



INSTITUTO FEDERAL
Paraíba

Campus
João Pessoa

UNIDADE ACADÊMICA 3
CURSO SUPERIOR BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JÚLIO CEZAR DE CERQUEIRA VÉRAS

**AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM GERADORES
TERMOELÉTRICOS, UTILIZANDO COMO FONTE TÉRMICA A DISSIPAÇÃO DE
CALOR EM SUPERFÍCIE OPOSTA À INCIDENTE SOLAR DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS CONHECIDOS**

João Pessoa

2022

JÚLIO CEZAR DE CERQUEIRA VÉRAS

**AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM GERADORES
TERMOELÉTRICOS, UTILIZANDO COMO FONTE TÉRMICA A DISSIPAÇÃO DE
CALOR EM SUPERFÍCIE OPOSTA À INCIDENTE SOLAR DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS CONHECIDOS**

*Trabalho De Conclusão De Curso apresentado
no IFPB, na Coordenação do Curso Superior
Bacharelado em Engenharia Elétrica, Unidade
Acadêmica 3, como requisito para a obtenção do
Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Orientador: Prof. Gilvan Vieira de Andrade Júnior, Dr.

João Pessoa

2022

ATA 94/2022 - CCSBEE/UA3/UA/DDE/DG/JP/REITORIA/IFPB

Coordenação do Curso Superior de Bacharelado
em Engenharia Elétrica
CCSBEE-JP

**ATA DE APRESENTAÇÃO PÚBLICA E AVALIAÇÃO DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

ATA Nº: (Nº / ANO)	275/2022
-----------------------	-----------------

Às quatorze horas do dia vinte e um do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e dois, de modo virtual foi realizada a Apresentação Pública e Avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado "**AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM GERADORES TERMOELÉTRICOS, UTILIZANDO COMO FONTE TÉRMICA A DISSIPAÇÃO DE CALOR EM SUPERFÍCIE OPOSTA À INCIDENTE SOLAR DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS CONHECIDOS**", do(a) aluno(a) **JULIO CÉZAR DE CERQUEIRA VÉRAS**, requisito obrigatório para conclusão do CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, com os membros da Banca Examinadora **GILVAN VIEIRA DE ANDRADE JÚNIOR, DR.** (Orientador, IFPB), **GUSTAVO ARAÚJO CAVALCANTE, DR.** (Examinador, IFPB) e **THYAGO LEITE DE VASCONCELOS LIMA, DR.** (Examinador, IFPB). Após a apresentação e as considerações da Banca Examinadora, o trabalho foi considerado **APROVADO**, com nota **100** sendo esta composta pela média aritmética das seguintes avaliações parciais:

Texto:	Apresentação:	Defesa oral:
100	100	100

Eu, **GILVAN VIEIRA DE ANDRADE JÚNIOR, DR.** (Orientador, IFPB), lavrei a presente Ata, que segue assinada por mim e pelos demais membros da Banca Examinadora.

Observações:

Documento assinado eletronicamente por:

- **Gilvan Vieira de Andrade Junior, COORDENADOR DE CURSO - FUC1 - CCTELT-JP**, em 28/12/2022 08:05:33.
- **Thyago Leite de Vasconcelos Lima, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 28/12/2022 08:58:35.
- **Gustavo Araujo Cavalcante, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 28/12/2022 10:00:18.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 28/12/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código: 372630
Verificador: fdaac6b8cc
Código de Autenticação:



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *campus* João Pessoa

V476a Vêras, Júlio Cezar de Cerqueira.
Avaliação da geração de energia elétrica em geradores termoelétricos, utilizando como fonte térmica a dissipação de calor em superfície oposta à incidente solar de painéis fotovoltaicos conhecidos / Júlio Cezar de Cerqueira Vêras. – 2022.
43 f. : il.

TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB / Coordenação de Engenharia Elétrica.
Orientador : Prof. Gilvan Vieira de Andrade Júnior, Dr.

1. Geração de energia elétrica. 2. Painéis fotovoltaicos. 3. Geradores termoelétricos. 4. Eficiência termoelétrica. I. Título.

CDU 621.311.2

JÚLIO CEZAR DE CERQUEIRA VÉRAS

**AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM GERADORES
TERMOELÉTRICOS, UTILIZANDO COMO FONTE TÉRMICA A DISSIPAÇÃO DE
CALOR EM SUPERFÍCIE OPOSTA À INCIDENTE SOLAR DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS CONHECIDOS**

*Trabalho De Conclusão De Curso
apresentado no IFPB, na Coordenação do
Curso Superior Bacharelado em Engenharia
Elétrica, Unidade Acadêmica 3, como
requisito para a obtenção do Grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica.*

BANCA EXAMINADORA

Prof. Gilvan Vieira de Andrade Júnior, Dr.
Doutor em Engenharia Elétrica UFCG, Orientador.

Prof. Gustavo Araújo Cavalcante, Dr.
Doutor em Engenharia Elétrica UFRN, 1º Examinador.

Prof. Thyago Leite de Vasconcelos Lima, Dr.
Doutor em Engenharia Mecânica UFPB, 2º Examinador.

João Pessoa, 21 de dezembro de 2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus que, durante toda a minha caminhada age por meio de seres humanos maravilhosos, fortalecendo e pavimentando os caminhos da sabedoria e serenidade, tornando-me cada vez mais firme em minhas convicções, contudo, sereno quanto às mudanças necessárias.

À minha família, na figura dos meus pais, **Décio de Cerqueira Véras** e **Dinalva Cezar Véras**, pais maravilhosos, amorosos e extremamente dedicados, que construíram, sobretudo, um ser humano, sabedor de seus limites e suas capacidades.

À minha esposa e parceira de caminhada, **Isabella de Medeiros Barbosa**, minha companheira, confidente e parceira que, em tantos momentos onde o desânimo era o único pensamento, me incentivava a continuar firme, certo de finalizar mais esta etapa.

Aos grandes amigos, em especial, **Thyago Leite de Vasconcelos Lima** que, além de um amigo, é como um irmão, ao amigo **Adriano Gouveia de Sousa** e **Eduardo de Melo Vasconcelos**, colegas de docência que sempre apoiaram e se fizeram presentes, para ouvir as queixas e ofertarem pacientemente palavras serenas de sabedoria.

Sou grato ao meu orientador, **Gilvan Vieira de Andrade Júnior**, que se pôs disponível e aceitou enfrentar juntamente, e pacientemente, mais esse desafio, em meio a tantos afazeres.

Por fim, meu eterno agradecimento a **Luiz Guedes Caldeira**, a quem 'culpo' por me encorajar e descobrir a docência como realização profissional e realização pessoal.

“A natureza da inovação é aproveitar as brechas onde ela pode prevalecer e demonstrar sua utilidade sem ser sobrepujada pela inércia do sistema ortodoxo.”

Kevin Kelly, cofundador da Revista Wired

RESUMO

O crescimento populacional mundial tem criado demanda no setor energético e, para suprir tal necessidade, recorrer as fontes renováveis de energia tem-se tornado cada vez mais atrativo. Atualmente, a energia eólica e a energia solar estão entre as mais promissoras, e têm recebido grandes incentivos do governo. No caso da energia solar fotovoltaica (FV) observa-se um crescente número de instalações em nível global, dada sua disponibilidade energética e potencial. A sua fonte de energia é o Sol, que atua com uma temperatura de superfície próxima de 5800 Kelvin, e provê, constantemente, em média, 1367 W/m^2 de irradiância fora da atmosfera terrestre. Na Terra, a potência média recebida é próxima de $1,8 \times 10^{11} \text{ MW}$. No Brasil, nos últimos anos, o setor FV vem acompanhando a tendência mundial e, portanto, seu crescimento é expressivo. A queda dos preços dos equipamentos (conversores estáticos / módulos fotovoltaicos) e melhora nas políticas públicas e avanços na tecnologia ajudam a impulsionar a energia solar. Não obstante, a eficiência do sistema FV pode ser considerada baixa, e depende da tecnologia de fabricação das células e módulos FVs, variando atualmente de 22,3% até 26,7%. Essa baixa eficiência ocorre por causa do aumento de temperatura do efeito de fluxo de calor entre a superfície incidente do material semicondutor e a superfície oposta dos módulos. Essa temperatura que chega à face oposta do painel FV é dissipada pelo ambiente. Dentro desse contexto, este trabalho, propõe o aproveitamento da temperatura dissipada pelos módulos FVs, para produzir variação de temperatura em dispositivos denominados geradores termoelétricos (*Thermoelectric Generators - TEGs*). Estes, realizam conversão termoelétrica a partir do gradiente de temperatura entre suas faces. Para verificar a temperatura a que os TEGs serão submetidos, são feitas medições da temperatura em pontos da face oposta à incidência solar, de um painel FV conhecido. Após as mensurações de temperatura, a superfície do TEG será submetida, em laboratório, pela média dessas mensurações. Por fim, a partir da temperatura proposta, medições de potência serão verificadas na conversão termoelétrica, verificando a possibilidade de associação dos TEGs aos sistemas FVs, de modo a assegurar aumento na eficiência do sistema.

Palavras-chave: Painéis Fotovoltaicos, Geradores Termoelétricos, Eficiência Termoelétrica, Associação Tecnológica.

ABSTRACT

The world population growth has created demand into the energy sectors and in order to supply such need, turn to renewable energy sources have become more attractive. Nowadays, the wind and the solar systems are among the most promising sources of clean energy. In the case of photovoltaic solar energy systems, the increasing mounting around the world is very expressive due to its energetic availability. The source of this system is the Sun which generates a temperature of up to 5800 Kelvin and provides, constantly, on average, 1367 W/m^2 of irradiance outside the Earth's atmosphere. On Earth's surface, the average power is close to the $1,8 \times 10^{11}$ MW. In Brazil, in the last few years, the solar sector is following the world trend and the increasing is also very expressive. The price drops on equipment and improvement in public policies in addition to the technological advances, help to boost solar technology systems. However, the photovoltaic systems efficiency is away far from high, and the manufacture of photovoltaic cells and modules is a technology of material dependence, and currently varies from 22,3% to 26,7%. This efficiency range is the effect of temperature increase over the semiconductors material generated by the heat flow from incident surface to the opposite surface of the photovoltaic panel. This heat flux reaches the opposite surface and dissipates into the environment. In this context, this text proposes the use of the temperature dissipated by the photovoltaic modules in order to produce variation of temperature in devices so called Thermoelectric Generators (TEGs). Such devices perform thermoelectric conversion given a temperature gradient between their surfaces. To verify the temperature to which the TEGs will be subjected, measurements of the temperature are made at points on the opposite side to the solar incidence, of a known PV panel. After the temperature measurements, the TEG surface will be subjected, in the laboratory, to the average of these measurements. Finally, based on the proposed temperature, power measurements will be verified in the thermoelectric conversion, verifying the possibility of associating the TEGs with the PV systems in order to ensure an increasing system's efficiency.

