

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA EM REDE NACIONAL
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

HARRYSON GUILHERME MORAES ANDRADE

**ABORDAGEM EXPERIMENTAL BASEADA NA TEORIA CONSTRUCIONISTA
PARA O ESTUDO DO EFEITO FOTOVOLTAICO UTILIZANDO UM
DISPOSITIVO DE RASTREAMENTO SOLAR COM ARDUÍNO**

São Luís – MA

2025

HARRYSON GUILHERME MORAES ANDRADE

**ABORDAGEM EXPERIMENTAL BASEADA NA TEORIA CONSTRUCIONISTA
PARA O ESTUDO DO EFEITO FOTOVOLTAICO UTILIZANDO UM
DISPOSITIVO DE RASTREAMENTO SOLAR COM ARDUÍNO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física em Rede Nacional (PROFIS), na Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Linha de pesquisa: processos de ensino e aprendizagem e tecnologias de informação e comunicação no ensino de física

Orientador: Prof. Dr. Edson Firmino Viana de Carvalho

São Luís – MA

2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Moraes Andrade, Harryson Guilherme.

ABORDAGEM EXPERIMENTAL BASEADA NA TEORIA
CONSTRUCIONISTA PARA O ESTUDO DO EFEITO FOTOVOLTAICO
UTILIZANDO UM DISPOSITIVO DE RASTREAMENTO SOLAR COM
ARDUÍNO / Harryson Guilherme Moraes Andrade. - 2025.
127 p.

Orientador(a): Edson Firmino Viana de Carvalho.
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Rede - Ensino de Física em Rede Nacional/ccet,
Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

1. Efeito Fotovoltaico. 2. Arduino. 3. Ensino de
Física. 4. Teoria Construcionista. I. Viana de Carvalho,
Edson Firmino. II. Título.

HARRYSON GUILHERME MORAES ANDRADE

**ABORDAGEM EXPERIMENTAL BASEADA NA TEORIA CONSTRUCIONISTA
PARA O ESTUDO DO EFEITO FOTOVOLTAICO UTILIZANDO UM
DISPOSITIVO DE RASTREAMENTO SOLAR COM ARDUÍNO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física em Rede Nacional (PROFIS), na Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada em: 29 / 05 / 2025

BANCA EXAMINADORA

Edson Firmino Viana de Carvalho
Doutor em Física – Universidade Federal do Maranhão
(Presidente)

Jerias Alves Batista
Doutor em Física – Universidade Federal do Maranhão
(Membro interno)

Tiago Nery Ribeiro
Doutor em Educação Matemática – Universidade Federal de Sergipe
(Membro externo)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Jeová Deus, cuja presença constante em minha vida me concedeu saúde e força. Sua orientação foi crucial para que eu pudesse enfrentar os desafios com paciência e perseverança, e seguir em frente mesmo nas horas mais difíceis. Sem Sua ajuda divina, nada disso teria sido possível.

Ao meu tio Andrade, que considero como um pai de coração, devo uma dívida de gratidão imensurável. Desde cedo, você foi a minha âncora educacional e a pessoa que, com sua força e sabedoria, moldou minha caminhada. Seu exemplo de vida, sempre pautado na ética, no amor ao próximo e na busca incessante pelo conhecimento, foi uma das maiores inspirações que já tive. Sua dedicação inabalável e seu apoio constante, mesmo nos momentos mais difíceis, foram fundamentais para que eu nunca desistisse dos meus sonhos. A educação exemplar que você me proporcionou, com paciência, carinho e sabedoria, moldou não apenas meu caráter, mas também minha visão de mundo. Obrigado por nunca ter desistido de mim, por sempre acreditar no meu potencial e por ser a luz que me guiou em tantos momentos desafiadores. Seu amor, conselhos e orientação são partes fundamentais da minha vida, e a cada passo que dou, carrego comigo tudo o que aprendi com você. Amo você profundamente e sou eternamente grato por tudo que fez por mim!

À minha mãe de sangue, Cleiciane, minha eterna fonte de apoio emocional e financeiro, dedico minha mais profunda gratidão e amor. Desde o início da minha caminhada, você sempre esteve ao meu lado, com uma presença marcante que me enche de coragem e determinação. Seus conselhos, sua força e sua dedicação inabalável me guiaram em cada etapa, mostrando que, mesmo diante dos maiores desafios, o amor de mãe é a maior fonte de energia que alguém pode ter. Você não apenas me incentivou a buscar conhecimento e a acreditar no meu potencial, mas também caminhou comigo em cada conquista, celebrando com orgulho cada pequeno ou grande avanço que alcancei. Te amo de todo meu coração!

À minha avó paterna, Lenita, dedico este agradecimento com todo o meu coração, reconhecendo o imenso papel que você desempenhou na minha vida desde o meu nascimento até a vida adulta. Sua presença foi fundamental, não apenas como cuidadora, mas como uma guia cheia de sabedoria e carinho. Desde a infância, você esteve ao meu lado, me apoiando emocionalmente e me orientando com paciência e amor. Lembro-me de ver sua força e dedicação enquanto trabalhava incansavelmente na feira, vendendo perfumes e itens de casa, sempre com uma resiliência admirável para garantir o nosso sustento e proporcionar o melhor para nossa família. Sua coragem e ética de trabalho são inspirações que carrego até hoje. O

amor que você sempre demonstrou por mim, a dedicação que teve para me criar e o apoio incondicional em todos os momentos da minha vida são preciosidades que me moldaram como pessoa. Sou imensamente grato por tudo o que fez e ainda faz por mim, e por ser a mãe que não tive, um alicerce de amor, sabedoria e força em minha vida. Amo você de maneira incondicional e eterna, com uma gratidão que palavras não podem expressar completamente.

Aos meus avós maternos, Nonato e Fátima, minha eterna gratidão por sempre demonstrarem carinho e bondade. Seus incentivos para buscar uma educação de qualidade e o orgulho que têm de minhas vitórias são um apoio constante em minha vida. Sua presença constante e amor são inestimáveis. Amo vocês profundamente!

À minha esposa Laura, minha eterna companheira e fonte inesgotável de amor e apoio, devo uma gratidão imensurável. Em cada etapa dessa jornada, sua presença foi como um farol que iluminou meu caminho, especialmente nos momentos em que a ansiedade e as incertezas pareciam maiores que eu. Você esteve ao meu lado nos dias mais difíceis, segurando minha mão e me incentivando a seguir em frente quando eu mesmo duvidava da minha capacidade. Não há palavras suficientes para expressar o quanto você significa para mim e o quanto sua presença foi essencial nessa trajetória. Obrigado por acreditar em mim, por celebrar comigo cada pequena vitória e, acima de tudo, por ser quem você é: a pessoa que faz tudo valer a pena. Amo-te mais do que as palavras podem descrever, e sou profundamente abençoado por compartilhar minha vida com você.

À minha sogra Bethânia, que se tornou uma grande amiga e me tratou como um filho, meu muito obrigado. Sua amizade e apoio foram extremamente valiosos durante todo esse período.

Ao meu irmão Richard, por ser um companheiro atencioso e carinhoso, e à minha cunhada Ana, que trouxe ao mundo o meu sobrinho Arthur, o meu maior amor, minha gratidão e admiração são infinitas. Richard, sua presença sempre foi uma fonte de apoio e inspiração, e sua dedicação à família me enche de orgulho. Ana, sou imensamente grato a você por ter gerado o Arthur, um presente tão precioso que trouxe ainda mais alegria e significado às nossas vidas.

Ao meu sobrinho Arthur, que com seu sorriso contagiante e sua inocência iluminou os meus dias, quero dizer que você é uma das maiores bênçãos que a vida me deu. Cada momento ao seu lado é uma lembrança valiosa, e meu amor por você não conhece limites. A vocês, Richard, Ana e Arthur, meu eterno carinho e um lugar especial em meu coração.

Às minhas irmãs Hagatta e Aylla, que, mesmo com sua pouca idade, demonstram uma maturidade e um carinho que me emocionam profundamente, minha eterna gratidão. Vocês sempre acreditaram em mim, mesmo nos momentos mais desafiadores, e foram minhas fiéis apoiadoras, enchendo meus dias de alegria e leveza.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edson Firmino, expresso minha eterna gratidão. Sua confiança em meu potencial e apoio incondicional foi essencial para meu sucesso acadêmico. Sua orientação, sempre sábia e encorajadora, ajudou-me a superar desafios e a alcançar meus objetivos. Sem sua dedicação e suporte, nada do que conquistei até aqui teria sido possível. Sou profundamente grato por tudo o que fez por mim e pela contribuição significativa que teve em minha jornada acadêmica.

Ao coordenador do polo, Prof. Dr. Eduardo Diniz, expresso minha sincera gratidão por todo o apoio e empenho dedicados. Sua assistência constante em momentos cruciais, especialmente nas solicitações para eventos, foi de grande importância para mim. Além disso, sou imensamente grato pelo esforço contínuo em tornar nosso ambiente acadêmico mais agradável e acolhedor. Muito obrigado por tudo o que fez e pela contribuição valiosa para minha trajetória.

Aos meus colegas acadêmicos, especialmente ao meu grande amigo Denilson Araújo, agradeço pelos momentos compartilhados, pelo apoio mútuo e pela confiança. Suas amizades e o companheirismo foram valiosos durante toda essa jornada.

A todos os professores do Polo 47 do MNPEF, agradeço sinceramente, em nome da Prof^a. Dr^a. Raisa Diniz, por sua contribuição essencial durante essa jornada. O ensino e o apoio de cada um foram fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal. Sou profundamente grato por todo o suporte e dedicação que proporcionaram, tornando esta experiência extremamente valiosa.

À Escola de Física do CERN, em especial ao coordenador Prof. Dr. Nelson Barrelo, sou muito grato pela oportunidade de conhecer o maior acelerador de partículas e de aprofundar meus estudos na física de partículas. Esta experiência foi fundamental para meu crescimento acadêmico e pessoal.

À minha querida amiga Beatriz, que sempre me apoiou e se tornou como uma irmã para mim, quero expressar minha profunda gratidão. Você esteve ao meu lado em tantos momentos, oferecendo apoio e carinho de forma que são difíceis de descrever. Sua ajuda e presença foram preciosas, e sou eternamente grato por tudo que você fez por mim. Muito obrigado!

Ao Prof. Thiago Braz, expresso minha gratidão pela confiança que depositou em meu trabalho e pela amizade que desenvolvemos. Sua influência foi significativa na minha formação profissional, e seu apoio foi crucial para meu crescimento. Saiba que você sempre terá um lugar especial em minha trajetória e que serei eternamente grato por tudo o que fez.

Por fim, a todos aqueles que, de alguma forma, me inspiraram, mesmo que indiretamente, e a todos os meus amigos, deixo minha mais profunda gratidão. Cada um de vocês desempenhou um papel essencial em minha jornada, seja através de palavras de

encorajamento, atos de apoio ou simplesmente com sua presença. Suas contribuições foram fundamentais para que eu chegasse até aqui, e o impacto de cada um de vocês é imensurável. Sou eternamente grato por todo o apoio, amizade e inspiração que recebi ao longo do caminho.

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

“A única habilidade competitiva de longo
prazo é a capacidade de aprender.”
Seymour Papert, 1960

RESUMO

Diante da crescente demanda por fontes de energia limpa, motivada tanto pela urgência ambiental quanto pelos altos custos da energia elétrica no Brasil, a energia solar surge como uma alternativa viável e sustentável. No entanto, o investimento inicial necessário para a instalação de sistemas fotovoltaicos ainda representa uma barreira significativa. Esta dissertação propõe o desenvolvimento e a aplicação de um dispositivo de rastreamento solar de baixo custo, controlado por Arduino, como ferramenta pedagógica para o ensino de Física no ensino médio. O objetivo principal é tornar o estudo da energia solar mais acessível, prático e envolvente, aliando teoria e prática por meio de uma abordagem construcionista. O dispositivo desenvolvido integra sensores de luz (LDRs) e motores que permitem acompanhar o movimento aparente do Sol, otimizando a captação de energia ao longo do dia e possibilitando sua replicação em ambientes educacionais. A pesquisa foi realizada com alunos do 2º ano do ensino médio de uma escola pública de tempo integral no município de Paço do Lumiar – MA. A metodologia adotada foi qualitativa e participativa, envolvendo aulas teóricas, construção colaborativa do protótipo, programação com Arduino e análise de dados coletados por meio de questionários, observações e relatórios. Os resultados indicaram que a proposta didática teve impacto significativo na aprendizagem dos estudantes, promovendo o engajamento, a autonomia, a motivação e a compreensão dos conceitos científicos relacionados à energia solar, ao efeito fotovoltaico e à automação. A análise dos dados, à luz da teoria construcionista de Seymour Papert, evidenciou que a construção ativa do conhecimento por meio da experimentação contribuiu para um aprendizado mais significativo, contextualizado e duradouro. A implementação do projeto não apenas facilitou a compreensão dos conteúdos físicos, como também desenvolveu habilidades práticas e socioemocionais entre os alunos, como a cooperação, a resiliência e o pensamento crítico. A experiência mostrou que atividades práticas e contextualizadas, quando integradas ao currículo escolar, podem tornar o ensino de Física mais atrativo e relevante.

Palavras-chave: Efeito Fotovoltaico. Arduino. Ensino de Física. Teoria Construcionista.

ABSTRACT

to install photovoltaic systems still represents a significant barrier. This dissertation proposes developing and applying a low-cost solar tracking device controlled by Arduino as a pedagogical tool for teaching Physics at the high school level. The main objective is to make the study of solar energy more accessible, practical, and engaging, combining theory and practice through a constructionist approach. The developed device integrates light sensors (LDRs) and motors that allow it to follow the Sun's apparent movement, optimizing energy capture throughout the day and making it possible to replicate the system in educational settings. The research was conducted with 2nd-year high school students from a full-time public school in Paço do Lumiar, Maranhão. The adopted methodology was qualitative and participatory, involving theoretical lessons, collaborative construction of the prototype, programming with Arduino, and data analysis collected through questionnaires, observations, and student reports. The results indicated that the didactic proposal significantly impacted student learning, promoting engagement, autonomy, motivation, and a deeper understanding of scientific concepts related to solar energy, the photovoltaic effect, and automation. The data analysis, grounded in Seymour Papert's constructionist theory, showed that the active construction of knowledge through experimentation contributed to a more meaningful, contextualized, and lasting learning experience. The implementation of the project not only facilitated the understanding of physical concepts but also helped develop practical and socio-emotional skills among the students, such as cooperation, resilience, and critical thinking. The experience demonstrated that when integrated into the school curriculum, practical and contextualized activities can make Physics teaching more attractive and relevant.

Keywords: Photovoltaic Effect. Arduino. Physics Teaching. Constructionist Theory.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tabela do INMETRO para a Seleção de Painéis Fotovoltaicos.....	33
Quadro 2 – Cronograma de execução da pesquisa	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rastreador de energia solar.....	16
Figura 2 - Princípio básico de uma célula fotovoltaica de tipo N-P.....	23
Figura 3 - Como funciona uma célula fotovoltaica	25
Figura 4 - Luz como onda eletromagnética	26
Figura 5 - Movimento aparente do Sol.....	29
Figura 6 - Rastreadores solares de eixo único	30
Figura 7 - Rastreadores solares de eixo único e duplo	30
Figura 8 – Esquema de geração de energia solar fotovoltaica	32
Figura 9 – Disposição completa do kit com Arduino Uno, servomotores, sensores LDR e painel solar	46
Figura 10 – Materiais para a montagem do rastreador	47
Figura 11 – Alunos realizando a montagem do protótipo	48
Figura 12 – Vista da posição dos servos motores.....	49
Figura 13 – Funcionamento das abas sombreadoras sobre os sensores LDR	50
Figura 14 – Protótipo pronto com as conexões	51
Figura 15 – Plataforma Arduino IDE aberta para o carregamento do código.....	51
Figura 16 – Esquema de ligação das conexões do sistema.....	52
Figura 17 – Porcentagem de alunos participantes por idade	58
Figura 18 – Respostas à Questão 1	58
Figura 19 – Respostas à Questão 2	59
Figura 20 – Respostas à Questão 3	60
Figura 21 – Respostas à Questão 4.....	60
Figura 22 – Respostas à Questão 5	61
Figura 23 – Primeira aula: introdução a pesquisa.....	64
Figura 24 – Segunda aula de fundamentação teórica	65
Figura 25 – Terceira aula: início do desenvolvimento do dispositivo.....	66
Figura 26 – Quarta aula: desenvolvimento do dispositivo	66
Figura 27 – Quinta aula: aplicação prática em sala de aula.....	67
Figura 28 – Refinamento do protótipo	68
Figura 29 – Sétima aula: implicações pedagógicas do uso do dispositivo de rastreamento solar	69
Figura 30 – Aula final: apresentação da prática desenvolvida em evento científico	69

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 CONTEÚDOS FÍSICOS E PRINCIPAIS CONCEITOS NO ESTUDO DO EFEITO FOTOVOLTAICO COM DISPOSITIVOS DE RASTREAMENTO SOLAR	20
2.1 Princípios do efeito fotovoltaico e placas solares.....	20
2.2 Luz como onda eletromagnética.....	25
2.3 Movimento solar e sua influência na geração de energia solar	28
2.4 Conversão de energia e eficiência energética.....	31
2.5 Óptica e eficiência na conversão de energia solar	34
2.6 Circuitos elétricos e componentes eletrônicos	37
2.7 Importância das energias renováveis.....	39
3 IMPLICAÇÕES PEDAGÓGICAS DO USO DE DISPOSITIVOS DE RASTREAMENTO SOLAR NO ENSINO DA FÍSICA	42
3.1 A interseção entre tecnologia e construcionismo	42
4 ASPECTOS METODOLÓGICOS	45
4.1 Levantamento teórico inicial	45
4.2 Aulas teóricas e recursos didáticos.....	45
4.3 Construção do protótipo	46
4.3.1 Passos para a Montagem da Estrutura.....	47
4.3.2 Passos para a Instalação dos Servos.....	48
4.3.3 Instalação dos Sensores LDR.....	49
4.4 Código do projeto.....	52
4.5 Coleta e análise de dados.....	54
4.6 Avaliação do impacto da metodologia	54
4.7 Cronograma de execução da pesquisa.....	55
5 DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO DIDÁTICA E ANÁLISE DOS QUESTIONÁRIOS	57
5.1 Análise do questionário diagnóstico.....	57
5.2 Aplicação prática da proposta didática.....	64
5.3 Análise dos relatórios após a implementação do projeto: uma perspectiva construcionista	70
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
REFERÊNCIAS	77
Apêndice A – Código de funcionamento	80
Apêndice B – Questionário diagnóstico	82
Apêndice C – Questionário final	83

Apêndice D – Recurso educacional.....	84
---------------------------------------	----

1 INTRODUÇÃO

A utilização de fontes de energia renováveis tornou-se uma necessidade urgente devido aos problemas ambientais enfrentados atualmente. Nesse contexto, Garcia e Soltau (2021), afirmam que a energia solar se destaca como um campo de estudo extremamente relevante. A crescente preocupação com fontes de energia sustentável fez da energia solar uma alternativa viável. Os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM) reconhecem a importância de abordar temas como a energia solar no contexto da formação dos estudantes, destacando a relevância de fontes de energia renováveis no contexto de sustentabilidade e preservação ambiental. A energia solar é vista como uma alternativa promissora frente aos desafios globais, e seu estudo oferece aos alunos uma compreensão interdisciplinar, envolvendo conceitos de física, química, geografia e matemática, conectando a teoria com aplicações práticas no cotidiano. Além de capacitar os estudantes com conhecimentos científicos e tecnológicos, o estudo da energia solar os prepara para refletir sobre questões ambientais e sociais, incentivando uma postura ética e responsável em relação ao uso dos recursos naturais, e contribuindo para o desenvolvimento de uma sociedade mais sustentável (BRASIL, 1998). No entanto, segundo Aroca (2009) o estudo da energia solar ainda é pouco explorado nas escolas, o que representa uma lacuna significativa na educação científica. Este trabalho buscou enriquecer a formação dos alunos através de uma abordagem experimental fundamentada na Teoria Construcionista. Para isso, foi explorado o estudo do efeito fotovoltaico utilizando um dispositivo de rastreamento solar controlado por Arduino.

De acordo com Coriolano e de Santana Souza (2020), atualmente, existem métodos cada vez mais aprimorados para otimizar a captura de energia solar, conhecidos como sistemas de rastreamento solar. Esses sistemas, que incluem os rastreadores solares (Figura 1), são dispositivos mecânicos e eletrônicos especialmente projetados para orientar os painéis solares, ou outros dispositivos fotovoltaicos, em direção ao sol ao longo do dia. Essa movimentação contínua permite que os painéis permaneçam sempre alinhados com a posição do sol, maximizando sua eficiência na captura de energia. Segundo Queiroz *et al.* (2018), dependendo do design do sistema, ele pode contar com um ou dois eixos de movimento, sendo o sistema de dois eixos capaz de proporcionar um alinhamento mais preciso, garantindo que os raios solares incidam perpendicularmente sobre as placas fotovoltaicas. Esse alinhamento otimizado contribui diretamente para a maior eficiência na conversão da energia solar em eletricidade, resultando em um aumento significativo na produção de energia em comparação aos sistemas fixos, que não acompanham o movimento solar durante o dia.

Figura 1 - Rastreador de energia solar.



Fonte: PCBPortugal (2024).

O objetivo principal dos rastreadores solares é maximizar a captura de luz solar e, consequentemente, aumentar a eficiência e a produção de energia dos sistemas solares. Barzotto *et al.* (2019) afirmam que os sistemas fotovoltaicos são responsáveis pela captura da energia proveniente da radiação solar, o que é realizado por meio de módulos fotovoltaicos, ou placas solares, que convertem essa energia em eletricidade. Ainda segundo Barzotto *et al.* (2019), este tipo de sistema de captação e conversão de radiação solar tem experimentado um crescimento significativo nos últimos anos e módulos solares geram a maior quantidade de energia quando os raios solares incidem sobre eles de forma perpendicular.

A construção do protótipo descrito neste trabalho foi baseada no método de Straub (2020), que propõe maneiras de otimizar o aproveitamento da energia solar. O projeto desenvolvido por ele visa verificar a posição do sol e ajustar o painel solar para que fique diretamente alinhado com ele. Utilizando quatro sensores LDR (Light Dependent Resistor), a posição do sol é rastreada, e dois servos motores controlam os movimentos horizontais e verticais do painel. Todo o sistema é gerenciado por um Arduino UNO, que lê os dados dos sensores, interpreta as informações e executa os movimentos necessários para manter o painel solar na posição ideal. (STRAUB, 2020)

No ensino de física, é evidente que muitas vezes faltam aplicações práticas e experiências de laboratório interativas que realmente envolvam os alunos. (SILVA & MACÊDO, 2023). A carga horária reduzida da disciplina de Física nas escolas estaduais dificulta o trabalho dos professores, que enfrentam salas de aula superlotadas, um extenso conteúdo a ser ensinado e tempo limitado para abordá-lo (RAIMUNDO, 2013). A maioria das escolas públicas não possui laboratórios de Ciências, e muitas vezes a infraestrutura não oferece um espaço adequado para a realização de aulas práticas. Esses desafios impedem os professores

de oferecer aulas diferenciadas, resultando na falta de interesse de muitos alunos pela disciplina, exemplifica Raimundo (2013). O desenvolvimento de um dispositivo de rastreamento solar com Arduino oferece uma oportunidade única para preencher essa lacuna, proporcionando uma experiência prática e tangível para os estudantes. Esse trabalho não se limitou a ensinar conceitos teóricos; ele os ilustra de maneira concreta, inspirando e motivando o aprendizado.

Embora haja estudos relacionados à energia solar e dispositivos de rastreamento solar, a maioria deles se concentra na engenharia e na eficiência dos sistemas. Rosa *et al.* (2012) falam que desde a década de 60, o ensino de Física vem se destacando como um campo promissor de pesquisa, com seus aportes teóricos vinculados a diversas áreas do conhecimento, como filosofia, psicologia cognitiva e epistemologia. Portanto, é de suma importância explorar o potencial pedagógico dos dispositivos de rastreamento solar no ensino de Física. Esta abordagem representa uma contribuição original para a literatura educacional, preenchendo uma lacuna nas pesquisas existentes e abrindo novas perspectivas para o ensino da disciplina.

A pesquisa em física solar e de dispositivos de rastreamento solar não só impacta o ensino, mas também está intimamente ligada à busca por fontes de energia sustentável. Promover a compreensão desses conceitos entre os estudantes é essencial para a conscientização ambiental e para a formação de futuros cidadãos que contribuirão para a sustentabilidade do planeta. Da Silva (2019) explica que a Física, enquanto disciplina que estuda os fenômenos naturais, pode ajudar os alunos a entender como esses fenômenos estão interligados ao tema da energia, agregando significado ao conteúdo ensinado, e isso não apenas gera uma aprendizagem que tem o poder de ser significativa para o estudante, mas também fomenta o respeito pelo consumo consciente de energia.

A escolha deste objeto de estudo foi motivada por uma paixão pessoal pela captação de energia solar e pela crença de que a educação desempenha um papel fundamental na disseminação do conhecimento científico. O desejo de inspirar estudantes e tornar a física acessível e compreensível para um público amplo é uma força motriz por trás desta pesquisa.

O objetivo principal desse trabalho foi ensinar conceitos do efeito fotovoltaico por meio da construção de um sistema de rastreamento solar, utilizando Arduino.

Especificamente os objetivos desta pesquisa são:

- Projetar e construir um dispositivo de rastreamento solar que seja de baixo custo, de fácil replicação e que possa ser utilizado em ambientes educacionais.
- Integrar sensores de luz e motores controlados por Arduino no dispositivo para garantir um rastreamento preciso do movimento solar.

- Testar e validar o dispositivo em um ambiente educacional, avaliando sua eficácia na melhoria da compreensão dos estudantes sobre os conceitos de física solar.
- Analisar o impacto do dispositivo no aprendizado, na motivação dos estudantes e na construção do conhecimento relacionado à energia solar.
- Divulgar os resultados da pesquisa para a comunidade educacional e científica, compartilhando as descobertas e lições aprendidas.
- Fomentar o uso de abordagens inovadoras e práticas pedagógicas no ensino da física solar em outras instituições de ensino.

Portanto, esta pesquisa se destaca por sua combinação de relevância educacional, inovação no ensino, contribuição para a pesquisa existente e implicações sociais e ambientais. Ao explorar o Ensino de Física por meio do desenvolvimento de um dispositivo de rastreamento solar com Arduino, esta pesquisa busca preencher uma importante lacuna no ensino de física e promover a compreensão e o interesse dos estudantes por fontes de energia sustentável e pela ciência em geral.

A metodologia desta pesquisa está ancorada na Teoria Construcionista de Seymour Papert. Essa abordagem valoriza a construção ativa do conhecimento pelos alunos, permitindo que eles se envolvam diretamente na criação e manipulação de dispositivos tecnológicos. Através da construção e uso do dispositivo de rastreamento solar com Arduino, os alunos não apenas aprendem sobre os conceitos de física solar, mas também desenvolvem habilidades práticas e técnicas que são essenciais para o aprendizado significativo e duradouro.

A estrutura desta dissertação está organizada em seis capítulos, além dos apêndices e das referências. No Capítulo 2, são apresentados os conteúdos físicos fundamentais para o entendimento do efeito fotovoltaico em dispositivos de rastreamento solar, incluindo princípios básicos das placas solares, a natureza da luz, o movimento solar, a conversão de energia e aspectos de eficiência, além de circuitos elétricos e a importância das fontes renováveis. O Capítulo 3 discute as implicações pedagógicas do uso de tecnologias educacionais, como os rastreadores solares, no ensino de Física, com ênfase na abordagem construcionista. O Capítulo 4 descreve os aspectos metodológicos da pesquisa, detalhando as etapas do levantamento teórico, o planejamento e a aplicação da proposta didática, a construção do protótipo, a programação do sistema, a coleta e análise dos dados, e a avaliação do impacto da metodologia adotada. No Capítulo 5, apresenta-se a descrição da intervenção didática e a análise dos questionários aplicados, abordando desde o diagnóstico inicial até os resultados obtidos com a prática pedagógica, interpretados à luz do construcionismo. Por fim, o Capítulo 6 reúne as

considerações finais, destacando as principais contribuições do estudo para o ensino de Física e para a formação de estudantes críticos, criativos e engajados com as questões científicas e ambientais contemporâneas.

2 CONTEÚDOS FÍSICOS E PRINCIPAIS CONCEITOS NO ESTUDO DO EFEITO FOTOVOLTAICO COM DISPOSITIVOS DE RASTREAMENTO SOLAR

No estudo do efeito fotovoltaico e sua aplicação em dispositivos de rastreamento solar, três conceitos físicos são fundamentais. Primeiro, o **efeito fotovoltaico**, que é o processo pelo qual a luz solar é convertida em eletricidade através da excitação de elétrons em materiais semicondutores, como o silício. Em segundo lugar, o rastreamento solar utiliza **princípios de cinemática e dinâmica** para ajustar a posição dos painéis solares, maximizando a captura de luz ao longo do dia e aumentando a eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Finalmente, o **efeito da temperatura** sobre o desempenho das células solares é crucial, pois o aumento da temperatura pode reduzir a eficiência elétrica das células, tornando importante a gestão térmica nos projetos de rastreamento para manter a eficiência ideal. Iremos ver alguns desses princípios abaixo.

2.1 Princípios do efeito fotovoltaico e placas solares

Em 1839, Alexandre Edmund Becquerel fez uma descoberta fundamental ao observar o efeito fotovoltaico pela primeira vez. Durante seus experimentos, Becquerel notou que, quando placas metálicas de platina ou prata eram imersas em um eletrólito e expostas à luz, surgia uma pequena diferença de potencial elétrico. Esta observação inicial, descrita por Rocha (2019), marcou o início da compreensão de como a luz pode ser convertida em eletricidade, estabelecendo as bases para o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica moderna.

Andrade (2023) explica que esse fenômeno ocorre em materiais semicondutores, como o silício, e permite a conversão da luz solar em eletricidade. Apesar da descoberta inicial por Becquerel, foram necessárias várias décadas para o desenvolvimento de dispositivos práticos que aproveitassem plenamente essa propriedade dos semicondutores.

O Laboratório Nacional de Energia Renovável (*National Renewable Energy Laboratory* – NREL, 2021) detalha que a energia dos fótons da luz solar excita elétrons em um semicondutor, promovendo sua movimentação para a banda de condução e gerando corrente elétrica. Esse deslocamento dos elétrons resulta em eletricidade utilizável, que pode ser armazenada em baterias ou usada diretamente para alimentar equipamentos. A eficiência dessa conversão depende tanto da qualidade do material semicondutor quanto da estrutura do dispositivo fotovoltaico.

A Agência Internacional de Energia Renovável (*International Renewable Energy Agency* – IRENA, 2021) reporta que a eficiência média dos módulos solares atualmente disponíveis é de aproximadamente 22%, com alguns módulos de alta eficiência alcançando até

24%. A previsão é de que a capacidade global de geração de energia solar fotovoltaica continue crescendo significativamente, impulsionada pelo avanço tecnológico que busca aumentar a eficiência e reduzir os custos da conversão da luz solar em eletricidade. No entanto, ainda há um vasto potencial energético a ser aproveitado. A potência total da luz solar que atinge a Terra é estimada em cerca de 100.000 terawatts (TW), enquanto, em 2022, a capacidade instalada mundial atingiu 1 TW. Projeções indicam que esse valor poderá mais que dobrar, alcançando 2,3 TW até 2025. Esses dados evidenciam o grande potencial de expansão da energia solar e a possibilidade de converter uma parcela ainda maior dessa fonte abundante em eletricidade sustentável.

A energia solar fotovoltaica tem sido amplamente aplicada em sistemas que utilizam módulos compostos por células fotovoltaicas, tornando-se cada vez mais comum, especialmente em regiões com alta radiação solar, como a Austrália e a Califórnia (Andrade, 2023). Esses sistemas organizam as células fotovoltaicas em painéis solares, conectados em série e paralelo para otimizar a tensão e a corrente elétrica gerada. A eletricidade produzida pode ser utilizada imediatamente ou armazenada em baterias para uso posterior.

Segundo Da Silva (2019), a energia solar fotovoltaica representa uma fonte significativa de eletricidade renovável, destacando-se por seu baixo impacto ambiental. A quantidade de eletricidade gerada é diretamente proporcional à intensidade da radiação solar recebida pelos painéis solares, ou seja, quanto maior a radiação, maior a produção de energia. Mesmo em condições de baixa luminosidade, como em dias nublados ou chuvosos, os sistemas fotovoltaicos continuam gerando eletricidade, embora em menor intensidade devido à redução da luz solar disponível. Esse processo ocorre porque a luz solar, composta por fótons, interage com o material semicondutor das células fotovoltaicas, estimulando o movimento dos elétrons e gerando eletricidade, fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico (DA SILVA, 2019).

As células solares, ou células fotovoltaicas, são dispositivos essenciais na conversão da luz solar em eletricidade. De acordo com Solar (2024), elas são fabricadas com materiais semicondutores, como o silício cristalino, desempenhando um papel crucial na geração de energia solar, que se destaca como uma alternativa sustentável e de menor impacto ambiental em comparação com fontes de energia convencionais.

