*, entre outros (RICHELLI; COLALONGO; KOVACS-VAJNA, 2016).

#### 2.5 A TECNOLOGIA LORA

A tecnologia LoRa, pertencente a camada física da tecnologia LPWAN, é uma modulação sem fio que oferece uma atraente combinação entre longo alcance, baixo consumo de energia e segurança na transmissão dos dados. Possui modulação baseada no espalhamento espectral – *Chirp Spread Spectrum* (CSS), na qual o símbolo é codificado em uma longa sequência de bits (*chirp*), fazendo a redução da relação sinal ruído (SNR) e a taxa de

interferência que o receptor precisa corrigir, sem mudar a largura de banda da frequência do sinal (SEMTECH, 2021).

A modulação CSS foi muito aplicada na área militar, devido sua robustez a interferências e seu longo alcance de comunicação. Devido a propagação (*Spread Factor*) ser variável, é possível alterá-lo em busca de uma taxa de transferência ideal para a aplicação desejada. Sua mudança afeta a taxa de transmissão de dados, que pode ser diminuída em detrimento de uma maior área de cobertura ou menor consumo de energia (ARRUDA, 2019).

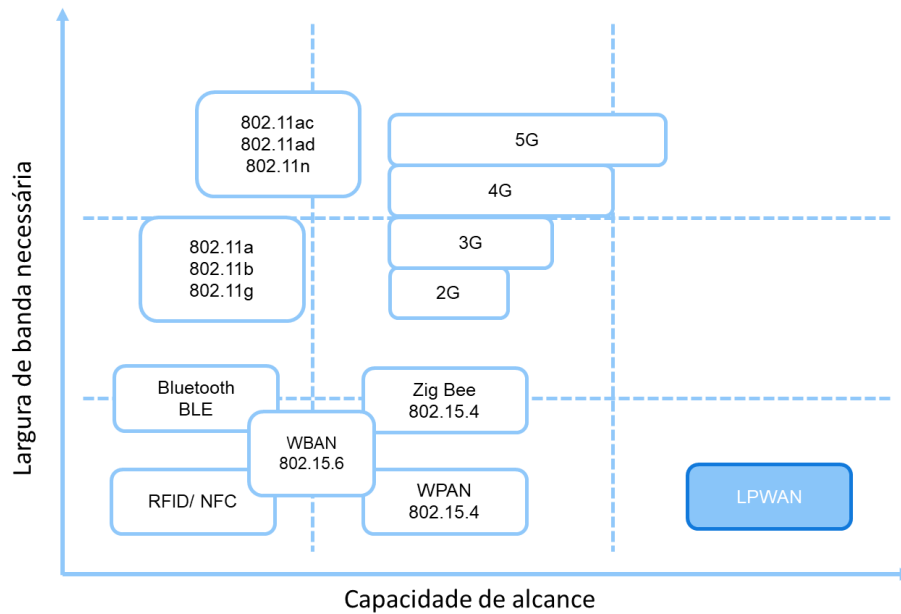
Alguns parâmetros são customizáveis na modulação LoRa, por exemplo, a Largura de Banda (BW), o Fator de Espalhamento (SF) e a Taxa de Codificação - *Code Rate* (CR). Tais parâmetros influenciam a taxa de bits efetiva da modulação, sua resistência a ruídos e sua facilidade de decodificação, tendo como principal parâmetro a largura de banda (ARRUDA, 2019).

Aplicações IoT podem ser divididas em *indoor* e *outdoor*, tendo como diferencial a distância de comunicação entre elas, podendo, muitas vezes, possuir o mesmo objetivo e aplicar a mesma tecnologia de comunicação (DE ANGELIS et al., 2015). Como exemplos de aplicações *indoor* tem-se o controle automático de temperatura do ambiente, sistema de iluminação, etc. Já para sistemas *outdoor*, pode-se citar a agricultura de precisão, sensoriamento de rios e outros locais de interesse (TEIXEIRA; ALMEIDA, 2017).

Em aplicações *outdoor* de longo alcance, uma das alternativas é a rede WAN (*Wide Area Network*), que possui tecnologias difundidas atualmente, como as redes de celular (e.g., 2G, 3G e 4G), com infraestrutura instalada e grande área de cobertura. Porém, apesar de proverem grande área de cobertura, consomem muita energia. Para aplicações que requerem econômica de energia tem-se a LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) (MEKKI et al., 2019).

Da mesma maneira que redes de celular, as tecnologias LPWAN são caracterizadas por *links* de longa distância, na ordem de quilômetros, possuindo topologia de rede estrela, com os nós conectados diretamente a um concentrador que atua como *gateway* para o protocolo da internet (VANGELISTA; ZANELLA; ZORZI, 2015). A diferença para a tecnologia GSM (*Global System for Mobile Communications*) está no baixo consumo de energia, por isso as LPWANs possuem largura de banda limitada (ARRUDA, 2019). A comparação entre largura de banda e distância da LPWAN com outras tecnologias pode ser vista na Figura 14.

Figura 14 - Comparação da distância vs. largura de banda necessária da LPWAN com outras tecnologias.



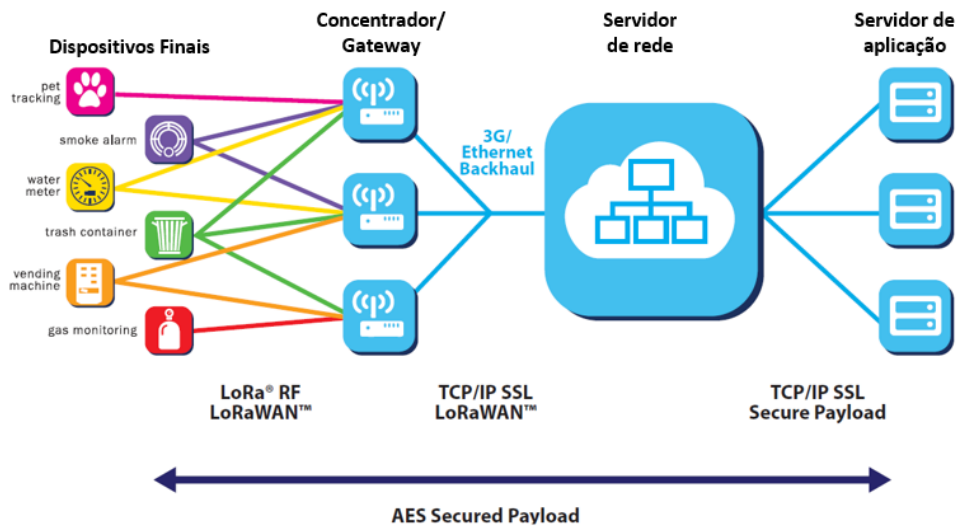
Fonte: Adaptado de Haidine et al. (2016).

### 2.5.1 O protocolo LoRaWAN

A arquitetura LoRaWAN é considerada uma arquitetura “*stars of stars*”, que define o protocolo de comunicação e a arquitetura do sistema de rede, enquanto a camada física LoRa habilita um *link* de longo alcance. O protocolo influencia a vida útil da bateria, a capacidade da rede, o QoS (*Quality Of Service*), a segurança e a quantidade de aplicativos atendidos pelo sistema (SILVA et al., 2017).

Uma rede típica LoRaWAN possui uma topologia “*star of stars*” (estrela) como mostra a Figura 15. De acordo com a imagem, diversos componentes fazem parte do protocolo, como dispositivos finais, *gateways* (ou, estações base), servidor de rede e aplicações. Veja abaixo as definições.

Figura 15 - Ilustração da arquitetura de uma rede LoRaWAN.



Fonte: Adaptado de Lora Alliance (2015).

- Dispositivos finais: são os dispositivos que se comunicam com o *gateway* por meio das tecnologias LoRa ou LoRaWAN.
- *Gateways*: os *gateways* são responsáveis por transmitir os dados recebidos pelos dispositivos finais para um servidor de rede, utilizando uma interface de retorno com uma maior taxa de transferência, geralmente Ethernet, 3G/4G ou WiFi.
- Servidor de rede: responsável por decodificar os pacotes enviados pelos dispositivos finais, realizando verificações de segurança e a taxa adaptativa de dados (ADR), gerando assim pacotes que devem ser encaminhados de volta aos dispositivos finais.
- Servidor de aplicação: cada aplicação recebe os dados do servidor de rede e deve decodificar os pacotes de segurança e utilizar as informações de acordo com as ações decididas para a aplicação.

#### 2.5.1.1 Largura de banda/Taxa de dados e tipos de mensagens

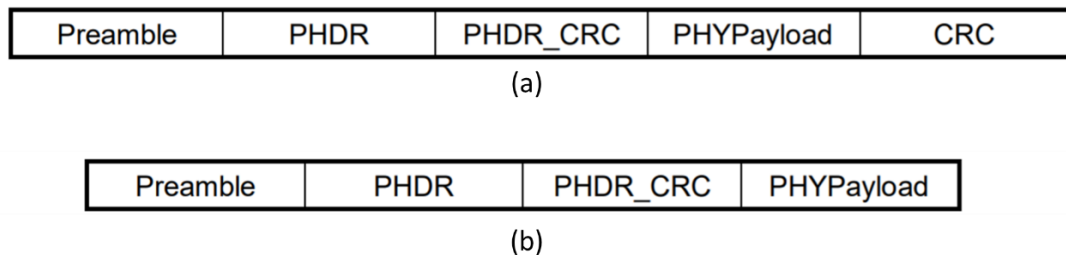
A largura de banda e a taxa de transmissão de dados são usadas para determinar a quantidade de informações que serão transmitidas em uma determinada unidade de tempo, geralmente em segundos. Largura de banda está relacionada a ordem espectral de frequência (em Hertz), na qual o sistema pode utilizar para comunicação digital. No protocolo LoRaWAN, a taxa de dados é selecionada por uma troca entre o alcance da comunicação e a duração da mensagem. Canais virtuais são criados com taxa de dados diferentes e sem qualquer

interferência entre si, devido à tecnologia de espalhamento espectral da camada física da tecnologia LoRa (SILVA et al., 2017).

As terminologias de mensagens do protocolo LoRa são diferenciadas entre *uplink* e *downlink*. Os *uplinks* são enviados pelos dispositivos finais para o servidor de rede, o qual retransmite as mensagens para um ou mais *gateways*. As mensagens são estruturadas e compostas por: cabeçalho da camada física do LoRa (PHDR), cabeçalho de verificação cíclica de redundância (CRC, ou PHDR\_CRC) e um preâmbulo usado com propósito de sincronização. O tamanho do dado pode variar de 2 a 255 *bytes* e sua integridade é protegida por outro CRC (LORA ALLIANACE, 2018).

As mensagens de *downlink*, diferente das de *uplink*, são enviados pelo servidor de rede apenas para um dispositivo final e entregue apenas por um *gateway*. O pacote é composto por um preâmbulo, cabeçalho de camada física PHDR e um CRC de cabeçalho (PHDR\_CRC), assim como o *uplink*.

Figura 16 - Estruturas das mensagens da camada física, (a) *uplink* e (b) *downlink*.



Fonte: Lora Allianace (2018).

### 2.5.1.2 Classes de dispositivos finais

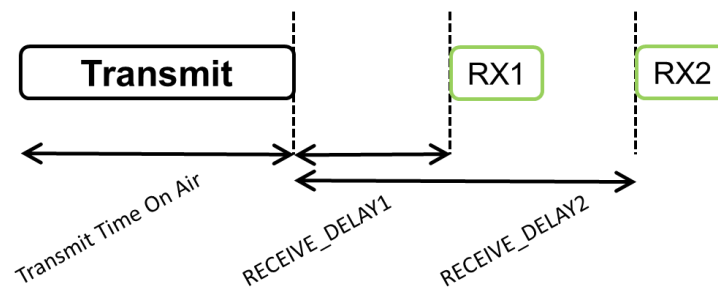
Em busca de otimização e para atender a diferentes aplicações, o protocolo utiliza três diferentes classes de dispositivos, que se diferenciam, principalmente, na troca de latência da comunicação de *downlink* e duração da bateria. Usualmente, o dispositivo é projetado para suportar mais de uma classe, que basicamente altera seu modo de funcionamento. A classe é definida durante a configuração do servidor de aplicação (ARRUDA, 2019). Os dispositivos são classificados como classe A, B ou C.

Classe A: é o modo de funcionalidade considerado padrão pela rede LoRaWAN e por obrigação deve ser suportado por todos os dispositivos que utilizem o protocolo. É a classe com maior desempenho energético e possui comunicação assíncrona e bidirecional (protocolo

Aloha). Geralmente é aplicada em sistemas de monitoramento, tendo a transmissão com base na necessidade do dispositivo (LORA ALLIANACE, 2018).

Nesta classe, o dispositivo abre duas janelas curtas após o envio da mensagem, com objetivo de receber uma mensagem de confirmação, utilizando o final da transmissão como referência. Seu baixo consumo de energia se dá pelo curto período de tempo da janela de recepção, como mostra a Figura 17.

Figura 17 - Janela de *downlink* para dispositivos da classe A.



Fonte: Lora Allianace (2018).

Classe B: estes dispositivos são sincronizados com o servidor de rede por meio de pacotes *beacon*, geralmente são utilizados por dispositivos finais que necessitam receber comandos de um controlador remoto ou prover de dados requisitados por um usuário. Na prática operam da mesma maneira que dispositivos da classe A, porém possuem janelas extras de *downlink* em horários agendados. Essa funcionalidade é possível, pois ele recebe um sinal de sincronização do *gateway*, portanto o servidor compreende que o dispositivo final está escutando (MARQUES; BOCHIE, 2019).

Classe C: aplicada para dispositivos finais que não possuem limitação energética. Essa classe mantém a janela de comunicação aberta, tendo como consequência o elevado consumo de energia, pois a essa janela só se fecha durante a transmissão. A Figura 18 apresenta, em forma de gráfico, uma comparação entre as classes, comparando a latência durante a comunicação do *downlink* do servidor e a vida útil da bateria.



Figura 18 - Comparação entre vida útil da bateria e latência da comunicação de *downlink* do servidor entre as classes de dispositivos do protocolo LoRa.



Fonte: Adaptado de LoRa Alliance (2015).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado o sistema de *harvesting* termoeletrico proposto, utilizando tubos de calor para o controle térmico passivo. Serão expostas as topologias estudadas com os diferentes arranjos entre os controladores térmicos e as fontes de calor. Também será apresentado o estudo realizado para a escolha da configuração mais eficiente para aplicação em um protótipo final. Além disso, serão apresentados os componentes utilizados para a execução dos testes, como os componentes mecânicos para fixação das estruturas que compõem o aparato, circuito de aquisição de dados e instalação da rede LoRaWAN. Já em relação ao módulo de geração, serão detalhados os módulos geradores, circuito de conversão e armazenamento de energia. Também será apresentado as configurações dos testes utilizadas.

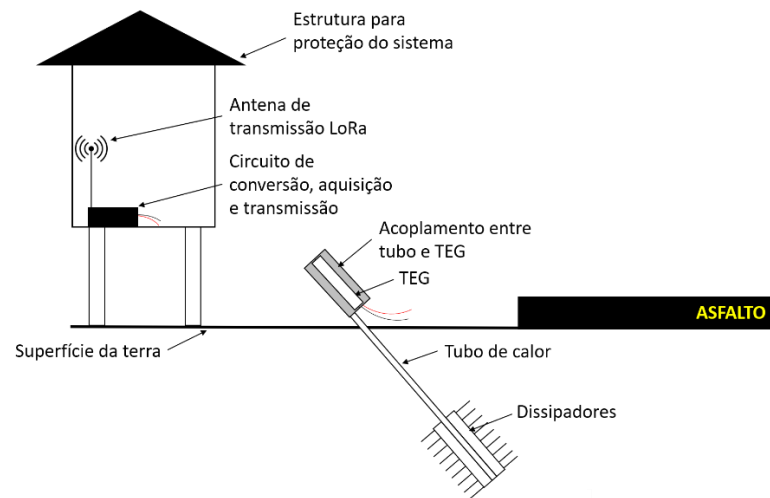
#### 3.1 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Nesta seção é apresentada a metodologia utilizada para realizar o estudo das configurações propostas para o arranjo entre controladores térmicos e a fonte de calor. O controle térmico passivo utilizado neste trabalho é o tubo de calor. Para apresentar os estudos realizados, esta seção foi dividida em duas partes: os componentes do protótipo e o sistema de aquisição de dados.

##### 3.1.1 Componentes do protótipo

Por meio do emprego de tubos de calor pretende-se utilizar o solo como elemento dissipador, a fim de gerar um gradiente de temperatura durante o dia por meio da radiação solar e, durante a noite, um gradiente inverso, com a temperatura do solo maior que da atmosfera. Para isso, pretende-se avaliar o funcionamento do tubo de calor em uma inclinação semelhante a latitude da cidade de Joinville, para melhor captação da energia solar. Um esquema geral do protótipo é mostrado na Figura 19, onde os geradores são fixados por meio de chapas acopladoras na parte superior do tubo de calor, expostos a radiação solar e o restante do tubo fica no interior do solo. Seis configurações de testes, baseadas neste conceito inicial, foram avaliadas e serão descritas em uma seção específica.

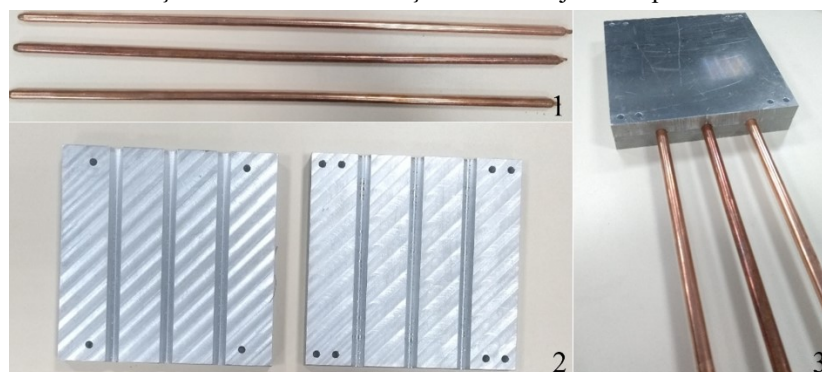
Figura 19 - Esquema idealizado para instalação do sistema para captação da energia solar utilizando o solo e tubos de calor.



Fonte: autor (2022).

A Figura 20 mostra a montagem e fixação dos tubos de calor junto as placas de alumínio. Nas duas placas maciças de alumínio foram usinadas três cavidades para encaixe dos tubos e sua fixação. Após a fixação das placas de alumínio, definiu-se o lado que seria exposto ao sol e, este foi pintado de preto para maior absorção da radiação solar. A outra extremidade dos tubos foram enterradas no solo, que tinha o papel de sumidouro de calor. Nesta extremidade podem ser fixas também aletas de alumínio para maior dissipação de calor.

Figura 20 - Montagem do aparato experimental, em que 1 são os tubos de calor, 2 as chapas de alumínio para fixação dos tubos e 3 a fixação dos tubos junto as placas.



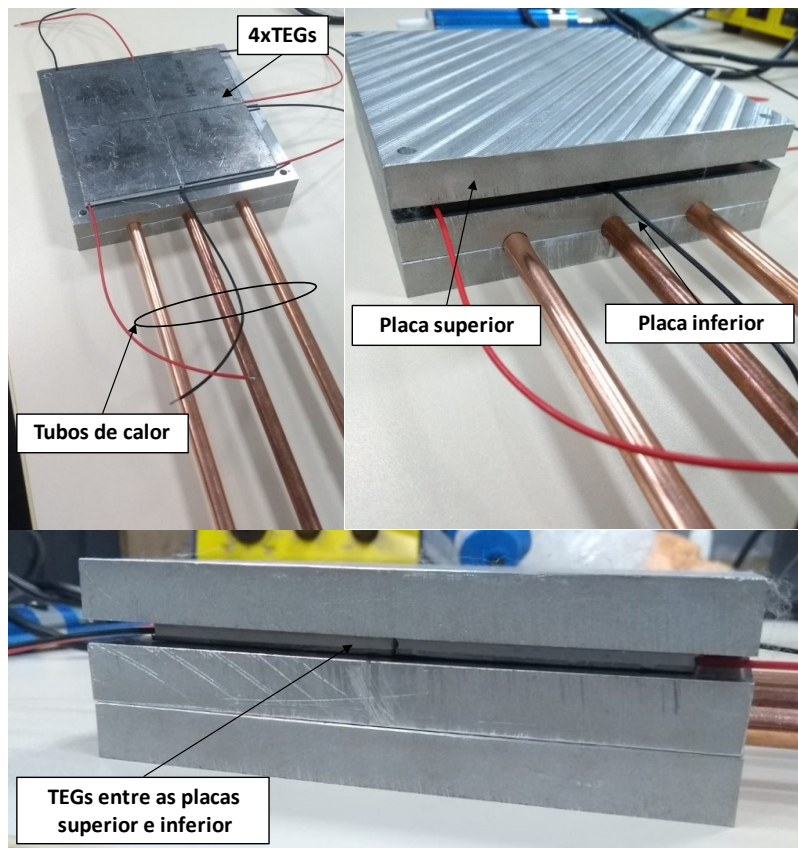
Fonte: autor (2022).

Os tubos de calor possuem 45 cm de comprimento e 8 mm de diâmetro e são feitos de cobre. Sua principal aplicação é o controle térmico de computadores, sendo o fluido de trabalho a água. Segundo o fabricante, sua temperatura de operação é de 20 a 200 °C com uma resistência

térmica menor que  $0,08 \text{ }^\circ\text{C/W}$ . As placas de alumínio utilizadas como placa coletora da radiação solar possuem  $174,24 \text{ cm}^2$  ( $13,2 \times 13,2\text{cm}$ ) de área.

Os geradores termoelétricos são posicionados na face da placa de alumínio, com seu lado quente para cima e o lado frio para baixo. Por meio de outra placa de alumínio (pintada de preta) os TEGs são prensados entre as duas superfícies, que são fixadas através de parafusos e porcas, como visto na Figura 21.

Figura 21 - Esquema de fixação dos TEGs com uma chapa de alumínio junto aos tubos de calor.



Fonte: autor (2022).

### 3.1.1.1 Gerador termoelétrico

O gerador termoelétrico a ser avaliado é o modelo TGPR-22W-7V-56S da TEGpro. Neste tópico serão apresentadas as principais características encontradas no *datasheet* do componente.

O modelo TGPR-22W-7V-56S é capaz de operar em temperaturas tão elevadas quanto  $330 \text{ }^\circ\text{C}$  continuamente e é fabricado especificamente para altas temperaturas. A potência gerada

pelo módulo depende do gradiente de temperatura no qual ele é submetido, bem como sua eficiência. O módulo possui arestas de 56 mm e 5 mm de espessura. Segundo o *datasheet*, para as temperaturas do lado quente 300°C e lado frio 30°C, o módulo possui as especificações descritas na Tabela 2. Além destes dados, o fabricante apresenta as curvas de resistência elétrica interna, tensão em circuito aberto e de potência pela temperatura. A folha de dados do gerador pode ser vista no Anexo A.

Tabela 2 - Especificações do *datasheet* para o modelo da TEGpro.

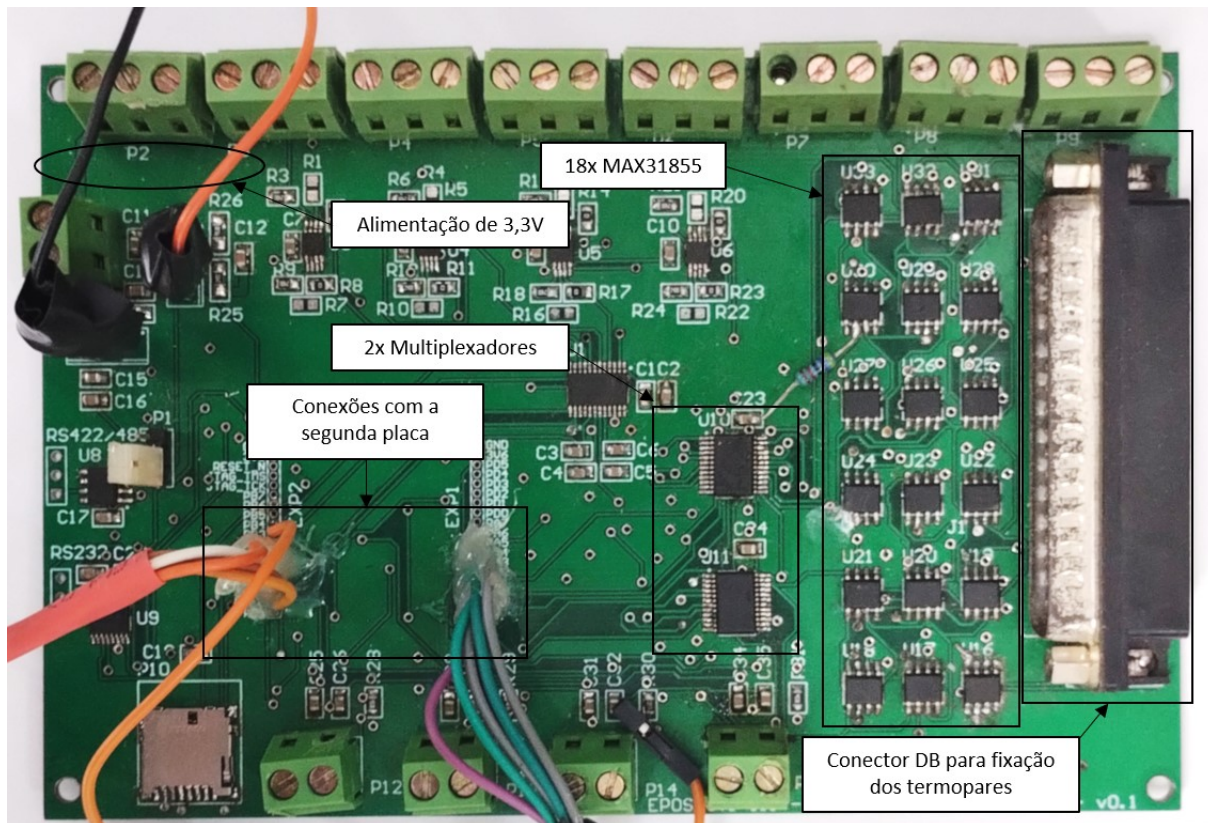
<b>Temperatura no lado quente</b>	300°C
<b>Temperatura no lado frio</b>	30°C
<b>Tensão de circuito aberto</b>	14,4V
<b>Resistencia interna equivalente</b>	2,4Ω
<b>Tensão equivalente com carga</b>	7,2V
<b>Potência equivalente de saída</b>	21,6W
<b>Dimensões</b>	56x56x5mm

Fonte: adaptado de TEGPro (2014).

### 3.1.2 Sistema de aquisição de dados

Para aquisição dos dados foram utilizadas duas placas de circuito impresso. A primeira placa, mostrada na Figura 22, possui suporte para a leitura de até 18 termopares utilizando o circuito integrado MAX31855, quatro entradas para RTD e conversor analógico digital integrado. Esta placa foi projetada por alunos da UFSC no Laboratório de Integração Software Hardware (LISHA) com objetivo de ser uma estação hidrológica. O objetivo da utilização desta placa é a leitura de termopares, pois o CI MAX31855 realiza a leitura e compensação da junção fria dos sensores e transmite os dados digitalmente pela comunicação SPI para o microcontrolador, que está presente na segunda placa (ver Figura 23).

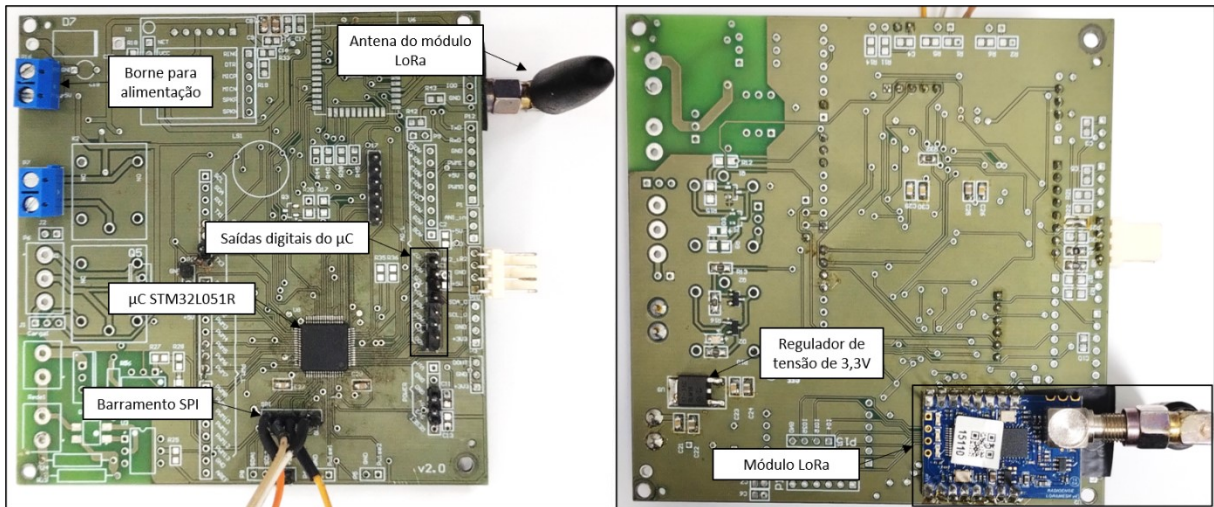
Figura 22 - Placa de circuito impresso responsável pela leitura dos dados de temperatura do experimento.



Fonte: autor (2022).

Para a segunda placa foi utilizado o microcontrolador de modelo STM32L051R6, que envia por meio do protocolo UART para um módulo LoRa instalado na mesma placa, que por sua vez envia as informações para o *gateway* instalado nas dependências da UFSC. O papel do *gateway* é receber os dados e encaminhar para um banco de dados na nuvem, gerenciado pela empresa InfluxDB, que podem ser acessados remotamente a partir de um computador com acesso à internet. A Figura 23 mostra a placa utilizada com a identificação dos componentes.

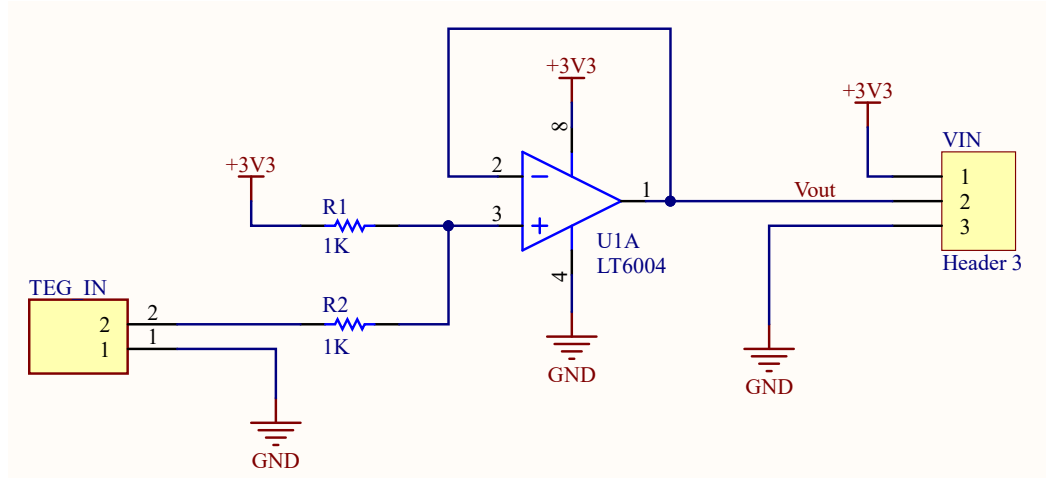
Figura 23 - Placa de circuito impresso responsável pela coleta dos dados de temperatura e tensão e envio para o banco de dados pelo módulo LoRa.



Fonte: autor.

Para a medição de tensão do gerador termoelétrico, utilizou-se um circuito de interface para medições de tensões positivas e negativas. Um Amplificador Operacional (Ampop) juntamente com dois resistores foram utilizados com o objetivo de adequar os valores para uma referência positiva, quando a saída do TEG for negativa, assim o microcontrolador pode realizar leituras utilizando seu conversor A/D. O amplificador utilizado foi o modelo LT6004 e foi montado na configuração de somador não-inversor, porém sem resistores de ganho. O circuito utilizado é mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Circuito de interface utilizando Ampop para medição de tensões negativas do gerador termoelétrico.



Fonte: autor (2022).

A função que define a tensão de saída do circuito é mostrada na Equação (5). Na prática, se mantém  $V_1 = 3,3 V$  e em  $V_2$  é conectada a saída positiva do TEG. Para os resistores foram utilizados valores iguais de  $1 k\Omega$  (necessariamente os resistores devem ser iguais). Portanto, com a Equação (5), é possível ler uma variação de tensão de  $-3,3$  a  $3,3 V$  na entrada  $V_2$ . Já na saída, os valores serão de  $0$  e  $3,3 V$ , que pode ser lido pelo conversor A/D do microcontrolador.

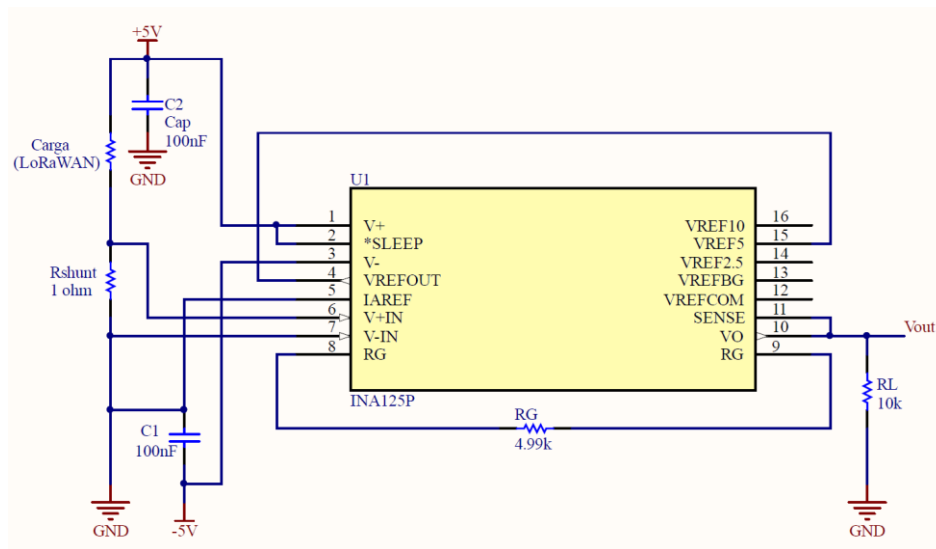
$$V_o = (R_1 \parallel R_2) \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right) \quad (5)$$

Para avaliação do consumo do circuito de transmissão de dados foi utilizado um amplificador de instrumentação, modelo INA125, utilizando um resistor *shunt* de aproximadamente  $1 \Omega$  (valor aferido com um multímetro modelo Hikari® HM-2900 antes de realizar as medidas). O circuito utilizado é mostrado na Figura 25, em que o resistor é colocado em série com o circuito, em relação ao GND, e as entradas do amplificador são conectadas com o intuito de medir a queda de tensão nos terminais do resistor, amplificando a medida para aquisição a partir de um conversor A/D. Para o cálculo do ganho, utilizou-se a equação disponibilizada pelo fabricante em seu *datasheet*. A Equação (6) mostra o cálculo realizado para determinar um ganho de aproximadamente 16 vezes a diferença de tensão entre as entradas  $V_{IN}^+$  e  $V_{IN}^-$  (BURR-BROWN, 1998).

$$G = 4 + \frac{60k\Omega}{R_G} = 4 + \frac{60k\Omega}{4,99k\Omega} = 16,02 \quad (6)$$



Figura 25 - Circuito para aquisição da corrente elétrica do sistema de transmissão LoRa para levantamento de consumo energético do sistema.



Fonte: autor (2022).

### 3.1.2.1 Desenvolvimento da rede LoRa

Para comunicação LoRa foi utilizado como *End Device* o módulo RD49C, mostrado na Figura 26, da Radioenge. Este módulo é desenvolvido para concepção de uma LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). Tanto a camada física LoRa, quanto a camada de rede LoRaWAN, têm como principal característica a otimização no uso de energia, permitindo longo alcance do sinal de rádio e ótimos aspectos técnicos da rede, mesmo com baixo consumo. Sendo assim, esses dispositivos são ideais para uso em sensoriamento remoto e controle e tráfego de dados móveis.

Figura 26 - Módulo LoRaWAN, modelo RD49C da Radioenge.



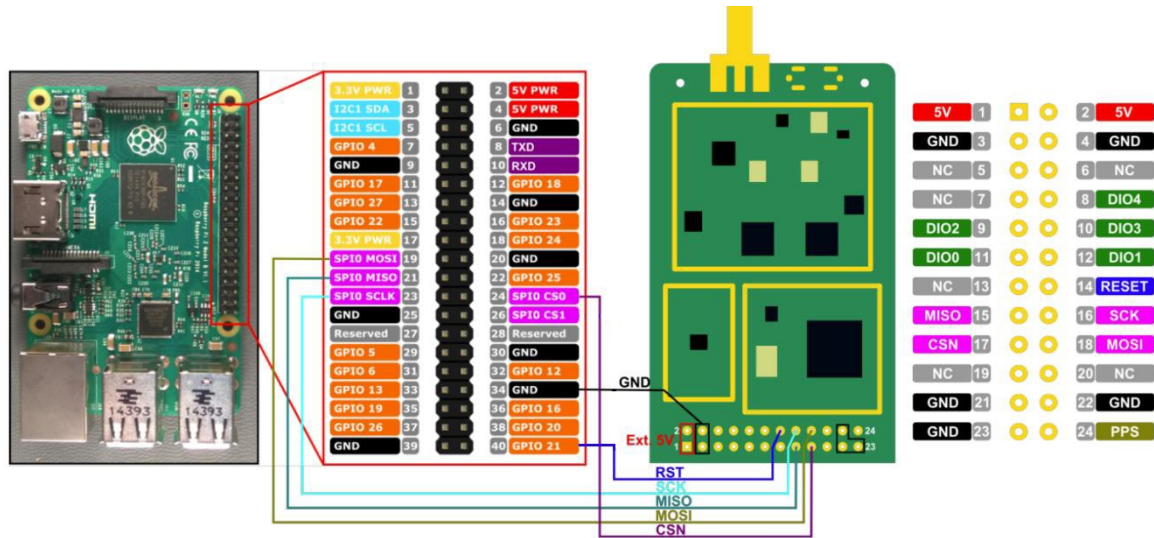
Fonte: Radioenge (2021).

Para a recepção dos dados e integração com a rede foi instalado um *gateway* nas instalações da UFSC-Joinville. O módulo utilizado foi o RHF0M301 da RisingRF, o qual possui o *chip* SX1301 que é baseado na v1.0 LoRaWAN da Semtech, fabricante do *chip*. Possui sensibilidade de até -143dBm e alimentação de 5 V, interface SPI e GPIO.

Para a interface do *gateway* foi utilizado um *Raspberry Pi* modelo 2B por ser um componente robusto e com capacidade de executar um sistema Linux embarcado, além de ser uma plataforma popular e de fácil acesso no mercado (ARRUDA, 2019). O *Raspberry Pi* 2B possui processador ARM Cortex-A7 com 900 MHz de processamento e *quad-core*, 1 GB de memória RAM, possuindo memória e processamento para executar um Sistema Operacional (SO) baseado em Linux, como o ChirpStack OS, sistema próprio para desenvolvimento de *gateway* LoRaWAN, com suporte para diversos módulos.

As conexões do módulo com o *Raspberry Pi* foram feitas de acordo com a RisingHF (2022), em que os pinos de alimentação, interface SPI e *reset* do módulo RHF0M301 devem ser conectados. Contudo, após a instalação do sistema operacional ChirpStack OS, mantendo os padrões de conexão sugeridos, verificou-se falhas no funcionamento do módulo. Após os testes, verificou que a falha estava relacionada a reinicialização do módulo, necessária para início de do seu funcionamento. Como as falhas estavam relacionadas ao *reset* do sistema, as configurações do *gateway* foram alteradas manualmente, mudando o pino de *reset* padrão utilizado pelo módulo (pino 26 da *Raspberry Pi*). Para isso, alterou-se as conexões diretamente no *Raspberry Pi* utilizando o pino físico 40 (GPIO 21) como a porta responsável pela reinicialização do módulo RHF0M301, como visto na Figura 27.