Keywords: Photovoltaic Panels, Thermoelectric Generators, Thermoelectric Efficiency, Technological Association.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de painéis solares em campos e telhados	12
Figura 2 - Pastilhas de Peltier.....	13
Figura 3 - Características físicas de um TEG.....	13
Figura 4 – Célula Fotovoltaica.....	15
Figura 5 – Condução Térmica em um Material.....	20
Figura 6 – Gerador Termoelétrico (TEG).....	21
Figura 7 – Painéis Solares Conhecidos	22
Figura 8 – Visualização das Conexões Elétricas dos Painéis.....	23
Figura 9 – Termovisor Fluke, modelo Ti300.....	23
Figura 10 – Foto Térmica do Painel Solar	24
Figura 11 – Representação da Plataforma Experimental.....	24
Figura 12 – Reservatório de Calor de Prata.....	25
Figura 13 – Preenchimento de Espaços com Pasta Térmica	26
Figura 14 – Plataforma Experimental com Fluxo de Calor.....	26
Figura 15 – Isolamento Térmico.....	27
Figura 16 – Circuitos de Norton e de Thévenin.....	28
Figura 17 – Bancada Experimental.....	29
Figura 18 – Fonte de Bancada Minipa MPS3005A	31
Figura 19 – Sensor de Temperatura LM35.....	31
Figura 20 – Medições de Temperatura	32
Figura 21 – Tensão de Thévenin	33
Figura 22 – Medições de Tensão.....	33
Figura 23 – Corrente de Norton.....	34
Figura 24 – Medições de Corrente.....	35
Figura 23 – Equivalente de Thévenin.....	42
Figura 24 – Equivalente de Norton	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
FV ou PV	Fotovoltaico
TEG	Gerador Termoelétrico
W	Watt
MW	Megawatt
m	Metro
m ²	Metro quadrado
Ohm [Ω]	Resistência Elétrica
Volt [V]	Tensão Elétrica
α [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]	Coefficiente de Seebeck

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	MOTIVAÇÃO	14
1.2	OBJETIVOS	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	ENERGIA INTERNA	17
2.2	RESISTÊNCIAS TÉRMICA E ELÉTRICA	17
2.3	EFEITO SEEBECK	18
2.4	EFEITO PELTIER	19
2.5	CONDUÇÃO TÉRMICA	19
2.6	GERADOR TERMOELÉTRICO	20
3	METODOLOGIA	22
3.1	TEMPERATURA EM PAINÉIS SOLARES	22
3.2	PLATAFORMA EXPERIMENTAL	24
3.3	MEDIÇÃO DE POTÊNCIA	27
4	MEDIÇÕES E CÁLCULOS	30
4.1	MEDIÇÃO DE TEMPERATURA	30
4.1	MEDIÇÕES DE TENSÃO	32
4.2	MEDIÇÕES DE CORRENTE	34
4.3	CÁLCULOS	35
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	37
	ANEXO I – RESISTOR <i>SHUNT</i>	41
	ANEXO II – TEOREMA DE THÉVENIN	41
	ANEXO III – TEOREMA DE NORTON	42

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por energia elétrica, seja por consumidores residenciais ou aumento nos processos da produção industrial, buscar recursos energéticos naturais tem se tornado cada vez mais necessário. Dentro desse contexto, a busca por recursos que reduzam ou minimizem ao máximo os impactos ambientais tem se tornado cada vez mais o centro das discussões e estudos no desenvolvimento de matrizes energéticas com baixo ou nenhuma emissão de poluentes na atmosfera (ROSA e GASPARIN, 2016).

As matrizes energéticas limpas, comumente chamadas de fontes de energia renováveis são aquelas consideradas inesgotáveis ou abundantes para os padrões de consumo da humanidade. Elas podem ser utilizadas sem a preocupação de desaparecerem, uma vez em que sempre se renovam. Dentro desse contexto, podem ser classificadas como fontes renováveis de energia, a energia eólica, energia oceânica, energia geotérmica, energia solar etc. Essas e tantas outras podem ser convertidas, de forma adequada, em energia elétrica (OLIVEIRA, 2021).

Nos últimos anos, a utilização de energia solar como fonte de energia tem aumentado consideravelmente. No Brasil, segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), em meio a uma pandemia de Covid-19, no ano de 2020, o crescimento foi de 70% para a área. No ranking mundial de instalações fotovoltaicas, o Brasil sai de 12º para 9º lugar, para instalações em casas, fazendas e comércios (SOLSTAR, 2021).

Para conversão de energia solar em energia elétrica, o sistema utiliza painéis fotovoltaicos, que são compostos por células fotovoltaicas, conectadas em arranjos, que podem ser em série e/ou em paralelo e, em geral, os painéis fotovoltaicos agrupam aproximadamente 36, 54 ou 60 células fotovoltaicas. A conexão desses painéis, e portanto, a montagem do sistema fotovoltaico, entrega a demanda de potência necessária gerada pela unidade consumidora (OLIVEIRA, 2021)(SOLSTAR, 2021). Segundo GREEN *et al* (2019) e SOLSTAR (2021), o tipo do material e tipo de dopagem das células fotovoltaicas que compõem o painel fotovoltaico, determinam a eficiência na conversão de energia solar em energia elétrica que, com as tecnologias vigentes, está entre 22,3% e 26,7%. Além disso, o ângulo de exposição dos painéis fotovoltaicos aos raios solares incidentes deve ser

o de maior eficiência. Assim, em geral, é comum que os painéis fotovoltaicos estejam dispostos como mostrado nos exemplos da Figura 1.

Figura 1 - Distribuição de painéis solares em campos e telhados



Fonte: <http://borealsolar.com.br/blog/2016/10/06/7-vantagens-de-instalar-paineis-solares-fotovoltaicos-em-sua-casa/>

Embora a exposição solar dos painéis fotovoltaicos à incidência solar seja indispensável para a conversão fotoelétrica, o calor entre as superfícies, incidente e oposta, afetam a eficiência na conversão da energia solar em energia elétrica, feita pelos painéis fotovoltaicos, gerando eficiências menores do que 30%, como apresentado por SOLSTAR (2021). Isso ocorre pelo fato de as células fotovoltaicas serem formadas por materiais semicondutores e, portanto, possuírem saturação, como preconizado no estudo da eletrônica dos semicondutores. Apesar disso, uma chave para aperfeiçoamento na conversão das tecnologias fotovoltaicas pode residir fortemente na dissipação de calor gerada pela superfície oposta à incidente, do painel fotovoltaico.

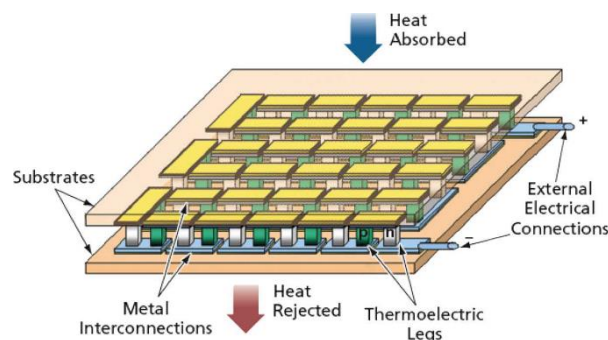
No contexto da dissipação de energia térmica, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) traz à luz da discussão, a proposta da utilização dos dispositivos que, comumente encontrados com a finalidade de refrigeração, são conhecidos por Células ou Módulos de Peltier. Estes são chamados assim em referência ao efeito Peltier, que descreve os efeitos gerados nas faces dos módulos de Peltier, uma vez que submetidos a um fluxo de corrente elétrica. Assim, ao submeter a Célula de Peltier – vista na Figura 2 – a fluxos contínuos de corrente elétrica em seus terminais, uma das faces aquece (absorve calor) e a outra face resfria (dissipa calor) gerando, portanto, uma diferença de temperatura entre suas faces. A energia dissipada ou absorvida, é proporcional à corrente elétrica aplicada.

Figura 2 - Pastilhas de Peltier

Fonte: <https://www.hperobotica.com.br/pd-87ed11-pastilha-peltier-tec-12710-12v-10a.html>

De modo concorrente, ao utilizar diferença de temperatura nas faces da Célula de Peltier, é possível gerar potência elétrica em seus terminais, convertendo a Célula de Peltier em um Gerador Termoelétrico (ou *Thermoelectric Generator* – TEG). Esse funcionamento do Módulo de Peltier como TEG pode ser descrito pelo efeito Seebeck (RAMADASS e CHANDRAKASAN, 2011).

Assim como as células fotovoltaicas, os dispositivos termoelétricos (Figura 3) são formados por semicondutores de estado sólido, aqui, denominados termopares do tipo $-n$ e do tipo $-p$, conectados em série eletricamente e conectados em paralelo termicamente. Estes, dispostos entre superfícies de cerâmica, são bons condutores de calor, na medida em que possuem alta resistência elétrica (BOBEAN e PAVEL, 2013).

Figura 3 - Características físicas de um TEG

Fonte: RAMANDASS e CHANDRAKASAN, 2011

Sustentado pela conversão termoelétrica e pela dissipação de calor existente na superfície oposta dos painéis solares, este trabalho de conclusão de curso traz como proposta, a avaliação na geração de energia elétrica pelos geradores

termoelétricos, a partir da temperatura dissipada, ou seja, da temperatura na superfície oposta à incidente solar de um painel solar conhecido. Como pode ser observado na Figura 3, o processo de conversão termoelétrico no TEG ocorre quando uma de suas faces de cerâmica absorve calor. Este, flui de forma homogênea através dos semicondutores, sendo o fluxo de calor direcionado até a outra superfície do TEG, onde o calor é rejeitado. Esse processo, cria uma diferença de temperatura entre as superfícies, denominadas genericamente de temperatura quente (T_{hot}) e temperatura fria (T_{cold}), para as faces que absorve e rejeita o calor, respectivamente. Essa diferença de temperatura gera energia elétrica nos terminais do TEG, pondo em prática, o efeito Seebeck.