Uma célula solar típica é composta por uma camada de silício cristalino, material amplamente utilizado em dispositivos fotovoltaicos devido às suas propriedades semicondutoras e à sua abundância (MATAN, 2023). O silício, quando dopado com elementos como boro e fósforo, forma uma junção p-n, essencial para a conversão da energia solar em eletricidade. O dopamento com boro cria a camada tipo p, caracterizada por uma deficiência de

elétrons (carga positiva), enquanto o dopamento com fósforo gera a camada tipo n, com um excesso de elétrons (carga negativa). A interação entre essas camadas estabelece um campo elétrico na região da junção p-n, responsável por separar e direcionar as cargas elétricas geradas pela luz solar, resultando na produção de corrente elétrica.

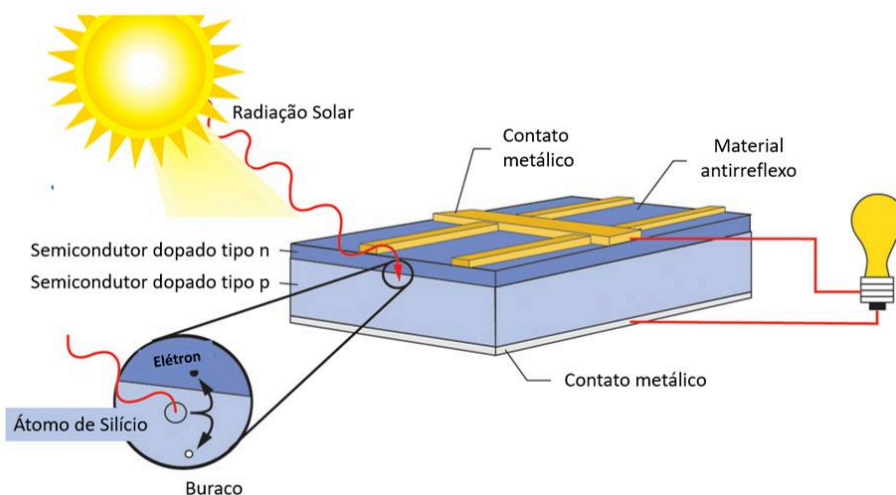
Quando a luz solar incide sobre a célula, os fótons da luz energizam os elétrons presentes na junção p-n, liberando-os dos átomos no material semiconductor. Esse processo é crucial para a geração de eletricidade, mas é importante esclarecer que a geração de corrente elétrica não ocorre pelo simples "salto" dos elétrons da banda de valência para a banda de condução, como é frequentemente descrito de forma simplificada. Na realidade, a corrente elétrica é gerada pelo movimento dos elétrons que são liberados dentro da região da junção p-n. O campo elétrico gerado pela diferença de dopagem entre as camadas p e n orienta esses elétrons a se moverem em uma direção específica, enquanto as lacunas (que são as "falta" de elétrons na camada p) se movem na direção oposta, formando uma corrente elétrica. Segundo Solar (2024), esse movimento ordenado de elétrons e lacunas é o que resulta na geração de eletricidade útil para o consumo.

A banda de valência e a banda de condução são conceitos fundamentais para entender o comportamento dos elétrons na célula solar. A banda de valência refere-se à energia dos elétrons que estão ligados aos átomos, enquanto a banda de condução refere-se à energia dos elétrons que foram liberados e agora estão livres para se mover pelo material semiconductor. No entanto, nem todos os elétrons gerados pela luz solar contribuem para a corrente elétrica. Apenas os elétrons que são liberados dentro da região da junção p-n e que são movidos pelo campo elétrico para as trilhas metálicas são os responsáveis pela corrente elétrica. Já os elétrons que são gerados fora da junção p-n rapidamente se recombinam com os átomos de silício, retornando para sua posição original na banda de valência e não contribuindo para a geração de corrente útil.

Além disso, dentro da junção p-n, existe uma região denominada camada de *depleção*. Nessa região, ocorre a recombinação dos elétrons da camada n e das lacunas da camada p, formando uma barreira elétrica. A camada de *depleção* é fundamental, pois impede que os elétrons e as lacunas se recombinem imediatamente, permitindo que eles se movam em direções opostas, sob a influência do campo elétrico. O campo elétrico gerado pela diferença de dopagem separa as cargas, forçando os elétrons a se moverem em direção à camada n, enquanto as lacunas se deslocam em direção à camada p. Esse processo de separação e movimentação das cargas gera uma corrente elétrica, que pode ser coletada pelas trilhas metálicas localizadas na

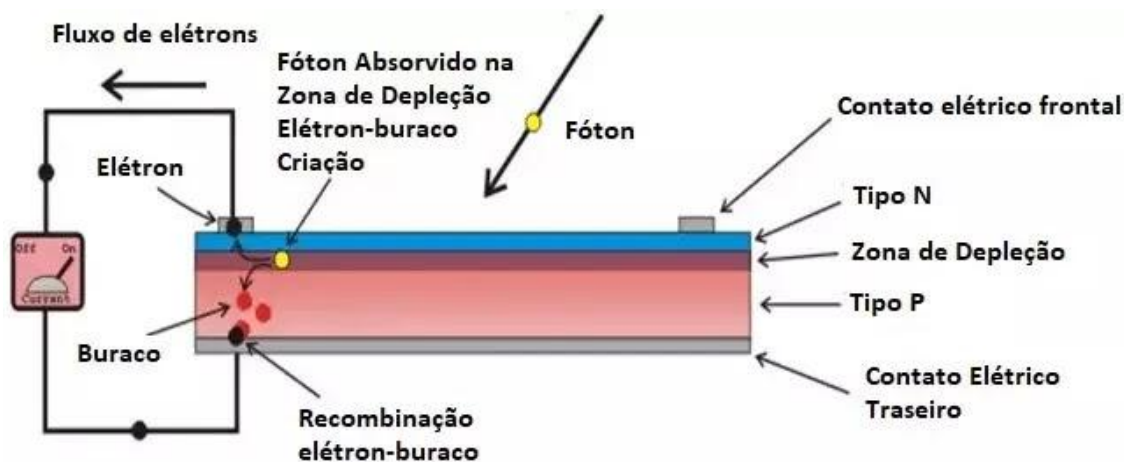
superfície da célula solar. Assim, a corrente elétrica gerada pela célula solar depende da movimentação ordenada dos elétrons e lacunas, facilitada pelo campo elétrico na junção p-n.

Figura 2 - Princípio básico de uma célula fotovoltaica de tipo N-P



Fonte: Carvalho (2021).

Figura 3 - Princípio básico de uma célula fotovoltaica de tipo N-P



Fonte: Coelho (2012).

A eficiência das células solares, que mede a proporção da energia solar convertida em eletricidade, tem avançado significativamente com o desenvolvimento de novas tecnologias de materiais e processos de fabricação. Matan (2023) aponta que as células solares modernas podem alcançar eficiências superiores a 20%, refletindo um avanço considerável em relação aos primeiros modelos de células solares. No entanto, o limite teórico máximo de eficiência para células solares de silício, conhecido como o limite de Shockley-Queisser, é de cerca de 33,7%. Este limite é uma referência baseada nas propriedades do material, que estabelece a

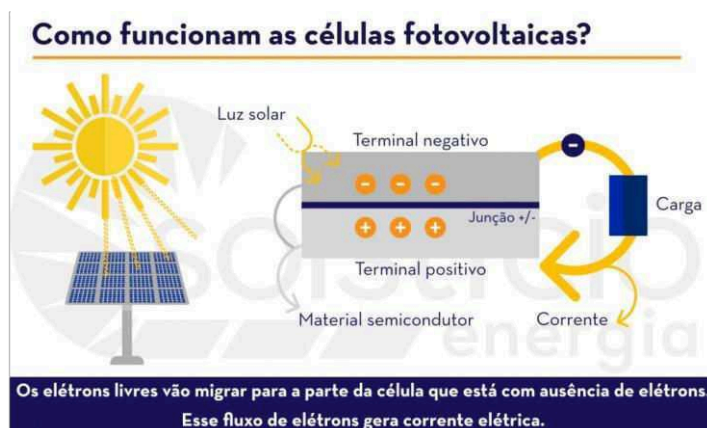
máxima quantidade de luz solar que pode ser convertida em eletricidade de maneira eficiente. Embora as células de silício sejam amplamente utilizadas, outros materiais semicondutores, como telureto de cádmio e arsenieto de gálio, também são empregados, oferecendo diferentes níveis de eficiência e custo, dependendo das aplicações específicas (Solar, 2024).

As células solares individuais são agrupadas em módulos fotovoltaicos, comumente conhecidos como painéis solares. De acordo com Solar (2024), para formar um módulo, dezenas de células solares são conectadas em série através de faixas condutoras finas, formando um circuito que permite a geração de eletricidade. Esse arranjo em série é fundamental para aumentar a tensão do sistema, permitindo que a eletricidade gerada pelas células seja transmitida de forma eficiente. Para proteger as células solares e garantir sua durabilidade, os módulos são cobertos com uma camada de vidro temperado antirreflexo, que reduz as perdas de luz e aumenta a eficiência da captura da radiação solar. Além disso, os módulos são montados em uma moldura de alumínio, que oferece resistência estrutural, enquanto a parte traseira do módulo possui uma caixa de junção equipada com cabos condutores, permitindo a conexão dos módulos em série.

Uma parte crucial do sistema fotovoltaico é o inversor solar, que converte a corrente contínua (CC) gerada pelas células solares em corrente alternada (CA), compatível com a rede elétrica e os dispositivos residenciais. Esse processo de conversão é fundamental para o uso da energia gerada pelos módulos solares em sistemas residenciais ou comerciais. De acordo com Matan (2023), os inversores solares têm evoluído com o tempo, permitindo maior eficiência e menor custo na conversão da energia. A combinação de células solares de alta eficiência, módulos bem projetados e inversores de qualidade é essencial para otimizar a produção de eletricidade e a viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos.

Na Figura 3, é apresentado um resumo de como funcionam as células solares em placas de energia solar, mostrando a interação entre as células, o inversor e a rede elétrica, além de ilustrar o processo de conversão da luz solar em eletricidade utilizável. A configuração dos módulos solares e a eficiência do sistema como um todo são determinantes para a viabilidade dos projetos de energia solar em larga escala, tanto em termos de sustentabilidade quanto de custo-benefício.

Figura 3 - Como funciona uma célula fotovoltaica



Fonte: Robot (2023).

O impacto ambiental das células solares é relativamente baixo em comparação com fontes de energia tradicionais. Matan (2023) observa que a geração de eletricidade solar não emite gases de efeito estufa, ajudando a reduzir o aquecimento global. Além disso, a energia solar reduz a dependência de recursos naturais finitos. No entanto, o ciclo de vida das células solares, incluindo a mineração, fabricação, transporte, instalação e reciclagem, deve ser otimizado para maximizar os benefícios ambientais (Solar, 2024). A tecnologia fotovoltaica está evoluindo continuamente, prometendo uma maior eficiência e menores custos, o que faz da energia solar uma solução cada vez mais viável e sustentável para atender às necessidades energéticas globais.

2.2 Luz como onda eletromagnética

A luz solar é essencial para a geração de eletricidade em sistemas fotovoltaicos, propagando-se como uma onda eletromagnética que abrange uma ampla gama de comprimentos de onda, desde o ultravioleta até o infravermelho. A energia transportada por cada onda é diretamente proporcional à sua frequência e inversamente proporcional ao seu comprimento de onda, conforme descrito pela equação de Planck (1901):

$$E = hf, \quad (1)$$

em que E representa a energia da onda eletromagnética (em joules), h é a constante de Planck ($6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) e f é a frequência da onda (em hertz, Hz).

A relação entre a frequência f e o comprimento de onda λ é dada pela equação:

$$c = \lambda f, \quad (2)$$

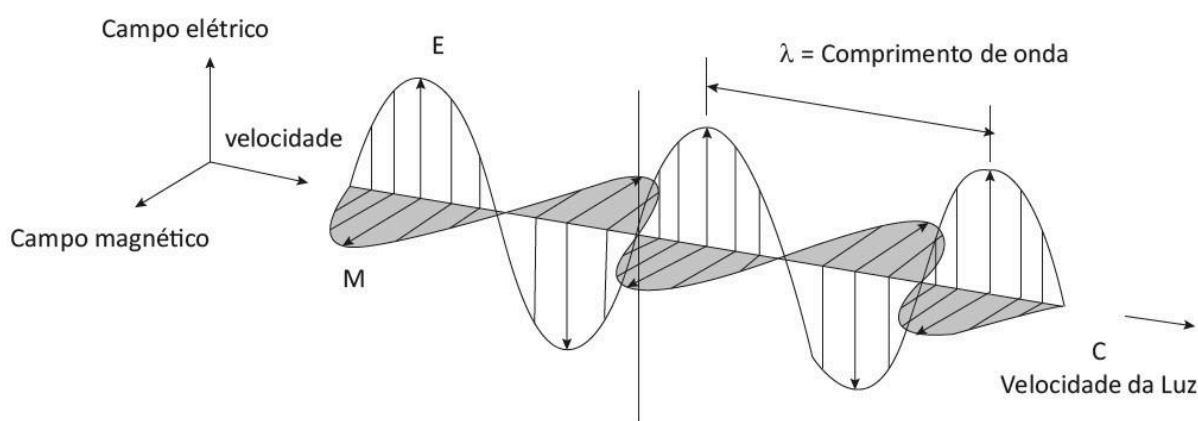
em que c é a velocidade da luz no vácuo ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$), λ é o comprimento de onda da luz (em metros).

Ao substituir f da segunda equação na primeira, obtemos uma relação para a energia em função do comprimento de onda:

$$E = \frac{hc}{\lambda}. \quad (3)$$

Esta relação demonstra que a energia de um fóton, que é uma partícula de luz, é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda: quanto menor o comprimento de onda (como no ultravioleta), maior será a energia do fóton. Essa propriedade é fundamental para a conversão da luz solar em eletricidade, uma vez que as células fotovoltaicas absorvem fótons de diferentes energias presentes na luz solar para gerar corrente elétrica. A Figura 4 ilustra as principais características de uma onda eletromagnética.

Figura 4 - Luz como onda eletromagnética



Fonte: ProMilitares (2020).

Quando a luz solar atinge uma célula fotovoltaica, ocorre um fenômeno conhecido como absorção fotovoltaica, no qual os fótons da luz interagem com os átomos do material semicondutor — geralmente o silício. Nesse processo, os fótons transferem sua energia para os elétrons da banda de valência do semicondutor, promovendo-os para a banda de condução. Essa transição cria pares de elétrons (carga negativa) e lacunas (carga positiva). O campo elétrico presente na junção p-n separa os pares gerados, orientando os elétrons em direção à camada tipo n e as lacunas para a camada tipo p, iniciando assim o fluxo de corrente elétrica de acordo com Green *et al.*, (2021).

Embora tanto os elétrons quanto as lacunas participem do transporte de carga, a corrente elétrica nas células fotovoltaicas é dominada pelo movimento dos elétrons, que possuem uma mobilidade cerca de 3,5 vezes maior que a das lacunas no silício. Este diferencial de mobilidade garante que os elétrons desempenhem o papel principal no transporte de carga, enquanto as lacunas contribuem em menor escala.

No entanto, é importante esclarecer que os elétrons que constituem a corrente elétrica não são exatamente os mesmos que foram inicialmente excitados pelos fótons e arrancados dos átomos dentro da camada de depleção. Quando os fótons atingem o semicondutor, sua energia é rapidamente transferida para o campo elétrico presente na junção p-n, e este campo promove a movimentação ordenada dos elétrons no circuito externo.

A velocidade de deslocamento físico dos elétrons no semicondutor é extremamente baixa, já que eles percorrem distâncias muito curtas, geralmente menores do que o diâmetro de um átomo, antes de se recombinarem com lacunas ou serem conduzidos pelo material. No entanto, a energia liberada pelo fóton é propagada quase instantaneamente pelo campo elétrico, à velocidade próxima à da luz. Este fenômeno resulta em um transporte eficiente de energia através do circuito, apesar do movimento lento das partículas individuais.

Assim, o que chamamos de corrente elétrica gerada em uma célula fotovoltaica não corresponde exatamente ao deslocamento de um único elétron como partícula ao longo do circuito. Em vez disso, trata-se da propagação da energia fornecida pelos fótons, que é transferida de forma eficiente entre os elétrons por meio do campo elétrico. Este comportamento apresenta semelhanças com o movimento de uma onda eletromagnética, mas com a presença de matéria (os átomos do semicondutor) no processo.

Esse mecanismo destaca a importância do campo elétrico gerado pela junção p-n na conversão de energia solar em eletricidade, enfatizando que a eficiência do sistema depende da dinâmica coletiva dos elétrons e da transferência de energia proporcionada pela interação entre fótons e semicondutores.

A eficiência da conversão de energia luminosa em eletricidade nas células fotovoltaicas é influenciada por diversos fatores, que vão desde as propriedades do semicondutor utilizado até a estrutura física e os dispositivos auxiliares integrados ao sistema. A qualidade do material semicondutor, a disposição das camadas dentro da célula solar e a presença de camadas de antirreflexo e proteção desempenham papéis fundamentais na quantidade de luz que pode ser absorvida, impactando diretamente a eficiência da conversão.

Para Green *et al.* (2021), as camadas antirreflexo são projetadas para reduzir a reflexão da luz que incide na superfície das células solares, permitindo que uma maior quantidade de fótons seja absorvida pelo material semicondutor. Essas camadas garantem que mais luz seja utilizada em vez de refletida, o que poderia comprometer a eficiência geral do sistema. O aumento na absorção de luz resulta em uma maior geração de pares de elétrons e lacunas, fundamentais para o processo de conversão de energia.

Além das melhorias nos materiais e na estrutura das células, a adoção de dispositivos de rastreamento solar tem se mostrado uma estratégia eficaz para otimizar a captura da luz solar. Esses sistemas ajustam continuamente a orientação dos painéis solares para seguir o movimento diário do sol, maximizando a incidência de luz sobre eles. Beckman & Klein (1984) apontam que, ao manter os painéis solares perpendiculares à luz solar o maior tempo possível, os dispositivos de rastreamento podem aumentar significativamente a radiação solar que incide sobre as células fotovoltaicas. Isso resulta em um aumento considerável na geração de eletricidade ao longo do dia, especialmente em regiões com grande variação na altura do sol, como nas áreas tropicais.

Portanto, a conversão de energia solar em eletricidade nas células fotovoltaicas envolve uma interação complexa entre a luz solar e o material semicondutor. A compreensão detalhada dos princípios físicos que regem a absorção e a conversão da luz, juntamente com a aplicação de tecnologias como o rastreamento solar, é essencial para otimizar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Essas tecnologias avançadas não apenas aumentam a eficiência intrínseca das células solares, mas também desempenham um papel crucial na maximização da geração de eletricidade renovável, contribuindo para um sistema de energia mais sustentável e eficaz.

2.3 Movimento solar e sua influência na geração de energia solar

O movimento do Sol e sua trajetória no céu desempenham um papel crucial na eficiência dos sistemas de rastreamento solar, que são cada vez mais utilizados para otimizar a geração de energia solar. A luz solar, que se propaga como uma onda eletromagnética, é composta por uma gama de comprimentos de onda que variam desde o ultravioleta até o infravermelho. Dutra (2019) afirma que cada uma dessas ondas transporta uma quantidade específica de energia, diretamente proporcional à sua frequência e inversamente proporcional ao seu comprimento de onda.

Todos os dias o Sol nasce na direção leste, atinge um ponto de máxima altura e se põe na direção oeste, descrevendo uma trajetória que muda ao longo do ano devido à inclinação do eixo da Terra e ao movimento orbital, segundo Dutra (2019). Esse movimento é resultado da rotação da Terra em aproximadamente 24 horas, no sentido de oeste para leste, o que faz com que o Sol pareça se mover da esquerda para a direita no céu, conforme ilustrado na Figura 5. Esse fenômeno é observado na esfera celeste, e a altura do Sol no céu é influenciada pela latitude do local e pela inclinação axial da Terra, que é de 23,5 graus em relação ao plano da órbita da Terra ao redor do Sol como afirma Dutra (2019).

Figura 5 - Movimento aparente do Sol

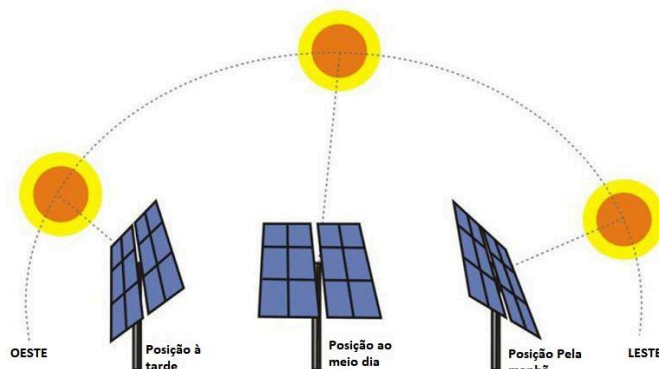


Fonte: Rodrigues Alves (2021).

A inclinação axial da Terra cria variações sazonais na trajetória solar, gerando as estações do ano. Durante o solstício de dezembro, no hemisfério sul, o Sol atinge o Trópico de Capricórnio, resultando em uma altura solar máxima de 23,5 graus em relação ao Equador Celeste. Em contraste, durante o solstício de junho, no hemisfério norte, o Sol atinge o Trópico de Câncer, criando uma situação oposta no hemisfério sul. De acordo com Dutra (2019) os equinócios de março e setembro, o Sol está diretamente sobre o Equador Terrestre, resultando em dias e noites de igual duração em todo o planeta.

Os rastreadores solares podem ser de eixo único ou de dois eixos. Em sistemas de eixo único, como o visto na Figura 6, o ajuste é feito em torno do eixo norte-sul, seguindo o movimento do Sol de leste a oeste. Segundo Lana (2015) os sistemas de dois eixos permitem um ajuste mais preciso, tanto horizontal quanto verticalmente, para acompanhar a mudança na altura do Sol ao longo do dia e das estações do ano.

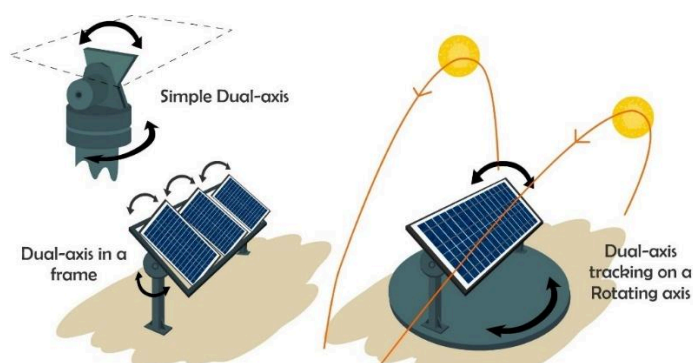
Figura 6 - Rastreadores solares de eixo único



Fonte – Energia Solar Master (2022)

A dinâmica dos motores utilizados para o rastreamento solar desempenha um papel fundamental na eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Os motores de passo e os motores de corrente contínua (CC) são as principais opções, sendo escolhidos com base no tipo de sistema e nas necessidades de ajuste. Os motores de passo são especialmente adequados para sistemas de eixo único, permitindo ajustes precisos e incrementais na posição dos painéis solares para seguir a trajetória do Sol ao longo do dia. Já os motores de corrente contínua são mais indicados para sistemas de dois eixos, onde a movimentação precisa ser contínua e suave, tanto na direção horizontal quanto vertical, para acompanhar a posição do Sol ao longo das estações. Como afirma Lana (2015), o uso correto desses motores pode aumentar significativamente a produção de energia solar ao garantir a máxima exposição dos painéis à radiação solar.

Figura 7 - Rastreadores solares de eixo único e duplo



Fonte: HebeSolar (2022).

A Figura 7 ilustra os dois tipos de motores mencionados: os motores de passo, ideais para ajustes precisos em sistemas de eixo único, e os motores de corrente contínua, preferidos em sistemas de dois eixos, proporcionando controle contínuo do movimento. O uso dessas tecnologias no rastreamento solar é essencial para otimizar a captura de luz solar e, consequentemente, aumentar a geração de eletricidade. Dessa forma, a implementação de

sistemas de rastreamento solar bem projetados, com motores adequados, pode melhorar significativamente o desempenho dos sistemas fotovoltaicos e contribuir para a eficiência na geração de energia renovável.

2.4 Conversão de energia e eficiência energética

A termodinâmica desempenha um papel fundamental na operação dos sistemas fotovoltaicos, influenciando não apenas a conversão de energia solar em eletricidade, mas também a gestão da transferência de calor nos dispositivos. A eficiência de um sistema fotovoltaico vai além da sua capacidade de converter luz em eletricidade; ela também envolve a forma como a energia térmica é administrada. O calor gerado pela absorção da luz solar pode impactar negativamente a eficiência das células solares, uma vez que o aumento da temperatura pode reduzir a geração de energia. A temperatura afeta diretamente as propriedades dos materiais semicondutores, como o silício, aumentando a resistência interna e, conseqüentemente, diminuindo a eficiência de conversão fotovoltaica. A eficiência energética de uma célula fotovoltaica (η_{EE}) pode ser expressa pela equação:

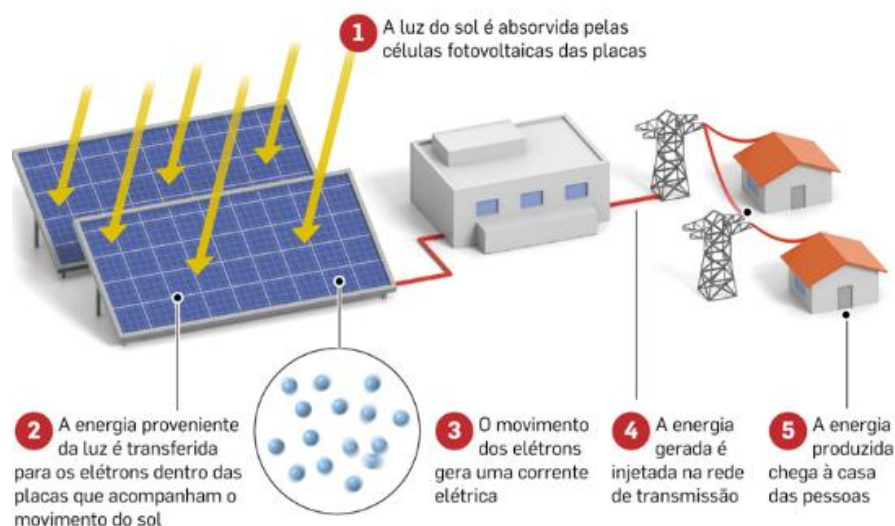
$$\eta_{EE} = \frac{E_{elétrica}}{E_{solar}} \times 100\%, \quad (4)$$

em que $E_{elétrica}$ representa a energia elétrica produzida e E_{solar} a energia solar incidente.

Para mitigar os efeitos negativos da temperatura, é crucial entender os processos de transferência de calor dentro do sistema, incluindo condução, convecção e radiação, que ajudam a dissipar o calor acumulado e a manter a operação das células solares em uma faixa de temperatura ideal.

A Figura 8 o processo de geração de energia solar fotovoltaica a partir da absorção de fótons pela célula solar, demonstrando a excitação dos elétrons na camada de silício e a criação de pares elétron-lacuna, essenciais para a produção de corrente elétrica utilizável. A imagem também destaca o caminho que a energia segue, desde a absorção da luz até a conversão em eletricidade, proporcionando uma compreensão visual do processo de transformação da energia solar em eletricidade.

Figura 8 – Esquema de geração de energia solar fotovoltaica



Fonte – InfinitySun Energia Solar (2018)

A eficiência energética, equação (4), depende de diversos fatores, incluindo a qualidade do material semicondutor, pureza do silício, estrutura da célula (monocristalina, policristalina ou de filme fino) e o design geral. Green *et al.*, (2015) endossam que em condições ideais de teste (25°C, radiação de 1000 W/m²), células solares comerciais geralmente atingem eficiências entre 15% e 22%, com pesquisas contínuas buscando aumentar esses números através de novos materiais e tecnologias avançadas de fabricação.

A eficiência de conversão em sistemas fotovoltaicos é impactada por diversos fatores, entre eles a recombinação de elétrons e lacunas, que ocorre quando um elétron livre da banda de condução se recombina com uma lacuna na banda de valência, dissipando energia na forma de calor e não em eletricidade. Esse fenômeno reduz a quantidade de energia aproveitável gerada pelas células solares. Além disso, as perdas resistivas também desempenham um papel importante na diminuição da eficiência. Como explica Mertens (2018), essas perdas estão relacionadas à resistência elétrica nos materiais condutores que compõem o circuito da célula solar, levando a uma dissipação de energia após a geração da corrente elétrica. As perdas resistivas podem ser minimizadas com a melhoria dos contatos metálicos e da condutividade do material utilizado, otimizando assim a eficiência do sistema fotovoltaico.

Porém, é importante destacar que a camada antirreflexo presente nas células solares, embora não tenha relação direta com as perdas resistivas, também pode impactar a eficiência. Sua função principal é reduzir a quantidade de luz refletida pela superfície da célula, permitindo maior absorção de fótons pelo material semicondutor. Ela pode contribuir para perdas de corrente por meio da dissipação de parte da energia da luz absorvida, mas sua atuação é anterior à junção p-n, que é onde a geração de corrente ocorre. Portanto, embora ambas as causas

resultem em uma redução na energia disponível, as perdas resistivas e as perdas associadas ao antirreflexo têm origens e efeitos distintos, o que reflete as complexidades no projeto e operação de sistemas fotovoltaicos eficientes.

A tabela do INMETRO (Quadro 1) serve como uma referência importante para a seleção de painéis fotovoltaicos, classificando-os de acordo com suas características técnicas e de desempenho, com foco na Eficiência Energética.

Quadro 1 - Tabela do INMETRO para a Seleção de Painéis Fotovoltaicos

CLASSES	ÍNDICE DE MÓDULO		EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
	SILÍCIO CRISTALINO	FILMES FINO	
A	EE > 13,5	EE > 9,5	 Mais eficiente Menos eficiente
B	13,5 >= EE > 13,0	9,5 >= EE > 7,5	
C	13,0 >= EE > 12,0	7,5 >= EE > 6,5	
D	12,0 >= EE > 11,0	6,5 >= EE > 5,5	
E	EE < 11,0	EE < 5,5	

Fonte – Portal Solar (2022)

A transferência de calor para fora das células fotovoltaicas desempenha um papel fundamental na operação e eficiência dos sistemas. A energia solar que não é convertida em eletricidade é dissipada em forma de calor, aumentando a temperatura das células fotovoltaicas e impactando a eficiência do sistema. Conforme indicado por Nelson (2003), a elevação da temperatura reduz a largura da banda proibida do semicondutor, diminuindo assim a eficiência de conversão de energia. O aumento da temperatura também reduz a tensão de circuito aberto (V_{oc}) a voltagem gerada pela célula quando o circuito está aberto. Em condições ideais, V_{oc} deve ser alta para maximizar a conversão de energia, mas a elevação da temperatura reduz essa voltagem, resultando em um desempenho geral inferior da célula fotovoltaica. A relação entre a temperatura e a eficiência (η) pode ser expressa como:

$$\eta \propto -\Delta T, \quad (5)$$

em que ΔT representa a variação da temperatura, refletindo que a eficiência diminui com o aumento da temperatura.

O impacto da temperatura é particularmente significativo em células solares de silício, que apresentam um coeficiente de temperatura negativo, resultando em uma redução da eficiência em aproximadamente 0,45% para cada grau Celsius de aumento na temperatura. Como mencionado por Green *et al.* (2015), esse efeito é causado pela diminuição da tensão de circuito aberto e pelo aumento da recombinação de portadores de carga.

Para otimizar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, é essencial monitorar a temperatura das células solares e implementar estratégias adequadas de controle térmico. Krauter (2006) enfatiza que a escolha do local de instalação e o tipo de montagem dos módulos influenciam a dissipação de calor e a eficiência geral do sistema. Estratégias de resfriamento eficazes incluem ventilação natural, dissipadores de calor, sistemas de resfriamento ativo e rastreamento solar para maximizar a captura de energia. Além disso, o uso de materiais com propriedades térmicas aprimoradas e a instalação em locais com maior reflexão da radiação também contribuem para a redução das temperaturas de operação, aumentando a eficiência do sistema.

Assim, um controle térmico adequado não apenas melhora o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, mas também prolonga sua vida útil, garantindo uma maior produção de energia ao longo do tempo. Essa interação entre a eficiência energética e a transferência de calor é vital para o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos mais eficientes e sustentáveis.

2.5 Óptica e eficiência na conversão de energia solar

Assim como a termodinâmica, a óptica desempenha um papel crucial na eficiência dos sistemas fotovoltaicos, influenciando diretamente a conversão da luz solar em eletricidade. Uma abordagem inovadora e economicamente viável para otimizar essa conversão é o uso de sistemas fotovoltaicos de concentração (CPV - *Concentrated Photovoltaics*). Esses sistemas utilizam lentes e espelhos para concentrar a luz solar em células solares de alta eficiência, reduzindo a quantidade de material necessário para gerar a mesma quantidade de energia. Lentes de Fresnel e espelhos parabólicos são exemplos de dispositivos ópticos utilizados para concentrar a luz, aumentando a quantidade de luz incidente sobre as células fotovoltaicas. Embora esses sistemas sejam mais caros e complexos, eles se tornam economicamente viáveis em regiões com alta irradiância solar, como desertos, e quando a produção em grande escala possibilita a redução de custos. O uso dessas tecnologias está se expandindo, especialmente em instalações de grande porte, como usinas solares, onde o aumento da eficiência pode justificar o custo inicial mais elevado.