Figura 27 - Esquema de ligação entre o RaspBerry Pi 2B e o módulo RHF0M301, com alteração no pino de *reset* para a GPIO 21 (pino físico número 40 do Raspberry Pi).



Fonte: adaptado de RisingHF (2022).

O ChirpStack OS possui quatro componentes internos indispensáveis para sua funcionalidade, sendo eles: *Network-server*, *Application-server*, *Gateway-bridge* e o *Concentrator*.

- *Network-server*: é um Servidor de Rede de código aberto, também parte do ChirpStack OS. Sua responsabilidade é o manuseio dos quadros de *uplink* recebidos pelo *gateway*, e assim fazer o agendamento das transmissões de *downlink*. É responsabilidade do *Server* lidar com a autenticação dos dispositivos, gerando as chaves de sessão e a comunicação com o *Application-server* (CHIRPSTACK, 2022).
- *Application-server*: é um servidor de aplicação que possui uma interface-web intuitiva e de fácil configuração. Ele é responsável pela parte do “inventário” dos dispositivos da infraestrutura do LoRaWAN, pelas solicitações de conexão e com a criptografia dos *payloads* (mensagens) das aplicações (CHIRPSTACK, 2022). Ele oferece uma interface *web* onde usuários, organizações, aplicativos e dispositivos podem ser gerenciados. Realiza a integração com serviços e banco de dados externos, como MQTT, HTTP, InfluxDB entre outros.
- *Concentrator*: é um *daemon* (processo executado em segundo plano) de código aberto executado pelo *host* do *gateway*. Implementa o *Packet-forwarder* para encaminhamento dos pacotes RF recebidos pelo concentrador do *gateway* LoRa por meio de um *link*

IP/UDP para servidor de rede. Ele permite executar vários aplicativos de encaminhamento de pacotes simultaneamente.

- *Gateway-bridge*: é um serviço que converte os pacotes do protocolo LoRa do *Packet-forwarder* para os do protocolo comum do *Network-server* (JSON e Protobuf) fazendo parte fundamental do Chirpstack OS.

A configuração do sistema operacional Chirpstack inicia-se pela instalação por meio do cartão SD no Raspberry Pi. A versão do sistema utilizada foi a Chirpstack Gateway OS 3.5.0, após sua instalação são realizadas duas principais configurações.

A primeira configuração é a seleção do concentrador utilizado e do módulo, nesta seção foi utilizado um módulo de configurações semelhantes ao utilizado no trabalho, o modelo RAK2245 que possui o mesmo *chip* SX1301 que o modelo da RisingHF utilizado, este modelo foi escolhido por possuir as frequências do padrão australiano AU915 já configuradas no sistema operacional. A segunda configuração é a escolha da máscara de canais a ser utilizada pelo *gateway*, neste caso foram escolhidos os canais de 0 a 7 mais o canal 64.

Após a configuração do *gateway*, é realizada a configuração no servidor de aplicação, diretamente no IP a qual o SO está conectado na rede. Após acessar a aplicação, é realizado o cadastro do servidor, do *gateway* e do dispositivo final e suas chaves de acesso. A configuração detalhada da rede LoRaWAN utilizada pode ser vista no Apêndice A.

### 3.1.3 Circuito proposto para aquisição de dados meteorológicos

Para avaliar se o sistema testado experimentalmente é capaz de suprir a demanda de um sistema de aquisição de dados climáticos, buscou-se alguns sensores que podem compor uma estação meteorológica e adquirir dados de temperatura ambiente, umidade e pressão atmosférica. Buscou-se um sensor capaz de adquirir estas três grandezas com velocidade e baixo consumo, sendo o sensor BME280 o especificado.

Este sensor foi desenvolvido especialmente para aplicações *mobile*, em que o tamanho e o baixo consumo de energia são parâmetros importantes para o projeto. O dispositivo combina sensores de elevada linearidade e precisão. É uma ótima opção para esta aplicação, pois é capaz de realizar as três medidas (temperatura, umidade e pressão atmosférica), retornando um sinal digital por meio do barramento I<sup>2</sup>C (BOSCH SENSORTEC, 2018).

Com as medidas de temperatura e umidade é possível definir o ponto de orvalho, que indica a temperatura onde o vapor de água presente na atmosfera irá se condensar na mesma taxa em que evapora. Portanto, na temperatura de ponto de orvalho, a pressão de equilíbrio parcial é igual a pressão de saturação parcial. Este dado é preferido pelos meteorologistas sobre a umidade relativa para previsão de chuva, geada e formação de neblina, bem como prever a probabilidade de tempestades (SHRESTHA; THAPA; GAUTAM, 2019).

Para a medida de temperatura do asfalto pode ser aplicado o termopar do tipo T. Os termopares são sensores que utilizam como princípio o efeito Seebeck, portanto, a tensão de circuito aberto medido é uma função da temperatura de junção e da composição dos dois metais. Para realizar a leitura destes dados é considerada a utilização do CI MAX31855, que realiza automaticamente a compensação de junta fria do termopar e comunica via SPI para o microcontrolador.

Para gerenciar estes dados, necessita-se de um microcontrolador do tipo *ultra-low power*, como por exemplo, o modelo STM32L051, mesmo modelo utilizado para aquisição dos dados experimentalmente do sistema de geração.

Para avaliar estes dados deve-se levar em consideração a eficiência do conversor utilizado e a capacidade de armazenamento do supercapacitor. Para isso, buscou-se na literatura alguns modelos de conversores que adequassem aos níveis de tensão gerados pelo TEG no experimento testado. Para a escolha, considerou-se a partida a frio como a menor tensão para a conversão ocorrer por maior tempo ao longo de um dia. Também foi considerado o funcionamento para tensões reversas, já que foi constatado que ao anoitecer também é possível coletar energia do gerador. Foram encontrados quatro modelos passíveis de utilização no sistema, são eles: LTC3108, LTC3109, EM8900 e o BQ25570.

O levantamento do consumo de cada componente foi feito a partir dos dados do fabricante, portanto é considerado o consumo teórico para os seguintes componentes: BME280, MAX31855, barramento I<sup>2</sup>C, SPI. Já para o módulo LoRa RD49C e o microcontrolador STM32L051R6 foram considerados os dados de consumo obtidos experimentalmente. Além dos componentes responsáveis pelo sensoriamento, considerou-se uma chave analógica para ligar e desligar o circuito de medição, com o intuito de diminuir o consumo energético do circuito como um todo. Um regulador de tensão linear com baixa corrente quiescente e baixa queda de tensão, modelo TPS7830, foi empregado apenas no conjunto EM8900/BQ25570, para alimentação do sistema LoRa e dos sensores com 3 V. O projeto do circuito sugerido pode ser visto no Apêndice E.

## 3.2 CONFIGURAÇÕES DE TESTE

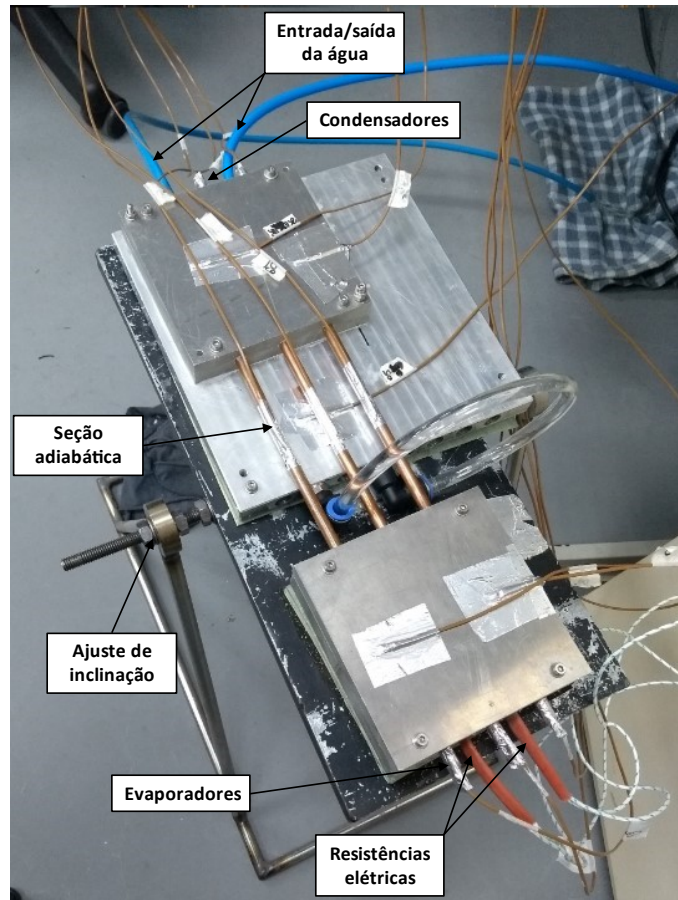
Nesta seção serão descritos os procedimentos realizados para os testes em laboratório e em campo, bem como os testes com o material de mudança de fase utilizado.

### 3.2.1 Testes em laboratório

Para análise dos tubos de calor foi desenvolvida uma bancada experimental para simular as condições do ambiente de aplicação. O teste consiste em monitorar a variação de temperatura ao longo do tubo de calor, enquanto se aquece uma extremidade e resfria a outra. Para o aquecimento dos tubos de calor nas seções dos evaporadores foram utilizadas duas resistências elétricas de 50 W cada. Elas foram inseridas no interior de um bloco de alumínio. Para resfriar a parte dos condensadores foi empregado também um bloco de alumínio com furos passantes por onde um fluido frio foi escoado (água a temperatura ambiente).

O procedimento de teste consistiu em aumentar a potência das resistências elétricas ao longo do tempo até o sistema entrar em regime permanente, coletando os dados de temperatura a cada 30 segundos. As potências utilizadas variam entre 20 W e 60 W e foram ajustadas com uma fonte de bancada TDK-Lambda, modelo GEN-300-5. A montagem da bancada pode ser vista na Figura 28.

Figura 28 - Aparato desenvolvido para testes em laboratório.



Fonte: autor (2022).

Este teste foi realizado para caracterização dos tubos de calor e determinação de sua resistência térmica. Como referência foi utilizado uma irradiação máxima de  $1412 \text{ W/m}^2$ , que é disponibilizada pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar. Sabendo a área da placa coletora, sabe-se potência necessária a ser aplicada às resistências, considerando que o sistema não possui perdas. As seções do evaporador e condensador possuem  $13,2 \text{ cm}$  de comprimento cada e a área total da placa coletora é de  $174,24 \text{ cm}^2$ , portanto, a máxima potência é de  $24,60 \text{ W}$ .

Os testes foram realizados em 3 inclinações: horizontal,  $26^\circ$  com evaporador em cima e  $26^\circ$  com o evaporador em baixo. Estas variações simulam a condição em campo, que o evaporador fica em cima quando há Sol incidindo na placa e o evaporador em baixo quando o solo está mais quente que o ar ambiente. A inclinação de  $26^\circ$  foi adotada, pois é a latitude da cidade de Joinville - SC (Latitude:  $26^\circ 18' 15'' \text{ S}$ ), definindo de maneira média a inclinação ótima de incidência dos raios solares. A linha do Equador é o paralelo mais diretamente voltado para o Sol, sendo o que recebe os raios solares mais diretamente (mais próximos da vertical). Lugares situados em latitudes mais altas recebem os raios solares de maneira inclinada, portanto, ao

inclinando o aparato próximo ao ângulo da latitude do local tem-se o objetivo de absorver maior quantidade de irradiação solar.

Os testes foram realizados aplicando potências pré-definidas nas resistências, começando com 20 W e a cada 30 min foram aumentados 10 W através da fonte de bancada até o sistema chegar em 60 W. Com a distribuição de temperatura ao longo do tubo e a potência aplicada pelas resistências elétricas, foi possível calcular a resistência térmica global experimental dos tubos de calor, que é dada pela razão entre a diferença das temperaturas médias no evaporador e condensador e a potência inserida nas resistências elétricas, descrita na Equação (7).

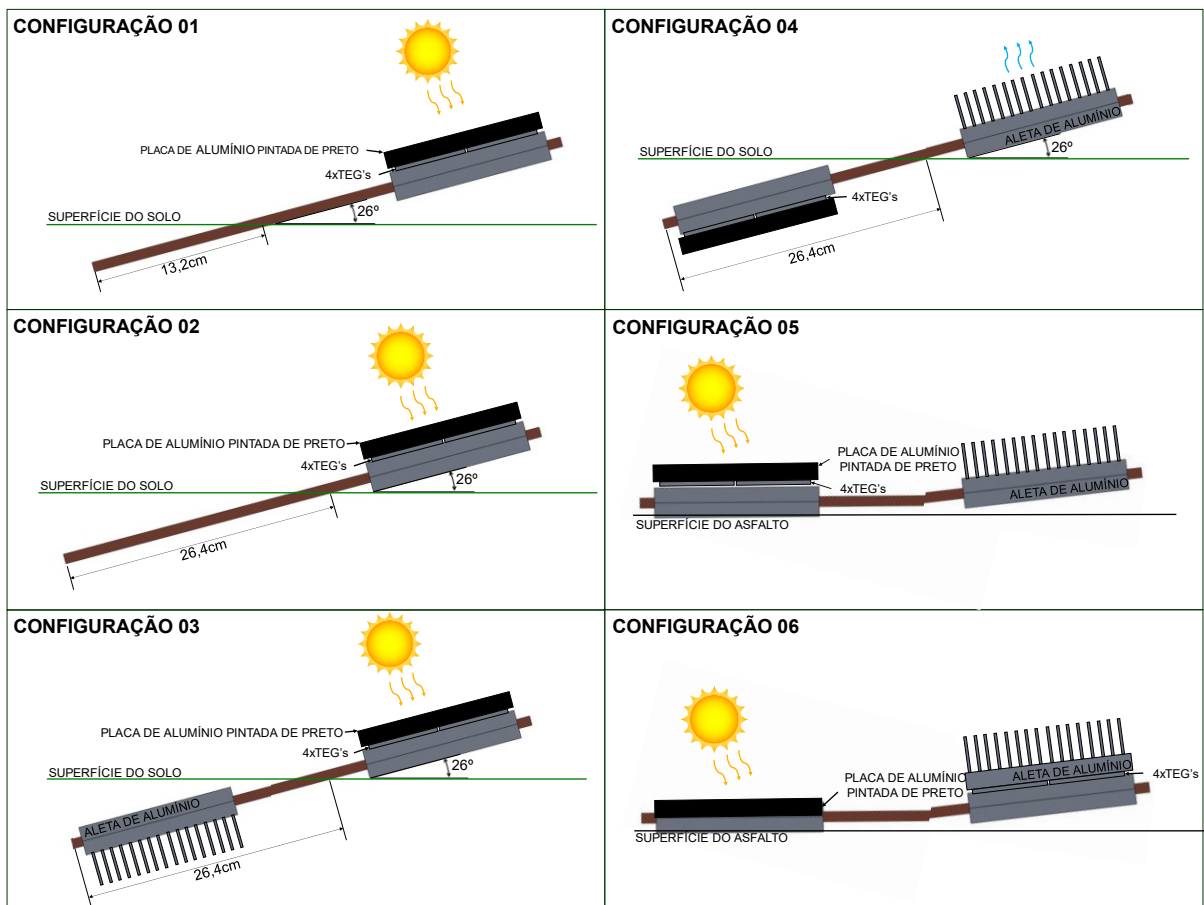
$$R_{t,ex} = \frac{T_{med,eva} - T_{med,cond}}{P_{total}} \quad (7)$$

Para aquisição dos dados de temperatura e sua transmissão foi utilizado o sistema LoRaWAN e o circuito integrado MAX31855 para leitura dos termopares. O posicionamento dos termopares na bancada é descrito na Figura 29.





Figura 30 - Configurações testadas em campo para obter melhor eficiência na geração de energia termoelétrica.



Fonte: autor (2022).

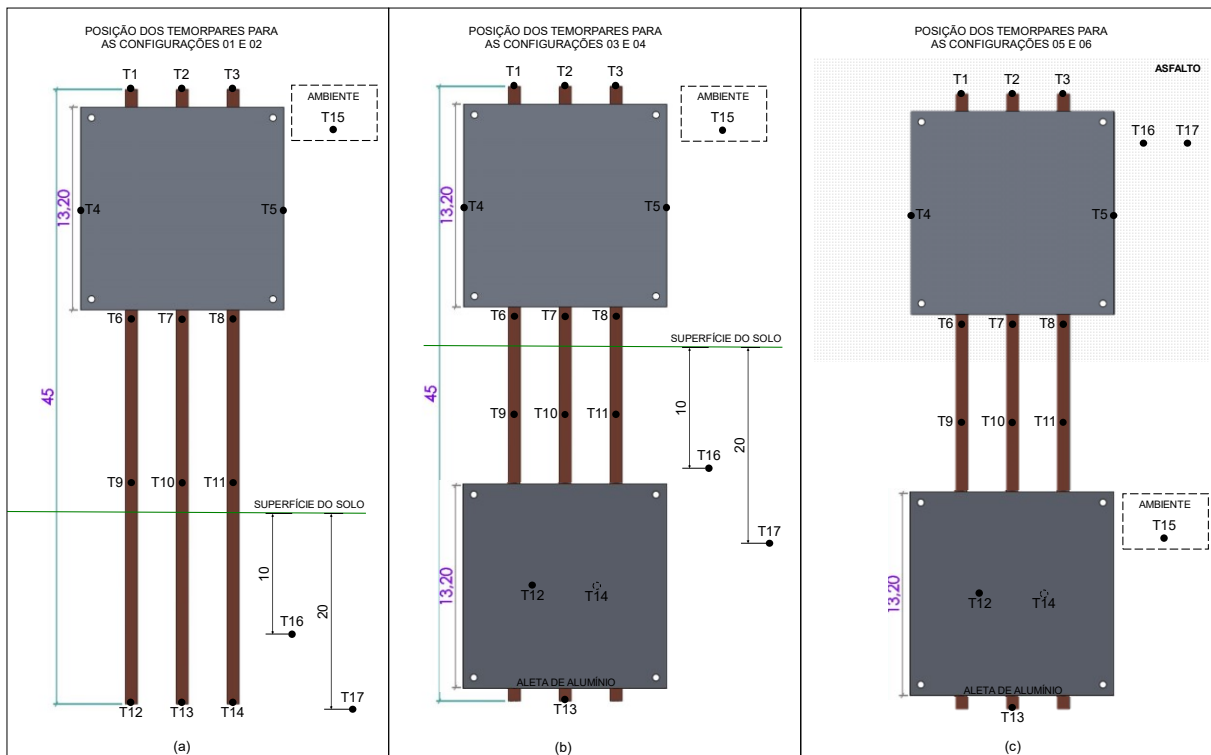
- Configuração 01: nesta configuração os 3 tubos de calor são inseridos 13,2 cm do seu comprimento no solo, o equivalente ao comprimento da placa de alumínio fixada no evaporador (ver Figura 28). Além disso, o experimento é inclinado em 26° em relação ao solo e voltado para o Norte. Os TEG estão posicionados entre as duas placas de alumínio.
- Configuração 02: parâmetros idênticos a configuração 01, porém o tubo é inserido 26,4 cm do seu comprimento no solo.
- Configuração 03: nesta configuração, se mantém os parâmetros da Configuração 02, porém um dissipador com aletas de alumínio é fixado na seção do condensador. Para a fixação dos TEGs manteve-se a mesma configuração anterior.
- Configuração 04: inversão da configuração 3, sendo os geradores termoelétricos enterrados e a aleta de alumínio ficando ao ar livre.
- Configuração 05: nesta configuração o sistema é instalado no asfalto. A placa de alumínio é fixada através de parafusos e buchas no asfalto. Pasta térmica foi empregada para

melhorar o contato entre as superfícies. Os geradores termoelétricos são fixados na seção do evaporador com uma placa de alumínio pintada de preto. Já na seção do condensador é fixada a aleta de alumínio para dissipação do calor, esta seção foi mantida na sombra.

- Configuração 06: repete-se a Configuração 05, porém os geradores termoelétricos são trocados da seção do evaporador para a seção do condensador, ficando entre a chapa de alumínio que fixa os tubos de calor e a aleta de alumínio, responsável por dissipar o calor para o ar. Esta seção também foi mantida na sombra.

Para cada configuração foram coletados dados de temperatura, tensão do TEG e do conversor utilizado. Porém como as características físicas do aparato se alteram, para algumas configurações, os termopares foram instalados em locais diferentes. A Figura 31 mostra o posicionamento dos sensores de temperatura para as configurações instaladas. As configurações 01 e 02, configurações 03 e 04 e configurações 05 e 06 possuem o mesmo arranjo de sensores.

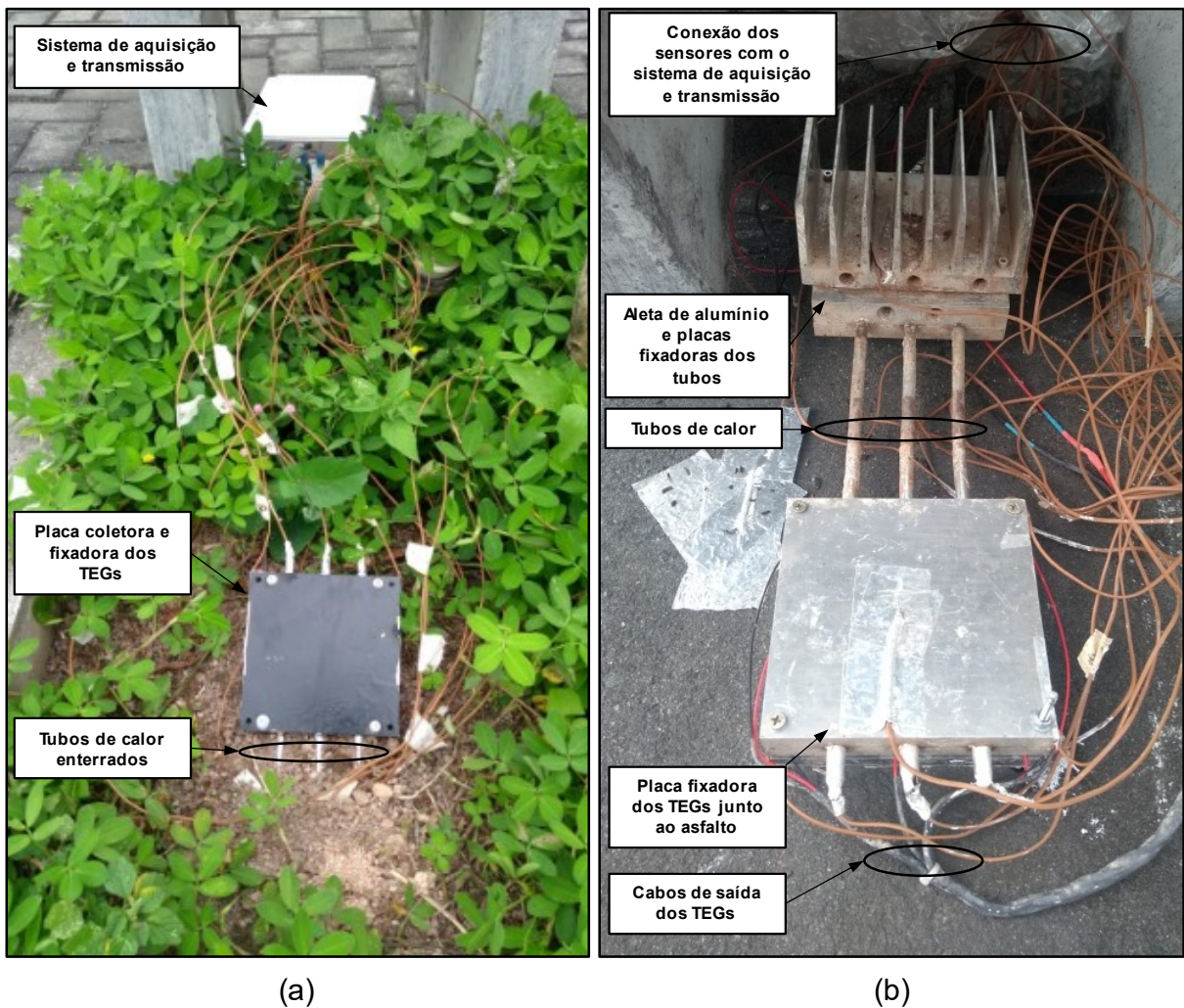
Figura 31 - Posição dos termopares para as configurações instaladas em campo. (a) Posição dos termopares para as Configurações 01 e 02. (b) Posição dos termopares para as Configurações 03 e 04. (c) Posição dos termopares para as Configurações 05 e 06.



Fonte: autor (2022).

O sistema foi instalado em campo nas configurações mencionadas, entre os meses de dezembro de 2021 e março de 2022 em duas cidades, Joinville-SC e Ijuí-RS. Em Ijuí foram avaliadas as configurações 01, 02 e 03. Foram medidas as temperaturas ao logo do dispositivo e tensões em aberto do gerador termoeletrico durante todo o dia. Os dados foram enviados em intervalos de 30 segundos por meio do protocolo LoRaWAN para o banco de dados. A Figura 32 mostra o aparato instalado em campo nas configurações 03 e 05.

Figura 32 - Sistema instalado em campo, em (a) aparato na configuração 03 e em (b) na configuração 05.



Fonte: autor (2022).

### 3.2.3 Teste com material de mudança de fase

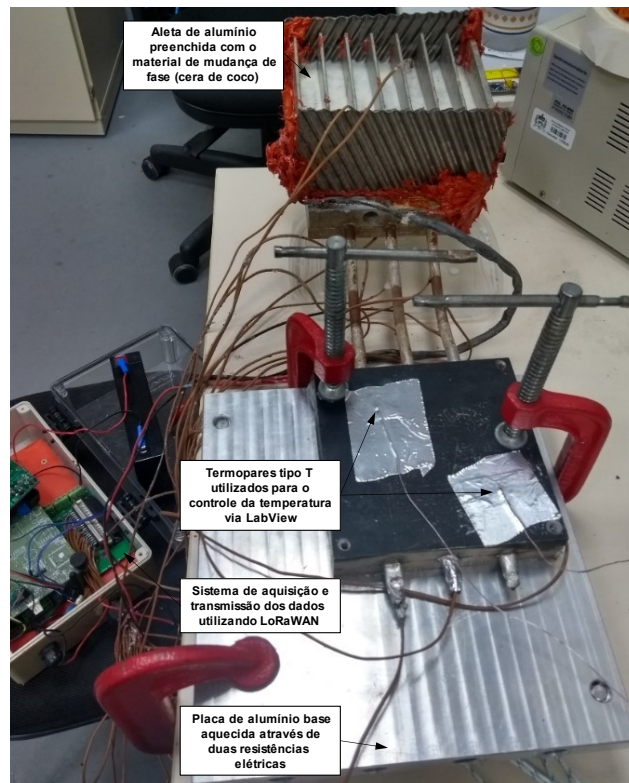
O material escolhido para ser utilizado como PCM foi a cera de coco. Uma cera vegetal com o ponto de fusão entre 48 °C e 54 °C segundo fabricante. Este material foi escolhido por ser de custo reduzido e ter seu ponto de fusão baixo, em comparação com outras ceras vegetais e parafinas disponíveis no mercado.

Para realizar sua caracterização e avaliar sua faixa de operação, foi utilizado um agitador magnético modelo SSAGDa, da marca SolidSteel, que possui uma base aquecedora. Também foi utilizado um tubo Becker de vidro com 500 ml de capacidade. O Becker foi aquecido a partir da temperatura ambiente até de 65 °C, sendo controlado pela base aquecedora, até a cera de coco mudar de fase completamente, passando do estado sólido para o líquido. Dentro do recipiente foram posicionados dois termopares do tipo T. O objetivo deste teste é descobrir a faixa de operação da cera, ou seja, o intervalo de temperatura em que o material irá absorver energia térmica até trocar de fase completamente.

Após sua caracterização, o material foi aplicado sobre a aleta de alumínio no aparato montado na configuração 06. O teste com PCM foi realizado apenas laboratório e foram utilizadas duas resistências elétricas de 50 W para o aquecimento, como forma de simular a temperatura da malha asfáltica.

As resistências foram inseridas em uma placa de alumínio utilizada como base para o experimento. Por meio de uma fonte de potência, as resistências foram controladas via LabView a partir de uma curva de temperatura aquisitada experimentalmente nos testes em campo da configuração 06. Foi implementado um controlador proporcional integral (PI) de malha fechada no LabView, por meio de termopares do tipo T posicionados na superfície da placa coletora. A Figura 33 mostra o posicionamento dos termopares e da bancada instalada em laboratório.

Figura 33 - Bancada utilizada para testes com material de mudança de fase (cera de coco).

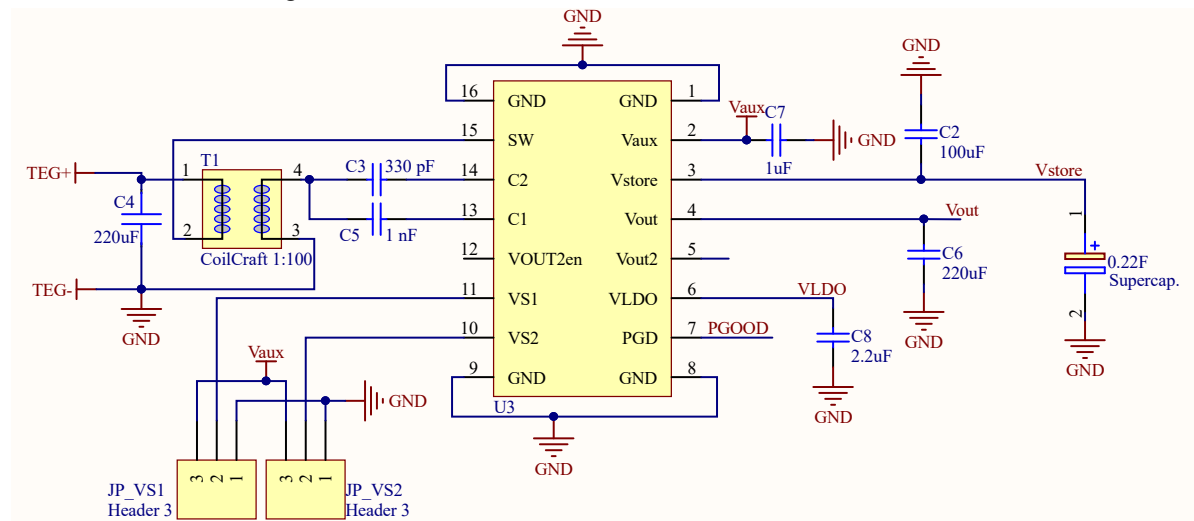


Fonte: autor (2022).

### 3.2.4 Teste com circuito conversor de energia modelo LTC3108

Foram realizados testes com o conversor de modelo LTC3108, da Linear Technology, disponível no laboratório. Este conversor possui um circuito interno de gerenciamento de energia e saídas reguladas de 2,2 V no pino VLDO. Ainda contam com uma saída regulada programada de 2,35 V, 3,3 V, 4,1 V ou 5 V e saída para conexão de um elemento de armazenamento de energia, como supercapacitores ou baterias. Pode funcionar com uma faixa de tensão na entrada de 20 a 500 mV ao utilizar um transformador de entrada com uma razão de transformação de 1:100 (ANALOG DEVICES, 2010). O circuito utilizado para os testes é mostrado na Figura 34. Para  $V_{STORE}$  foi utilizado um supercapacitor de 0,22 F, no pino  $V_{OUT}$  foi conectado um capacitor de 220  $\mu\text{F}$  e no pino  $V_{LDO}$  um capacitor de 2,2  $\mu\text{F}$ .

Figura 34 - Circuito do conversor LTC3108 utilizado nos testes.



Fonte: autor (2022).

### 3.3 ANÁLISE DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

Uma análise de incertezas das grandezas medidas foi realizada sobre os resultados experimentais. Essas incertezas são encontradas nas medições de tensão do conversor A/D do microcontrolador e do CI MAX31855, responsável por ler as temperaturas utilizando termopares do tipo T. Para determinar a incerteza de medição do conversor A/D foi necessário verificar sua resolução, utilizando o número de *bits* e a tensão de referência utilizada. O microcontrolador STM32L051 possui conversores analógico digital de 12 *bits*, portanto, pode-se encontrar sua resolução com a Equação (8).

$$k = \frac{V_{ref}}{(2^n - 1)} \quad (8)$$

Neste caso, foi utilizada uma tensão de referência ( $V_{ref}$ ) de 3,3V, sendo  $n$  o número de bits, com isso obteve-se uma resolução ( $k$ ) de 0,806 mV,  $k_{\%} = 0,024\%$ .

Além da resolução do conversor A/D, as medições de tensão do TEG foram realizadas por um *Ampop* juntamente com dois resistores. Estas resistências foram aferidas com um multímetro Hikari de modelo HM-2900, que possui incertezas para medições menores de 4 k $\Omega$  de  $\pm 0,3\%$ . Após aferidas as resistências, seus valores foram inseridos na Equação (5) para o cálculo da tensão de saída do circuito e, então convertida para valores digitais de 0 a 4095 pelo

microcontrolador. Essa incerteza foi considerada no cálculo de propagação de erros ao calcular a potência dos geradores termoelétricos.

Já para as medições de temperatura, obteve-se a incerteza a partir da folha de dados do CI MAX31855, que fornece as incertezas para cada tipo de termopar que o componente é capaz de medir. Para termopares do tipo T com variação de  $-270$  a  $+400^{\circ}\text{C}$ , a incerteza de medição é de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Para determinar a incerteza relacionada a potência elétrica do gerador termoelétrico foi utilizado o método de propagação de erros, conforme Borba (2019) e Martins (2019), calculado conforme o Apêndice D.

Com relação ao sistema de medição de tensão (NI 9205), sua incerteza é de 1% do fundo de escala, ou seja, 0,1 V. Este sistema foi utilizado para a medição dos dados de corrente consumida pelo sistema LoRaWAN. Para a aferição da resistência utilizada para aquisição dos dados de corrente elétrica, foi utilizado um multímetro de modelo HM-2900 do fabricante Hikari®. Segundo manual, para medição de resistências menores que  $400\ \Omega$  sua incerteza é de  $\pm 0,3\%$  e resolução de  $0,01\ \Omega$ . Já para medidas de tensão em corrente contínua, o multímetro possui incertezas de  $\pm 1,0\%$  para todas as escalas (HIKARI®, 2019).



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos experimentos obtidos por meio dos testes realizados na bancada experimental desenvolvida em laboratório, com o foco em avaliar os resultados obtidos do experimento instalado em campo, tanto no asfalto quanto no solo, em diversas configurações. Inicialmente serão apresentados os resultados da análise dos tubos de calor testado em laboratório, descrito previamente na seção 3.2.1. Em seguida serão apresentados os testes realizados em campo, suas curvas de temperatura em diversos pontos do experimento e da potência elétrica encontrada para as diferentes configurações instaladas. Depois da análise térmica e de geração de energia do TEG, será apresentado o consumo de energia do sistema de aquisição e transmissão do protocolo LoRaWAN. Após, será realizada uma análise do desempenho do conversor ULP testado em campo e por fim será comparado os resultados obtidos com a literatura.

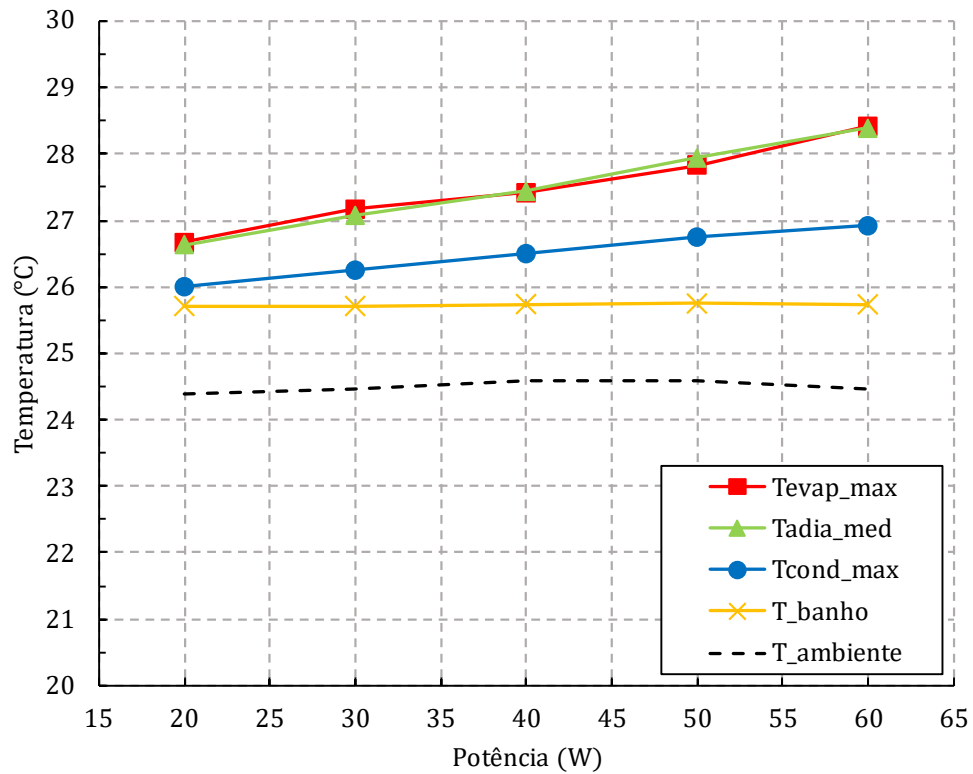
### 4.1 RESULTADOS DOS TESTES EM BANCADA DOS TUBOS DE CALOR

Para análise dos tubos de calor foram realizados testes em laboratório com o intuito de avaliar seu limite de operação através da resistência térmica global de cada tubo.

A capacidade máxima de transporte de calor de um tubo de calor é alcançada quando a força capilar gerada pela variação do raio do menisco é igual ou menor que a soma das forças de atrito do líquido e do vapor (PAIVA, 2007). Experimentalmente, pode-se observar este fenômeno por meio da variação de temperatura na parede do tubo de calor. As temperaturas no final dos evaporadores e a temperatura de operação dos tubos (temperatura média na seção adiabática) aumentam conforme o aumento da potência nas resistências elétricas. Quando a temperatura no final do evaporador aumenta rapidamente, ocorre o início da secagem do tubo e a potência imposta neste ponto é considerada o limite máximo de transferência de calor do tubo. Os testes foram realizados com uma temperatura de condensador (face fria), que assemelha as condições de temperatura as quais o experimento será submetido em campo, ou seja, próxima as temperaturas do solo.

As temperaturas coletadas nos extremos do evaporador, condensador e a temperatura média na seção adiabática são apresentados na Figura 35. Referente ao experimento instalado na horizontal, com energia térmica inserida no evaporador, não é possível observar ponto de secagem, pois as temperaturas não apresentam alterações bruscas durante o decorrer do teste.

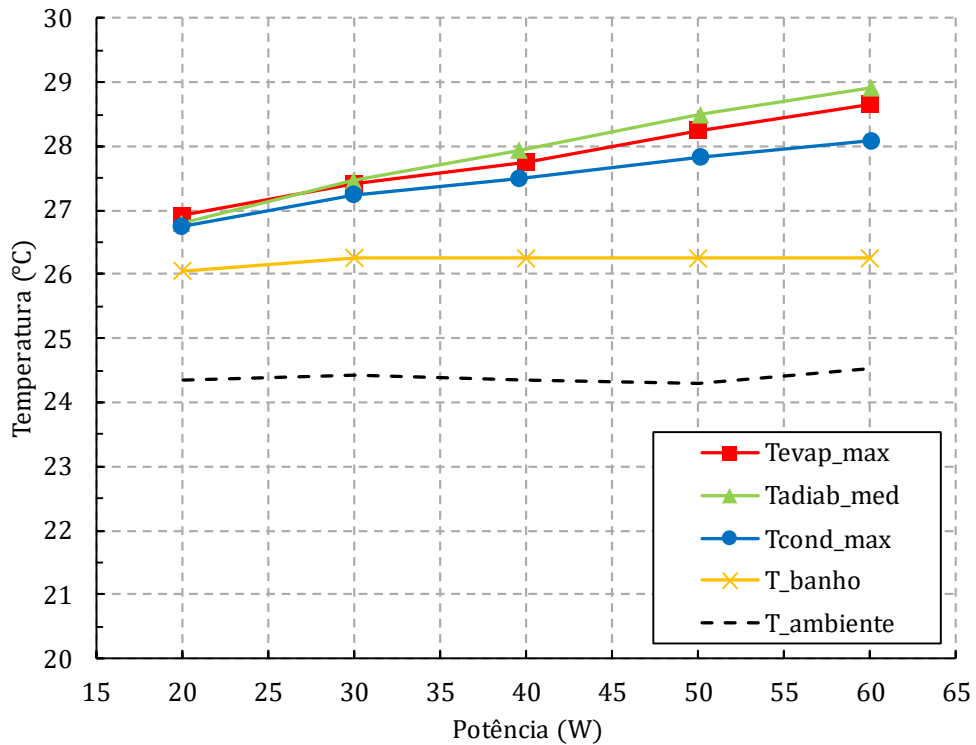
Figura 35 - Temperaturas máximas ao longo dos tubos para o conjunto nos testes de laboratório em relação a potência inserida no sistema. Experimento instalado na horizontal.



