



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

ABORDANDO OS EFEITOS TERMOELÉTRICOS NO ENSINO SUPERIOR:

TEORIA E PRÁTICA

CAIO AMARO DE OLIVEIRA

Orientador: Prof. Dr. Frederico Alan de Oliveira Cruz

Seropédica/2022

CAIO AMARO DE OLIVERIA

**ABORDANDO OS EFEITOS TERMOELÉTRICOS NO ENSINO SUPERIOR:
TEORIA E PRÁTICA**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Física da UFRRJ, como requisito parcial para obtenção do título de Licenciado em Física.

Seropédica, maio de 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

ABORDANDO OS EFEITOS TERMOELÉTRICOS NO ENSINO SUPERIOR:

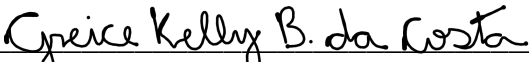
TEORIA E PRÁTICA

CAIO AMARO DE OLIVEIRA

Monografia aprovada em ____/____/____ para obtenção do título de Licenciado em Física.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Frederico Alan de Oliveira Cruz (Orientador)
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro



Profa. Dra. Greice Kelly Bezerra da Costa
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Profa. Dra. Elizandra Martins Silva
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

A Deus, que me criou e me proporcionou momentos ímpares na minha caminhada até aqui. A meu pai, que me deu apoio por toda a trajetória da minha graduação. A minha falecida mãe, que apesar de não ser capaz de vivenciar este momento comigo, durante sua vida sempre zelou e lutou pela qualidade dos meus estudos.

AGRADECIMENTOS

A minha família, pela ajuda financeira e emocional que foram cruciais para a minha permanência no curso. Agradeço a meus colegas de graduação, Anselmo Dylan Peixoto Brito, Michel Xisto Silva Silveira e Thalyta de Oliveira Inocêncio Martins que além da companhia durante esse percurso foram fonte de inspiração e tornaram os desafios mais fáceis de serem superados. A meu orientador, Prof. Dr. Frederico Alan de Oliveira Cruz, pela paciência, pelos puxões de orelha e por aceitar orientar este trabalho. A meus colegas de república que foram sempre compreensíveis e me ajudaram a manter um ambiente propício para os estudos. Agradeço a minha noiva, Rebeca de Lima Costa, que foi compreensível nas minhas ausências para me dedicar aos estudos. A minha prima/irmã por sua constante amizade e apoio. A meu pai e melhor amigo, pelas conversas, conselhos, apoio e motivação para enfrentar os desafios da vida.

RESUMO

OLIVEIRA, Caio Amaro. **ABORDANDO OS EFEITOS TERMOELÉTRICOS NO ENSINO SUPERIOR: TEORIA E PRÁTICA**. 2022. Monografia. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Neste trabalho é realizada uma revisão histórica do desenvolvimento do pensamento e análise do fenômeno termoelétrico, a partir dos trabalhos originais sobre o tema. Em momento posterior é realizada uma avaliação da grade curricular do curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, com o objetivo de identificar em quais disciplinas existe a possibilidade de abordagem do tema. Por fim, é apresentada uma proposta experimental, mediada pela plataforma Arduino, que pode ser utilizada nas disciplinas de caráter prático.

Palavras-chave: Efeito termoelétrico, Arduino, Atividade experimental

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
1. DE SEEBECK ATÉ NERNST: Um histórico dos fenômenos	15
2. EFEITOS TERMOELÉTRICOS: Minimização do tema na trajetória do estudante de Física	29
2.1. Olhando a UFRRJ.....	30
2.2. Além dos Muros	38
3. PROPOSTA DE ABORDAGEM EXPERIMENTAL	39
3.1. O efeito abordado	39
3.2. Materiais e software utilizados	40
3.2.1. <i>A plataforma Arduino</i>	40
3.2.2. <i>O sensor de temperatura</i>	41
3.2.3. <i>Amplificador de Instrumentação AD620</i>	42
3.2.4. <i>Outros</i>	43
3.2.5. <i>Ambiente de desenvolvimento integrado</i>	45
3.2.6. <i>Bibliotecas IDE</i>	46
3.3. Metodologia de análise	46
3.3.1. <i>Montagem 1: Análise qualitativa utilizando um diodo emissor de luz (LED)</i>	47

3.3.2. Montagem 2: Aplicando o Arduino e os sensores de temperatura DS18B20, à prova d'água.....	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
4.1. Estudo Qualitativo.....	54
4.2. Estudo Quantitativo.....	55
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
REFERÊNCIAS	67
APÊNDICE A: Bibliotecas <i>DallasTemperature</i> e <i>OneWire</i>.....	71
APÊNDICE B: Código de funcionamento da Montagem 2.....	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Ilustração do experimento de Seebeck sem inclinação da agulha imantada	16
Figura 1.2 - Ilustração do experimento de Seebeck com inclinação da agulha imantada	16
Figura 1.3 - Ilustração do experimento de Seebeck utilizando vidro seco, para impedir o contato direto do dedo com os metais.....	17
Figura 1.4 - Ilustração do experimento de Peltier para estudar a condutividade do Bi.....	19
Figura 1.5 - Ilustração do termoscópio metálico em formato de pinça de Peltier	20
Figura 1.7 - Ilustração do sistema utilizado por Lenz (1838) para investigar o resfriamento, observado por Peltier, na junção de um termopar.....	23
Figura 1.8 - Ilustração do experimento de Ettinghausen e Nernst.....	27
Figura 3.1 - Arduino UNO R3	41
Figura 3.2 - Sensor de temperatura DS18B20, à prova d'água.....	42
Figura 3.3 – (A) Amplificador de Instrumentação AD620; (B) Pinagem do amplificador de Instrumentação AD620	43
Figura 3.5 - Termopar tipo J	44
Figura 3.6 - Ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino	45

Figura 3.7 - Gerador Termoelétrico	47
Figura 3.8 - Ilustração da montagem do gerador termoelétrico, utilizando o amplificador e o LED	49
Figura 3.9 - Ilustração da montagem utilizando o Arduino	50
Figura 3.10 - Ilustração para montagem dos sensores de temperatura DS18B20, à prova d'água	50
Figura 3.11 - Ilustração da montagem utilizando múltiplas matrizes de contato	51
Figura 3.12 - Ilustração da colocação do sensor de temperatura e da haste do gerador termoelétrico no reservatório com água.....	52
Figura 4.1 - Montagem utilizando LED	54
Figura 4.2 - Dados da tensão elétrica obtidos ao realizar o experimento.....	56
Figura 4.3 -Ilustração da montagem utilizando amperímetro	57
Figura 4.4 - Dados da corrente elétrica obtidos ao realizar o experimento	58
Figura 4.5 - Dados da tensão elétrica obtidos ao realizar o experimento com resistor de 300 Ω	59
Figura 4.6 - Curva de Potência elétrica segundo a equação (4.3)	59
Figura 4.7 - Comportamento da temperatura em função do tempo.....	60
Figura 4.8 - Resultado característico de uma curva de histerese.....	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Recorte curricular do ciclo básico, Estrutura curricular 00132 (UFRRJ)	30
Quadro 2.2 - Recorte curricular do ciclo profissional, Estrutura curricular 00132 (UFRRJ)	34
Quadro 2.3 - Recorte curricular das matérias optativas, Estrutura curricular 00132 (UFRRJ)	37
Quadro 3.1 - Componentes e equipamentos eletrônicos necessários para a experimentação	44

INTRODUÇÃO

Ao longo da história, os estudos científicos caminham mediante às necessidades e curiosidades da humanidade, dessa forma muitos conhecimentos teóricos e práticos são desenvolvidos. Durante o processo surgem conjecturas, realizam-se testes e obtém-se resultados preliminares que, atualmente, são apresentados nos manuais universitários (livros didáticos) através de relações matemáticas.

É possível citar várias leis e fenômenos físicos que são descritos (ou ensinados) a partir de equações matemáticas, como por exemplo, segunda lei de Newton, eletromagnetismo de Maxwell, fenômeno de refração, entre outros. Em alguns casos as expressões matemáticas são bastante complexas, produzindo uma sensação de que basta “decorar” os termos e parâmetros para compreendê-lo. Um conhecimento científico que se enquadra nessa situação é o fenômeno da termoeletricidade e os efeitos termoelétricos.

Quando se observa mais especificamente sobre o fenômeno da termoeletricidade, mesmo que atualmente exista estudos sobre o tema, em diversas áreas (MARTIN, 2012; KOMPATSCHER; KEMERINK, 2021), a sua discussão nos manuais universitários é quase inexistente e quando são mencionados ela fica restrita, como já mencionado, a apresentação de uma relação matemática pouco esclarecedora.

Essa situação ocorre por alguns motivos, alguns deles serão discutidos com mais profundidade ao longo desta monografia, mas dois deles podem ser destacados nesse processo: o desconhecimento do fenômeno em si e o uso irrestrito dos livros didáticos. O primeiro deles ocorre, na maioria das vezes, pela forma como as ementas das disciplinas e as grades curriculares são construídas, fazendo com que o mesmo tema seja visto e revistos inúmeras vezes num processo de formação em espiral. O segundo motivo se enquadra com uma prática de uso quase bíblico dos “livros base” das disciplinas (CRUZ, 2020), em que o professor, sem qualquer reflexão, segue um manual para preparar e até usar em sala com os estudantes.

No caso da formação em Física (Licenciatura ou Bacharelado) parece existir uma lacuna entre os conteúdos apresentados, os manuais utilizados e a necessidade formativas dos indivíduos, isto é, independente da área de conhecimento existe uma grande dúvida da “capacidade em atender às necessidades dos alunos e às demandas específicas do contexto universitário” (GONDAR; FERREIRA, 2019, p. 302) com a atual estrutura de ensino utilizada.

Especificamente nos cursos de Licenciatura o impacto formativo e consequente ação futura dos formandos é grande, pois eles passam a usar as mesmas metodologias “aprendidas” durante os seus anos dentro das universidades, como dito por Lima, Cruz e Machado (2020, p. 11): “tal qual uma criança imita os adultos em certas brincadeiras, os alunos que buscam os cursos

de licenciatura tendem a repetir [...] os procedimentos adotados pelos professores desses cursos”.

Baseado na realidade relatada, buscou-se criar um material de consulta que pudesse ser utilizado por estudantes interessados no fenômeno da termoeletricidade e também pelos professores que lecionam disciplinas no curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Nas próximas páginas são apresentadas desde uma compilação do desenvolvimento histórico dos estudos a respeito da termoeletricidade até uma proposta de abordagem experimental com o uso de uma plataforma de prototipagem.

Considerando todos os elementos mencionados anteriormente, esta monografia foi organizada da seguinte maneira:

- Capítulo 1 - Serão apresentados os resultados dos experimentos mais significativos realizados sobre o fenômeno ao longo dos anos, desde Seebeck até Nernst.
- Capítulo 2 - É apresentada uma análise dos cursos de graduação em física Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, buscando verificar disciplinas com potencialidade para o estudo dos efeitos termoeletrônicos e aplicação da montagem experimental proposta no capítulo 3.
- Capítulo 3 - Propõe-se apresentar duas montagens experimentais para o estudo do efeito Seebeck, uma para análise qualitativa e outra para uma abordagem analítica utilizando uma placa de prototipagem, Arduino Uno, dentre outros componentes eletrônicos de fácil acesso.

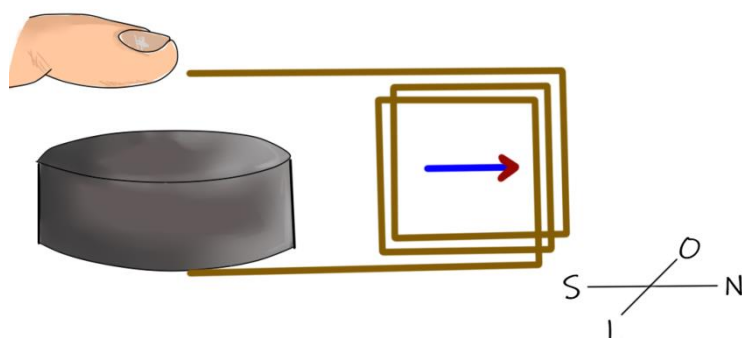
- Capítulo 4 - É realizada avaliação da proposta experimental evidenciando as vantagens e desvantagens das montagens, além de expor os resultados encontrados a partir delas, assim justificando a realização da atividade.
- Considerações finais - Aqui serão apresentadas algumas reflexões sobre todo o trabalho e das possibilidades de implementação efetiva do tema no curso de Licenciatura em Física da UFRRJ.

1. DE SEEBECK ATÉ NERNST: Um histórico dos fenômenos

Durante o desenvolvimento da ciência é normal a observação de eventos inesperados, que não fossem alvo nos fenômenos estudados, um exemplo ocorreu durante as experiências realizadas por Thomas Johann Seebeck (1770 - 1831). O pesquisador europeu durante as suas pesquisas a respeito dos efeitos elétricos e magnéticos das células Galvânicas - dispositivo capaz de gerar corrente elétrica de forma espontânea através de reações químicas, chamadas de reação de redução e reação de oxidação (BROWN *et al.*, 2016) - se deparou com um efeito desconhecido o qual produziu efeitos elétricos sem a necessidade de um meio ionizante, que era necessário para o funcionamento das células galvânicas (BROWN *et al.*, 2016).

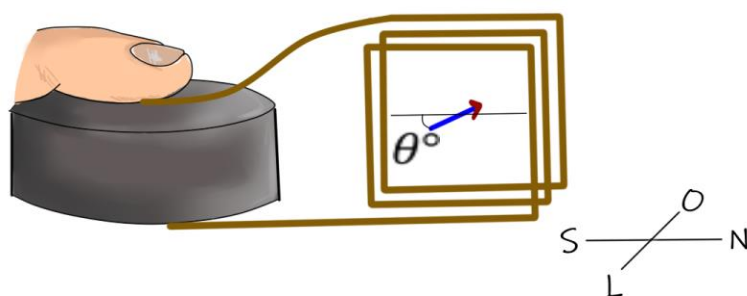
Seebeck, durante o seu estudo utilizou dois metais diferentes, o Bismuto (Bi) e o Antimônio (Sb), sendo um deles corresponde ao disco metálico em análise e o outro ao metal que compõe a espira (Figura 1.1), esta última usada para obter medidas de corrente elétrica indiretamente através do campo magnético gerado pela corrente. A medida do campo era realizada pela inclinação de uma agulha imantada que ficava na presença do campo magnético gerado pela corrente, sendo essa medida baseada no experimento de Oersted (1820). A questão é que, para prosseguir na execução do experimento, a extremidade livre da espira era pressionada contra o topo do disco metálico, essa ação gerava uma diferença de temperatura entre a base do disco, à temperatura ambiente, e o topo que se encontrava em equilíbrio térmico com o dedo (Figura 1.2).