A luz solar é composta por ondas eletromagnéticas que se propagam em uma vasta gama de comprimentos de onda, desde o ultravioleta até o infravermelho. Quando a luz atinge uma superfície, como uma célula fotovoltaica, ela pode ser refletida, absorvida ou transmitida. A reflexão acontece quando uma parte da luz é desviada de volta para o ambiente ao encontrar uma superfície. De acordo com a Lei da Reflexão, o ângulo de incidência, que é o ângulo entre o raio de luz incidente e a normal da superfície, é igual ao ângulo de reflexão, o ângulo entre o raio refletido e a normal, segundo Hecht (2002).

A reflexão é um dos fatores que contribuem para a redução da eficiência em sistemas fotovoltaicos, pois a luz refletida na superfície das células solares não é aproveitada para gerar eletricidade. Esse fenômeno ocorre devido à diferença de índice de refração entre o ar e o material semicondutor da célula. Para mitigar essas perdas, é utilizado um revestimento antirreflexo, que desempenha um papel essencial na otimização do desempenho das células solares. Esses revestimentos funcionam por meio de interferência destrutiva, um processo no qual as ondas de luz refletidas pelas interfaces do filme se anulam, reduzindo a quantidade total de luz refletida.

De acordo com Green *et al.* (2021), a quantidade de luz refletida varia significativamente com o comprimento de onda: pode alcançar até 50% para luz de 400 nm e diminuir para 33% em 700 nm. Essa variação destaca a importância de projetar o filme antirreflexo de forma a cobrir uma ampla faixa espectral, garantindo a máxima absorção de fótons. O desempenho desse revestimento depende de vários fatores, incluindo o coeficiente de reflexão na superfície, o índice de refração do material, a espessura do filme, o comprimento de onda da luz incidente e o ângulo de refração da luz dentro do material semicondutor. Por essa razão, o uso de filmes antirreflexo é considerado obrigatório em todas as células solares modernas, sendo uma tecnologia amplamente adotada para melhorar a eficiência de conversão.

Além disso, esses revestimentos são cuidadosamente projetados para formar uma camada com um índice de refração intermediário entre o ar e o semicondutor, minimizando as perdas na interface. Essa combinação de propriedades ópticas permite que mais luz penetre na célula solar, maximizando a quantidade de fótons disponíveis para o processo fotovoltaico. Em sistemas em que a eficiência é prioridade, o controle da reflexão não é apenas um detalhe técnico, mas um requisito fundamental para garantir o melhor desempenho possível dos módulos fotovoltaicos.

A relação entre a inclinação do painel fotovoltaico e a quantidade de luz que chega ao material semicondutor (Si) pode ser descrita pelas seguintes equações:

- Intensidade da luz refletida:

$$I_t(\delta) = \frac{(1 - R)^2}{1 + R^2 - 2R\cos(\delta)}, \quad (6)$$

em que R é o coeficiente de reflexão e δ é o ângulo de incidência da luz.

- Intensidade da luz transmitida:

$$I_t(\delta) = \frac{2n_{ar}^2}{n_{ar}^2 + n_f^2 + (n_{ar}^2 - n_f^2)\cos(\delta)}, \quad (7)$$

em que n_{ar} e n_f representam os índices de refração dos meios envolvidos.

- Cálculo do ângulo de incidência:

$$\delta = \frac{4\pi n_f d}{\lambda_0} \cos(\theta_{ref}), \quad (8)$$

Nesta equação, d é a espessura do material e λ_0 é o comprimento de onda da luz incidente, enquanto θ_{ref} é o ângulo de referência.

Quando a luz passa de um meio para outro com um índice de refração diferente, como ao atravessar o vidro de uma célula fotovoltaica, ocorre a refração. Este fenômeno altera a trajetória dos raios de luz e é descrito pela Lei de Snell, que relaciona os ângulos de incidência e refração com os índices de refração dos dois meios. A refração pode influenciar a quantidade de luz que chega à camada ativa da célula fotovoltaica, o que é um aspecto crucial a ser considerado no design das células solares.

A absorção é o processo pelo qual a luz é capturada pelo material semicondutor da célula fotovoltaica e convertida em energia elétrica, sendo fundamental para a eficiência de conversão dos sistemas fotovoltaicos. Este processo depende diretamente das propriedades do material semicondutor e da camada de depleção. De acordo com Green et al. (2021), materiais como o silício são amplamente utilizados devido a características específicas, como sua energia de gap (band gap), alta pureza, longo tempo de vida dos portadores de carga e boa mobilidade eletrônica. A energia de gap do silício é de aproximadamente 1,1 eV, permitindo a absorção de luz com comprimentos de onda menores que 1100 nm, aproveitando uma parte significativa do espectro solar.

Quando a luz solar incide sobre a célula, os fótons com energia igual ou superior ao gap interagem com os elétrons do semicondutor, promovendo-os da banda de valência para a banda de condução e gerando pares de elétrons e lacunas. Este fenômeno ocorre principalmente na região da camada de depleção, onde o campo elétrico interno ajuda a separar os portadores de carga, evitando a recombinação e permitindo que eles sejam coletados como corrente elétrica. A eficiência da absorção também é influenciada pela espessura da célula, pela textura superficial, que pode reduzir a reflexão, e pela presença de revestimentos antirreflexo, que aumentam a quantidade de luz absorvida pelo material semicondutor.

Para maximizar a absorção e a geração de energia, é essencial que as células sejam otimizadas em termos de propriedades do material semicondutor, como o gap, o coeficiente de absorção, a pureza e a mobilidade dos portadores, garantindo um equilíbrio entre custo e desempenho no design dos sistemas fotovoltaicos.

Os espelhos parabólicos representam uma abordagem eficiente para concentrar a luz solar, projetados com uma curvatura que reflete os raios solares em um ponto focal específico. Nesse ponto, uma célula fotovoltaica pode ser posicionada para maximizar a captura de radiação. Segundo Goetzberger et al. (2005), essa técnica pode aumentar significativamente a

intensidade da radiação solar incidente, potencializando a geração de eletricidade pelas células. No entanto, o uso de espelhos parabólicos em sistemas fotovoltaicos enfrenta desafios práticos e econômicos que limitam sua aplicação em larga escala.

Além da concentração da luz, outras tecnologias complementares, como revestimentos antirreflexo e o design de células solares com múltiplas camadas, desempenham papéis fundamentais na otimização da eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Os revestimentos antirreflexo são desenvolvidos com materiais de índice de refração específico, que reduzem significativamente a reflexão da luz na superfície da célula, permitindo maior absorção e, consequentemente, maior geração de energia.

Apesar de seus benefícios teóricos, o uso comercial de espelhos parabólicos em sistemas fotovoltaicos é considerado inviável, especialmente para aplicações residenciais ou em usinas solares de grande escala. A ausência desse tipo de tecnologia nas principais instalações solares se deve a vários fatores, incluindo os custos adicionais de fabricação e instalação, a complexidade de manutenção e os desafios relacionados ao alinhamento preciso e à resistência a condições climáticas adversas. Em termos práticos, sistemas fotovoltaicos convencionais, que não utilizam concentradores, são mais acessíveis, simples de implementar e amplamente escaláveis, o que explica sua predominância no mercado global de energia solar.

2.6 Circuitos elétricos e componentes eletrônicos

Os sistemas fotovoltaicos dependem fortemente de uma série de componentes eletrônicos para a conversão eficiente de energia e para o gerenciamento do sistema. A interação entre esses componentes é essencial para maximizar a eficiência e a durabilidade das células solares.

Os **diodos de bypass** são fundamentais para proteger as células solares contra danos causados por sombreamento parcial. Quando uma célula é parcialmente sombreada, ela pode se tornar um ponto de aquecimento, reduzindo a eficiência do módulo e potencialmente danificando as células. Conforme indicado por Masters (2013), os diodos de bypass permitem que a corrente elétrica (I) flua ao redor das células sombreadas, prevenindo danos e minimizando as perdas de energia. A relação da corrente em um circuito pode ser descrita pela Lei de Ohm:

$$V = RI, \quad (9)$$

onde V é a tensão, I é a corrente e R é a resistência do circuito.

Outro componente crucial é o **inversor**, responsável por converter a corrente contínua (CC) gerada pelos módulos solares em corrente alternada (CA), utilizada na rede elétrica. Existem diferentes tipos de inversores, como inversores de string, microinversores e inversores centrais, cada um adequado para diferentes tipos de instalações e necessidades. Os

microinversores, por exemplo, são particularmente úteis em sistemas onde os módulos podem sofrer sombreamento desigual, pois permitem a otimização individual de cada módulo, como explica Knier (2002). A eficiência do inversor (η_{inv}) pode ser expressa pela relação:

$$\eta_{inv} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%, \quad (10)$$

em que P_{out} é a potência de saída e P_{in} é a potência de entrada.

Os **controladores de carga** são fundamentais em sistemas off-grid, regulando o fluxo de energia entre os painéis solares e as baterias, protegendo estas últimas de sobrecargas e descargas profundas. De acordo com Wenham *et al.* (2013), esses dispositivos garantem que a energia gerada pelos painéis seja armazenada de maneira eficiente e segura, prolongando a vida útil das baterias e aumentando a eficiência geral do sistema. A relação entre a capacidade da bateria (C) e a corrente (I) pode ser descrita pela fórmula:

$$C = It, \quad (11)$$

em que t é o tempo em horas.

Sensores de corrente, tensão e temperatura são frequentemente usados para monitorar o desempenho do sistema. Esses sensores são cruciais para a detecção precoce de falhas e para o ajuste do sistema para maximizar a eficiência. Por exemplo, sensores de temperatura podem ajudar a identificar regiões aquecidas em módulos solares, que podem indicar falhas iminentes.

Os **sensores de luz**, como os **LDRs** (*Light Dependent Resistors*), desempenham um papel crucial nos sistemas de rastreamento solar. Esses dispositivos detectam a intensidade da luz solar e fornecem sinais elétricos que orientam os motores do sistema para posicionar os painéis solares em direção ao ponto de máxima incidência luminosa (P). A relação entre a intensidade da luz (I) e a resistência do LDR (R) pode ser expressa pela equação (9), em que V é a tensão aplicada.

Entretanto, as coordenadas angulares da trajetória do Sol (α e β), em que α é o ângulo com a linha horizontal e β ângulo com a linha do Equador, mudam continuamente ao longo do dia e do ano devido à inclinação do eixo terrestre. Um sistema de rastreamento que dependa exclusivamente de LDRs enfrentaria um problema de busca em loop, pois, mesmo ao encontrar a posição máxima de luz em um momento, essa posição mudaria rapidamente devido à rotação e translação da Terra.

A integração de técnicas preditivas com medições em tempo real, conforme destacado por Duffie & Beckman (1980), oferece uma solução robusta para sistemas de rastreamento solar, maximizando a captura de energia e reduzindo perdas associadas a desvios na orientação dos painéis. A utilização de algoritmos de controle, como o PID (Proporcional, Integral,

Derivativo), permite ajustes automáticos e precisos dos painéis, otimizando a captação de luz solar.

Os microcontroladores, como o **Arduino**, são amplamente utilizados no controle de sistemas de rastreamento solar devido à sua flexibilidade e capacidade de programação. O Arduino processa as informações dos sensores e determina a posição ideal dos painéis em qualquer momento do dia, implementando algoritmos de controle que evitam movimentos bruscos que possam danificar o sistema. A eficiência do sistema pode ser quantificada em termos de energia gerada (E):

$$E = Pt, \quad (12)$$

em que P é a potência e t é o tempo de operação.

O Arduino pode ser integrado a sistemas de monitoramento remoto, permitindo o controle e a visualização dos dados de operação do sistema de qualquer lugar. Essa capacidade é especialmente útil para grandes instalações ou sistemas em locais remotos, onde o acesso físico pode ser limitado, como afirma Patel (2021).

Além disso, plataformas de software avançadas permitem o monitoramento em tempo real e a análise de dados históricos, essenciais para a manutenção preventiva. Essa abordagem é vital para identificar e resolver problemas antes que causem falhas significativas ou perdas de eficiência, como discutido por Markvart (2000). O gerenciamento de grandes portfólios de instalações solares é particularmente importante para maximizar a eficiência operacional, conforme ressaltam Honsberg & Bowden (1999).

Em resumo, a integração eficiente de circuitos elétricos e componentes eletrônicos, aliada a uma boa compreensão das equações físicas, é essencial para otimizar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos e garantir sua operação eficaz em diversas condições.

2.7 Importância das energias renováveis

As energias renováveis desempenham um papel crucial na transição energética sustentável, oferecendo alternativas limpas às fontes convencionais de energia, que são responsáveis pela emissão significativa de gases de efeito estufa. Dentre essas fontes, a energia solar se destaca por sua abundância e pela capacidade de conversão em eletricidade limpa por meio de tecnologias fotovoltaicas. A quantidade de energia solar que chega à Terra é aproximadamente 22 vezes superior ao consumo energético global, evidenciando seu potencial quase inesgotável. Esse potencial é expresso pela equação da energia solar recebida:

$$E_{solar} = GAt, \quad (13)$$

em que E_{solar} é a energia solar total recebida (em joules), G é a irradiância solar (em W/m^2), A é a área exposta (em m^2) e t é o tempo de exposição (em segundos). Essa característica torna a

radiação solar uma solução essencial para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os impactos ambientais associados ao seu uso.

No entanto, é importante considerar a natureza sistêmica e interdisciplinar das questões envolvidas na adoção de energias renováveis. Observa-se uma falta de sinergia entre políticas e práticas, além de uma aderência insuficiente aos compromissos em defesa do meio ambiente e das futuras gerações. As decisões e metas estabelecidas em conferências internacionais frequentemente não se concretizam conforme acordado, levando à repetição de encontros para discutir entraves estruturais e contextuais enfrentados pelos países signatários. Essa inércia tem prejudicado o progresso em direção ao Desenvolvimento Sustentável e à estabilização do clima global, como apontado por Nunes (2018).

Em comparação com outras fontes de energia, a energia solar se destaca não apenas por sua renovabilidade, mas também por seu baixo impacto ambiental. Ao contrário dos combustíveis fósseis, a geração de eletricidade a partir da energia solar não emite poluentes atmosféricos ou gases de efeito estufa durante a operação dos sistemas fotovoltaicos. A eficiência da conversão da energia solar em eletricidade, expressa pela equação:

$$\eta_{convertida} = \frac{P_{eletricidade}}{P_{solar}} \times 100, \quad (14)$$

em que $\eta_{convertida}$ é a eficiência do sistema (em %), $P_{eletricidade}$ é a potência elétrica gerada (em watts) e P_{solar} é a potência solar incidente (em watts), ressalta o potencial da energia solar em comparação a outras fontes de energia.

Embora a energia eólica e a hidroeletricidade sejam importantes fontes renováveis, a energia solar oferece maior flexibilidade de instalação. Ela pode ser implementada em diversas escalas, desde pequenas instalações residenciais até grandes usinas solares. A energia eólica, por exemplo, depende das condições de vento, representadas pela equação da potência do vento:

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \rho A v^3, \quad (15)$$

onde P_{vento} é a potência extraída do vento (em watts), ρ é a densidade do ar (em kg/m³), A é a área varrida pelas lâminas do rotor (em m²) e v é a velocidade do vento (em m/s). A hidroeletricidade, embora amplamente utilizada, pode ter impactos ambientais significativos, como a alteração de ecossistemas aquáticos e o deslocamento de comunidades devido à construção de barragens. Em contrapartida, a energia solar apresenta menor impacto ambiental e maior facilidade de integração em ambientes urbanos, rurais e remotos. A modularidade dos sistemas solares permite sua adaptação a diversas necessidades de consumo energético, como afirmam Green *et al.* (2015).

O impacto ambiental da energia solar é relativamente baixo. Embora a fabricação de painéis solares envolva o uso de materiais semicondutores e processos industriais que consomem energia, o impacto ambiental total é menor em comparação à extração e queima de combustíveis fósseis. Durante a operação, os sistemas solares não emitem CO₂ ou outros poluentes atmosféricos, contribuindo significativamente para a mitigação das mudanças climáticas e para a melhoria da qualidade do ar, conforme discutido por Fthenakis & Kim (2007).

Economicamente, a energia solar tem se tornado cada vez mais competitiva. O custo dos sistemas fotovoltaicos tem diminuído consistentemente, devido a avanços tecnológicos, economias de escala e aumento da eficiência de produção. Essa tendência de redução de custos está tornando a energia solar uma das opções mais econômicas para a nova capacidade de geração de eletricidade, superando em muitos casos os custos das fontes tradicionais, mesmo sem subsídios governamentais (International Energy Agency, 2020).

Além disso, a adoção da energia solar proporciona benefícios econômicos indiretos, como a criação de empregos nas indústrias de fabricação, instalação e manutenção de sistemas solares. A transição para uma economia baseada em energias renováveis pode estimular o desenvolvimento econômico local, aumentar a segurança energética e promover a independência energética. Jacobson & Delucchi (2011) explicam que a descentralização da geração de energia, facilitada pelos sistemas solares distribuídos, pode reduzir a necessidade de grandes investimentos em infraestrutura de transmissão e distribuição, proporcionando economias adicionais.

Assim, a integração de energias renováveis, especialmente a energia solar, é essencial para uma abordagem sustentável e eficiente em relação ao consumo energético global, promovendo um futuro mais limpo e sustentável.

3 IMPLICAÇÕES PEDAGÓGICAS DO USO DE DISPOSITIVOS DE RASTREAMENTO SOLAR NO ENSINO DA FÍSICA

A física solar e a busca por fontes de energia sustentável são fundamentais no contexto atual, diante dos desafios ambientais e da necessidade de transições energéticas. A compreensão dos princípios de funcionamento das células solares e suas aplicações em sistemas fotovoltaicos é essencial para os estudantes. Segundo Wolfson (2012), a adoção de tecnologias solares não apenas reduz a dependência de combustíveis fósseis, mas também contribui para a mitigação das mudanças climáticas, destacando a importância da energia solar como uma solução viável para um futuro sustentável.

Contudo, é importante destacar que a aprendizagem de conceitos complexos na física solar não deve depender exclusivamente da tecnologia, como os dispositivos de rastreamento solar. Métodos tradicionais de ensino, como a resolução de problemas e discussões em sala de aula, continuam sendo válidos e eficazes. Hattie e Donoghue (2016) reforçam que a eficácia das estratégias de ensino reside na maneira como elas são integradas ao conteúdo e mediadas pela prática pedagógica, sugerindo que uma abordagem diversificada enriquece a experiência de aprendizado.

3.1 A interseção entre tecnologia e construcionismo

O ensino de física, como qualquer disciplina, enfrenta o desafio de envolver os estudantes de forma eficaz. O professor de física de Harvard, Erick Mazur (1996), autor de “Peer Instruction: A User's Manual”, destaca a importância da interatividade para aprimorar o aprendizado. Em sua pesquisa sobre aprendizagem ativa, Mazur demonstra que criar um ambiente de aprendizado interativo é fundamental para o engajamento dos alunos. Ao invés de apenas ouvir passivamente, os estudantes são incentivados a discutir conceitos, resolver problemas em grupo e aplicar o que aprenderam em contextos práticos. Essa abordagem não apenas melhora a compreensão conceitual, mas também desenvolve habilidades críticas de pensamento e resolução de problemas, aumentando a motivação dos alunos e tornando a experiência de aprendizado mais dinâmica e relevante.

Contribuindo para essa perspectiva, Hestenes (1992) promove o uso de modelos e tecnologia para tornar o ensino da física mais prático e envolvente. Sua abordagem é especialmente relevante para o desenvolvimento de dispositivos educacionais, como o rastreador solar com Arduino proposto neste estudo. Hestenes enfatiza a importância de conectar a teoria à prática, proporcionando aos alunos ferramentas que os ajudem a visualizar e entender conceitos físicos. Ao integrar dispositivos como o rastreador solar, os educadores

podem ilustrar princípios físicos de maneira tangível, permitindo que os estudantes vejam em tempo real como as teorias se aplicam ao mundo real. Essa metodologia não apenas facilita a compreensão de conceitos abstratos, mas também estimula o interesse e a curiosidade dos alunos, promovendo um aprendizado mais profundo e significativo.

Ademais, a relação entre a física solar e a sustentabilidade ambiental é um tema crucial abordado por Wolfson (2012). Ele destaca a energia solar como uma fonte limpa e sustentável, ressaltando a necessidade de conscientização ambiental. Wolfson contextualiza a pesquisa deste projeto em um cenário de preocupação ambiental global, argumentando que a adoção de tecnologias solares não apenas reduz a dependência de combustíveis fósseis, mas também diminui as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. A implementação de dispositivos de rastreamento solar pode maximizar a eficiência da captação de energia solar, tornando-a ainda mais eficaz. Nesse sentido, a educação desempenha um papel crucial, equipando os estudantes com o conhecimento necessário para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos.

A pesquisa de Hattie e Donoghue (2016) também é relevante nesse contexto, pois investiga estratégias de ensino eficazes que potencializam a aprendizagem. Eles destacam a importância de abordagens inovadoras que envolvem os alunos e promovem a compreensão ativa. O uso de ferramentas tecnológicas interativas transforma a experiência de aprendizado, tornando-a mais dinâmica e engajadora. Segundo os autores, estratégias que incentivam a participação ativa e a aplicação prática dos conceitos teóricos são essenciais para um aprendizado profundo e duradouro. Dispositivos como o rastreador solar facilitam a visualização de conceitos abstratos e estimulam a aprendizagem investigativa, aumentando a motivação dos estudantes e promovendo um senso de realização e relevância.

Neste cenário, as ideias de Seymour Papert, expostas em seu trabalho de 1985, têm relevância direta para o desenvolvimento de dispositivos de rastreamento solar com Arduino. Papert (1985) argumenta que a aprendizagem é facilitada quando os estudantes podem incorporar conceitos ao seu repertório de modelos mentais. Ele enfatiza que o uso da tecnologia, como os computadores, pode criar condições ideais para a consolidação desses modelos. No contexto do ensino de física solar, isso significa que os alunos podem desenvolver uma compreensão mais profunda dos princípios envolvidos ao interagir com a tecnologia de forma prática.

Além disso, a abordagem construcionista de Papert destaca a importância de os estudantes não apenas utilizarem a tecnologia, mas programarem e interagirem com ela ativamente. A construção e a programação de um rastreador solar com Arduino desafiam os

alunos a estruturar seus conhecimentos de forma lógica. Ao programar o dispositivo, eles aprendem conceitos de eletrônica e controle automatizado, desenvolvendo habilidades fundamentais como pensamento computacional e resolução de problemas. Essa abordagem favorece a construção de modelos mentais mais sólidos, promovendo um aprendizado que se ancore na experimentação concreta.

Entretanto, é válido questionar até que ponto a tecnologia é indispensável nesse processo de aprendizagem. Embora a programação de computadores ofereça novas possibilidades, muitos conceitos podem ser aprendidos sem o uso de tecnologia, através de métodos tradicionais. Contudo, a programação possibilita uma aprendizagem mais ativa, com feedback imediato e oportunidades para experimentação de soluções. É essencial, portanto, que a tecnologia seja integrada ao conteúdo de forma estratégica e mediada pela prática pedagógica.

Portanto, no contexto da pesquisa sobre o desenvolvimento de um dispositivo de rastreamento solar com Arduino para o ensino de física solar, as ideias de Papert sobre o construcionismo e o uso da tecnologia como ferramenta educacional são fundamentais. Essas ideias apoiam a abordagem de promover a construção de modelos mentais sólidos e envolver ativamente os alunos no processo de aprendizado, tornando o ensino da física solar mais prático e significativo. A integração de estratégias pedagógicas inovadoras e o uso de tecnologias educacionais contribuem para um aprendizado mais dinâmico e relevante, preparando os estudantes para os desafios acadêmicos e profissionais do futuro.

4 ASPECTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa foi realizada com alunos do 2º ano do ensino médio de uma escola estadual localizada em Paço do Lumiar, Maranhão. O objetivo central foi integrar a teoria e a prática, permitindo que os estudantes construíssem um protótipo de rastreamento solar utilizando Arduino, fundamentado no estudo da energia solar fotovoltaica. Para isso, foram adotadas metodologias qualitativas e participativas, que visam promover o engajamento dos alunos durante a construção do dispositivo e a aplicação dos conhecimentos adquiridos nas aulas teóricas.

Os aspectos relevantes descritos foram planejados com base na experiência da aplicação prática com esses alunos. A seguir, detalham-se as etapas do trabalho de pesquisa e a metodologia empregada.

4.1 Levantamento teórico inicial

O desenvolvimento do protótipo de rastreamento solar segue o método proposto por Straub (2020), que enfatiza o uso de sensores LDR (Light Dependent Resistor) para rastrear a posição do sol, bem como a utilização de servos motores para ajustar os movimentos horizontais e verticais do painel solar. O sistema é controlado por um Arduino UNO, que interpreta os dados dos sensores e ajusta a posição do painel em tempo real, garantindo a maximização da captação de energia solar.

A primeira fase do projeto envolve um levantamento teórico inicial, em que os alunos realizam um estudo preliminar sobre os conceitos fundamentais da energia solar e as tecnologias utilizadas em sistemas de rastreamento solar. Esse levantamento bibliográfico inclui referências sobre a conversão de energia solar em eletricidade, a eficiência dos dispositivos solares e a aplicação do Arduino em projetos semelhantes, com destaque para o trabalho de Straub (2020). Este estudo fornece os subsídios teóricos necessários tanto para a construção das aulas quanto para o desenvolvimento do protótipo.

4.2 Aulas teóricas e recursos didáticos

As aulas teóricas foram planejadas para introduzir os conceitos essenciais da energia solar e das tecnologias de rastreamento. Os tópicos abordados incluíram o efeito fotovoltaico, o funcionamento do Arduino, a utilização de sensores LDR e os motores servos. Para facilitar a aprendizagem, foram utilizados recursos multimídia, como apresentações, simulações interativas e vídeos educativos, que contextualizam os conceitos e incentivam os alunos a interagir de forma ativa com o conteúdo.

4.3 Construção do protótipo

Na etapa de construção do protótipo, os alunos participaram diretamente da montagem, seguindo etapas bem definidas:

- Instalação dos Sensores: Quatro sensores LDR são dispostos em cruz para maximizar a detecção da luz solar.
- Configuração dos Motores: Dois servos motores são configurados para permitir o movimento horizontal (azimute) e vertical (elevação) do painel solar.
- Programação do Arduino: O Arduino UNO é programado para interpretar os dados dos sensores e controlar os motores, garantindo a correta orientação do painel em relação ao sol.

Nesta etapa, a fase de testes práticos é crucial para avaliar a eficácia do protótipo, permitindo que os alunos observem a capacidade do dispositivo em rastrear o sol e maximizar a captação de energia solar.

O kit foi cuidadosamente selecionado de forma a permitir a articulação do painel em dois eixos (horizontal e vertical) e a realização de leituras de intensidade luminosa por sensores LDR (resistores dependentes de luz). A estrutura base do projeto é composta por uma Placa Arduino Uno SMD, conectada a um computador por meio de um cabo USB para a programação inicial. A alimentação do sistema foi garantida por uma fonte de alimentação chaveada de 5V 1A, conectada ao Arduino por um extensor de portas (EPX10) com conector jack P4, permitindo distribuir energia de forma segura e organizada para os demais componentes do circuito.

Figura 9 – Disposição completa do kit com Arduino Uno, servomotores, sensores LDR e painel solar



Fonte: Próprio autor.

A primeira etapa do projeto é a construção da estrutura de suporte para o rastreador solar. A estrutura é essencial para garantir que o sistema de servos e sensores esteja fixo e alinhado corretamente. O material escolhido para essa etapa foi o MDF, devido à sua

durabilidade, leveza e facilidade de corte e montagem. A estrutura será projetada para permitir movimentos tanto horizontais quanto verticais, possibilitando o acompanhamento do sol durante o dia.

4.3.1 Passos para a Montagem da Estrutura

- **Corte das Peças:** Comece cortando as peças de MDF nas dimensões necessárias para o projeto. Utilize uma serra tico-tico ou serra circular para obter cortes precisos. As principais peças a serem cortadas incluem:
 - Base: uma placa de MDF de aproximadamente 25 cm x 25 cm.
 - Suporte vertical: uma placa de MDF de aproximadamente 25 cm x 10 cm, que será fixada na base.
 - Suporte horizontal: uma placa de MDF de aproximadamente 20 cm x 10 cm, que servirá para fixar o painel solar e os sensores.
 - Braços para os servos: duas pequenas peças de MDF que servirão de suportes para fixar os motores servo na estrutura.
- **Montagem da Base:** Comece montando a base, que servirá como fundação do sistema. Fixe o suporte vertical à base utilizando parafusos M3 x 10mm. Para isso, faça furos na base e na parte inferior do suporte vertical. Depois, fixe-os com parafusos e arruelas.
- **Fixação dos Suportes para os Servos:** Nos dois lados do suporte vertical, fixe as pequenas peças de MDF (braços para os servos). Esses braços devem ser posicionados de forma a permitir o movimento livre dos servos horizontais e verticais.
- **Fixação do Suporte Horizontal:** O suporte horizontal será fixado na parte superior do suporte vertical, com a finalidade de fornecer estabilidade para o painel solar e os sensores LDR. Esse suporte servirá como ponto de conexão para os servos, os sensores e o painel solar.

Figura 10 – Materiais para a montagem do rastreador



Fonte: Próprio autor.

Figura 11 – Alunos realizando a montagem do protótipo



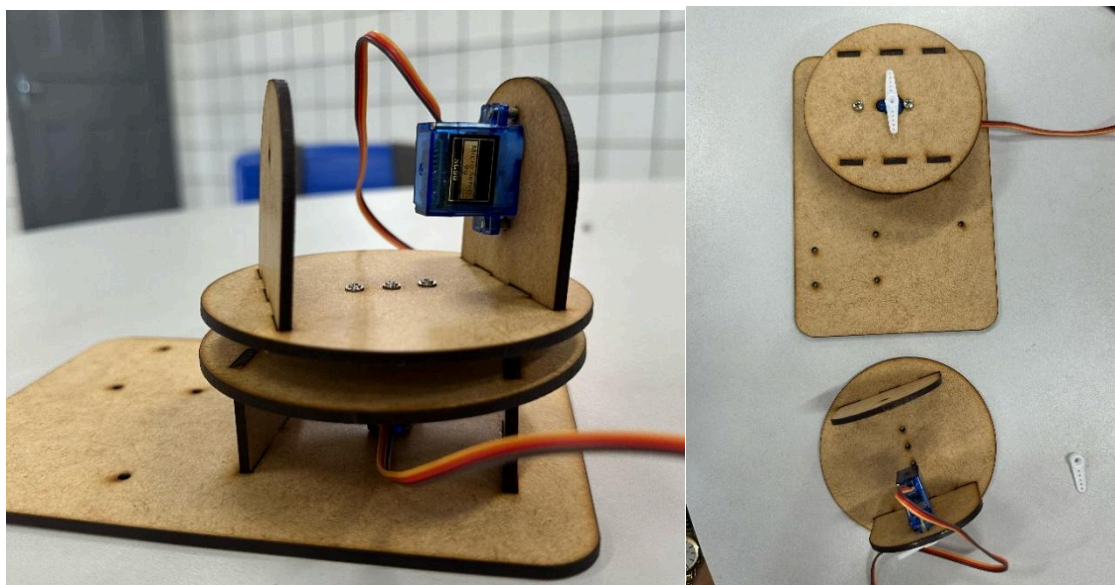
Fonte: Próprio autor.

Os servos motores são responsáveis por realizar os movimentos horizontais e verticais, ajustando a posição do painel solar. São necessários dois servos: um para o movimento horizontal e outro para o movimento vertical. O processo de instalação dos servos envolve fixá-los na estrutura e conectá-los corretamente ao Arduino.

4.3.2 Passos para a Instalação dos Servos

- **Servo Horizontal:** O servo responsável pelo movimento horizontal deve ser fixado no braço horizontal de MDF, utilizando parafusos Philips M3 x 6mm. O servo deve ser posicionado de forma que sua rotação mova a base do sistema para a esquerda e para a direita.
- **Servo Vertical:** O servo responsável pelo movimento vertical deve ser fixado no braço vertical de MDF, utilizando os mesmos parafusos. O movimento vertical ajustará a inclinação do painel solar para garantir que ele esteja sempre voltado para o sol.
- **Conexões dos Servos ao Arduino:**
- O servo horizontal será conectado ao pino digital D3 do Arduino, enquanto o servo vertical será conectado ao pino digital D5 do Arduino. No código, esses servos serão controlados pelas variáveis Horizontal e Vertical, respectivamente.

Figura 12 – Vista da posição dos servos motores



Fonte: Próprio autor.

4.3.3 Instalação dos Sensores LDR

Os sensores LDR (Light Dependent Resistor) são usados para detectar a intensidade da luz em diferentes direções, permitindo que o sistema ajuste a posição do painel solar em resposta ao movimento do sol. A instalação dos sensores LDR é crucial para o funcionamento correto do rastreador solar.