A partir do cenário apresentado, este TCC irá analisar a potência fornecida por um TEG a partir da temperatura dissipada pelos painéis fotovoltaicos de um sistema de conversão solar conhecido. Para isso, o sistema fotovoltaico alvo, será o sistema em funcionamento no estacionamento da entrada principal do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus João Pessoa, onde foram feitas diversas medições de temperatura nas faces opostas à incidente pela luz solar, isto, a partir de um visor termoelétrico. Após as medições, foi feita a média das temperaturas, que é aplicada em laboratório, na superfície do TEG. Por fim, são feitas as medições de potência no TEG. Estas, a partir de cálculos de corrente e tensão. Para isso, recorre-se aos conceitos de circuitos equivalentes de Norton e de Thévenin, além da aplicação de um resistor *shunt* para a medição de corrente. Todas as medições feitas em laboratório, foram feitas com o auxílio de uma placa de Arduino Uno.

1.1 MOTIVAÇÃO

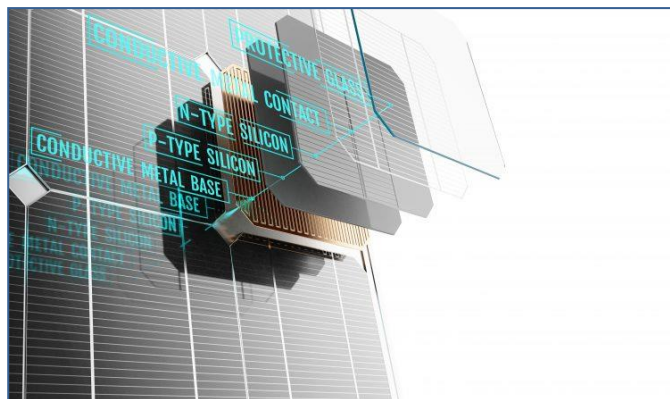
A principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho reside na observação da relação na geração de energia elétrica dos painéis fotovoltaicos e a energia dissipada em forma de calor. Como citado em diversos artigos, além de ser conhecimento de domínio público e, portanto, seja esta informação extensamente utilizada nos cálculos para a instalação de painéis fotovoltaicos, a eficiência na conversão solar em energia elétrica é menor que 30%, embora nos últimos anos tenha havido uma crescente dedicação nos estudos dos materiais semicondutores que compõe as células fotovoltaicas. No trabalho de GREEN *et al* (2009) e

SOLSTAR (2021), são citadas eficiências em intervalos entre 22,3% e 26,7%, para ser mais preciso. Assim, na conversão fotoelétrica supõe-se perda estimada maior que 70%, sendo grande parte da perda por não aproveitamento total dos raios solares, que se dissipam em calor.

Dentro do contexto de dissipação de calor, e sabendo que os painéis fotovoltaicos são formados pela união de células fotovoltaicas, em série ou em paralelo, com 36, 54 e até 60 células, gerando tensões DC na ordem de 12 Volts, como citado em JUNIOR e BAGNARA (2016) observa-se a possibilidade do aproveitamento do calor sobre células termoelétricas e, caso haja relevância nessa conversão, sugerem-se estudos mais elaborados na associação elétrica das células termoelétricas, como empregado nas células fotovoltaicas.

Como descrevem JUNIOR e BAGNARA (2016), a célula fotovoltaica é o elemento essencial na conversão solar em energia elétrica e cada célula individualmente, ocupa área de 100 mm² e podem gerar potência em um intervalo da ordem de 500 mW a 1 W. As células fotovoltaicas, vistas na Figura 4 com destaque, são associadas, e formam os painéis solares.

Figura 4 – Célula Fotovoltaica



Fonte: <https://blog.bluesol.com.br/celula-solar-em-carro-eletrico-da-audi/>

Por fim, no trabalho de VERAS *et al* (2015) um gerador termoelétrico é submetido a ciclos térmicos controlados, em laboratório, para avaliar a degradação da pastilha geradora. Neste trabalho, o TEG é submetido a um controle de variação de temperatura ΔT , uma vez em que o controle de temperatura é feito por meio de um sistema controlado por PID (Proporcional, Integral e Derivativo). Não obstante, neste trabalho, a proposta é avaliar o impacto da incidência de calor no TEG sob a

uma temperatura fixa. Esta, simulada em laboratório, com base nas condições de temperaturas reais de um sistema fotovoltaico conhecido.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho possui como objetivo principal uma análise da potência elétrica na conversão termoelétrica ao aproveitar a dissipação de calor de painéis fotovoltaicos conhecidos. Assim, como objetivos específicos, este trabalho deve:

- Coletar as medidas de temperatura na superfície não incidente solar dos painéis solares do IFPB no horário com maior incidência solar;
- Montar em laboratório um sistema capaz de aquecer o gerador termoelétrico;
- Montar um circuito para medição de corrente e de tensão do gerador termoelétrico;
- Verificar a intensidade da potência gerada;
- Analisar os resultados e comparar com a potência média das células fotovoltaicas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No desenvolvimento deste trabalho, no Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica necessária a compreensão do trabalho. No Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento do projeto, com análise das medidas de temperaturas coletadas, montagem de circuitos e dados coletados para conclusão do estudo. No Capítulo 4 são abordados os métodos de medição e os cálculos e, por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões, as considerações finais e proposta para pesquisas posteriores.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A eficiência na conversão termoelétrica é intrínseca dependente dos materiais semicondutores que formam os TEGs, como explica HATZIKRANIOTIS *et al.* (2010). Isso ocorre na medida em que os efeitos termoelétricos geram um fluxo de portadores elétricos (corrente elétrica), em função da variação de temperatura. Desse modo, compreender os principais parâmetros que fundamentam a conversão termoelétrica, além de características básicas dos TEGs, é imprescindível e, para tanto, são trazidos à luz tais informações, como segue.

2.1 ENERGIA INTERNA

O primeiro parâmetro observado sobre conversão termoelétrica é a relação entre as atrações intermoleculares, movimentos de rotação, translação e vibração das moléculas. Este, definido como energia interna (ΔU), é calculado levando em consideração o calor Q trocado pelo sistema com o meio ambiente e o trabalho realizado pelo/sobre o sistema, como preconiza HALLIDAY e RESNICK (2009), ao descrever o princípio da conservação de energia (primeira Lei da Termodinâmica).

Uma vez que o trabalho pelo/sobre um determinado sistema é, por definição, produção de movimento, observa-se que os TEGs não executam trabalho, uma vez que não possui partes mecânicas e, portanto, partes móveis. Assim, a variação de energia interna em TEGs resume-se ao calor trocado com o meio ambiente apenas.

2.2 RESISTÊNCIAS TÉRMICA E ELÉTRICA

Segundo BARAKO (2012) as resistências térmica e elétrica são características intrínsecas em um material. Estas, descrevem as condições de condução, em que a resistência térmica diz respeito a boa ou má transferência de calor, e a resistência elétrica diz respeito a capacidade de condução elétrica, em que a transferência de elétrons é alta ou baixa. No que diz respeito as características térmicas, os métodos utilizados para sua estimativa são complexos, com ensaios específicos em laboratório para estudos em materiais. Não obstante, as práticas feitas nos ensaios deste trabalho possibilitam a estimativa da resistência elétrica

interna (R_{in}) do gerador termoelétrico. No tópico deste trabalho que trata sobre a implementação experimental, os métodos e cálculos serão bem descritos.

A partir da estimativa da resistência elétrica, é possível estimar a resistividade do material semicondutor, uma vez que são informações adicionais dadas pelo fabricante, de comprimento (L) e de área da seção transversal (A) dos semicondutores, pela 2ª Lei de Ohm como descrevem (HALLIDAY e RESNICK, 2009) e (YATIM, 2012). Assim, tem-se que

$$\rho = R_{in} \frac{L}{A} \quad (1)$$

em que ρ é a resistividade elétrica e R_{in} é a resistência elétrica interna do TEG.

2.3 EFEITO SEEBECK

Nos TEGs, o efeito Seebeck pode ser observado quando há diferença de temperatura entre suas superfícies. No trabalho de BOBEAN e PAVEL (2013) são citados T_H e T_C para representação das temperaturas nas superfícies do TEG, em que, T_H representa a superfície de maior temperatura e T_C representa a superfície de menor temperatura ($T_H > T_C$). Uma vez em que as superfícies do TEG são submetidas a diferença de temperatura (ΔT), seus terminais produzem tensão. Assim, resumidamente, o efeito Seebeck produz tensão no momento em que o TEG é submetido a diferença de temperatura.

Segundo DZIURDZIA (2011), a equação que representa o efeito Seebeck é dada pela relação a seguir.

$$V_S = \alpha(T_h - T_c) \quad (2)$$

em que α é o coeficiente de Seebeck, intrínseco do material, cujo cálculo empírico é feito sob ensaios no material, em laboratório. Contudo, no trabalho de AHISKA e MAMUR (2013) são citadas estimativas, em que, para TEGs formados de materiais metálicos o coeficiente de Seebeck é da ordem de 1 microvolt por grau

Celsius ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$), enquanto que, para materiais semicondutores, o coeficiente de Seebeck é da ordem de 100 microvolts por grau Celsius ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$).

2.4 EFEITO PELTIER

O efeito Peltier é oposto ao efeito Seebeck. Assim, há uma aplicação de corrente aos terminais do módulo de Peltier que, ao percorrer o circuito formado por semicondutores em série, dentro do módulo, gerará uma diferença de temperatura em suas superfícies. Em resumo, uma das superfícies absorve calor T_H , e a outra dissipa calor T_C . O efeito Peltier pode ser quantificado pelo coeficiente de Peltier (π), que se relaciona com o coeficiente de Seebeck (BOBEAN e PAVEL, 2013). Matematicamente, o cálculo é feito pela equação

$$\pi = \alpha \cdot I \quad (3)$$

em que I é a intensidade de corrente no módulo de Peltier. Assim, a quantidade de calor absorvida/dissipada é proporcional a corrente elétrica aplicada. Ainda, caso haja inversão no sentido da corrente elétrica, as superfícies T_H e T_C também são invertidas.