Figura 1.1 - Ilustração do experimento de Seebeck sem inclinação da agulha imantada



Fonte: Acervo do autor¹.

Figura 1.2 - Ilustração do experimento de Seebeck com inclinação da agulha imantada



Fonte: Acervo do autor².

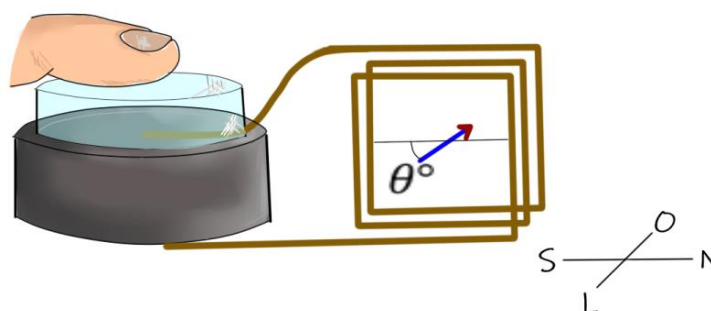
No intuito de compreender o que ocorria, Seebeck realizou algumas variações na montagem experimental, utilizando espiras de diferentes formatos (SEEBECK, 1826), mas não percebeu uma diferença nos fenômenos elétricos já observados, concluindo que uma das principais causas dos efeitos observados eram devido à diferença de temperatura nos metais. Apesar dos resultados encontrados, ainda preocupado se aquilo não era apenas alguma característica da célula galvânica, visto que, a sua mão poderia se comportar como uma

¹ Ilustração feita a partir da descrição feita por Seebeck (1826).

² Ilustração feita a partir da descrição feita por Seebeck (1826).

substância ionizante, ele faz pequenas modificações na experiência, colocando vidro seco entre o seu dedo e o metal analisado (Figura 3). Os resultados encontrados por Seebeck permitiram ele concluir estar diante de um novo fenômeno.

Figura 1.3 - Ilustração do experimento de Seebeck utilizando vidro seco, para impedir o contato direto do dedo com os metais



Fonte: Acervo do autor³.

Convencido que os efeitos observados dependiam da diferença de temperatura e dos metais envolvidos, ele começou a investigar se a forma de promover essa diferença poderia influenciar no comportamento final. Ao realizar algumas outras experiências, ele obteve resultados que mostraram que à diferença de temperatura, entre os metais, é fundamental e independente da forma que ela era produzida, ou seja, não era relevante para a inclinação da agulha imantada se a diferença de temperatura, ΔT , era causada por duas fontes de calor com potências diferentes ou se um dos metais era aquecido e o outro permanecia em temperatura ambiente.

Ademais, além de analisar o processo de aquecimento dos materiais, Seebeck variou os pares de metais observando mudanças significativas nos

³ Ilustração feita a partir da descrição feita por Seebeck (1826).

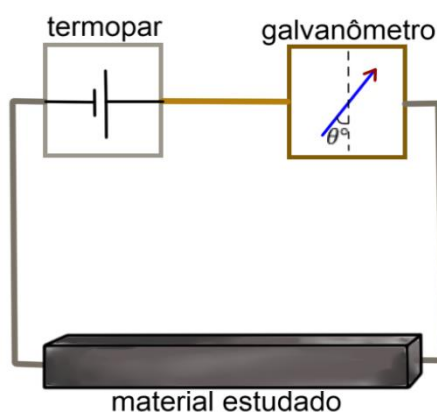
resultados experimentais. No caso dos metais de referências, Sb e Bi, tinham como resposta à mesma diferença de temperatura uma inclinação oposta no seu sentido. Disposto a explorar diversas combinações de metais, com purezas e formatos diferentes, contou com a participação de diversos pesquisadores e cientistas, seja essa participação indireta, com a reprodução e confirmação dos resultados de Seebeck, ou direta, que eles dividiram materiais e equipamentos para a realização dos experimentos. Além disso, observou comportamentos inesperados em elevadas diferenças de temperatura, como, por exemplo, a diminuição e a inversão no sentido da agulha imantada, revelando uma ligação do efeito com propriedades do próprio material, dado que esses comportamentos dependiam dos metais utilizados no experimento.

Nesse contexto, ele conseguiu organizar uma tabela em que foi possível classificar e descrever as propriedades elétricas e magnéticas, devido ao efeito termoelétrico, de forma hierárquica. Nesse esforço houve a conclusão de que a intensidade do efeito magnético era diretamente proporcional à pureza do material. Contudo, mesmo Seebeck variando de diversas formas a composição da sua experiência, para poder ter um entendimento da recente descoberta, não investiu esforço para descrever os eventos através de equações matemáticas como temos costumes de encontrar em artigos referentes ao tema, como, por exemplo, em Terasaki (2005) e Ashcroft e Mermin (1976). Portanto, Seebeck, além de descobrir e pesquisar um dos fenômenos físicos que promove grande desenvolvimento científico e tecnológico, dado a aplicabilidade dos termopares, ele também nos mostra, dado a sua forma de pesquisar que a física, até mesmo a ciência na totalidade, não deve ser reduzida a encontrar uma descrição matemática de fenômenos.

Outro cientista que se destacou com estudos a respeito dos efeitos termoelétricos foi Jean Charles Athanase Peltier (1785 - 1845), físico francês que analisou os efeitos térmicos do sentido da corrente através da junção de dois condutores. Este efeito consiste no aumento ou diminuição da temperatura dependendo do sentido da corrente na junção entre dois metais.

Entretanto, o processo de descoberta e estudo não foi programado, assim como no caso de Seebeck, Peltier estava interessado em outros resultados, no caso, ele estava empenhado em analisar a condutividade elétrica do Sb e Bi. Como era necessária uma tensão baixa, ele optou então utilizou um termopar que atendia às suas necessidades, os mesmos estudados por Seebeck, mas formados por zinco (Zn) e cobre (Cu), porém durante a experiência para avaliar a condutividade percebeu-se uma inclinação diferente do esperado no galvanômetro (Figura 1.4).

Figura 1.4 - Ilustração do experimento de Peltier para estudar a condutividade do Bi

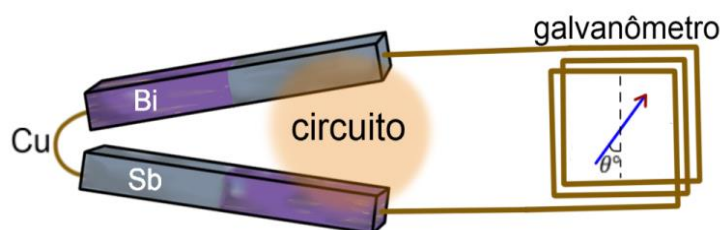


Fonte: Acervo do autor⁴.

⁴ Ilustração feita a partir da descrição de Peltier (1834).

Em primeiro momento, Peltier acreditou que o efeito poderia estar a ocorrer devido à interferência do meio externo, no entanto, mesmo tomando todas as medidas necessárias para poder descartar esta hipótese, o resultado anômalo permaneceu (PELTIER, 1834). No intuito de compreender o que ocorria, ele considerou que uma corrente secundária poderia existir, de tal forma que, a leitura do galvanômetro seria invertida ao utilizar o Bi. Além disso, por usar um termopar para gerar a corrente, considerou como causadores dessa corrente secundária algum tipo de efeito termoelétrico que mudariam a corrente resultante e conseqüentemente afetaria a medida no galvanômetro. Portanto, criou um equipamento em formato de pinça, que cada mandíbula seria formada por um termopar Sb-Bi (Figura 1.5) capaz de identificar as mudanças de temperatura num ponto do circuito.

Figura 1.5 - Ilustração do termoscópio⁵ metálico em formato de pinça de Peltier



Fonte: Acervo do autor⁶.

Peltier tinha em mão um resultado sem causa conhecida para estudar, o aparato necessário para investigar as causas, faltava então os questionamentos para orientar a sua investigação. Assim ele escreve no seu artigo de 1834,

⁵ Termoscópio é um instrumento que consegue perceber apenas a diferença de temperatura entre dois pontos, mas não é capaz de medir um valor absoluto para essa grandeza física.

⁶ Ilustração feita a partir da descrição de Peltier (1834).

“*Nouvelles Expériences sur la Caloricité des courans électriques*”, algumas perguntas que ele tentaria responder na experimentação.

1º Alguma corrente elétrica, qualquer que seja sua intensidade, aumenta infalivelmente a temperatura de condutores homogêneos?

2º Qualquer modificação que faça, também ocorre em todo o comprimento do condutor?

3º Qual lei segue a mudança de temperatura de acordo com o comprimento ou de acordo com a seção do fio condutor?

4º Quais são as relações entre as mudanças de temperatura que uma mesma corrente causa nos vários metais trefilados em fios da mesma dimensão?

5º Que efeito ocorre com as alternativas de condutores sólidos ou líquidos? e nas alternativas de condutores sólidos, que diferença resulta do simples contato ou soldagem?

6 Qual é a ordem das substâncias datermanes (transcalóricas) de caloricidade elétrica?(PELTIER, 1834)

Ao realizar experiências, ele percebe que a temperatura cresce em todo o comprimento do fio, o que já era esperado dado ao efeito Joule, cujo condutor atravessado por uma corrente tem a sua temperatura aumentada (BISCUOLA *et al.*, 2012). Todavia, as temperaturas nas soldas desses metais com o circuito não se comportam de maneira semelhante, ou seja, dependendo dos metais envolvidos, a temperatura variava diferentemente, tal que em alguns casos foi verificada a diminuição da temperatura numa solda.

O resultado da diminuição da temperatura chamou a atenção de Peltier e isso fez com que ele realizasse experimentos com termoscópios de ar, que estaria imune a efeitos magnéticos, como indução de Faraday, visto que, as medidas seriam efetuadas indiretamente. O procedimento adotado permitiu aferir essas mudanças de temperatura na junção de dois materiais e verificar que tais variações ocorrem devido ao sentido da corrente elétrica através dela.

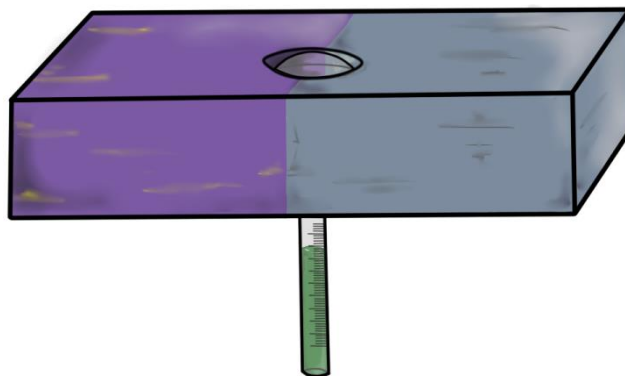
Apesar dos resultados encontrados, o resfriamento em junções envolvendo Bi e Sb gerava dúvidas na comunidade científica da época, levando

outros físicos a tentarem reproduzir os resultados relatados por Peltier. A comprovação dos resultados é atribuída ao físico Heinrich Lenz (1804 - 1865), conhecido por suas contribuições na Lei de Indução de Faraday-Lenz.

Lenz estudava os metais Bi e Sb e considerou que para avançar na compreensão deles deveria considerar as conclusões de Peltier, assim ele resolveu aferir se de fato os resultados de resfriamento eram reais. No sistema montado por ele, uma peça de cada material foi soldada, deixando um orifício onde era possível inserir um termômetro (Figura 1.7).

Esse processo possibilitou a Lenz a estudar o comportamento da junção, Bi e Sb, quanto a variação de temperatura quando ocorria a passagem de corrente elétrica, dessa forma, obteve os mesmos resultados de Peltier. Em momento posterior, ele realizou outra experiência, porém colocando a peça heterogênea de Bi-Sb em contato térmico com o gelo e no orifício, que antes foi usado para inserir o termômetro de ar, foi adicionado água e observado o processo de solidificação devido ao resfriamento da junção ao fluir corrente elétrica pelo sistema.

Figura 1.6 - Ilustração do sistema utilizado por Lenz (1838) para investigar o resfriamento, observado por Peltier, na junção de um termopar.



Fonte: Acervo do autor⁷.

Prosseguindo com o estudo dos efeitos termoelétricos, outro cientista que se destacou foi o físico britânico, William Thomson (1824 - 1907), também conhecido como Lord Kelvin. Entretanto, os seus estudos com relação aos fenômenos termoelétricos tiveram origem diferente em relação aos trabalhos dos outros pesquisadores já mencionados. Na sua pesquisa ele decidiu estudar os efeitos ao invés de se deparar com eles nas suas pesquisas, ou seja, ele queria compreender o fenômeno e estabelecer um modelo matemático que pudesse descrever as 'nuances' percebidas, assim tomou como fundamento da sua teoria as equações⁸ (1) e (2).

$$F\gamma = J(\gamma\Sigma \alpha_t + B\gamma^2) \quad (1)$$

$$\Sigma \alpha_t = \Sigma \alpha_t \left(1 - e^{-\frac{1}{J} \int_T^t \mu dt}\right) \quad (2)$$

⁷ Ilustração feita a partir da descrição feita por Lenz (1838).

⁸ Dado a época de publicação do trabalho de Thomson (1857) as grandezas físicas eram representadas por uma simbologia distinta às modernas, de tal forma que: **F**, representa a *força eletromotriz*; γ , a corrente uniforme que circula através do condutor; **J**, uma constante de equivalência termomecânica; $\alpha \cdot \gamma$, quantidade de calor por unidade de tempo em todas as partes do condutor que circula uma corrente γ e está a uma temperatura t ; μ , "função de Carnot"; **T**, temperatura da parte fria do circuito; A e B, constantes independentes da corrente elétrica, tal que, B é positiva.