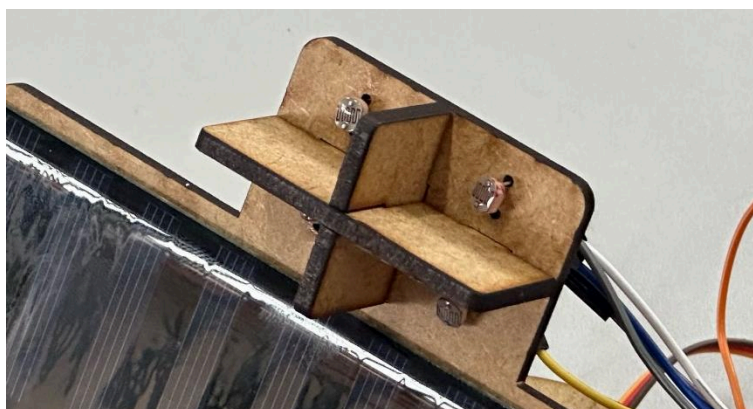
4.3.3.1 Passos para a Instalação dos Sensores LDR

- **Posicionamento dos Sensores LDR:** O sistema requer quatro sensores LDR, que devem ser instalados de forma estratégica para detectar a luz em quatro direções: superior esquerda, superior direita, inferior esquerda e inferior direita. Os sensores LDR serão instalados no suporte horizontal, em posições que garantam a leitura adequada da luz solar.
 - Coloque um LDR na parte superior esquerda, outro na parte superior direita, outro na parte inferior esquerda e o último na parte inferior direita do suporte horizontal.
- **Fixação dos LDRs:** Utilize pequenas abas de MDF, que servirão como suportes para os sensores LDR. Fixe-os nas posições corretas utilizando parafusos M3 x 6mm, de modo que fiquem estáveis e alinhados para realizar as medições de luminosidade.
- **Conexões dos Sensores LDR ao Arduino:**
 - Cada sensor LDR será conectado a um pino analógico do Arduino. O código utiliza os pinos A0, A1, A2 e A3 para os sensores LDR, respectivamente. As

conexões dos sensores devem ser feitas com jumpers fêmea-fêmea para garantir a estabilidade do sinal.

As abas posicionadas ao redor dos sensores LDR (Resistores Dependentes de Luz), na parte superior da estrutura em MDF, desempenham um papel essencial no funcionamento do rastreador solar. Essas pequenas extensões funcionam como barreiras que projetam sombras sobre os sensores conforme o ângulo de incidência da luz solar varia ao longo do dia. Quando o sol se move, a luz atinge os sensores de forma desigual por causa das sombras geradas por essas abas. Essa diferença de luminosidade detectada entre os LDRs é o que aciona o algoritmo de controle no Arduino, promovendo o deslocamento do painel solar para a direção onde há maior intensidade luminosa. Trata-se de uma aplicação direta do princípio de realimentação sensorial, em que o sistema ajusta sua posição continuamente a partir da leitura diferencial dos sensores.

Figura 13 – Funcionamento das abas sombreadoras sobre os sensores LDR



Fonte: Próprio autor.

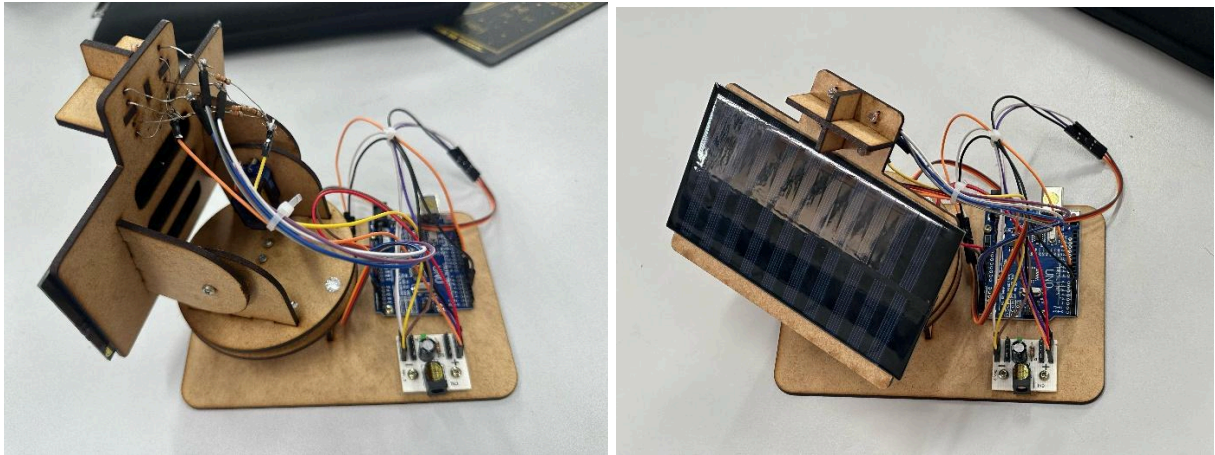
4.3.3.2 Conexões Elétricas e Alimentação

Para alimentar o sistema, será utilizado um módulo extensor de portas, que fornecerá a energia necessária para o Arduino, os servos e os sensores LDR. A alimentação do sistema deve ser feita de forma que todos os componentes recebam a tensão necessária para o funcionamento estável.

Passos para a Conexão e Alimentação:

- **Fonte de Alimentação:** Utilize uma fonte chaveada 5VDC 1A para alimentar o Arduino e os servos. A conexão do módulo extensor de portas garante que o sistema receba a tensão adequada, sem sobrecarregar o Arduino.
- **Conexões de Alimentação:** O pino de alimentação do Arduino deve ser conectado à fonte de 5V. Além disso, os servos devem ser conectados à mesma fonte de alimentação, para que possam ser controlados pelo Arduino.

Figura 14 – Protótipo pronto com as conexões



Fonte: Próprio autor.

4.3.3.3 Carregando o Código no Arduino

Após a montagem do sistema físico, o próximo passo é carregar o código no Arduino. O código é responsável por controlar os movimentos dos servos com base nas leituras dos sensores LDR.

Passos para Carregar o Código:

- **Conecte o Arduino ao computador:** Use um cabo USB para conectar o Arduino ao computador.
- **Carregue o código:** Abra a IDE do Arduino, cole o código fornecido e faça o upload para o Arduino. O código controla os servos horizontais e verticais com base nas leituras de luminosidade dos sensores LDR, ajustando a posição do painel solar em tempo real.

Figura 15 – Plataforma Arduino IDE aberta para o carregamento do código

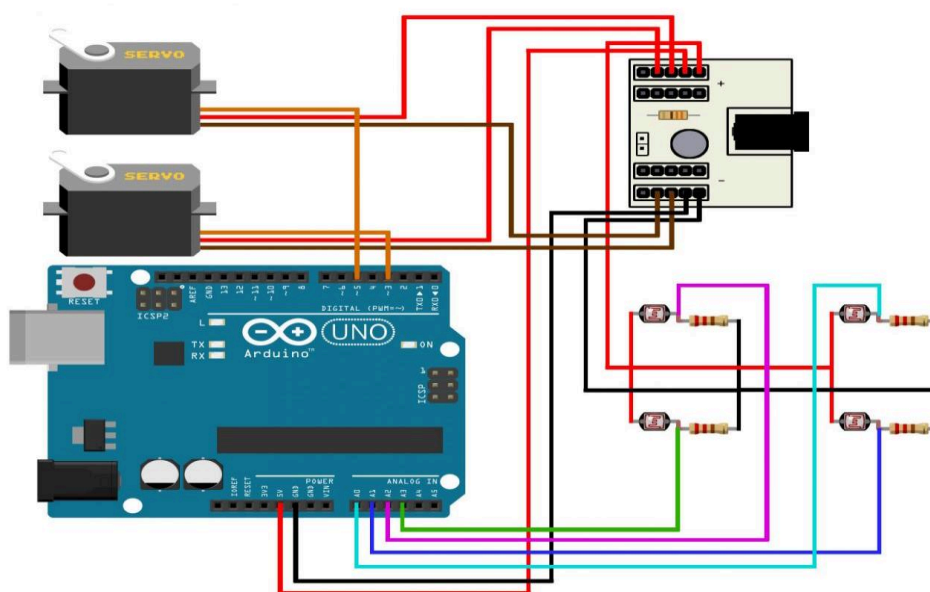
```

1
2 #include <Servo.h> // Inclui a Biblioteca
3
4 Servo Horizontal; // Inicia o Servo da Horizontal
5 Servo Vertical; // Inicia o Servo da Vertical
6
7 int ServoHorizontal = 90; // Estabelece valor fixo à ServoHorizontal
8 int ServoVertical = 90; // Estabelece valor fixo à ServoVertical
9
10 int LimitesServoHorizontalMax = 180; // Estabelece os limites de rotação
11 int LimitesServoHorizontalMin = 65; // Estabelece os limites de rotação
12
13 int LimitesServoVerticalMax = 120; // Estabelece os limites de rotação
14 int LimitesServoVerticalMin = 15; // Estabelece os limites de rotação
15
16 int LDRC = A0; // Inicia LDRC no pino A0
17 int LDRE = A1; // Inicia LDRE no pino A1
18 int LDRC = A2; // Inicia LDRC no pino A2
19 int LDRE = A3; // Inicia LDRE no pino A3
20
21 void setup() {
22   Horizontal.attach(3); // Inicia servo Horizontal na porta 03
23   Vertical.attach(5); // Inicia servo Vertical na porta 05
24
25   Horizontal.write(180); // Inicia servo Horizontal na posição 180
26   Vertical.write(45); // Inicia servo Vertical na posição 45
27   delay(3000); // Aguarda 3 segundos
28 }
29
30 void loop() {
31   int LDC = analogRead(LDRC); // leitura Analógica do LDR Direita Cima
32   int LEC = analogRead(LDRE); // leitura Analógica do LDR Esquerda Cima
33   int LDB = analogRead(LDRC); // leitura Analógica do LDR Direita Baixo
34   int LEB = analogRead(LDRE); // leitura Analógica do LDR Esquerda Baixo
35
36   int tol = 50;
  
```

Fonte: Próprio autor.

Todas as conexões do sistema estão detalhadamente descritas no esquema a seguir, que ilustra a disposição dos componentes e suas respectivas ligações no circuito. O esquema mostra claramente a conexão dos sensores LDR aos pinos analógicos do Arduino, assim como a interligação dos servos motores às portas digitais do microcontrolador. Além disso, o diagrama inclui a alimentação dos componentes e os resistores Pull-Down utilizados para garantir leituras precisas dos sensores de luminosidade. Seguir este esquema de ligação é essencial para garantir o correto funcionamento do rastreador solar, proporcionando o controle adequado dos movimentos do painel solar conforme a variação da intensidade da luz.

Figura 16 – Esquema de ligação das conexões do sistema



Fonte: Straub (2020).

4.4 Código do projeto

O código completo utilizado para o funcionamento do rastreador solar está detalhadamente apresentado no Apêndice A. Ele foi desenvolvido para o rastreador com o objetivo de ajustar automaticamente a posição do painel solar, orientando-o sempre para a direção que recebe a maior quantidade de luz. Isso é feito através do controle de dois servos motores (um para o movimento horizontal e outro para o movimento vertical), com base nas leituras fornecidas por quatro sensores LDR (Resistor Dependente de Luz). A cada ciclo de leitura, o código determina os ajustes necessários nos servos para manter o painel solar na posição ideal para capturar o máximo de energia solar.

A primeira parte do código começa com a inclusão da biblioteca Servo.h, que é essencial para o controle dos servos. O código então declara dois objetos do tipo Servo: um para controlar o movimento horizontal e outro para controlar o movimento vertical. Esses objetos,

denominados Horizontal e Vertical, são os responsáveis por movimentar o painel solar. Além disso, o código define variáveis para controlar os limites de rotação dos servos, para garantir que eles não se movam além de seus limites físicos. Os valores de rotação máximos e mínimos são estabelecidos para ambos os servos, sendo 180 graus e 65 graus para o servo horizontal e 120 graus e 15 graus para o servo vertical.

Em seguida, são definidas as variáveis de entrada para os sensores LDR. O código atribui os pinos analógicos do Arduino aos sensores de luminosidade: LDRDC para o LDR da direita superior, LDRDB para o LDR da direita inferior, LDREC para o LDR da esquerda superior, e LDREB para o LDR da esquerda inferior. A leitura dos sensores será feita por meio da função `analogRead()`, que retorna valores entre 0 e 1023, representando a intensidade de luz captada pelos sensores. Esses valores serão usados para determinar se o painel solar precisa se mover.

Na função `setup()`, os servos são inicialmente configurados para funcionar nas portas digitais 3 e 5 do Arduino. Os servos são posicionados em ângulos iniciais definidos no código: o servo horizontal começa em 180 graus (o que corresponde à posição máxima da direita) e o servo vertical começa em 45 graus (uma posição intermediária para o movimento de inclinação). Após essa configuração inicial, o código aguarda 3 segundos para garantir que os servos estejam prontos para realizar os movimentos.

A parte mais importante do código ocorre dentro da função `loop()`, que é executada repetidamente enquanto o Arduino estiver ligado. A cada ciclo, o código realiza a leitura dos sensores LDR para determinar a intensidade de luz em cada direção. As variáveis `ValorSup` e `ValorInf` representam a média das leituras dos sensores de luminosidade superior e inferior, respectivamente. Da mesma forma, as variáveis `ValorDir` e `ValorEsq` representam a média das leituras dos sensores da direita e da esquerda.

O código então calcula duas variáveis de diferença: `DifSupInf` (diferença entre a intensidade de luz superior e inferior) e `DifDirEsq` (diferença entre a intensidade de luz direita e esquerda). Esses valores serão usados para determinar a direção em que o painel solar deve se mover. Se a diferença de luminosidade entre a parte superior e inferior do painel for maior do que uma tolerância definida pelo código (variável `tol`), o servo vertical será ajustado para mover o painel para cima ou para baixo, dependendo da direção da luz. O mesmo acontece para a diferença entre os lados direito e esquerdo: se houver uma diferença de luminosidade significativa, o servo horizontal ajusta a posição do painel para a direita ou para a esquerda.

No código, o movimento dos servos é controlado de maneira que os valores de rotação nunca ultrapassem os limites definidos para cada servo, garantindo que o painel solar se mova

de forma segura e eficiente. Quando o painel está posicionado na direção correta, o código mantém o painel nessa posição até que uma nova diferença de luminosidade seja detectada pelos sensores, o que então acionará novos movimentos dos servos.

O uso de um pequeno delay de 100 milissegundos no final do loop ajuda a evitar que os servos se movam muito rapidamente e de forma desordenada. Esse atraso permite uma movimentação mais suave e controlada, além de garantir que o Arduino tenha tempo suficiente para processar as leituras dos sensores e enviar os comandos de movimento para os servos. Além disso, a introdução de um valor de tolerância na comparação de luminosidade permite um movimento mais estável, evitando que os servos se movam constantemente devido a pequenas variações na intensidade da luz.

4.5 Coleta e análise de dados

Durante a construção e os testes, dados relevantes foram coletados para avaliar o desempenho do dispositivo, as dificuldades enfrentadas pelos alunos e a aplicação dos conceitos de Física Solar. Essa coleta é realizada por meio de questionários de conhecimento prévio, registros de observação, entrevistas qualitativas e testes práticos. Os questionários permitem levantar o entendimento inicial dos alunos sobre conceitos-chave, como radiação solar e conversão de energia solar.

A comparação entre o conhecimento prévio e o aprendizado adquirido durante as atividades práticas possibilita medir o progresso dos estudantes e identificar áreas que necessitam de reforço. Além disso, os registros detalhados das etapas da construção do protótipo e as interações dos alunos com o projeto são essenciais para compreender as dificuldades enfrentadas, as soluções encontradas e o nível de engajamento dos alunos.

4.6 Avaliação do impacto da metodologia

A avaliação do impacto da abordagem prática no ensino da Física Solar foi realizada por meio de diversos instrumentos de coleta de dados. As entrevistas qualitativas, realizadas durante o desenvolvimento do projeto, proporcionaram uma visão mais profunda sobre a percepção dos alunos em relação à experiência de aprendizagem e à eficácia do dispositivo como ferramenta pedagógica.

Após a implementação do protótipo, os alunos realizaram testes práticos para avaliar sua competência em operar o dispositivo e interpretar os dados gerados. A eficiência do sistema foi testada em condições reais, verificando a capacidade de alinhar o painel solar com a posição ideal do sol. Durante os testes, os estudantes aplicaram os conceitos teóricos em situações concretas, consolidando seu aprendizado e verificando o desempenho do dispositivo.

4.7 Cronograma de execução da pesquisa

As implicações pedagógicas do uso de dispositivos de rastreamento solar no ensino da física são fundamentadas na abordagem construcionista (PAPERT, 1985), que enfatiza a importância da construção ativa do conhecimento pelos alunos. Sendo assim, esse projeto é realizado em um período de 8 aulas de 50 minutos, distribuídas de forma estratégica para que os alunos possam absorver os conceitos teóricos e aplicá-los na prática. O cronograma detalhado com as etapas e a quantidade de aulas dedicadas a cada fase do projeto é apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Cronograma de execução da pesquisa

Aula	Etapas	Atividades
1	Introdução à Pesquisa	- Apresentação dos objetivos e hipóteses da pesquisa. - Discussão sobre a importância do efeito fotovoltaico e dispositivos de rastreamento solar. - Aplicação do questionário diagnóstico
2	Fundamentação Teórica	- Revisão dos conceitos físicos relevantes, incluindo princípios do efeito fotovoltaico, luz como onda eletromagnética e movimento solar.
3	Desenvolvimento do Dispositivo	- Introdução ao Arduino e aos componentes eletrônicos. - Início da construção do protótipo do dispositivo de rastreamento solar.
4	Continuação do Desenvolvimento	- Finalização da construção do protótipo. - Testes iniciais do sistema e ajustes necessários para garantir seu funcionamento eficaz.
5	Aplicação Prática em Sala de Aula	- Implementação do dispositivo em atividades práticas com alunos. - Realização de experimentos para observar o efeito fotovoltaico e a eficiência energética.
6	Reflexão sobre Implicações Pedagógicas	Discussão sobre as implicações pedagógicas do uso do dispositivo, com destaque para a abordagem construcionista de Seymour Papert.
7	Análise dos Resultados	- Coleta e análise dos dados obtidos durante as atividades práticas.

		- Avaliação do impacto da metodologia construcionista no aprendizado dos alunos.
8	Apresentação dos Resultados	- Preparação e apresentação dos resultados em um seminário final. - Compartilhamento das experiências e aprendizagens com outros educadores e pesquisadores.

Fonte: Próprio autor.

5 DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO DIDÁTICA E ANÁLISE DOS QUESTIONÁRIOS

Esta seção tem como objetivo apresentar, de forma estruturada e detalhada, as etapas da intervenção didática desenvolvida à luz da teoria construcionista, centrada no estudo do efeito fotovoltaico por meio da construção e aplicação de um dispositivo de rastreamento solar controlado por Arduino. A proposta foi concebida para promover uma aprendizagem ativa e significativa, integrando teoria e prática no ensino de Física.

A seção inicia-se com a análise do questionário diagnóstico (Apêndice B), aplicado antes da intervenção, com o intuito de identificar os conhecimentos prévios dos estudantes sobre os temas abordados — energia solar, efeito fotovoltaico e microcontroladores. Em seguida, é descrita a aplicação prática, com destaque para as atividades desenvolvidas ao longo de oito encontros, os recursos utilizados, a dinâmica em sala de aula e a interação dos alunos com o experimento.

Na última parte, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos relatórios reflexivos elaborados pelos alunos após a implementação do projeto. Essa análise visa compreender as transformações no processo de aprendizagem, bem como as competências desenvolvidas ao longo da experiência, incluindo aspectos técnicos, cognitivos e socioemocionais. O conjunto dos dados obtidos permite avaliar o impacto da proposta didática e oferece subsídios para refletir sobre as possibilidades de uso de tecnologias acessíveis e abordagens pedagógicas inovadoras no ensino de Física.

5.1 Análise do questionário diagnóstico

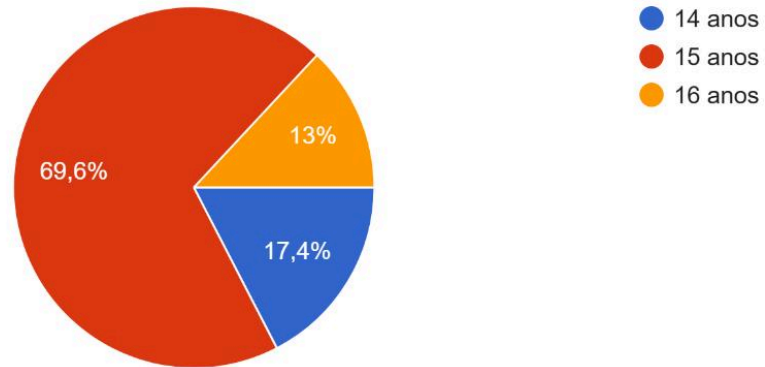
A aplicação do questionário diagnóstico permitiu identificar os conhecimentos prévios dos estudantes sobre energia solar, efeito fotovoltaico e microcontroladores. Os discentes, com idades entre 14 e 16 anos, encontram-se em uma fase cognitiva propícia à construção ativa do conhecimento. Papert (1980) argumenta que a aprendizagem é mais eficaz quando o aluno manipula e transforma objetos do mundo, tornando o conhecimento pessoal e significativo. Assim, o diagnóstico inicial é uma ferramenta essencial para subsidiar práticas pedagógicas pautadas no construcionismo (PAPERT, 2008).

No gráfico da Figura 17 é possível visualizar a quantidade de alunos participantes, distribuída por faixa etária, o que nos permite entender melhor a diversidade presente no grupo e sua relação com o processo de aprendizagem vivenciado.

Figura 17 – Porcentagem de alunos participantes por idade

Qual sua idade?

46 respostas



Fonte: Próprio autor.

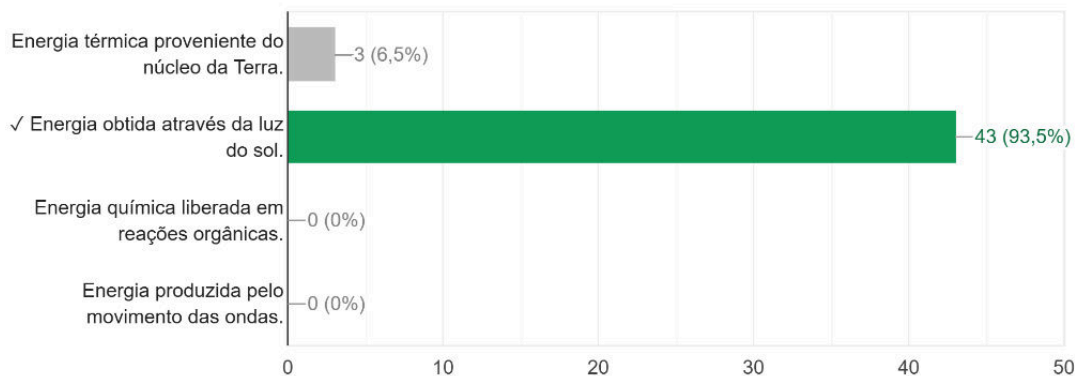
Questão 1: O que é energia solar?

A maioria dos estudantes (93%) identificou corretamente que a energia solar é obtida através da luz do sol (alternativa B), conforme mostra a Figura 18. Esse resultado evidencia uma familiaridade inicial com o tema, que pode ser ampliada por meio de experiências práticas. Conforme destaca Papert (2008), o aprendizado se fortalece quando os conceitos são integrados a ações concretas. A construção de protótipos solares favorece a compreensão do conceito de energia solar para além da memorização.

Figura 18 – Respostas à Questão 1

1 - O que é energia solar?

43 / 46 respostas corretas

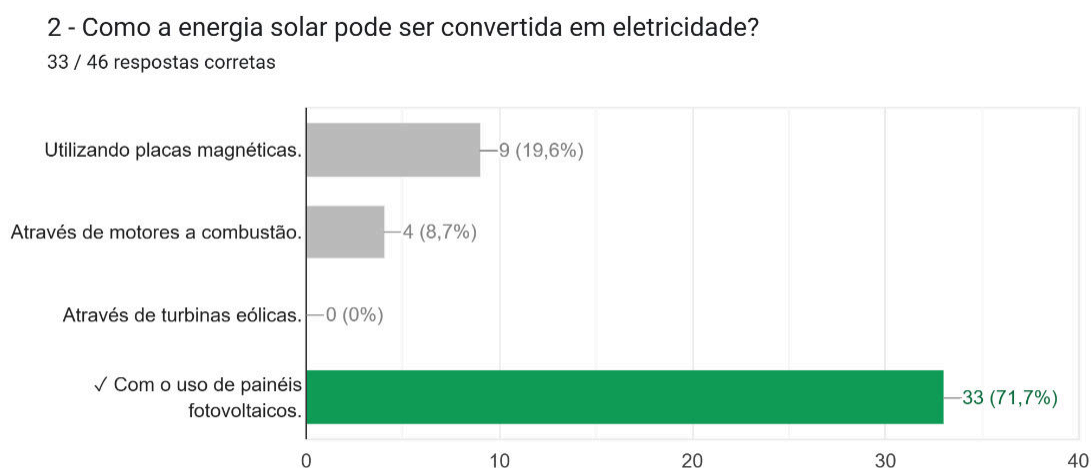


Fonte: Próprio autor.

Questão 2: Como a energia solar pode ser convertida em eletricidade?

Nesta questão, 72% dos alunos marcaram corretamente a alternativa D (com o uso de painéis fotovoltaicos). Apesar da maioria ter acertado, o percentual revela a necessidade de reforçar os conceitos sobre a conversão da energia solar. A aprendizagem baseada em projetos, utilizando microcontroladores como o Arduino, favorece a compreensão desse processo, tornando a experiência tangível e significativa, como propõe Papert (1985).

Figura 19 – Respostas à Questão 2

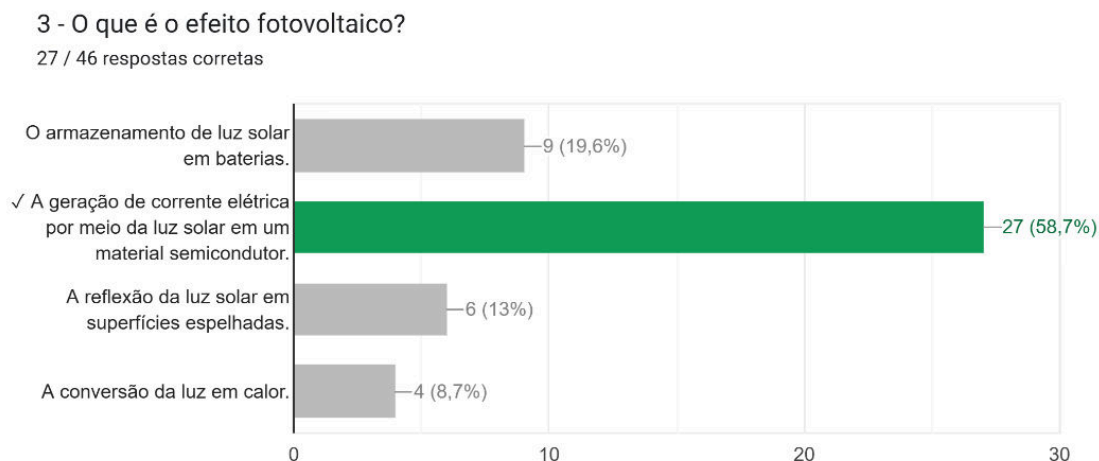


Fonte: Próprio autor.

Questão 3: O que é o efeito fotovoltaico?

Apenas 59% dos alunos (ver Figura 20) reconheceram o efeito fotovoltaico como a geração de corrente elétrica por meio da luz solar em um material semicondutor (alternativa B). Esse dado reforça a importância de atividades experimentais que permitam observar e manipular esse fenômeno. Cachapuz (2005) ressalta que os estudantes aprendem melhor quando participam ativamente da investigação científica. Projetos com células fotovoltaicas conectadas ao Arduino proporcionam esse tipo de experiência.

Figura 20 – Respostas à Questão 3

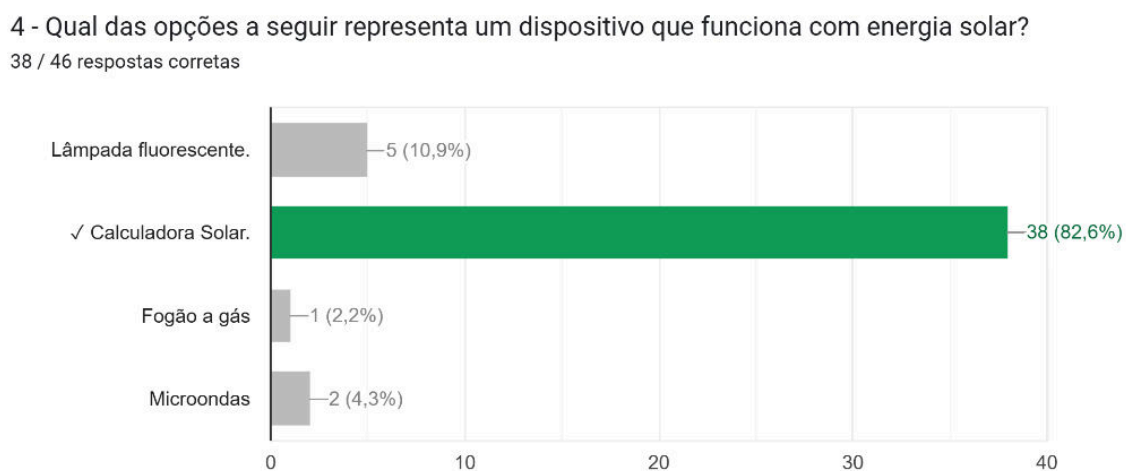


Fonte: Próprio autor.

Questão 4: Qual das opções representa um dispositivo que funciona com energia solar?

Nesta questão, 83% identificaram corretamente a calculadora solar como um exemplo de dispositivo movido a energia solar. Embora a maioria tenha acertado, é fundamental que os alunos compreendam como diferentes dispositivos operam com essa fonte energética. Papert (1985) defende que o conhecimento se consolida quando o aprendiz é desafiado a criar e adaptar tecnologias no contexto de resolução de problemas reais.

Figura 21 – Respostas à Questão 4

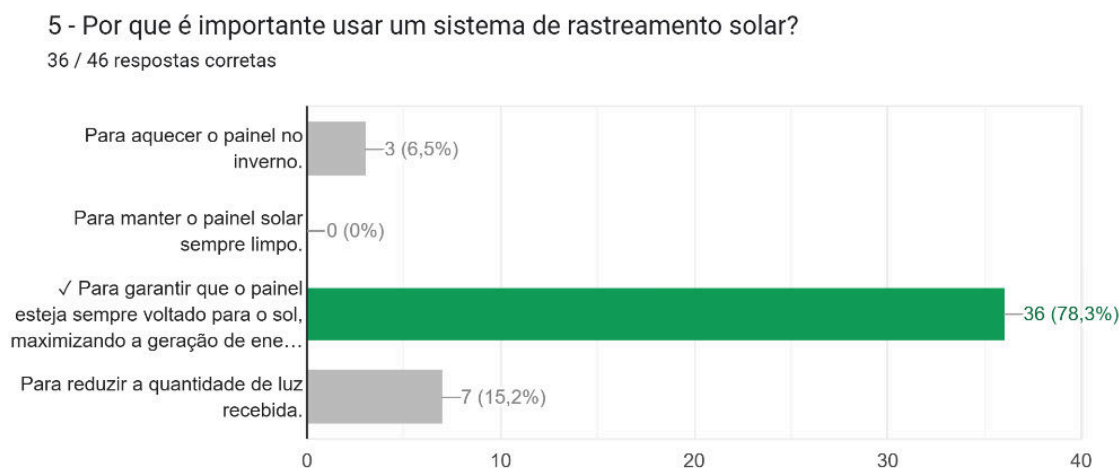


Fonte: Próprio autor.

Questão 5: Por que é importante usar um sistema de rastreamento solar?

A resposta correta (alternativa C) foi identificada por 78% dos estudantes (ver). A compreensão sobre a importância de manter os painéis sempre voltados para o sol pode ser reforçada através da construção de sistemas de rastreamento automatizados. Essa atividade estimula o pensamento computacional e a interdisciplinaridade, promovendo uma aprendizagem ativa e significativa (MORIN, 2000).

Figura 22 – Respostas à Questão 5



Fonte: Próprio autor.

Questões 6, 7 e 8: Respostas dissertativas

As questões abertas 6, 7 e 8 foram formuladas com o intuito de avaliar a compreensão conceitual dos estudantes sobre os temas "efeito fotovoltaico", "energia solar" e "microcontroladores, como o Arduino". A análise das respostas revelou que, embora a maioria dos alunos demonstre alguma familiaridade superficial com os temas abordados, suas formulações carecem de embasamento técnico-científico e revelam dificuldades conceituais relevantes. A presença de comentários espontâneos durante a aplicação do questionário também contribuiu para compreender o grau de desafio que esses conteúdos representam no imaginário dos estudantes.

Na questão sobre o efeito fotovoltaico (questão 6), observou-se que aproximadamente 85% dos alunos apresentaram respostas vagas ou incorretas. Foram comuns afirmações como: “É quando o sol vira energia”, “É quando a luz vira energia elétrica nas placas” e “É a energia que vem da luz”. Alguns estudantes, ao se depararem com a pergunta, comentaram de forma espontânea: “Agora pegou, professor!”, ou ainda “Esse nome é difícil, nunca ouvi na aula”. Uma resposta particularmente representativa foi: “É o painel que transforma o calor do sol em energia elétrica”. Essa resposta revela não apenas uma confusão entre energia térmica e energia

elétrica, mas também uma tendência à associação direta com o cotidiano — nesse caso, a observação de painéis solares — sem a compreensão dos processos físicos envolvidos, como a atuação dos semicondutores, a liberação de elétrons e a geração de corrente elétrica. Um pequeno grupo, cerca de 15%, demonstrou aproximação com uma explicação mais técnica. Um aluno, por exemplo, respondeu: “Quando a luz bate no material da placa e os elétrons se movimentam e aí gera a energia elétrica. É tipo a base da energia solar nas casas”. Ainda que simplificada, essa resposta revela que o aluno teve algum contato com o conceito científico por meio de experimentos ou explicações mais aprofundadas em sala de aula. O baixo índice de acertos pode ser atribuído ao fato de que o conceito de “efeito fotovoltaico” dificilmente é tratado de forma detalhada no ensino básico, aparecendo mais frequentemente de forma implícita em discussões ambientais ou tecnológicas, mas sem a devida articulação com os fundamentos da física moderna.