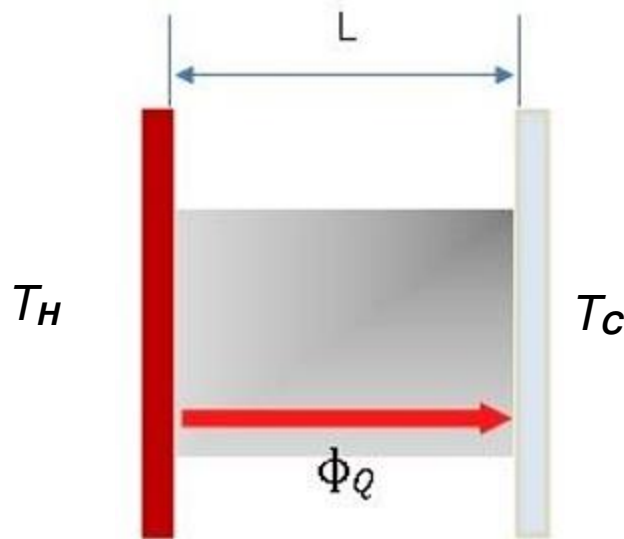
Embora não seja o enfoque deste trabalho, é importante destacar o efeito Peltier. Este, vastamente utilizado, é utilizado para garantir a temperatura alvo a que o TEG é submetido. Essa aplicação ficará clara no tópico em que há a descrição experimental do trabalho.

2.5 CONDUÇÃO TÉRMICA

A transferência de calor, de um ponto a outro, dentro de um material, é a condução térmica. Como descrito em LINEYKIN e YAAKOV (2007) e HALLIDAY e RESNICK (2009) a transferência/condução de calor ocorre do ponto de maior temperatura para o ponto de menor temperatura e, portanto, significa que deve haver uma diferença de temperatura para haver condução térmica, como preconiza a segunda Lei da Termodinâmica. Na prática, o fluxo de calor ocorre como visto na Figura 5, onde ϕ_Q é o fluxo de temperatura entre as superfícies T_H e T_C , a uma

distância L . Nos semicondutores, a variação de temperatura gera elétrons livres no material, fazendo surgir o efeito termoelétrico, que intensifica as lacunas e os portadores de cargas livres, no material que, por difusão, buscam equilíbrio (SUBRAMANIAN, 2006).

Figura 5 – Condução Térmica em um Material



Fonte: VERAS *et al* (2015)

Para a geração termoelétrica, garantir o fluxo térmico entre as superfícies de cerâmica do TEG é imprescindível e, embora a conversão termoelétrica seja determinada pela Lei de Fourier, em que as temperaturas nos dois pontos devem ser estacionárias, avaliar a conversão termoelétrica com a variação dessas temperaturas, em estados variáveis, pode auxiliar no fornecimento de energia elétrica a partir de fontes limpas de energia.

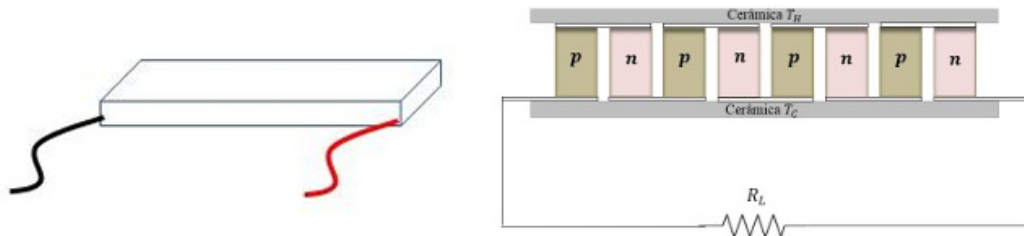
2.6 GERADOR TERMOELÉTRICO

Em 1821, o efeito termoelétrico foi observado em termopares pela primeira vez, por J. Seebeck que utilizou dois tipos de metais diferentes conectados entre si, por meio de junções. Segundo JAVAN (2000) os materiais semicondutores também exibem os efeitos termoelétricos, além de apresentarem vantagens sobre os metais, tais como redução do efeito Joule e maior sensibilidade a variação de temperatura.

Na Figura 6 é possível verificar a estrutura de um gerador termoelétrico, formado por semicondutores de estado sólido, capazes de converter energia térmica

diretamente em energia elétrica, quando submetidos a uma diferença de temperatura (ISMAIL e AHMED, 2009).

Figura 6 – Gerador Termoelétrico (TEG)



Fonte: VERAS *et al* (2015)

O TEG é formado por N termopares semicondutores do tipo $-n$ e do tipo $-p$, conectado em série eletricamente e em paralelo termicamente, dispostos entre dois substratos de cerâmica, que são bons condutores de calor e oferecem alta resistência elétrica (LAIRD e LU, 2006), (ISMAIL e AHMED, 2009) e (DZIURDZIA, 2011). Além disso, os TEGs possuem algumas vantagens, como:

- i. Confiáveis e silenciosos, por não possuírem partes móveis;
- ii. Requerem pouca manutenção;
- iii. Possuem tamanhos e pesos reduzidos;
- iv. Operam em altas temperaturas;
- v. Possuem longo prazo de vida;
- vi. São adequados a aplicações de pequena escala ou aplicações remotas, típicas aplicações rurais onde o fornecimento de energia é limitado ou inexistente; e
- vii. São ecologicamente corretos.

A conversão termoelétrica é classificada como sendo uma técnica de colheita de energia, que coleta e armazena a energia desperdiçada pelo ambiente. Essa energia coletada é, em geral, utilizada para alimentar dispositivos eletrônicos de baixo consumo, geralmente, dispositivos móveis (HARB, 2011). Assim, os TEGs são classificados como coletores e conversores termoelétricos.

3 METODOLOGIA

Aqui, são apresentados os métodos empregados para avaliar a problemática proposta. Dentro desse contexto, são apresentados os dispositivos utilizados, as conexões desses dispositivos e os circuitos desenvolvidos, necessários à análise. Além disso, toda a metodologia a ordem cronológica das atividades realizadas.

3.1 TEMPERATURA EM PAINÉIS SOLARES

No desenvolvimento deste projeto, foi necessário definir um sistema fotovoltaico em funcionamento, conhecido e de fácil acesso. Para tanto, escolheu-se os painéis solares instalados no estacionamento do IFPB, Campus João Pessoa. Estes, como mostra a Figura 7, são painéis solares que atendem aos requisitos.

Figura 7 – Painéis Solares Conhecidos



Fonte: O Autor

Uma vez que os painéis solares do sistema estão suspensos, torna-se viável determinar a temperatura dissipada pela face não incidente dos painéis solares, sem a necessidade de acessar telhados ou outra estrutura mais restrita. Assim, embaixo dos painéis, é possível verificar a disposição das placas fotovoltaicas, eletricamente, em paralelo. Essa visualização é possível, dada a montagem das placas e as conexões elétricas entre elas, que são facilmente visualizadas, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Visualização das Conexões Elétricas dos Painéis



Fonte: O Autor

Após a inspeção visual para avaliar a possibilidade do acesso à superfície dos painéis solares, oposta à incidente, utiliza-se um termovisor da marca Fluke, modelo Ti300, como mostrado na Figura 9, para verificar, em diversos pontos do sistema fotovoltaico, a temperatura média dissipada pelos painéis solares.

Figura 9 – Termovisor Fluke, modelo Ti300

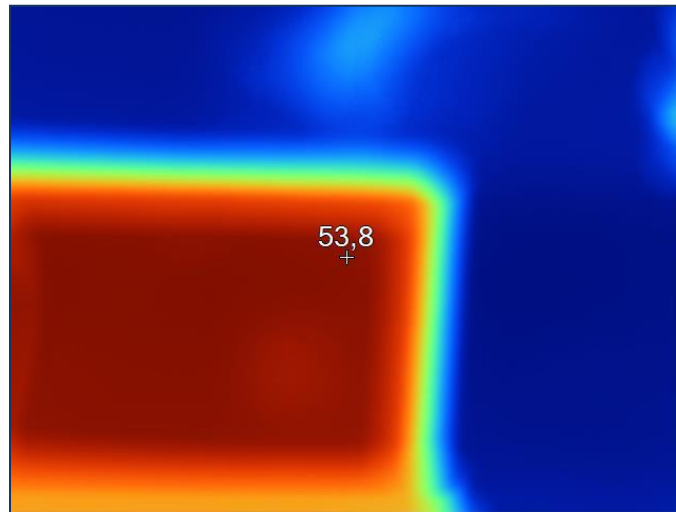


Fonte: <https://www.raisa.com.br/termovisor-20c-a-1200c-9hz-fluke-ti400>

Com o termovisor, foi possível verificar, em diversos pontos do sistema fotovoltaico em questão, qual a temperatura média dissipada na superfície oposta às placas fotovoltaicas. Para isso, 50 (cinquenta) fotos térmicas foram tiradas aproximadamente ao meio dia. Nas fotos, como mostrado a título de exemplo na Figura 10, é possível verificar a temperatura naquele momento. Além disso,

identificam-se os limites das placas solares pelas cores mais vermelhas, que representam as altas temperaturas, em contraste com o azul do meio ambiente.

Figura 10 – Foto Térmica do Paine Solar



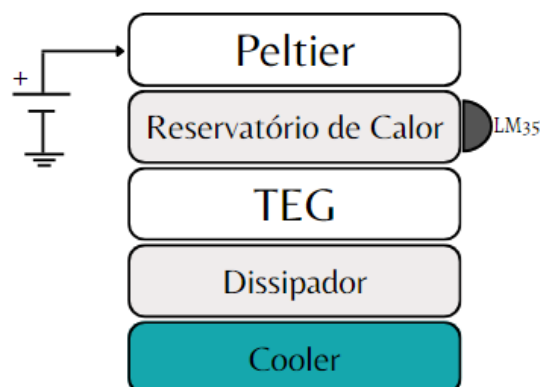
Fonte: O Autor

Ao finalizar as fotos feitas pelo termovisor, é feita a média das temperaturas de todos os pontos medidos. Essa temperatura média, de aproximadamente 52 °C, será a temperatura de referência, aplicada em laboratório, no gerador termoelétrico.

3.2 PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Para aplicar a temperatura de referência calculada a partir das medidas feitas pelo termovisor, a plataforma experimental proposta que deve ser montada, está representada na Figura 11.