No seu processo de pesquisa, Thomson analisou os resultados encontrados por Seebeck e Peltier relacionando-os com o princípio da termodinâmica enunciada por Clausius, onde a energia térmica em trânsito em sistemas reversíveis, tem como sentido espontâneo ir do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura (THOMSON, 1857). Entretanto, segundo ele, não poderia ser afirmado a reversibilidade do sistema, dado que, o termo quadrado das suas equações, $B\gamma^2$ não poderia ser negligenciado em vista da dependência dos fenômenos observados com o sentido da corrente elétrica através da junção formada pelo Bi e o Sb.

Portanto, Thomson prossegue a sua pesquisa organizando questionamentos e experimentos que iriam orientar as suas conclusões ao longo da sua investigação, como, por exemplo, se perguntar se o sentido da corrente produziria efeitos térmicos distintos no mesmo metal, ou seja, investigar se os efeitos termoelétricos eram acarretados pela diferença de temperatura ponto a ponto no mesmo metal ou dependia unicamente da diferença de temperatura nas soldas entre metais distintos. Dessa maneira, encontra um resultado a favor da primeira consideração, os efeitos termoelétricos dependem da temperatura ponto a ponto em um mesmo metal. Com esse resultado ele adiciona uma função nas suas equações⁹, que carrega as características de cada metal do termopar, descrevendo de forma matemática os fenômenos termoelétricos.

⁹ A equação de Thomson (1857), escreve que a *força eletromotriz* termoelétrica, \mathbf{F} , é gerada por um termo que depende da diferença de calor envolvido nas junções, $\mathbf{J}\Delta\Theta$, e também de uma função característica, ϑ , de cada termopar do circuito que, por sua vez, depende de cada metal envolvido.

$$F = \int_T^S \mu \theta dt = J \{ \theta_S - \theta_T + \int_T^S \vartheta dt \} \quad (3)$$

O trabalho de Thomson não vem como um papel de apresentar uma descoberta totalmente desconexa como os estudos científicos da época, pelo contrário, baseado em estudos e resultados de cientistas que o antecederam, conseguiu formular hipóteses, avaliá-las e formular descrições matemáticas que descrevessem os fenômenos termoelétricos. Esse processo foi importante para unificar o efeito Seebeck, que se caracteriza por uma corrente elétrica gerada por existir uma diferença de temperatura entre as junções de dois metais distintos, e o efeito Peltier, que se caracteriza por um gradiente de temperatura gerado pela existência de uma corrente elétrica que flui entre as junções de dois metais diferentes, adicionando um novo parâmetro que corresponde à resposta termoelétrica de cada metal envolvido no circuito.

O avanço nos estudos sobre os efeitos termoelétricos não ficou restritos aos pesquisadores já citados. Albert von Ettingshausen (1850 - 1932) e Walther Nernst (1865 - 1941) fizeram contribuições importantes nesse campo. Eles foram responsáveis pelo estudo do efeito termomagnético, que relaciona uma força eletromotriz¹⁰ com um campo magnético e um fluxo de calor perpendicular entre si (ALONSO; FINN, 2015). Os seus estudos foram motivados por resultados irregulares encontrados quando estudavam a experiência realizada por Hall que,

¹⁰ Vale lembrar que a força eletromotriz se refere a uma diferença de potencial, mantendo esse nome apenas por questões históricas.

por sua vez, consiste em colocar uma placa de metal, a qual passa uma corrente elétrica, num ambiente com um campo magnético perpendicular a essa corrente.

A experiência de Ettinghausen e Nernst consistia numa placa de Bi de 5 cm de comprimento, 4 cm de largura e 2 mm de espessura, provida de dois eletrodos colocados opostos um ao outro nos lados de maior comprimento, enquanto a peça era afixada por folhas de cobre nos lados de menores, porém sem contato metálico em função de um isolamento realizado por folhas de mica¹¹ (ETTINGSHAUSEN; NERNST, 1886). Além disso, ao colocarem essa placa de Bi numa região de campo magnético uniforme, produzido por um eletroímã, e a submeterem a um gradiente de temperatura, ambas perpendiculares entre si, observaram através de um galvanômetro conectado com os eletrodos uma corrente elétrica perpendicular tanto em relação ao gradiente de temperatura quanto ao campo magnético (Figura 1.8), fenômeno que é atualmente conhecido como efeito Nernst-Ettingshausen.

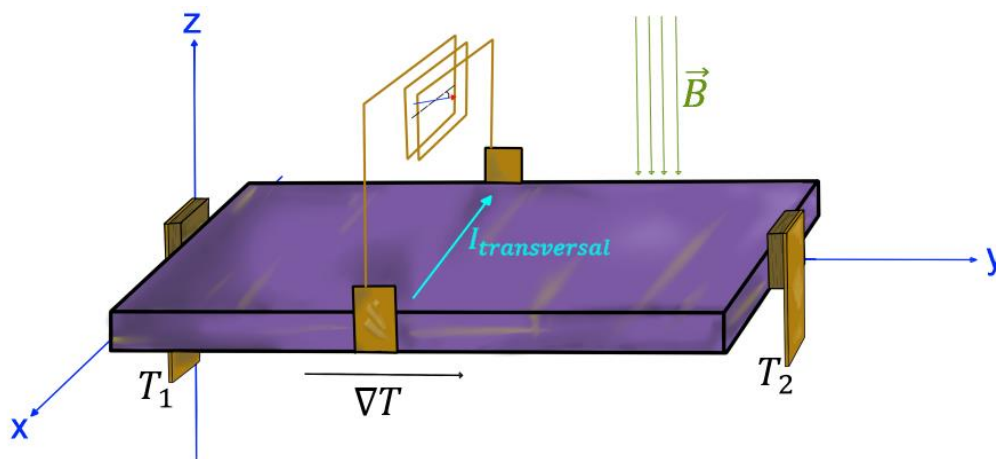
Em primeiro momento eles consideraram que a força eletromotriz¹² observada era causada devido aos termopares que constituíam a montagem do experimento, porém, após investigações a respeito dessa consideração, ela foi descartada. Além disso, ao longo dos ensaios experimentais observou-se que essa corrente transversal só ocorria quando a placa de Bi estava imersa na

¹¹ Segundo Cavalcante, Baltar e Sampaio (2005, p. 531): “Mica, do latim *micare* (brilho), é um termo genérico aplicado ao grupo dos minerais constituído por silicatos hidratados de alumínio, potássio, sódio, ferro, magnésio e, por vezes, lítio, cristalizado [...]”.

¹² Vale lembrar que a força eletromotriz se refere a uma diferença de potencial, mantendo esse nome apenas por questões históricas.

região com campo magnético, então consideraram que ela era oriunda de um efeito termomagnético.

Figura 1.7 - Ilustração do experimento de Ettinghausen e Nernst



Fonte: Acervo do autor¹³.

Entretanto, essa corrente perpendicular ao campo e ao gradiente de temperatura não era a única observada, havia também correntes longitudinais, ou seja, na direção do gradiente de temperatura. Tais correntes foram entendidas como consequências da falta de domínio total da direção do gradiente de temperatura e do campo magnético, dessa maneira não conseguindo reproduzir unicamente as correntes transversais, ou seja, observado além delas, correntes longitudinais. Contudo, conseguiram medir o grau dessas correntes e interpretá-las com respeito à intensidade dos campos e geometria dos metais analisados.

Apesar das experiências realizadas por eles não serem totalmente conclusivas, houve uma grande contribuição para o avanço nos estudos dos

¹³ Ilustração feita a partir da descrição feita por Ettinghausen e Nernst (1886).

efeitos termoelétricos, pois indicaram que os fenômenos observados estavam ligados à estrutura molecular dos metais.

O que é possível perceber nesse trajeto inicial é que alguns aspectos da ciência ficaram evidentes: ao longo de um trabalho de pesquisa é possível encontrar fenômenos inesperados em busca de alguns resultados; nem sempre a pesquisa na área da física necessita obrigatoriamente de equações matemáticas; o desenvolvimento tecnológico e científico da humanidade é o resultado de trabalho duro de muitos pesquisadores.

2. EFEITOS TERMOELÉTRICOS: Minimização do tema na trajetória do estudante de Física

Os estudos dos efeitos termoelétricos são marcados pela presença de grandes nomes da ciência, que foram determinantes para os avanços nas pesquisas nesta área do conhecimento. As descobertas realizadas em séculos anteriores ao nosso proporcionam avanços tecnológicos que favorecem a humanidade na atualidade, podem ser citados: os geradores termoelétricos, que apresentam longa vida útil; os termômetros de termopar, que apresentam excelente precisão e capacidade térmica baixa; as Pastilha de Peltier, componente utilizado para resfriamento de equipamentos eletrônicos, assim como vasta aplicação em refrigeradores; Além disso, os efeitos termoelétricos, incluindo o Efeito Ettingshausen-Nernst, não podem ser desprezados em pesquisas e equipamentos de alta precisão, devendo ser considerado em diversas áreas de pesquisa e desenvolvimento tecnológico. Devido a sua importância tecnológica, não apenas como curiosidade fenomenológica, este tema deve (ou deveria) ser abordado, pela necessidade formativa, nos cursos de Física, sejam eles de Licenciatura ou Bacharelado.

Uma vez que o tema envolve conhecimentos de termodinâmica e eletricidade é possível que ele seja foco de disciplinas que abordem estes conhecimentos ou em outras mais avançadas. Para avaliar em que momento do curso de Física é possível abordar este tema foi necessário avaliar a ementa e conteúdos programáticos de algumas disciplinas.

2.1. Olhando a UFRRJ

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro apresenta em seu site oficial¹⁴ oito estruturas curriculares para o curso de Licenciatura em Física, sendo a mais antiga, atualmente inativa, a Estrutura Curricular 00125 de 1987, e a mais recente, que será considerada para a análise proposta neste capítulo, a Estrutura Curricular 00132 de 2014.

De maneira geral, a grade curricular de 2014 é dividida em dois momentos, o ciclo básico e o profissional, cada um com uma duração mínima de quatro períodos letivos, assim totalizando um mínimo de oito períodos letivos para a conclusão do curso. O ciclo básico é caracterizado pelo estudo de diversos temas da física como: mecânica, termodinâmica, eletromagnetismo e introdução à física moderna (ótica, relatividade e introdução à química). Além do estudo teórico e experimentais dessas respectivas áreas a grade curricular também é composta por disciplinas que se propõe a estudar o desenvolvimento histórico da física (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 - Recorte curricular do ciclo básico, Estrutura curricular 00132 (UFRRJ)

Código	nome da disciplina	Conteúdo/objetivo
IC 165	Física I-A	Leis fundamentais da mecânica clássica
IC 169	Física Experimental I-A	Método científico e leis de força e leis de conservação da mecânica clássica
IC194	História da Física I	Desenvolvimento histórico da

¹⁴<https://is.gd/imXtDU>

		mecânica clássica: Da física aristotélica à mecânica newtoniana
IC 166	Física II-A	Compreensão dos Princípios Fundamentais da Mecânica dos Meios Contínuos e da Termodinâmica
IC 170	Física Experimental II-A	O método científico, experiências envolvendo Mecânica dos Meios Contínuos e Termodinâmica
IC 195	História da Física II	Fornecer ao estudante uma compreensão do desenvolvimento histórico dos conceitos da Termodinâmica e da Teoria Cinética dos Gases
IC 167	Física III-A	Compreensão dos princípios fundamentais dos fenômenos elétricos e magnéticos
IC 171	Física Experimental III-A	Fenômenos elétricos. Fenômenos magnéticos. Leis da indução
IC 196	História da Física III	Fornecer ao estudante uma compreensão do desenvolvimento histórico dos conceitos do eletromagnetismo
IC 168	Física IV-A	Proporcionar uma compreensão dos

		fenômenos associados às Ondas Eletromagnéticas e uma introdução ao estudo da Teoria da Relatividade e da Física Quântica.
IC 172	Física Experimental IV-A	Óptica geométrica. Ótica Física
IC 197	História da Física IV	Fornecer ao estudante uma compreensão do desenvolvimento histórico dos conceitos da Óptica e da Física Moderna.

Fonte: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2022.

Observa-se que as disciplinas do ciclo básico são divididas em quatro grupos de conhecimento: Mecânica Newtoniana, Meios Contínuos e Termodinâmica, Eletromagnetismo e Física Moderna. Dentre estes, dois demonstram haver condições para discutir assuntos adjacentes ao tema da termoeletricidade, seja através de uma abordagem experimental, teórica e/ou histórica.

As disciplinas de caráter teórico, Física II-A (IC 166) e Física III-A (IC 167), parecem ter como objetivo discutir as leis fundamentais da Termodinâmica, Eletricidade e Magnetismo, respectivamente, de forma bastante independentes, indicando não ser factível que nelas sejam apresentados conteúdos de termoeletricidade com detalhamento.

No caso das disciplinas de cunho prático, no caso mais específico de Física Experimental II-A (IC 170) e Física Experimental III-A (IC 171), que apresentam um caráter investigativo e assim, segundo Grandini e Grandini

(2004, p. 252), "incentivar o aluno a conhecer, entender e aprender a aplicar a teoria na prática, dominando ferramentas e técnicas que poderão ser utilizadas em pesquisa científica", há indicação que o tema da termoeletricidade possa ser abordado ao longo destas disciplinas. Ademais nas disciplinas que fazem uma abordagem histórica e relacionada ao desenvolvimento do pensamento científico, mais especificamente da Física, também é possível os estudos dos efeitos termoelétricos.

No ciclo profissional as disciplinas têm como objetivo a discussão mais detalhada e avançada dos conteúdos já estudados, como por exemplo a disciplina Mecânica Clássica I (IC 173), que faz uma abordagem matematicamente mais elaborada dos conceitos apresentados nas disciplinas Física I-A (IC 165) e em parte da Física II-A (IC 166), e também a discussão de novos conteúdos como é o caso da disciplina Mecânica Quântica I (IC 123). Nesta parte do curso também existem atividades prático-laboratoriais, que estão voltadas à discussão de equipamentos eletrônicos, como na disciplina Eletrônica Básica I (IC 178) e de fenômenos físicos estudados nos séculos XIX e XX, Estrutura da Matéria I (IC 198) e Estrutura da Matéria II (IC 199), que dado seu conteúdo programático (Quadro 2.2) podem abordar os efeitos termoelétricos por diferentes perspectivas, seja pela aplicação dos termopares e outras tecnologias relacionadas e/ou pelo comportamento físico da matéria quando considerado os efeitos termoelétricos. Ainda se tratando de disciplinas que se utilizam de práticas laboratoriais como recurso, é possível citar as disciplinas de Instrumentação para o Ensino de Física – IC 188, IC 189, IC 190 e IC 191 – que com a abordagem de fenômenos termo elétricos podem favorecer a preparação do aluno de licenciatura para sua prática profissional (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 - Recorte curricular do ciclo profissional, Estrutura curricular 00132 (UFRRJ)

Código	nome da disciplina	Conteúdo/objetivo
IC 101	Eletromagnetismo I	Proporcionar ao aluno a compreensão do Eletromagnetismo Estático
IC 131	Termodinâmica	Compreensão dos princípios fundamentais da termodinâmica
IC 173	Mecânica Clássica I	Compreensão dos princípios básicos da Mecânica Clássica na formulação Newtoniana e Aplicações.
IC 198	Estrutura da Matéria I	Investigações experimentais e teóricas sobre a Estrutura da Matéria no século XIX e XX.
IC 188	Instrumentação Para o Ensino de Física A	Proporcionar ao estudante uma reflexão sobre os problemas da transposição didática para o ensino médio de conteúdos relacionados à Mecânica
IC 102	Eletromagnetismo II	Compreensão da Teoria Eletromagnética
IC 178	Eletrônica Básica I	Componentes básicos. Componentes semicondutores. Transdutores. Optoeletrônica. Amplificador operacional.