Na questão 7, que abordava o tema da energia solar, as respostas indicaram uma familiaridade ligeiramente maior entre os estudantes. Cerca de 60% relacionaram corretamente a energia solar à sustentabilidade, ao uso de placas solares e à ideia de uma fonte limpa de energia. Foram frequentes respostas como: “É a energia que vem do sol e ajuda o meio ambiente”, “É uma energia limpa e renovável que usa o sol”, e “Usa placas solares pra economizar energia da rua”. Um estudante escreveu: “Energia que é boa pro planeta e não polui, por isso é usada nas casas com placa solar”. Apesar de conceitualmente limitadas, essas respostas demonstram que os estudantes foram expostos ao tema, ainda que com ênfase nos aspectos ambientais e não nos princípios de funcionamento dos sistemas fotovoltaicos. Cerca de 30% das respostas apresentaram ideias equivocadas ou misturaram conceitos. Uma aluna escreveu: “É o painel que guarda o sol e transforma ele em luz à noite”, revelando a associação com baterias ou sistemas de armazenamento, mas de forma confusa e fantasiosa. Outros 10% declararam não saber responder. Durante a aplicação, alguns alunos comentaram: “Essa eu já ouvi falar mais”, ou ainda “Essa é mais fácil porque tem nas casas agora”. Esses relatos reforçam a ideia de que a popularização dos painéis solares no cotidiano contribui para a aproximação dos estudantes com o tema, ainda que isso não implique, necessariamente, em uma compreensão aprofundada dos dispositivos envolvidos, como inversores, controladores de carga ou a diferença entre sistemas térmicos e fotovoltaicos.

Já a questão 8, que tratava dos microcontroladores como o Arduino, apresentou o maior índice de desconhecimento entre os estudantes. Cerca de 65% responderam diretamente que não sabiam o que era, com frases como: “Nunca ouvi falar”, “Não faço ideia”, “É uma palavra nova pra mim”. Um aluno comentou em voz alta ao ler a pergunta: “Agora complicou de vez,

professor!” e outro completou: “Isso deve ser coisa de robô”. Essas reações evidenciam o distanciamento da maioria em relação ao universo da cultura maker e da programação aplicada à ciência. Entre os 25% que conseguiram formular algo, surgiram respostas como: “É uma plaquinha que liga luz”, “A gente usa pra fazer sensor funcionar”, ou “Serve pra robótica, pra ligar motor e sensor com computador”. Apenas dois estudantes, representando 10%, demonstraram um entendimento mais próximo da realidade funcional do Arduino, como ilustra a seguinte resposta: “O Arduino é uma placa de prototipagem usada para programar sensores, motores e LEDs. É muito usada em projetos de automação e robótica educacional”. Essas respostas indicam que o contato com o Arduino esteve provavelmente limitado a atividades extracurriculares, feiras de ciências ou oficinas específicas, não sendo algo presente no currículo formal da maioria dos estudantes. O desconhecimento é indicativo de uma lacuna importante na formação científica e tecnológica no ensino médio, especialmente em tempos em que habilidades como pensamento computacional, lógica de programação e eletrônica básica tornam-se cada vez mais valorizadas nas diretrizes educacionais contemporâneas.

Ao se analisar as três questões em conjunto, percebe-se uma progressão decrescente no nível de familiaridade e compreensão dos estudantes: “energia solar” aparece como um tema mais conhecido e acessível, “efeito fotovoltaico” é reconhecido apenas superficialmente e com confusões conceituais relevantes, enquanto o “Arduino” ainda é praticamente desconhecido pela maioria. Esses dados evidenciam a importância de propostas pedagógicas que envolvam o estudante de forma ativa, prática e contextualizada. Projetos como a construção de um rastreador solar automatizado com Arduino, por exemplo, permitem não apenas o contato com conceitos teóricos da física e da eletrônica, mas também promovem o engajamento crítico e criativo dos estudantes, ao conectar os conteúdos escolares com desafios reais e aplicações tecnológicas do cotidiano. Além disso, ao vivenciar esses temas por meio da experimentação, os alunos tendem a ressignificar seu entendimento e superar as dificuldades iniciais demonstradas nas respostas aqui analisadas.

As respostas a essas deficiências de aprendizagem podem ser buscadas na perspectiva construcionista de Seymour Papert (1985), que propõe a aprendizagem como um processo ativo de construção do conhecimento, favorecido pela interação com objetos concretos e tecnológicos. Pois, o uso de ferramentas como o Arduino fornece aos estudantes “objetos para pensar”, ou seja, elementos tangíveis que promovem o raciocínio abstrato por meio da experimentação. Ao desenvolverem projetos com sensores, painéis solares e sistemas de controle automatizado, os alunos têm a oportunidade de aplicar conceitos de física, eletrônica e programação em situações reais, promovendo a aprendizagem significativa.

Dessa forma, integrar o uso de tecnologias interativas em sala de aula, como kits baseados em microcontroladores, representa não apenas uma inovação pedagógica, mas uma necessidade urgente para ampliar a compreensão dos estudantes sobre os fenômenos científicos. A proposta didática do projeto, alinhada ao construcionismo, permite que os alunos avancem de uma compreensão superficial para uma visão mais estruturada e aplicada dos conceitos científicos, como o efeito fotovoltaico e a conversão de energia solar em eletricidade.

5.2 Aplicação prática da proposta didática

Esta seção apresenta a intervenção didática realizada com estudantes do ensino médio, estruturada a partir de uma proposta baseada na teoria construcionista de Seymour Papert. A sequência didática foi planejada com oito encontros, cada um com objetivos e atividades específicas, articulando teoria e prática por meio da construção e experimentação de um dispositivo de rastreamento solar automatizado com Arduino. O planejamento e a execução das aulas buscaram promover o protagonismo dos alunos, o aprendizado ativo e o desenvolvimento de competências científicas e tecnológicas.

A intervenção iniciou-se na **primeira aula**, com a **introdução à pesquisa**, momento em que os alunos foram apresentados aos objetivos e hipóteses do projeto. A aula iniciou com uma discussão sobre a importância do efeito fotovoltaico, destacando seu papel na conversão da luz solar em eletricidade e suas aplicações no contexto da energia sustentável. Além disso, foram explorados os dispositivos de rastreamento solar, enfatizando como esses sistemas aumentam a eficiência da captação de energia ao acompanhar a trajetória do Sol. Esse momento inicial foi essencial para despertar a curiosidade dos alunos e motivá-los a compreender a relevância do tema, conectando conceitos teóricos com aplicações práticas que impactam diretamente a sociedade. A 23 mostra o professor transmitindo essas informações para os estudantes.

Figura 23 – Primeira aula: introdução a pesquisa



Fonte: Próprio autor.

Na **segunda aula**, dedicada à **fundamentação teórica**, foram revisados os principais conceitos físicos necessários para o desenvolvimento da pesquisa. A aula iniciou com uma revisão dos princípios do efeito fotovoltaico, explicando como os fótons da luz solar interagem com os semicondutores para gerar eletricidade. Em seguida, explorou-se a natureza da luz como onda eletromagnética, destacando suas propriedades e sua relação com a conversão de energia. Além disso, discutiu-se o movimento aparente do Sol no céu, enfatizando como sua trajetória influencia a captação de energia solar ao longo do dia. Esse aprofundamento conceitual foi fundamental para que os alunos construíssem uma base sólida de conhecimento, permitindo uma melhor compreensão dos desafios e vantagens dos dispositivos de rastreamento solar.

Figura 24 – Segunda aula de fundamentação teórica



Fonte: Próprio autor.

A **terceira aula** marcou o início da etapa de **desenvolvimento do dispositivo**, com a introdução ao uso do Arduino e dos componentes eletrônicos que compõem o sistema de rastreamento solar. A aula começou com uma explicação sobre o funcionamento do Arduino, destacando sua importância como plataforma de prototipagem e sua aplicabilidade na automação de sistemas. Em seguida, os componentes eletrônicos, como sensores de luminosidade (LDRs), servomotores e módulos de alimentação, foram apresentados, detalhando suas funções dentro do sistema. Após essa introdução teórica, iniciou-se a construção do protótipo, com os alunos realizando a montagem inicial da estrutura do rastreador solar (Figura). Esse momento proporcionou um aprendizado prático fundamental, estimulando a familiarização com os equipamentos e preparando a turma para a programação e testes do dispositivo nas etapas seguintes.

Figura 25 – Terceira aula: início do desenvolvimento do dispositivo



Fonte: Próprio autor.

Na **quarta aula**, a atividade teve continuidade com a **finalização da construção do dispositivo** e a realização dos primeiros testes. Com a estrutura concluída, iniciou-se a fase de testes iniciais, verificando a comunicação entre o Arduino, os sensores de luminosidade (LDRs) e os servomotores responsáveis pelo movimento do dispositivo. Durante essa etapa, ajustes finos foram necessários para garantir a precisão na captação da luz solar e no acionamento correto dos motores. Os alunos analisaram o comportamento do sistema e identificaram possíveis melhorias, como a calibração dos sensores e otimizações no código de controle, conforme pode ser observado na Figura . Esse encontro foi essencial para consolidar os conhecimentos adquiridos, promovendo um aprendizado ativo e exploratório por meio da experimentação e solução de problemas.

Figura 26 – Quarta aula: desenvolvimento do dispositivo



Fonte: Próprio autor.

A **quinta aula** foi dedicada à **aplicação prática em sala de aula**. Com o protótipo em funcionamento, os alunos realizaram experimentos para observar o efeito fotovoltaico em ação,

comparando o desempenho de painéis fixos com o dispositivo rastreador, demonstrando, na prática, a importância do alinhamento otimizado com a trajetória do Sol. Além disso, os alunos coletaram dados sobre a geração de energia em diferentes condições de iluminação (Figura), refletindo sobre como pequenas variações podem impactar o desempenho do sistema. Essa experiência não apenas reforçou os conceitos teóricos discutidos anteriormente, mas também incentivou o pensamento crítico e a experimentação científica.

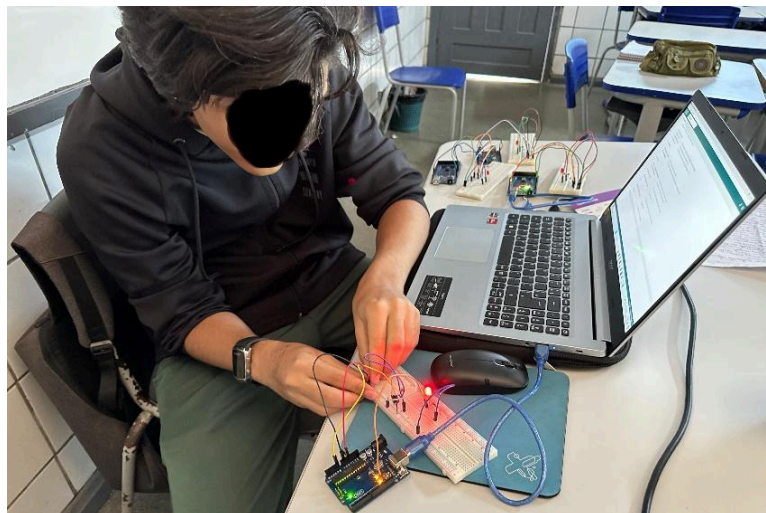
Figura 27 – Quinta aula: aplicação prática em sala de aula



Fonte: Próprio autor.

Após a quinta aula, foi necessário realizar alguns ajustes no equipamento para melhorar seu desempenho. Durante os experimentos, identificamos pequenas variações na resposta dos sensores de luz, o que comprometia a precisão do rastreamento solar. Para corrigir esse problema, ajustamos os parâmetros de sensibilidade dos sensores e refinamos o código de controle do Arduino. Um dos alunos, demonstrando grande interesse e habilidade, contribuiu ativamente no processo de calibração, ajudando a configurar corretamente os sensores para garantir um melhor alinhamento do painel com a posição do Sol. Esses ajustes foram fundamentais para otimizar a eficiência do dispositivo e garantir resultados mais precisos nos testes seguintes.

Figura 28 – Refinamento do protótipo



Fonte: Próprio autor.

Na **sexta aula**, foi proposta uma **reflexão sobre as implicações pedagógicas** do projeto. Em grupo, os alunos discutiram como a construção do protótipo contribuiu para sua compreensão dos conceitos abordados e como a experimentação prática favoreceu o aprendizado. A abordagem construcionista foi ressaltada como promotora do engajamento, da autonomia e do desenvolvimento de habilidades socioemocionais, como o trabalho em equipe e a criatividade.

Na **sétima aula**, concentramos esforços na **análise dos resultados** obtidos ao longo do projeto. A coleta de dados dos testes práticos foi revisada minuciosamente, e os alunos participaram ativamente da interpretação dos valores registrados, relacionando-os aos conceitos teóricos previamente estudados (Figura). A avaliação do impacto da metodologia construcionista no aprendizado mostrou que a abordagem prática facilitou a assimilação dos conteúdos, tornando o processo de ensino mais envolvente e interativo. Os alunos relataram maior motivação para aprender física e compreenderam de forma mais concreta os princípios do efeito fotovoltaico e da automação com Arduino. Essa etapa reforçou a importância do ensino experimental como ferramenta essencial para a aprendizagem significativa.

Figura 29 – Sétima aula: implicações pedagógicas do uso do dispositivo de rastreamento solar



Fonte: Próprio autor.

Por fim, na **oitava aula**, os grupos se dedicaram à **preparação e apresentação dos resultados** em um seminário final, realizado durante a Semana de Ciência e Tecnologia em outra escola. Cada grupo organizou suas conclusões, destacando os desafios enfrentados, as soluções desenvolvidas e os conhecimentos adquiridos sobre o efeito fotovoltaico e o rastreamento solar. Além de consolidar o aprendizado, a apresentação permitiu que os alunos desenvolvessem habilidades de comunicação científica ao compartilhar suas descobertas com um público mais amplo.

O evento contou também com outras demonstrações científicas, incluindo uma empolgante batalha de robôs, que despertou grande interesse entre os participantes. Essa troca de experiências com outros educadores e pesquisadores reforçou a importância do ensino baseado na experimentação e na abordagem construcionista. O encerramento da pesquisa foi marcado pelo entusiasmo dos alunos, que se mostraram mais confiantes e engajados na exploração de tecnologias sustentáveis e no desenvolvimento de soluções inovadoras para problemas reais.

Figura 30 – Aula final: apresentação da prática desenvolvida em evento científico



Fonte: Próprio autor.

5.3 Análise dos relatórios após a implementação do projeto: uma perspectiva construcionista

Após a conclusão do projeto de construção de um rastreador solar automatizado com Arduino, os estudantes foram convidados a responder um questionário composto por 17 perguntas dissertativas, cujo objetivo foi promover a autorreflexão e avaliar o impacto da experiência em diferentes dimensões do processo de aprendizagem: conceitual, técnica, colaborativa e subjetiva. A análise das respostas revelou transformações significativas na compreensão dos alunos sobre os temas abordados, especialmente quando comparadas com suas concepções iniciais, antes da implementação do projeto.

Logo nas primeiras perguntas — “Explique com suas palavras o que foi o projeto do rastreador solar” e “Qual era o objetivo principal do projeto” — os estudantes demonstraram ter compreendido com clareza o propósito da atividade. A maioria descreveu o projeto como a construção de um dispositivo que acompanha o movimento do Sol para captar melhor a energia solar. Uma aluna escreveu: “Foi um projeto onde criamos um painel que se movimenta sozinho usando sensores e uma placa Arduino para captar mais luz do Sol.” Essa resposta já evidencia um vocabulário técnico mais apurado e uma apropriação dos conceitos de automação e eficiência energética. No início do projeto, muitos estudantes sequer sabiam o que era um rastreador solar ou confundiam energia solar com calor. Ao final, identificaram não apenas o “o que”, mas o “por que” do funcionamento do protótipo, demonstrando evolução em termos de raciocínio tecnológico e contextualização científica.

Na terceira pergunta — “Qual a importância de estudar e aplicar a energia solar?” — as respostas se mostraram particularmente reveladoras do avanço conceitual dos estudantes. Antes do projeto, a energia solar era frequentemente vista de forma genérica, associada a “economia” ou “uma forma diferente de luz”. Após a vivência prática, as respostas passaram a refletir uma compreensão mais crítica e abrangente. Um estudante afirmou: “A energia solar é importante porque é limpa, não polui, e pode ser usada em regiões onde não tem acesso à energia elétrica. Com o rastreador, ela pode ser mais eficiente ainda.” Percebe-se aqui não apenas o reconhecimento da sustentabilidade, mas também da função do projeto no aprimoramento dessa tecnologia. Outro aluno escreveu: “Estudar energia solar ajuda a entender como a gente pode gerar energia sem agredir o planeta. E com o rastreador, aproveita mais o sol.” Essa integração entre os conceitos de sustentabilidade e eficiência energética representa um avanço em relação à percepção inicial limitada.

As perguntas sobre a participação nas atividades práticas (4 e 5) indicaram que os alunos não apenas atuaram de forma ativa, como também passaram a compreender melhor seu papel

em um processo coletivo. Um estudante relatou: “Eu ajudei na montagem do circuito, ligando os fios nos sensores. No começo fiquei com medo de errar, mas depois fui pegando confiança.” Outro comentou: “No meu grupo, eu fiquei responsável por testar os códigos. A gente errava muito, mas ia aprendendo junto.” Esses relatos mostram o engajamento progressivo dos alunos, muitos dos quais iniciaram o projeto com receio de lidar com tecnologia, mas foram adquirindo autonomia à medida que o trabalho avançava. A estrutura colaborativa e o ambiente de apoio entre colegas e professor foram fundamentais para essa evolução, como destacado por Papert (1985) ao afirmar que a aprendizagem significativa ocorre quando o estudante interage com objetos para pensar — neste caso, o próprio protótipo — em contextos de construção coletiva.

A sexta pergunta — “Você encontrou dificuldades? Quais foram e como superou?” — revelou que as barreiras enfrentadas não foram obstáculos intransponíveis, mas sim pontos de virada no processo de aprendizagem. A maioria mencionou a programação como o principal desafio. Um aluno escreveu: “Nunca tinha mexido com código, então não entendia nada. Mas aos poucos fui testando, vendo os erros e entendendo com a ajuda do professor.” Outro disse: “A parte de ligar tudo sem dar curto foi difícil. A gente queimou uns LEDs, mas depois aprendeu a verificar antes.” Esses relatos revelam uma disposição para enfrentar o erro como parte do processo, o que é essencial numa abordagem construcionista. O que antes era um fator de desistência — o medo de falhar — passou a ser encarado como oportunidade de aprendizagem.

As perguntas 7 e 8, sobre o que foi aprendido e os conceitos trabalhados, reforçam essa progressão. Os estudantes passaram a mencionar, de forma articulada, conceitos de física (transformação de energia, potência, eletricidade), de eletrônica (sensor LDR, resistores, corrente elétrica) e de programação (estrutura de código, comandos básicos, lógica condicional). Um exemplo de resposta: “Aprendi que a luz do sol pode gerar energia elétrica nas placas, mas que se o painel se movimenta com o sol, a geração é maior. Aprendi também a mexer com sensores e o código do Arduino para isso acontecer.” Outro afirmou: “Antes eu não sabia o que era um microcontrolador, agora sei que é uma plaquinha que controla tudo e pode ser programada pra várias coisas.” O projeto promoveu, assim, uma integração entre teoria e prática, entre ciência e tecnologia, que muitas vezes está ausente no ensino tradicional.

A pergunta 9 — “Você acha que o projeto ajudou a entender melhor esses conteúdos?” — obteve unanimidade nas respostas afirmativas. As justificativas revelaram que a experiência concreta facilitou a compreensão de conteúdos que, de outra forma, seriam abstratos. Um aluno sintetizou: “Na teoria a gente decora, mas aqui a gente entendeu mesmo.” Outro completou: “Eu nunca entendi direito como funcionava energia solar. Agora vi como ela funciona na

prática.” Essas falas são potentes para demonstrar a eficácia da abordagem. Elas revelam o deslocamento de uma postura passiva (memorização) para uma aprendizagem ativa (compreensão e aplicação).

Nas perguntas sobre a colaboração (10 e 11), os estudantes destacaram a importância do trabalho em grupo, da divisão de tarefas e da cooperação. Um dos relatos mais frequentes foi: “No grupo tinha gente que sabia mais e ajudava os outros. A gente se dividiu bem e ninguém ficou parado.” A divisão espontânea de papéis e o fortalecimento da responsabilidade coletiva foram marcantes. Um aluno descreveu: “Um fazia o código, outro ligava os fios e outro testava. A gente se ajudava porque se não funcionasse, todo mundo perdia.” Essa consciência da interdependência dentro de um projeto colaborativo é um elemento-chave para o desenvolvimento de competências do século XXI, como comunicação, empatia e resolução de problemas em equipe.

A pergunta 12 — “Você acredita que evoluiu em termos de conhecimento e habilidades?” — foi outro ponto alto da análise. A maioria dos alunos reconheceu que o projeto representou uma curva de aprendizado. Um deles afirmou: “Antes eu não sabia nem o que era Arduino. Agora sei montar, ligar os sensores, fazer o código rodar. Foi uma grande evolução.” Outro comentou: “Aprendi coisas novas e vi que sou capaz de aprender mais. Isso me motivou muito.” O reconhecimento da própria evolução é um sinal inequívoco de que o projeto cumpriu sua função formativa.

As últimas perguntas (13 a 17) abordaram aspectos afetivos e reflexivos da experiência. Quando perguntados sobre o que mais gostaram, os alunos citaram a montagem, o funcionamento real do sistema e o trabalho em equipe. Um aluno comentou: “Foi muito legal ver o painel se mexendo, saber que a gente fez aquilo funcionar.” Outro disse: “Gostei porque foi diferente de tudo que já fiz na escola. Me senti parte de algo importante.” Sobre o que poderia ser melhorado, surgiram sugestões como mais tempo para desenvolver, mais peças para testar e realizar apresentações públicas do projeto. Ao fazer um resumo da experiência, muitos utilizaram palavras como “incrível”, “desafiadora”, “divertida” e “transformadora”. E, finalmente, todos afirmaram que gostariam de participar de outros projetos similares. “Sim, eu participaria com certeza. Aprendi mais nesse projeto do que em várias aulas teóricas.”

Essa última resposta dos estudantes sintetiza, de forma contundente, o impacto abrangente que o projeto do rastreador solar exerceu sobre o processo de aprendizagem. A análise cuidadosa das respostas revelou que, ao longo do desenvolvimento da atividade, os alunos vivenciaram uma transformação profunda em sua postura diante do conhecimento e das tecnologias envolvidas. Inicialmente, muitos estudantes assumiam uma posição passiva, com

conhecimentos fragmentados e pouca familiaridade com os conceitos científicos e técnicos relacionados à energia solar e ao uso de microcontroladores. Contudo, à medida que o projeto avançava, ficou evidente uma mudança significativa, que se manifestou não só no domínio dos conteúdos, mas principalmente no modo como os estudantes se relacionaram com o processo de aprendizagem, mostrando maior protagonismo, interesse e autonomia.

Essa transição de uma postura receptiva para uma participação ativa reflete os princípios centrais da abordagem construcionista, que valoriza o envolvimento do aprendiz na construção do próprio conhecimento por meio da criação e manipulação de artefatos significativos. No contexto do rastreador solar, os alunos não foram meros receptores de informações, mas agentes ativos que experimentaram, testaram hipóteses, enfrentaram erros e superaram desafios concretos. A aprendizagem, portanto, deixou de ser um processo linear de memorização para tornar-se uma experiência dinâmica e interativa, onde o erro foi compreendido como uma etapa natural e necessária para a construção do saber. Isso gerou um ambiente rico em descobertas, motivação e autoconfiança, fatores indispensáveis para a consolidação do conhecimento técnico-científico.

Além da evolução conceitual, o projeto possibilitou que os estudantes desenvolvessem habilidades técnicas concretas, como a montagem de circuitos eletrônicos, o uso de sensores, a programação em Arduino e a integração desses componentes para atingir um objetivo funcional real. Essa progressão do desconhecimento total ao manejo consciente dessas tecnologias demonstra a eficácia do método de ensino adotado. Os estudantes passaram a compreender não apenas o funcionamento do sistema de rastreamento solar, mas também os fundamentos físicos que o sustentam, como a transformação da energia luminosa em elétrica, e os princípios básicos da eletrônica e da lógica computacional. Essa apropriação multidisciplinar é fundamental para formar cidadãos capazes de entender e interagir com as tecnologias do mundo contemporâneo.

Outro aspecto fundamental observado foi a importância da colaboração e do trabalho em equipe. Os relatos indicam que a construção do conhecimento não ocorreu isoladamente, mas em um ambiente coletivo onde o diálogo, a troca de saberes e a ajuda mútua foram imprescindíveis para superar as dificuldades. Esse contexto colaborativo favoreceu o desenvolvimento de competências socioemocionais, como a empatia, a comunicação e a capacidade de resolver problemas em conjunto, habilidades essenciais para a vida acadêmica e profissional. Assim, o projeto contribuiu não apenas para o desenvolvimento técnico e cognitivo, mas também para a formação integral do estudante, alinhada às demandas da educação para o século XXI.

Por fim, o entusiasmo e a disposição dos estudantes para participar de projetos similares no futuro evidenciam que a experiência foi além do aprendizado meramente técnico. Ela promoveu uma conexão emocional e motivacional com o universo da ciência e da tecnologia, despertando a curiosidade e o interesse pelo conhecimento científico. Essa motivação intrínseca é um dos resultados mais valorizados pela pedagogia construcionista, pois garante que a aprendizagem seja duradoura e significativa, ultrapassando o âmbito escolar e influenciando a trajetória pessoal e profissional dos estudantes.

Em suma, o impacto do projeto do rastreador solar transcende a mera aquisição de conteúdos. Ele representa uma transformação na forma como os estudantes aprendem, interagem, se motivam e se preparam para os desafios do mundo atual. A clara evolução observada nas respostas ao questionário final confirma que o engajamento ativo, a experimentação prática e a construção colaborativa são caminhos eficazes para uma educação científica mais envolvente, crítica e conectada com a realidade dos alunos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste projeto de construção de um dispositivo de rastreamento solar automatizado com Arduino representa uma convergência entre paixão pessoal, compromisso com a educação científica e busca por soluções sustentáveis. Mais do que atender aos objetivos técnicos de projetar um protótipo de baixo custo, replicável e funcional, a proposta evidenciou o impacto positivo que abordagens didáticas baseadas na aprendizagem ativa e na experimentação podem ter sobre a formação dos estudantes do ensino médio.

A intervenção didática, fundamentada na teoria construcionista de Seymour Papert, foi planejada e executada em oito encontros, nos quais os alunos puderam se envolver progressivamente na construção de conhecimento por meio de atividades práticas. O projeto promoveu o engajamento dos estudantes em tarefas que exigiram desde a compreensão dos conceitos físicos — como o efeito fotovoltaico e o funcionamento dos microcontroladores — até a montagem e programação do protótipo. Nesse processo, os participantes não apenas desenvolveram habilidades técnicas e cognitivas, como também ampliaram competências socioemocionais, tais como a colaboração, a autonomia, a resiliência e o pensamento crítico.

A análise do questionário diagnóstico revelou que os estudantes apresentavam conhecimentos prévios limitados e, muitas vezes, superficiais sobre os temas investigados. Tal diagnóstico inicial reforçou a importância de práticas pedagógicas que estimulem a construção ativa do conhecimento e a superação da aprendizagem meramente receptiva. A aplicação prática da proposta didática mostrou-se eficaz para ampliar significativamente a compreensão dos conteúdos científicos, uma vez que os alunos passaram a mobilizar conceitos de forma contextualizada e integrada às atividades realizadas.

Os relatórios produzidos pelos alunos após a implementação do projeto reforçam a eficácia da abordagem construcionista. Neles, observa-se que a experiência prática de construção do protótipo proporcionou não apenas a internalização dos conteúdos, mas também um novo olhar sobre a ciência e a tecnologia como instrumentos de transformação social. O artefato concreto — o rastreador solar — tornou-se símbolo de uma aprendizagem significativa, onde os alunos assumiram o protagonismo no processo de ensino-aprendizagem, passando de meros receptores de informação a agentes ativos na construção do saber.

Além disso, os relatos apontam um aumento expressivo no interesse pela Física, na percepção da relevância da energia solar e no reconhecimento do valor das práticas sustentáveis. A experiência também despertou nos estudantes a consciência sobre a importância da ciência no enfrentamento de problemas reais da sociedade contemporânea, como a crise energética e as mudanças climáticas.

Dessa forma, a presente pesquisa não apenas alcançou seus objetivos iniciais — técnicos, didáticos e pedagógicos — como também reforçou a pertinência de se adotar abordagens educacionais que integrem teoria e prática, ciência e sociedade, ensino e inovação. A divulgação dos resultados visa estimular a adoção de experiências semelhantes por outros educadores e instituições, fortalecendo a ideia de que a educação em Física pode — e deve — ser transformadora, acessível e conectada com os desafios do mundo atual.

Este trabalho, portanto, reafirma o potencial das práticas construcionistas como estratégia eficaz para o ensino de Física, revelando que o ato de "aprender fazendo", por meio da criação de soluções tecnológicas reais, é um caminho promissor para a formação de cidadãos críticos, criativos e socialmente comprometidos.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Harryson Guilherme Moraes; CAMPELO, Djamilton Foicinha. Sistema automatizado de irrigação com arduino utilizando energia sustentável: uma proposta para o ensino de Física no Campo. 2023.
- AROCA, Sílvia Calboba. Ensino de física solar em um espaço não formal de educação. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- BARZOTTO, Lucas R. et al. Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo utilizando a plataforma arduino. In: SIMPROC4. 2019.
- BRASIL. Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio. Brasília: Ministério da Educação, 1998.
- CACHAPUZ, António et al. (Org.). *A necessária renovação do ensino das ciências*. São Paulo: Cortez, 2005.
- CORIOLOANO, Diego Lopes; DE SANTANA SOUZA, Thiago. Rastreador solar controlado por arduino. Anais da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT) do IFS, v. 2, n. 1, p. 606-609, 2020.
- DA ENERGIA, SUSTENTABILIDADE E. A. EMERGÊNCIA. JOSELY NUNES-VILLELA. 2018. Tese de Doutorado. Universidade Federal Fluminense.
- DA SILVA, Alexandre et al. Energia fotovoltaica no Brasil: uma revisão de literatura. PI-Pesquisa e Inovação, v. 1, n. 1, p. 100-115, 2019.
- DA SILVA, Edson Araujo. O Ensino de Física e as Energias Renováveis. Revista Acervo Educacional, v. 1, p. e1309-e1309, 2019.
- DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. Solar engineering of thermal processes. New York: Wiley, 1980.
- DUTRA, Carlos Maximiliano; VERNIER, Andrea Berro. Uso Tecnologia Móvel para o estudo do Movimento Aparente do Sol. Ensino & Pesquisa, v. 17, n. 1, 2019.
- FTHENAKIS, Vasilis M.; KIM, Hyung Chul. Greenhouse-gas emissions from solar electric-and nuclear power: A life-cycle study. Energy policy, v. 35, n. 4, p. 2549-2557, 2007.
- GARCIA, Bruno Fernandes; SOLTAU, Samuel Bueno. Física solar: uma experiência de ensino remoto durante a pandemia. Research, Society and Development, v. 10, n. 3, p. e49910313495-e49910313495, 2021.
- Goetzberger, A., Hoffmann, V., & Zastrow, A. (2005). Photovoltaic Solar Energy: Advances and Applications. Springer.
- GREEN, Martin A. Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications. 1st ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2015.
- GREEN, Martin et al. Solar cell efficiency tables (version 57). Progress in photovoltaics: research and applications, v. 29, n. 1, p. 3-15, 2021.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de Física: eletricidade e magnetismo. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- HATTIE, John; DONOGHUE, Gregory. Learning strategies: a synthesis and conceptual model. Nature Human Behaviour, v. 1, p. 1-13, 2016.