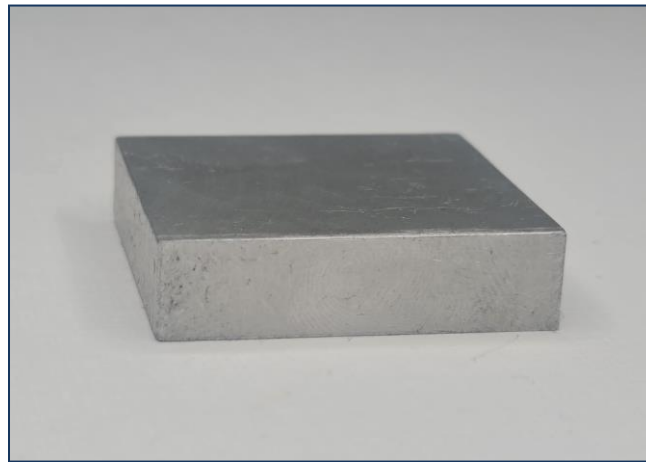
Figura 11 – Representação da Plataforma Experimental



Fonte: O Autor

A representação da plataforma experimental enfatiza a montagem em blocos dos componentes que irão compor o experimento. De cima para baixo, o primeiro bloco é um módulo de Peltier, que será utilizado para gerar a temperatura de referência, já calculada anteriormente. Para isso, o módulo será submetido ao efeito Peltier, a partir de uma fonte de bancada. O bloco seguinte, é uma peça de metal, mostrada na Figura 12, feita de prata, que possui excelente condutividade térmica (426 J/s.m.K). Esse bloco foi confeccionado especificamente para esse experimento, e suas medidas são de 40 mm x 40 mm x 10 mm (Lado x Lado x Altura).

Figura 12 – Reservatório de Calor de Prata

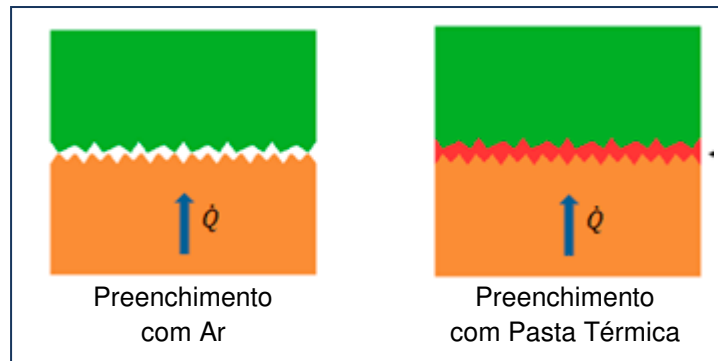


Fonte: O Autor

A finalidade do bloco de prata, é servir como um reservatório de calor. Assim, a variação de temperatura, gerada pela placa de Peltier, que é brusca com a variação de corrente, poderá ser 'sentida' aos poucos. Além do mais, sabendo que a temperatura gerada na face do bloco é homogênea, a temperatura poderá ser verificada pelo sensor LM35 conectado a parede lateral do bloco, como mostrado na representação experimental.

Para garantir o fluxo de calor entre as superfícies dos componentes, é adicionada pasta térmica. Como é possível verificar na Figura 13, a pasta térmica preenche os vazios que existem nas superfícies. Na imagem do bloco, os vazios na superfície são mais evidentes. Nos módulos de Peltier, esses espaços vazios não são visíveis tão facilmente, contudo, sabe-se que todas as superfícies são porosas e, portanto, possuem lacunas. Esse preenchimento é indispensável, visto que os espaços vazios são preenchidos pelo ar, que possui baixíssima condutividade térmica, na ordem de 0,03 J/s.m.K.

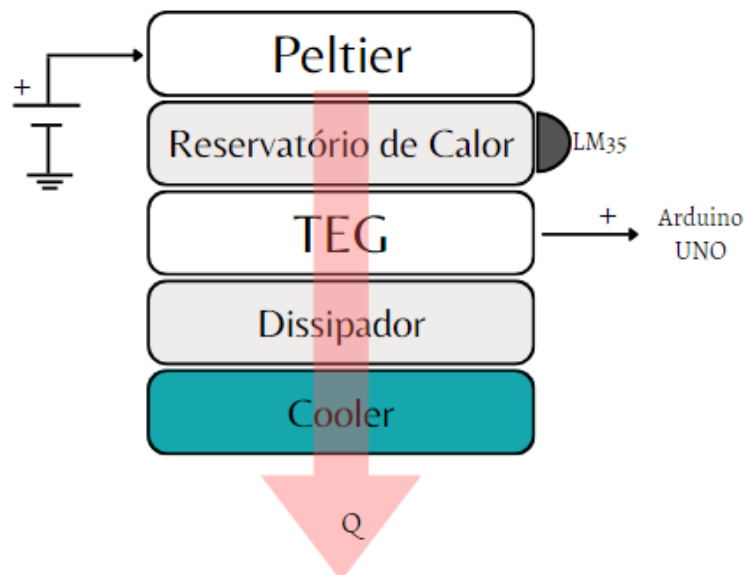
Figura 13 – Preenchimento de Espaços com Pasta Térmica



Fonte: <https://adrenaline.com.br/artigos/v/62770/pasta-termica-importa-como-coloco-arruinei-meu-pc-colocando-muito>

Após o reservatório de calor, o próximo bloco é o gerador termoelétrico, que será o foco de nossa análise. Os próximos blocos, formados pelo dissipador e pelo *cooler*, auxiliam no fluxo de calor. Em laboratório, esses elementos são necessários para garantir a temperatura de referência. Assim, considerando a plataforma experimental em funcionamento, levando em consideração o fluxo de calor, ela pode ser novamente representada pela Figura 14.

Figura 14 – Plataforma Experimental com Fluxo de Calor

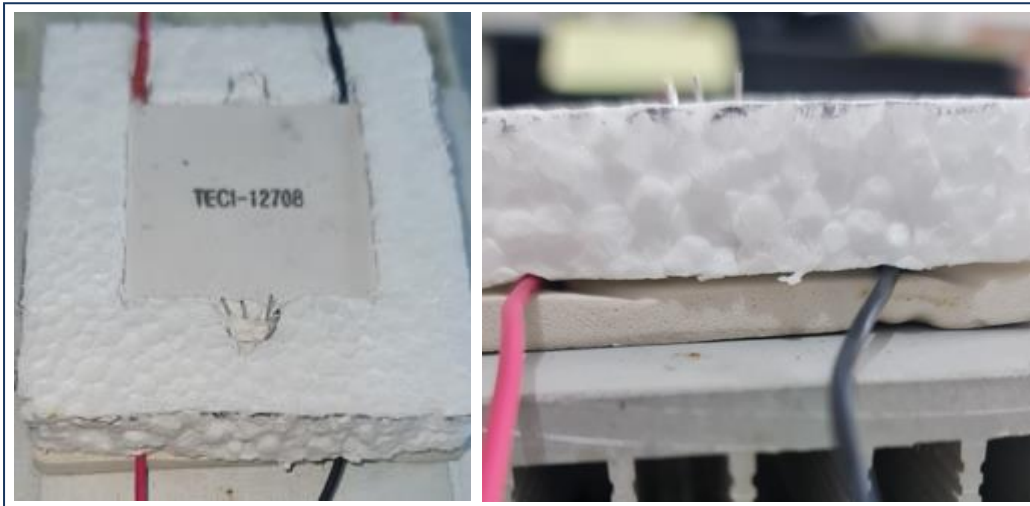


Fonte: O Autor

Na montagem da plataforma, além da utilização da pasta térmica, é preciso garantir que não haja interferência térmica do meio ambiente e, portanto, é feito um isolamento térmico entre a face do módulo de Peltier e o reservatório de calor, e

entre o reservatório de calor e o TEG. Além disso, o sensor de temperatura, LM35, está confinado, para sofrer variações de medição. Esse isolamento térmico pode ser visto na Figura 15, que apresenta duas perspectivas, vista de cima e vista lateral do isolamento térmico.

Figura 15 – Isolamento Térmico



Fonte: O Autor

Após o isolamento térmico, as conexões entre o LM35, Arduino e Computador são feitas. Além disso, o bloco do módulo Peltier é conectado a fonte de bancada, e um *sketch* é desenvolvido para efetuar as medições de temperatura.

3.3 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA

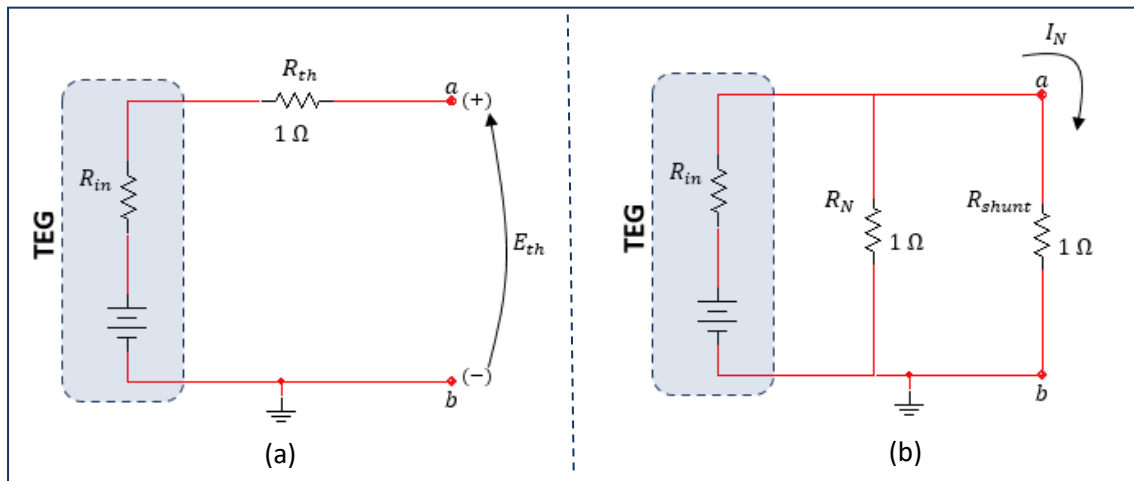
A medição de potência do gerador é feita indiretamente, ou seja, a potência é calculada a partir das medidas de tensão e de corrente. Estas, assim como as medições de temperatura, utilizam o auxílio do Arduino UNO. Para isso, um *sketch* específico é desenvolvido. Dito isto, após as medidas de tensão e corrente, é feito o cálculo de potência elétrica, com base na equação

$$P = V \cdot I \quad (4)$$

em que V é a tensão elétrica e I é a corrente elétrica, medidas.

Para medição da tensão elétrica, é montado o circuito da Figura 16a. Para tanto, a tensão é medida diretamente entre os terminais *a* e *b*, uma vez que a tensão medida é na casa dos miliwatts (mW) e a placa do Arduino UNO faz medições de tensão entre zero volts e cinco volts. Como preconiza o teorema de Thévenin, descrito no Anexo II deste trabalho, a tensão medida é a mesma gerada pelo TEG, e pode ser definida como sendo a tensão de Thévenin (E_{th}).