		Introdução à eletrônica digital
IC 174	Mecânica Clássica II	Princípios básicos da Mecânica dos Sistemas e dos Meios Contínuos, formulação não Newtoniana
IC 199	Estrutura da Matéria II	Física Atômica, Física Molecular, Física dos Sólidos, Física Nuclear
IC 189	Instrumentação Para o Ensino de Física B	Proporcionar ao estudante uma reflexão sobre os problemas da transposição didática para o ensino médio de conteúdos relacionados à Física Térmica e à Mecânica dos Fluidos
IC 123	Mecânica Quântica I	Apresentar os fundamentos da Mecânica Quântica e sua formulação matemática
IC 180	Elementos de física computacional	Equações diferenciais parciais da física; método da diferença finita, método dos elementos finitos; introdução ao programa MATLAB; introdução ao programa COMSOL; aplicações.
IC 190	Instrumentação Para o Ensino de Física C	Proporcionar ao estudante uma reflexão sobre os problemas da transposição didática para o ensino médio

		de conteúdos relacionados à Eletricidade e ao Magnetismo.
IC 112	Física Estatística	Fornecer ao estudante a compreensão de um tipo particular de leis que se aplicam ao comportamento e às propriedades de sistemas macroscópicos, isto é, compostos por uma quantidade enorme de componentes individuais.
IC 191	Instrumentação Para o Ensino de Física D	Proporcionar ao estudante uma reflexão sobre os problemas da transposição didática para o ensino médio de conteúdos relacionados à Óptica e à Física Moderna.
IC 402	Tópicos de Física Contemporânea	Fornecer ao estudante um panorama dos temas de pesquisa desenvolvidos pela Física contemporânea

Fonte: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2022.

Percebe-se que o estudo de fenômenos termoelétricos também é de possível abordagem ao analisar o rol de disciplinas não obrigatórias do curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro nomeada como optativas, sendo três delas as que melhor se destaca neste objetivo (Quadro 2.3).

Quadro 2.3 - Recorte curricular das matérias optativas, Estrutura curricular 00132 (UFRRJ)

Código	nome da disciplina	Conteúdo/objetivo
IC 105	Evolução da Física	Desenvolvimento Histórico da Mecânica, do Eletromagnetismo e da Mecânica Quântica.
IC 140	Introdução à Física do Estado Sólido	Propriedades estruturais, mecânicas, térmicas, elétricas e magnéticas dos Sólidos. Teoria de bandas e aplicações.
IC 179	Introdução à Física do Estado Sólido	Coesão cristalina. Estrutura cristalina. Condução eletrônica. Teoria de bandas. Comportamento eletromagnético, mecânico e térmico dos cristais. Supercondutividade.

Fonte: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2022.

Vale ressaltar a semelhança da disciplina IC 105 com as disciplinas de História da Física (IC 194, IC 195, IC 196 e IC 197), ou seja, a matéria Evolução da Física, segundo a descrição no sistema da universidade, apresenta objetivo semelhante à uma disciplina obrigatória, isso porque o público alvo da disciplina IC 105 são os alunos de outros cursos que queiram conhecer a história da física em um único período letivo, assim abordar efeitos termoelétricos nessa disciplina pode ser de boa utilidade dado a vasta aplicação tecnológica destes fenômenos.

2.2. Além dos Muros

Nota-se que os fenômenos termoelétricos são comentados em um número reduzido de títulos, como por exemplo: “Fundamentos de Física” (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012), “Física” (YOUNG; FREEDMAN, 2015) e “Física do Estado Sólido” (ASHCROFT; MERMIN, 1976). No entanto, apenas no último livro citado há a menção do Efeito Seebeck, uma vez que, nos outros casos é citado o termo “termopar” para se referir à geradores elétricos, mas não há abordagem física do fenômeno termoelétrico. No caso dos livros indicados aos estudantes do ensino básico, pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD), o tema é citado somente em: “Matéria, Energia e Vida” (MORTIMER et al., 2020), mas ainda sem discussão física dos efeitos termoelétricos, apenas citando a utilidade desse conhecimento.

Um dos tipos de termômetros para uso industrial é o termopar, empregado para controle e registro contínuo de temperatura. Seu funcionamento se baseia na medida da diferença de potencial elétrico nas junções de fios metálicos diferentes. De acordo com os materiais dos fios da junção, os termopares são capazes de medir temperaturas muito abaixo ou muito acima da temperatura ambiente. (MORTIMER *et al.*, 2020).

Portanto, no capítulo a seguir será apresentado uma montagem experimental que possa fomentar o estudo dos efeitos termoelétricos, mais especificamente o efeito Seebeck, dentro do curso de licenciatura da UFRRJ.

3. PROPOSTA DE ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Considerando ser fundamental a realização de uma abordagem da termoeletricidade no Curso de Licenciatura em Física da UFRRJ, permitindo que os futuros professores estejam preparados para compreender situações que envolvam o fenômeno. Neste capítulo será apresentada uma proposta que permita discutir o tema nas disciplinas experimentais do referido curso.

3.1. O efeito abordado

Considerando a história do desenvolvimento do pensamento nos estudos referente aos efeitos termoelétricos, será apresentada uma proposta que permita mostrar e discutir o efeito Seebeck. A proposta tem como base o reaproveitamento de alguns equipamentos já disponíveis na instituição e também do uso de novas ferramentas, sendo estes descritos a seguir.

Espera-se que ao discutir o efeito Seebeck nos laboratórios, além de capacitar os futuros professores no exercício de sua profissão, possa também ser o ponto de partida para novos estudos e experimentos a serem desenvolvidos dentro do curso de graduação em questão.

3.2. Materiais e software utilizados

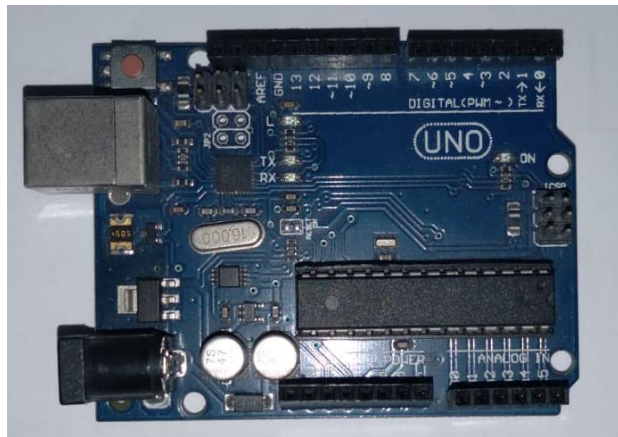
3.2.1. A plataforma Arduino

O Arduino é uma plataforma eletrônica de prototipagem de código aberto (*open source*) que a permite interação entre programas (*software*) e componentes eletrônicos (*hardware*). Ela foi criada pela Interaction Design Institute Ivrea, localizado na Itália, por quatro pesquisadores - Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe e David Mellis (ARDUINO, 2021) - com o objetivo de ser uma ferramenta que poderia ser utilizada por estudantes sem conhecimento de programação.

Em função da sua possibilidade de conexão com diversos sensores e facilidade no manuseio, ela pode ser usada no estudo de diversos fenômenos e tem sido utilizada em diversas áreas do conhecimento, desde projetos associadas a passatempos (*hobbies*) (LOCKER, 2021), em projetos de pesquisa (SILVA, 2019) e ensino (AGUIAR, 2017).

A plataforma Arduino UNO (Figura 3.1), mais especificamente¹⁵, possui dimensões iguais a 5,35 cm x 6,90 cm, com seis portas analógicas, quatorze portas digitais, uma saída de alimentação de 5 V, uma saída de alimentação de 3,3 V, três portas GND (*Ground*), duas portas de voltagem de referência. A alimentação da placa pode ser feita por alimentação via USB A/B ou através de uma fonte de tensão contínua dentro do intervalo de tensão 6V - 20V e com conector do tipo Jack (2,1 mm x 5,5 mm).

¹⁵ Além do Arduino Uno, o fabricante desenvolveu o Arduino Nano e o Arduino MKR.

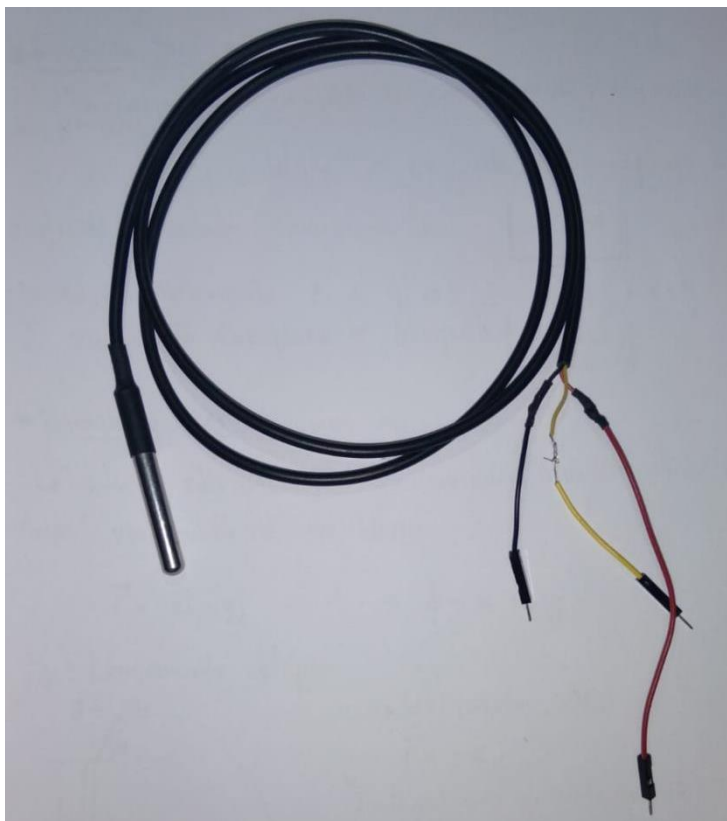
Figura 3.1 - Arduino UNO R3

Fonte: Acervo do Autor.

3.2.2. O sensor de temperatura

Há diversos sensores de temperatura que são utilizados nos projetos de Arduino, no entanto optou-se pelo DS18B20 (Figura 3.2) que realiza medidas entre $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ e também é à prova d'água. O funcionamento deste sensor é baseado em diodos sensíveis à temperatura, tal que para cada temperatura é produzida uma tensão elétrica proporcional que é enviada para o Arduino processar a informação (BABOS, 2020).

Figura 3.2 - Sensor de temperatura DS18B20, à prova d'água

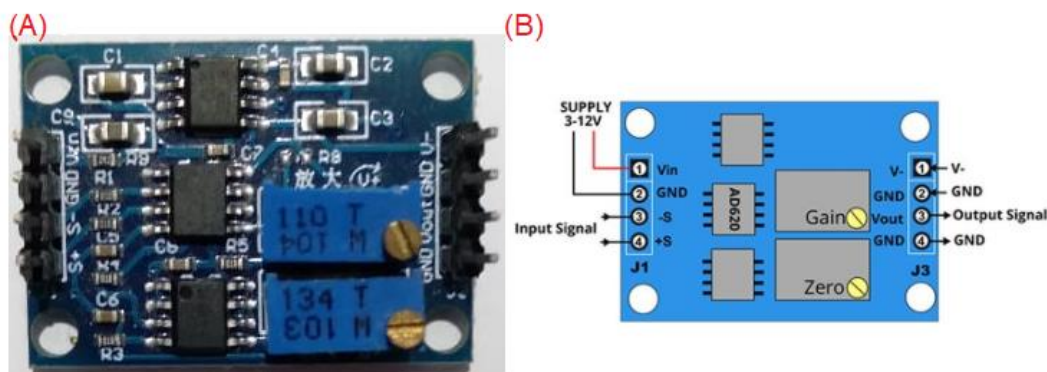


Fonte: Acervo do Autor.

3.2.3. Amplificador de Instrumentação AD620

O Amplificador de Instrumentação AD620 (Figura 3.3.A) é um módulo eletrônico amplificador para sensores que trabalham com sinais de saída baixo, fazendo a amplificação do sinal com um ganho de 1,5 até 1000 vezes. Este módulo é equipado com chip amplificado AD620 e admite ajuste de sinal nulo, além disso, apresenta baixo nível de ruído e alta precisão, assim justificando sua utilização em projetos de baixa tensão que requer precisão.

Figura 3.3 – (A) Amplificador de Instrumentação AD620; (B) Pinagem do amplificador de Instrumentação AD620



Fonte: Amplificador instrumental AD620, Disponível em: < <https://is.gd/qmXRqP> >.

Ademais, o amplificador de instrumentação AD620 apresenta ajuste de ganho de forma direta, sem a necessidade de acoplar resistências adicionais ou outros componentes eletrônicos. Estes ajustes são feitos através dos potenciômetros, *Gain* e *Zero* (Figura 3.3.B), presentes na placa. Em contrapartida, este equipamento apresenta dificuldades para a determinação exata do ganho de tensão proporcionado.