Fonte: autor (2022).

Quando o experimento é instalado em uma inclinação de 26 graus, com a seção do evaporador dos tubos de calor na parte inferior, se observa um comportamento semelhante ao instalado na horizontal, ver Figura 36. As temperaturas do evaporador não apresentaram aumento brusco de valor, o que indica que os tubos estão operando normalmente nas potências em questão, não atingindo seu ponto de secagem. Esta inclinação é favorável ao desempenho do tubo de calor, haja vista que o líquido condensado no condensador, além do efeito capilar, terá a gravidade ao seu favor.

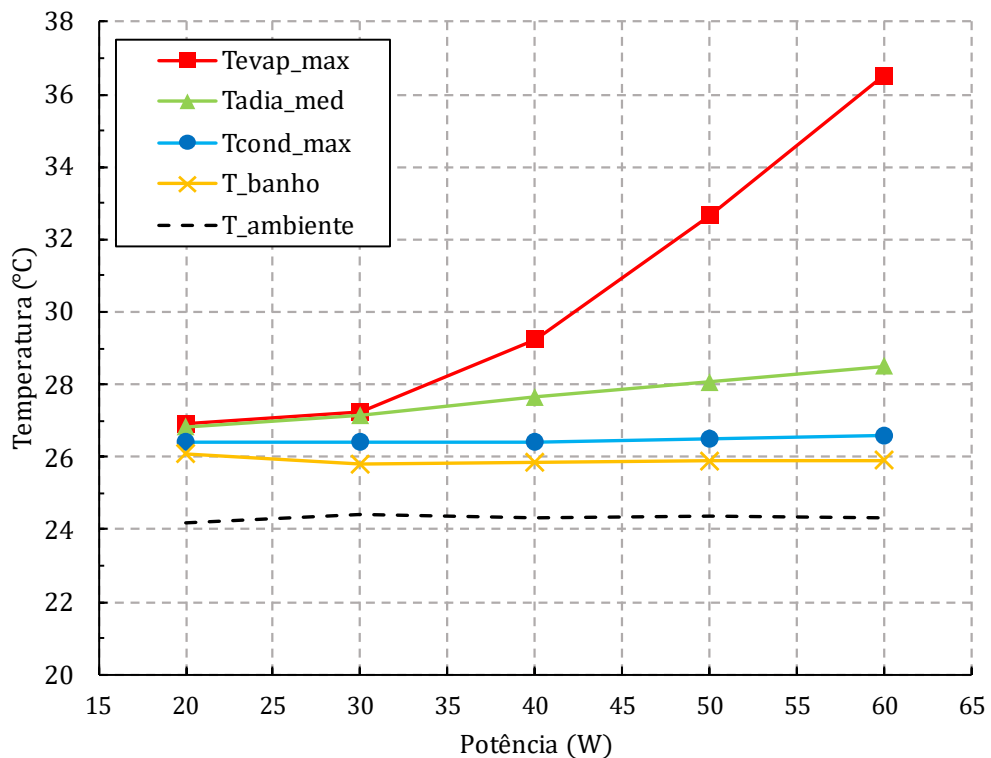
Figura 36 - Temperaturas máximas ao longo dos tubos para o conjunto nos testes de laboratório em relação a potência inserida no sistema. Inclinação em 26 graus com evaporadores embaixo.



Fonte: autor (2022).

Na última configuração o sistema foi inclinado em 26 graus, com a seção do evaporador na parte superior. Na Figura 37 pode-se analisar as temperaturas ao longo do tubo e observar a temperatura do evaporador aumentando rapidamente a partir da potência de 40 W. Isto indica que a partir desta potência o tubo está próximo da região de secagem e, não será capaz de transportar tais quantidade de potência inseridas no sistema sem um aumento de temperatura excessivo, ou seja, esta potência é seu limite operacional para esta configuração.

Figura 37 - Temperaturas máximas ao longo dos tubos para o conjunto nos testes de laboratório em relação a potência inserida no sistema. Inclinação em 26 graus com evaporadores em cima.

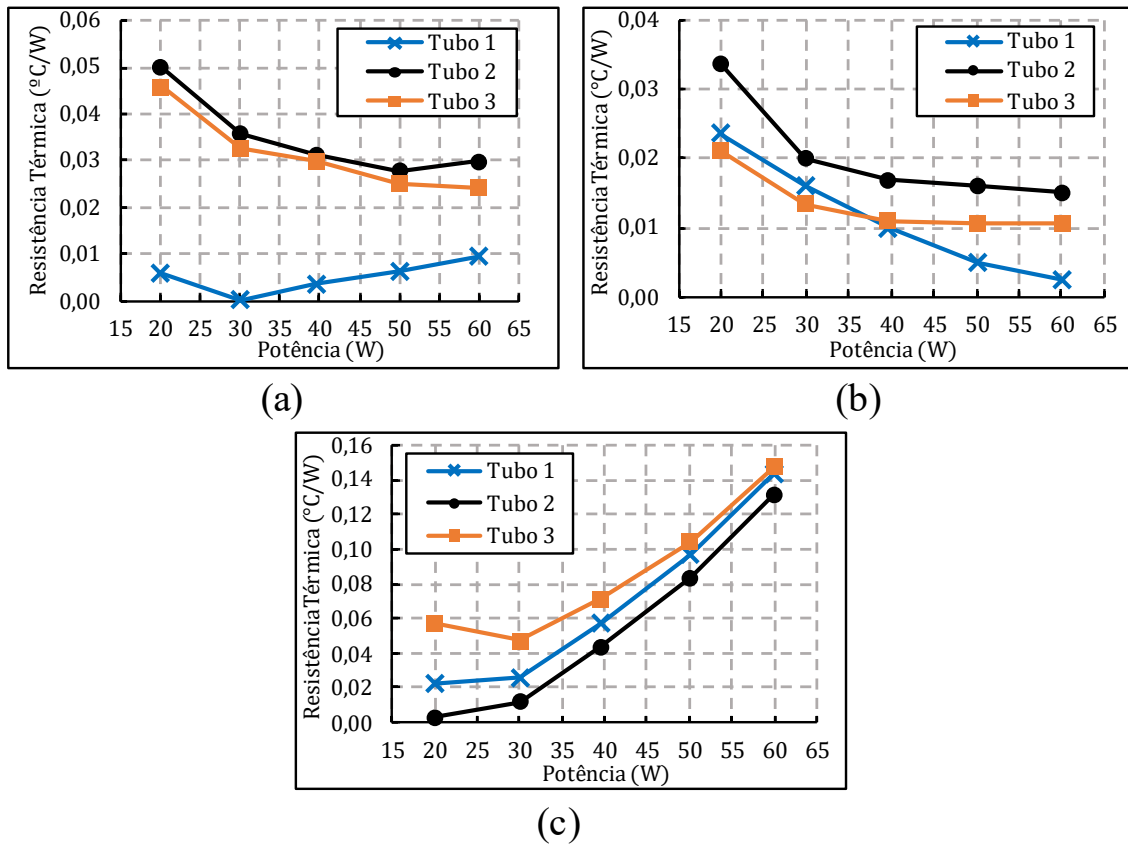


Fonte: autor (2022).

Outra forma de observar o início do ponto de secagem do tubo é através da resistência térmica total, que é a razão entre a máxima diferença de temperaturas entre os extremos do tubo e o calor transportado. As resistências térmicas dos tubos de calor utilizados neste trabalho são apresentadas na Figura 38. A resistência térmica diminui conforme o aumento da potência transportada até o ponto onde inicia-se a secagem, ou seja, o aumento da potência resulta no aumento da resistência térmica.

Como pode-se notar na Figura 38a e Figura 38b, as resistências diminuem com o aumento da potência imposta para os três tubos analisados. Apenas na Figura 38c é possível observar o início da secagem de todos os tubos, evidenciado pelo aumento da resistência térmica, indicando que a retirada de calor pela seção do condensador não está ocorrendo de forma ideal. Isso ocorre, pois o fluido no interior do tubo deve superar a perda de carga através do elemento poroso e ainda o vetor gravidade em sentido oposto. Apesar do ponto de secagem ocorrer em uma potência mais baixa, o tubo ainda possui uma resistência térmica reduzida, ou seja, ele conseguirá transportar calor de maneira satisfatória mesmo nesta condição adversa.

Figura 38 - Resistência térmica dos tubos nos testes de laboratório pela potência. (a) Inclinação em 0 grau. (b) Inclinação em 26 graus com condensador em cima. (c) Inclinação em 26 graus com evaporador em cima.



Fonte: autor (2022).

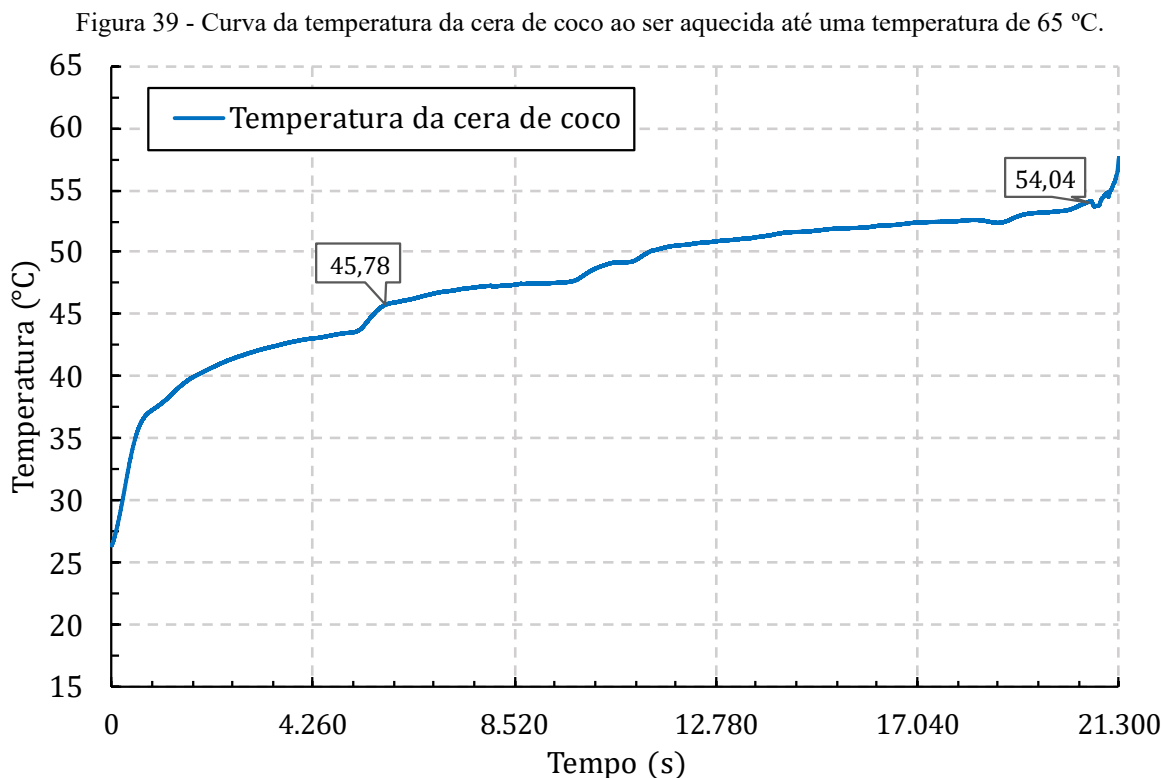
Com as análises térmicas foi possível observar que o sistema é capaz de transferir potências maiores que o máximo calculado para a área da placa coletora desenvolvida. Os tubos testados na horizontal e com a seção do evaporador para baixo não apresentaram ponto de secagem, sendo possível transferir potências maiores de 65 W. Contudo, na condição de evaporador para cima, é observado o ponto de secagem a uma potência próxima aos 40 W, entretanto, a partir dos valores de resistência térmica, é possível constatar que mesmo nestas condições adversas de potência, o tubo terá um funcionamento satisfatório.

Com as condições atuais do protótipo, considerando a potência máxima irradiada sobre a placa coletora, os tubos irão funcionar fora da região de secagem, sendo possível aumentar a potência a ser transferida a partir do aumento da área de coleta de irradiação solar. Considerando o ponto de secagem sendo 40 W, é possível aumentar a área da placa coletora de 174,24 cm<sup>2</sup> para 283,29 cm<sup>2</sup>, configurando um aumento de 62,59% do tamanho atual.

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE (PCM)

Os testes em laboratório com o material de mudança de fase foram realizados com o intuito de encontrar sua temperatura de mudança de fase.

Com os testes observou-se o início da mudança de fase em uma temperatura próxima aos 45 °C, conforme a Figura 39. Em aproximadamente 54 °C, constatou-se visualmente que o material havia atingido o estado líquido, não conseguindo armazenar mais energia térmica e sua temperatura começou a subir bruscamente. Neste teste concluiu-se que a temperatura de mudança de fase da cera de coco poderá atender as condições dos testes em campo.



Fonte: autor (2022).

#### 4.3 RESULTADOS DOS TESTES DE CAMPO

Nesta seção será apresentada a análise dos resultados obtidos experimentalmente, mostrando os resultados de cada configuração, comportamento do tubo de calor e energia gerada pelo TEG.

### 4.3.1 Testes em campo: temperaturas

Os testes em campo foram realizados em diversas configurações, com o intuito de encontrar a configuração de instalação mais eficiente, ou seja, a configuração que produza mais energia ao longo de um dia. Os testes foram realizados em duas cidades distintas, Joinville em Santa Catarina, e Ijuí, no Rio Grande do Sul. Em Joinville foram testadas todas as configurações propostas e em Ijuí foi possível a realização de testes apenas nas configurações 01, 02 e 03.

Como os testes foram realizados em campo e, conseqüentemente, dependiam das condições climáticas nos dias testados, utilizou-se para maior semelhança na comparação dos dados, a radiação solar nos dias em questão. Como não foi possível realizar medidas da irradiância solar ou luminosidade no momento dos testes, buscou-se no banco de dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), dados da radiação global dos dias específicos de testes para a região de Joinville - SC. O instituto possui uma estação instalada em Itapoá-SC (Lat: -26,081389, Long: -48,641667) que é cidade vizinha de Joinville-SC (41,28 km em linha reta). Para os dados aquiridos em Ijuí - RS, utilizou-se os dados meteorológicos do INMET da cidade de Cruz Alta-RS (Lat: -28.63944, Long.: -53.60611), cidade vizinha (41,66 km em linha reta).

A partir destes dados, considerou-se as informações obtidas pela estação meteorológica de irradiação a cada hora, para avaliar se as condições dos dias, obtendo-se uma maior confiabilidade nos dados de energia gerada para uma mesma condição climática em cada configuração instalada.

Outra maneira de comparar as condições do clima, para maior confiabilidade dos resultados finais de potência e energia gerada pelo TEG, foi o emprego da temperatura adiabática do tubo de calor. Contudo, desta forma, só é possível realizar comparações entre testes realizados para a mesma configuração, pois ao alterar algum parâmetro de instalação, por exemplo, o uso ou não da aleta de alumínio, as temperaturas adiabáticas mudam, pois a capacidade de dissipação de calor do sistema também muda. Sendo assim, este método deve ser utilizado com restrições.

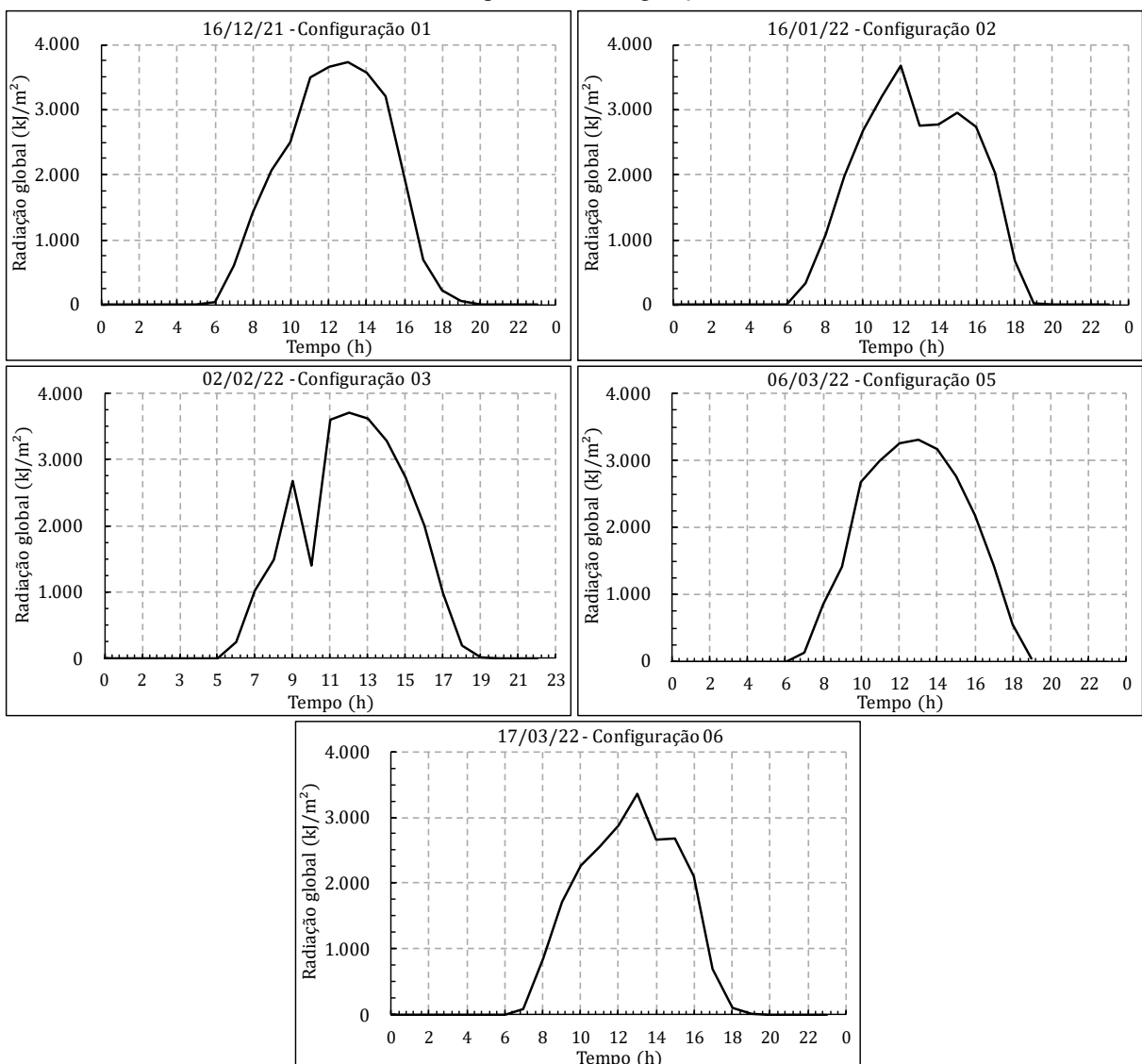
#### 4.3.1.1 *Análise das temperaturas em Joinville - SC*

Nesta subseção serão apresentados os resultados referentes as configurações avaliadas na cidade de Joinville-SC. As configurações testadas em sua maioria dependem da irradiação

solar como fonte de calor, dentre elas, apenas a Configuração 04 não depende diretamente da radiação solar como fonte térmica, pois possui sua fonte de calor é o interior do solo, sendo o ar ambiente seu sumidouro.

A Figura 40 mostra os dados de radiação de Itapoá-SC, consideradas para a cidade de Joinville-SC, local de realização dos testes. Neste gráfico são mostradas as curvas de radiação, data de realização do teste e a configuração testada.

Figura 40 - Radiação solar na cidade de Itapoá-SC, medidas pela estação meterológica do INMET nos dias de testes para cada configuração.



Fonte: adaptado de INMET (2022).

O primeiro teste realizado foi o da configuração 01, em que a seção do condensador do tubo de calor foi inserida 13,2 cm no solo e inclinada em  $26^\circ$ , resultando em

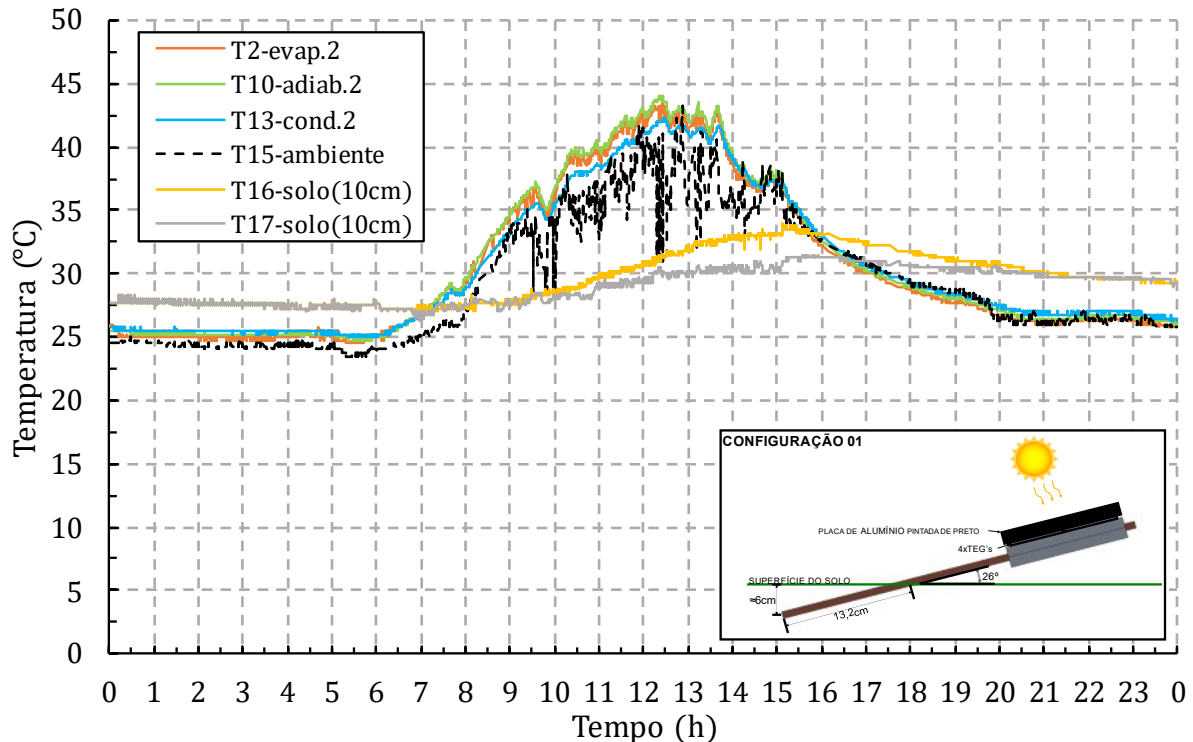


aproximadamente 6 cm vertical no solo. Os geradores termoelétricos foram fixados através de uma chapa de alumínio, como mostrado na Figura 21, que foi pintada de preto para maior absorção da radiação solar.

Ao instalar o sistema externamente, foi realizada a coleta das temperaturas nas seções do evaporador, adiabática, condensador e na superfície da placa de alumínio, tanto em cima quanto embaixo e em duas profundidades do solo. Devido ao número limitado de termopares do sistema de aquisição de dados, foram escolhidas duas profundidades fixas para coleta da temperatura para todos os experimentos que envolvem o solo. Os termopares no solo foram enterrados em 10 cm e 20 cm. Também foi medida a tensão de saída em aberto dos geradores termoelétricos para avaliação de geração de energia.

A primeira análise feita foi a variação das temperaturas ao longo dos tubos de calor para verificar seu funcionamento. Foi observado que as temperaturas das seções do evaporador, adiabática e condensador se mantiveram próximas umas das outras, o que se conclui que o tubo está funcionando corretamente, conforme Figura 41. A configuração 02, onde a seção do condensador e seção adiabática foram inseridas no solo, equivalente a 26,4 cm do tubo de calor e cerca de 12 cm de profundidade, apresentaram resultados semelhantes a configuração 01, seus gráficos de temperatura são apresentados no Apêndice C.

Figura 41 - Comparação das temperaturas ao longo do tubo de calor na Configuração 01, juntamente com as temperaturas do solo e ambiente. Dados da cidade de Joinville-SC no dia 16 de dezembro de 2021, em um dia de sol.

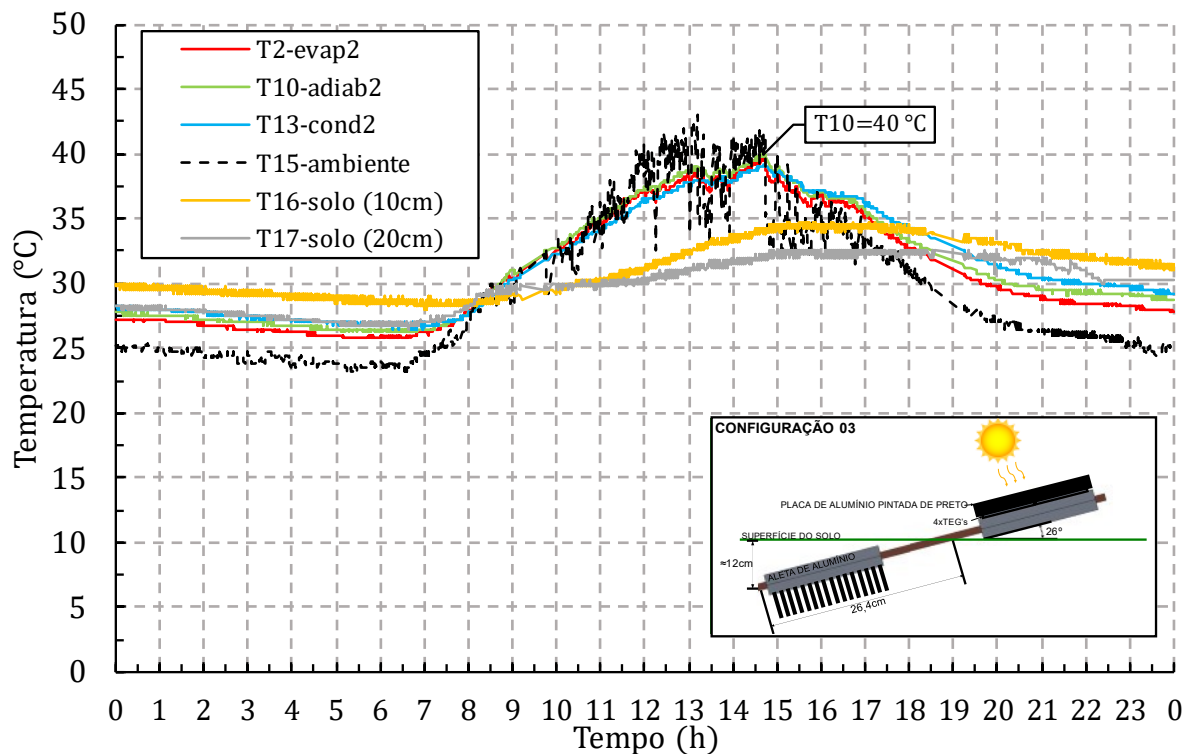


Fonte: autor (2022).

A Figura 42 apresenta os resultados das temperaturas ao longo do tubo de calor, temperatura ambiente e para as profundidades de 10 e 20 cm do solo para a configuração 03. Nesta configuração, o tubo é enterrado juntamente com uma aleta de alumínio com dimensões iguais a placa coletora (13,2 x 13,2 cm). A aleta é fixada através de parafusos sobre duas chapas de alumínio as quais prensam o tubo, fixando através de parafusos passantes. Entre os tubos e as chapas de alumínio foi utilizado pasta térmica para garantir maior contato entre as partes, o mesmo é feito entre a aleta de alumínio e as chapas fixadoras.

Nota-se que as temperaturas ao longo do tubo se mantêm próximas umas das outras, indicando o seu funcionamento adequado, também se percebe que a amplitude destas temperaturas em comparação com as configurações 01 e 02 são menores, ficando abaixo dos 40 °C, indicando uma maior dissipação de calor para o solo.

Figura 42 - Comparação das temperaturas ao longo do tubo de calor na Configuração 03, juntamente com as temperaturas do solo e ambiente. Dados da cidade de Joinville-SC no dia 02 de fevereiro de 2022, em um dia de sol.

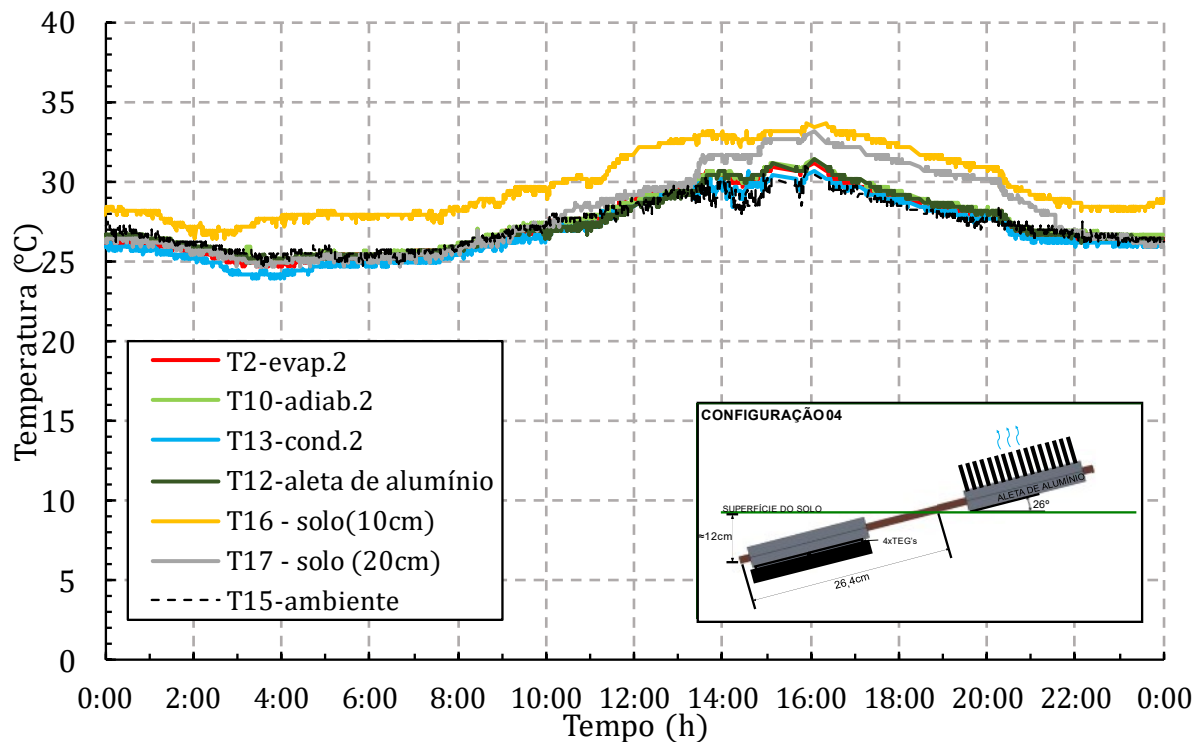


Fonte: autor (2022).

Para a configuração 04, o sistema foi instalado com o objetivo de captar a energia térmica do solo e transportá-la para o ar ambiente, criando um gradiente sobre o gerador termoelétrico a partir das interfaces solo e ar ambiente. O primeiro passo foi verificar as temperaturas ao longo do tubo para analisar seu funcionamento. A Figura 43 mostra as temperaturas das seções do evaporador, adiabática e condensador do tubo de calor, as temperaturas de duas profundidades do solo e a temperatura da aleta de alumínio exposta ao ar ambiente.

As temperaturas ao longo do tubo e na aleta de alumínio ficam abaixo da temperatura do solo em 10 cm, temperatura próxima a profundidade a qual a placa fixadora dos geradores está enterrada, indicando que está ocorrendo transferência e dissipação para o ar. As temperaturas ao longo do tubo se mantêm próximas umas das outras, outro fator indicativo para de bom funcionamento nesta configuração.

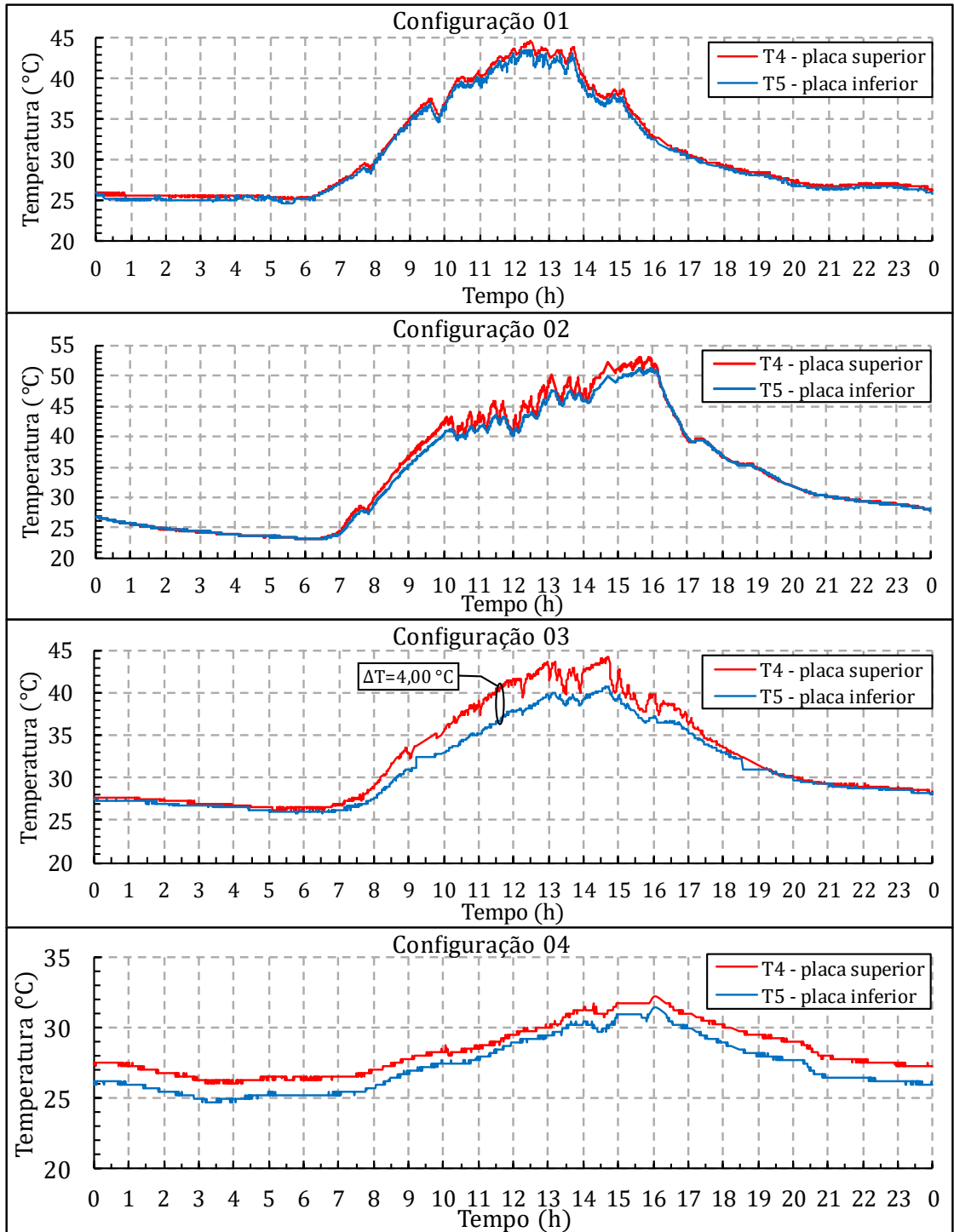
Figura 43 - Temperaturas ao longo do tubo, no solo e na aleta de alumínio para a configuração 04. Instalação em Joinville-SC.



Fonte: autor (2022).

Para verificação dos gradientes de temperatura foram analisadas as temperaturas das placas que fixam os geradores, ou seja, a temperatura da placa superior, que recebe a radiação solar e a temperatura da placa inferior, que é responsável pela fixação dos tubos de calor. Portanto, para a diferença de temperatura sobre os TEGs foi considerado a diferença entre as temperaturas da placa superior e da placa inferior. A Figura 44 mostra as curvas das temperaturas das placas superiores e inferiores das configurações 01 a 04. A partir do gráfico se percebe que a configuração 03 apresenta gradientes de temperatura maiores, o que consequentemente influencia na geração de energia do TEG. Para esta configuração foi encontrado o maior gradiente de temperatura entre as quatro configurações testadas, de 4,00 °C, atingindo este valor máximo às 11 h e 37 min, como indicado no gráfico.

Figura 44 - Temperaturas das placas superior e inferior (lado quente e lado frio do TEG, respectivamente) para as configurações de 01 a 04 do sistema instalado em Joinville - SC.



Fonte: autor (2022).

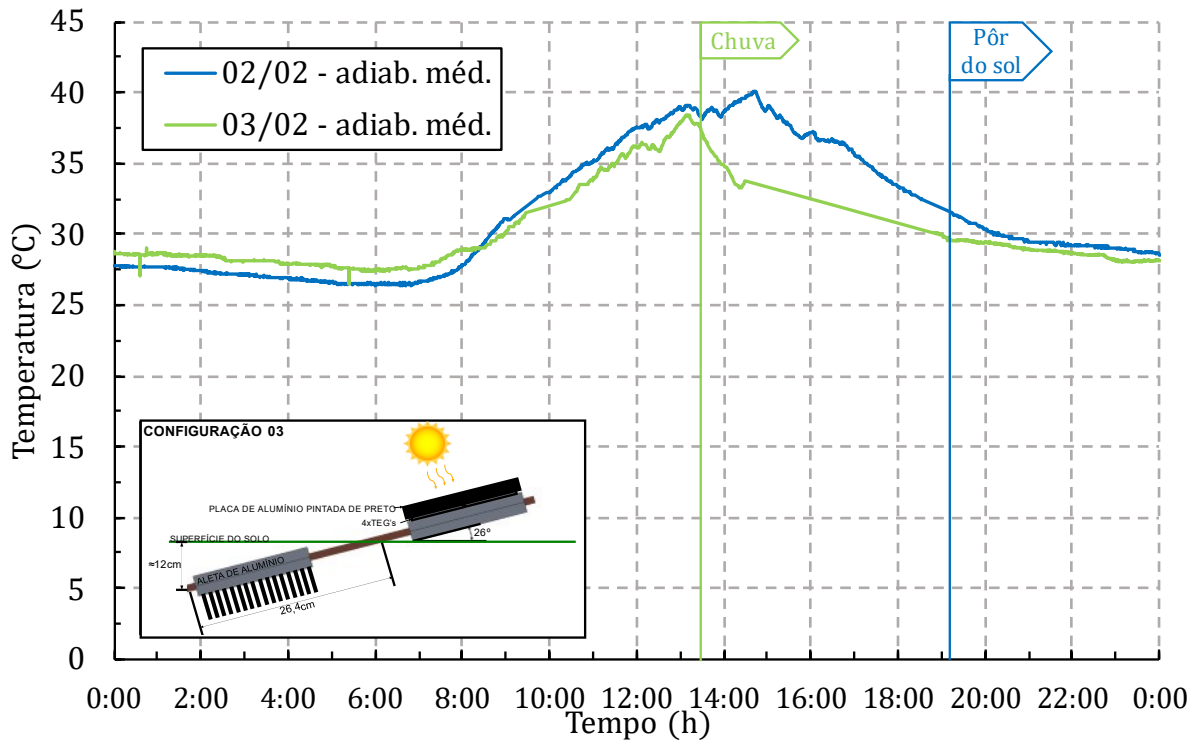
Analisando as curvas do lado quente e frio a qual o gerador termoelétrico foi submetido nos testes das configurações 01, 02, 03 e 04, é possível constatar que a configuração que possui melhor desempenho em termos de geração de gradiente térmico é a configuração 03.