Figura 16 – Circuitos de Norton e de Thévenin



Fonte: O Autor

Como descrito no parágrafo anterior, a placa de Arduino UNO não executa medições diretas de corrente elétrica, contudo, é possível empregar uma técnica para a medição de corrente elétrica de forma indireta. Para tanto, utiliza-se um resistor de derivação (*shunt*), que auxiliará na conversão da tensão elétrica medida. A fim de deixar clara a definição da técnica utilizada na utilização de um resistor *shunt*, sua descrição é apresentada conforme o Anexo I deste trabalho.

Após a conexão do resistor *shunt*, como visto no circuito da Figura 16b, as medições de corrente elétrica, feitas pelo Arduino UNO serão definidas a partir da relação dada pela primeira Lei de Ohm. Isso só é possível, porque o resistor *shunt* é de 1Ω, com precisão de 99,99%. Assim, na medição da tensão, a corrente elétrica é dada pela relação

$$V = (1).I \quad (5)$$

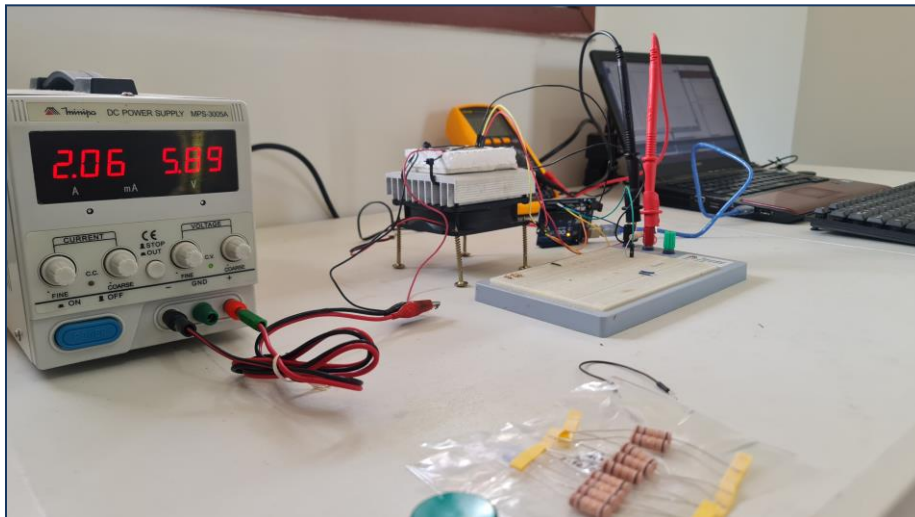
em que a corrente elétrica é igual a tensão elétrica medida sobre o resistor *shunt*.

Após as medições de tensão e de corrente e, sabendo que os teoremas de Thévenin e de Norton possuem relação matemática, a potência média gerada pelo TEG é calculada. Esta, será apresentada com mais detalhes no próximo tópico, que apresentará os valores das medições e os cálculos.

Sejam as fontes reais, fontes não ideais, nos circuitos da Figura 16 observa-se relevância em mensurar a resistência interna (R_{in}) do TEG. Isso é possível, graças as relações matemáticas entre os teoremas de Thévenin e Norton, como será apresentado do próximo tópico.

Feitas todas as observações necessárias, a implementação da bancada com montagem de todo o experimento é apresentada na Figura 17. Nesta, é possível observar os componentes e instrumentos utilizados.

Figura 17 – Bancada Experimental



Fonte: O Autor

Da esquerda para a direita da Figura 17, é possível identificar uma fonte de bancada, que aplica a corrente a pastilha de Peltier. Conectada termicamente à pastilha, é possível observar a plataforma experimental. A frente da plataforma experimental, uma matriz de contatos (*proto-board*) é utilizada para montar os circuitos da Figura 16. Em seguida, é possível observar a placa de Arduino UNO, conectada a um computador do tipo *notebook*, onde estão implementados os *sketches* e são verificadas as medições, de temperatura, tensão elétrica e corrente elétrica.

4 MEDIÇÕES E CÁLCULOS

Neste tópico, são apresentadas as duas etapas do experimento: as medições gerais (temperatura, tensão elétrica e corrente elétrica) e os cálculos (potência elétrica e resistência interna do TEG) de modo que possam esclarecer a hipótese proposta neste trabalho.

Dentro desse contexto, é possível classificar este tópico como segue: o Tópico 4.1 trata das medições de temperatura e fixação do ponto de referência, já definido anteriormente; para o Tópico 4.2 são feitas as medições das tensões elétricas de Thévenin (E_{th}), quando o TEG está submetido à temperatura referencial; no Tópico 4.3 as tratativas se referem às medições de corrente elétrica, por meio da resistência *shunt* e aplicação da Lei de Ohm sobre ele. A corrente elétrica medida nesta etapa, refere-se a corrente de Norton (I_N); e, por fim, o Tópico 4.4 trata as medições por meio de cálculos, para chegar a potência elétrica fornecida pelo TEG, uma vez submetido a temperatura referencial, além de apresentar os cálculos para obtenção da resistência interna (R_{in}) do gerador termoelétrico.

4.1 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

No tópico 3.1 deste texto são apresentadas as argumentações para obtenção da temperatura de referência a que o TEG é submetido. Naquele momento, são obtidas várias fotos por um termovisor, em vários pontos das superfícies opostas as incidentes, dos painéis solares supra citados. A partir das medições calculou-se o valor aproximado para uma temperatura referencial, a partir da média das medidas, ao que se chega em 52 °C. Esta temperatura média é estabelecida na bancada, em valor aproximado, por meio de variação de corrente sobre a pastilha cujo efeito Peltier é aplicado.

O componente utilizado para variação de corrente na pastilha é uma fonte de bancada Minipa MPS-3005A, apresentada na Figura 18. Para tanto, a corrente elétrica máxima que pode ser fornecida pela fonte, é de até 5 Ampères e o seu ajuste pode ser feito por meio de *bornes* variáveis, como mostra a figura. As conexões com a placa de Peltier são feitas por meio de conexões do tipo jacaré, como pode ser verificado na Figura 17 da Bancada Experimental.

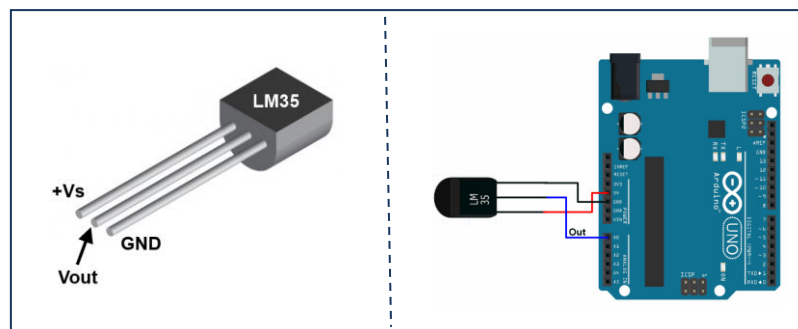
Figura 18 – Fonte de Bancada Minipa MPS3005A



Fonte: <https://www.cofermeta.com.br/medicao/testadores-eletricos/fonte-de-alimentacao-digital-simples-dc-30v-5a->

Na medida em que a corrente é ajustada manualmente, um *sketch* para medição de temperatura é executado na placa Arduino UNO. As medições feitas por esta placa verificam a temperatura por meio de um sensor de temperatura LM35, visto na Figura 19a. Na Figura 19b, é possível verificar as conexões dos terminais do sensor LM35 ao Arduino UNO.

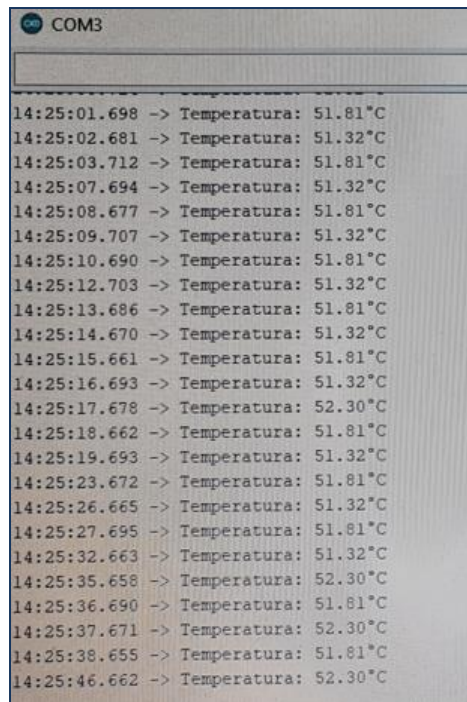
Figura 19 – Sensor de Temperatura LM35



Fonte: <https://www.electronicwings.com/arduino/lm35-interfacing-with-arduino-uno>

O *sketch* verifica a temperatura instantânea, que varia conforme a intensidade da corrente elétrica e, após vários ajustes, a temperatura média mais próxima do valor de referência é obtida. Na Figura 20, é possível verificar uma janela de medições de temperatura. Estas medições de temperatura foram feitas por aproximadamente 20 (vinte) minutos. Esse tempo garantiu estabilidade na temperatura aproximada desejada, uma vez que há algum tempo a média da temperatura referencial se mantinha constante. Dito isto, a intensidade de corrente elétrica é fixada para as medições de tensão elétrica e corrente elétrica.

Figura 20 – Medições de Temperatura



Timestamp	Temperature (°C)
14:25:01.698	51.81
14:25:02.681	51.32
14:25:03.712	51.81
14:25:07.694	51.32
14:25:08.677	51.81
14:25:09.707	51.32
14:25:10.690	51.81
14:25:12.703	51.32
14:25:13.686	51.81
14:25:14.670	51.32
14:25:15.661	51.81
14:25:16.693	51.32
14:25:17.678	52.30
14:25:18.662	51.81
14:25:19.693	51.32
14:25:23.672	51.81
14:25:26.665	51.32
14:25:27.695	51.81
14:25:32.663	51.32
14:25:35.658	52.30
14:25:36.690	51.81
14:25:37.671	52.30
14:25:38.655	51.81
14:25:46.662	52.30

Fonte: O Autor

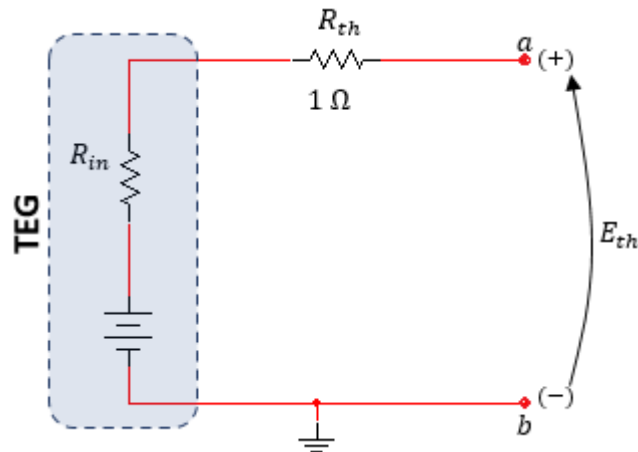
Seja a temperatura referencial igual a 52 °C, e a temperatura média obtida nas medições de 52,263 °C, considera-se a margem de erro de 0,263 °C aceitável, dado o baixo impacto na conversão termoelétrica. Assim, uma vez submetido a temperatura próxima da referência, o TEG foi avaliado, primeiramente a partir da medição da tensão de Thévenin (E_{th}), como apresenta o tópico a seguir.