3.2.4. Outros

Para a realização do experimento, também será necessário um par de termopares, sendo esse componente a junção de dois fios de materiais diferentes. No trabalho em questão foi utilizado o termopar do tipo J da WJE - Controles industriais (Figura 3.5), composto pela junção de Ferro e Constantan¹⁶, com haste de Inox de 5 cm, porém esta montagem não exclui a utilização de um

¹⁶ Constantan é uma liga metálica formada por cobre e níquel usada na fabricação de resistores de fio e outros componentes de potência. Caracteriza-se por seu baixo coeficiente de variação da resistência com a temperatura (Instituto Newton C.Braga, 2018).

termopar de tipo diferente. Além disso, a proposta experimental requer a utilização de outros componentes e equipamentos eletrônicos, que por sua vez, são mais comuns em laboratórios universitários de eletrônica, como: Resistores, LEDs difuso¹⁷, fios de conexão (*jumpers*), Voltímetros e Matriz de contato (Quadro 3.1).

Figura 3.4 - Termopar tipo J



Fonte: Acervo do autor.

Quadro 3.1 - Componentes e equipamentos eletrônicos necessários para a experimentação

Tipo	Nome	Quantidade (unidade)
Placa de prototipagem	Arduino Uno	1
Cabo de alimentação	USB A/B	1
Fios de conexão	<i>Jumpers</i>	“A definir pelo usuário”
Resistor	Resistor de 4,7 kΩ	1
Sensor de Temperatura	DS18B20, à prova d’água	2
Amplificador de Sinal	Amp AD620	1

¹⁷ Acrônimo para *Light Emitter Diode*; Um LED difuso tem por característica ser composto por uma capsula fosca e por sua luz ser “espalhada”, facilitando a visualização do brilho na luz do dia.

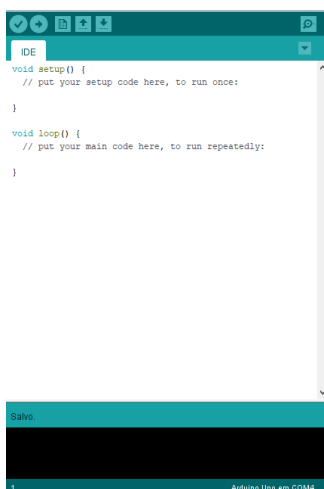
Termopar	Termopar tipo J	2
Matriz de contato	<i>Protoboard</i>	1
Medidor de Tensão	Voltímetro	1
LED	LED difuso Vermelho	1

Fonte: Acervo do Autor.

3.2.5. Ambiente de desenvolvimento integrado

A plataforma Arduino é um *hardware* responsável por realizar a aquisição dos dados, mas a etapa de representação dos dados depende de um *software* denominado de ambiente de desenvolvimento integrado (*IDE*¹⁸) (Figura 3.6) que une: funcionalidades de programação e a utilização de bibliotecas previamente desenvolvidas para diversas aplicações (TOLEDO; DIAS, 2015).

Figura 3.5 - Ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino



Fonte: Acervo do autor.

¹⁸ Acrônimo para *Integrated Development Environment*.

3.2.6. Bibliotecas IDE

Para sua interação com a plataforma Arduino é necessário que o IDE esteja carregado com duas bibliotecas, descritas a seguir:

- ★ *OneWire* - Ela é descrita como uma "biblioteca compatível com todas as arquiteturas" e que pode ser usada "em todas as placas Arduino" quando forem utilizados sensores de temperatura (ARDUINO, 2022).
- ★ *DallasTemperature* (APÊNDICE A) - Ela é utilizada com auxiliar a *OneWire* no controle de temperatura, especificamente aos sensores da série DS18 (BURTON, 2016).

3.3. Metodologia de análise

A montagem experimental pode ser dividida em duas partes principais, a primeira que se utiliza do conjunto de termopares para estudar o Efeito Seebeck de maneira qualitativa e a segunda com o objetivo estudar este efeito de maneira analítica a qual é possível verificar a relação entre a diferença de temperatura e a tensão elétrica gerada (equação 3.1).

$$V = \alpha \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

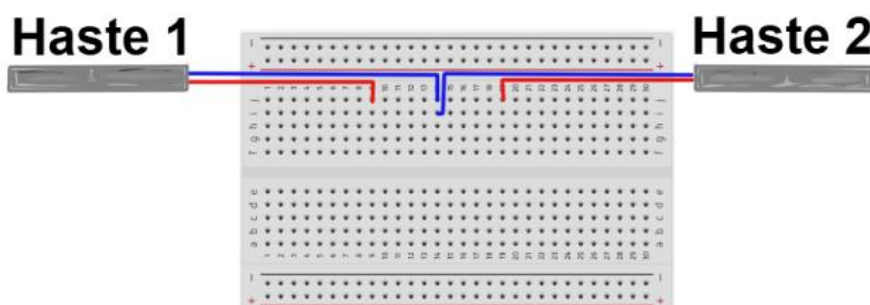
sendo α uma constante relacionada ao par de metais escolhidos e que descreve a capacidade de gerar diferença de tensão elétrica a partir de um gradiente de

temperatura, assim, quanto maior for o parâmetro α , melhor será o gerador em gerar tensão elétrica.

3.3.1. Montagem 1: Análise qualitativa utilizando um diodo emissor de luz (LED¹⁹)

Esta etapa consiste em montar um gerador termoelétrico a partir dos termopares Tipo-J, para isso é necessário conectar os fios da mesma natureza, sem que seja necessário saber precisamente qual o material de cada conexão, bastando realizar a ligação²⁰ considerando as cores de cada terminal (Figura 3.7).

Figura 3.6 - Gerador Termoelétrico



Fonte: Acervo do autor.

Ao produzir uma diferença de temperatura entre as hastes do gerador, pelo resultado de Seebeck, deve ser medida uma corrente elétrica que circula entre as conexões. Para verificar a existência desta corrente de forma qualitativa,

¹⁹ Acrônimo para *Light Emitter Diode* (diodo emissor de luz).

²⁰ Para facilitar a utilização da prática em laboratório, é viável realizar uma solda nos terminais para que estes possam se conectar à uma matriz de contato (*protoboard*).

pode-se utilizar um LED²¹, contudo a tensão gerada pelo gerador termoelétrico utilizado é insuficiente para ligá-lo²², da ordem de milivolts, sendo necessário a utilização de um amplificador de sinal elétrico para otimizar a visualização do fenômeno.

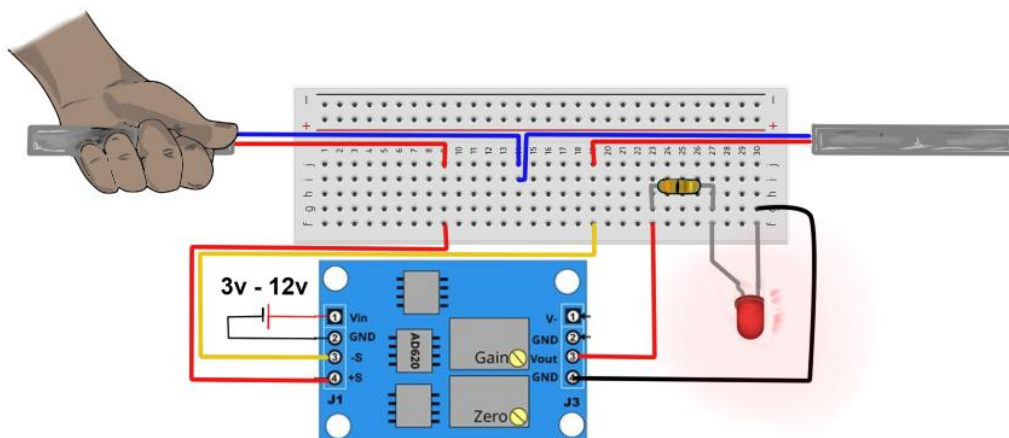
Por fim, pode-se proporcionar a diferença de temperatura entre as hastes utilizando a temperatura do corpo humano, segurando uma das hastes com a mão e a outra em contato com o ambiente, assim como Seebeck fez em seus primeiros experimentos (Figura 3.8).

Vale ressaltar que dependendo da temperatura ambiente, é indicado utilizar um reservatório com água fresca, com temperatura aproximada de 20 °C, garantindo a existência de um gradiente de temperatura entre o corpo humano e o reservatório de aproximadamente 15 °C, suficiente para perceber o funcionamento do LED, quando utilizado o amplificador. Um ponto importante na etapa de montagem é utilizar um resistor (~ 300 Ω) para garantir que o LED não irá “queimar” caso o ganho, fornecido pelo amplificador de sinal, seja superior que a tensão máxima de funcionamento.

²¹ Acrônimo para *Light Emitter Diode* (diodo emissor de luz).

²² Um LED possui melhor desempenho quando ligado a uma fonte de 1,5 V ~ 3,0 V.

Figura 3.7 - Ilustração da montagem do gerador termoelétrico, utilizando o amplificador e o LED ²³



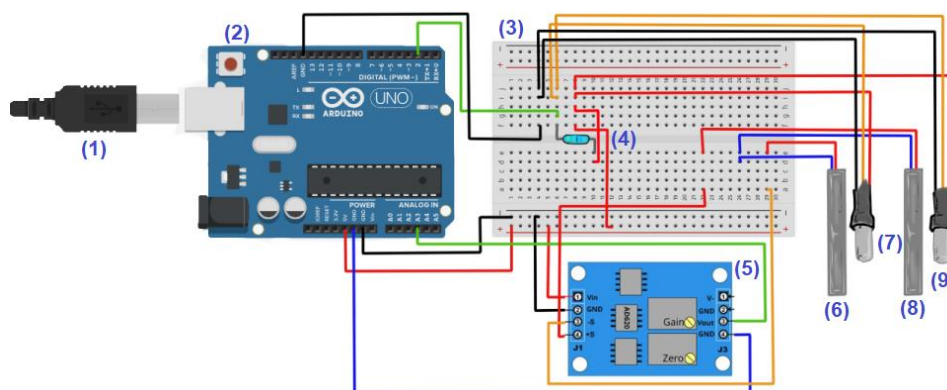
Fonte: Acervo do autor.

3.3.2. Montagem 2: Aplicando o Arduino e os sensores de temperatura DS18B20, à prova d'água

A aplicação do Arduino e dos sensores de temperatura para a determinação da tensão produzida não requer mudanças severas em relação a montagem anterior, pois a plataforma receberá os sinais do gerador termoelétrico e sensores de temperatura (Figura 3.9).

²³ Acrônimo para *Light Emitter Diode* (diodo emissor de luz).

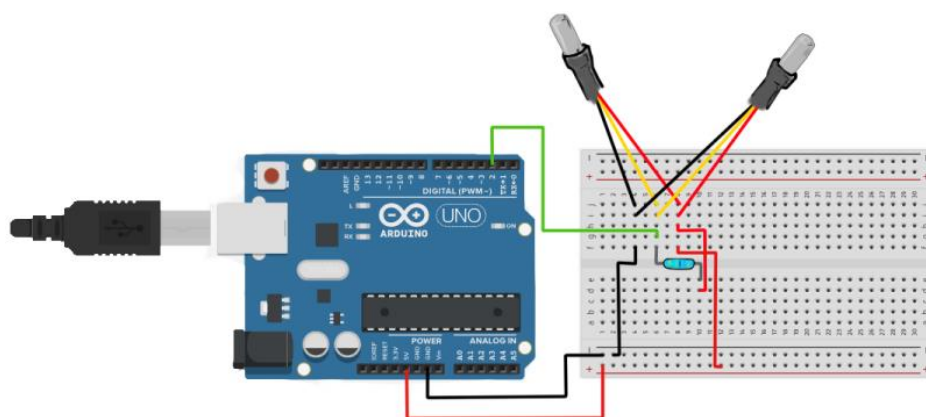
Figura 3.8 - Ilustração da montagem utilizando o Arduino; (1) Cabo de alimentação do Arduino; (2) Placa Arduino Uno; (3) Matriz de contato (protoboard); (4) Resistor (4,7 K Ω); (5) Amplificador instrumental AD620; (6) Haste 1 do gerador termoelétrico; (7) Sensor de temperatura 1; (8) Haste 2 do gerador termoelétrico; (9) Sensor de temperatura 2



Fonte: Acervo do autor.

Caso se disponha de material suficiente pode-se utilizar mais de uma matriz de contato, montando os sensores de temperatura em uma matriz (Figura 3.10), o gerador termoelétrico com o amplificador em outra (Figura 8²⁴), e depois interagir ambas com o Arduino utilizando os *jumpers* (Figura 3.11).

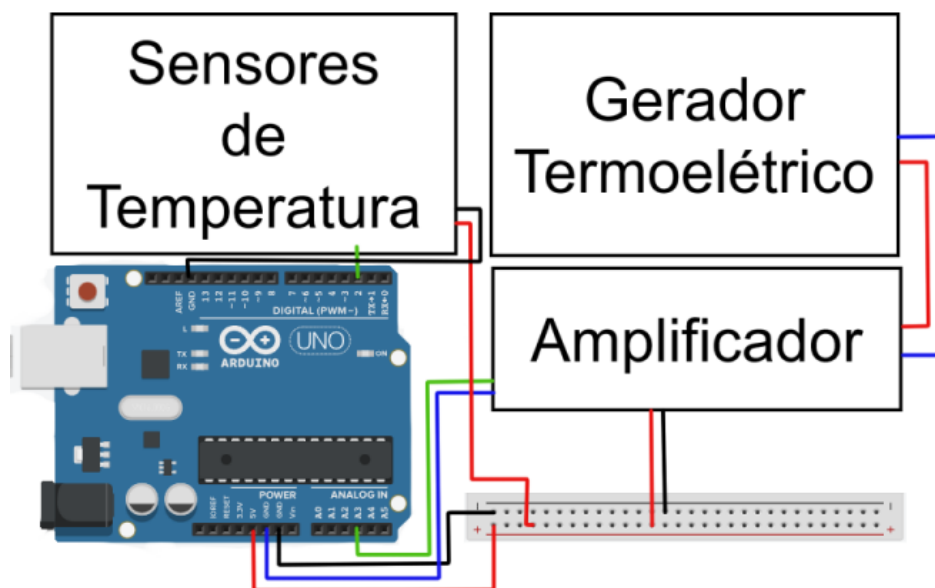
Figura 3.9 - Ilustração para montagem dos sensores de temperatura DS18B20, à prova d'água



Fonte: Acervo do Autor.

²⁴ Mesma montagem, porém, retirando o resistor e o LED.