Os resultados analisados até aqui foram para condições climáticas semelhantes, consideradas de sol com poucas nuvens. Porém, deve ser avaliado o funcionamento do sistema quando as condições climáticas não são favoráveis no fator radiação solar, ou seja, em dias nublados e chuvosos. Para isso, decidiu-se comparar os dados da configuração 03 que se apresentou mais eficiente na geração de gradiente térmico sobre o TEG.

A Figura 45 apresenta os resultados da configuração 03. Nela a variação de temperaturas em dois dias diferentes com condições climáticas distintas foi comparada. No dia 02/02/2022, o clima foi de céu limpo com poucas nuvens e no dia 03/02/2022 ocorreram pancadas de chuva.

Para a mesma configuração são apresentadas as temperaturas adiabáticas, que refletem a temperatura de funcionamento do tubo. Pode-se observar que as temperaturas ao longo do dia se mantêm próximas quando a condição é de céu limpo para ambos os dias, porém, essa condição muda no dia 03/02/2022 às 13h e 30 min, quando ocorrem pancadas de chuva, evidenciadas pelas quedas bruscas das temperaturas adiabáticas do tubo, enquanto as temperaturas do dia 02/02/2022 se mantêm até o horário do pôr do sol, às 19h e 07 min.

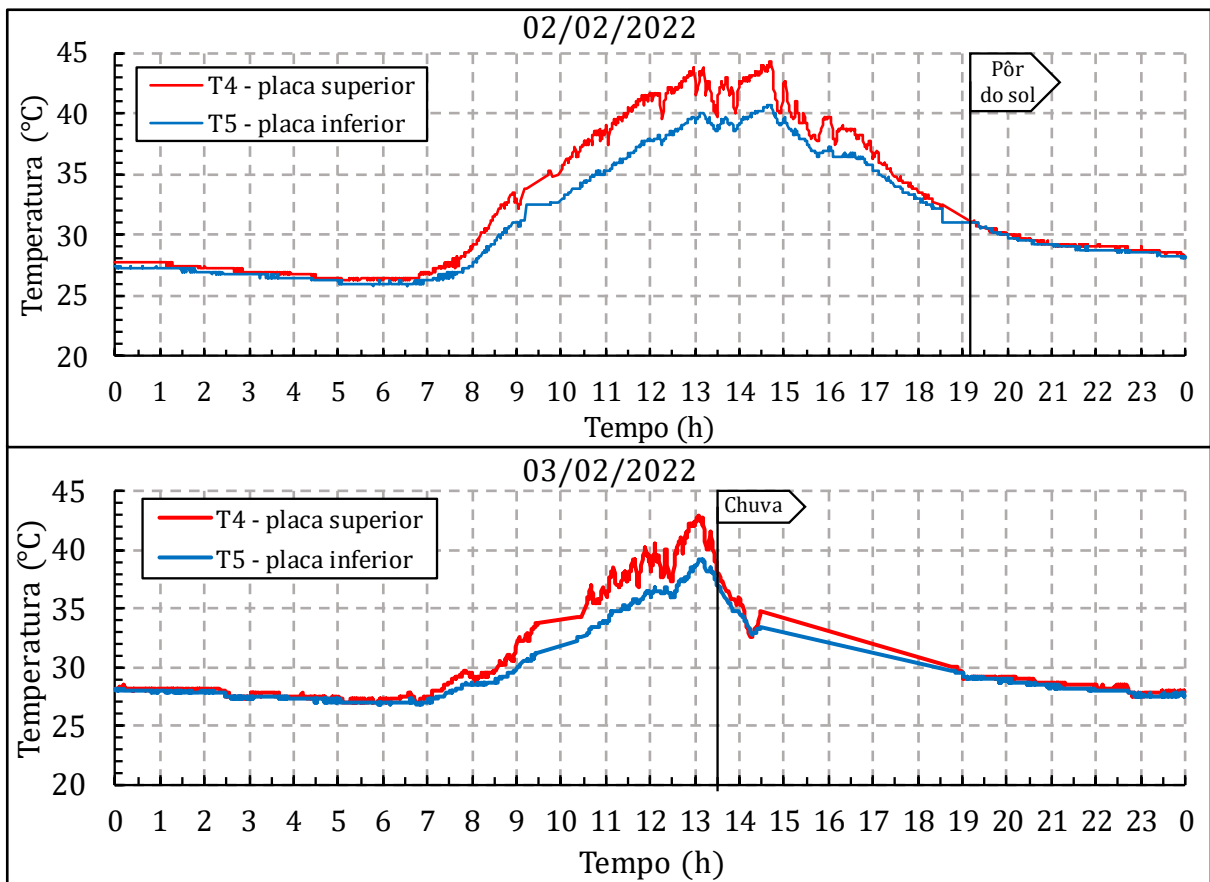
Figura 45 - Temperaturas adiabáticas médias do tubo de calor instalado em 2 dias de condições climáticas distintas na cidade de Joinville-SC. Sistema instalado na Configuração 03.



Fonte: autor (2022).

Ao analisar as temperaturas sobre o gerador termoelétrico, observa-se um comportamento similar a curva da temperatura adiabática dos tubos de calor para os dias 02 e 03/02/2022. A Figura 46 mostra a comparação entre as temperaturas da placa superior e inferior, que foram utilizadas como referência para o cálculo do diferencial de temperatura do TEG. Na figura se observa a diminuição da diferença de temperatura no momento em que ocorre a chuva, o que influencia diretamente na geração de energia. Isto indica que pode ocorrer redução na geração de energia em momentos de chuva, ou a inversão de polaridade nos terminais do gerador em momentos em que a temperatura da placa inferior for maior que da placa superior. A discussão dos resultados relacionados a tensão de saída e energia gerada serão feitas nas próximas seções.

Figura 46 - Temperaturas nas faces do geradores termoelétrico em condições climáticas distintas para a configuração 03, sistema instalado na cidade de Joinville - SC.



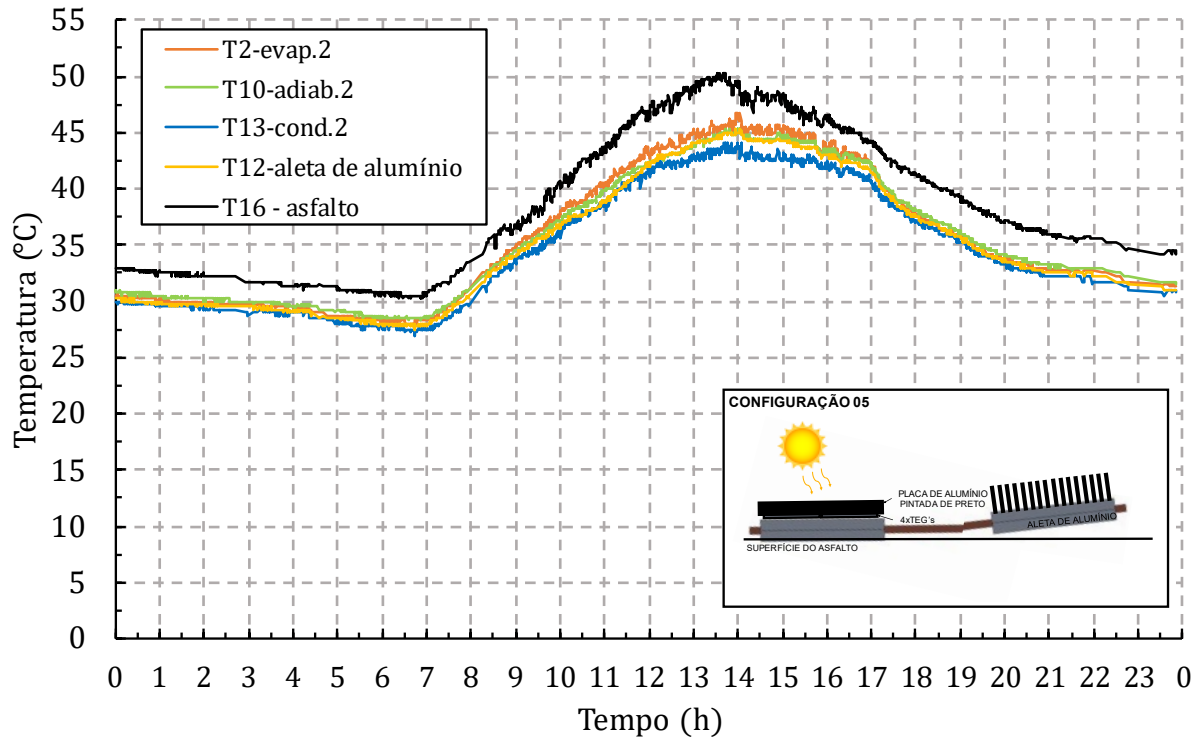
Fonte: autor (2022).

Para as configurações 05 e 06 o sistema foi instalado com objetivo de utilizar a energia térmica do asfalto. Para isso, foram medidas as temperaturas da superfície do asfalto, da placa fixadora dos tubos de calor, ao longo do tubo e na aleta de alumínio. As primeiras temperaturas a se analisar são ao longo do tubo para verificar seu funcionamento.

Na Figura 48 são descritas as temperaturas ao longo do tubo para a configuração 05, juntamente com as temperaturas do asfalto e da aleta de alumínio. Percebe-se que as temperaturas do evaporador, adiabática e do condensador se mantêm próximas umas das outras como nas outras configurações testadas, indicando a correta transferência de calor para a aleta de alumínio. A temperatura do asfalto é maior que as temperaturas ao longo do tubo, o que indica que a temperatura está sendo transferida para o lado quente do TEG e sendo dissipada para o ar através da aleta.



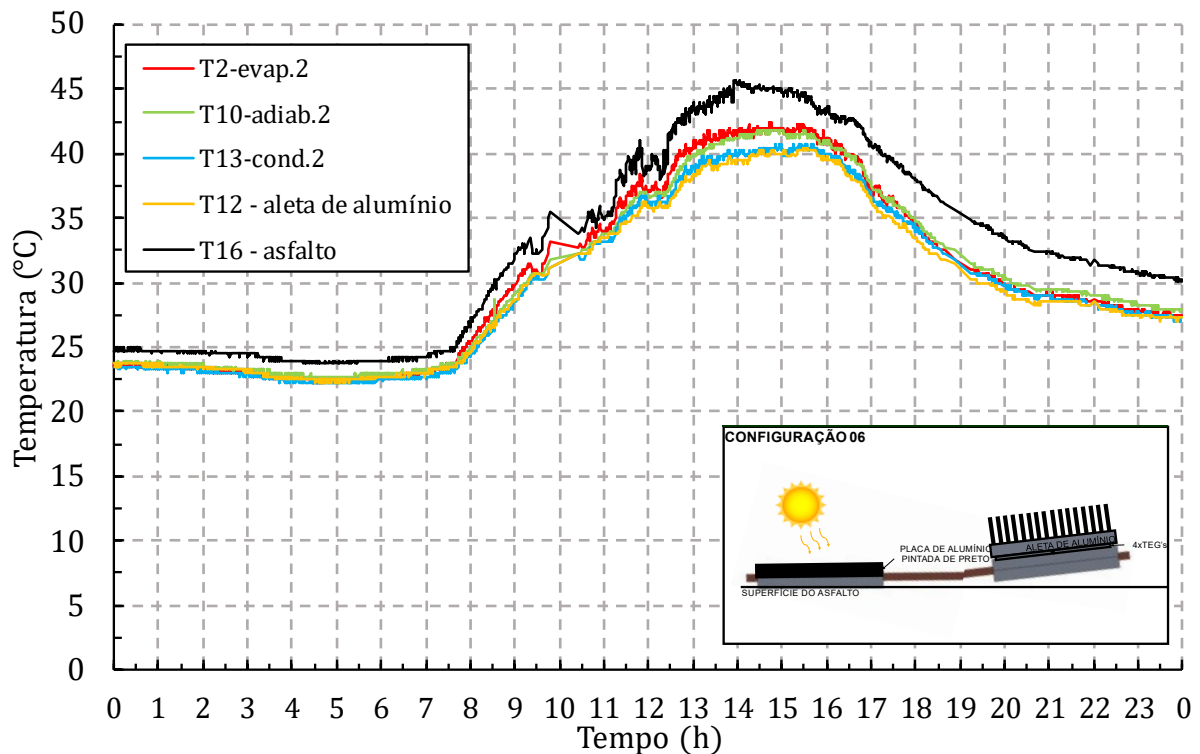
Figura 47 - Temperaturas do asfalto, ao longo do tubo e da aleta de alumínio para a configuração 05. Instalado em Joinville-SC.



Fonte: autor.

Na Figura 48 são descritas as temperaturas ao longo do tubo para a configuração 06, juntamente com as temperaturas do asfalto e da aleta de alumínio. Pode-se perceber que as temperaturas se mantêm próximas umas das outras, como nas configurações anteriores, indicando a correta transferência de calor para a aleta de alumínio. A temperatura da aleta, neste caso, se torna a temperatura do lado frio do TEG, sendo considerada para os cálculos. A temperatura do asfalto é maior que as temperaturas ao longo do tubo, o que indica que a temperatura está sendo transferida para o lado quente do TEG e sendo dissipada.

Figura 48 - Temperaturas do asfalto, ao longo do tubo e na aleta de alumínio para a configuração 06, em um dia de céu limpo e sol. Instalado em Joinville -SC, dados do dia 17/03/2022.



Fonte: autor (2022).

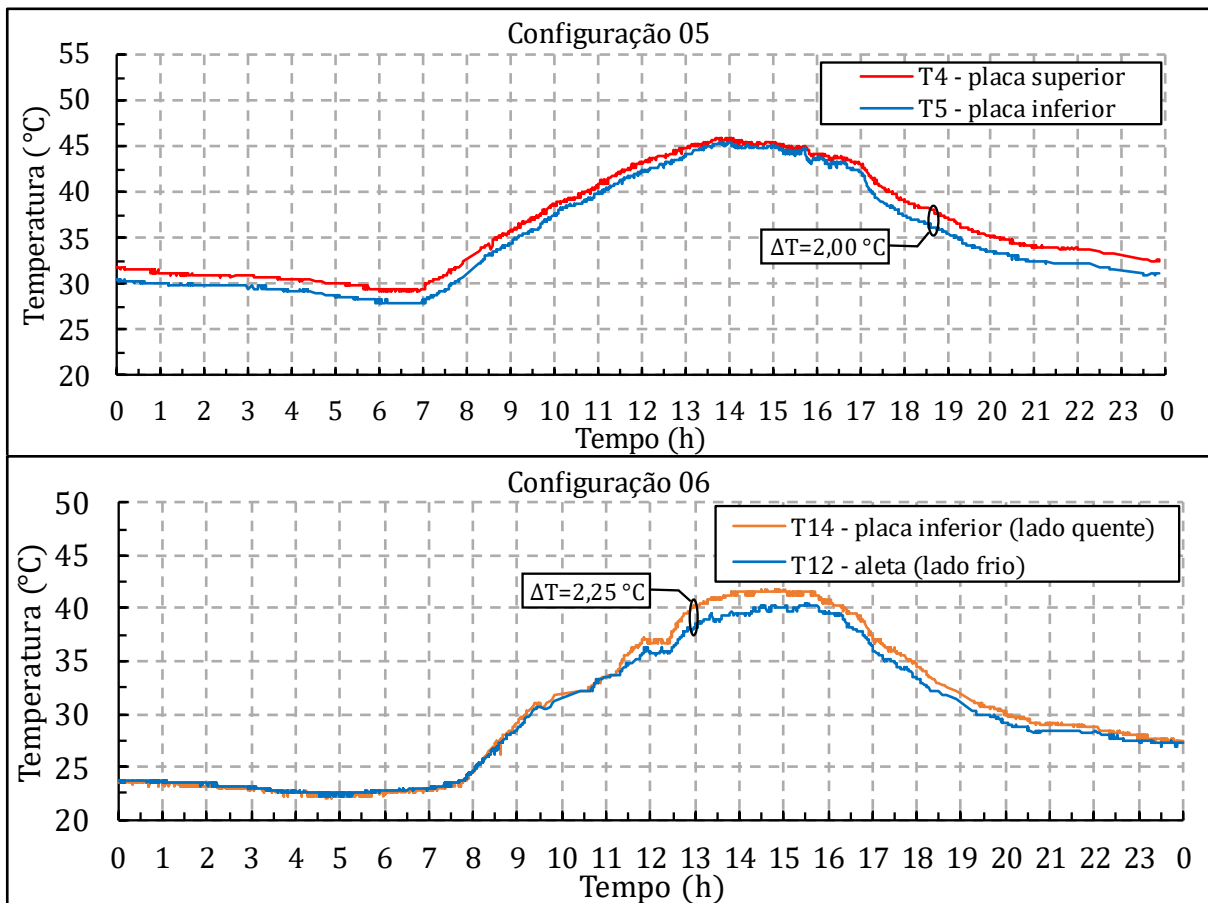
Para avaliar o desempenho em relação ao gradiente térmico de cada configuração, as curvas das temperaturas das placas que fixam os geradores termoelétricos foram comparadas. Na configuração 05 os pontos utilizados são as placas coletora (superior) e as placas que conectam os tubos de calor com a aleta de alumínio (inferior). Para a configuração 06 são as placas fixadoras do tubo que nas quais os TEGs são apoiados (lado quente) e a aleta de alumínio que prensa os geradores contra a placa de alumínio (lado frio).

A Figura 49 mostra as curvas das temperaturas consideradas nas faces do TEG e mostram dois comportamentos diferentes. Para a configuração 05, as maiores diferenças de temperatura ocorrem quando as temperaturas das placas superior e inferior são as menores, ou seja, em períodos do dia em que o Sol não é predominante, como na manhã e no anoitecer. O maior gradiente térmico encontrado foi de 2,00 °C, atingido às 18h e 35 min, sendo o pôr do sol no dia do teste (06/03/2022) ocorrendo às 18h e 41 min.

Na configuração 06, os maiores gradientes de temperatura ocorrem durante o dia, em temperaturas mais elevadas e nos momentos em que o Sol é predominante. A maior diferença de temperatura encontrada para esta configuração foi de 2,25 °C às 12h e 55 min.

Analisando o gráfico não é possível definir qual configuração é mais eficiente apenas considerando a variação de temperatura máxima, devido seus gradientes térmicos serem próximos. Nas próximas seções serão discutidos os resultados em termos de tensão do gerador em aberto e energia gerada durante um dia, com o objetivo de avaliar a configuração mais eficiente.

Figura 49 - Temperaturas das placas do lado quente e lado frio do TEG, para as configurações de 05 e 06 do sistema instalado em Joinville - SC.



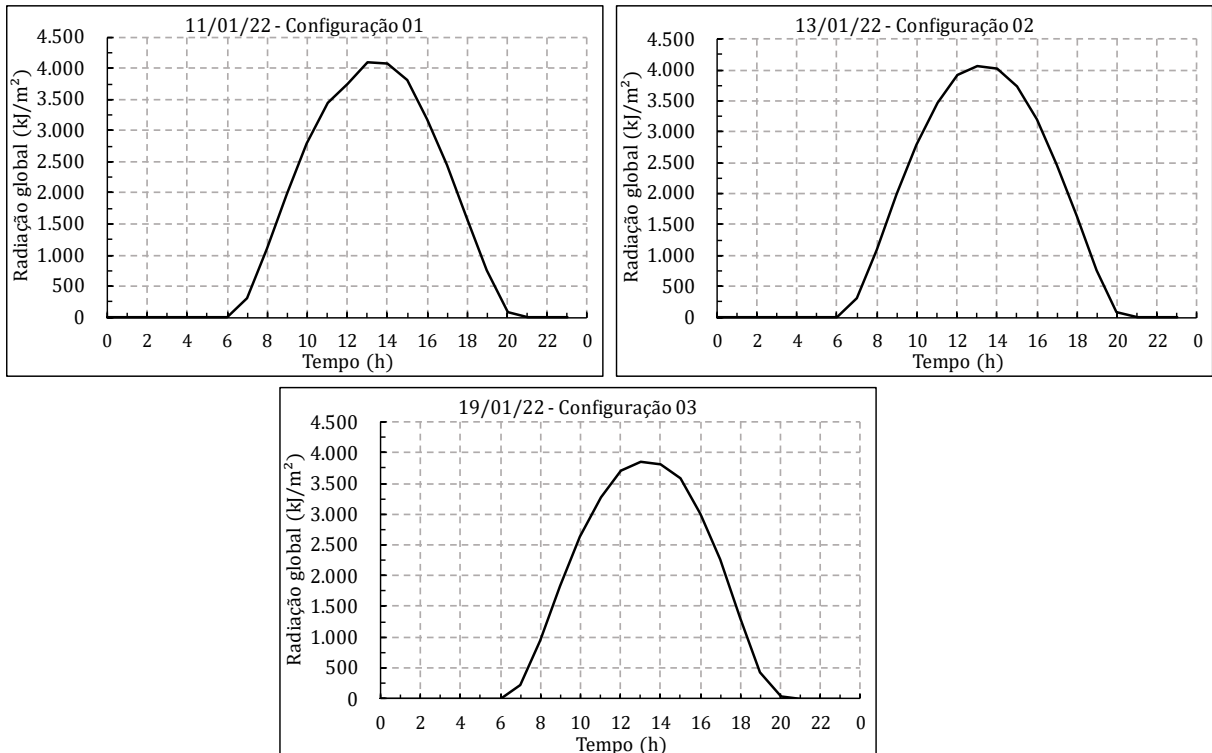
Fonte: autor (2022).

#### 4.3.1.2 Análise das temperaturas em Ijuí - RS

Nesta subseção serão apresentados os resultados referentes aos testes realizados na cidade de Ijuí-RS para as configurações 01, 02 e 03. O primeiro passo foi verificar as condições climáticas dos dias testados, analisando a irradiação solar no dia. A Figura 50 ilustra a radiação

global considerada para as três configurações testadas, a partir destes dados pode-se considerar os três dias como dias de sol com céu limpo.

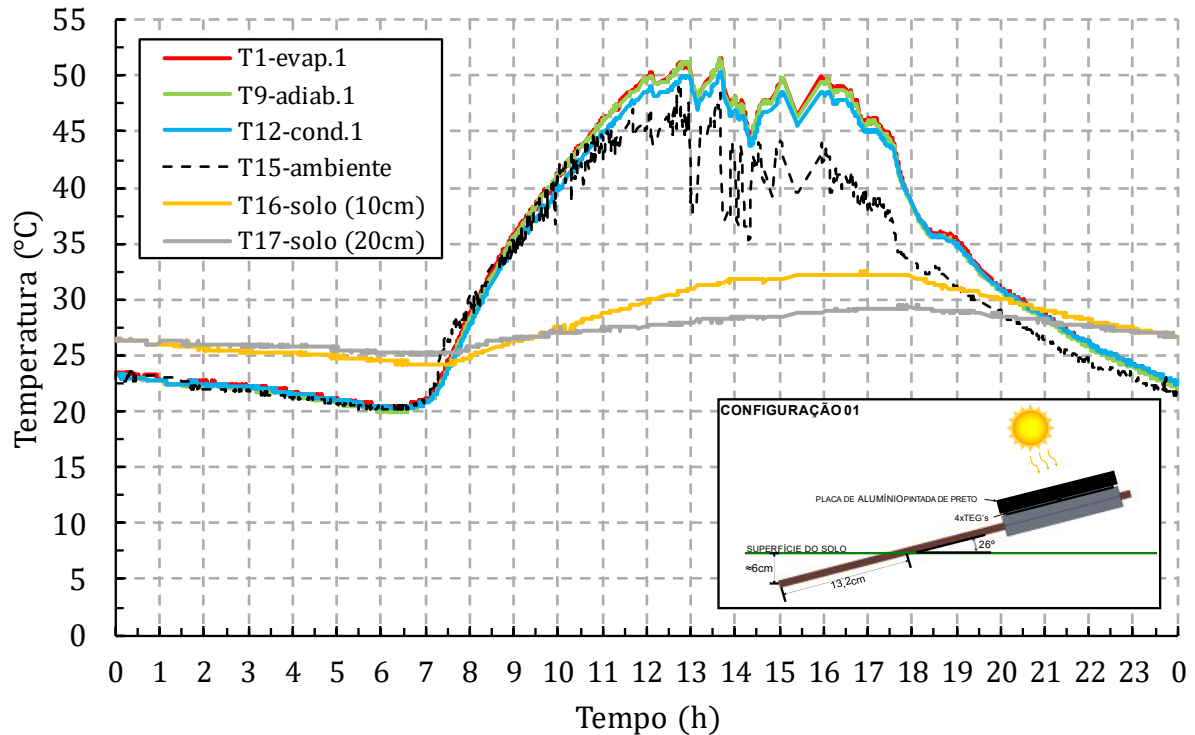
Figura 50 - Radiação solar na cidade de Cruz Alta-RS, medidas pela estação meteorológica do INMET nos dias de testes das configurações 01, 02 e 03.



Fonte: adaptado de INMET (2022).

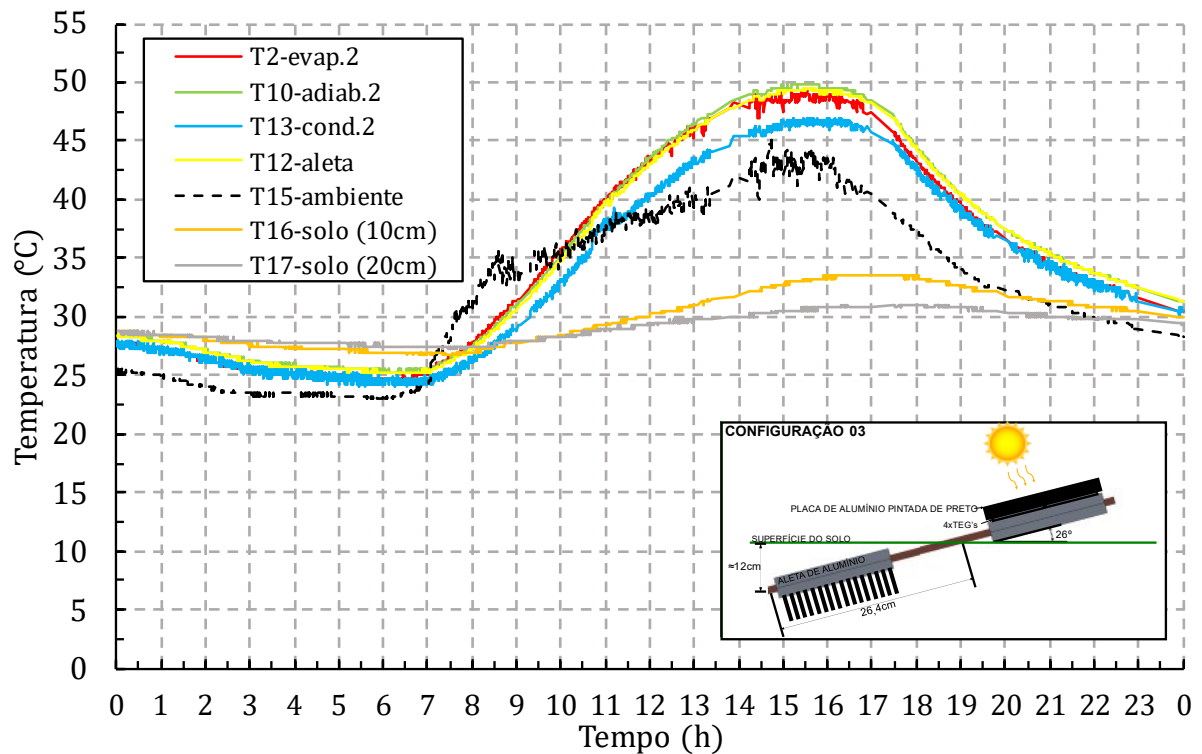
Da mesma forma que as análises realizadas em Joinville, foi observado que as temperaturas ao longo do tubo se mantiveram próximas umas das outras, indicando que o tubo está funcionando corretamente, conforme Figura 51. Para a configuração 02, onde a seção do condensador e seção adiabática foram inseridas no solo, os resultados são semelhantes a configuração 01 em termos de funcionamento dos tubos de calor, seus gráficos de temperatura são apresentados no Apêndice C.

Figura 51 - Comparação das temperaturas ao longo do tubo de calor na Configuração 01, juntamente com as temperaturas do solo e ambiente. Dados da cidade de Ijuí-RS no dia 11 de janeiro de 2022, em um dia de sol.



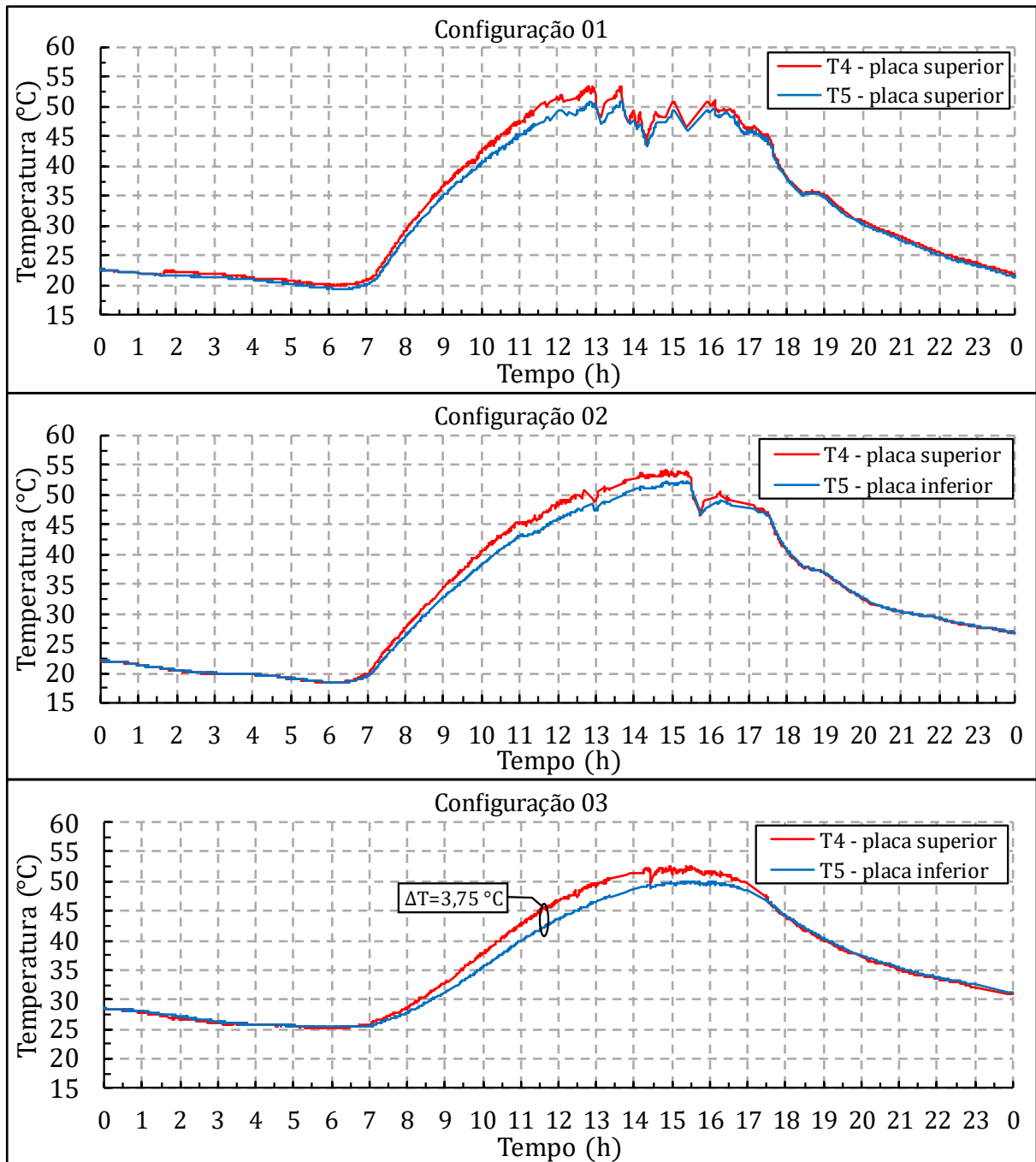
Os resultados para a configuração 03 são apresentados na Figura 52. As temperaturas do evaporador e adiabática são maiores que a do condensador, porém, as temperaturas da aleta de alumínio enterrada no solo são próximas a temperatura de operação do tubo (temperatura adiabática média). Isto indica que o tubo de calor mesmo em uma condição de inclinação adversa ao seu funcionamento está transferindo calor, suprimindo a necessidade para as condições impostas a ele.

Figura 52 - Comparação das temperaturas ao longo do tubo de calor na Configuração 03, juntamente com as temperaturas do solo e ambiente. Dados da cidade de Ijuí-RS no dia 19 de janeiro de 2022, em um dia de sol.



Pra verificar se o sistema está gerando gradientes de temperatura sobre o gerador termoelétrico, se analisa as temperaturas nas placas superior e inferior, consideradas como as temperaturas nas faces do TEG. Na Figura 53 é observada as curvas para as configurações 01, 02 e 03 na cidade de Ijuí-RS. Pode-se observar que a configuração 03 apresenta os maiores gradientes, atingindo seu o máximo de 3,75 °C às 11 h e 37 min.

Figura 53 - Temperaturas das placas superior e inferior (lado quente e lado frio do TEG, respectivamente) para as configurações de 01 a 03 do sistema instalado em Ijuí - RS.

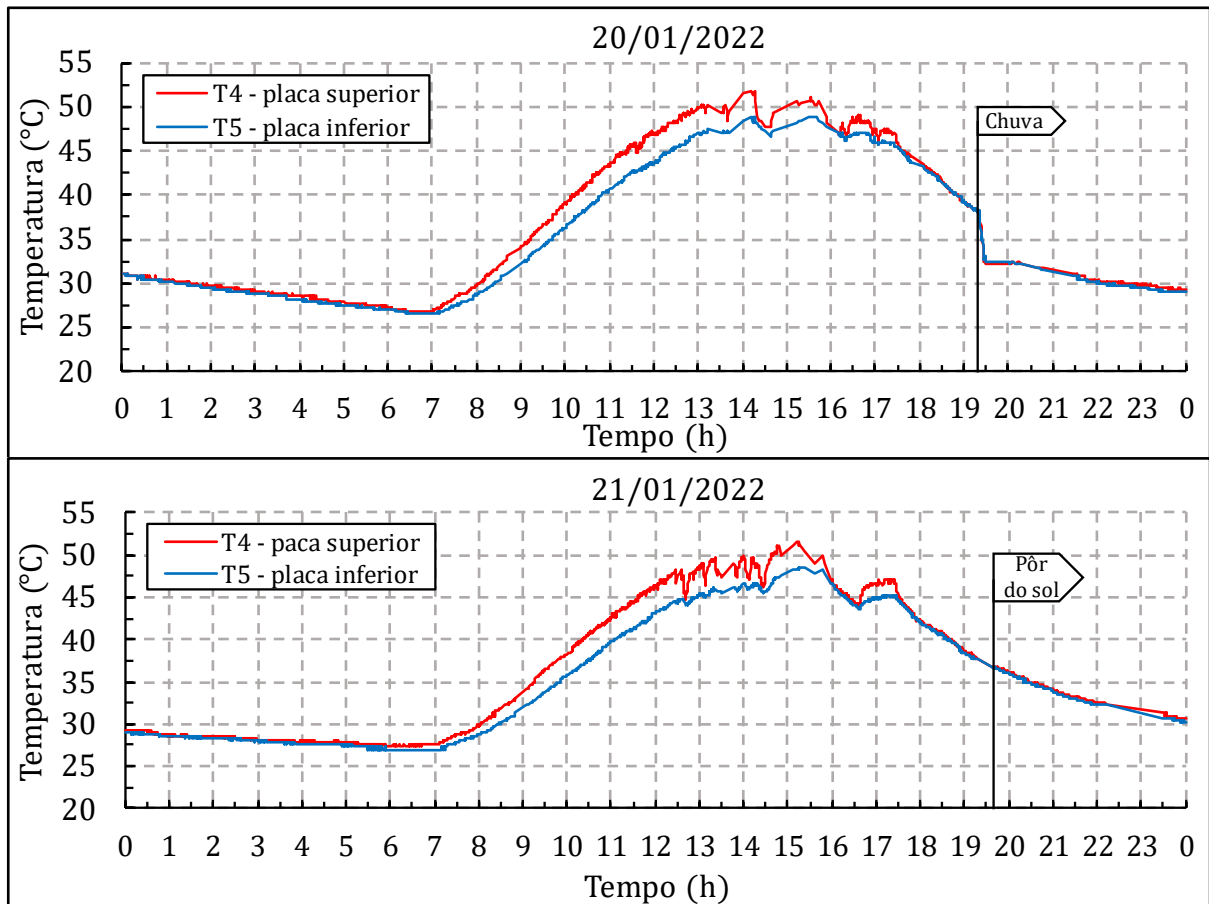


Fonte: autor (2022).

Para condições climáticas diferentes também foram analisadas as diferenças nos gradientes de temperatura sobre o gerador termoeletrico. Para isso, foram comparados dados para a configuração 03, que apresentou maior gradiente térmico durante um dia de testes em dias de sol. A Figura 54 mostra dois dias de testes, dia 20/01/2022 um dia de sol com nuvens e

com chuva no fim do dia, em que as temperaturas sobre a placa decaem bruscamente no momento da chuva. Já o dia 21/01/2022 um dia de sol com nuvens, como se percebe pela oscilação das temperaturas. Os efeitos das temperaturas na geração de energia serão analisados nas próximas seções.

Figura 54 - Temperaturas nas faces do geradore termoeletrico em condições climáticas distintas para a configuração 03, sistema instalado na cidade de Ijuí - RS.



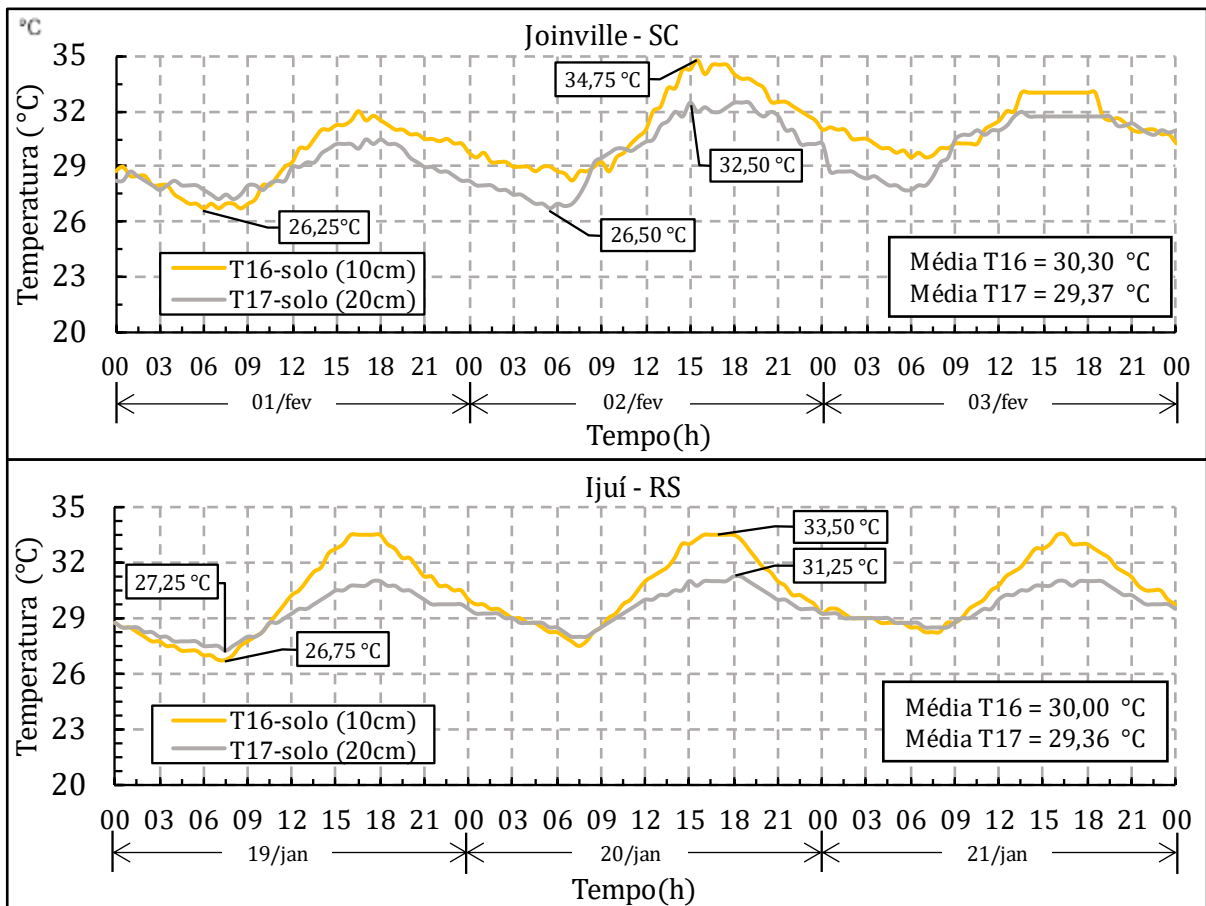
Fonte: autor (2022).