- HECHT, Eugene; ZAJAC, Alfred. Optics, chapter 9. Addison-Wesley, v. 3, p. 384-441, 2002.
- HESTENES, David. Modeling methodology for physics teachers. Proceedings of the International Conference on Undergraduate Physics Education, p. 935-958, 1992.
- HONSBURG, Christiana; BOWDEN, Stuart. Photovoltaics: devices, systems and applications. CD Rom. Key Centre for Photovoltaic Engineering, University of New South Wales, Australia, 1999.
- International Energy Agency. (2020). Renewable Energy Market Update. IEA.
- IRENA (2021). Solar Energy. Disponível em: <https://www.irena.org/topics/solar-energy>
- JACOBSON, Mark Z.; DELUCCHI, Mark A. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. Energy policy, v. 39, n. 3, p. 1154-1169, 2011.
- KLEIN, S. A.; BECKMAN, W. A. *Review of Solar Radiation Utilizability*. ASME Journal of Solar Energy Engineering, v. 106, n. 4, p. 393–399, nov. 1984.
- KNIER, Gil. How do photovoltaics work. Science@ NASA, 2002.
- KRAUTER, Stefan. Solar electric power generation. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. doi, v. 10, p. 978-3, 2006.
- LANA, Luana Teixeira Costa et al. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. Engenharias On-line, v. 1, n. 2, p. 21-33, 2015.
- MARKVART, Tomas (Ed.). Solar electricity. John Wiley & Sons, 2000.
- MASTERS, Gilbert M. Renewable and efficient electric power systems. John Wiley & Sons, 2013.
- MATAN. O que são células solares e como funcionam? Disponível em: <<https://www.electricity-magnetism.org/pt-br/o-que-sao-celulas-solares-e-como-funcionam/>>.
- MAZUR, Eric. Peer Instruction: A User's Manual. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.
- MERTENS, Konrad. Photovoltaics: fundamentals, technology, and practice. John Wiley & Sons, 2018.
- MORIN, Edgar. Os sete saberes necessários à educação do futuro. 2ª ed., São Paulo: Cortez, Brasília, DF: UNESCO, 2000.
- NELSON, Jenny A. The physics of solar cells. World Scientific Publishing Company, 2003.
- NREL (2021). Solar Physics. Disponível em: <https://www.nrel.gov/learning/re-solarphysics.html>
- PAPERT, S. A Máquina das Crianças: repensando a escola na era da informática. Porto Alegre: Artmed, 2008.
- PAPERT, Seymour. Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas. 2nd ed. New York: Basic Books, 1985.
- PATEL, Mukund R.; BEIK, Omid. Wind and solar power systems: design, analysis, and operation. CRC press, 2021.
- Planck, M. (1901). On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum. Annalen der Physik, 4(553), 1-29.
- PORTAL SOLAR. *Células Solares: O que São e Como Funcionam?*. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/celulas-solares>. Acesso em: 12 abr. 2025.
- QUEIROZ, J. et al. Classificação de rastreadores solares: uma breve revisão. [s.l: s.n.], 2018.

RAIMUNDO, Fábio Jaime. AULAS PRÁTICAS DE FÍSICA NO ENSINO MÉDIO INOVADOR DAS ESCOLAS PÚBLICAS DA GRANDE FLORIANÓPOLIS. 2013.

ROCHA, GABRIEL SOPRAN; RODRIGUES, ODINEY SILVA. ESTUDO DE VIABILIDADE DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PELO EFEITO FOTOVOLTAICO. 2019.

ROSA, Cleci Werner da et al. O ensino de ciências (Física) no Brasil: da história às novas orientações educacionais. Revista Iberoamericana de Educación, 2012.

SILVA, Bruno Carvalho; DE MACÊDO, Haroldo Reis Alves. FÍSICA EXPERIMENTAL EM CASA: UMA PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A FALTA DE LABORATÓRIOS NO ENSINO DE FÍSICA. Livros da Editora Integrar, p. 35-42, 2023.

STRAUB, M. G. Rastreador Solar com Arduino e LDR. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/blog/rastreador-solar-com-arduino-um-seguidor-solar-atraves-de-ldr/>>.

WENHAM, Stuart R. et al. Applied photovoltaics. Routledge, 2013.

WOLFSON, Richard. Energy, Environment, and Climate. 2nd ed. New York: W.W. Norton & Company, 2012.

Apêndice A – Código de funcionamento

```
#include <Servo.h> // Importa a biblioteca para controle de servos
// Instanciação dos servos
Servo motorAzimute; // Servo responsável pelo movimento horizontal
Servo motorAltura; // Servo responsável pelo movimento vertical
// Posições iniciais dos servos
int posAzimute = 90;
int posAltura = 90;
// Limites de movimento dos servos
int maxAzimute = 180;
int minAzimute = 65;
int maxAltura = 120;
int minAltura = 15;
// Definições dos pinos dos sensores LDR
int sensorTopDir = A0;
int sensorBotDir = A1;
int sensorTopEsq = A2;
int sensorBotEsq = A3;
void setup() {
    // Associação dos servos aos pinos PWM
    motorAzimute.attach(3);
    motorAltura.attach(5);
    // Define posições iniciais
    motorAzimute.write(180);
    motorAltura.write(45);
    delay(3000); // Espera inicial de 3 segundos
}
void loop() {
    // Leituras dos sensores de luminosidade
    int leituraTopDir = analogRead(sensorTopDir);
    int leituraBotDir = analogRead(sensorBotDir);
    int leituraTopEsq = analogRead(sensorTopEsq);
    int leituraBotEsq = analogRead(sensorBotEsq);
    // Tolerância para evitar movimentações desnecessárias
    int tolerancia = 50;
    // Cálculo das médias das leituras para cada eixo
    int mediaSuperior = (leituraTopDir + leituraTopEsq) / 2;
    int mediaInferior = (leituraBotDir + leituraBotEsq) / 2;
    int mediaDireita = (leituraTopDir + leituraBotDir) / 2;
    int mediaEsquerda = (leituraTopEsq + leituraBotEsq) / 2;
    // Diferença entre as leituras para decisão de movimento
    int deltaVertical = mediaSuperior - mediaInferior;
    int deltaHorizontal = mediaDireita - mediaEsquerda;
```

```

// Controle do servo vertical (altura)
if (abs(deltaVertical) > tolerancia) {
  if (mediaSuperior > mediaInferior) {
    posAltura++;
    if (posAltura > maxAltura) {
      posAltura = maxAltura;
    }
  } else {
    posAltura--;
    if (posAltura < minAltura) {
      posAltura = minAltura;
    }
  }
  motorAltura.write(posAltura);
}

// Controle do servo horizontal (azimute)
if (abs(deltaHorizontal) > tolerancia) {
  if (mediaDireita > mediaEsquerda) {
    posAzimute--;
    if (posAzimute < minAzimute) {
      posAzimute = minAzimute;
    }
  } else {
    posAzimute++;
    if (posAzimute > maxAzimute) {
      posAzimute = maxAzimute;
    }
  }
  motorAzimute.write(posAzimute);
}

delay(100); // Intervalo de 100 milissegundos entre as leituras
}

```

Apêndice B – Questionário diagnóstico

Questionário 1 - Energia Solar e Tecnologia

1. O que é energia solar?

- (A) Energia térmica proveniente do núcleo da Terra.
- (B) Energia obtida através da luz do sol.
- (C) Energia química liberada em reações orgânicas.
- (D) Energia produzida pelo movimento das ondas.

2. Como a energia solar pode ser convertida em eletricidade?

- (A) Utilizando placas magnéticas.
- (B) Através de motores a combustão.
- (C) Através de turbinas eólicas.
- (D) Com o uso de painéis fotovoltaicos.

3. O que é o efeito fotovoltaico?

- (A) O armazenamento de luz solar em baterias.
- (B) A geração de corrente elétrica por meio da luz solar em um material semicondutor.
- (C) A reflexão da luz solar em superfícies espelhadas.
- (D) A conversão da luz em calor.

4. Qual das opções a seguir representa um dispositivo que funciona com energia solar?

- (A) Lâmpada fluorescente.
- (B) Calculadora Solar.
- (C) Fogão a gás.
- (D) Micro-ondas.

5. Por que é importante usar um sistema de rastreamento solar?

- (A) Para aquecer o painel no inverno.
- (B) Para manter o painel solar sempre limpo.
- (C) Para garantir que o painel esteja sempre voltado para o sol, maximizando a geração de energia.
- (D) Para reduzir a quantidade de luz recebida.

6. O que você sabe sobre efeito fotovoltaico?

7. O que você sabe sobre energia solar?

8. O que você sabe sobre microcontroladores, como o Arduino?

Apêndice C – Questionário final

Após responderem as perguntas abaixo, produzam um relatório final sobre o projeto.

1. Explique com suas palavras o que foi o projeto do rastreador solar.
2. Qual era o objetivo principal do projeto?
3. Qual a importância de estudar e aplicar a energia solar?
4. Como você participou do desenvolvimento do projeto?
5. Quais atividades você realizou ao longo das aulas práticas?
6. Você encontrou dificuldades? Quais foram e como superou?
7. O que você aprendeu com esse projeto?
8. Quais conceitos de Física, eletrônica, programação e sustentabilidade foram trabalhados?
9. Você acha que o projeto ajudou a entender melhor esses conteúdos? Justifique.
10. Como foi a colaboração com os colegas?
11. Vocês dividiram tarefas? Como foi o trabalho em grupo?
12. Você acredita que evoluiu em termos de conhecimento e habilidades?
13. O que mais gostou no projeto?
14. O que poderia ser melhorado para as próximas turmas?
15. Faça um resumo da sua experiência com o projeto.
16. O que esse projeto representou para você?
17. Você gostaria de participar de outros projetos assim?

Apêndice D – Recurso educacional



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA EM REDE NACIONAL
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

HARRYSON GUILHERME MORAES ANDRADE

APRENDENDO FÍSICA COM ENERGIA SOLAR E ROBÓTICA EDUCACIONAL

São Luís – MA

2025

APRESENTAÇÃO

Prezado(a) professor(a),

É com grande satisfação que apresentamos este recurso educacional, fruto de uma proposta pedagógica inovadora e significativa no ensino de Física. Desenvolvido a partir da dissertação intitulada “Abordagem experimental baseada na teoria construcionista para o estudo do efeito fotovoltaico utilizando um dispositivo de rastreamento solar com Arduino”, no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) – Polo 47 da Universidade Federal do Maranhão, este material tem como objetivo principal promover uma aprendizagem mais ativa, contextualizada e conectada com os desafios contemporâneos da educação científica.

Este recurso está estruturado de forma a possibilitar ao(à) professor(a) a compreensão dos conceitos fundamentais envolvidos no estudo da energia solar e do efeito fotovoltaico, destacando a importância da luz como onda eletromagnética, a relação entre o movimento solar e a eficiência na captação de energia, bem como os benefícios pedagógicos da aplicação de dispositivos automatizados no ensino de Física. Além disso, apresenta a interseção entre os fundamentos do construcionismo de Seymour Papert e o uso de tecnologias como o Arduino, promovendo a integração entre teoria e prática por meio da robótica educacional.

O material oferece instruções detalhadas para a construção de um protótipo de rastreador solar, utilizando materiais acessíveis e componentes eletrônicos simples, e propõe uma sequência didática completa, desde a investigação inicial até a prática reflexiva. As atividades sugeridas foram aplicadas com estudantes do Ensino Médio, possibilitando a análise de resultados e o desenvolvimento de reflexões pedagógicas a partir da experiência vivenciada.

Nosso desejo é que este recurso educacional inspire novas práticas em sala de aula, contribuindo para a formação de estudantes mais críticos, criativos e conscientes sobre as possibilidades da ciência e da tecnologia na construção de um futuro sustentável. Desejamos a você uma excelente leitura e, principalmente, boas práticas educativas com seus(as) alunos(as).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio básico de funcionamento de uma célula fotovoltaica	8
Figura 2 – Detalhe da junção p-n de uma célula fotovoltaica	9
Figura 3 - Luz como onda eletromagnética se comporta	11
Figura 4 - Movimento aparente do Sol	12
Figura 5 – Disposição completa do kit com Arduino Uno, servomotores, sensores LDR e painel solar.....	18
Figura 6 – Materiais para a montagem do rastreador.....	20
Figura 7 – Vista da posição dos servos motores	21
Figura 8 – Funcionamento das abas sombreadoras sobre os sensores LDR	22
Figura 9 – Protótipo pronto com as conexões.....	23
Figura 10 – Plataforma Arduino IDE aberta para o carregamento do código.....	23
Figura 11 – Esquema de ligação dos dispositivos na placa Arduino UNO	24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	4
2	CONCEITOS FÍSICOS DO EFEITO FOTOVOLTAICO COM RASTREADORES SOLARES.....	6
2.1	Princípios do efeito fotovoltaico e placas solares.....	6
2.2	Luz como onda eletromagnética.....	10
2.3	Movimento solar e sua influência na geração de energia solar	12
2.4	Implicações pedagógicas do uso de dispositivos de rastreamento solar no ensino da física ..	13
3	A INTERSEÇÃO ENTRE TECNOLOGIA E CONSTRUCIONISMO.....	14
3.1	Circuitos elétricos e componentes eletrônicos	15
4	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO.....	18
4.1	Passos para a montagem da estrutura	19
4.2	Passos para a instalação dos servos	20
4.3	Instalação dos sensores LDR	21
4.4	Conexões elétricas e alimentação.....	22
4.5	Carregando o código no Arduino.....	23
4.6	Código do projeto.....	24
5	SEQUÊNCIA DIDÁTICA: DA INVESTIGAÇÃO INICIAL À PRÁTICA REFLEXIVA	
	27	
5.1	Etapas da pesquisa e organização da prática	29
	BIBLIOGRAFIA	34
	Apêndice A – Layout de corte dos moldes da estrutura do rastreador	36
	Apêndice B – Código de funcionamento.....	39
	Apêndice C – Questionário inicial	41
	Apêndice D – Questionário final	42

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia sustentáveis tem colocado a energia solar no centro das discussões sobre meio ambiente, ciência e educação. Em um mundo cada vez mais impactado por mudanças climáticas, crises energéticas e desigualdades no acesso a recursos, torna-se urgente repensar a forma como educamos nossas novas gerações. É papel da escola, nesse cenário, formar sujeitos críticos, criativos e capazes de propor soluções reais e responsáveis para os desafios do nosso tempo.

A energia solar, nesse contexto, desponta como uma oportunidade ímpar de articulação entre conhecimento científico e prática pedagógica significativa. Trata-se de um campo fértil para o desenvolvimento de competências interdisciplinares, ao mesmo tempo em que convida professores e estudantes a refletirem sobre o papel da ciência na construção de um futuro mais sustentável.

Este recurso educacional nasce com o propósito de oferecer um guia prático e didático para professores do Ensino Médio interessados em explorar o tema da energia solar em sala de aula. Mais do que um simples roteiro, este material propõe uma jornada educativa fundamentada na Teoria Construcionista, aliando o ensino de Física à construção de um rastreador solar automatizado com Arduino – um dispositivo capaz de acompanhar o movimento do Sol, otimizando a captação de luz pelas placas fotovoltaicas.

Ao adotar uma abordagem experimental e baseada em projetos, o guia propõe o estudo do efeito fotovoltaico de maneira integrada, reunindo conceitos de física, eletrônica e programação, e promovendo o protagonismo estudantil. A ideia é transformar a sala de aula em um ambiente de investigação e construção do conhecimento, onde os alunos assumem um papel ativo, pensam coletivamente e aplicam o que aprendem em contextos reais.

Além de apresentar o embasamento teórico necessário para a compreensão da energia solar e do funcionamento do efeito fotovoltaico, este Recurso educacional inclui:

- Orientações passo a passo para a construção do protótipo de rastreador solar utilizando Arduino e materiais acessíveis;
- Sugestões de aplicação didática, alinhadas à BNCC e ao desenvolvimento de habilidades do século XXI;
- Relatos e análises dos resultados obtidos com turmas reais, demonstrando o potencial transformador da proposta.

Nosso desejo é que este material possa inspirar e apoiar educadores que buscam tornar o ensino da Física mais instigante, contextualizado e significativo, contribuindo para a formação de

estudantes conscientes, capazes de agir com ética e responsabilidade frente aos desafios ambientais e sociais do presente e do futuro.

2 CONCEITOS FÍSICOS DO EFEITO FOTOVOLTAICO COM RASTREADORES SOLARES

A compreensão do funcionamento de sistemas fotovoltaicos com rastreamento solar exige a abordagem de alguns conceitos físicos essenciais. O primeiro deles é o **efeito fotovoltaico**, fenômeno pelo qual a energia luminosa do sol é convertida em energia elétrica, a partir da excitação de elétrons em materiais semicondutores, como o silício. Em seguida, os **princípios de cinemática e dinâmica** entram em cena no desenvolvimento dos **rastreadores solares**, mecanismos responsáveis por ajustar continuamente a orientação dos painéis, a fim de otimizar a captação da luz solar ao longo do dia. Por fim, é importante considerar a **influência da temperatura** sobre o desempenho das células solares, uma vez que o aquecimento excessivo pode comprometer sua eficiência elétrica. Por isso, a gestão térmica se torna um fator relevante no projeto de sistemas de rastreamento. A seguir, exploraremos cada um desses princípios com maior profundidade.

2.1 Princípios do efeito fotovoltaico e placas solares

Em 1839, Alexandre Edmund Becquerel fez uma descoberta fundamental ao observar o efeito fotovoltaico pela primeira vez. Durante seus experimentos, Becquerel notou que, quando placas metálicas de platina ou prata eram imersas em um eletrólito e expostas à luz, surgia uma pequena diferença de potencial elétrico. Esta observação inicial, descrita por Rocha (2019), marcou o início da compreensão de como a luz pode ser convertida em eletricidade, estabelecendo as bases para o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica moderna.

Andrade (2023) explica que esse fenômeno ocorre em materiais semicondutores, como o silício, e permite a conversão da luz solar em eletricidade. Apesar da descoberta inicial por Becquerel, foram necessárias várias décadas para o desenvolvimento de dispositivos práticos que aproveitassem plenamente essa propriedade dos semicondutores.

O Laboratório Nacional de Energia Renovável (*National Renewable Energy Laboratory – NREL*, 2021) detalha que a energia dos fótons da luz solar excita elétrons em um semicondutor, promovendo sua movimentação para a banda de condução e gerando corrente elétrica. Esse deslocamento dos elétrons resulta em eletricidade utilizável, que pode ser armazenada em baterias ou usada diretamente para alimentar equipamentos. A eficiência dessa conversão depende tanto da qualidade do material semicondutor quanto da estrutura do dispositivo fotovoltaico.

A Agência Internacional de Energia Renovável (*International Renewable Energy Agency – IRENA*, 2021) reporta que a eficiência média dos módulos solares atualmente disponíveis é de

aproximadamente 22%, com alguns módulos de alta eficiência alcançando até 24%. A previsão é de que a capacidade global de geração de energia solar fotovoltaica continue crescendo significativamente, impulsionada pelo avanço tecnológico que busca aumentar a eficiência e reduzir os custos da conversão da luz solar em eletricidade. No entanto, ainda há um vasto potencial energético a ser aproveitado. A potência total da luz solar que atinge a Terra é estimada em cerca de 100.000 terawatts (TW), enquanto, em 2022, a capacidade instalada mundial atingiu 1 TW. Projeções indicam que esse valor poderá mais que dobrar, alcançando 2,3 TW até 2025. Esses dados evidenciam o grande potencial de expansão da energia solar e a possibilidade de converter uma parcela ainda maior dessa fonte abundante em eletricidade sustentável.

A energia solar fotovoltaica tem sido amplamente aplicada em sistemas que utilizam módulos compostos por células fotovoltaicas, tornando-se cada vez mais comum, especialmente em regiões com alta radiação solar, como a Austrália e a Califórnia (Andrade, 2023). Esses sistemas organizam as células fotovoltaicas em painéis solares, conectados em série e paralelo para otimizar a tensão e a corrente elétrica gerada. A eletricidade produzida pode ser utilizada imediatamente ou armazenada em baterias para uso posterior.

Segundo da Silva (2019), a energia solar fotovoltaica representa uma fonte significativa de eletricidade renovável, destacando-se por seu baixo impacto ambiental. A quantidade de eletricidade gerada é diretamente proporcional à intensidade da radiação solar recebida pelos painéis solares, ou seja, quanto maior a radiação, maior a produção de energia. Mesmo em condições de baixa luminosidade, como em dias nublados ou chuvosos, os sistemas fotovoltaicos continuam gerando eletricidade, embora em menor intensidade devido à redução da luz solar disponível. Esse processo ocorre porque a luz solar, composta por fótons, interage com o material semicondutor das células fotovoltaicas, estimulando o movimento dos elétrons e gerando eletricidade, fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico (DA SILVA, 2019).

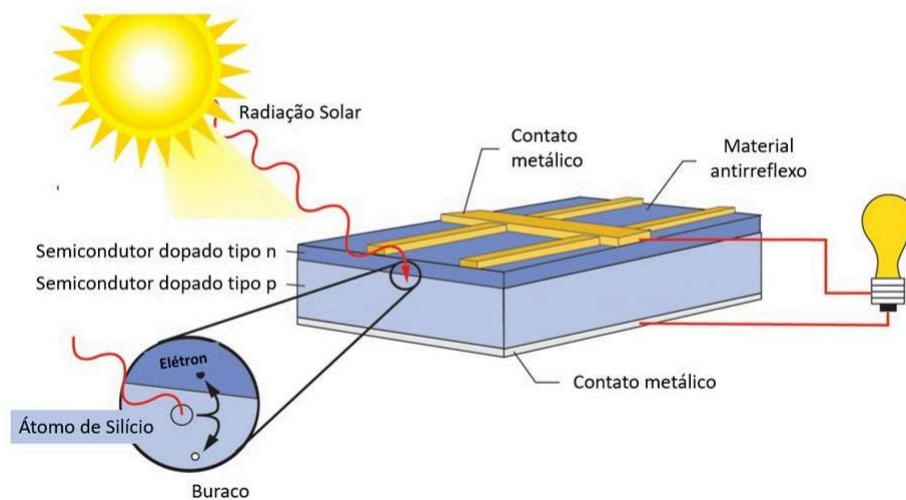
As células solares, ou células fotovoltaicas, são dispositivos essenciais na conversão da luz solar em eletricidade. De acordo com Solar (2024), elas são fabricadas com materiais semicondutores, como o silício cristalino, desempenhando um papel crucial na geração de energia solar, que se destaca como uma alternativa sustentável e de menor impacto ambiental em comparação com fontes de energia convencionais.

Uma célula solar típica é composta por uma camada de silício cristalino, material amplamente utilizado em dispositivos fotovoltaicos devido às suas propriedades semicondutoras e à sua abundância (MATAN, 2023). O silício, quando dopado com elementos como boro e fósforo, forma uma junção p-n, essencial para a conversão da energia solar em eletricidade. O dopamento com boro cria a camada tipo p, caracterizada por uma deficiência de elétrons (carga positiva),

enquanto o dopamento com fósforo gera a camada tipo n, com um excesso de elétrons (carga negativa). A interação entre essas camadas estabelece um campo elétrico na região da junção p-n, responsável por separar e direcionar as cargas elétricas geradas pela luz solar, resultando na produção de corrente elétrica.

Quando a luz solar incide sobre a célula, os fótons da luz energizam os elétrons presentes na junção p-n, liberando-os dos átomos no material semiconductor. Esse processo é crucial para a geração de eletricidade, mas é importante esclarecer que a geração de corrente elétrica não ocorre pelo simples "salto" dos elétrons da banda de valência para a banda de condução, como é frequentemente descrito de forma simplificada. Na realidade, a corrente elétrica é gerada pelo movimento dos elétrons que são liberados dentro da região da junção p-n. O campo elétrico gerado pela diferença de dopagem entre as camadas p e n orienta esses elétrons a se moverem em uma direção específica, enquanto as lacunas (que são as "falta" de elétrons na camada p) se movem na direção oposta, formando uma corrente elétrica. Segundo Solar (2024), esse movimento ordenado de elétrons e lacunas é o que resulta na geração de eletricidade útil para o consumo. A Figura 1 ilustra esse mecanismo.

Figura 1 - Princípio básico de funcionamento de uma célula fotovoltaica



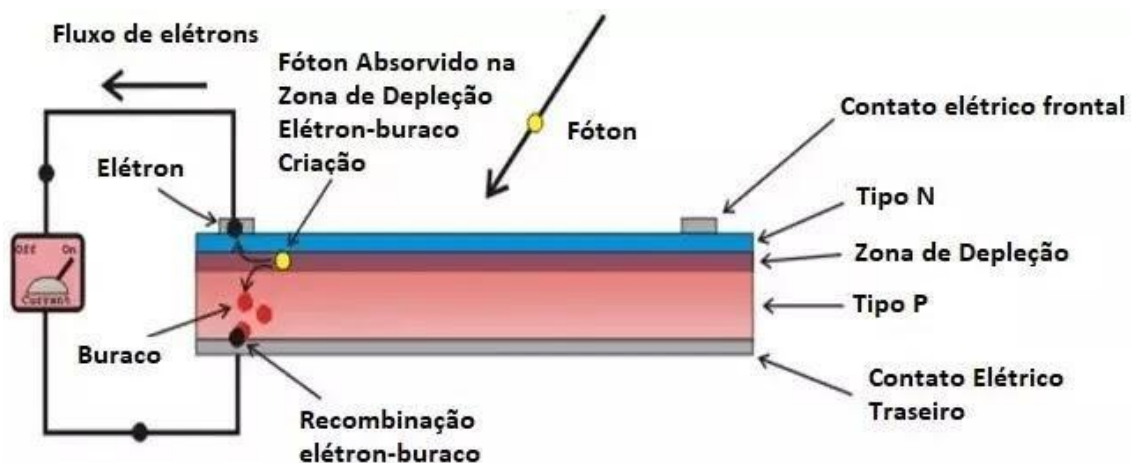
Fonte: Carvalho (2021).

A banda de valência e a banda de condução são conceitos fundamentais para entender o comportamento dos elétrons na célula solar. A banda de valência refere-se à energia dos elétrons que estão ligados aos átomos, enquanto a banda de condução refere-se à energia dos elétrons que foram liberados e agora estão livres para se mover pelo material semiconductor. No entanto, nem todos os elétrons gerados pela luz solar contribuem para a corrente elétrica. Apenas os elétrons que são liberados dentro da região da junção p-n e que são movidos pelo campo elétrico para as trilhas metálicas são os responsáveis pela corrente elétrica. Já os elétrons que são gerados fora da junção

p-n rapidamente se recombinam com os átomos de silício, retornando para sua posição original na banda de valência e não contribuindo para a geração de corrente útil.

Além disso, dentro da junção p-n (Figura 2), existe uma região denominada camada de depleção. Nessa região, ocorre a recombinação dos elétrons da camada n-e das lacunas da camada p, formando uma barreira elétrica. A camada de depleção é fundamental, pois impede que os elétrons e as lacunas se recombinem imediatamente, permitindo que eles se movam em direções opostas, sob a influência do campo elétrico. O campo elétrico gerado pela diferença de dopagem separa as cargas, forçando os elétrons a se moverem em direção à camada n, enquanto as lacunas se deslocam em direção à camada p. Esse processo de separação e movimentação das cargas gera uma corrente elétrica, que pode ser coletada pelas trilhas metálicas localizadas na superfície da célula solar. Assim, a corrente elétrica gerada pela célula solar depende da movimentação ordenada dos elétrons e lacunas, facilitada pelo campo elétrico na junção p-n.

Figura 2 – Detalhe da junção p-n de uma célula fotovoltaica



Fonte: Coelho (2012).

A eficiência das células solares, que mede a proporção da energia solar convertida em eletricidade, tem avançado significativamente com o desenvolvimento de novas tecnologias de materiais e processos de fabricação. Matan (2023) aponta que as células solares modernas podem alcançar eficiências superiores a 20%, refletindo um avanço considerável em relação aos primeiros modelos de células solares. No entanto, o limite teórico máximo de eficiência para células solares de silício, conhecido como o limite de Shockley-Queisser, é de cerca de 33,7%. Este limite é uma referência baseada nas propriedades do material, que estabelece a máxima quantidade de luz solar que pode ser convertida em eletricidade de maneira eficiente. Embora as células de silício sejam amplamente utilizadas, outros materiais semicondutores, como telureto de cádmio e arsenieto de gálio, também são empregados, oferecendo diferentes níveis de eficiência e custo, dependendo das aplicações específicas (Solar, 2024).

As células solares individuais são agrupadas em módulos fotovoltaicos, comumente conhecidos como painéis solares. De acordo com Solar (2024), para formar um módulo, dezenas de células solares são conectadas em série através de faixas condutoras finas, formando um circuito que permite a geração de eletricidade. Esse arranjo em série é fundamental para aumentar a tensão do sistema, permitindo que a eletricidade gerada pelas células seja transmitida de forma eficiente. Para proteger as células solares e garantir sua durabilidade, os módulos são cobertos com uma camada de vidro temperado antirreflexo, que reduz as perdas de luz e aumenta a eficiência da captura da radiação solar. Além disso, os módulos são montados em uma moldura de alumínio, que oferece resistência estrutural, enquanto a parte traseira do módulo possui uma caixa de junção equipada com cabos condutores, permitindo a conexão dos módulos em série.

2.2 Luz como onda eletromagnética

A luz solar é essencial para a geração de eletricidade em sistemas fotovoltaicos, propagando-se como uma onda eletromagnética que abrange uma ampla gama de comprimentos de onda, desde o ultravioleta até o infravermelho. A energia transportada por cada onda é diretamente proporcional à sua frequência e inversamente proporcional ao seu comprimento de onda, conforme descrito pela equação de Planck (1901):

$$E = hf, \quad (1)$$

em que E representa a energia da onda eletromagnética (em joules), h é a constante de Planck ($6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) e f é a frequência da onda (em hertz, Hz).

A relação entre a frequência f e o comprimento de onda λ é dada pela equação:

$$c = \lambda f, \quad (2)$$

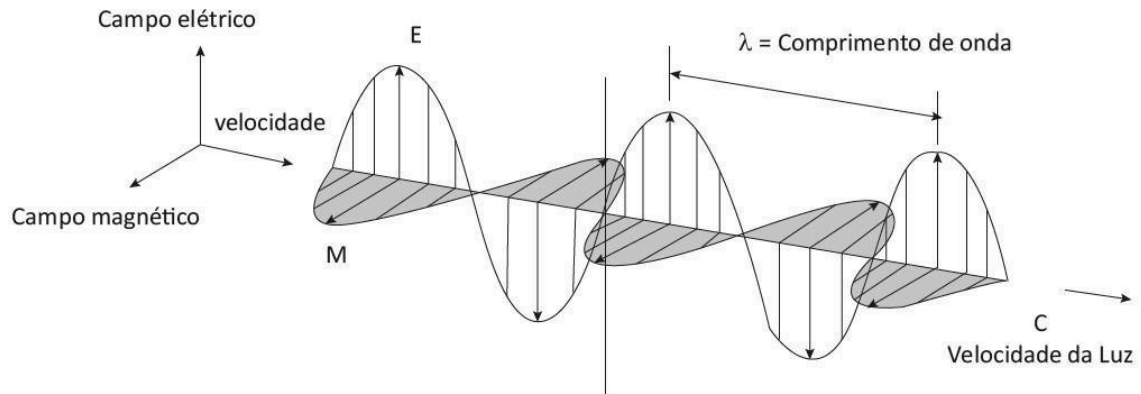
em que c é a velocidade da luz no vácuo ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$), λ é o comprimento de onda da luz (em metros).

Ao substituir f da segunda equação na primeira, obtemos uma relação para a energia em função do comprimento de onda:

$$E = \frac{hc}{\lambda}. \quad (3)$$

Esta relação demonstra que a energia de um fóton, que é uma partícula de luz, é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda: quanto menor o comprimento de onda (como no ultravioleta), maior será a energia do fóton. Essa propriedade é fundamental para a conversão da luz solar em eletricidade, uma vez que as células fotovoltaicas absorvem fótons de diferentes energias presentes na luz solar para gerar corrente elétrica. A Figura 3 ilustra as principais características de propagação de uma onda eletromagnética.

Figura 3 - Luz como onda eletromagnética se comporta



Fonte: ProMilitares (2020).

Quando a luz solar atinge uma célula fotovoltaica, ocorre um fenômeno conhecido como absorção fotovoltaica, no qual os fótons da luz interagem com os átomos do material semicondutor — geralmente o silício. Nesse processo, os fótons transferem sua energia para os elétrons da banda de valência do semicondutor, promovendo-os para a banda de condução. Essa transição cria pares de elétrons (carga negativa) e lacunas (carga positiva). O campo elétrico presente na junção p-n separa os pares gerados, orientando os elétrons em direção à camada tipo n-e as lacunas para a camada tipo p, iniciando assim o fluxo de corrente elétrica de acordo com Green *et al.* (2017).

Embora tanto os elétrons quanto as lacunas participem do transporte de carga, a corrente elétrica nas células fotovoltaicas é dominada pelo movimento dos elétrons, que possuem uma mobilidade cerca de 3,5 vezes maior que a das lacunas no silício. Este diferencial de mobilidade garante que os elétrons desempenhem o papel principal no transporte de carga, enquanto as lacunas contribuem em menor escala.

No entanto, é importante esclarecer que os elétrons que constituem a corrente elétrica não são exatamente os mesmos que foram inicialmente excitados pelos fótons e arrancados dos átomos dentro da camada de depleção. Quando os fótons atingem o semicondutor, sua energia é rapidamente transferida para o campo elétrico presente na junção p-n, e este campo promove a movimentação ordenada dos elétrons no circuito externo.

A velocidade de deslocamento físico dos elétrons no semicondutor é extremamente baixa, já que eles percorrem distâncias muito curtas, geralmente menores do que o diâmetro de um átomo, antes de se recombinarem com lacunas ou serem conduzidos pelo material. No entanto, a energia liberada pelo fóton é propagada quase instantaneamente pelo campo elétrico, à velocidade próxima à da luz. Este fenômeno resulta em um transporte eficiente de energia através do circuito, apesar do movimento lento das partículas individuais.

Assim, o que chamamos de corrente elétrica gerada em uma célula fotovoltaica não corresponde exatamente ao deslocamento de um único elétron como partícula ao longo do circuito.

Em vez disso, trata-se da propagação da energia fornecida pelos fótons, que é transferida de forma eficiente entre os elétrons por meio do campo elétrico. Este comportamento apresenta semelhanças com o movimento de uma onda eletromagnética, mas com a presença de matéria (os átomos do semiconductor) no processo.