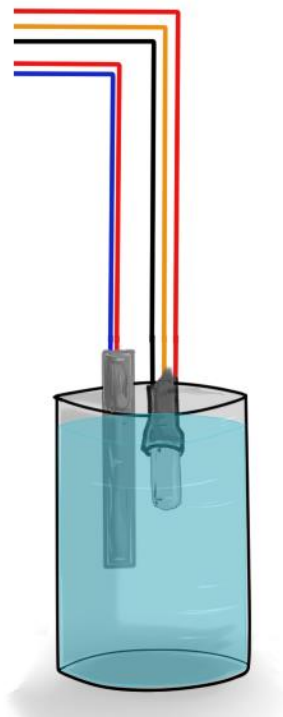
Figura 3.10 - Ilustração da montagem utilizando múltiplas matrizes de contato



Fonte: Acervo do autor.

É importante frisar que, assim como observado por Seebeck, o método que proporciona a diferença de temperatura não é relevante para a tensão gerada, podendo ser utilizado durante a montagem qualquer sistema que permita produzir diferença de temperatura entre as hastes. Contudo, ao longo deste trabalho foi utilizado misturas entre água e gelo, seguindo o seguinte processo: coloca-se um sensor de temperatura e uma haste do gerador em um reservatório com água à temperatura ambiente (Figura 3.12); de forma semelhante, coloca-se o outro sensor de temperatura e a outra haste do gerador em outro reservatório com água à mesma temperatura do primeiro.

Figura 3.11 - Ilustração da colocação do sensor de temperatura e da haste do gerador termoelétrico no reservatório com água



Fonte: Acervo do autor.

Nesta situação as duas hastes estarão à mesma temperatura a leitura de tensão tem que ser nula, caso não seja, deve-se ajustar o ponto zero através do amplificador instrumental AD620. Com o sistema ajustado foi adicionado em um dos reservatórios cubos de gelo, produzindo uma variação de temperatura entre as hastes, permitindo o Arduino registrar as diferenças de temperatura que esse processo irá acarretar e conseqüentemente as diferenças de potencial elétrico.

Para realização das medidas foi utilizado um código escrito em C++ (APÊNDICE B), permitindo obter as medidas da tensão em função da diferença de temperatura nas junções dos termopares.

Após a realização do experimento e obtenção dos dados através da IDE²⁵ do Arduino foi utilizado um programa de construção de gráficos, Graph,

²⁵ Acrônimo para *Integrated Development Environment*.

permitindo a análise dos dados, também pode-se utilizar o Desmos, uma vez que, ambos são gratuitos e possuem as seguintes características:

- ★ Graph - "aplicativo de código aberto usado para desenhar gráficos matemáticos em um sistema de coordenadas" (JOHANSEN, 2014), que pode ser usado em computadores com sistemas operacionais Windows e Linux;
- ★ Desmos - "pacote gratuito de ferramentas de matemática, incluindo as renomadas Calculadora Gráfica e Calculadora Científica" (DESMOS, 2022), que pode ser acessado com auxílio de navegadores de *internet* ou aplicativos de telefones móveis.

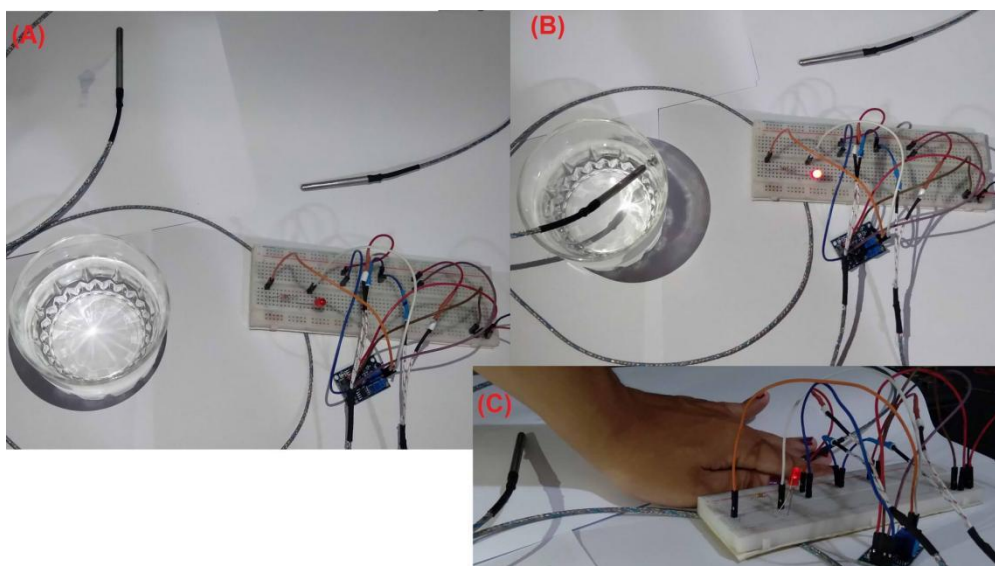
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Estudo Qualitativo

Na primeira montagem, usada para demonstrar a geração de uma corrente elétrica, apesar de não ocorrer uma análise gráfica é possível identificar os principais aspectos do fenômeno estudado, ou seja, quanto maior a diferença de temperatura no intervalo de funcionamento dos equipamentos, maior será o brilho do LED. Apesar de apresentar um resultado simples ele é fundamental para a percepção do fenômeno estudado, pois resultados qualitativos podem provocar impactos positivos na aprendizagem:

A abordagem da teoria física centrada em experimentos qualitativos e suas discussões oferece ao aluno a possibilidade de uma postura ativa, na medida em que ele constrói, observa e analisa, ao mesmo tempo que desenvolve a capacidade de discutir e trabalhar em grupo. (MELO, 2010)

Figura 4.1 - Montagem utilizando LED; (A) Duas hastes do gerador à temperatura ambiente (LED apagado); (B) Uma haste em contato com o ambiente e outra em um reservatório de água gelada (Brilho forte); (C) Uma haste em contato com o ambiente e outra em contato com o corpo humano (Brilho fraco/médio)



Fonte: Acervo do autor.

Um ponto importante, que deve ser levado em conta, é que essa primeira montagem permitirá que os estudantes possam se familiarizar com os equipamentos que serão utilizados nas demais análises. É sempre bom lembrar que a maioria deles nunca teve contato com o fenômeno ou mesmo com os instrumentos utilizados na montagem, então esse momento pode servir para uma discussão proveitosa para todos os participantes.

Como sugestão pode ser útil inserir nessa etapa recipientes com água, realizando a análise se a posição dos sensores e a diferença de temperatura dos recipientes afetam o brilho do LED. Outras questões que podem ser discutidas com os estudantes e isso dependerá de como o professor conduzirá a atividade, mas uma proposta é utilizar um roteiro de exploração que permita ao estudante responder questões que auxiliem sua aprendizagem.

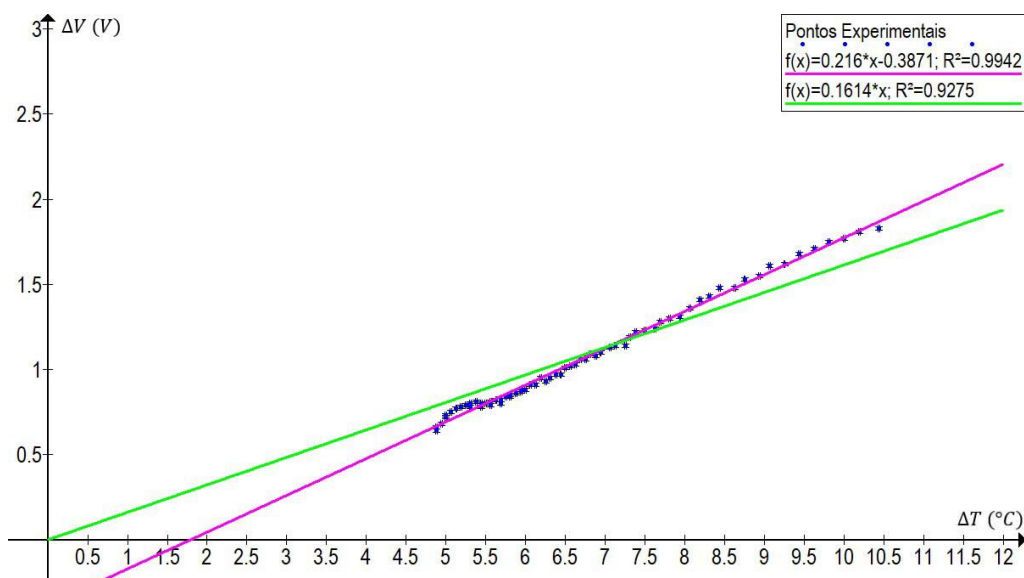
No entanto, a montagem descrita acima não possibilita observar o comportamento da tensão gerada com relação à temperatura das hastes do sistema construído, para isso é proposto uma outra montagem experimental utilizando a placa de prototipagem para aquisição dos dados e medição, tanto da tensão gerada quanto da diferença de temperatura entre as hastes.

4.2. Estudo Quantitativo

Na avaliação do experimento quantitativo foi necessário a utilização de recipiente com água e gelo, permitindo estabelecer diferenças de temperatura nas junções do gerador termoelétrico formado por dois termopares do Tipo J. Nessa etapa foi obtido um resultado (Figura 4.2), que foi analisado supondo função de ajuste com as seguintes características:

- ★ Hipótese 1: $v = \alpha \cdot \Delta T$, considerando esta a mais adequada ao problema, uma vez que, é o ajuste equivalente à expressão atribuída ao efeito Seebeck.
- ★ Hipótese 2: $v = \alpha \cdot \Delta T + v_0$, considerando algum valor residual na medida.

Figura 4.2 - Dados da tensão elétrica obtidos ao realizar o experimento



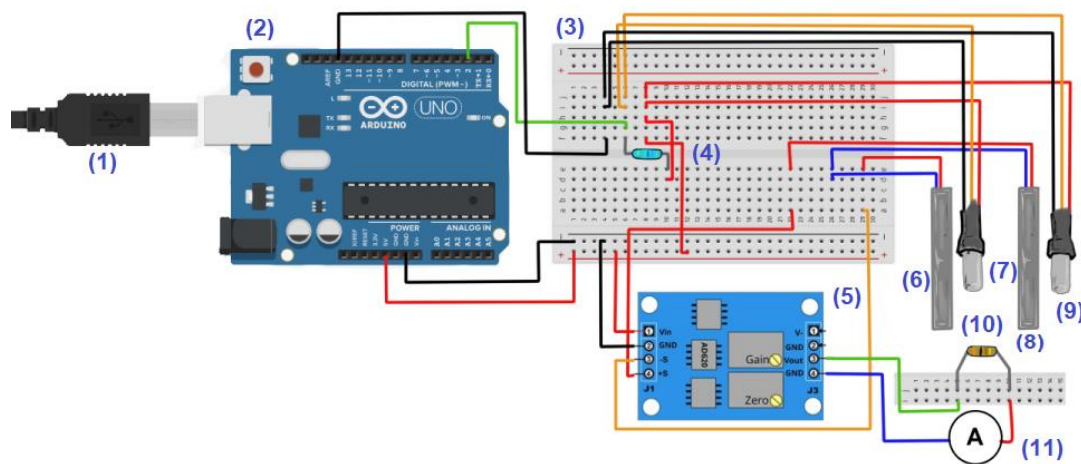
Fonte: Acervo do autor.

Os resultados encontrados mostram que os dados são bem ajustados por uma função afim (função polinomial de grau 1), como esperado, porém com um coeficiente linear não nulo (Hipótese 2) apesar do resultado mais adequado deveria ser aquele associado a Hipótese 1. Uma explicação possível para esse resultado pode ser dada a partir de dois fatores, um deles foi descrito por Wendling (2010) ao perceber que o amplificador operacional apresenta uma tensão de saída denominada *offset* e que podem causar erros proporcionais ao ganho na medição por conta dessa tensão agir como uma diferença de sinal de entrada no amplificador. O segundo, que não deve ser desprezado, mas que não

foi investigado, está associado à composição dos elementos envolvidos no gerador termoelétrico, uma vez que o efeito Seebeck é um fenômeno de difusão e este por sua vez depende das substâncias envolvidas, assim podendo haver potenciais eletroquímicos que estão acarretando esse termo constante na hipótese 2.

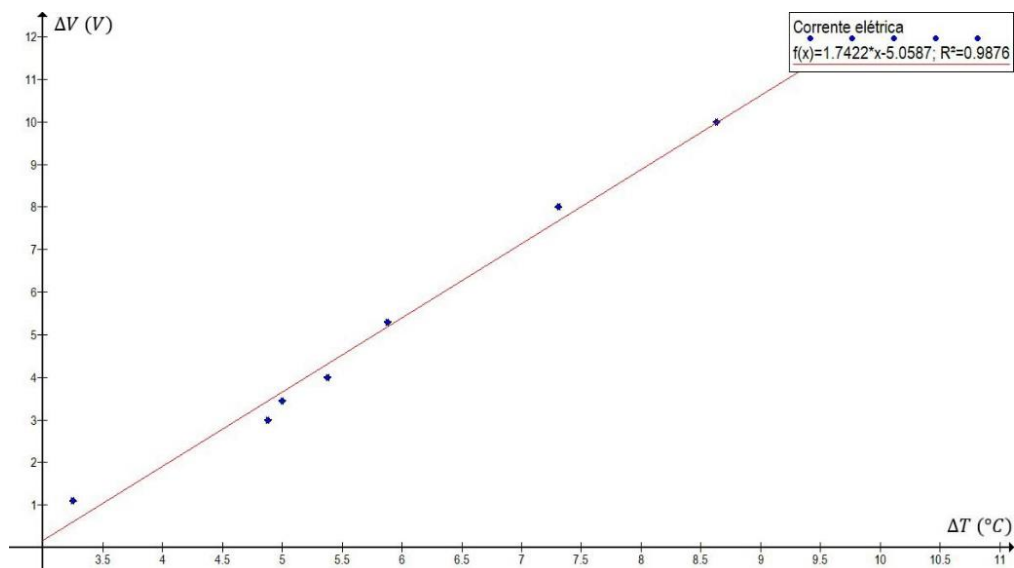
Com pequenas modificações na montagem do experimento pode-se dar continuidade no estudo a respeito do gerador termoelétrico. Conectando as saídas do amplificador com um amperímetro podemos estudar o comportamento da corrente gerada pelo gerador termoelétrico, e identificar uma tendência linear (Figura 4.4), indicando que a resistência do gerador é constante considerando os intervalos de temperatura utilizados no experimento ($\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Figura 4.3 -Ilustração da montagem utilizando amperímetro; (1) Cabo de alimentação do Arduino; (2) Placa Arduino Uno; (3) Matriz de contato (*protoboard*); (4) Resistor (4,7 K Ω); (5) Amplificador instrumental AD620; (6) Haste 1 do gerador termoelétrico; (7) Sensor de temperatura 1; (8) Haste 2 do gerador termoelétrico; (9) Sensor de temperatura 2; (10) Resistor (300 Ω); (11) Amperímetro



Fonte: Acervo do autor.