#### 4.3.1.3 Temperaturas do solo

As temperaturas do solo foram medidas em duas profundidades diferentes, em 10 cm e em 20 cm. Estes valores foram avaliados durante os testes das configurações 01 a 04. O objetivo foi quantificar diferença de temperatura com o aumento da profundidade. A Figura 55 mostra o gráfico da temperatura do solo nas duas profundidades medidas, tanto para Joinville-SC, quanto para Ijuí-SC durante três dias consecutivos em que o clima foi de sol com poucas nuvens.



Figura 55 - Temperaturas no interior do solo em duas profundidades diferentes, medições na cidade de Joinville - SC e Ijuí - RS.



Fonte: autor (2022).

Ao analisar os resultados para cada cidade, percebe-se que os valores se mantêm próximos, indicando que a mudança de local não influenciou nas temperaturas do solo em um âmbito geral. Entretanto, ao se analisar os máximos e mínimos indicados no gráfico, percebe-se diferenças entre as profundidades analisadas. Os máximos para a profundidade de 10 cm são maiores, tendo seu valor máximo para a cidade de Joinville de 34,75 °C e na profundidade de 20 cm de 32,50 °C, ambos no dia 02 de fevereiro, uma diferença de 2,25 °C.

Para a cidade de Ijuí, no dia 20 de janeiro tem-se o valor máximo de 33,50 °C, enquanto a profundidade de 20 cm atingiu um valor máximo de 31,25 °C, uma diferença de 2,25 °C. Tanto para a cidade de Joinville, quanto para a cidade de Ijuí, os valores máximos ocorrem no período da tarde, quando a radiação solar incide sobre a placa coletora, portanto, esta diferença

das temperaturas pode gerar um maior gradiente térmico sobre o TEG, conforme se aumenta a profundidade em que o tubo de calor está enterrado.

Já para as temperaturas mínimas, sua ocorrência acontece na parte da manhã. Para Joinville, tem-se um valor mínimo de 26,25 °C no dia 01 de fevereiro para a profundidade de 10 cm e um valor de 26,50 °C para a profundidade de 20 cm no dia 02 de fevereiro. A diferença entre os valores é de 0,25 °C, porém, percebe-se que as temperaturas não ficam na mesma faixa de valores nas manhãs do dia 02 e 03 de fevereiro, sendo a profundidade de 20 cm com valores menores, indicando que pode ocorrer um ganho no gradiente térmico do TEG para profundidades maiores também no período da manhã.

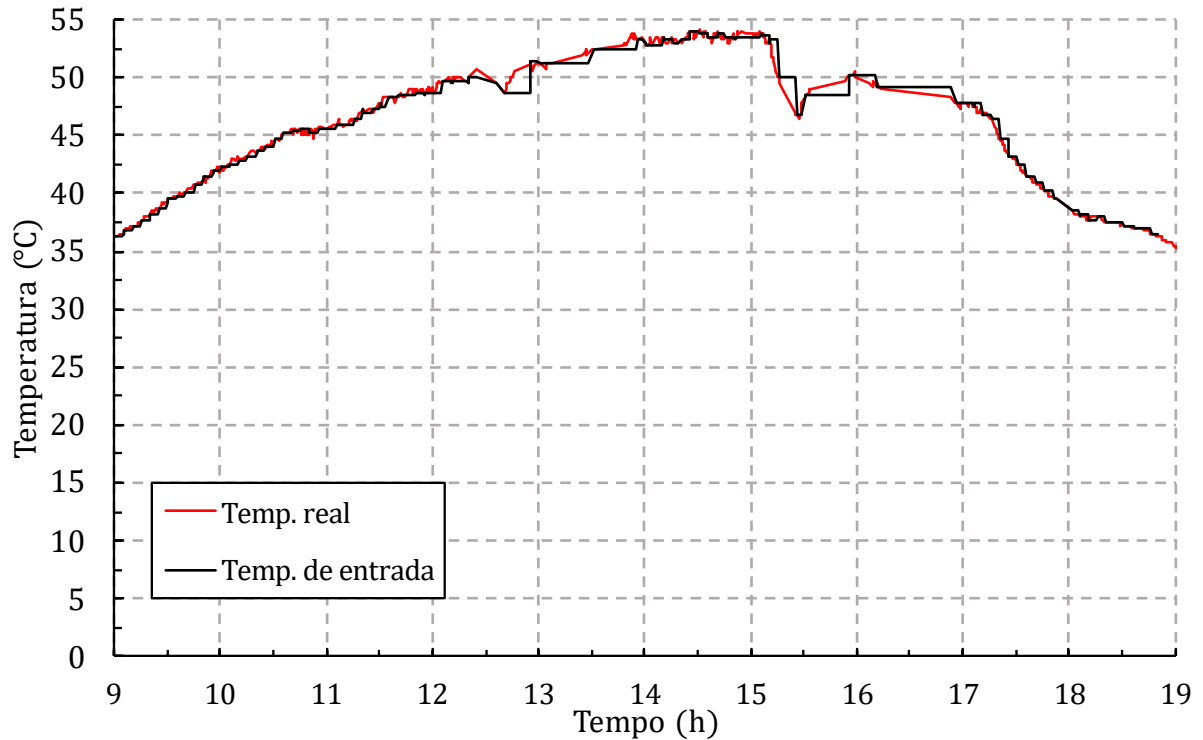
Para Ijuí, os valores mínimos ocorrem no dia 19 de janeiro, de 26,75 °C para a profundidade de 10 cm e de 27,25 °C para a profundidade de 20 cm, uma diferença de 0,50 °C. No gráfico referente a cidade de Ijuí nota-se um comportamento diferente ao de Joinville, sendo que os valores na parte da manhã se mantêm próximos em todos os dias, não havendo ganho significativo para o gradiente térmico no gerador termoelétrico.

#### *4.3.1.4 Temperaturas do material de mudança de fase*

O experimento com o material de mudança de fase foi realizado em laboratório, devido as condições climáticas instáveis no período de teste. Uma bancada foi construída e um perfil de temperatura coletado durante os testes de campo foi emulado através de resistências elétricas e um controle PID.

Para realização dos testes a distribuição de temperatura do dia escolhido foi reduzida para 10 horas, sendo utilizado as temperaturas das 9 h até as 19 h do dia em questão. A curva de distribuição criada é mostrada na Figura 56, juntamente com a curva real adquirida em campo.

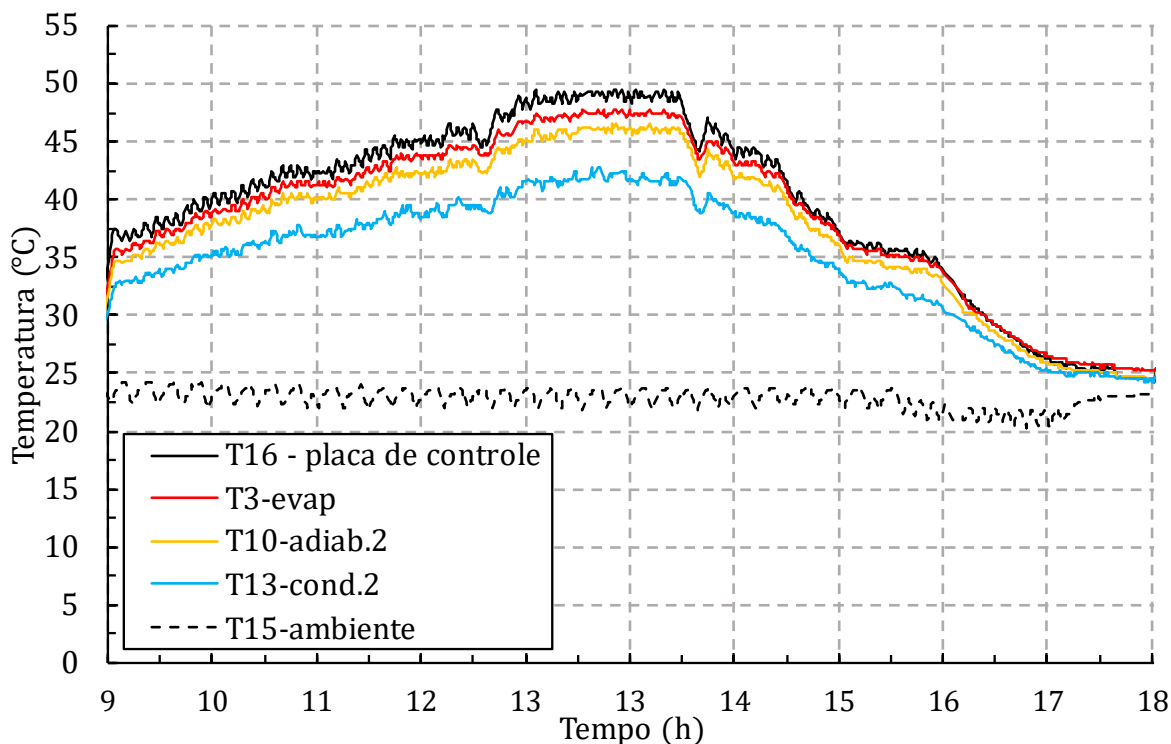
Figura 56 - Temperaturas de referencia e de entrada para o controle via LabView do experimento instalado em laboratório.



Fonte: autor (2022).

Como se percebe pelo gráfico da temperatura de entrada do controle, mesmo com a redução dos pontos a partir da temperatura real, a curva se mantém com um comportamento próximo ao real. A Figura 57 mostra as temperaturas ao longo do tubo para o experimento, a temperatura ambiente da sala e a temperatura da placa de controle, que neste caso, simula a temperatura do asfalto para a configuração 06.

Figura 57 - Temperaturas ao longo do tubo para o teste da configuração 06 com PCM realizado em laboratório

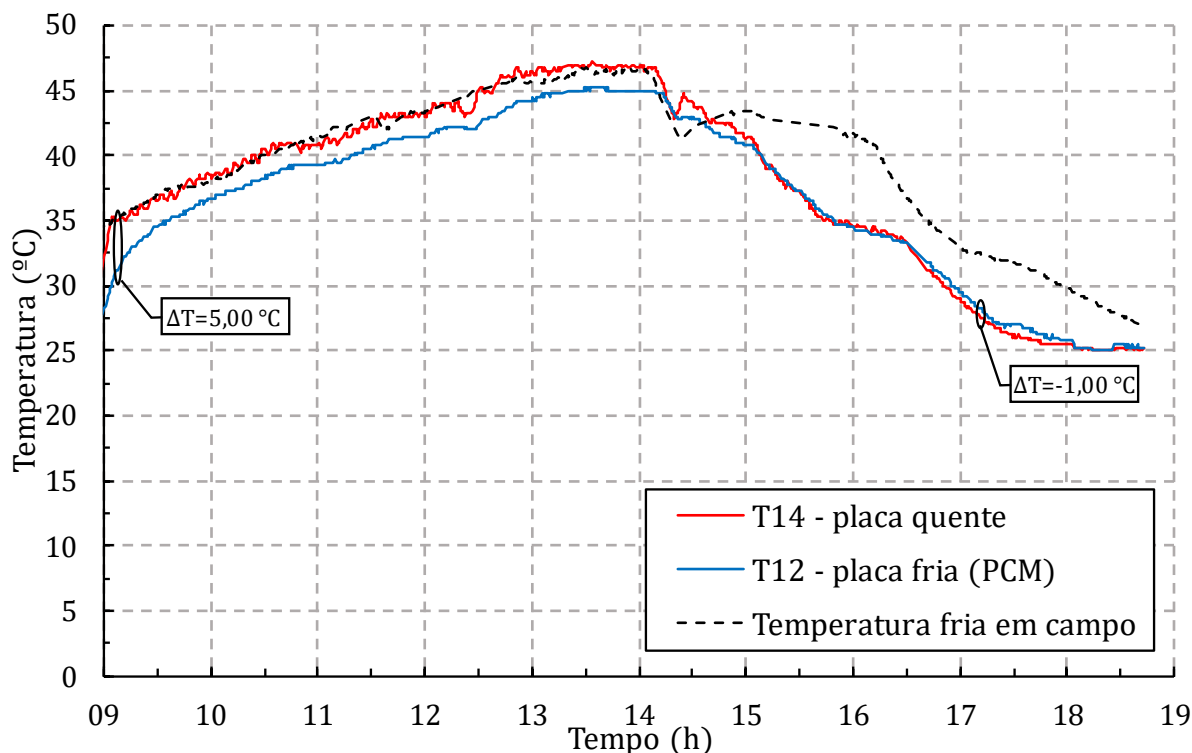


Fonte: autor (2022).

Com estas temperaturas é possível observar que o tubo está em correto funcionamento, já que as temperaturas do evaporador e condensador se mantêm em valores próximos, indicando que o sistema está transferindo e dissipando o calor recebido através das resistências elétricas.

Para visualizar o gradiente térmico gerado pelo experimento, é mostrada na Figura 58 as temperaturas da placa quente e placa fria, que fixam os geradores termoelétricos. A placa fria é a própria aleta de alumínio neste caso, que está preenchida com o material de mudança de fase. No teste, o maior gradiente térmico encontrado foi de 5,00 °C, catalogado às 9 h e 22 min e o menor de -1,00 °C às 17 h e 21 min.

Figura 58 - Temperaturas nas faces do gerador termoeletrico para o sistema instalado na configuração 06 com PCM.



Fonte: autor (2022).

A atuação do PCM fica evidente quando as temperaturas do sistema estão diminuindo, ficando menores que a temperatura na aleta de alumínio, gerando um gradiente térmico negativo. Isso ocorre pois o PCM ao mudar de fase armazenou energia térmica, liberando esta energia enquanto sua temperatura diminui.

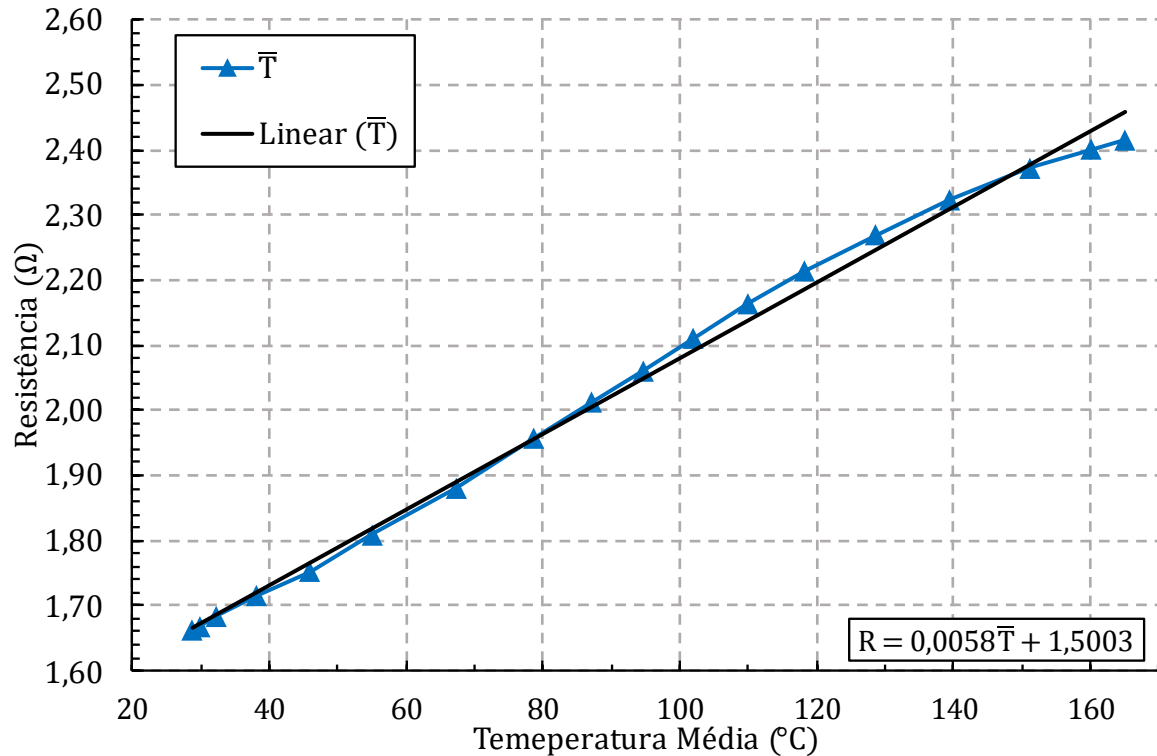
#### 4.3.2 Análise da potência teórica nos TEGs utilizados

Para uma análise teórica de potência máxima gerada pelos TEGs é necessário o conhecimento de sua resistência elétrica interna. Para isso, utilizou-se a relação entre a resistência elétrica interna do material semiconductor pelas temperaturas de lado quente e frio disponibilizadas pelo fabricante. Estas temperaturas se aproximam das temperaturas de trabalho em que o aparato será submetido, portanto, a curva mais próxima encontrada é descrita na Figura 59.

Como se percebe pelo gráfico, a curva de resistência pela temperatura média (média entre a face quente e fria) nos geradores termoeletricos se comporta de forma quase linear.

Portanto, pode-se utilizar a temperatura média na qual o TEG está submetido e então linearizá-la para obter-se a equação geral da resistência interna.

Figura 59 - Resistência elétrica pela temperatura média no TEG com a linearização para obter equação da resistência elétrica interna do gerador.



Fonte: adaptado de TEGPro (2014).

Com a linearização da curva de resistência pela temperatura média do TEG é obtida a Equação (9).

$$R_{in} = 0,0058 \cdot \bar{T} + 1,5003 \quad (9)$$

Portanto, para se calcular a potência máxima instantânea gerada pelo TEG, conforme apresentada por Borba (2019), onde é considerada a resistência de carga igual a resistência interna do gerador ( $R_{in} = R_L$ ), e  $V_{inst}$  é a tensão medida experimentalmente nos terminais em aberto do gerador termoelétrico, assim, tem-se a Equação (10).

$$P_{inst} = \frac{V_{inst}^2}{4 \cdot R_{in}(\bar{T})} \quad (10)$$

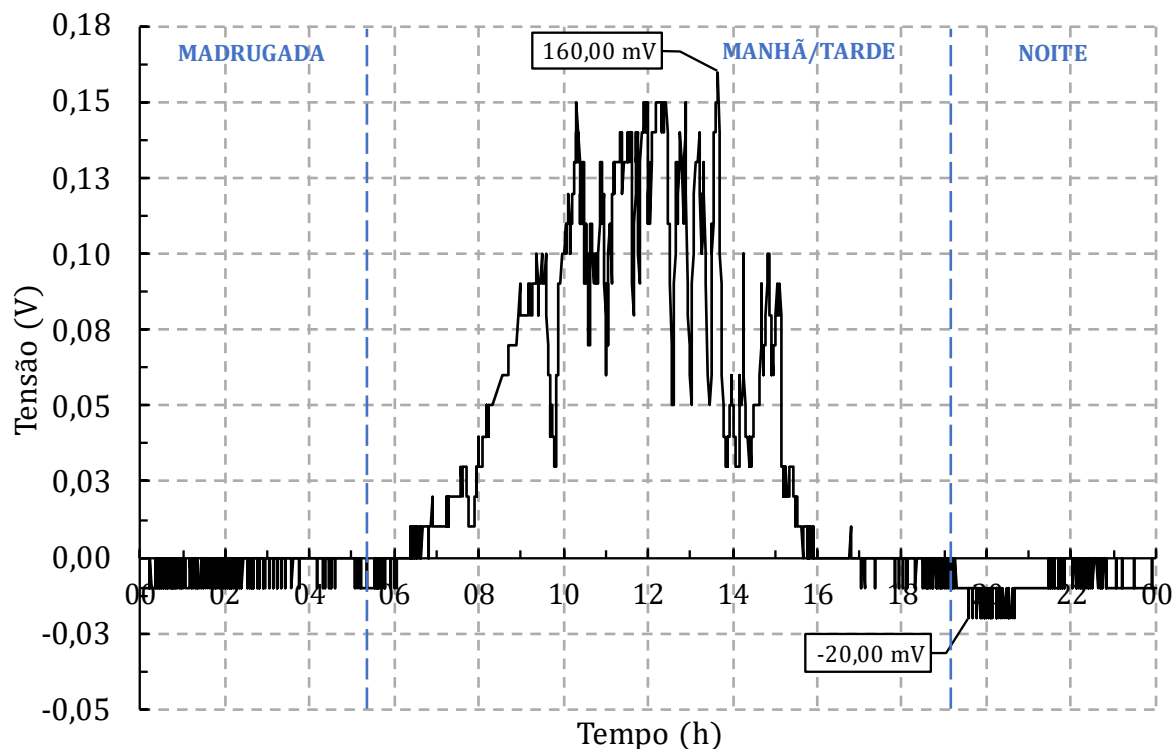
### 4.3.3 Testes em campo: geração de energia

Nesta seção serão apresentados os resultados de potência e tensão medidas experimentalmente no aparato proposto e o cálculo da energia gerada pelos TEGs. Serão apresentadas as curvas de potência e tensão em relação aos diferentes efeitos climáticos durante os dias, bem como a energia gerada no período de um dia para os melhores casos, para as cidades de Joinville - SC e Ijuí - RS. O critério para análise referente as condições climáticas do dia de teste foram realizadas da mesma forma utilizada na análise das temperaturas da seção 4.3.1, ou seja, utilizando as radiações medidas pelas estações meteorológicas do INMET.

#### 4.3.3.1 Geração de energia em Joinville - SC

A primeira análise é da configuração 01, em que o tubo de calor é enterrado 13,2 cm do seu comprimento (seção do condensador) em uma inclinação de aproximadamente 26 graus com o plano horizontal. A Figura 60 apresenta a curva de tensão de saída em aberto do gerador termoelétrico para a configuração instalada em Joinville - SC no dia 16 de dezembro de 2021. Para esta configuração, os potenciais elétricos máximos e mínimos encontrados nos terminais do TEG foram de 160,00 mV e -20,00 mV, respectivamente. As tensões encontradas para a configuração 02 possuem valores próximos a configuração 01 e são mostradas no Apêndice C, juntamente com as curvas de temperatura do aparato.

Figura 60 - Tensão em aberto nos terminais dos geradores termoelétricos para a configuração 01, instalado dia 16 de dezembro de 2021 em Joinville - SC.

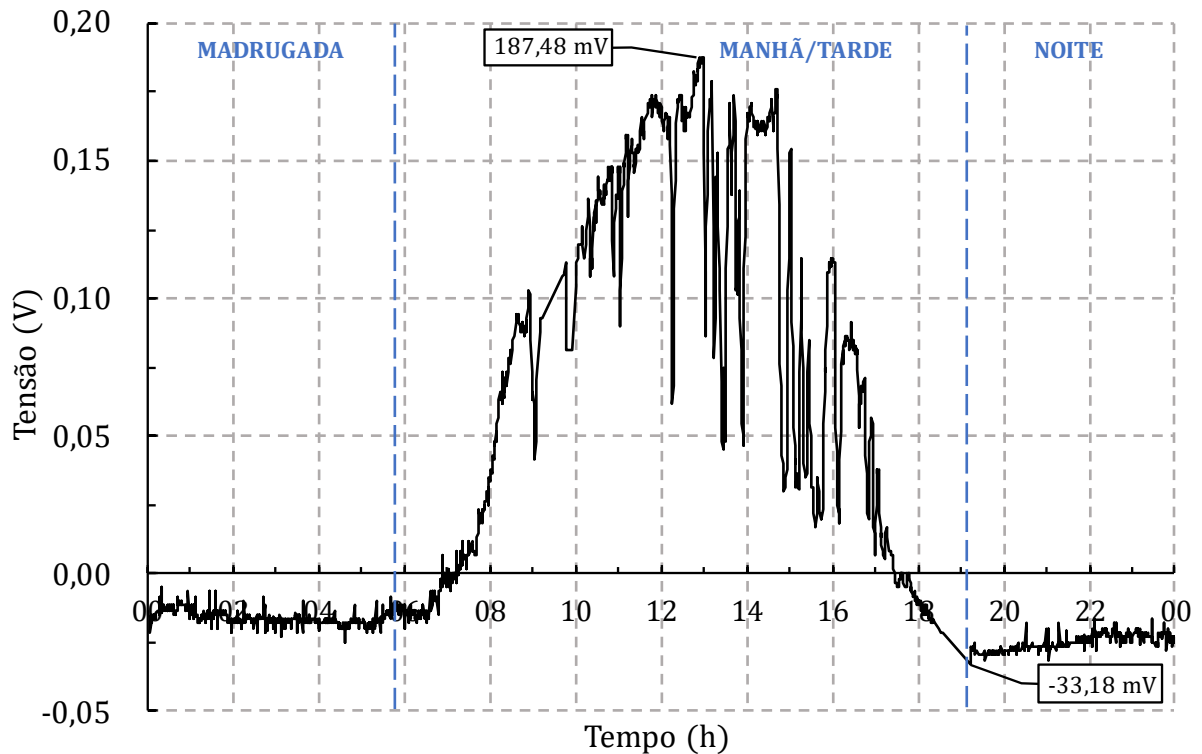


Fonte: autor (2022).

As tensões nos terminais do gerador para a configuração 03 são mostradas na Figura 61. Neste gráfico é possível perceber um aumento nos valores ao longo do dia em comparação com a configuração 01, devido ao aumento do gradiente térmico, como visto na análise das temperaturas do protótipo. Os valores máximos e mínimos encontrados neste arranjo foram de 187,48 mV e -33,18 mV, respectivamente. O teste foi realizado no dia 02 de fevereiro em Joinville - SC.



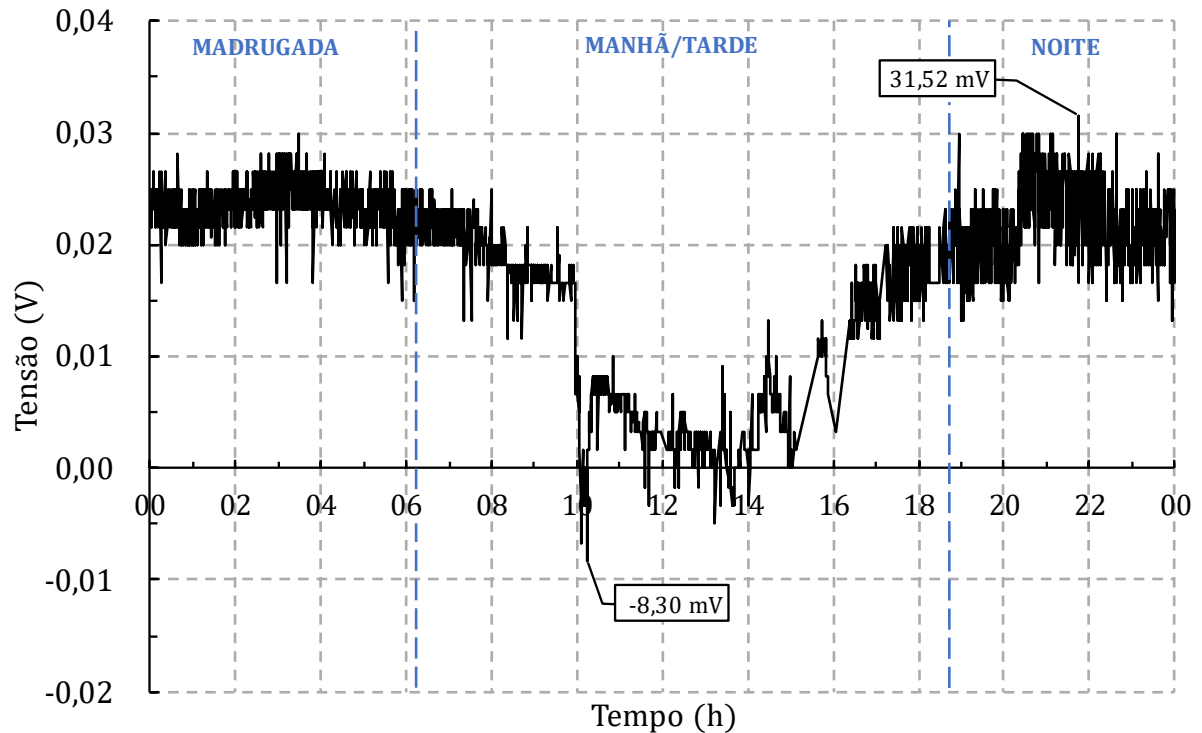
Figura 61 - Tensão em aberto nos terminais dos geradores termoeletricos para a configuração 03, instalado dia 02 de fevereiro de 2022 em Joinville - SC.



Fonte: autor (2022).

A configuração 04 foi instalada utilizando a energia do solo como fonte quente para o gerador termoeletrico, já a fonte fria foi o ar ambiente. Percebe-se na curva de tensão em aberto do TEG da Figura 62 que os maiores valores de potencial elétrico ocorrem na parte da manhã e da noite, principalmente pelo ar ambiente estar com uma temperatura menor do que durante o dia. Entretanto, as amplitudes das tensões para esta configuração são menores que as configurações de 01 a 03 devido as baixas temperaturas sobre o TEG. Seu valor máximo foi de 31,52 mV e seu valor mínimo foi de -8,30 mV.

Figura 62 - Tensão em aberto nos terminais dos geradores termoelétricos para a configuração 04, instalado no dia 24 de fevereiro em Joinville - SC.

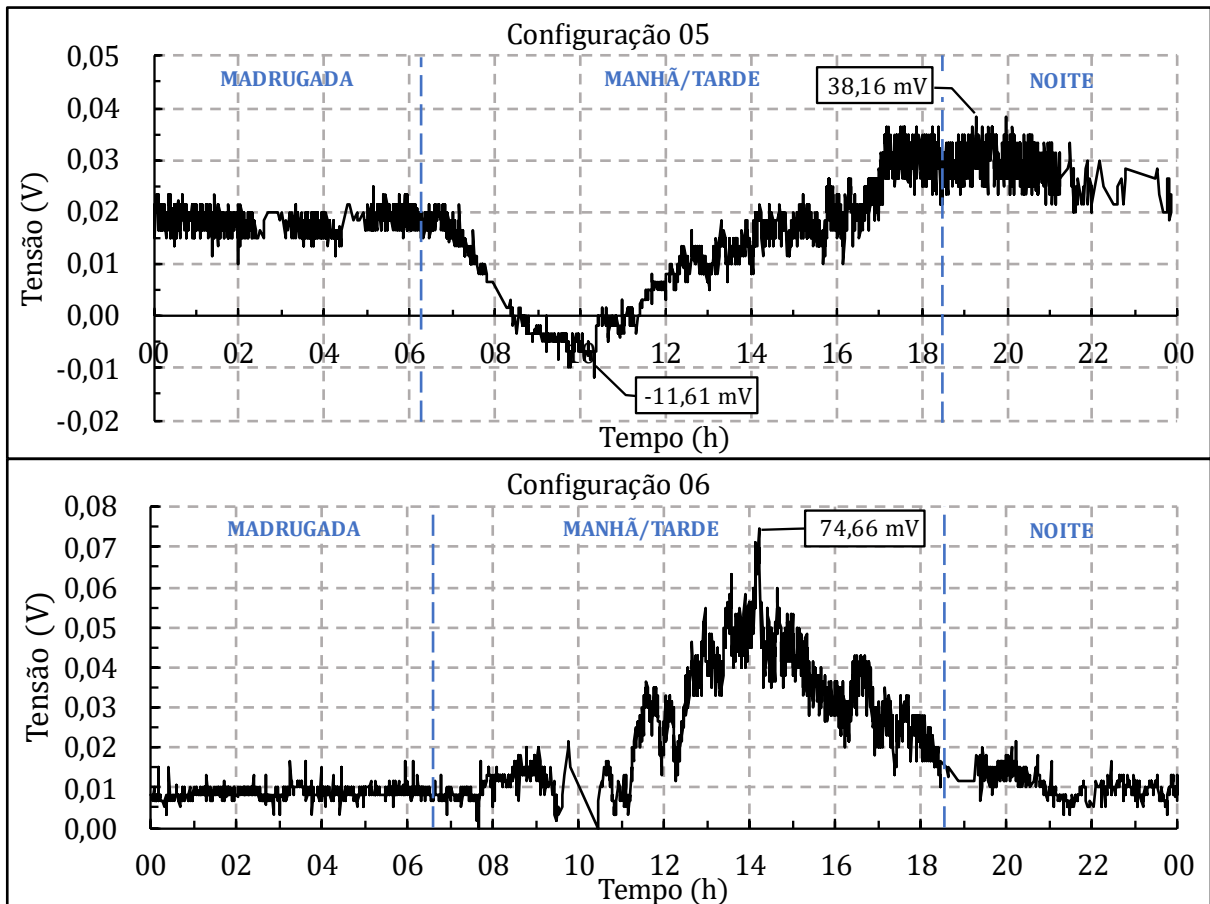


Fonte: autor (2022).

Nas configurações 05 e 06 o asfalto foi utilizado como fonte quente e o ar ambiente para dissipação do calor. Para estes casos, foram comparadas as tensões do TEG em um mesmo gráfico, mostrado na Figura 63. Para a configuração 05, em que o gerador termoelétrico está em contato direto com o asfalto, percebe-se que a curva de tensão possui valores maiores nos turnos da manhã e da noite, com um pico de 38,16 mV, e um mínimo de -11,61 mV.

A configuração 06 tem o gerador termoelétrico instalado na aleta, neste caso não ocorreram potenciais elétricos negativos como na configuração 05. Nesta configuração a tensão elétrica máxima encontrada foi de 74,66 mV. Os maiores valores de tensão ocorreram no período de tarde.

Figura 63 - Tensão em aberto nos terminais do TEG para as configurações 5 e 6. Sistema instalado em Joinville - SC.

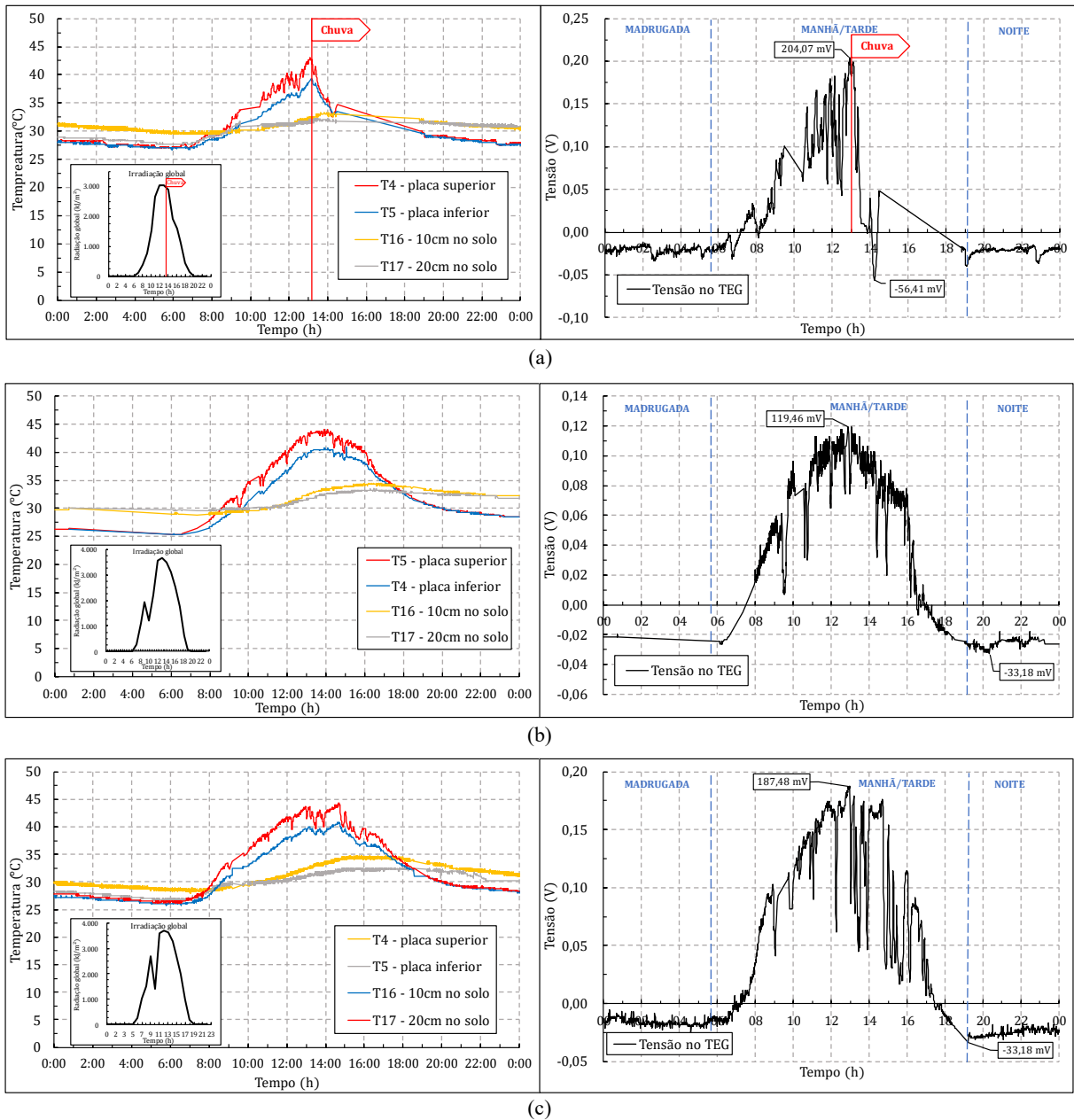


Fonte: autor (2022).

Para dias em que as condições climáticas não são semelhantes, foram comparadas as temperaturas nos lados quente e frio do TEG e as temperaturas do interior do solo, também foram analisadas as tensões em aberto do gerador termoelétrico e a energia total gerada em um dia. As condições consideradas foram dia com chuva, nublado e de sol. A configuração 03 foi escolhida para demonstrar os efeitos climáticos nos resultados do experimento, pois dentre os testes, foi a que apresentou maior diferencial de temperatura como visto na análise de temperatura.

Como pode ser visto na Figura 64, o clima influencia diretamente nas temperaturas e na capacidade de dissipação de calor dos tubos. Além disso, a oscilação na tensão do TEG pode ser percebida de acordo com a oscilação de temperatura na placa coletora (lado quente do gerador), o que impacta diretamente na energia gerada pelo sistema.

Figura 64 - Comparação para condições climáticas diferentes para sistema instalado na Configuração 03. (a) Dia de sol com início de pancadas de chuva próximo às 13h (03/02/2022). (b) Dia de sol com nuvens (16/02/2022). (c) Dia de sol com poucas nuvens (02/02/2022).



Fonte: autor (2022).

No dia da ocorrência da chuva, percebe-se uma queda gradual tanto da temperatura sobre as placas quanto na tensão do gerador termoelétrico, até atingir um pico de tensão negativa. O menor valor encontrado neste caso foi de  $-56,41$  mV como indicado na Figura 64a. Isso ocorre, pois a temperatura das placas atinge um valor menor que a temperatura do solo, invertendo a polaridade do gerador. No dia nublado com pouco sol, mostrado na Figura 64b, as amplitudes de tensão possuem valores menores que os da Figura 64c, considerado um dia de

sol com poucas nuvens. A presença de muitas nuvens, principalmente no fim do dia, provoca oscilações na temperatura na placa coletora e com valores maiores que a placa inferior por um período longo.

Os valores de tensão máxima e mínima medidos no dia 16/02/2022 foram de 119,46 mV e -33,18 mV, respectivamente. Já para o dia 02/02/2022, os valores encontrados foram de 187,48 mV para o máximo e -33,18 mV para o mínimo.

A Tabela 3 mostra as comparações realizadas entre as diferentes condições climáticas testadas para a configuração 03, desde a energia gerada pelos geradores termoeletricos, níveis máximos e mínimos de tensão em aberto e as diferenças de temperaturas máximas e mínimas encontrados durante o período de um dia.