4.2 MEDIÇÕES DE TENSÃO

Para medir a tensão do TEG, o circuito mostrado na Figura 21 é montado em uma *protoboard*. Na figura, é apresentada a estrutura interna do TEG, constando de fonte de tensão e uma resistência interna (R_{in}), intrínseca das fontes reais. Além disso, em série com o TEG, é posta uma resistência, ora denominada de resistência de Thévenin (R_{th}), de valor conhecido igual a 1 Ω . Por fim, o circuito possui os terminais *a* e *b*, onde uma carga (R_L) qualquer pode ser conectada.

A proposta do circuito é a conexão dos terminais *a* e *b* são aos pinos analógico A1 e ao GND do Arduino UNO, respectivamente. A tensão nos terminais é verificada antes das conexões com o Arduino, e a magnitude medida não ultrapassa os milivolts (mV), garantindo a conexão direta entre os terminais *a* e *b*, e o Arduino UNO.

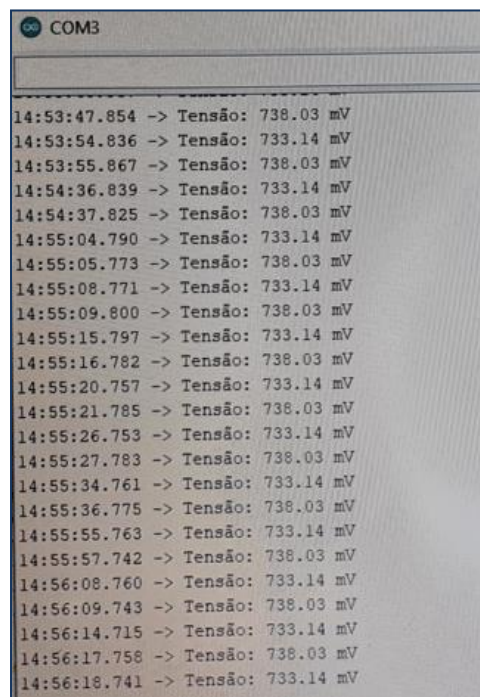
Figura 21 – Tensão de Thévenin



Fonte: O Autor

Submetido a temperatura de referência, e garantindo não haver incoerência nas medições e limites da placa Arduino UNO, são iniciadas as medições de tensão entre os terminais *a* e *b*. Seguindo o tempo de exposição de 20 (vinte) minutos, definido pela estabilidade da temperatura, são feitas as medições, como visto na Figura 22.

Figura 22 – Medições de Tensão



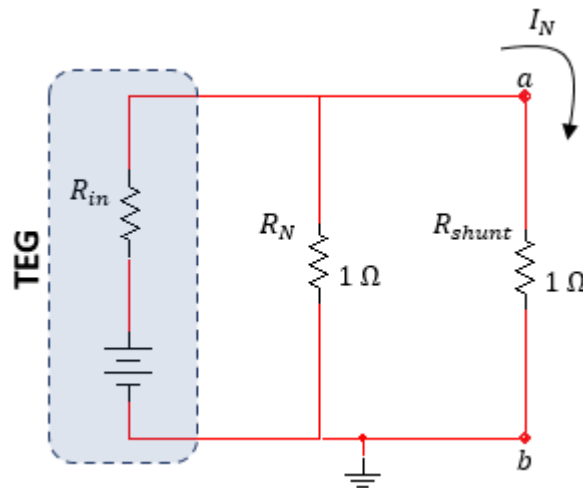
Fonte: O Autor

Assim como feito com a temperatura, tem-se o cálculo médio da tensão elétrica de Thévenin (E_{th}) gerado pelo TEG. Esta, é de aproximadamente 740,2 mV, e será utilizada para o cálculo da potência elétrica gerada pelo TEG.

4.3 MEDIÇÕES DE CORRENTE

Para calcular a corrente elétrica, o circuito da Figura 23 é montado em uma *protoboard*. Para isso, observa-se um circuito de Norton, cuja resistência (R_N) é a mesma resistência de Thévenin e, portanto, são resistências iguais ($R_N=R_{th}$). Essa relação, garante uma relação matemática entre os teoremas de Thévenin e de Norton, como visto nos Anexo I e Anexo II, deste trabalho. Dito isto, é possível observar ainda que os terminais *a* e *b* são conectados por um fio (curto-circuitados) e um resistor *shunt* é conectado para medição de tensão elétrica. Tal finalidade é a conversão de tensão elétrica em corrente elétrica, como explicado anteriormente, garantida pela Lei de Ohm.

Figura 23 – Corrente de Norton



Fonte: O Autor

A título de informação, seja a Lei de Ohm dada por $V = R \cdot I$, em que V é a tensão medida, I é a corrente e R é o valor de R_{shunt} , então, tem-se que $V = I$. Isso significa dizer que a intensidade do fluxo de corrente no circuito é igual as medições de tensão feitas sobre o resistor R_{shunt} e, por fim, são apresentadas na Figura 24.

Para garantir a precisão na medição de corrente, foi buscado no mercado um resistor com 99,99% de precisão, para utilização como resistor *shunt*.

Figura 24 – Medições de Corrente

Timestamp	Current (mA)
15:34:49.798	205.28
15:34:50.780	210.17
15:34:52.797	205.28
15:34:53.779	210.17
15:34:58.788	205.28
15:34:59.816	210.17
15:35:02.812	205.28
15:35:03.795	210.17
15:35:08.803	205.28
15:35:09.786	210.17
15:35:16.769	205.28
15:35:19.763	210.17
15:35:20.798	205.28
15:35:22.765	210.17
15:35:23.800	205.28
15:35:24.785	210.17
15:35:26.798	205.28
15:35:29.796	210.17
15:35:30.780	205.28
15:35:32.795	210.17
15:35:33.782	205.28

Fonte: O Autor

Assim como feito com a temperatura e a tensão elétrica, tem-se o cálculo médio da corrente elétrica de Norton (I_N) gerado pelo TEG. Esta, é de aproximadamente 203,4 mA e, assim como a tensão, é utilizada para o cálculo da potência elétrica gerada pelo TEG.

4.4 CÁLCULOS

De posse dos valores médios de tensão elétrica e de corrente elétrica, é possível executar o cálculo de potência elétrica gerada na conversão termoelétrica pelo TEG, a partir da equação

$$P = V \cdot I \quad (6)$$

em que V é a tensão elétrica média e I é a corrente elétrica média, medidas.

Assim, substituindo os valores medidos de tensão elétrica e corrente elétrica na equação 6, tem-se a relação a seguir.

$$P = (740,2mV) * (203,4mA)$$

em que

$$P = 150,56 \text{ mW}$$

Com os dados das medições, é possível ainda verificar a resistência interna do TEG, quando submetido a temperatura de 52 °C. Isso é possível dada a relação matemática entre os circuitos de Thévenin e de Norton. Dito isto, ao analisar as relações e os valores medidos, pode-se calcular a resistência interna, partindo da resistência total no circuito, como é feito a seguir.

$$R_{eq} = \frac{E_{th}}{I_N} = \frac{740,2mV}{203,4mA} = 3,64 \Omega$$

Dada a simplicidade do circuito estudado, em que as resistências, interna (R_{in}) e *shunt* (R_{shunt}) estão conectadas em série e, sabendo que $R_{shunt} = 1 \Omega$, então, a resistência interna do TEG pode ser calculada como segue, por

$$R_{in} = 3,64 - 1 = 2,64 \Omega$$

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou a potência gerada por um TEG, uma vez que submetido a uma temperatura conhecida, no caso, a temperatura dissipada pela superfície não incidente de painéis solares em pleno funcionamento. A principal motivação do experimento reside na busca incessante por fontes de energias alternativas e limpas. Nesse caso específico, avaliar um dispositivo vastamente utilizado, contudo, não com efeito de geração de energia elétrica e sim, a partir da energia elétrica. Tal dispositivo é o módulo de Peltier.

Nos resultados finais, a potência gerada pela célula de Peltier avaliada está de acordo com o nível de potência esperado e, quando comparada as atuais células fotovoltaicas, observa-se relevância. Estas, descritas e estudadas mais exaustivamente, produzem potência média na casa dos miliwatts, sendo a célula de Peltier também em níveis aproximados de potência, quando experimentadas neste trabalho, podem despertar estudos mais aprofundados na área.

Uma característica evidente dos TEGs são a baixa resistência interna, que talvez possam indicar a possibilidade de geração de maior potência do que a que foi encontrada neste trabalho, desde que sejam avaliadas outras condições mais ideais de transferência de calor.

Por fim, foi possível avaliar que há grande dificuldade em experimentos que envolvem transferência de calor. Muitos são os parâmetros que podem afetar os resultados. Desde brisas de ar até uma isolamento térmica mal feita.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, a avaliação feita sobre o TEG levou em consideração apenas a temperatura incidente e, portanto, não foi verificada a diferença de temperatura entre as suas faces. Além do mais, o controle de temperatura manual pode fornecer imprecisão, dado o tempo de resposta no ajuste fino da temperatura de referência. Ainda, a dissipação de calor foi considerada apenas no sentido descendente e não no sentido oposto também. Assim, com base nessas observações, podem ser sugeridas algumas modificações no experimento, tais como:

- Verificar a diferença de temperatura ΔT entre as faces do TEG;
- Implementar um sistema de controle de temperatura, com tempo de resposta ótimo;
- Em laboratório, verificar a importância do auxílio de dissipadores extras, para um eventual sentido ascendente na dissipação de calor.