Figura 4.4 - Dados da corrente elétrica obtidos ao realizar o experimento



Fonte: Acervo do autor.

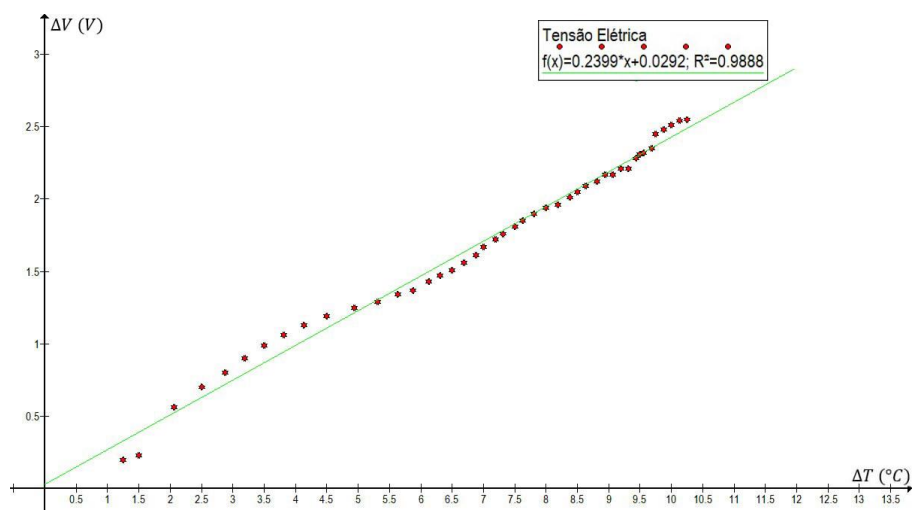
Repetindo a experiência de estudo da tensão elétrica utilizando o resistor de 300Ω (Figura 4.5), como na montagem com o amperímetro, assim obtendo tanto uma curva para a corrente quanto para a tensão elétrica dentro das mesmas condições. Mediante essas curvas pode-se determinar a potência elétrica (Figura 4.6), P_{el} , do nosso equipamento dado que:

$$P_{el} = V \cdot I \quad (4.1)$$

$$P_{el}(T) = (0,24 \cdot T + 0,03) \cdot (1,74 \cdot T - 5,06) \cdot 10^{-3} \quad (4.2)$$

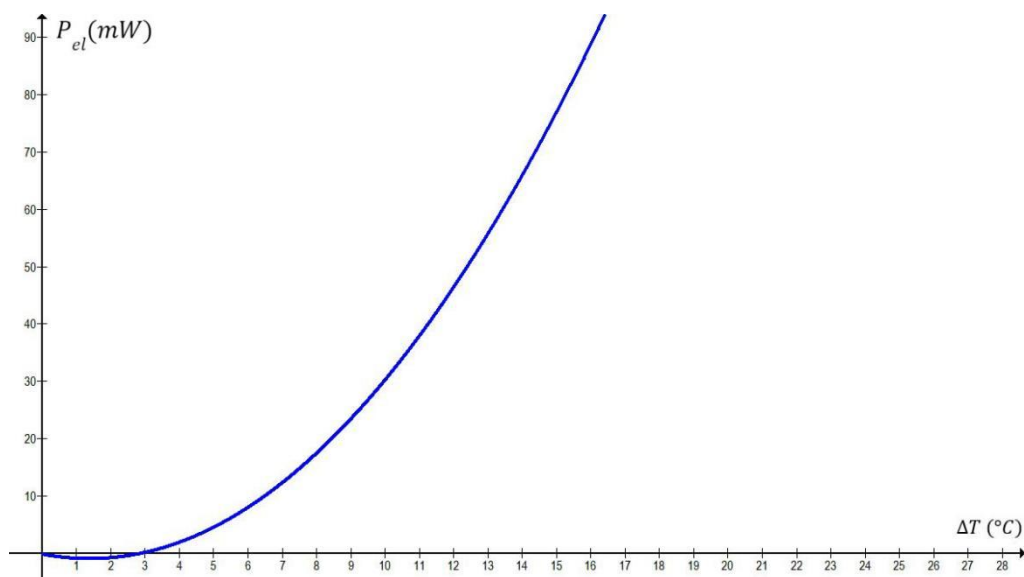
$$P_{el}(T) = (0,42 \cdot T^2 - 1,16 \cdot T - 0,15)(mW) \quad (4.3)$$

Figura 4.5 - Dados da tensão elétrica obtidos ao realizar o experimento com resistor de 300 Ω



Fonte: Acervo do autor.

Figura 4.6 - Curva de Potência elétrica segundo a equação (4.3)



Fonte: Acervo do autor.

Portanto, é possível observar que a potência elétrica do gerador termoeletrico utilizando dois termopares, do Tipo J, cresce proporcionalmente ao quadrado da diferença de temperatura. No entanto, existe um intervalo em que ela é negativa, segundo a equação (4.3), em função das constantes presentes nas curvas de corrente e de tensão elétrica. Considerando que utilizamos o calor

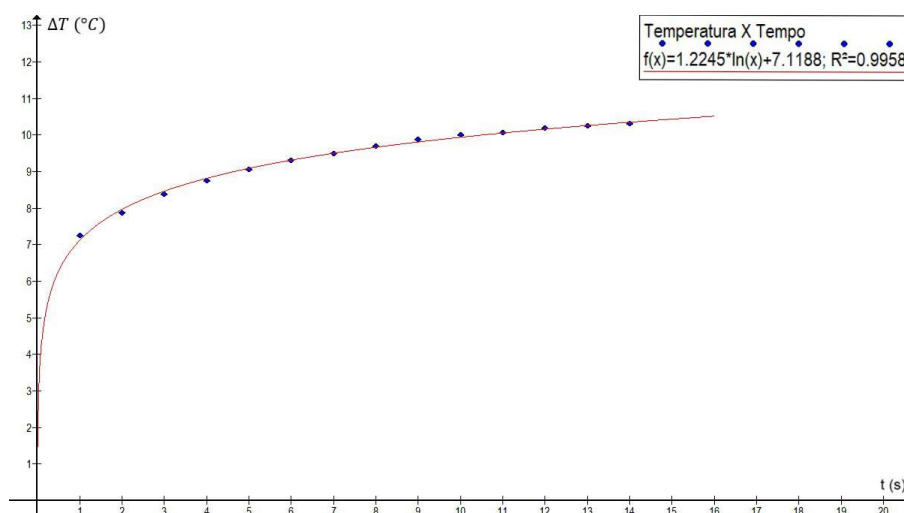
da água nos recipientes, é possível determinar a potência térmica cedida ao gerador, P_{ter} , da seguinte maneira:

$$P_{ter} = dQ/dt \quad (4.4)$$

$$P_{ter} = m_{\text{água}} \cdot c_{\text{água}} dT/dt \quad (4.5)^{26}$$

A função da temperatura com o tempo pode ser obtido a partir das medidas realizadas com o Arduino, uma vez que o intervalo de tempo para cada medida pode ser escolhido no código de programação utilizado na IDE²⁷ e que permitiu obter resultados que podem ser considerados adequados para o nível de avaliação proposta ($R^2 = 0,9948$). (Figura 4.7)

Figura 4.7 - Comportamento da temperatura em função do tempo



Fonte: Acervo do autor.

²⁶ A massa de água utilizada no experimento foi de 370 g, e considerado o calor específico da água como 4,19 J/g °C.

²⁷ Acrônimo para *Integrated Development Environment*.

$$T(t) = 1,22 \cdot \ln(t) + 7,12 \quad (4.6)$$

$$\frac{dT}{dt} = 1,22 \cdot \left(\frac{1}{t}\right) \quad (4.7)$$

É importante frisar que esse comportamento, equação (4.6), da temperatura com relação ao tempo, é característica para tempos pequenos, dado que, caso se analise o sistema para intervalos de tempo longos, será necessário considerar as perdas de calor do recipiente para o meio. Nessa situação foi considerando:

- ★ Intervalos de tempo pequeno o suficiente permitindo desconsiderar a perda de calor dos recipientes para o meio;
- ★ Intervalos de tempo longos o suficiente para podermos ter uma diferença de temperatura no equilíbrio dos sensores com o recipiente;

Nessa condição o rendimento (η) obtido foi de 0,02%, resultado que pode ser avaliado ao compará-lo com uma máquina térmica de Carnot. Supondo que esta funcione entre temperaturas 27,0 °C e 16,6 °C , ou seja, semelhante aos reservatórios utilizados no gerador termoelétrico, o rendimento (η_c) dela será de 3,46 %. Isso mostra que o rendimento do gerador termoelétrico corresponde será cerca de 170x menor que de uma máquina de Carnot sob as mesmas temperaturas.

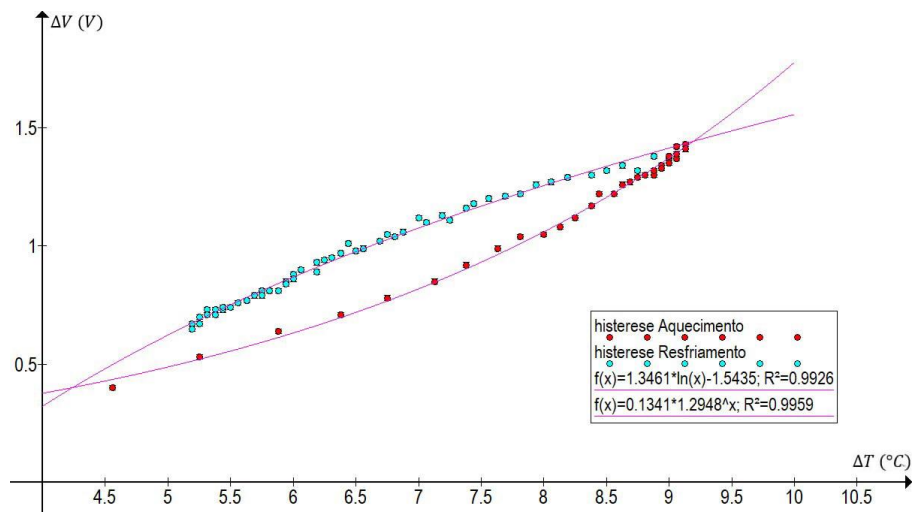
Este resultado pode justificar, por exemplo, o pouco uso dos geradores termoelétricos de termopares Tipo J como fonte de energia no dia a dia, visto que, ele aproveita pouca energia do sistema. Por outro lado, este fato pode

revelar o motivo dos termopares serem utilizados em maior parte como sensores, dado que ele utiliza uma parcela muito baixa da energia do sistema de alimentação.

É importante dizer que todos os dados apresentados foram obtidos utilizando o amplificador de instrumentação AD620, que apesar de possibilitar um ganho entre 1,5x e 1000x em relação ao valor da tensão de entrada, não possibilitou a determinação do valor de ganho de maneira precisa. No entanto, como pode ser observado o estudo Efeito Seebeck, não foi prejudicado, pelo contrário os resultados obtidos foram satisfatórios com o fenômeno.

Infelizmente, em função da pandemia de SARS-CoV-2, houve bastante dificuldade na realização das experiências e outros amplificadores não puderam ser testados. A utilização do AD620 ocorreu pela disponibilidade deste dentro deste período e não houve preferência na utilização de um tipo específico, caso o leitor tenha interesse em implementar o sistema deve levar em consideração que o amplificador deve proporcionar um ganho que seja suficiente para levar uma tensão de entrada no Arduino para valores que permitam a sua leitura.

Um resultado interessante obtido neste estudo ocorreu quando foram realizadas análises repetidas vezes e foi possível observar um comportamento compatível com uma histerese térmica (Figura 4.8), que de alguma maneira pode servir de impulso para um maior interesse dos estudantes sobre o tema.

Figura 4.8 - Resultado característico de uma curva de histerese

Fonte: Acervo do autor.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação ao compilado histórico do desenvolvimento científico no respectivo tema considero que ele pode ser uma boa fonte de consulta, servindo de elemento introdutório para fomentar o interesse sobre o fenômeno e conseqüentemente sobre a sua aplicação tecnológica. Essa afirmação se baseia na apresentação das ilustrações dos experimentos realizados e produzidos a partir dos escritos nos originais que não apresentam estas representações ou esquemas.

A discussão do tema também se torna importante a partir da necessidade de se buscar novas maneiras para geração de energia elétrica, que seja menos poluente e produzam impacto ao meio ambiente, como preconizado no item 7 da Agenda do Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015) e a discussão de geração de energia sustentável ser um tema presente na atual Base Nacional Comum Curricular (BRASIL, 2018).

Em relação a montagem experimental apesar de existirem empresas especializadas em desenvolver kits didáticos é fato que os valores são razoavelmente elevados e em função dos diversos cortes de verbas das universidades nos últimos anos (TENENTE, FIGUEIREDO, 2019; OLIVEIRA, 2021; KONCHINSKI, 2022) deve-se pensar como alternativa a montagem de sistemas alternativos baseados em plataformas de prototipagem.