Tabela 3 - Comparação dos parâmetros da Configuração 03 para dias com diferentes condições climáticas, dados referentes a um dia completo.

Condição climática	Energia gerada por 4 TEGs (TGPR-22W7V-56) [J]	Menor tensão [mV]	Maior tensão [mV]	Maior $\Delta T$ [°C]	Menor $\Delta T$ [°C]
Dia de sol com chuva (03/02/2022)	158,48±10,03	-56,41	204,07	4,25	-0,75
Dia de sol com nuvens (16/02/2022)	123,92±7,91	-33,18	119,46	3,75	-0,25
Dia de sol com poucas nuvens (02/02/2022)	286,24±18,40	-33,18	187,48	4,00	-0,25

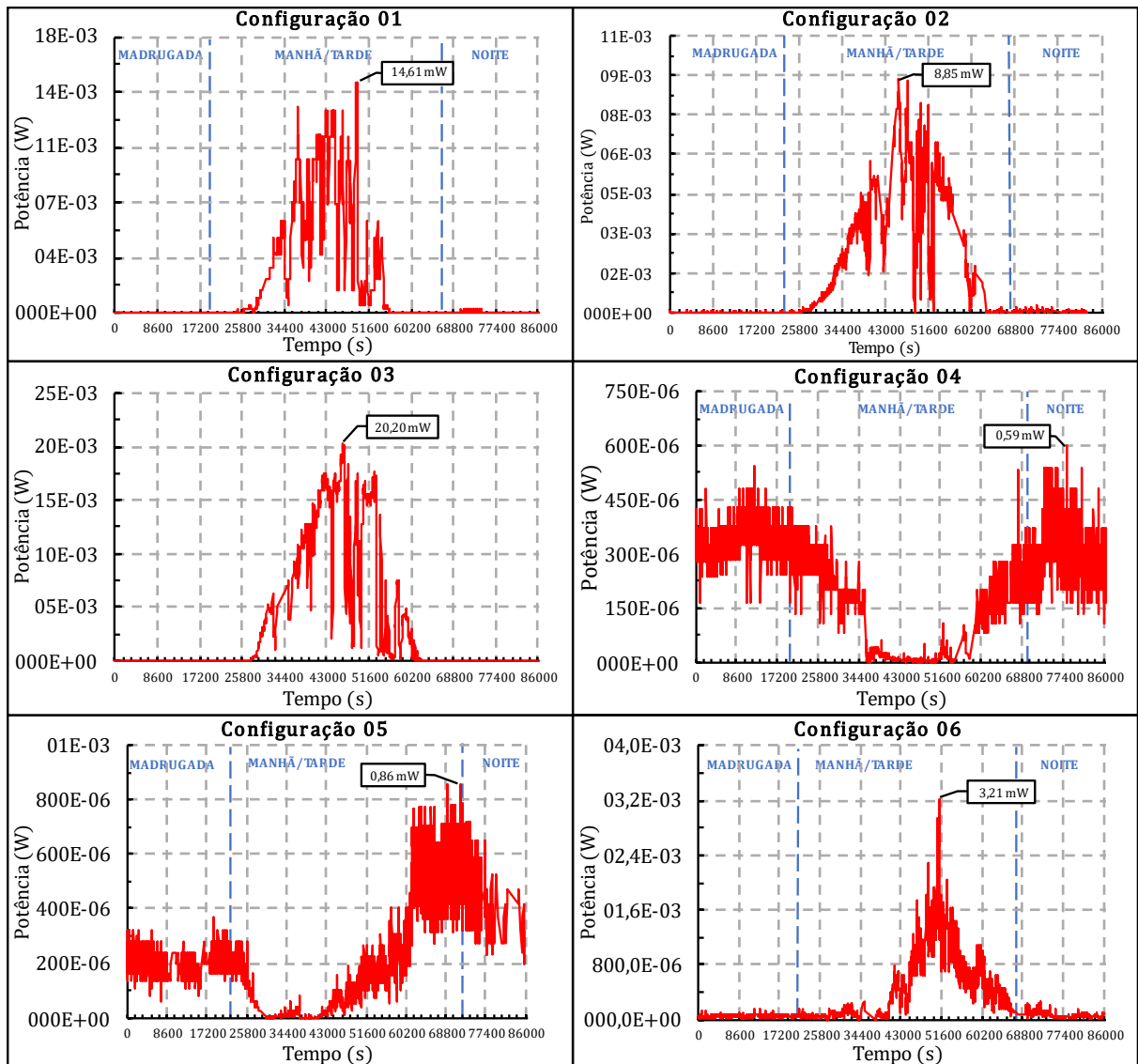
Fonte: autor (2022).

Percebe-se, pela Tabela 3, que a maior geração de energia ocorreu no dia em que o Sol foi predominante, logo em seguida o dia chuvoso e por último o dia de Sol com nuvens. Analisando as tensões em aberto do TEG, nota-se que o dia com chuva teve um valor de tensão negativa maior que as outras condições, mostrando que é possível gerar energia mesmo em dias chuvosos ou durante turnos em que o Sol não está presente. Para as condições de Sol com nuvens também ocorrem tensão elétrica com polaridade invertida, porém com um valor menor que na condição de chuva.

Os diferenciais de temperatura máximos encontrados no dia refletem as mesmas condições das tensões em aberto do TEG. Quando a diferença de temperatura sobre o gerador é positiva, tem-se tensão positiva, porém nas condições em que o gradiente inverte, o gerador também inverte a polaridade, gerando energia em momentos em que o Sol não está presente.

A partir da Equação (10) foi calculada a potência instantânea para cada ponto medido durante um dia inteiro, considerando condições climáticas similares para comparação dos dados de temperatura e energia gerada. As potências calculadas para cada configuração testada são mostradas na Figura 65.

Figura 65 - Curva de potência pelo tempo para cada configuração testada em Joinville - SC.



Fonte: autor (2022).

Nota-se que para as configurações de 01 a 03 a curva de potência possui comportamento similar e se diferencia apenas na amplitude dos valores, sendo o maior pico de potência instantânea catalogado na configuração 03, de 20,20 mW. Para a configuração 04, o valor máximo instantâneo de potência foi de 0,59 mW. Nesta configuração, os valores de

potência são menores devido o gerador termoelétrico estar submetido as temperaturas do interior do solo, que são menores que as temperaturas das configurações 01 e 03 em que o aparato está exposto ao Sol. Nesta configuração, a geração de energia ocorre com maior intensidade quando as temperaturas do solo são maiores que a do ar ambiente, ou seja, na madrugada e na noite.

As configurações 05 e 06 utilizam a energia térmica do asfalto e da irradiação solar. Nestas configurações obteve-se, para a melhor condição, uma potência máxima de 0,86 mW e 3,21 mW respectivamente. A configuração 05 apresentou maior geração de energia nos turnos da madrugada e da noite, devido a seus gradientes de temperatura serem maiores nestes períodos do dia. A configuração 06 apresentou maior desempenho no turno da tarde, quando as temperaturas do asfalto atingem seus valores máximos.

A partir das curvas de potência foi possível calcular a energia gerada durante um dia para cada configuração instalada em campo, para quantificar a configuração que possui maior desempenho energético. Para isso foi calculada a área sob cada curva através da área do trapézio para cada ponto de potência instantânea calculado, sendo realizada uma análise de incertezas de acordo com o Apêndice D. A energia calculada para cada configuração e seu gradiente térmico máximo encontrado durante o dia são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Energia gerada em um dia pelos TEGs para cada configuração instalada em campo para condições climáticas onde o sol é predominante.

<b>Configuração de instalação do sistema</b>	<b>Energia gerada por 4 TEGs (TGPR-22W7V-56)</b>	<b>Maior <math>\Delta T</math>. [°C]</b>
Configuração 01	143,79±9,37 J	2,00
Configuração 02	189,64±12,96 J	3,00
Configuração 03	286,24±18,40 J	4,00
Configuração 04	18,17±1,08 J	1,75
Configuração 05	19,91±1,25 J	2,00
Configuração 06	24,09±1,54 J	2,25
Configuração 06 – com PCM	48,56±3,12 J	5,00

Fonte: autor (2022).

Ao analisar a energia gerada em um dia pelas configurações testadas, percebe-se que a configuração 03 foi a que obteve maior valor gerado durante o período, considerando as

configurações instaladas em condições climáticas semelhantes. Já para a configuração com menor desempenho em termos de energia e gradiente térmico, foi a configuração 04.

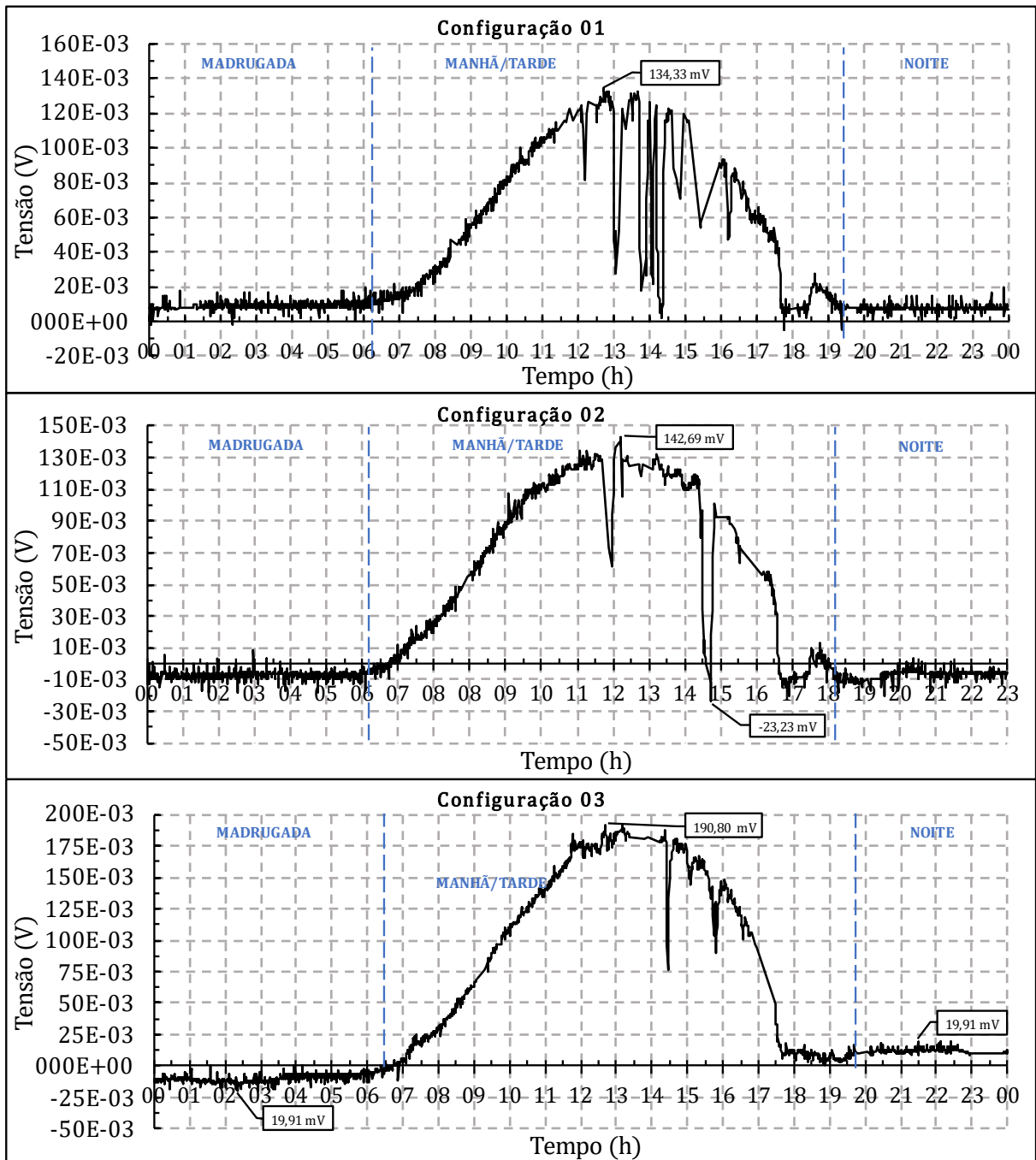
O maior gradiente térmico encontrado foi a para a configuração 06 com PCM. Em comparação com a configuração 06 sem a aplicação da cera de coco, obteve-se um aumento da energia gerada quando utilizado o material de mudança de fase, mesmo o teste realizado tendo duração de 10 h.

#### 4.3.3.2 *Geração de energia em Ijuí – RS*

Os testes realizados em Ijuí - RS foram com o aparato configurado nos arranjos 01, 02 e 03. Estas configurações tem o objetivo de utilizar o solo como forma de dissipação do calor durante o dia e fonte térmica durante a madrugada e a noite. A Figura 66 mostra as curvas de tensão em aberto dos geradores termoelétricos durante um dia para as três configurações testadas. Nela é possível perceber a diferença entre as amplitudes de tensão de saída para cada configuração, sendo a menor tensão entre elas durante o período da manhã/tarde a configuração 01, com um valor máximo de 134,33 mV. Já o maior valor encontrado durante a manhã/tarde foi na configuração 03, com um valor de 190,80 mV. Estas diferenças se devem aos maiores gradientes encontrados durante os testes na configuração 03, como visto na análise das temperaturas.



Figura 66 - Tensões em aberto do gerador termoeletrico para as configurações 01, 02 e 03 para o aparato instalado em Ijuí - RS.



Fonte: autor (2022).

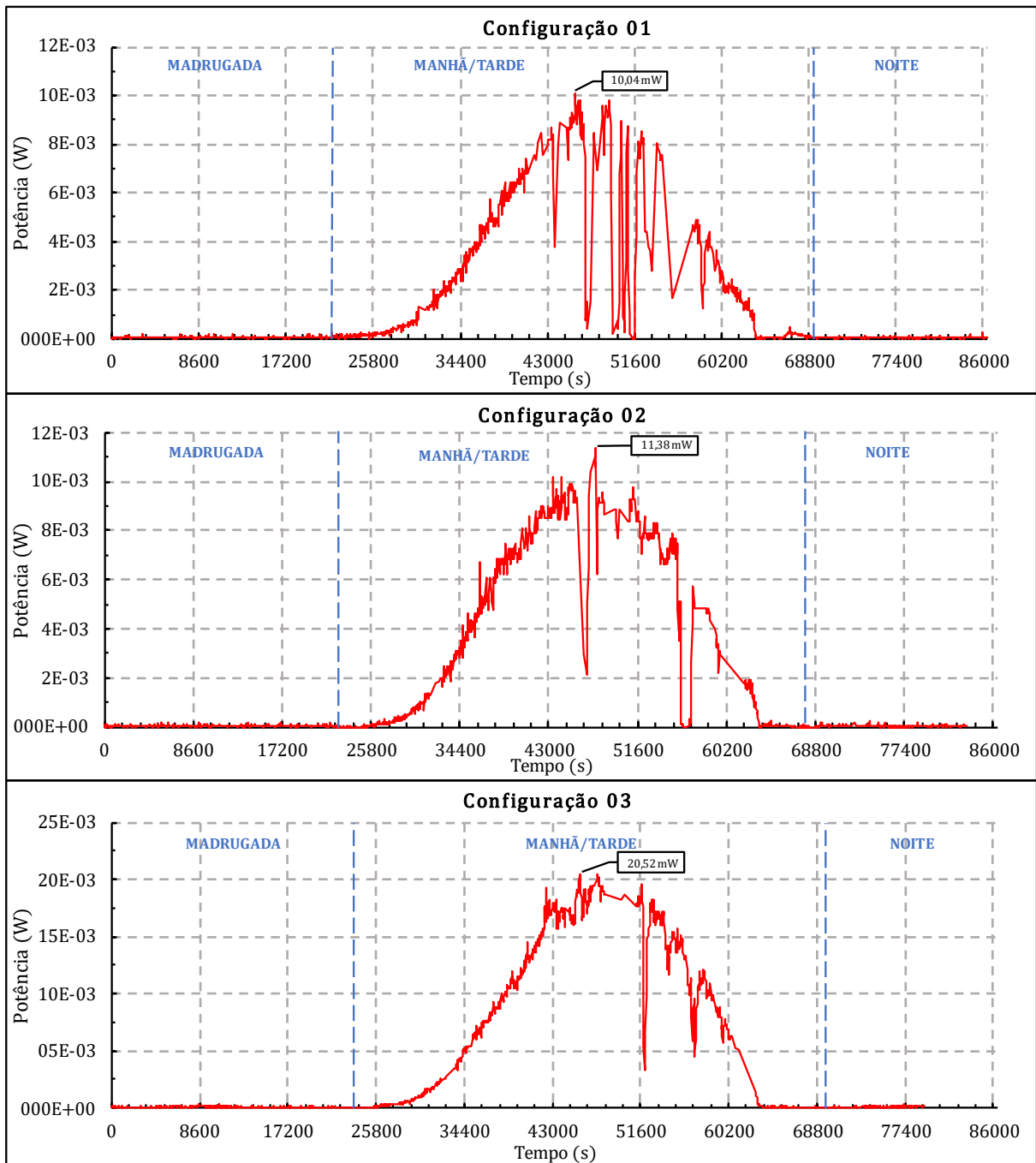
Durante a madrugada e a noite, o sistema continua gerando energia, porém, com a polaridade da tensão dos geradores invertidas. Como visto no gráfico, a configuração 01 não foi capaz de inverter as polaridades do gerador com valores significativos. A configuração 02 obteve durante a madrugada e noite valores próximos a  $-10$  mV, com um valor mínimo de

tensão de  $-23,23$  mV que ocorreu no período da tarde. Este valor negativo durante a tarde pode ser conferido pela curva das temperaturas sobre o gerador, em que no mesmo horário ocorre uma queda de temperatura, muito provavelmente ocasionado pela passagem de nuvens.

A configuração 03 obteve valores negativos de tensão apenas durante o período da madrugada, tendo um valor mínimo de  $-19,91$  mV. Já no período da noite, o sistema não foi capaz de gerar tensões negativas, porém manteve valores positivos, obtendo um máximo durante este período de  $19,91$  mV. Isso indica que mesmo à noite, o ar ambiente estava com temperaturas maiores que o solo.

Com os valores de tensão em aberto do gerador e os valores das resistências a partir dos dados do fabricante, foi calculado a potência instantânea para cada configuração ao longo do dia. A Figura 67 mostra as potências para as três configurações instaladas em Ijuí - RS. Como esperado, a configuração 03 obteve o maior valor de potência instantânea, de  $20,52$  mW, e a configuração 01, o menor valor, de  $10,04$  mW.

Figura 67 - Curva das potências para as configurações 01, 02 e 03 instaladas em Ijuí - RS.



Fonte: autor (2022)

Com as curvas de potência, é possível calcular a energia elétrica gerada durante o dia ao calcular-se a área sob a curva. A Tabela 5 mostra as energias geradas para cada configuração, juntamente com seu erro calculado com a análise de incertezas das medições, vista no Apêndice D.

Tabela 5 - Energia gerada em um dia pelos TEGs para as configurações 01, 02 e 03 instaladas em campo para condições climáticas onde o sol é predominante. Sistema instalado em Ijuí -RS.

Configuração de instalação do sistema	Energia gerada por 4 TEGs (TGPR-22W7V-56) [J]	Menor tensão [mV]	Maior tensão [mV]	Maior $\Delta T$ [°C]	Menor $\Delta T$ [°C]
Configuração 01	155,97±10,58	-4,92	134,33	3,25	-0,25
Configuração 02	189,64±12,96	-23,23	147,69	3,00	-0,625
Configuração 03	378,60±25,74	-19,91	190,80	3,75	-0,25

Fonte: autor (2022).

Entre as configurações, a que apresentou maiores valores de geração de energia e também de gradiente térmico foi a configuração 03. Esta configuração foi capaz de gerar 378,60±25,74 J em 24 h e obteve um gradiente térmico máximo de 3,75 °C. Tanto para o sistema instalado em Joinville - SC quanto em Ijuí - SC a configuração 03 obteve o melhor desempenho.

#### 4.3.4 Avaliação do consumo da transmissão LoRa

Para avaliar o consumo da transmissão via LoRaWAN foi utilizado um resistor *shunt* em série com o circuito LoRa. Para aquisição do sinal foi utilizando um amplificador de instrumentação modelo INA125 conectado ao sistema de medição de tensão da *National Instruments* (NI 9205) e o sinal foi lido e tratado via *LabView*.

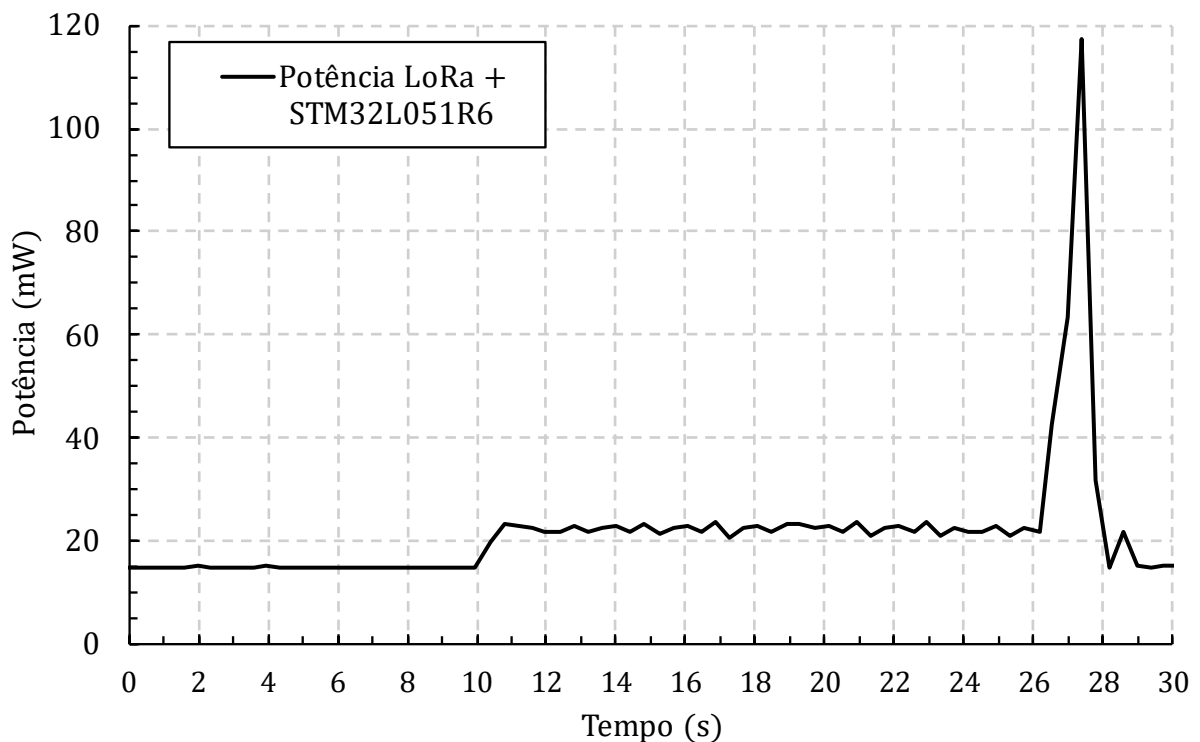
Foram realizados três diferentes testes para avaliação do consumo da transmissão de dados. As transmissões foram realizadas a cada 30 segundos, durante 1 hora, sendo enviado dados de temperatura do aparato e de tensão do conversor LTC3108, completando ao todo 40 *bytes*. Porém, desta forma, a energia consumida é a total, contando com o circuito de aquisição de dados e a transmissão LoRa. Para avaliar apenas a energia gasta para realizar a transmissão de um pacote de dados foram feitos outros dois testes, mantendo o intervalo de 30 segundos entre os envios. O circuito de aquisição de dados foi desligado e uma *payload* nula enviada. Após esta etapa, o microcontrolador foi reprogramado para envio de 40 *bytes* previamente preenchidos, simulando uma transmissão realizada nos testes em campo. O tempo destes testes também foi de 1 hora.

A partir da curva de corrente aquiritada para cada teste é possível realizar o cálculo da potência elétrica instantânea para cada intervalo de tempo em que os dados foram contabilizados. Para calcular a potência utilizou-se a Equação (11), baseada na Lei de Ohm.

$$P_{LoRa} = V \cdot I \quad (11)$$

Para determinar a potência utilizou-se a tensão de saída fornecida pelo *datasheet* do regulador de tensão, modelo TLV1117-33, que é de 3,3 V, o qual alimenta todos os componentes presentes no circuito (TEXAS INSTRUMENTS®, 2014). A curva de potência encontrada para o teste de envio com a *payload* de 40 bytes é mostrada na Figura 68.

Figura 68 - Curva de potência elétrica durante um intervalo de 30 segundos de transmissão do sistema LoRa, enviando 40 bytes de dados.



Fonte: autor (2022).

Com a aquisição dos dados de potência instantânea durante 3600 segundos, foi calculado a energia total consumida para realizar as transmissões a cada 30 segundos e, a partir disso, baseado no número de transmissões feitas, a energia necessária para realizar uma

transmissão, levando em consideração cada configuração testada. A energia consumida pelo sistema LoRaWAN para cada teste realizado é mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Energia consumida em 1 hora para cada configuração testada do sistema de aquisição de dados e transmissão utilizando protocolo LoRaWAN.

Teste realizado	Energia consumida pelo sistema LoRa (1 hora)	Número de transmissões realizadas	Energia consumida em 1 transmissão
Transmissão de 40 bytes + aquisição de dados	320,63±16,33 J	130	2,466±0,126 J
Transmissão de 40 bytes	81,19±4,15 J	130	0,625±0,032 J
Transmissão com <i>payload</i> nula	82,70±4,89J	130	0,636±0,037 J

Fonte: autor (2022).

A partir destes dados foi possível analisar o número de transmissões admissíveis com uma carga completa para diferentes valores de capacitância de supercapacitores comerciais. Utilizando a Equação (12), calculou-se a energia máxima armazenada considerando uma tensão de 5 V, até a tensão de alimentação do módulo LoRaWAN, que trabalha com uma tensão de 3,3 V. A partir disso, analisou-se três valores de capacitância, baseados nos modelos EECS0HD224 de 0,22 F, EECF5R5H105 de 1 F da fabricante Panasonic e modelo FG0H225ZF de 2,2 F da fabricante Kemet.

$$E_{\text{cap}} = \frac{C_{\text{nom}} V_{\text{cap}}^2}{2} \quad (12)$$

Para calcular a energia armazenada no supercapacitor utilizou-se a diferença da energia armazenada com 5 V e com 3,3 V. Dividiu-se este valor pelo consumo de uma transmissão de *payload* de 40 bytes, obtendo assim o número de transmissões possíveis em uma carga completa do supercapacitor. Os valores encontrados para cada capacitor são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Número de transmissões possíveis da payload de 40 bytes para diferentes valores de supercapacitores.

Supercapacitor	Capacitância nominal	Energia máxima armazenada com 5V	Energia máxima armazenada com 3,3V	Número de transmissões possíveis (payload de 40 bytes)
EECS0HD224	0,22 F	2,75 J	1,20 J	2
EECF5R5H105	1,00 F	12,5 J	5,45 J	11
FG0H225ZF	2,20 F	27,5 J	11,98 J	24

Fonte: autor (2022).

Com a análise dos capacitores é possível perceber que com um supercapacitor de 0,22 F já é possível realizar duas transmissões de dados a partir de uma carga completa. Com menores valores de capacitância é possível realizar cargas mais rápidas, portanto deve-se avaliar a energia disponível para a carga deste capacitor. Idealmente, o supercapacitor de modelo FG0H225ZF de 2,2 F, a partir de uma carga completa, é capaz de realizar uma transmissão por hora dos dados durante 24 horas. Porém, deve se analisar seu tempo de carga a partir do conversor a ser utilizado e se este conversor consegue carregar capacitâncias elevadas durante seu tempo de funcionamento.

Além da transmissão dos dados, deve-se considerar o circuito de aquisição destes dados. O circuito completo é composto por sensores, microcontrolador e o sistema de transmissão LoRa e será discutido na próxima seção.

#### 4.3.5 Consumo teórico do circuito de aquisição e transmissão de dados proposto

Nesta seção será apresentada uma análise do circuito de aquisição de dados meteorológicos, calculando sua energia teórica de consumo e avaliando os conversores propostos para gerenciar a energia gerada pelo TEG, comparando sua eficiência teórica e consumo de energia.

A Tabela 8 mostra os conversores selecionados e sua máxima eficiência, nível de tensão de partida, mínima tensão de entrada e máxima tensão na saída.

Tabela 8 - Comparação dos conversores aplicados a *harvesting*, passíveis a serem utilizados no sistema proposto, com suas principais características de funcionamento.

Modelo	Polaridade	Partida a frio	Entrada mín.	Entrada máx.	Saída máx.	Máx. eficiência
LTC3108	Unipolar	20 mV	20 mV	500 mV	5,0 V	39%
LTC3109	Bipolar	30 mV	±30 mV	±500 mV	5,0 V	28%
EM8900	Unipolar	5 mV	5 mV	200 mV	5,0 V	≅ 68%
BQ25570	Unipolar	600 mV	100 mV	5,1 V	5,5 V	93%

Fonte: autor (2022).

Foram levantados os dados teóricos de cada componente proposto para compor o circuito de aquisição de dados meteorológicos e na Tabela 9 é mostrado o consumo de cada componente e o número possível de leitura para o melhor dia de geração encontrado na cidade de Joinville-SC.

Tabela 9 - Consumo de energia do circuito proposto para monitoramento climático de rodovias em comparação com a energia gerada pelo sistema de *harvesting* em um dia, coletando dados e enviando a cada 1h.

	Componente	Energia consumida no dia (J)
Consumo	BME280	0,0014 J
	MAX31855	4,0392 $\mu$ J
	Barramento I <sup>2</sup> C	0,0396 J
	Barramento SPI	2,6928 nJ
	Módulo LoRa RD49C + STM32L051 (obtido experimentalmente)	15,0000 J
	NLAS4684 (modo ativo)	0,8225 J
	NLAS4684 (modo suspenso)	0,0569 J
	LT6004	1,3306 J
	TPS78230 (apenas para EM8900 e BQ25570)	0,1898 J
	<b>Total</b>	<b>17,6880 J</b>
Geração	Configuração 03 + LTC3108	106,89±6,89 J
	Configuração 03 + LTC3109	80,15±5,15J
	Configuração 03 + EM8900 e BQ25570	173,52±11,18 J
	<b>Total da Configuração 03</b>	<b>286,24±23,06 J</b>

Fonte: autor (2022).



Como observado na tabela, o conversor que possui maior eficiência é conjunto dos modelos EM8900 e BQ25570. Mesmo não possuindo bipolaridade, a associação dos componentes consegue converter uma maior quantidade de energia que o modelo LTC3108 e LTC3109. Porém, estes dados de energia não são exclusivamente o que definem a eficiência dos conversores, pois é necessário avaliar o consumo do circuito gerenciador de energia que eles utilizam. Os conversores da *Linear Technology* possuem internamente circuitos capazes de gerenciar a energia convertida, porém, para o modelo EM8900, é necessário um circuito externo. O CI sugerido para esta finalidade é o modelo EM8502 do mesmo fabricante, entretanto, este circuito possui uma tensão máxima de saída em seus pinos regulados, que é de 2,6 V, não suprimindo a necessidade para um nível de 3,3 V para alimentação do módulo LoRaWAN. Por isso, foi sugerido a utilização de outro conversor, de modelo BQ25570, que possui gerenciamento de energia interno e MPPT. Este conversor possui um faixa de conversão de 100 mV até 5,1 V em seus pinos de entrada, além disto, possui uma eficiência elevada em comparação com os outros modelos citados.

Para comparar o consumo de cada circuito responsável pelo gerenciamento de energia, verificou-se os dados fornecidos pelo fabricante, considerando sempre o máximo consumo de cada circuito. Para visualização destes dados foi elaborado a Tabela 10, mostrando a corrente de consumo de cada componente.

Tabela 10 - Consumo de corrente dos conversores quando não estão convertendo energia.

<b>Circuitos Conversores</b>	<b>Consumo típico do conversor (μA)</b>	<b>Consumo máximo do conversor (μA)</b>
Circuito LTC3108	6,4	9,6
Circuito LTC3109	7,31	10,55
Circuito EM8900 + BQ25570	0,738	3,488

Fonte: autor (2022).

O consumo dos conversores LTC foram baseados nas correntes quiescentes dos pinos  $V_{OUT}$  e  $V_{AUX}$ , somados as correntes de fuga em  $V_{STORE}$  e  $V_{OUT2}$ . Para o modelo LTC3108 as correntes quiescentes típicas em  $V_{AUX}$  é de 6 μA e em  $V_{OUT}$  de 0,1 μA, já as correntes de fuga somam 0,2 μA. Já no modelo LTC3109, as correntes quiescentes típicas são 7 μA em  $V_{AUX}$  e 0,2 μA em  $V_{OUT}$ , e as correntes de fuga são de 0,11 μA. Para os circuitos conversores EM8900

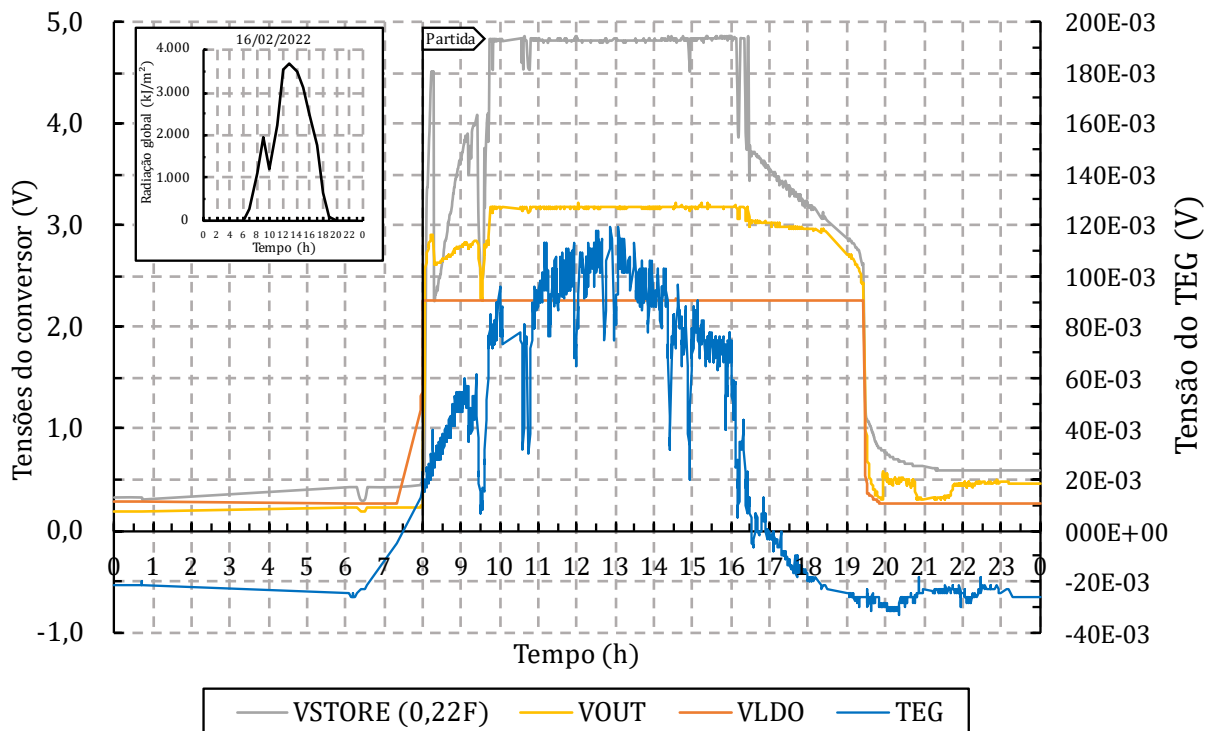
foram utilizadas as correntes de fuga no pino DIS. Para estas condições, os valores típicos são  $0,25 \mu\text{A}$ . O circuito BQ25570 possui uma corrente quiescente de  $488 \text{ nA}$ .

Com estes valores é observado que o conjunto de CIs EM8900 e BQ25570 possuem o menor consumo de corrente quando não estão em funcionamento, portanto, quando se analisa Tabela 9 juntamente com a Tabela 10, se conclui que este é o melhor arranjo em termos de eficiência e consumo energético.

### 4.3.6 Avaliação dos resultados do conversor LTC3108

A Figura 69 apresenta as tensões de funcionamento do conversor durante um dia de testes para a configuração 03. É possível perceber que a tensão de partida do conversor fica próxima aos 20 mV a tensão fornecida pelo TEG (em azul), como mencionado pelo fabricante. A partir deste ponto, a tensão regulada,  $V_{LDO}$ , é ativada, enquanto as tensões  $V_{OUT}$  (saída configurada em 3,3 V) e  $V_{STORE}$  carregam até se estabilizarem. É observado que  $V_{OUT}$  e  $V_{STORE}$  não atingem seus valores ideais conforme fabricante, observado os valores máximos de 3,21 V e 4,86 V. A máxima tensão obtida no gerador termoeletrico neste dia de teste foi de 119,46 mV e um gradiente de temperatura máximo de 3,75 °C.

Figura 69 - Funcionamento do conversor LTC3108 durante um dia de testes na configuração 03 em Joinville-SC no dia 16/02/2022.



Fonte: autor (2022).

A Tabela 11 resume os dados obtidos experimentalmente para o conversor LTC3108, complementando os dados citados com a geração de energia e energia armazenada no supercapacitor.

Tabela 11 - Dados coletados experimentalmente do conversor LTC3108.

Conversor	LTC3108
Energia coletada no dia (16/02/2022)	123,92±7,91 J
Tensão de partida	18,25 mV
Energia coletada pelo conversor ( $\eta = 39\%$ )	42,40±0,13 J
Tensão máxima no supercapacitor (0,22 F)	4,86 V
Energia armazenada no supercapacitor (0,22 F)	2,60 J
Tempo para primeira carga	6240 s

Fonte: autor (2022).

Considerando a eficiência fornecida via *datasheet* do conversor, obteve-se 42,40±0,13 J de energia coletada durante o dia. A energia teórica consumida pelo circuito proposto, calculada na seção 4.3.5, é de 17,69 J, considerando a aquisição e envio a cada 1 h. Com isso, pode-se verificar que há energia suficiente a ser fornecida para o circuito considerando as taxas de aquisição e transmissão propostas.

Outro dado importante é a energia máxima armazenada no capacitor, que depende da tensão na saída  $V_{STORE}$  do conversor. No teste realizado, a maior tensão encontrada nos terminais do supercapacitor foi de 4,86 V, resultando em 2,60 J de energia máxima armazenada. Com essa energia, considerando o custo energético para uma transmissão de 0,625±0,032 J, é possível realizar 2 transmissões, considerando uma mensagem de 40 *bytes*. Com a energia convertida pelo LTC3108, considerando a eficiência de 39%, estima-se que a quantidade de cargas possíveis ao capacitor de 0,22 F pode ser de 16 vezes.

Para a escolha do supercapacitor deve-se considerar os períodos de funcionamento do conversor, que majoritariamente ocorrem nos períodos da manhã/tarde. Portanto, ao escolher o supercapacitor de 0,22 F, por exemplo, não seria possível a transmissão de dados nos períodos da noite e madrugada, pois não haveria energia para carregamento do dispositivo.

O supercapacitor de 1 F, quando carregado completamente com uma tensão de 5 V, tem capacidade de realizar 11 envios de dados através do módulo LoRa. Ao analisar o nível máximo de 4,86 V encontrado nos terminais do conversor (saída  $V_{STORE}$ ), este modelo consegue realizar 10 envios. Com a energia teórica encontrada é possível realizar 3 cargas no modelo de supercapacitor de 1 F.

Com o cálculo teórico, o supercapacitor de 2,2 F, com uma carga completa com tensão de 5 V, é capaz de enviar 24 vezes uma mensagem e 40 *bytes* de dados. Considerando o nível

de tensão máxima encontrada experimentalmente no pino  $V_{STORE}$  do conversor de 4,86 V, e a eficiência disponibilizada pelo fabricante, há energia suficiente para realizar 1 carga completa deste supercapacitor. Com esta energia é possível realizar 22 transmissões com o módulo LoRa.