REFERÊNCIAS

- AHISKA, R.; MAMUR, H. Design and implementation of a new portable thermoelectric generator for low geothermal temperatures. **IET renew. Power gener.**, v. 7, p. 700-706, Maio 2013.
- BAROUDI, U. et al. **Radio Frequency Energy Harvesting Characterization: An Experimental Study.** IEEE 11th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications. Liverpool: [s.n.]. 2012. p. 1976-1981.
- BHUVANESWARI, P. T. V.; BALAKUMAR, V. V.; BALAMURALIDHAR, P. **Solar energy harvesting for wireless sensor networks.** In Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, 2009. CICSYN '09. [S.l.]: [s.n.]. 2009. p. 57-61.
- BOBEAN, C.; PAVEL, V. The Study and Modeling of a Thermoelectric Generator Module. **The 8th International Symposium on Advanced Topics in Electric Engineering**, p. 1-4, Maio 2013.
- BOYLESTAD, R. L. **Introdução à Análise de Circuitos.** 12^a. ed. São Paulo: Pearson, v. 1, 2012.
- BRAGA, N. C. Instituto NCB - Newton C. Braga. **Newton C. Braga**, 2015. Disponível em: <<https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/matematica-na-eletronica/10906-calculando-shunts-m279.html>>. Acesso em: 3 Novembro 2022.
- DOS SANTOS, H. F. et al. Fabricação e Caracterização de um Minimódulo Fotovoltaico Monofacial com Célula de Silício Monocristalino. **IX Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Florianópolis, p. 1-8, maio 2022.
- DZIURDZIA, P. Modeling and Simulation of Thermoelectric Energy Harvesting Processes. **Sustainable Energy Harvesting Technologies – Past, Present and Future**, p. 109-128, 2011.
- HAEBERLE, F. et al. Estimativa da Temperatura do Módulo FV a Partir de Um Modelo de Balanço de Energia. **IX Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Florianópolis, 2022.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, J. W. **Fundamentos de Física.** Rio de Janeiro: LTC, v. 2, 2009.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, J. W. **Fundamentos de Física.** Rio de Janeiro: LTC, v. 3, 2009.
- HARB, A. Energy harvesting: State-of-the-art. **Renewable Energy**, v. 36, n. 10, p. 2641-2654, 2011.
- ISMAIL, B. I.; AHMED, W. H. Thermoelectric Power Generator Using Waste-Heat Energy as an Alternative Green Technology. **Recent Patents on Electrical Engineering**, v. 2, p. 27-39, 2009.
- JAVAN, H. OPTIMAL DESIGN OF THERMOELECTRIC GENERATOR, p. 345-348, 2000.
- LAIRD, I.; LU, D. D. C. SPICE Steady State Modelling of Thermoelectric Generators Involving The Thomson Effect, p. 1-6, 2006.
- LIMA, A. A. et al. Uma Revisão dos Princípios da Conversão Fotovoltaica de Energia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, Outubro 2020. ISSN 1806-1117.

OLIVEIRA, M. H. V. D. **Impacto de Microfissuras em Módulos Solares de Silício em Sistemas Fotovoltaicos**. Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, p. 78. 2021.

OTTMAN, G. K.; BHATT, A. C.; LESIEUTRE, G. A. Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply. **Power Electronics, IEEE Transactions on**, v. 17, n. 5, p. 669-676, Setembro 2002.

PORTAL SOLAR. Portal Solar. **Site do Portal Solar - Primeiro e Maior Portal de Energia Solar do Brasil**, 2014 - 2022. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/celula-fotovoltaica.html>>. Acesso em: 03 Outubro 2022.

RAMADASS, Y. K.; CHANDRAKASAN, A. P. A Battery-Less Thermoelectric Energy Harvesting Interface Circuito With 35 mV Startup Voltage. **IEEE Journal Of Solid-State Circuits**, v. 46, n. 1, p. 333-341, Janeiro 2011.

REDAÇÃO SOLSTAR. SOLSTAR. **Site da empresa SOLSTAR**, 2021. Disponível em: <<https://solstar.com.br/2021/06/01/energia-solar-no-brasil-mercado-que-mais-cresce-no-pais/>>. Acesso em: 27 Janeiro 2022.

ROSA, A. R. O. D.; GASPARIN, F. P. Panorama da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. VII, p. 140-147, Dezembro 2016. ISSN ISSN Digital - 2526-2831.

SILVA, G. V. et al. Estratégia de Controle Para Redução de Ondulação de Tensão em Inversores Fotovoltaicos Monofásicos de Dois Estágios. **IX Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Florianópolis, 2022.

VERAS, J. C. D. C. et al. An Automatic Thermal Cycling based Test Platform for Thermoelectric Generator Testing. **2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings**, Pisa, p. 1949-1953, Maio 2015. ISSN 978-1-4799-6114-6/1091-5281.

WU, T.; YANG, H.-C. RF energy harvesting with cooperative beam selection for wireless sensors. **Wireless Communications Letters**, v. 3, n. 6, p. 585-588, Dezembro 2014.

YATIM, N. M. **Development of "Open-Short Circuit" Dimensionless Figure-Of-Merit (ZT) Measurement Technique for Investigation of Thermoelements and Segmented Thermoelectric Structures**. Institute of Energy School of Engineering Cardiff University. Cardiff University. 2012.

ANEXOS

A fim de corroborar com o texto, nesta seção são apresentadas as fundamentações para implementação da técnica de resistor de derivação, do teorema de Thévenin e teorema de Norton.

ANEXO I – RESISTOR *SHUNT*

Por possuir valor baixo, segundo BRAGA (2015) o resistor de derivação (ou resistor *shunt*) é utilizado basicamente em duas aplicações: (1) conexão em paralelo com um amperímetro; ou (2) conexão em série com uma carga, cuja corrente deve ser medida.

Na primeira aplicação, a função do resistor de derivação é ampliar o fundo de escala de um, em geral, amperímetro. Como o próprio nome sugere, para esta aplicação, parte da corrente do circuito é derivada de modo a possibilitar medidas de correntes de maiores valores que as obtidas pelo fundo de escala do instrumento. Para esta aplicação, é necessário um cálculo um pouco mais elaborado do que na utilização a seguir, que é bem mais simples.

Na segunda aplicação, deseja-se medir a corrente de uma determinada carga e, portanto, a função do resistor de derivação é o cálculo da corrente que o atravessa. Esse resistor deve ser colocado em série com a carga que se deseja descobrir sua corrente e, em geral, para esse tipo de aplicação, o resistor de derivação deve ser preciso e igual a 1 (um) Ohm. Assim, é feita a medição da tensão sobre esse resistor que, pela Lei de Ohm é igual ao fluxo de corrente que o atravessa. Essa técnica é bastante utilizada, visto a maior facilidade de medição de tensão.

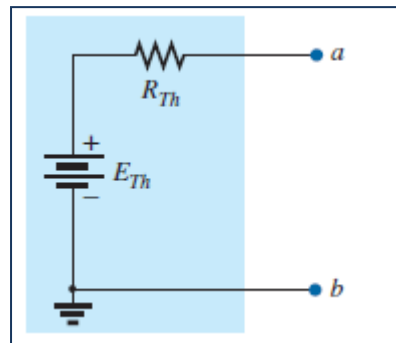
ANEXO II – TEOREMA DE THÉVENIN

O teorema de Thévenin pode ser aplicado a circuitos, de modo a reduzir sua complexidade. Assim, qualquer circuito de corrente contínua de dois terminais, pode ser reduzido a um circuito equivalente, que consiste de apenas uma fonte e um resistor em série.

O teorema de Thévenin afirma que o circuito equivalente de Thévenin fornecerá, independentemente do valor da carga acoplada ao circuito, a mesma tensão elétrica e a mesma corrente elétrica à carga.

A resistência de Thévenin R_{th} é a resistência equivalente às resistências do circuito complexo dado, e a tensão de Thévenin E_{th} é a tensão fornecida nos terminais do circuito equivalente, como visto na Figura 23.

Figura 25 – Equivalente de Thévenin



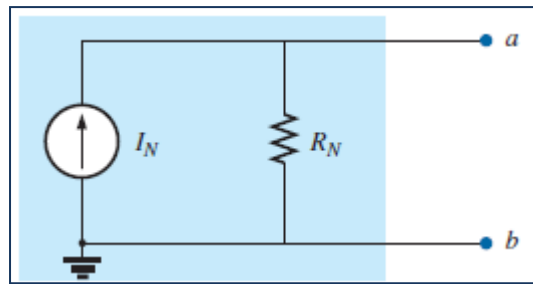
Fonte: BOYLESTAD (2012)

Por fim, se a tensão nos terminais a e b do circuito complexo que gerou o equivalente de Thévenin for medido por um voltímetro, o valor apresentado é o mesmo que E_{th} .

ANEXO III – TEOREMA DE NORTON

Com igual proposta que o teorema de Thévenin, o teorema de Norton é utilizado para simplificar circuitos mais complexos, contudo, o equivalente de Norton é um circuito com fonte de corrente I_N em paralelo com a resistência de Norton R_N . Assim, qualquer circuito de corrente contínua de dois terminais, pode ser reduzido a um circuito equivalente, que consiste de apenas uma fonte de corrente e um resistor em paralelo, como visto na Figura 24.

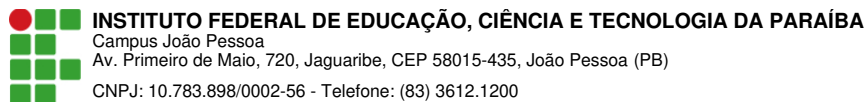
A resistência de Norton é calculada da mesma forma que a resistência de Thévenin e, portanto, pode-se concluir que ambas são iguais para o mesmo circuito. Assim, as resistências de Norton e de Thévenin se relacionam ($R_{th} = R_N$) e, ao calcular uma, conseqüentemente, já se determinou o valor da outra.

Figura 26 – Equivalente de Norton

Fonte: BOYLESTAD (2012)

Com base nos cálculos da resistência dos teoremas de Thévenin e Norton, é possível determinar a relação entre os dois circuitos e, portanto, um pode ser convertido no outro, apenas ao aplicar a Lei de Ohm na conversão.

Por fim, o cálculo de corrente nos terminais *a* e *b* por Norton deve ser o mesmo resultado para o cálculo feito no equivalente de Thévenin nos mesmos pontos e, do mesmo modo, o cálculo da tensão nos pontos *a* e *b* por Thévenin deve ser o mesmo resultado para o cálculo feito no equivalente de Norton.



Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)

Assunto: Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
Assinado por: Julio Veras
Tipo do Documento: Dissertação
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Julio Cezar de Cerqueira Vêras, ALUNO (20172610016) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA, em 28/12/2022 18:03:18.

Este documento foi armazenado no SUAP em 28/12/2022. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 708034
Código de Autenticação: 352615e90b