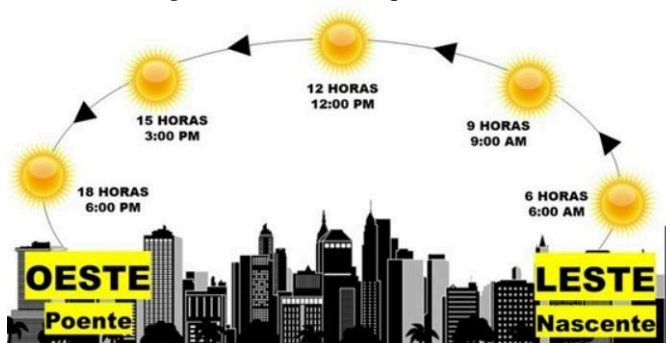
Esse mecanismo destaca a importância do campo elétrico gerado pela junção p-n na conversão de energia solar em eletricidade, enfatizando que a eficiência do sistema depende da dinâmica coletiva dos elétrons e da transferência de energia proporcionada pela interação entre fótons e semicondutores.

2.3 Movimento solar e sua influência na geração de energia solar

O movimento do Sol e sua trajetória no céu desempenham um papel crucial na eficiência dos sistemas de rastreamento solar, que são cada vez mais utilizados para otimizar a geração de energia solar. A luz solar, que se propaga como uma onda eletromagnética, é composta por uma gama de comprimentos de onda que variam desde o ultravioleta até o infravermelho. Dutra (2019) afirma que cada uma dessas ondas transporta uma quantidade específica de energia, diretamente proporcional à sua frequência e inversamente proporcional ao seu comprimento de onda.

Todos os dias o Sol nasce na direção leste, atinge um ponto de máxima altura e se põe na direção oeste, descrevendo uma trajetória que muda ao longo do ano devido à inclinação do eixo da Terra e ao movimento orbital, segundo Dutra (2019). Esse movimento é resultado da rotação da Terra em aproximadamente 24 horas, no sentido de oeste para leste, o que faz com que o Sol pareça se mover da esquerda para a direita no céu, conforme ilustrado na Figura 4. Esse fenômeno é observado na esfera celeste, e a altura do Sol no céu é influenciada pela latitude do local e pela inclinação axial da Terra, que é de 23,5 graus em relação ao plano da órbita da Terra ao redor do Sol como afirma Dutra (2019).

Figura 4 - Movimento aparente do Sol



Fonte: Rodrigues Alves (2021).

A inclinação axial da Terra cria variações sazonais na trajetória solar, gerando as estações do ano. Durante o solstício de dezembro, no hemisfério sul, o Sol atinge o Trópico de Capricórnio, resultando em uma altura solar máxima de 23,5 graus em relação ao Equador Celeste. Em contraste, durante o solstício de junho, no hemisfério norte, o Sol atinge o Trópico de Câncer, criando uma situação oposta no hemisfério sul. De acordo com Dutra (2019) os equinócios de março e setembro, o Sol está diretamente sobre o Equador Terrestre, resultando em dias e noites de igual duração em todo o planeta.

2.4 Implicações pedagógicas do uso de dispositivos de rastreamento solar no ensino da física

A física solar e a busca por fontes de energia sustentável são fundamentais no contexto atual, diante dos desafios ambientais e da necessidade de transições energéticas. A compreensão dos princípios de funcionamento das células solares e suas aplicações em sistemas fotovoltaicos é essencial para os estudantes. Segundo Wolfson (2012), a adoção de tecnologias solares não apenas reduz a dependência de combustíveis fósseis, mas também contribui para a mitigação das mudanças climáticas, destacando a importância da energia solar como uma solução viável para um futuro sustentável.

Contudo, é importante destacar que a aprendizagem de conceitos complexos na física solar não deve depender exclusivamente da tecnologia, como os dispositivos de rastreamento solar. Métodos tradicionais de ensino, como a resolução de problemas e discussões em sala de aula, continuam sendo válidos e eficazes. Hattie e Donoghue (2016) reforçam que a eficácia das estratégias de ensino reside na maneira como elas são integradas ao conteúdo e mediadas pela prática pedagógica, sugerindo que uma abordagem diversificada enriquece a experiência de aprendizado.

3 A INTERSEÇÃO ENTRE TECNOLOGIA E CONSTRUCIONISMO

O ensino de física, como qualquer disciplina, enfrenta o desafio de envolver os estudantes de forma eficaz. O professor de física de Harvard, Erick Mazur (1996), autor de “Peer Instruction: A User's Manual”, destaca a importância da interatividade para aprimorar o aprendizado. Em sua pesquisa sobre aprendizagem ativa, Mazur demonstra que criar um ambiente de aprendizado interativo é fundamental para o engajamento dos alunos. Ao invés de apenas ouvir passivamente, os estudantes são incentivados a discutir conceitos, resolver problemas em grupo e aplicar o que aprenderam em contextos práticos. Essa abordagem não apenas melhora a compreensão conceitual, mas também desenvolve habilidades críticas de pensamento e resolução de problemas, aumentando a motivação dos alunos e tornando a experiência de aprendizado mais dinâmica e relevante.

Contribuindo para essa perspectiva, Hestenes (1992) promove o uso de modelos e tecnologia para tornar o ensino da física mais prático e envolvente. Sua abordagem é especialmente relevante para o desenvolvimento de dispositivos educacionais, como o rastreador solar com Arduino proposto neste estudo. Hestenes enfatiza a importância de conectar a teoria à prática, proporcionando aos alunos ferramentas que os ajudem a visualizar e entender conceitos físicos. Ao integrar dispositivos como o rastreador solar, os educadores podem ilustrar princípios físicos de maneira tangível, permitindo que os estudantes vejam em tempo real como as teorias se aplicam ao mundo real. Essa metodologia não apenas facilita a compreensão de conceitos abstratos, mas também estimula o interesse e a curiosidade dos alunos, promovendo um aprendizado mais profundo e significativo.

Neste cenário, as ideias de Seymour Papert, expostas em seu trabalho de 1985, têm relevância direta para o desenvolvimento de dispositivos de rastreamento solar com Arduino. Papert (1985) argumenta que a aprendizagem é facilitada quando os estudantes podem incorporar conceitos ao seu repertório de modelos mentais. Ele enfatiza que o uso da tecnologia, como os computadores, pode criar condições ideais para a consolidação desses modelos. No contexto do ensino de física solar, isso significa que os alunos podem desenvolver uma compreensão mais profunda dos princípios envolvidos ao interagir com a tecnologia de forma prática.

Além disso, a abordagem construcionista de Papert destaca a importância de os estudantes não apenas utilizarem a tecnologia, mas programarem e interagirem com ela ativamente. A construção e a programação de um rastreador solar com Arduino desafiam os alunos a estruturar seus conhecimentos de forma lógica. Ao programar o dispositivo, eles aprendem conceitos de eletrônica e controle automatizado, desenvolvendo habilidades fundamentais como pensamento

computacional e resolução de problemas. Essa abordagem favorece a construção de modelos mentais mais sólidos, promovendo um aprendizado que se ancore na experimentação concreta.

Entretanto, é válido questionar até que ponto a tecnologia é indispensável nesse processo de aprendizagem. Embora a programação de computadores ofereça novas possibilidades, muitos conceitos podem ser aprendidos sem o uso de tecnologia, através de métodos tradicionais. Contudo, a programação possibilita uma aprendizagem mais ativa, com feedback imediato e oportunidades para experimentação de soluções. É essencial, portanto, que a tecnologia seja integrada ao conteúdo de forma estratégica e mediada pela prática pedagógica.

Portanto, no contexto da pesquisa sobre o desenvolvimento de um dispositivo de rastreamento solar com Arduino para o ensino de física solar, as ideias de Papert sobre o construcionismo e o uso da tecnologia como ferramenta educacional são fundamentais. Essas ideias apoiam a abordagem de promover a construção de modelos mentais sólidos e envolver ativamente os alunos no processo de aprendizado, tornando o ensino da física solar mais prático e significativo. A integração de estratégias pedagógicas inovadoras e o uso de tecnologias educacionais contribuem para um aprendizado mais dinâmico e relevante, preparando os estudantes para os desafios acadêmicos e profissionais do futuro.

3.1 Circuitos elétricos e componentes eletrônicos

Os sistemas fotovoltaicos dependem fortemente de uma série de componentes eletrônicos para a conversão eficiente de energia e para o gerenciamento do sistema. A interação entre esses componentes é essencial para maximizar a eficiência e a durabilidade das células solares.

Os diodos de bypass são fundamentais para proteger as células solares contra danos causados por sombreamento parcial. Quando uma célula é parcialmente sombreada, ela pode se tornar um ponto de aquecimento, reduzindo a eficiência do módulo e potencialmente danificando as células. Conforme indicado por Masters (2013), os diodos de bypass permitem que a corrente elétrica (I) flua ao redor das células sombreadas, prevenindo danos e minimizando as perdas de energia. A relação da corrente em um circuito pode ser descrita pela Lei de Ohm:

$$V = RI, \quad (4)$$

em que V é a tensão, I é a corrente e R é a resistência do circuito.

Outro componente crucial é o inversor, responsável por converter a corrente contínua (CC) gerada pelos módulos solares em corrente alternada (CA), utilizada na rede elétrica. Existem diferentes tipos de inversores, como inversores de **string**, **microinversores** e **inversores centrais**, cada um adequado para diferentes tipos de instalações e necessidades. Os **microinversores**, por exemplo, são particularmente úteis em sistemas onde os módulos podem sofrer sombreamento

desigual, pois permitem a otimização individual de cada módulo, como explica Knier (2002). A eficiência do inversor (η_{inv}) pode ser expressa pela relação:

$$\eta_{inv} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%, \quad (5)$$

em que P_{out} é a potência de saída e P_{in} é a potência de entrada.

Os controladores de carga são fundamentais em sistemas off-grid, regulando o fluxo de energia entre os painéis solares e as baterias, protegendo estas últimas de sobrecargas e descargas profundas. De acordo com Wenham *et al.* (2013), esses dispositivos garantem que a energia gerada pelos painéis seja armazenada de maneira eficiente e segura, prolongando a vida útil das baterias e aumentando a eficiência geral do sistema. A relação entre a capacidade da bateria (C) e a corrente (I) pode ser descrita pela fórmula:

$$C = It, \quad (6)$$

em que t é o tempo em horas.

Sensores de corrente, tensão e temperatura são frequentemente usados para monitorar o desempenho do sistema. Esses sensores são cruciais para a detecção precoce de falhas e para o ajuste do sistema para maximizar a eficiência. Por exemplo, sensores de temperatura podem ajudar a identificar regiões aquecidas em módulos solares, que podem indicar falhas iminentes.

Os sensores de luz, como os LDRs (*Light Dependent Resistors*), desempenham um papel crucial nos sistemas de rastreamento solar. Esses dispositivos detectam a intensidade da luz solar e fornecem sinais elétricos que orientam os motores do sistema para posicionar os painéis solares em direção ao ponto de máxima incidência luminosa (P). A relação entre a intensidade da luz (I) e a resistência do LDR (R) pode ser expressa pela equação (4), em que V é a tensão aplicada.

Entretanto, as coordenadas angulares da trajetória do Sol (α e β), em que α é o ângulo com a linha horizontal e β ângulo com a linha do Equador, mudam continuamente ao longo do dia e do ano devido à inclinação do eixo terrestre. Um sistema de rastreamento que dependa exclusivamente de LDRs enfrentaria um problema de busca em loop, pois, mesmo ao encontrar a posição máxima de luz em um momento, essa posição mudaria rapidamente devido à rotação e translação da Terra.

A integração de técnicas preditivas com medições em tempo real, conforme destacado por Duffie & Beckman (2013), oferece uma solução robusta para sistemas de rastreamento solar, maximizando a captura de energia e reduzindo perdas associadas a desvios na orientação dos painéis. A utilização de algoritmos de controle, como o PID (Proporcional, Integral, Derivativo), permite ajustes automáticos e precisos dos painéis, otimizando a captação de luz solar.

Os microcontroladores, como o Arduino, são amplamente utilizados no controle de sistemas de rastreamento solar devido à sua flexibilidade e capacidade de programação. O Arduino

processa as informações dos sensores e determina a posição ideal dos painéis em qualquer momento do dia, implementando algoritmos de controle que evitam movimentos bruscos que possam danificar o sistema. A eficiência do sistema pode ser quantificada em termos de energia gerada (E):

$$E = Pt, \quad (7)$$

em que P é a potência e t é o tempo de operação.

O Arduino pode ser integrado a sistemas de monitoramento remoto, permitindo o controle e a visualização dos dados de operação do sistema de qualquer lugar. Essa capacidade é especialmente útil para grandes instalações ou sistemas em locais remotos, onde o acesso físico pode ser limitado, como afirma Patel (2021).

Além disso, plataformas de software avançadas permitem o monitoramento em tempo real e a análise de dados históricos, essenciais para a manutenção preventiva. Essa abordagem é vital para identificar e resolver problemas antes que causem falhas significativas ou perdas de eficiência, como discutido por Markvart (2000). O gerenciamento de grandes portfólios de instalações solares é particularmente importante para maximizar a eficiência operacional, conforme ressaltam Honsberg & Bowden (2014).

4 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Na etapa de construção do protótipo, precisamos seguir etapas bem definidas:

- Instalação dos Sensores: Quatro sensores LDR são dispostos em cruz para maximizar a detecção da luz solar.
- Configuração dos Motores: Dois servos motores são configurados para permitir o movimento horizontal (azimute) e vertical (elevação) do painel solar.
- Programação do Arduino: O Arduino UNO é programado para interpretar os dados dos sensores e controlar os motores, garantindo a correta orientação do painel em relação ao sol.

Nesta etapa, a fase de testes práticos é crucial para avaliar a eficácia do protótipo, permitindo que os alunos observem a capacidade do dispositivo em rastrear o sol e maximizar a captação de energia solar.

O kit foi cuidadosamente selecionado de forma a permitir a articulação do painel em dois eixos (horizontal e vertical) e a realização de leituras de intensidade luminosa por sensores LDR (resistores dependentes de luz). A estrutura base do projeto é composta por uma Placa Arduino Uno SMD, conectada a um computador por meio de um cabo USB para a programação inicial. A alimentação do sistema foi garantida por uma fonte de alimentação chaveada de 5V 1A, conectada ao Arduino por um extensor de portas (EPX10) com conector jack P4, permitindo distribuir energia de forma segura e organizada para os demais componentes do circuito. Na Figura 5 estão os componentes eletrônicos necessários para construir o experimento.

Figura 5 – Disposição completa do kit com Arduino Uno, servomotores, sensores LDR e painel solar



Fonte: Próprio autor.

A primeira etapa do projeto é a construção da estrutura de suporte para o rastreador solar. A estrutura é essencial para garantir que o sistema de servos e sensores esteja fixo e alinhado

corretamente. O material escolhido para essa etapa foi o MDF, devido à sua durabilidade, leveza e facilidade de corte e montagem. A estrutura será projetada para permitir movimentos tanto horizontais quanto verticais, possibilitando o acompanhamento do sol durante o dia.

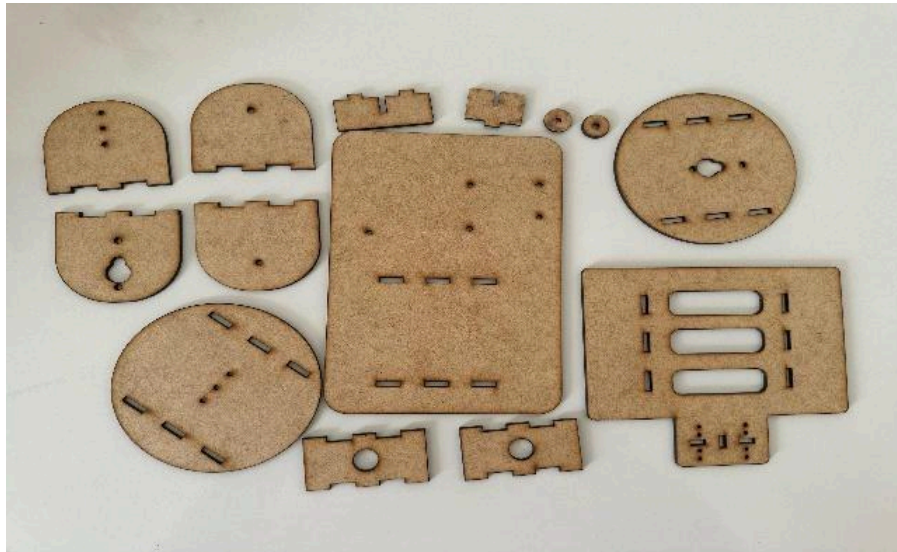
4.1 Passos para a montagem da estrutura

Corte das Peças: Comece cortando as peças de MDF nas dimensões necessárias para o projeto. Utilize uma serra tico-tico ou serra circular para obter cortes precisos. As principais peças a serem cortadas incluem:

- Base: uma placa de MDF de aproximadamente 25 cm x 25 cm.
- Suporte vertical: uma placa de MDF de aproximadamente 25 cm x 10 cm, que será fixada na base.
- Suporte horizontal: uma placa de MDF de aproximadamente 20 cm x 10 cm, que servirá para fixar o painel solar e os sensores.
- Braços para os servos: duas pequenas peças de MDF que servirão de suportes para fixar os motores servo na estrutura.
- Montagem da Base: Comece montando a base, que servirá como fundação do sistema. Fixe o suporte vertical à base utilizando parafusos M3 x 10mm. Para isso, faça furos na base e na parte inferior do suporte vertical. Depois, fixe-os com parafusos e arruelas.
- Fixação dos Suportes para os Servos: Nos dois lados do suporte vertical, fixe as pequenas peças de MDF (braços para os servos). Esses braços devem ser posicionados de forma a permitir o movimento livre dos servos horizontais e verticais.
- Fixação do Suporte Horizontal: O suporte horizontal será fixado na parte superior do suporte vertical, com a finalidade de fornecer estabilidade para o painel solar e os sensores LDR. Esse suporte servirá como ponto de conexão para os servos, os sensores e o painel solar.

Na Figura 6 estão as peças já cortadas necessárias para montagem do rastreador solar. No **Apêndice A** estão os layouts dos cortes a serem feitos na placa de MDF.

Figura 6 – Materiais para a montagem do rastreador



Fonte: Próprio autor.

4.2 Passos para a instalação dos servos

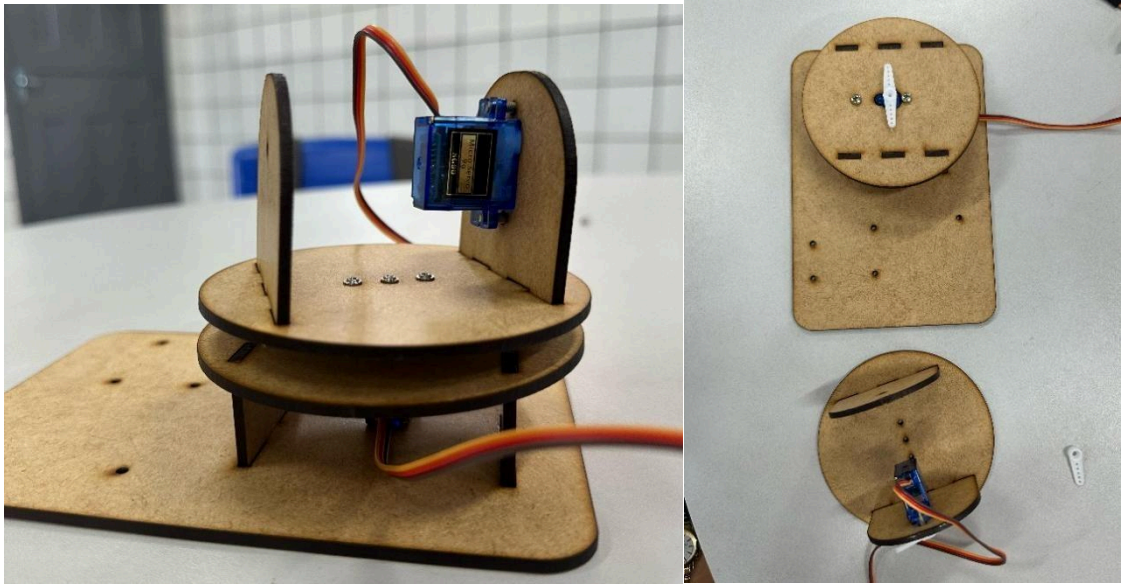
Os servos motores são responsáveis por realizar os movimentos horizontais e verticais, ajustando a posição do painel solar. São necessários dois servos: um para o movimento horizontal e outro para o movimento vertical. O processo de instalação dos servos envolve fixá-los na estrutura e conectá-los corretamente ao Arduino.

- **Servo Horizontal:** O servo responsável pelo movimento horizontal deve ser fixado no braço horizontal de MDF, utilizando parafusos Philips M3 x 6mm. O servo deve ser posicionado de forma que sua rotação mova a base do sistema para a esquerda e para a direita.
- **Servo Vertical:** O servo responsável pelo movimento vertical deve ser fixado no braço vertical de MDF, utilizando os mesmos parafusos. O movimento vertical ajustará a inclinação do painel solar para garantir que ele esteja sempre voltado para o sol.

4.2.1 Conexões dos servos ao Arduino

O servo horizontal será conectado ao pino digital D3 do Arduino, enquanto o servo vertical será conectado ao pino digital D5 do Arduino. No código, esses servos serão controlados pelas variáveis Horizontal e Vertical, respectivamente. A Figura 7 mostra a disposição dos servos no rastreador.

Figura 7 – Vista da posição dos servos motores



Fonte: Próprio autor.

4.3 Instalação dos sensores LDR

Os sensores LDR (*Light Dependent Resistor*) são usados para detectar a intensidade da luz em diferentes direções, permitindo que o sistema ajuste a posição do painel solar em resposta ao movimento do sol. A instalação dos sensores LDR é crucial para o funcionamento correto do rastreador solar.

4.3.1 Passos para a instalação dos sensores LDR

- **Posicionamento dos Sensores LDR:** O sistema requer quatro sensores LDR, que devem ser instalados de forma estratégica para detectar a luz em quatro direções: superior esquerda, superior direita, inferior esquerda e inferior direita. Os sensores LDR serão instalados no suporte horizontal, em posições que garantam a leitura adequada da luz solar. Coloque um LDR na parte superior esquerda, outro na parte superior direita, outro na parte inferior esquerda e o último na parte inferior direita do suporte horizontal.
- **Fixação dos LDRs:** Utilize pequenas abas de MDF, que servirão como suportes para os sensores LDR. Fixe-os nas posições corretas utilizando parafusos M3 x 6mm, de modo que fiquem estáveis e alinhados para realizar as medições de luminosidade.
- **Conexões dos Sensores LDR ao Arduino:** Cada sensor LDR será conectado a um pino analógico do Arduino. O código utiliza os pinos A0, A1, A2 e A3 para os sensores LDR, respectivamente. As conexões dos sensores devem ser feitas com jumpers fêmea-fêmea para garantir a estabilidade do sinal.

As abas posicionadas ao redor dos sensores LDR (Resistores Dependentes de Luz), na parte superior da estrutura em MDF, desempenham um papel essencial no funcionamento do rastreador solar. Essas pequenas extensões funcionam como barreiras que projetam sombras sobre os sensores conforme o ângulo de incidência da luz solar varia ao longo do dia. Quando o sol se move, a luz atinge os sensores de forma desigual por causa das sombras geradas por essas abas. Essa diferença de luminosidade detectada entre os LDRs é o que aciona o algoritmo de controle no Arduino, promovendo o deslocamento do painel solar para a direção onde há maior intensidade luminosa. Trata-se de uma aplicação direta do princípio de realimentação sensorial, em que o sistema ajusta sua posição continuamente a partir da leitura diferencial dos sensores.

Figura 8 – Funcionamento das abas sombreadoras sobre os sensores LDR



Fonte: Próprio autor.

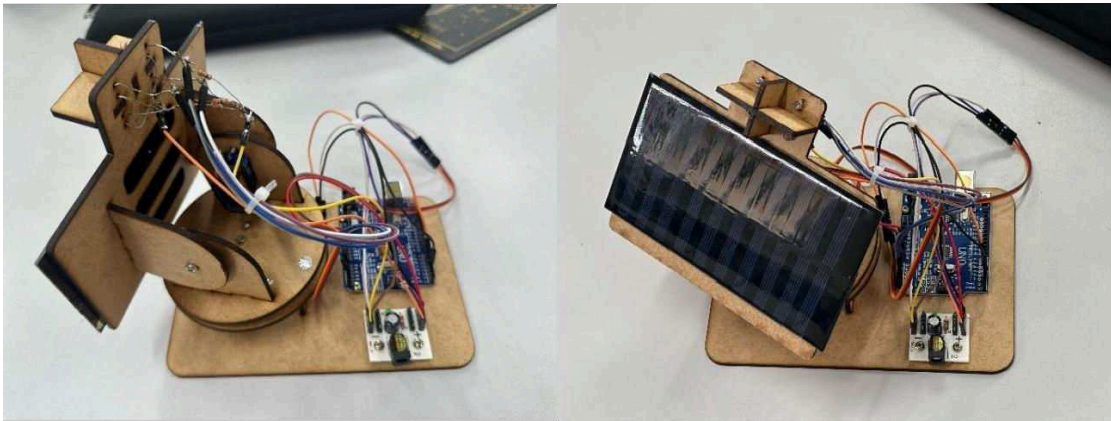
4.4 Conexões elétricas e alimentação

Para alimentar o sistema, será utilizado um módulo extensor de portas, que fornecerá a energia necessária para o Arduino, os servos e os sensores LDR. A alimentação do sistema deve ser feita de forma que todos os componentes recebam a tensão necessária para o funcionamento estável.

4.4.1 Passos para a conexão e alimentação

- Fonte de Alimentação: Utilize uma fonte chaveada 5VDC 1A para alimentar o Arduino e os servos. A conexão do módulo extensor de portas garante que o sistema receba a tensão adequada, sem sobrecarregar o Arduino.
- Conexões de Alimentação: O pino de alimentação do Arduino deve ser conectado à fonte de 5V. Além disso, os servos devem ser conectados à mesma fonte de alimentação, para que possam ser controlados pelo Arduino.

Figura 9 – Protótipo pronto com as conexões



Fonte: Próprio autor.

4.5 Carregando o código no Arduino

Após a montagem do sistema físico, o próximo passo é carregar o código no Arduino. O código é responsável por controlar os movimentos dos servos com base nas leituras dos sensores LDR. A Figura 10 mostra a interface da plataforma Arduino IDE.

- Passos para Carregar o Código:
- Conecte o Arduino ao computador: Use um cabo USB para conectar o Arduino ao computador.
- Carregue o código: Abra a IDE do Arduino, cole o código fornecido e faça o upload para o Arduino. O código controla os servos horizontais e verticais com base nas leituras de luminosidade dos sensores LDR, ajustando a posição do painel solar em tempo real.

Figura 10 – Plataforma Arduino IDE aberta para o carregamento do código

```

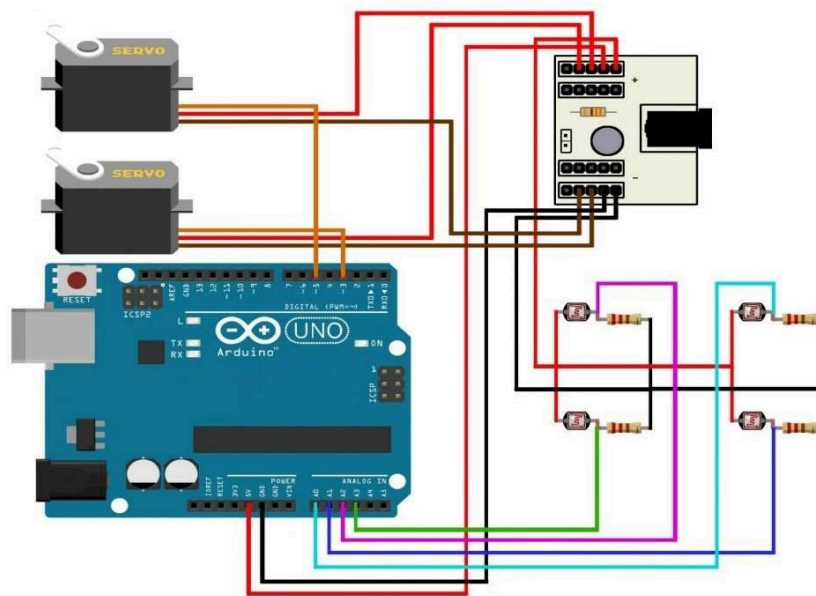
sketch_apr8a | Arduino IDE 2.1.1
File Edit Sketch Tools Help
Arduino Uno
sketch_apr8a.ino
1
2 #include <Servo.h> // Inclui a biblioteca
3
4 Servo Horizontal; // Inicia o Servo da Horizontal
5 Servo Vertical; // Inicia o Servo da Vertical
6
7 int ServoHorizontal = 90; // Estabelece valor fixo à ServoHorizontal
8 int ServoVertical = 90; // Estabelece valor fixo à ServoVertical
9
10 int limiteServoHorizontalMax = 180; // Estabelece os limites de rotação
11 int limiteServoHorizontalMin = 0; // Estabelece os limites de rotação
12
13 int limiteServoVerticalMax = 120; // Estabelece os limites de rotação
14 int limiteServoVerticalMin = 0; // Estabelece os limites de rotação
15
16 int LDREC = A0; // Inicia LDREC no pino A0
17 int LDREB = A1; // Inicia LDREB no pino A1
18 int LDREC = A2; // Inicia LDREC no pino A2
19 int LDREB = A3; // Inicia LDREB no pino A3
20
21 void setup() {
22   Horizontal.attach(3); // Inicia servo Horizontal na porta D3
23   Vertical.attach(5); // Inicia servo Vertical na porta D5
24
25   Horizontal.write(180); // Inicia servo Horizontal na posição 180
26   Vertical.write(45); // Inicia servo Horizontal na posição 45
27   delay(3000); // Aguarda 3 segundos
28 }
29
30 void loop() {
31   int LDC = analogRead(LDREC); // leitura Analógica do LDR Direita Cima
32   int LEC = analogRead(LDREC); // leitura Analógica do LDR Esquerda Cima
33   int LDB = analogRead(LDREB); // leitura Analógica do LDR Direita Baixo
34   int LEB = analogRead(LDREB); // leitura Analógica do LDR Esquerda Baixo
35
36   int tol = 50;

```

Fonte: ARDUINO (2021).

Todas as conexões do sistema estão detalhadamente descritas no esquema a seguir, que ilustra a disposição dos componentes e suas respectivas ligações no circuito. O esquema da Figura 11 mostra a conexão dos sensores LDR aos pinos analógicos do Arduino, assim como a interligação dos servos motores às portas digitais do microcontrolador. Além disso, o diagrama inclui a alimentação dos componentes e os resistores Pull-Down utilizados para garantir leituras precisas dos sensores de luminosidade. Seguir este esquema de ligação é essencial para garantir o correto funcionamento do rastreador solar, proporcionando o controle adequado dos movimentos do painel solar conforme a variação da intensidade da luz.

Figura 11 – Esquema de ligação dos dispositivos na placa Arduino UNO



Fonte: Straub (2020).

4.6 Código do projeto

O código completo utilizado para o funcionamento do rastreador solar está detalhadamente apresentado no **Apêndice B**. Ele foi desenvolvido para o rastreador com o objetivo de ajustar automaticamente a posição do painel solar, orientando-o sempre para a direção que recebe a maior quantidade de luz. Isso é feito através do controle de dois servos motores (um para o movimento horizontal e outro para o movimento vertical), com base nas leituras fornecidas por quatro sensores LDR (Resistor Dependente de Luz). A cada ciclo de leitura, o código determina os ajustes necessários nos servos para manter o painel solar na posição ideal para capturar o máximo de energia solar.

A primeira parte do código começa com a inclusão da biblioteca Servo.h, que é essencial para o controle dos servos. O código então declara dois objetos do tipo Servo: um para controlar o movimento horizontal e outro para controlar o movimento vertical. Esses objetos, denominados

Horizontal e Vertical, são os responsáveis por movimentar o painel solar. Além disso, o código define variáveis para controlar os limites de rotação dos servos, para garantir que eles não se movam além de seus limites físicos. Os valores de rotação máximos e mínimos são estabelecidos para ambos os servos, sendo 180 graus e 65 graus para o servo horizontal e 120 graus e 15 graus para o servo vertical.

Em seguida, são definidas as variáveis de entrada para os sensores LDR. O código atribui os pinos analógicos do Arduino aos sensores de luminosidade: LDRDC para o LDR da direita superior, LDRDB para o LDR da direita inferior, LDREC para o LDR da esquerda superior, e LDREB para o LDR da esquerda inferior. A leitura dos sensores será feita por meio da função **analogRead()**, que retorna valores entre 0 e 1023, representando a intensidade de luz captada pelos sensores. Esses valores serão usados para determinar se o painel solar precisa se mover.

Na função **setup()**, os servos são inicialmente configurados para funcionar nas portas digitais 3 e 5 do Arduino. Os servos são posicionados em ângulos iniciais definidos no código: o servo horizontal começa em 180 graus (o que corresponde à posição máxima da direita) e o servo vertical começa em 45 graus (uma posição intermediária para o movimento de inclinação). Após essa configuração inicial, o código aguarda 3 segundos para garantir que os servos estejam prontos para realizar os movimentos.

A parte mais importante do código ocorre dentro da função **loop()**, que é executada repetidamente enquanto o Arduino estiver ligado. A cada ciclo, o código realiza a leitura dos sensores LDR para determinar a intensidade de luz em cada direção. As variáveis **ValorSup** e **ValorInf** representam a média das leituras dos sensores de luminosidade superior e inferior, respectivamente. Da mesma forma, as variáveis **ValorDir** e **ValorEsq** representam a média das leituras dos sensores da direita e da esquerda.