#### 4.4 COMPARAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS COM A LITERATURA

Técnicas de *harvesting* de energia tem sido explorada nos últimos anos, o que não é diferente para os geradores termoelétricos. A escolha deste componente ocorre principalmente por sua durabilidade e confiabilidade, entretanto, este dispositivo possui baixa eficiência se comparado a painéis solares. No entanto, existem trabalhos que propõe metodologias para utilização da energia gerada por TEGs. A Tabela 12 mostra os resultados de densidade de potência ( $\text{mW}/\text{cm}^3$ ) de diferentes fontes empregadas para geração de energia exclusivamente em autoestradas, como fotovoltaica, piezoelétrica e termoelétrica. A maior densidade de energia é da geração fotovoltaica, empregada pela empresa *Wattway* em rodovias, com uma densidade de potência de  $24,02 \text{ mW}/\text{cm}^3$  (WATTWAY, 2019). Já para geração termoelétrica, a maior densidade foi encontrada por Tahami et al. (2019), de  $3,02 \text{ mW}/\text{cm}^3$ . Em seu trabalho, dois TEGs foram submetidos a um gradiente de temperatura máximo de  $34 \text{ }^\circ\text{C}$ , gerando uma potência máxima de 34 mW.

No presente estudo, a densidade de  $0,322 \text{ mW}/\text{cm}^3$  para a configuração 03 foi obtida, com um gradiente de temperatura de  $4,00 \text{ }^\circ\text{C}$  e uma potência máxima de 20,20 mW. Esta densidade energética se deve sobretudo a reduzida variação de temperatura obtida nas faces do TEG.

Tabela 12 - Geração de energia de *harvesting* aplicada a autoestradas de outros trabalhos.

Tipo de geração	Referência	Máxima densidade de potência
Fotovoltaica	WATTWAY, 2019	24,02 mW/cm <sup>3</sup>
Piezoelétrica	YESNER et al., 2016	1,03 mW/cm <sup>3</sup>
	ZHAO; LING; YU, 2012	0,75 mW/cm <sup>3</sup>
Termoelétrica	DATTA; DESSOUKY; PAPAGIANNAKIS, 2017	1,457 mW/cm <sup>3</sup>
	WU; YU, 2013	2,6 mW/cm <sup>3</sup>
	JIANG et al., 2017	2,83 mW/cm <sup>3</sup>
	TAHAMI et al., 2019	3,02 mW/cm <sup>3</sup>
	Este trabalho	0,322 mW/cm <sup>3</sup>

Fonte: autor (2022).

Como visto na comparação dos resultados com a literatura, o protótipo ainda pode ser melhorado buscando-se maiores densidades de energia. Para isso, algumas modificações na parte estrutural e térmica podem ser realizadas, bem como a mudança dos modelos de geradores termoelétricos. O modelo utilizado neste trabalho não é adequado para baixas temperaturas, como o modelo utilizado no trabalho de Tahami et al. (2019). Para comprovar que a mudança de modelo do gerador termoelétrico pode apresentar aumento na densidade energética do sistema foi calculado a densidade considerando o TEG de modelo TXL-199-02Q, por meio dos dados do fabricante e os gradientes de temperatura obtidos experimentalmente neste trabalho.

O fabricante disponibiliza a equação de tensão de saída em aberto para o gerador termoelétrico, facilitando o cálculo teórico da sua potência de saída. O modelo TXL-199-02Q possui resistência interna de 9,3  $\Omega$ . Com esse dado pode-se encontrar a máxima potência de saída para os gradientes de temperaturas encontrados experimentalmente, no caso a configuração 03. A Equação (13) define a tensão de saída em aberto para o gerador termoelétrico TXL-199-02Q (TXL GROUP, 2017).

$$V_{OC} = N * (0,0002 * 1,004^{4T}) * \Delta T \quad (13)$$

onde  $N$  é o número total de termo elementos e  $\Delta T$  o gradiente térmico em que o gerador é submetido.

O gerador tem dimensões de 40x40x0,35 mm e para o gradiente térmico máximo de 4,00 °C, a densidade de potência gerada foi de 0,502 mW/cm<sup>3</sup>. Comparando com o resultado

deste trabalho ( $0,322 \text{ mW/cm}^3$ ), o aumento foi 64,14% na densidade de potência apenas com o uso de um gerador termoelétrico apropriado para baixas temperaturas.

Outras modificações a serem feitas para melhorar o desempenho do sistema proposto serão discutidas na seção de trabalhos futuros.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram analisadas seis configurações para geração de energia termoelétrica tendo como fontes a energia solar térmica, a malha asfáltica e o solo. Um circuito eletrônico de conversão, gerenciamento de energia e coleta de dados climáticos é proposto para formar uma mini estação meteorológica com o objetivo de levantar condições de uma autoestrada e enviar estes dados para um servidor na internet por meio do protocolo LoRaWAN.

A primeira análise realizada foi do sistema térmico, com o objetivo de testar a capacidade de transferência de calor dos tubos de calor adquiridos. Constatou-se que os tubos conseguem suprir a demanda energética do sistema mesmo em condições de inclinação adversa.

A partir dos testes em campo foi constatado que a capacidade de transferência do todo o sistema supri a demanda, considerando as condições máximas de potência em que o aparato é submetido em campo. Portanto, pode-se concluir que é possível aumentar a superfície coletora em 62,59% e, por consequência, aumentar o gradiente de temperatura e a geração de energia elétrica.

A análise dos circuitos conversores propostos foi realizada. Sua eficiência e capacidade de conversão e armazenamento utilizando três tipos de supercapacitores foi avaliada, considerando dados do fabricante e níveis de tensão de partida e regime permanente. Uma análise do consumo energético dos componentes do sistema para testar a viabilidade da aplicação do circuito proposto foi estudada, considerando consumo dos sensores, microcontrolador e seus periféricos e do sistema de gerenciamento de energia de cada conversor, seja ele interno ou externo ao CI, como no caso do conversor EM8900. Nestas análises, o circuito conversor de modelo EM8900 em conjunto com o modelo BQ25570 apresentou maior eficiência na conversão, comparando os dados com resultados adquiridos experimentalmente do mesmo dia (*i.e.*, 02/02/2022) para os diferentes conversores.

A utilização destes conversores foi considerada adequada devido aos reduzidos gradientes de temperatura encontrados durante os testes e, conseqüentemente, baixos níveis de tensão no TEG. A maior diferença de temperatura encontrada durante os testes foi de 4,00 °C com uma tensão de 187,48 mV nos terminais do gerador. Isso impede o emprego de outros modelos disponíveis que trabalham com tensões de entrada maiores que os modelos analisados ou possuem tensões de partida acima do nível máximo obtido durante os testes, inviabilizando sua implementação, como por exemplo, o modelo BQ25570.



O modelo BQ25570 da Texas Instruments® necessita de 600 mV em seus terminais de entrada para começar o funcionamento, para contornar este problema, propõe-se a sua utilização em conjunto com outro conversor capaz de elevar a tensão de saída em níveis aceitáveis, para realizar sua partida e a conversão com maior eficiência devido a seu MPPT (Rastreador De Ponto De Máxima Potência).

O consumo necessário de energia armazenada nos supercapacitores para transmissão dos dados via LoRa foi obtido experimentalmente considerando uma transmissão de 40 bytes de dados. Um conjunto de supercapacitores foram analisados para armazenamento da energia gerada pelos TEGs. Verificou-se que para a aquisição de dados do circuito proposto mais o envio por meio da rede de comunicação sem fio, um supercapacitor de 0,22 F é suficiente para realizar 2 transmissões quando completamente carregado.

Com o desenvolvimento do trabalho foi possível obter um projeto de um circuito de coleta de dados e gerenciamento de energia a partir de quatro geradores termoelétricos. Este circuito consome 17,69 J e se propõe a adquirir dados de temperatura ambiente, umidade relativa do ar e temperatura do asfalto e enviar utilizando a tecnologia LoRaWAN para um banco de dados na internet. A Configuração 03 foi a mais eficiente entre os protótipos desenvolvidos. A energia coletada em um dia de testes, considerando a máxima potência do TEG, foi de  $286,24 \pm 18,40$  J. A energia máxima coletada em um dia com essa configuração instalada, considerando o conjunto de circuitos conversores EM8900 e BQ25570, foi de  $173,52 \pm 11,18$  J, sendo a eficiência segundo fabricante de  $\cong 68\%$  e  $93\%$  respectivamente.

O sistema de geração e conversão é capaz de fornecer energia para o circuito proposto com uma frequência de coleta e envio de dados para a internet através da rede LoRa a cada hora, utilizando o supercapacitor de 0,22 F, sendo possível realizar 2 transmissões de dados a cada carga completa do dispositivo. Estimou-se que com o conversor LTC3108, considerando uma eficiência de 39%, disponibilizada pelo fabricante, seja possível realizar 16 cargas completas deste supercapacitor.

Ao analisar o supercapacitor de 2,2 F, constatou-se que é possível realizar 1 carga completa com a energia convertida pelo conversor LTC3108 e realizar 22 transmissões com o módulo LoRa. Conclui-se que este supercapacitor é o mais indicado para o sistema, pois ao carregar durante o período do dia, quando há energia sendo convertida, e ser utilizada durante os períodos da noite e madrugada.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Modificações para melhorar a eficiência de geração podem ser realizadas, como por exemplo, o uso de módulos termoeletricos de modelos diferentes, que possuam temperaturas de operação mais próximas das temperaturas de trabalho do experimento.

Outra forma para aumentar a geração de energia seria aumentando a área da placa coletora, com o intuito de aumentar a temperatura de operação do sistema, aumentando consequentemente a geração de energia do TEG. Juntamente com a mudança da área da placa coletora, pode-se aumentar o comprimento do tubo de calor, assim, transportando a energia térmica para profundidades maiores do solo, onde a temperatura é menor, com o objetivo de elevar o gradiente de térmico nas faces do gerador.

Realizar testes práticos do circuito proposto com o intuito de analisar qual circuito conversor se apresenta mais eficiente nos testes em campo em comparação com as análises de consumo teórico realizadas neste trabalho.

Aplicar um circuito de gerenciamento de energia ao circuito, projetado para consumir correntes quiescentes menores que o circuito interno dos modelos conversores citados no trabalho. A partir dos testes práticos, avaliar a transmissão dos dados utilizando a rede LoRaWAN desenvolvida no trabalho, avaliando o consumo de energia e número de transmissões possíveis em um dia.

Utilizar um circuito regulador com correntes quiescentes menores para alimentação do módulo LoRa.

Realizar testes práticos com os diferentes valores de capacitância propostos para o elemento de armazenamento do sistema e avaliar qual o modelo mais indicado para implementação prática.

Utilização de circuitos de referência de tensão para os componentes eletrônicos de instrumentação com o objetivo de aumentar a precisão das medidas, principalmente da tensão em aberto do gerador termoeletrico.

## REFERÊNCIAS

- ADAMI, S. E. et al. **Self-powered ultra-low power DC-DC converter for RF energy harvesting**. 2012 IEEE Faible Tension Faible Consommation, FTFC 2012. **Anais...Paris: IEEE**, jun. 2012.
- ANALOG DEVICES. LTC3108. p. 1–22, 2010.
- ARRUDA, C. V. **Análise da implantação de uma rede LoRaWAN para sistemas embarcados**. Joinville: UFSC, 2019.
- BELL, L. E. Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. **Science**, v. 321, n. 5895, p. 1457–1461, 2008.
- BORBA, A. C. DE. **Análise experimental e analítica de geradores termoelétricos aplicados em nanossatélites**. Dissertação—Joinville, SC: UFSC, 1 mar. 2019.
- BOSCH SENSORTEC. **BME280 - Combined Humidity and Temperature Sensor**. , 2018. Disponível em: <<https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>>
- BURR-BROWN, C. **INA125 - Instrumentation Amplifier With Precision Voltage Reference**. , 1998.
- BUSSE, C. A. Theory of the ultimate heat transfer limit of cylindrical heat pipes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 16, n. 1, p. 169–186, 1973.
- CARVALHAES-DIAS, P.; CABOT, A.; SIQUEIRA DIAS, J. A. Evaluation of the thermoelectric energy harvesting potential at different latitudes using solar flat panels systems with buried heat sink. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 8, n. 12, p. 14, 2018.
- CATALAN, L. et al. Experimental evidence of the viability of thermoelectric generators to power volcanic monitoring stations. **Sensors (Switzerland)**, v. 20, n. 17, p. 1–25, 1 set. 2020.
- CHIRPSTACK. **ChirpStack, open-source LoRaWAN® Network Server stack**. Disponível em: <<https://www.chirpstack.io>>. Acesso em: 26 jun. 2022.
- DATTA, U.; DESSOUKY, S.; PAPAGIANNAKIS, A. T. Harvesting thermoelectric energy from asphalt pavements. **Transportation Research Record**, v. 2628, p. 12–22, 2017.
- DE ANGELIS, G. et al. **A hybrid outdoor/indoor Positioning System for IoT applications**. 1st IEEE International Symposium on Systems Engineering, ISSE 2015 - Proceedings. **Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.**, 21 out. 2015.
- DIAS, P. C. et al. Autonomous Multisensor System Powered by a Solar Thermoelectric Energy Harvester with Ultralow-Power Management Circuit. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 64, n. 11, p. 2918–2925, 2015.

DIAS, P. C. et al. Autonomous soil moisture sensor based on nanostructured thermosensitive resistors powered by an integrated thermoelectric generator. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 239, p. 1–7, 2016.

FAGHRI, A. **Heat pipe science and technology**. Washington, DC: Taylor & Francis, 1995.

FLEURIAL, J.-P. et al. **Miniaturized Thermoelectric Power Sources**. 34th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. **Anais...**1999.

HAIDINE, A. et al. The Role of Communication Technologies in Building Future Smart Cities. In: **Wound Healing - New insights into Ancient Challenges**. [s.l.] InTech, 2016. p. 55–76.

HIKARI®. **Manual de Instruções Múltimetro Digital HM-2900**. , 2019.

HU, W.; YU, X. Thermal and mechanical properties of bio-based PCMs encapsulated with nanofibrous structure. **Renewable Energy**, v. 62, p. 454–458, fev. 2014.

HUANG, Y. et al. Study on field experiments of forest soil thermoelectric power generation devices. **PLoS ONE**, v. 14, n. 8, p. 1–13, 2019.

INMET. **Tabela de Estações - ITAPOÁ A851**. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A851>>. Acesso em: 8 jun. 2022.

ISHIYAMA, T.; YAMADA, H. Effect of heat pipes to suppress heat leakage for thermoelectric generator of energy harvesting. **2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2012**, 2012.

JIANG, W. et al. Energy harvesting from asphalt pavement using thermoelectric technology. **Applied Energy**, v. 205, p. 941–950, 1 nov. 2017.

KREITH, F. **Princípios da Transferência de Calor**. 6<sup>a</sup> ed. São Paulo: Pionera Thomson Learning Ltda., 2003.

LAWRENCE, E. E.; SNYDER, G. J. **A Study of Heat Sink Performance in Air and Soil for Use in a Thermoelectric Energy Harvesting Device**. Twenty-First International Conference on Thermoelectrics. **Anais...**2002.

LEE, H. Thermoelectric Generators. In: **Thermoelectrics: Design and Materials**. 1. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, Ltda., 2017.

LI, Z. et al. A hybrid piezoelectric-triboelectric generator for low-frequency and broad-bandwidth energy harvesting. **Energy Conversion and Management**, v. 174, n. May, p. 188–197, 2018.

LORA ALLIANCE, T. C. **LoRAwan 1.0.3 Specification**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan1.0.3.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2022.

LORA ALLIANCE. **What is it? A technical overview of LoRa ® and LoRaWAN™**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2022.

MANTELLI, M. B. H. Thermosyphon technology for industrial applications. In: VASILIEV, L. L.; KAKAÇ, S. (Eds.). **Heat Pipes and Solid Sorption Transformations: fundamentals and practical applications**. Boca Raton (USA): CRC Press, 2013.

MARQUES, J. J. B.; BOCHIE, K. **LoRa**. Disponível em: <<https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2018-1/trabalhos-vf/lora/>>. Acesso em: 26 jun. 2022.

MARTINS, T. **Avaliação da colheita de energia termoelétrica para microsatélites**. Dissertação—Joinville,SC: UFSC, 2019.

MEKKI, K. et al. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. **ICT Express**, v. 5, n. 1, p. 1–7, 1 mar. 2019.

MOHAN, N. **Eletrônica de potência: curso introdutório**. Rio de Janeiro: LTC, 2014. v. 6

MONTEIRO, M. M. **Caracterização termofísica de bio materiais demudança de fase por meio da metodologia T-History**. Dissertação—Brasília: Universidade de Brasília, 2018.

NISHIDA, F. B. **DESENVOLVIMENTO DE TUBOS DE CALOR COM MICRORANHURAS FABRICADAS POR ELETROEROSÃO A FIO**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

NORTHWESTERN UNIVERSITY. **Brief History of Thermoelectrics**. Disponível em: <<http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/history.html>>. Acesso em: 6 jun. 2021.

PAIVA, K. V. DE. **COMPORTAMENTO TÉRMICO EM GRAVIDADE E MICROGRAVIDADE DE MINI TUBOS DE CALOR DO TIPO FIOS-PLACAS**. Florianópolis: UFSC, 2007.

PIELICHOWSKA, K.; PIELICHOWSKI, K. **Phase change materials for thermal energy storage**. **Progress in Materials Science** Elsevier Ltd, , 2014.

PRIYA, S.; INMAN, D. J. (EDS.). **Energy Harvesting Technologies**. 1. ed. Boston, MA: Springer, 2009.

RADIOENGE. **Mote LoRa Radioenge - Manual de Utilização**. , abr. 2021.

REAY, D.; KEW, P. **Heat Pipes: Theory, Desing and Applications**. 5<sup>a</sup>. ed. Burlington, Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 2006.

REMELI, M. F. et al. Simultaneous power generation and heat recovery using a heat pipe assisted thermoelectric generator system. **Energy Conversion and Management**, v. 91, p. 110–119, 2015.

RICHELLI, A.; COLALONGO, L.; KOVACS-VAJNA, Z. A Review of DC/DC Converters for Ultra Low Voltage Energy Harvesting. **Journal of Low Power Electronics**, v. 12, n. 2, p. 138–149, 1 jun. 2016.

RISINGHF. **RHF0M301 Datasheet.** Disponível em: <<https://wiki.risinghf.com/en/01/01/03/03/#introduction>>. Acesso em: 7 jun. 2022.

ROWE, D. M. (ED.). **CRC Handbook of Thermoelectrics.** Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 1995.

SANTO, M. DO E. **Análise experimental de diferentes configurações de termossifões para aplicação em coletor solar.** [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

SEMTECH. **What is LoRa?** Disponível em: <<https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>>. Acesso em: 7 jun. 2021.

SHARMA, A. et al. **Review on thermal energy storage with phase change materials and applications.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, fev. 2009.

SHARMA, R. K. et al. Developments in organic solid-liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, v. 95, p. 193–228, 1 maio 2015.

SHRESTHA, A. K.; THAPA, A.; GAUTAM, H. Solar radiation, air temperature, relative humidity, and dew point study: Damak, jhapa, Nepal. *International Journal of Photoenergy*, v. 2019, 2019.

SILVA, J. D. C. et al. **LoRaWAN-A Low Power WAN Protocol for Internet of Things: a Review and Opportunities.** 2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech). *Anais...IEEE*, 31 ago. 2017.

SKOVAJSA, J.; ZALESK, M. The use of the photovoltaic system in combination with a thermal energy storage for heating and thermoelectric cooling. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 8, n. 10, 28 set. 2018.

TAHAMI, S. A. et al. Developing a new thermoelectric approach for energy harvesting from asphalt pavements. *Applied Energy*, v. 238, n. October 2018, p. 786–795, 2019.

TEGPRO. **TE-MOD-22W7V-56 Thermoelectric generator module - Datasheet.** , 2014.

TEIXEIRA, G. B.; ALMEIDA, J. V. P. DE. **REDE LORA® E PROTOCOLO LORAWAN® APLICADOS NA AGRICULTURA DE PRECISÃO NO BRASIL.** TCC—Ponta Grossa: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

TEXAS INSTRUMENTS®. **TLV1117 Adjustable and Fixed Low-Dropout Voltage Regulator.** , 2014. Disponível em: <[www.ti.com](http://www.ti.com)>

TEXAS INSTRUMENTS. **BQ25570 nano power boost charger and buck converter.** , 2019. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25570.pdf>>

TXL GROUP, INC. **TXL-199-02Q Thermoelectric Generator Module.** , 2017.

VANGELISTA, L.; ZANELLA, A.; ZORZI, M. Long-Range IoT Technologies: The Dawn of LoRa. In: ATANASOVSKI, V.; LEON-GARCIA, A. (Eds.). **Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures.** Lecture Notes of the Institute for Computer

Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2015. v. 159p. 51–58.

VIESSER, E. **CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL POROSO EM TITÂNIO PARA TUBOS DE CALOR**. Joinville: UFSC, 2018.

WATTWAY. **Fiche Technique**. Disponível em: <[https://www.wattwaybycolas.com/media/documents/documents-en-francais/20190410\\_fiche-technique-ww.pdf](https://www.wattwaybycolas.com/media/documents/documents-en-francais/20190410_fiche-technique-ww.pdf)>. Acesso em: 26 jun. 2022.

WU, G.; YU, X. Computer-Aided Design of Thermal Energy Harvesting System across Pavement Structure. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 6, n. 2, p. 73–79, 2013.

YESNER, G. et al. **Piezoelectric energy harvesting using a novel cymbal transducer design**. 2016 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, European Conference on Application of Polar Dielectrics, and Piezoelectric Force Microscopy Workshop, ISAF/ECAPD/PFM 2016. **Anais...**Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 27 set. 2016.

YILDIZ, F. Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and. **The Journal of Technology Studies**, v. 35, n. 1, p. 40–48, 2009.

ZHAO, H.; LING, J.; YU, J. A comparative analysis of piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement. 2012.

## APÊNDICE A- CONFIGURAÇÃO DO CHIRPSTACK OS

Após realizar a instalação do sistema operacional (Chirpstack *Gateway* OS versão 3.5.0) no *Raspberry Pi* utilizando um *microSD* foi possível acessá-lo remotamente por meio do protocolo SSH (*Secure Socket Shell*) utilizando o software PuTTY. No primeiro acesso, as configurações do sistema para usuário e senha são “admin”.

Para começar as configurações é necessário acessar o menu principal do sistema com o comando via terminal “sudo gateway-config”, então será aberto um menu geral que possui caminhos para todas as configurações básicas do *gateway*, conforme a Figura 70.

Figura 70 - Menu de configuração do *gateway* do ChirpStack OS.

```

raspberrypi3:~$ sudo gateway-config
lqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqChirpStack Gateway OSqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqk
x Version:      3.5.0                                     x
x Gateway ID:  b827ebfffee04b3f                         x
x                                                       x
x lqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqk x
x x           1  Setup LoRa concentrator shield          x x
x x           2  Edit ChirpStack Concentrator config     x x
x x           3  Edit ChirpStack Gateway Bridge config  x x
x x           4  Restart ChirpStack Concentrator        x x
x x           5  Restart ChirpStack Gateway Bridge      x x
x x           6  Enable / disable applications          x x
x x           7  Configure WIFI                          x x
x x           8  Set admin password                     x x
x x           9  Flash concentrator MCU                  x x
x x          10  Reload Gateway ID                       x x
x mqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqj x
tqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqu
x               < OK >                < Quit >          x
mqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqj

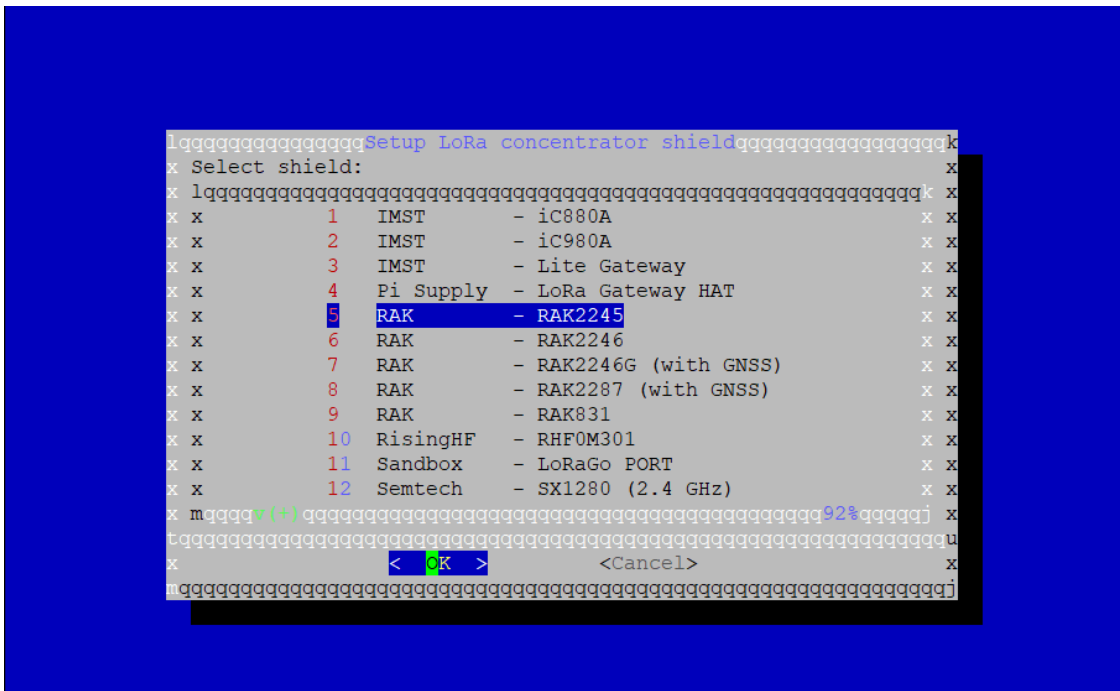
```

Fonte: autor (2022).

A primeira configuração necessária é a opção 1 – “Setup LoRa concentrator shield”, onde estão localizadas as configurações do módulo da RisingHF, que possui o *chip* concentrador SX1301. Porém, ao selecionar a opção do modelo da RisingFH, as opções de seleção de frequência não são compatíveis com o End-Device utilizado, portanto, foi necessário selecionar a opção 5, como consta na Figura 71, cujo modelo é o RAK2245 que também possui o concentrador de modelo SX1301 e possui as configurações para o padrão de frequência australiano AU915.



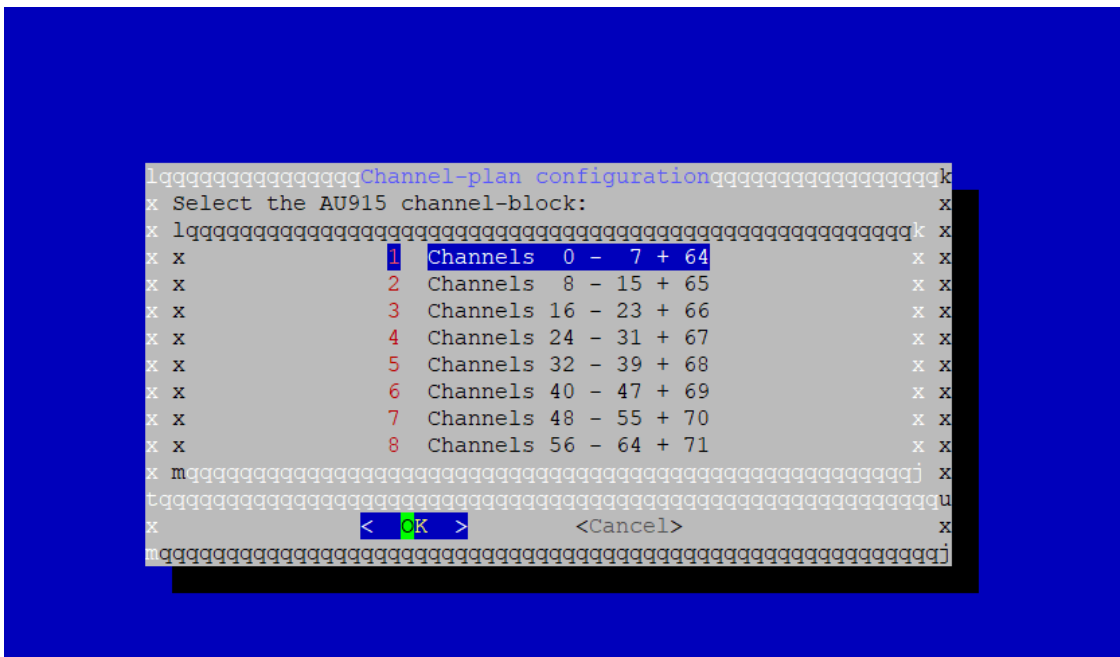
Figura 71 - Seleção do concentrador do gateway.



Fonte: autor (2022).

Por último, é selecionado o bloco de canais, sendo escolhida a opção 1, dos canais de 0 a 7 + 64, como mostra a Figura 72.

Figura 72 - Configuração do bloco de canais a ser utilizado.



Fonte: autor (2022).

Seguindo as configurações, seleciona-se a opção 2 do menu principal “Edit ChirpStack concentrator config”, e após, seleciona-se a opção “General configuration”. Após isso será aberto um arquivo contendo as configurações gerais do concentrador, neste arquivo será necessário fazer duas alterações, rolando até o fim do arquivo, verificar se a linha `gateway_id` está preenchida corretamente com o ID do módulo utilizado, após isso, logo abaixo, realizar a alteração no pino reset do módulo, que por padrão estará preenchido com 0. Neste caso, foi alterado para a GPIO21, portanto a linha fica escrita da seguinte forma: “`reset_pin=21`”. As alterações são mostradas na Figura 73 e após serem feitas, é necessário salvar o arquivo antes de sair. Caso o sistema não reconheça a alteração é necessário realizar a reinicialização do RaspberryPi utilizando o comando “`sudo reboot`”.

Figura 73 - Configuração do ID do *gateway* e pino de reset utilizado.

```
# Gateway ID.
gateway_id="b827ebfffee04b3f"

# Reset pin.
#
# Note: most model configurations come with a pre-defined reset_pin, in which
# case the setting below will be ignored.
reset_pin=21
```

Fonte: autor (2022).

Para verificação do correto funcionamento do sistema, digita-se pelo terminal do ChirpStack OS o comando “`sudo monit summary`”, obtendo um resumo dos principais módulos que compõem o *gateway* e seu estado de funcionamento, após a alteração do pino *reset* para a GPIO 21, o sistema retorna os estados OK para todos os seus processos como mostra a Figura 74.

Figura 74 - Monitoramento do status de cada componente do *gateway* LoRa.

```
raspberrypi3:~$ sudo monit summary
Monit 5.27.2 uptime: 18d 3h 45m
```

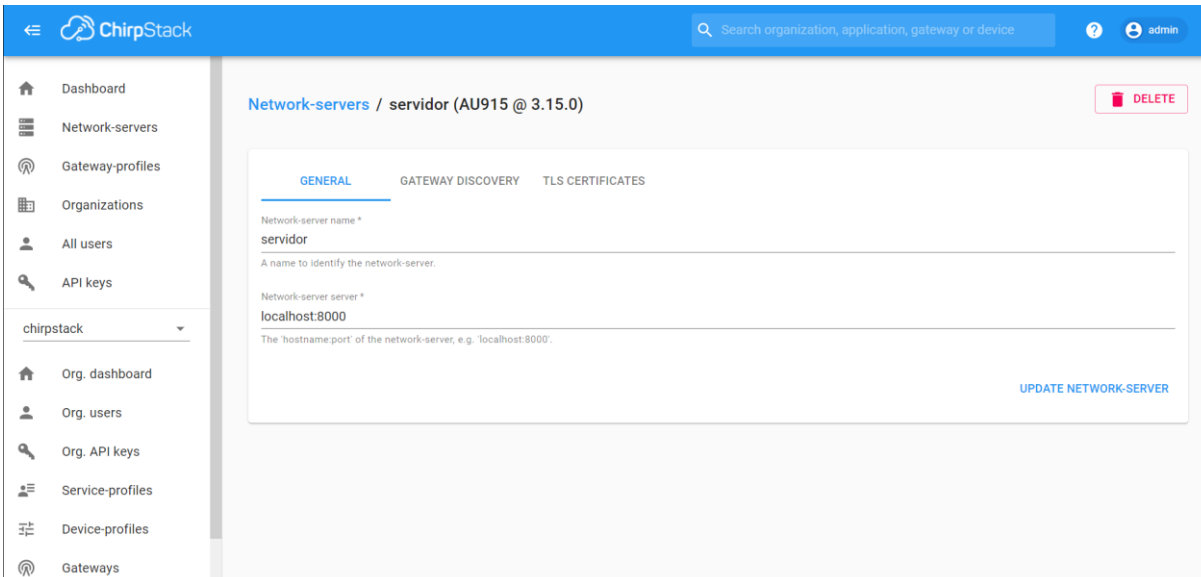
Service Name	Status	Type
raspberrypi3	OK	System
chirpstack-network-server	OK	Process
chirpstack-gateway-bridge	OK	Process
chirpstack-concentrator	OK	Process
chirpstack-application-server	OK	Process

Fonte: autor (2022).

Após a configuração inicial do *gateway* é necessário realizar as configurações no Application-server, acessando pelo navegador com o IP da RaspberryPi, na porta 8080 (porta padrão). A primeira tela será a de acesso, pedindo usuário e senha, por padrão é admin para ambos, é possível alterar estas credenciais diretamente nas configurações do *gateway* para se obter maior segurança.

Para visualização dos dados é necessário acessar o *Application Server* e realizar algumas configurações para que o End-Device se conecte à rede do *gateway* e assim possa transmitir os dados corretamente. Após o login no Application-server, é necessário definir inicialmente o Network-server e a Organização (não é necessária configuração do Gateway-profile), como exemplo se tem a configuração do network-server, nomeado como “servidor”, na Figura 75, acessando o “localhost” na porta 8000, como padrão.

Figura 75 - Criando network-server no Application Server do Chirpstack OS.



The screenshot displays the ChirpStack web interface. The top navigation bar includes the ChirpStack logo, a search bar, and the user 'admin'. A left sidebar contains navigation options: Dashboard, Network-servers, Gateway-profiles, Organizations, All users, API keys, and a dropdown for 'chirpstack' with sub-items like Org. dashboard, Org. users, Org. API keys, Service-profiles, Device-profiles, and Gateways. The main content area shows the configuration for a 'Network-server' named 'servidor' (AU915 @ 3.15.0). It has three tabs: GENERAL (selected), GATEWAY DISCOVERY, and TLS CERTIFICATES. The 'GENERAL' tab contains two input fields: 'Network-server name \*' with the value 'servidor' and 'Network-server server \*' with the value 'localhost:8000'. A 'DELETE' button is in the top right, and an 'UPDATE NETWORK-SERVER' button is at the bottom right of the form.

Fonte: autor (2022).

A criação destes perfis é necessária para definir a estrutura de rede e quem são os proprietários do *gateway* e dos dispositivos finais cadastrados. Após essa parametrização inicial, cria-se o Service-profile e o Device-profile. O Service-profile pode ser visto como um contrato entre um usuário e a rede, descrevendo os recursos habilitados para o usuário deste perfil e a taxa de mensagens que podem ser enviadas pela rede (CHIRPSTACK, 2020). Sua configuração é mostrada na Figura 76.

Figura 76 - Tela de criação do Service-profile no Application-server.

The screenshot shows the ChirpStack web interface for creating a service profile. The left sidebar contains navigation options like Dashboard, Network-servers, Gateway-profiles, Organizations, All users, and API keys. The main content area is titled 'Service-profiles / Create' and contains the following form fields:

- Service-profile name \***: service
- Network-server \***: servidor
- Add gateway meta-data**: GW metadata (RSSI, SNR, GW geoloc., etc.) are added to the packet sent to the application-server.
- Enable network geolocation**: When enabled, the network-server will try to resolve the location of the devices under this service-profile. Please note that you need to have gateways supporting the fine-timestamp feature and that the network-server needs to be configured in order to provide geolocation support.
- Device-status request frequency**: 0
- Minimum allowed data-rate \***: 0
- Maximum allowed data-rate \***: 0
- Private gateways**: Gateways under this service-profile are private. This means that these gateways can only be used by devices under the same service-profile.

Fonte: autor (2022).

Já o Device-profile define os recursos dos dispositivos e seus parâmetros de inicialização necessários ao servidor de rede para configurar o acesso de rádio LoRaWAN. Essas informações são fornecidas pelo fabricante do dispositivo final. Nele é selecionado o tipo de autenticação utilizado, sendo OTAA ou ABP, as classes que o dispositivo suporta (A, B ou C) e sua decodificação da mensagem recebida (em Javascript). O Device-profile com suas configurações gerais pode ser visto na Figura 77.

Figura 77 - Configurações do Device-profile utilizado.

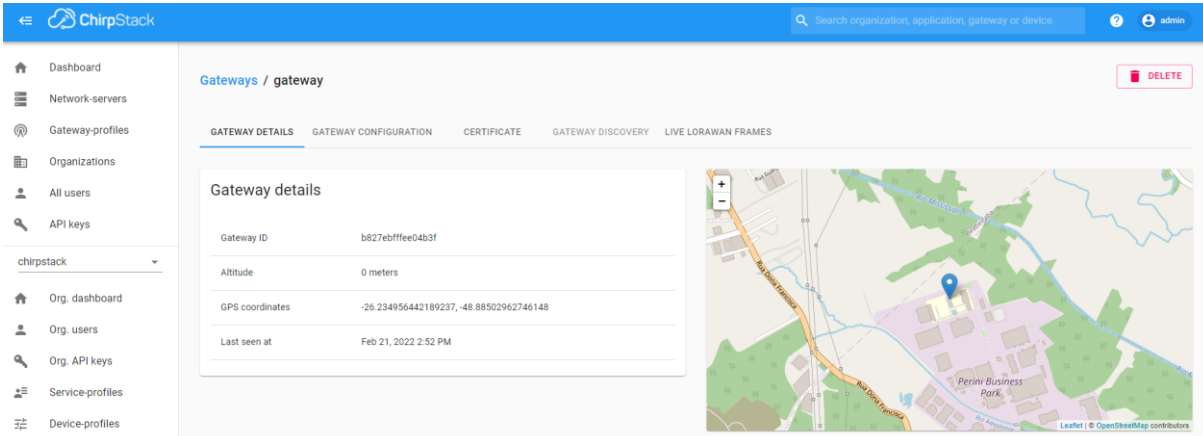
The screenshot shows the ChirpStack web interface for configuring a device profile. The left sidebar is the same as in Figure 76. The main content area is titled 'Device-profiles / device-profile' and has a 'DELETE' button in the top right. The 'GENERAL' tab is selected, showing the following configuration details:

- Device-profile name \***: device-profile
- LoRaWAN MAC version \***: 1.0.3
- LoRaWAN Regional Parameters revision \***: A
- ADR algorithm \***: Default ADR algorithm
- Max EIRP \***: 15
- Uplink interval (seconds) \***: 10

Fonte: autor (2022).

Após isso, adiciona-se o *gateway* na rede, pelo menu lateral, ao acessar esta opção irá aparecer os gateways ativos, para criação do *gateway* é preciso definir um nome, uma descrição e o ID do *gateway* instalado, além de selecionar o Network-server e o Service-profile criados anteriormente, também será solicitado para entrar com a localização e altitude do local onde está fisicamente instalado o sistema. Após a criação do *gateway*, é possível visualizar seus detalhes gerais como mostra a Figura 78, além da quantidade de mensagens recebidas e transmitidas e cada frequência e Data Rate. Dentro do *gateway* também é possível visualizar em tempo real os frames de dados recebidos por ele.

Figura 78 - Página de informações gerais após criação do *gateway* no Application-server.



The screenshot shows the ChirpStack web interface. The left sidebar contains navigation options: Dashboard, Network-servers, Gateway-profiles, Organizations, All users, API keys, and a dropdown for 'chirpstack' with sub-options: Org. dashboard, Org. users, Org. API keys, Service-profiles, and Device-profiles. The main content area is titled 'Gateways / gateway' and includes a 'DELETE' button. Below the title are tabs for 'GATEWAY DETAILS', 'GATEWAY CONFIGURATION', 'CERTIFICATE', 'GATEWAY DISCOVERY', and 'LIVE LORAWAN FRAMES'. The 'GATEWAY DETAILS' tab is active, showing a table with the following data:

Gateway ID	b827ebfffee04b3f
Altitude	0 meters
GPS coordinates	-26.234956442189237, -48.88502962746148
Last seen at	Feb 21, 2022 2:52 PM

To the right of the table is a map showing the location of the gateway, marked with a blue pin. The map includes labels for 'Perini Business Park' and 'R. Perini'. The map is credited to 'Leaflet | © OpenStreetMap contributors'.