Numa análise dos resultados encontrados, a versão de montagem experimental para estudo qualitativo ela se mostra versátil para sua aplicação tanto em nível superior quanto em turmas de ensino básico, portanto agregando aos licenciados um conhecimento que pode ser bastante útil na sua atuação

docente na atualidade como citado pelo Conselho Nacional de Educação (MEC, 2001):

A formação do Físico nas Instituições de Ensino Superior deve levar em conta tanto as perspectivas tradicionais de atuação dessa profissão, como novas demandas que vêm emergindo nas últimas décadas. Em uma sociedade em rápida transformação, como esta em que hoje vivemos, surgem continuamente novas funções sociais e novos campos de atuação, colocando em questão os paradigmas profissionais anteriores, com perfis já conhecidos e bem estabelecidos. Dessa forma, o desafio é propor uma formação, ao mesmo tempo ampla e flexível, que desenvolva habilidades e conhecimentos necessários às expectativas atuais e capacidade de adequação a diferentes perspectivas de atuação futura. (*ibidem*, p. 3)

Ainda que o equipamento para os estudos quantitativos seja de montagem razoavelmente simples, ele pode proporcionar aos participantes uma interação com uma ferramenta moderna de instrumentação - que no caso desta monografia foi placa de prototipagem Arduino - usada de maneira recorrente em trabalhos voltados ao ensino de física (HAHN, CRUZ, CARVALHO, 2019; SILVEIRA, CRUZ, 2020; HAHN *et al.*, 2021), mas que tem a possibilidade de ser utilizada em pesquisas aplicadas (SANTANA, DIAS, CRUZ, 2017). Ademais, com esta montagem foi possível estudar o efeito Seebeck, obtendo resultados que se aproximam do comportamento linear atribuído a este efeito, com um parâmetro de correção normalizado (R^2) de 0,9275 para uma curva de ajuste experimental segunda à relação de Seebeck. Além disso, ao utilizar um amperímetro, equipamento de fácil acesso em laboratórios universitários, foi possível verificar o comportamento linear da corrente elétrica mediante à variação de temperatura, assim podendo concluir que a resistência interna do gerador termoelétrico é constante dentro do intervalo de temperatura explorado.

Durante o processo de realização do trabalho obteve-se um resultado correspondente a uma histerese no comportamento do gerador, sendo tal resultado um motivador para novas discussões e trabalhos no tema. Vale ressaltar que os resultados, apesar de promissores, ainda necessitam de ajustes para sua completa implementação como recurso pedagógico de alguma das disciplinas práticas da UFRRJ, no entanto é importante frisar que esse fato não altera a importância do estudo e estabelece a possibilidade de que ocorra o desenvolvimento de um kit experimental no âmbito da instituição.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Deymes. **ROBÓTICA EDUCACIONAL COM ARDUINO COMO FERRAMENTA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE FÍSICA**. Sobral, CE. 2017.

ALONSO, Marcelo; FINN, Edward. **Física um curso universitário: Campos e Ondas**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. v. 2.

Amplificador de Instrumentação AD620 3V ~ 12V. **USINAINFO: Eletrônica e robótica**. Disponível em: < <https://is.gd/qmXRqP> >. Acesso em: 21 mar, 2022.

ANALOG DEVICES. **DATASHEET: AD620**. Disponível em: < <https://is.gd/vYzIKS> >. Acesso em: 21 mar, 2022.

ARDUINO. **Arduino**, set 2021. About. Disponível em: < <https://www.arduino.cc/en/about> >. Acesso em: 17 jan, 2022.

ARDUINO. **Datasheet: Arduino UNO R3**. Disponível em: < <https://is.gd/ophfNA> >. Acesso em: 21 mar, 2022.

ARDUINO. **OneWire**. 2022. Libraries. Disponível em: < <https://is.gd/bzfCM4> >. Acesso em: 11 abr, 2022.

ASHCROFT, Neil; MERMIN, David. **Física do estado sólido**. Orlando: Harcourt Colege Publishers, 1976.

BABOS, Flávio. Sensor de temperatura: LM35 | TMP36 | DS18B20 (Completo). **Flávio Babos**. 20 de jun 2020. Disponível em: < <https://is.gd/JVJVnO> >. Acesso em: 18 jan, 2022.

BISCUOLA, Gualter José *et al.* **Tópicos de Física: Eletricidade, Física Moderna, Análise dimensional**. 18. ed. São Paulo: Saraiva, 2012. v. 3. ISBN 978-85-02-17814-4.

BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: Ministério da Educação, 2018.

BROWN, Theodore *et al.* **Química: A Ciência Central**. 13. ed. São Paulo: Pearson Education de Brasil, 2016. ISBN 978854300565-2.

CALVACANTE, Patrícia; BALTAR, Carlos; SAMPAIO, João. Mica. *In: LUZ, Adão; LINS, Fernando. ROCHAS & MINERAIS INDUSTRIAIS: uso e especificações*. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2005. cap. 25, p. 531-543.

COELHO *et al.* Análise das características e dinâmicas dos termopares tipo J e K. **Scientific Electronic Archives**, v. 10. abril de 2017.

Constantan (ALM1171). **Instituto Newton C.Braga**. 26 de novembro de 2018. Disponível em: < <https://is.gd/zwG9Pk> >. Acesso em: 21 mar, 2022.

CRUZ, F. A. O.. Investigação em educação e a formação do professor. **APeDuC Journal - Research and Practices in Science, Mathemat**, v. 1, p. 178-185, 2020.

DESMOS. **O que fazemos**. 2022. quem somos. Disponível em: < <https://is.gd/l7gCXh> >. Acesso em: 11 abr, 2022.

ETTINGSHAUSEN, Albert. NERNST, Walther. Ueber das Auftreten electromotorischer kräfte in Metallplatten, welche von einem Wärmestrome durchflossen werden und sich im magnetischen felde befinden. **Annalen der Physik**, v. 265. p. 343-347, 1886.

GONDAR, Anelise. FERREIRA, Mergenfel. Desafio do uso do livro didático no ensino superior. **Pandaemonium**, v. 22, n. 37, p. 302 - 330, mai - ago, 2019.

GUIMARÃES, Fábio. Voltímetro, amperímetro e ohmímetro c/ Arduino. **Mundo Projetado: Site para aprendizes e hobbistas de eletrônica**. 10 de out, 2018. Disponível em: < <https://is.gd/ofojVF> >. Acesso em: 03 mai, 2022.

HAHN, M. D. ; CRUZ, F. A. O. ; CARVALHO, P. S. . Determining the Speed of Sound as a Function of Temperature Using Arduino. **Physics Teacher**, v. 57, p. 114-115, 2019.

HAHN, M. D. et al. Adapting a Solar Photovoltaic Panel Experiment for Blind Students. **Physics Education**, v. 56, p. 1-12, 2021.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. 9. ed. São Paulo: LTC, 2012. v. 3.

JOHANSEN, I. **Graph 4.4.2**, 2014. Disponível em: < <https://is.gd/pckax0> >, Acesso em: 13 abr. 2022.

KOMPATSCHER, Anton. KEMERINK, Martijn. On the concept of an effective temperature Seebeck ratchet. **Applied Physics Letters**. v. 119, 13 de julho de 2021.

KONCHINSKI, Vinicius. Universidades federais perdem 12% do orçamento durante governo Bolsonaro. **Brasil de Fato, Curitiba**, 16 de fevereiro de 2022. Disponível em: < <https://is.gd/urNaPv> >. Acesso em: 11 abr, 2022.

LENZ, E. Einige Versuche im Gebiete des Galvanismus. **Bulletin scientifiq. der St. Petersburger academie**, [S. l.], v. 126, n. 6, p. 342-349, 1838.

LIMA, Maria. CRUZ, Frederico. MACHADO, Natalia. IMAGINAÇÃO, CRIATIVIDADE e COMUNICAÇÃO: possível tripé para o ensino de física. **Ciência em Tela**, v. 13, 2020.

LOCKER, Anatol. Os 50 melhores projetos com Arduino – Inverno de 2021. **All3DP**, 2021. Disponível em: < <https://is.gd/Gu23HT> >. Acesso em: 18 jan, 2022.

MARTIN, Joshua. Computational Seebeck Coefficient Measurement Simulations. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**. Gaithersburg, Maryland, EUA. v. 117, 2 de maio de 2012.

MEC - Ministério da Educação. **PARECER CNE/CES 1.304/2001 - HOMOLOGADO**, 2001. Disponível em: <<https://is.gd/hCzb5j>>, Acesso em: 13 abr. 2022.

MELO, L. A. **Introdução à Instrumentação para o Ensino de Física - Atividades Experimentais no Ensino de Física: Lei de Hooke**, 2010. Disponível em:< <https://is.gd/idHPAY> >, Acesso em: 10 abr. 2022.

MILESBURTON. **Dallas Temperature Control Library**. 15 de janeiro de 2016. Disponível em: < <https://is.gd/xT8kQR> >. Acesso em: 11 abr, 2022.

MORTIMER, Eduardo *et al.* **MATÉRIA, ENERGIA E VIDA: Uma abordagem interdisciplinar: Materiais e Energia: Transformação e Conservação**. 1. ed. São Paulo: Editora scipione, 2020. v. 4.

OERSTED. Hans. EXPERIÊNCIA SOBRE O EFEITO DO CONFLITO ELÉTRICO SOBRE A AGULHA MAGNÉTICA. Copenhagen, 21 de julho 1820. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**. V. 10, p.115-122. 1986.

OLIVEIRA, Elida. **Cortes no orçamento de universidades federais poderão afetar mais de 70 mil pesquisas**. G1, 31 de maio de 2021. Disponível em:< <https://is.gd/cAbhf> >. Acesso em: 11 abr. 2022.

ONU. **Indicadores Brasileiros para Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: < <https://is.gd/lq51PO> >. Acesso em: 11 abr, 2022.

PELTIER, Par M. Nouvelles Expériences sur la Caloricité des courans électriques. *In: ANNALES de Chimie et de Physique*. Paris: [s. n.], 1834. v. LVI, p. 371-387.

PHYWE. **Semiconductor Thermogenerator**. Seebeck Effect. disponível em: <<https://is.gd/qXk5ox>>. Acesso em: 13 abr. 2022.

SANTANA, B. A. ; DIAS, C. M. ; CRUZ, F. A. O. . Construção e validação de um protótipo para estudo de flexão comandado pela plataforma Arduino®. **Revista De Engenharia e Tecnologia**, v. 9, p. 28-37, 2017.

SEEBECK, Thomas. **Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz**. *In: Abhandlungen der Königlichen, Akademie der Wissenschaften*. p. 265-373. Berlim, 1826.

SILVA, Andreia. **EXPERIMENTOS COM O ARDUINO® NAS AULAS DE FÍSICA**. Orientador: Profº Dr. Lázaro Luís de Lima Sousa. 2018. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Rio Grande do Norte, 2019.

SILVEIRA, M. X. S. ; CRUZ, F. A. O. . **Análise da variação da temperatura de corpos: uma proposta com uso da plataforma arduino**. Vivências (URI. ERECHIM), v. 16, p. 253-268, 2020.

TENENTE, Luiza; FIGUEIREDO, Patrícia. **Entenda o corte de verba das universidades federais e saiba como são os orçamentos das 10 maiores**. G1, 15 de maio de 2019. Disponível em: < <https://is.gd/40RSNC> >. Acesso em: 11 abr. 2022.

TERASAKI, Ichiro. Introduction to Thermoelectricity. *In*: SORRELL, Charles C. *et al.* **Electronic and Optical Materials: Materials for Energy Conversion Devices**. Sawston, Reino Unido: Woodhead Publishing Series, 2005. cap. 13, p. 339-357.

THOMSEN, Adilson. Medindo temperatura debaixo d'água com DS18B20. **FILIFELOP**. 2 de jun, 2015. Disponível em: < <https://is.gd/FqkZe5> >. Acesso em: 03 mai, 2022.

THOMSON, William. On a Mechanical Theory of Thermo-electric Currents. **Proceeding of the Royal Society of Edinburgh**, v.3, p. 91-98, 1857.

TOLEDO. Cláudio. DIAS. Maurício. **Ides e Programação**, 2015. Disponível em: < <https://is.gd/oTvgOp> >. Acesso em: 18 jan, 2022.

UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. **SIGAA - Sistema Integrado de Gestão de Atividades Acadêmicas**, 2022. Currículos. Disponível em: < <https://is.gd/imXtDU> >. Acesso em: 12 jan. 2022.

WENDLING, Marcelo. **Amplificadores Operacionais**. 2 ed. São Paulo: unesp, 2010.

YOUNG, Hugh; FREEDMAN, Roger. **Física: Eletromagnetismo**. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015. v. 3.

APÊNDICE A: Bibliotecas *DallasTemperature* e *OneWire*

Segue o código de programação, em linguagem C++, utilizado no IDE do Arduino para o funcionamento de dois sensores de temperatura DS18B20, à prova d'água.

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// O fio de dados é conectado no pino digital 2 no Arduino
#define ONE_WIRE_BUS 2

// Prepara uma instância oneWire para comunicar com qualquer outro dispositivo oneWire
OneWire pino(2);

// Passa uma referência oneWire para a biblioteca DallasTemperature
DallasTemperature barramento(&pino);
DeviceAddress sensor1;
DeviceAddress sensor2;
void setup(void)
{
  // Inicia a biblioteca
  Serial.begin(9600);
  barramento.begin();
  barramento.getAddress(sensor1, 0);
  barramento.getAddress(sensor2, 1);
}

void loop(void)
{
  // Manda comando para ler temperaturas
  barramento.requestTemperatures();

  // Escreve a temperatura em Celsius

  float temperatura1 = barramento.getTempC(sensor1);
  float temperatura2 = barramento.getTempC(sensor2);
  Serial.print(" Temp 1:");
  Serial.print(temperatura1);
  Serial.print(" graus ");
  Serial.print(" , Temp 2:");
  Serial.print(temperatura2);
  Serial.println(" graus");

  delay(1000);
}
```


APÊNDICE B: Código de funcionamento da Montagem 2

Segue o código de programação, em linguagem C++, utilizado no IDE do Arduino para o funcionamento e aquisição de dados da montagem 2 (GUIMARÃES, 2018).

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
OneWire pino(2);
DallasTemperature barramento(&pino);
DeviceAddress sensor1;
DeviceAddress sensor2;
float tensaoA3;
float aRef=5;
#define AMOSTRAS 12

void setup()
{
  //sensors.begin(); // Inicia a biblioteca
  Serial.begin(9600);
  barramento.begin();
  barramento.getAddress(sensor1, 0);
  barramento.getAddress(sensor2, 1);
}
float lePorta(uint8_t portaAnalogica) {
  float total=0;
  for (int i=0; i<AMOSTRAS; i++) {
    total += 1.0 * analogRead(portaAnalogica);
    delay(5);
  }
  return total / (float)AMOSTRAS;
}

void loop() {
  barramento.requestTemperatures();
  tensaoA3 = ((lePorta(A3) * aRef) / 1024.0);
  Serial.print(tensaoA3);
  Serial.print(" ");
  // barramento.requestTemperatures();
  float temperatura1 = barramento.getTempC(sensor1);
  float temperatura2 = barramento.getTempC(sensor2);
  Serial.println(temperatura2 - temperatura1);

  delay(1000);
}
```