Fonte: autor (2022).

E por fim, é criada a aplicação e a partir dela é cadastrado o dispositivo final a se comunicar com o *gateway*, nele se define um nome, uma descrição e é feito o cadastro do ID único (*Device EUI*), disponibilizado pelo fabricante, como mostra a Figura 79. Após isso adiciona-se as chaves de acesso para OTAA, um endereço para o dispositivo e duas chaves de sessão: a *Network session key* e a *Application session key*.

Figura 79 - Cadastramento do dispositivo final no Application-server.

The screenshot shows the ChirpStack web interface for creating a new device. The breadcrumb navigation is 'Applications / device / Devices / Create'. The left sidebar contains navigation options like 'Network-servers', 'Gateway-profiles', 'Organizations', 'All users', 'API keys', and 'chirpstack'. The main content area has three tabs: 'GENERAL', 'VARIABLES', and 'TAGS'. The 'GENERAL' tab is selected and contains the following fields and options:

- Device name \***: rd49c. A note below states: 'The name may only contain words, numbers and dashes.'
- Device description \***: Aquisição de temperaturas.
- Device EUI \***: MSB. There is a refresh icon to the right.
- Device-profile \***: device-profile. A dropdown arrow is visible on the right.
- Disable frame-counter validation**. A note below reads: 'Note that disabling the frame-counter validation will compromise security as it enables people to perform replay-attacks.'
- Device is disabled**. A note below reads: 'ChirpStack Network Server will ignore received uplink frames and join-requests from disabled devices.'

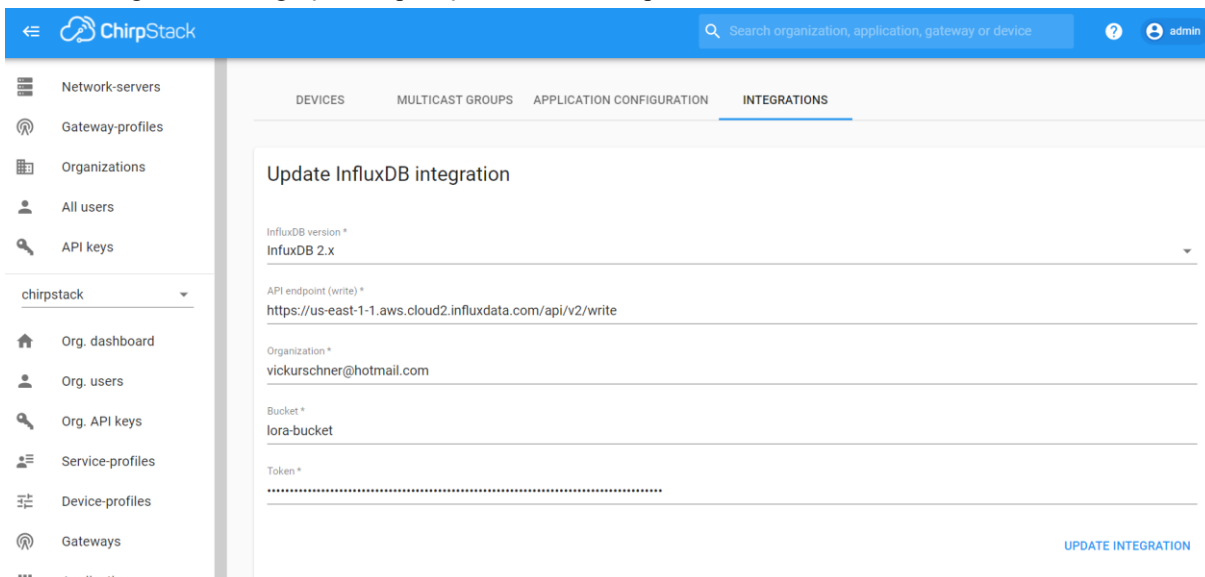
A 'CREATE DEVICE' button is located at the bottom right of the form.

Fonte: autor (2022).

Após toda parametrização do *Application server*, o dispositivo final está pronto para comunicar com o *gateway* e o último passo é a integração da aplicação com um banco de dados, neste trabalho foi utilizado o InfluxDB, um banco de dados de séries temporais de código aberto, diretamente na nuvem e gratuito, podendo reter os dados até 30 dias no plano gratuito. Para a integração, foi necessário desenvolvimento de um código na linguagem Go (Apêndice B), integrando a aplicação LoRaWAN com o banco de dados criado no site<sup>1</sup> da InfluxDB. Para integrar os dois sistemas é necessário cadastrar diretamente na aplicação criada, na aba *Integrations*. Após se cadastrar, cria-se uma organização, um *Bucket* e um *Token*, os quais são únicos da aplicação do banco de dados, necessários para segurança e encaminhamento dos dados corretamente, com mostra a Figura 80.

<sup>1</sup> < [www.cloud2.influxdata.com/signup](http://www.cloud2.influxdata.com/signup) >

Figura 80 - Integração da aplicação criada no Chirpstack OS com o banco de dados InfluxDB.

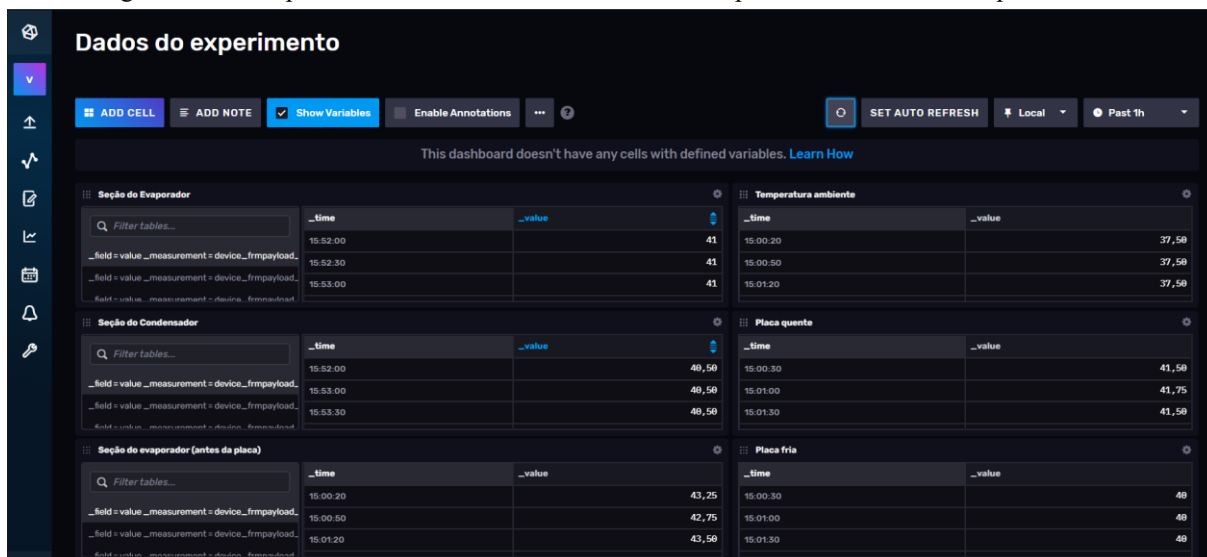


The screenshot displays the ChirpStack web interface. The top navigation bar is blue with the ChirpStack logo and a search bar. The left sidebar contains a menu with items like 'Network-servers', 'Gateway-profiles', 'Organizations', 'All users', 'API keys', and a dropdown for 'chirpstack'. The main content area is titled 'INTEGRATIONS' and shows a form for 'Update InfluxDB integration'. The form fields are: 'InfluxDB version \*' (InfluxDB 2.x), 'API endpoint (write) \*' (https://us-east-1-1.aws.cloud2.influxdata.com/api/v2/write), 'Organization \*' (vickurschner@hotmail.com), 'Bucket \*' (lora-bucket), and 'Token \*' (masked with dots). An 'UPDATE INTEGRATION' button is at the bottom right.

Fonte: autor (2022).

Após integração com o banco de dados na nuvem, é possível visualizar as mensagens encaminhadas diretamente por um navegador na internet acessando o site da InfluxDB Cloud e criando um *dashboard* para visualização dos dados, podendo ser organizado em tabelas, gráficos ou marcadores visuais de diversos tipos. Para esta aplicação, foram configurados tabelas e gráficos dos principais dados a serem observados, configurando cada tabela para cada seção do aparato, como mostra a Figura 81, onde é mostrada a aquisição e coleta de uma hora atrás a partir do momento de acesso ao site.

Figura 81 - Exemplo do *dashboard* criado com o InfluxDB para coleta dos dados experimentais.



Fonte: autor (2022).



## APÊNDICE B - APLICAÇÃO EM LINGUAGEM GO PARA INTEGRAÇÃO COM O BANCO DE DADOS INFLUXDB

```

package main

import (
    "context"
    "fmt"

    influxdb2 "github.com/influxdata/influxdb-client-go/v2"
)

func main() {
    // Create a client
    // You can generate an API Token from the "API Tokens Tab" in the UI
    client := influxdb2.NewClient("https://us-east-1-1.aws.cloud2.influxdata.com",
        "6hDuQrwNVZBGNtr_0lKQeiJrtlP3AnavXxL9LdkAwGmljE6riDX0-Y96RG7xMG9yP_xsOc7t2cN5-6jM4z98Ag==")

    // Get query client
    queryAPI := client.QueryAPI("vickurschner@hotmail.com")

    query := `from(bucket:"lora-bucket")|> range(start: -1h) |> filter(fn: (r) =>
    r._measurement == "stat")`

    // get QueryTableResult
    result, err := queryAPI.Query(context.Background(), query)
    if err != nil {
        panic(err)
    }

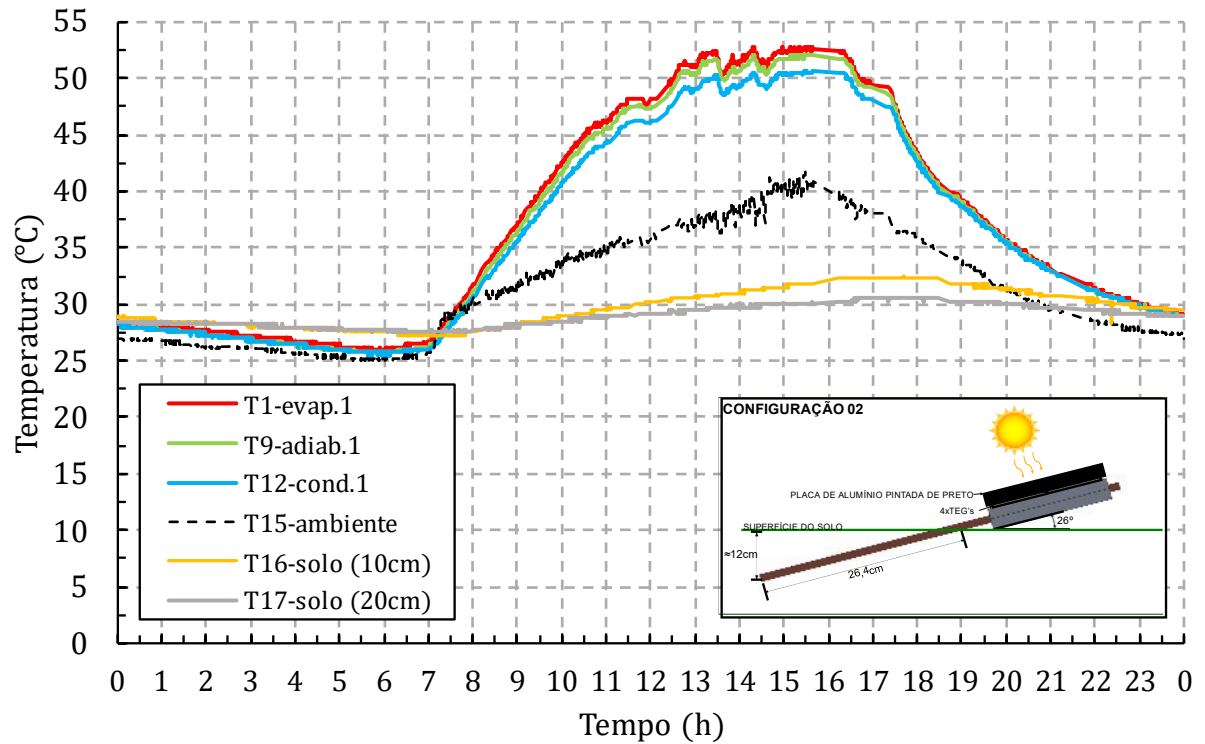
    // Iterate over query response
    for result.Next() {
        // Notice when group key has changed
        if result.TableChanged() {
            fmt.Printf("table: %s\n", result.TableMetadata().String())
        }
        // Access data
        fmt.Printf("value: %v\n", result.Record().Value())
    }
    // check for an error
    if result.Err() != nil {
        fmt.Printf("query parsing error: %\n", result.Err().Error())
    }
    // always close client at the end
    defer client.Close()
}

```

## APÊNDICE C - DADOS ENCONTRADOS PARA A CONFIGURAÇÃO 02

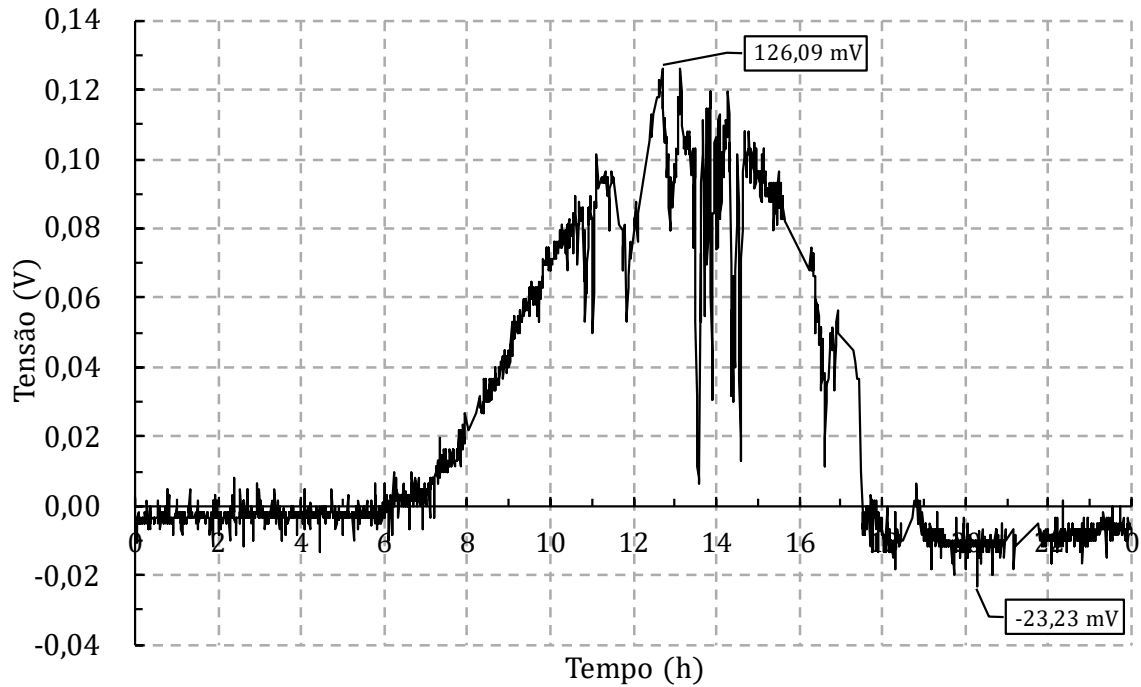
### • DADOS PARA JOINVILLE - SC

Figura 82 - Temperaturas ao longo do tubo para a configuração 02 testada em Joinville -SC.



Fonte: autor (2022).

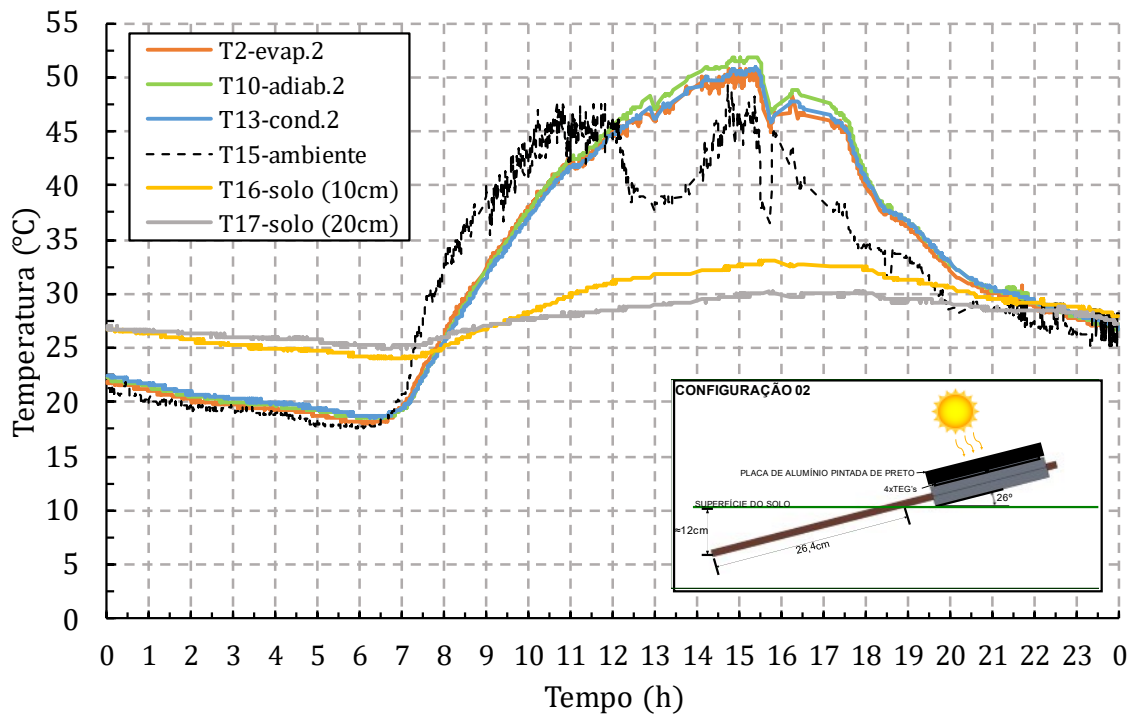
Figura 83 - Tensão em aberto nos terminais dos geradores termoeletricos para a configuração 02 em Joinville - SC.



Fonte: autor (2022).

## • DADOS PARA IJUÍ - RS

Figura 84 - Temperaturas ao longo do tubo para a configuração dois testada em Ijuí - RS.



Fonte: autor (2022).

## APÊNDICE D- ANÁLISE DE INCERTEZAS

Foi feita uma breve análise de incertezas nas potências elétricas calculadas, a partir das incertezas nas medições de tensão e temperatura, encontrou-se as incertezas nos cálculos das potências elétricas instantâneas do gerador termoelétrico.

$$\bar{T} = \frac{T_{sup} - T_{inf}}{2} \quad (14)$$

$$\partial\bar{T} = \sqrt{\left(\frac{\partial\bar{T}}{\partial T_{sup}} \partial T_{sup}\right)^2 + \left(\frac{\partial\bar{T}}{\partial T_{inf}} \partial T_{inf}\right)^2} \quad (15)$$

$$\partial\bar{T} = \sqrt{\frac{1}{2} \partial T_{sup} + \frac{\partial\bar{T}}{\partial T_{inf}} \partial T_{inf}} \quad (16)$$

$$\partial\bar{T} = \sqrt{\frac{1}{4} (\partial T_{sup}^2 + \partial T_{inf}^2)} \quad (17)$$

Porém, as incertezas de  $T_{sup}$  e  $T_{inf}$  são iguais, por tanto  $\partial T_{sup} = \partial T_{inf}$ , então  $\partial\bar{T} = \frac{\sqrt{2}}{2} \partial T_{sup}$ , como a incerteza das medições de temperatura são  $\partial T_{sup} = 2$ , temos:

$$\partial\bar{T} = \sqrt{2} \quad (18)$$

Considerando que  $R_{in} = R_L$ , temos  $\partial R_{in} = \frac{\partial R_{in}}{\partial \bar{T}} \partial\bar{T}$ , e como  $\partial\bar{T} = \frac{\sqrt{2}}{2} \partial T_{sup}$ , chega-se na seguinte expressão, baseado na Equação (9), que descreve a resistência interna do TEG:

$$\partial R_{in} = \frac{0,0058 \cdot \sqrt{2}}{2} \cdot \partial T_{sup} \quad (19)$$

$$\partial R_{in} = 0,0058 \cdot \sqrt{2} \approx 0,008 \quad (20)$$

Portanto a partir da análise de incerteza das medições de temperatura e cálculo de resistência interna do gerador, é possível realizar a análise de incertezas para as medições de potências instantâneas do TEG, como mencionado na seção 3.3, portanto a equação para propagação do erro nas medições de potência é descrita na Equação (21), e seu resultado na Equação (22).

$$\Delta P_{inst} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{inst}}{\partial V}\right)^2 \cdot (\Delta V_{inst})^2 + \left(\frac{\partial P_{inst}}{\partial R}\right)^2 \cdot (\partial R_{in})^2} \quad (21)$$

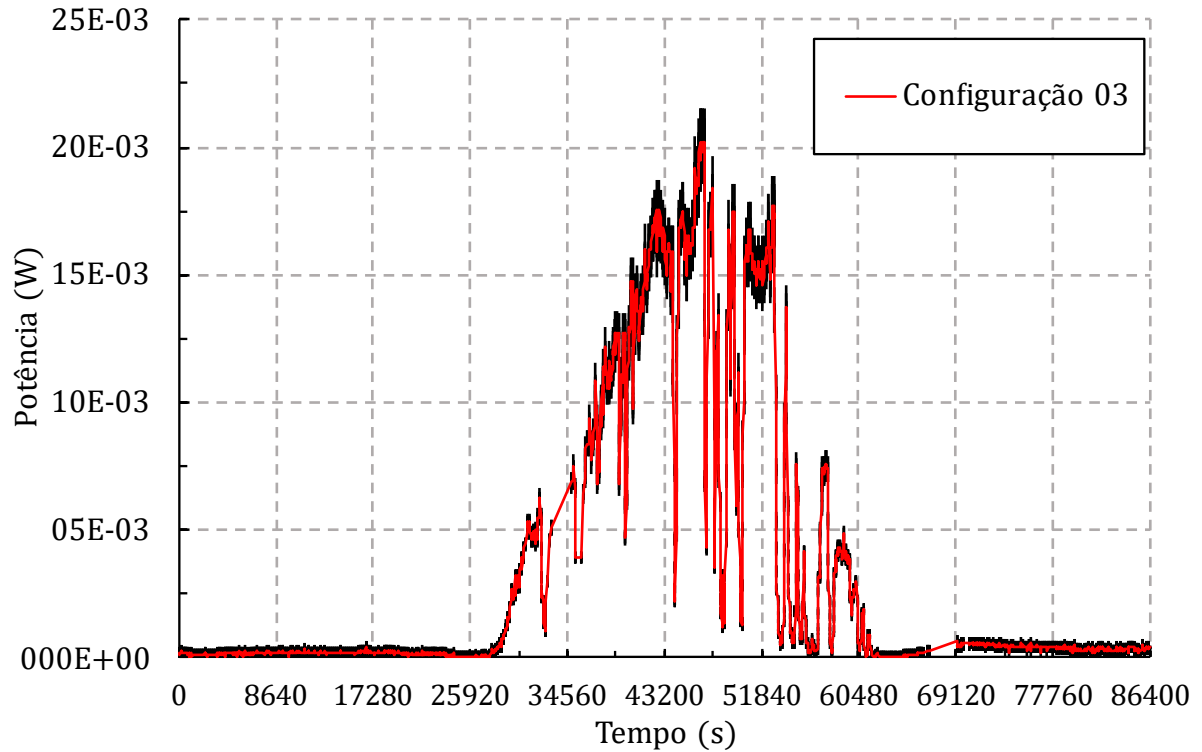
$$\Delta P_{inst} = \sqrt{\left(\frac{2V_{inst}}{4R_{in}}\right)^2 \cdot (\Delta V_{inst})^2 + \left(-\frac{V_{inst}}{4R_{in}^2}\right)^2 \cdot (\partial R_{in})^2} \quad (22)$$

Em que  $\Delta V_{inst}$  é a incerteza na medição da tensão e  $\partial R_{in}$  é a incerteza da resistência interna do TEG descrita na Equação (20). Da mesma forma a incerteza total associada a potência elétrica instantânea é definida na Equação (23).

$$\Delta P_{total} = \sqrt{(\Delta P_{inst_1})^2 + (\Delta P_{inst_2})^2 + (\Delta P_{inst_3})^2 + \dots + (\Delta P_{inst_n})^2} \quad (23)$$

Na Figura 85 vemos a potência calculada em um dia de testes na Configuração 03, juntamente com as incertezas associadas a medição de temperatura e tensão.

Figura 85 - Incertezas associadas a medição de potência do TEG para os testes com a Configuração 03.



Fonte: autor (2022).

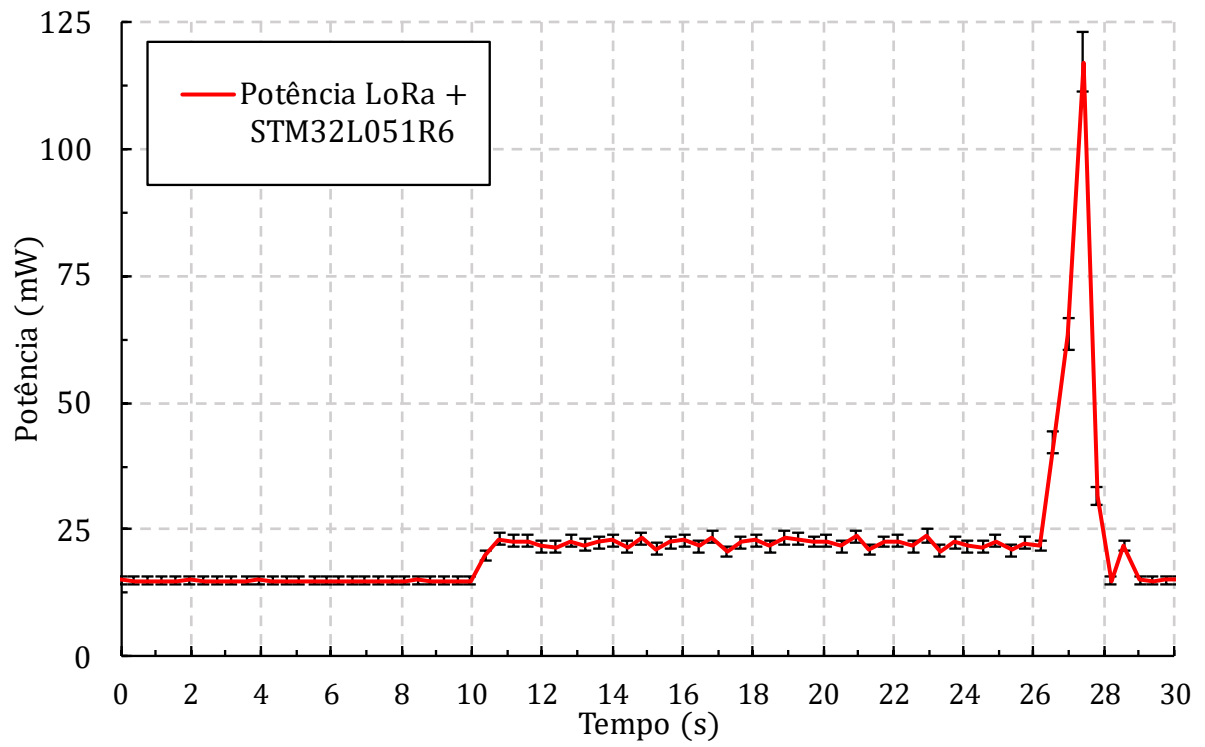
Para as medições realizadas com uma bancada da National Instruments (NI 9205), que apresenta um erro na medição de tensão de 1% do fundo de escala, quando o fundo de escala é 5 V, o erro de medição é de 0,05 V e quando o fundo de escala é 1 V, o erro é de 0,01 V. Portanto, para determinar as incertezas nas medições de potência elétrica do sistema de transmissão LoRaWAN, foi utilizado o mesmo método de propagação de erros utilizado para estimar a geração de energia do TEG, porém, desta vez, se utilizou a Equação (11) para determinar a potência elétrica. Portanto, a Equação (25) descreve a propagação de erro para a potência medida do sistema LoRaWAN, que foi derivada da Equação (24).

$$\Delta P_{inst} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{inst}}{\partial V}\right)^2 \cdot (\Delta V_{inst})^2 + \left(\frac{\partial P_{inst}}{\partial I}\right)^2 \cdot (\Delta I)^2} \quad (24)$$

$$\Delta P_{inst} = \sqrt{I^2 \cdot (\Delta V_{inst})^2 + V^2 \cdot (\Delta I)^2} \quad (25)$$

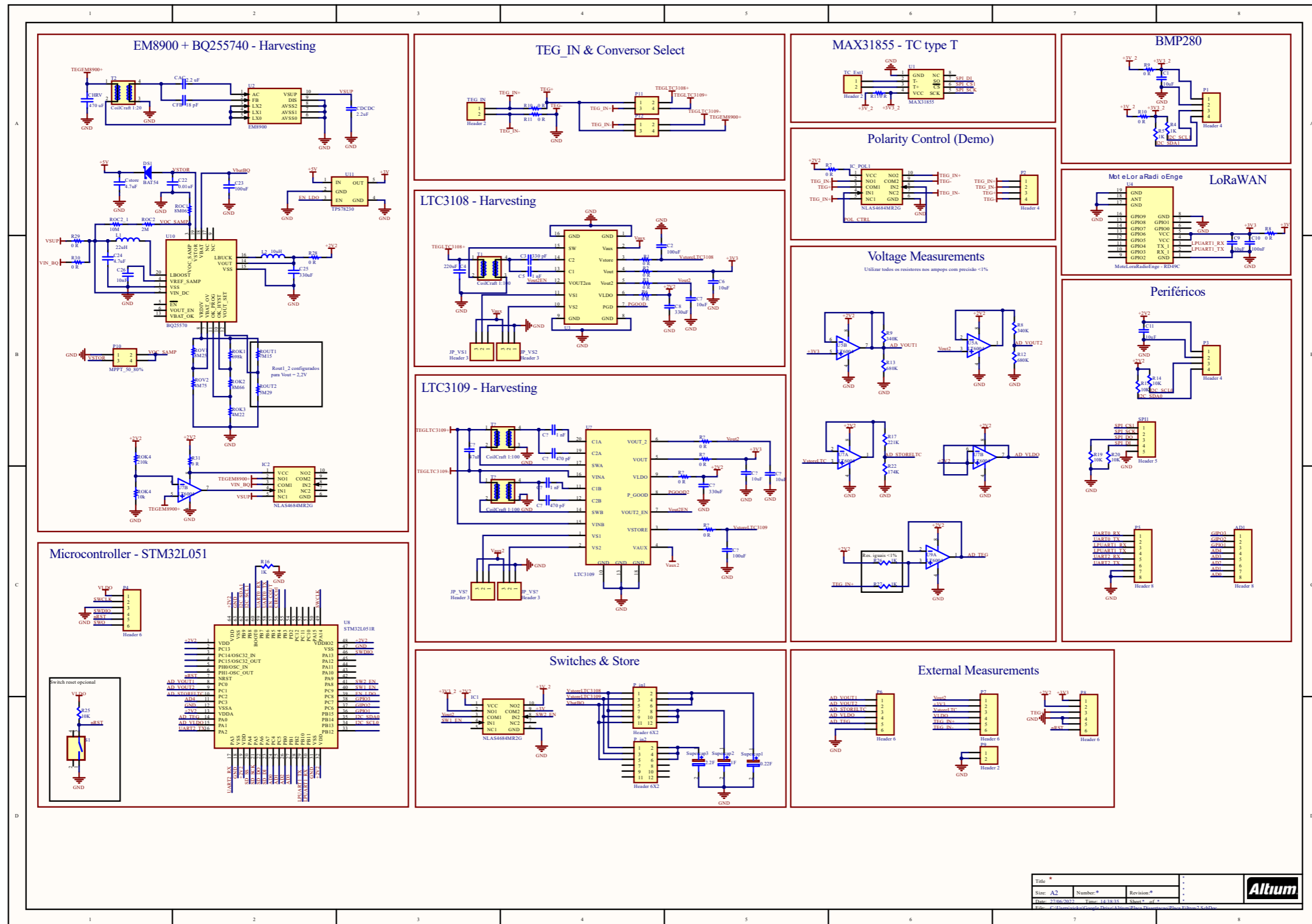
Para encontrar a incerteza total associada as medições, basta somar todas as incertezas instantâneas encontradas, como descrito na Equação (23), na Figura 86 é mostrada as incertezas na curva de potência encontrada experimentalmente para a transmissão LoRaWAN.

Figura 86 - Incertezas associadas a medição de potência do sistema LoRaWAN.



Fonte: autor (2022).

APÊNDICE E - ESQUEMÁTICO COMPLETO DO CIRCUITO PROPOSTO DO MÓDULO HARVESTING







## ANEXO A - FOLHA DE DADOS DO GERADOR TERMOELÉTRICO TE-MOD-22W-7V-56



**TE-MOD-22W7V-56**  
**22 Watt Thermoelectric Module**

### Product Overview

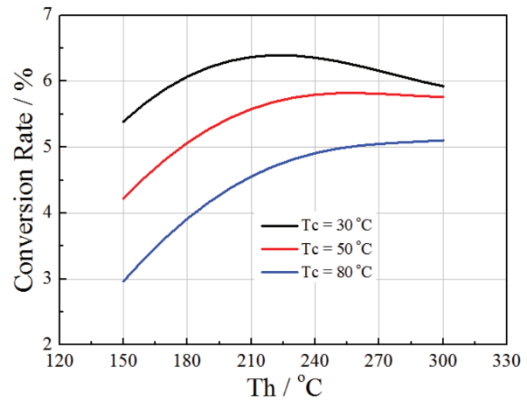
Our TEG power module is specifically designed and manufactured to convert high temperature heat sources directly into electricity. The Bi-Te based thermoelectric modules can operate at temperatures as high as 330 °C (626 K) continuously and up to 400 °C (752 K) intermittently. The module will generate DC voltage if there is a temperature difference across the module. Power is generated as the temperature difference across the module increases. The efficiency of the module will also increase as well. Thermally conductivity graphite sheets have been applied to both sides of the ceramic plates to provide low contact thermal resistance. Therefore you do not need to apply thermal grease or other heat transfer compound when you install the module. The graphite sheet works very well in high temperatures.



### Specifications

Hot Side Temperature (°C)	300
Cold Side Temperature (°C)	30
Open Circuit Voltage (V)	14.4
Matched Load Resistance (ohms)	2.4
Matched load output voltage (V)	7.2
Matched load output current (A)	3.0
Matched load output power (W)	21.6
Heat flow across the module(W)	≈ 365
Heat flow density(W cm-2)	≈ 13.2
AC Resistance (ohms) Measured under 27 °C at 1000 Hz	1.1 ~ 1.35

### Specification of the Module



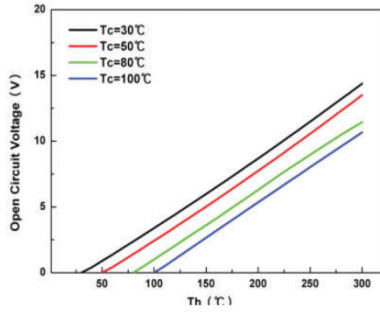
Note: Conversion rate = Matched load output power/Heat flow through the module

©2014 TEGpro www.tegpro.com.  
Specifications subject to change without notice. Sep, 2014 - Rev 1.0

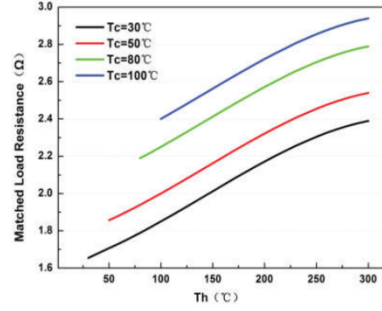


**TE-MOD-22W7V-56**  
22 Watt Thermoelectric Module

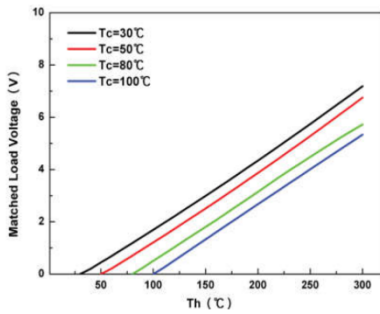
**Performance**



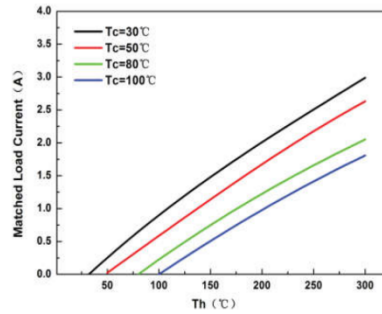
The chart for open circuit voltage Vs  $T_h$  under various  $T_c$



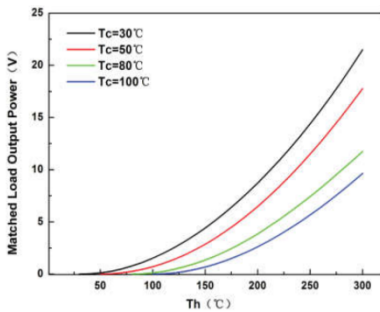
The chart for matched load resistance Vs  $T_h$  under various  $T_c$



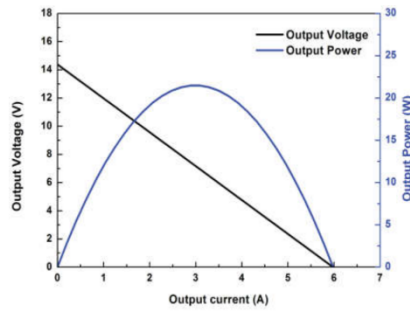
The chart for matched load voltage Vs  $T_h$  under various  $T_c$



The chart for matched load current Vs  $T_h$  under various  $T_c$



The chart for matched load output power Vs  $T_h$  under various  $T_c$



The chart for output voltage and output power Vs output current under  $T_h=300^\circ\text{C}$  and  $T_c=30^\circ\text{C}$

©2014 TEGpro www.tegpro.com.  
Specifications subject to change without notice. Nov, 2014 - Rev 1.0

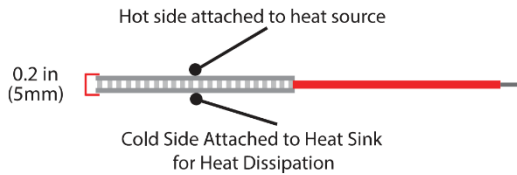
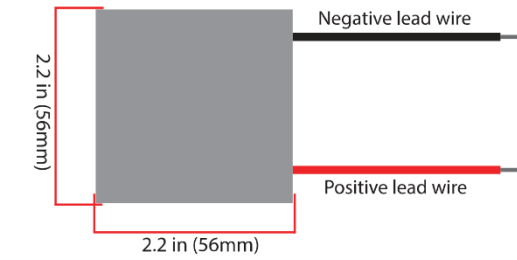
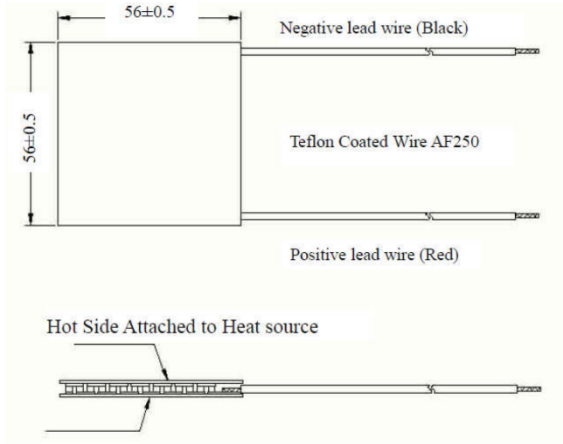
TEGpro  
802.728.4533 P  
802.728.3800 F  
info@tegpro.com  
www.tegpro.com





**TE-MOD-22W7V-56**  
**22 Watt Thermoelectric Module**

**Dimensions**



©2014 TEGpro www.tegpro.com.  
Specifications subject to change without notice. Nov, 2014 - Rev 1.0

TEGpro  
802.728.4533 P  
802.728.3800 F  
info@tegpro.com  
www.tegpro.com