O código então calcula duas variáveis de diferença: **DifSupInf** (diferença entre a intensidade de luz superior e inferior) e **DifDirEsq** (diferença entre a intensidade de luz direita e esquerda). Esses valores serão usados para determinar a direção em que o painel solar deve se mover. Se a diferença de luminosidade entre a parte superior e inferior do painel for maior do que uma tolerância definida pelo código (variável **tol**), o servo vertical será ajustado para mover o painel para cima ou para baixo, dependendo da direção da luz. O mesmo acontece para a diferença entre os lados direito e esquerdo: se houver uma diferença de luminosidade significativa, o servo horizontal ajusta a posição do painel para a direita ou para a esquerda.

No código, o movimento dos servos é controlado de maneira que os valores de rotação nunca ultrapassem os limites definidos para cada servo, garantindo que o painel solar se mova de forma segura e eficiente. Quando o painel está posicionado na direção correta, o código mantém

o painel nessa posição até que uma nova diferença de luminosidade seja detectada pelos sensores, o que então acionará novos movimentos dos servos.

O uso de um pequeno delay de 100 milissegundos no final do loop ajuda a evitar que os servos se movam muito rapidamente e de forma desordenada. Esse atraso permite uma movimentação mais suave e controlada, além de garantir que o Arduino tenha tempo suficiente para processar as leituras dos sensores e enviar os comandos de movimento para os servos. Além disso, a introdução de um valor de tolerância na comparação de luminosidade permite um movimento mais estável, evitando que os servos se movam constantemente devido a pequenas variações na intensidade da luz.

5 SEQUÊNCIA DIDÁTICA: DA INVESTIGAÇÃO INICIAL À PRÁTICA REFLEXIVA

Esta seção tem como objetivo apresentar, de forma estruturada e detalhada, as etapas da intervenção didática desenvolvida com base nos princípios da Teoria Construcionista, centrada no estudo do efeito fotovoltaico por meio da construção e utilização de um rastreador solar automatizado controlado por Arduino. A proposta visa promover aprendizagens ativas e significativas, integrando conhecimentos científicos à aplicação prática e à resolução de problemas reais no contexto escolar.

Antes de iniciar a sequência propriamente dita, é essencial que o(a) professor(a) realize uma sondagem diagnóstica. A aplicação de testes prévios e questionários permite identificar os conhecimentos prévios, as concepções espontâneas e o nível de familiaridade dos estudantes com os temas que serão abordados — tais como energia solar, efeito fotovoltaico, eletrônica básica e programação de microcontroladores. Essa etapa inicial é fundamental para ajustar a proposta às necessidades reais da turma e garantir uma intervenção mais eficaz. Um exemplo de questionário diagnóstico encontra-se no **Apêndice C** deste recurso educacional.

A sequência didática foi estruturada em oito encontros presenciais, distribuídos entre momentos teóricos, experimentais e reflexivos. Cada etapa contempla atividades investigativas, construção colaborativa do conhecimento e interação direta com o protótipo do rastreador solar, promovendo a interdisciplinaridade entre Física, Matemática, Tecnologia e Sustentabilidade.

Ao longo das aulas, os estudantes são convidados a planejar, construir, programar, testar e refletir sobre o funcionamento do dispositivo, sendo desafiados a aplicar conceitos físicos em contextos concretos e a resolver problemas que surgem naturalmente no decorrer do processo. A metodologia estimula o trabalho em grupo, o pensamento crítico e o protagonismo estudantil, favorecendo o desenvolvimento de competências cognitivas e socioemocionais.

A avaliação do impacto da abordagem prática no ensino da Física Solar deve ser realizada por meio de diversos instrumentos de coleta de dados, permitindo uma análise mais rica e abrangente da aprendizagem. Entre esses instrumentos, destacam-se:

- Entrevistas qualitativas com os estudantes, realizadas ao longo do desenvolvimento do projeto. Essas entrevistas proporcionam uma visão mais aprofundada sobre a percepção dos alunos em relação à experiência de aprendizagem, os desafios enfrentados e a eficácia do dispositivo como ferramenta pedagógica.
- Testes práticos, aplicados após a implementação do protótipo, nos quais os alunos demonstram sua competência em operar o dispositivo, interpretar os dados coletados e avaliar a eficiência do sistema em condições reais. Durante esses testes, os estudantes devem ser capazes de aplicar os conceitos teóricos em situações concretas, como o

alinhamento do painel solar com a posição ideal do sol, consolidando seu aprendizado e verificando o desempenho técnico do dispositivo construído.

Na fase final, os alunos elaboram relatórios reflexivos individuais ou em grupo, compartilhando suas percepções sobre o projeto, as dificuldades enfrentadas, os aprendizados adquiridos e as aplicações possíveis do que foi estudado. Esses relatos, somados às observações do professor, possibilitam uma análise qualitativa da intervenção e revelam transformações significativas no processo de ensino-aprendizagem.

Além de avaliar os conteúdos assimilados, essa etapa permite compreender o impacto da proposta em termos de motivação, engajamento e desenvolvimento de habilidades técnicas (como montagem de circuitos e lógica de programação), conceituais (relacionadas à energia solar e ao efeito fotovoltaico) e atitudinais (como cooperação, resiliência e autonomia).

A sequência proposta mostra que é possível, com recursos acessíveis e estratégias inovadoras, ensinar Física de maneira mais envolvente, contextualizada e transformadora, aproximando os estudantes da ciência e preparando-os para um mundo em constante mudança.

O cronograma detalhado com as etapas e a quantidade de aulas dedicadas a cada fase do projeto é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Cronograma de execução da pesquisa

Aula	Etapas	Atividades
1	Introdução à Pesquisa	- Apresentação dos objetivos e hipóteses da pesquisa. - Discussão sobre a importância do efeito fotovoltaico e dispositivos de rastreamento solar. - Aplicação do questionário diagnóstico
2	Fundamentação Teórica	- Revisão dos conceitos físicos relevantes, incluindo princípios do efeito fotovoltaico, luz como onda eletromagnética e movimento solar.
3	Desenvolvimento do Dispositivo	- Introdução ao Arduino e aos componentes eletrônicos. - Início da construção do protótipo do dispositivo de rastreamento solar.
4	Continuação do Desenvolvimento	- Finalização da construção do protótipo. - Testes iniciais do sistema e ajustes necessários para garantir seu funcionamento eficaz.
5	Aplicação Prática em Sala de Aula	- Implementação do dispositivo em atividades práticas com alunos.

		- Realização de experimentos para observar o efeito fotovoltaico e a eficiência energética.
6	Reflexão sobre Implicações Pedagógicas	Discussão sobre as implicações pedagógicas do uso do dispositivo, com destaque para a abordagem construcionista de Seymour Papert.
7	Análise dos Resultados	- Coleta e análise dos dados obtidos durante as atividades práticas. - Avaliação do impacto da metodologia construcionista no aprendizado dos alunos.
8	Apresentação dos Resultados	- Preparação e apresentação dos resultados em um seminário final. - Compartilhamento das experiências e aprendizagens com outros educadores e pesquisadores.

Fonte: Próprio autor.

5.1 Etapas da pesquisa e organização da prática

5.1.1 AULA 1 – Introdução à pesquisa

A aula tem como objetivo apresentar a proposta da pesquisa aos estudantes, discutir sua relevância para o contexto educacional e tecnológico atual, e realizar um diagnóstico prévio sobre os conhecimentos dos alunos.

Conteúdo:

- Objetivos e hipóteses da pesquisa
- Efeito fotovoltaico e rastreadores solares
- Importância da energia solar

Habilidades:

- (EM13CNT301) Analisar e interpretar fenômenos físicos relacionados à energia.
- (EM13CNT307) Identificar problemas reais e propor soluções com base científica.

Metodologia:

Roda de conversa, exposição dialogada e aplicação de questionário diagnóstico.

Descrição das Atividades:

1. Apresentação dos objetivos da pesquisa e cronograma de atividades.
2. Discussão em grupo sobre energias renováveis e rastreamento solar.

3. Aplicação de um questionário diagnóstico para mapear conhecimentos prévios (**Apêndice C**).

5.1.2 AULA 2 – Fundamentação teórica

Esta aula será dedicada ao estudo dos fundamentos físicos que embasam o funcionamento do dispositivo, com foco no efeito fotovoltaico, na natureza da luz e no movimento aparente do Sol.

Conteúdo:

- Efeito fotovoltaico
- Luz como onda eletromagnética
- Movimento solar e variação da luminosidade

Habilidades:

- (EM13CNT104) Explicar fenômenos físicos a partir de modelos teóricos.
- (EM13CNT105) Utilizar conceitos de radiação e luz na resolução de problemas.

Metodologia:

Aula expositiva dialogada, uso de simulações e vídeos educativos.

Descrição das Atividades:

1. Aula teórica com recursos visuais (slides, vídeos e simulações PhET).
2. Análise de situações-problema relacionadas à captação de energia solar.
3. Discussão sobre como a luz interage com diferentes materiais.

5.1.3 AULA 3 – Desenvolvimento do dispositivo (Parte 1)

Nesta etapa, os alunos conhecerão o Arduino e seus principais componentes, dando início à montagem do dispositivo de rastreamento solar.

Conteúdo:

- Introdução ao Arduino
- Sensores de luz (LDRs)
- Servomotores e circuitos

Habilidades:

- (EM13CNT309) Aplicar conceitos físicos e computacionais na resolução de problemas reais.
- (EM13CNT106) Construir e programar sistemas simples automatizados.

Metodologia:

Aprendizagem prática, trabalho em grupo e abordagem construcionista.

Descrição das Atividades:

1. Apresentação dos componentes eletrônicos.
2. Explicação básica sobre montagem de circuitos.
3. Início da construção do protótipo com base no diagrama elétrico.

5.1.4 AULA 4 – Continuação do desenvolvimento do dispositivo (Parte 2)

Dar continuidade à montagem do protótipo, realizar os testes iniciais e ajustar o código e a estrutura para garantir o funcionamento adequado do sistema.

Conteúdo:

- Finalização da montagem do rastreador solar
- Testes e ajustes na programação Arduino

Habilidades:

- (EM13CNT309) Efetuar ajustes com base em testes e dados empíricos.
- (EM13CNT303) Identificar falhas técnicas e propor melhorias no protótipo.

Metodologia:

Aprendizagem baseada em projetos (ABP), programação prática e trabalho cooperativo.

Descrição das Atividades:

1. Finalização da montagem física do dispositivo.
2. Upload e testes do código de rastreamento solar.
3. Diagnóstico de problemas e correção de falhas no sistema.

5.1.5 AULA 5 – Aplicação prática em sala de aula

Esta aula será voltada à experimentação com o dispositivo construído, testando sua eficiência em comparação a um painel fixo e observando o comportamento em diferentes condições de iluminação.

Conteúdo:

- Teste prático do rastreador solar
- Comparação entre dispositivo fixo e móvel
- Eficiência na captação da energia solar

Habilidades:

- (EM13CNT104) Analisar dados empíricos coletados em experimentos.
- (EM13CNT301) Relacionar teoria e prática no estudo de sistemas físicos.

Metodologia:

Aula prática experimental com coleta de dados.

Descrição das Atividades:

1. Realização de experimentos com o painel fixo e o rastreador solar.
2. Registro da tensão e corrente geradas em diferentes horários.
3. Análise comparativa dos dados obtidos.

5.1.6 AULA 6 – Reflexão sobre implicações pedagógicas

Neste encontro, os alunos refletirão sobre o processo vivido e as possibilidades pedagógicas do uso do dispositivo no ensino de Física, com ênfase na abordagem construcionista.

Conteúdo:

- Construção do conhecimento por meio da experimentação
- Abordagem construcionista de Seymour Papert
- Interdisciplinaridade no ensino de Física

Habilidades:

- (EM13CHS301) Refletir sobre o papel das tecnologias na aprendizagem.
- (EM13CNT309) Avaliar o processo de construção do conhecimento científico.

Metodologia:

Discussão orientada, leitura de trechos de Papert e debate coletivo.

Descrição das Atividades:

1. Apresentação sobre o pensamento construcionista.
2. Discussão em grupo sobre o que foi aprendido e os desafios enfrentados.
3. Redação reflexiva sobre a experiência vivida.

5.1.7 AULA 7 – Análise dos resultados

Momento para sistematizar os dados coletados nas aulas práticas, avaliar o impacto da metodologia e levantar evidências do aprendizado promovido.

Conteúdo:

- Análise de gráficos e tabelas
- Discussão dos dados obtidos
- Avaliação da aprendizagem

Habilidades:

- (EM13MAT401) Interpretar e representar dados com tabelas e gráficos.
- (EM13CNT308) Avaliar resultados experimentais de forma crítica.

Metodologia:

Análise de dados, construção de gráficos e reflexão coletiva.

Descrição das Atividades:

1. Sistematização dos dados coletados nos testes.
2. Construção de gráficos de tensão/tempo e comparação de eficiência.
3. Debate sobre os resultados e construção de conclusões.

5.1.8 AULA 8 – Apresentação dos resultados

Finalizar o projeto com uma apresentação pública dos resultados, promovendo a socialização do conhecimento construído com a comunidade escolar e outros professores.

Conteúdo:

- Elaboração de apresentação científica
- Comunicação de resultados
- Compartilhamento de experiências

Habilidades:

- (EM13LP19) Apresentar ideias de forma clara e argumentativa.
- (EM13CNT308) Comunicar descobertas e conclusões científicas.

Metodologia:

Seminário final, produção de pôster ou slides, debate aberto.

Descrição das Atividades:

1. Organização de grupos para apresentação dos projetos.
2. Criação de slides, pôsteres ou banners com os resultados.
3. Apresentação pública para professores, colegas e comunidade escolar.

Ao final desta etapa aplique o questionário final que está o **Apêndice D**. Este tem como função avaliar os aprendizados adquiridos ao longo da experiência, bem como verificar mudanças nas percepções dos estudantes em relação aos conteúdos e à prática pedagógica vivenciada.

BIBLIOGRAFIA

- ANDRADE, Harryson Guilherme Moraes; CAMPELO, Djamilton Foicinha. Sistema automatizado de irrigação com Arduino utilizando energia sustentável: uma proposta para o ensino de Física no campo. 2023.
- ARDUINO. Captura de tela da interface da plataforma Arduino IDE. [S.l.]: Arduino, [2021, 15 setembro]. 1 imagem. Disponível em: <https://www.arduino.cc>. Acesso em: 29 abr. 2025.
- AROCA, Silvia Calbo. Ensino de física solar em um espaço não formal de educação. 2009. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- BANZI, Massimo; SHILOH, Michael. Getting started with Arduino. 3rd ed. Sebastopol: Maker Media, 2015.
- BARZOTTO, Lucas R. et al. Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo utilizando a plataforma Arduino. In: SIMPÓSIO DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA – SIMPROC4, 2019. Anais [...]. 2019.
- BEATY, H. Wayne; FINK, Donald G. Standard handbook for electrical engineers. New York: McGraw-Hill Education, 2013.
- BORN, Max; WOLF, Emil. Principles of optics. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. Resenha em: The Observatory, v. 120, n. 1155, p. 149, 2000.
- BOYLE, Godfrey. Renewable energy: power for a sustainable future. Journal of Energy Literature, v. 2, p. 106-107, 1996.
- CACHAPUZ, António et al. (Org.). A necessária renovação do ensino das ciências. São Paulo: Cortez, 2005.
- CORIOLOANO, Diego Lopes; SANTANA SOUZA, Thiago de. Rastreador solar controlado por Arduino. Anais da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT) do IFS, v. 2, n. 1, p. 606-609, 2020.
- CRESWELL, John W. Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. 2nd ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2003.
- DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. Solar engineering of thermal processes. New York: Wiley, 1980.
- DUTRA, Carlos Maximiliano; VERNIER, Andrea Berro. Uso da tecnologia móvel para o estudo do movimento aparente do Sol. Ensino & Pesquisa, v. 17, n. 1, 2019.
- EKE, Rustu; SENTURK, Ali. Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system. Solar Energy, v. 86, n. 9, p. 2665-2672, 2012.
- FTHENAKIS, Vasilis M.; KIM, Hyung Chul. Greenhouse-gas emissions from solar electric-and nuclear power: a life-cycle study. Energy Policy, v. 35, n. 4, p. 2549-2557, 2007.
- GARCIA, Bruno Fernandes; SOLTAU, Samuel Bueno. Física solar: uma experiência de ensino remoto durante a pandemia. Research, Society and Development, v. 10, n. 3, p. e49910313495, 2021.
- GOETZBERGER, Adolf; HOFFMANN, Volker; ZASTROW, Andreas. Photovoltaic Solar Energy: Advances and Applications. Heidelberg: Springer, 2005.
- GREEN, Martin A. Solar cell efficiency tables. Progress in Photovoltaic Research and Applications, v. 8, 2000.

GREEN, Martin A. Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications. 1. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2015.

GREEN, Martin et al. Solar cell efficiency tables (version 57). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 29, n. 1, p. 3-15, 2021.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de Física: eletricidade e magnetismo. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HATTIE, John; DONOGHUE, Gregory. Learning strategies: a synthesis and conceptual model. Nature Human Behaviour, v. 1, p. 1-13, 2016.

HECHT, Eugene; ZAJAC, Alfred. Optics, chapter 9. 3. ed. Addison-Wesley, 2002. p. 384-441.

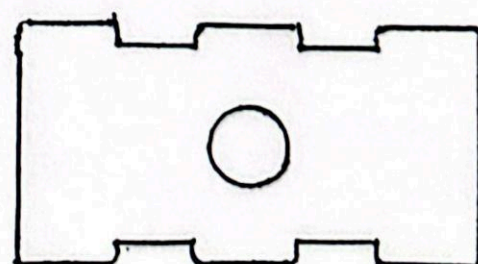
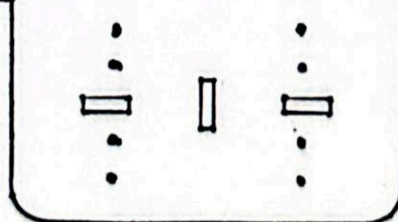
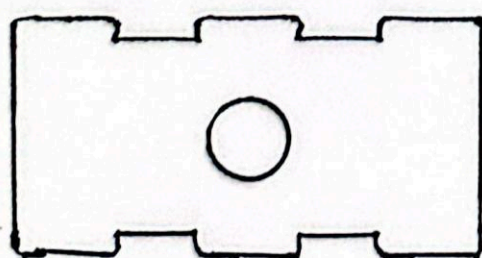
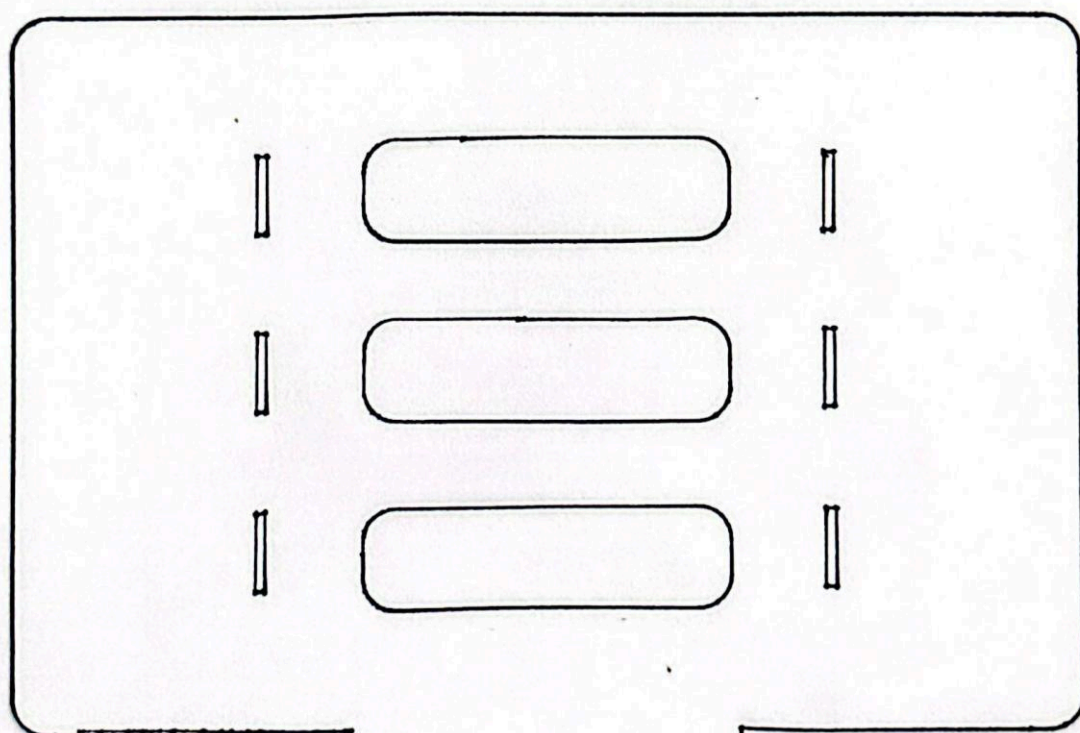
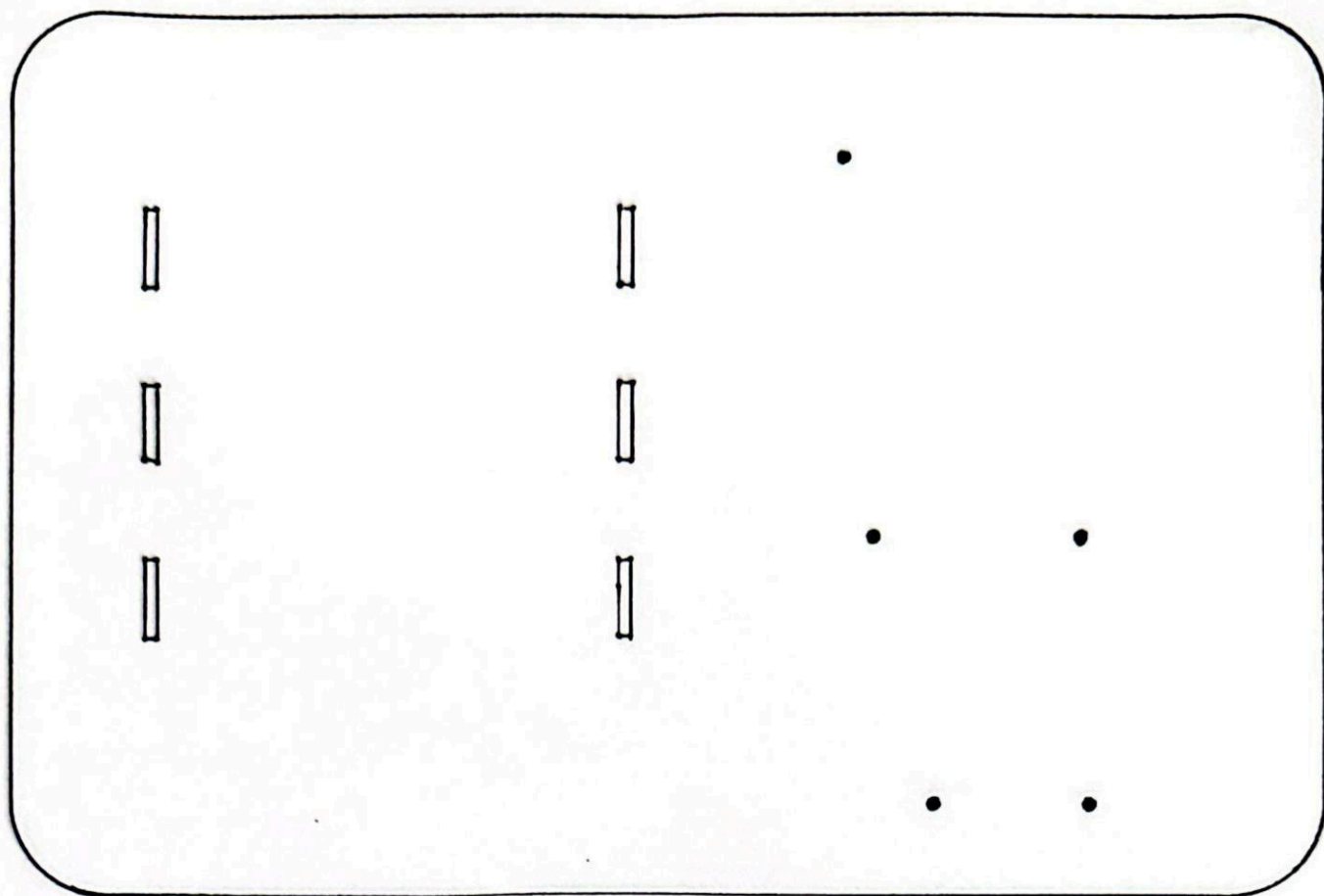
HESTENES, David. Modeling methodology for physics teachers. Proceedings of the International Conference on Undergraduate Physics Education, p. 935-958, 1992.

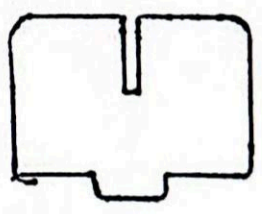
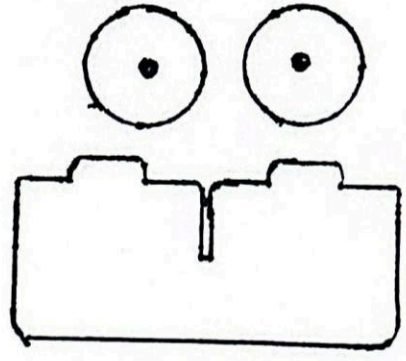
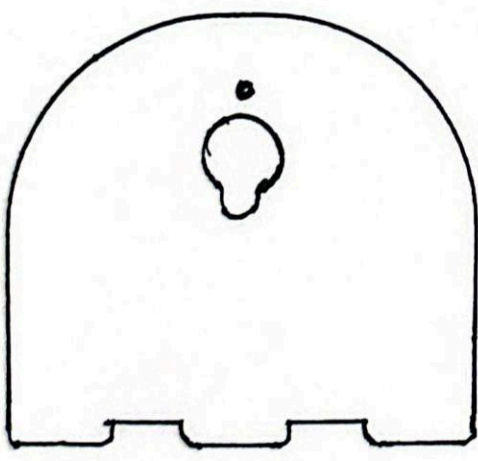
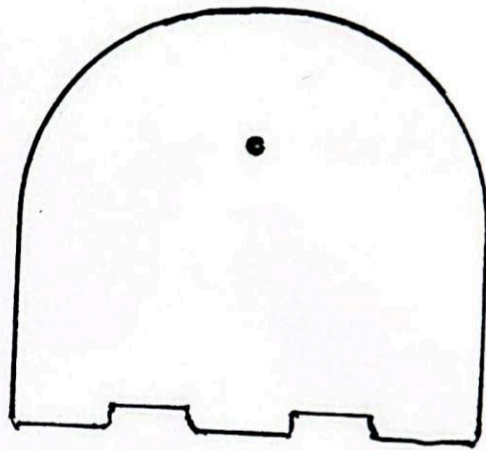
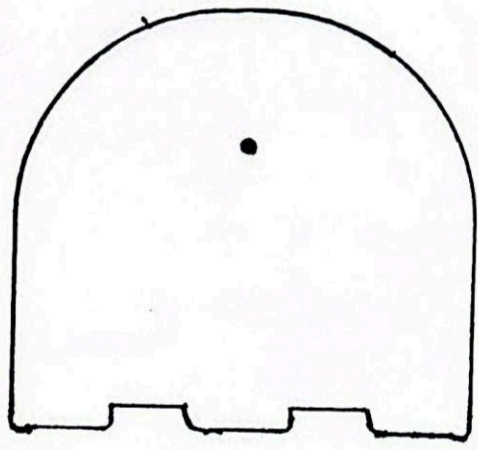
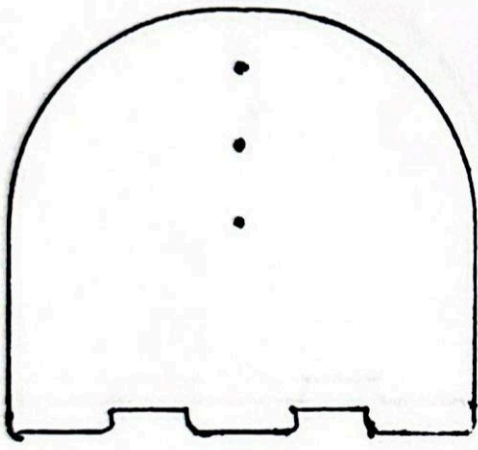
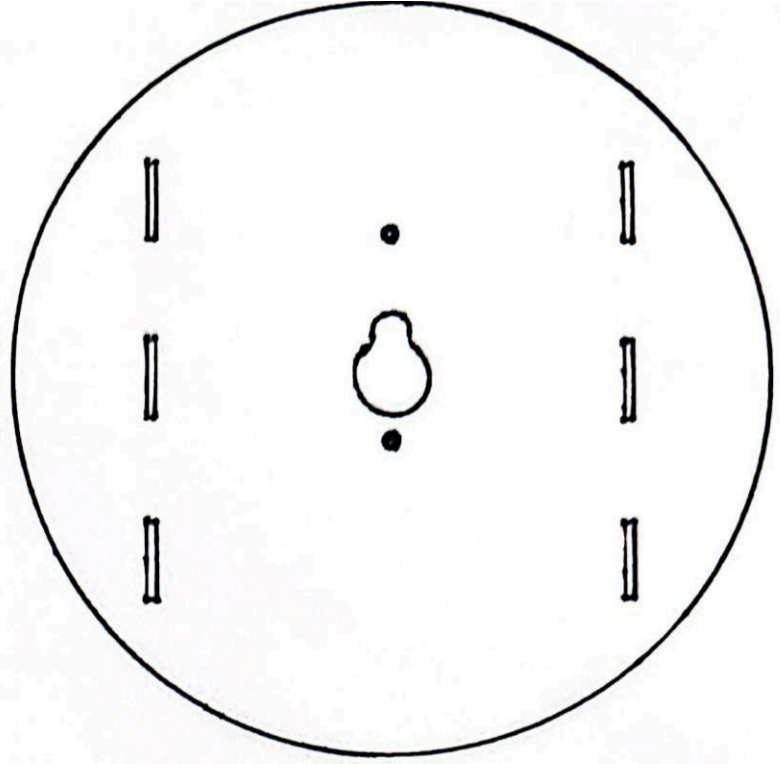
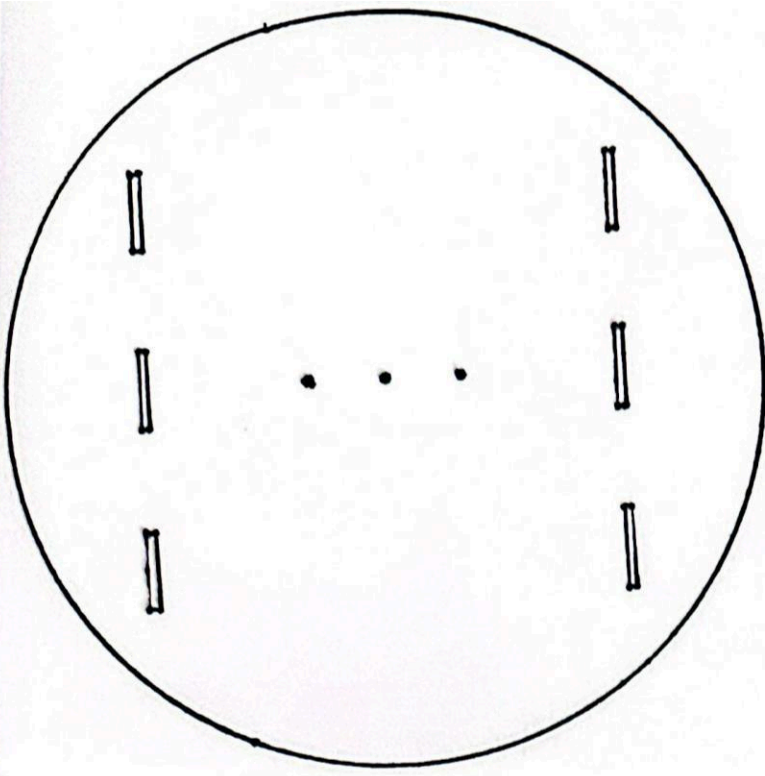
HONSBURG, Christiana; BOWDEN, Stuart. Photovoltaics: devices, systems and applications. CD-ROM. Sydney: Key Centre for Photovoltaic Engineering, University of New South Wales, 1999.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Renewable Energy Market Update. IEA, 2020.

IRENA. Solar Energy. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/topics/solar-energy>. Acesso em: 10 abr. 2025.

Apêndice A – Layout de corte dos moldes da estrutura do rastreador





Apêndice B – Código de funcionamento

```
#include <Servo.h> // Importa a biblioteca para controle de servos
// Instanciação dos servos
Servo motorAzimute; // Servo responsável pelo movimento horizontal
Servo motorAltura; // Servo responsável pelo movimento vertical
// Posições iniciais dos servos
int posAzimute = 90;
int posAltura = 90;
// Limites de movimento dos servos
int maxAzimute = 180;
int minAzimute = 65;
int maxAltura = 120;
int minAltura = 15;
// Definições dos pinos dos sensores LDR
int sensorTopDir = A0;
int sensorBotDir = A1;
int sensorTopEsq = A2;
int sensorBotEsq = A3;
void setup() {
    // Associação dos servos aos pinos PWM
    motorAzimute.attach(3);
    motorAltura.attach(5);
    // Define posições iniciais
    motorAzimute.write(180);
    motorAltura.write(45);
    delay(3000); // Espera inicial de 3 segundos
}
void loop() {
    // Leituras dos sensores de luminosidade
    int leituraTopDir = analogRead(sensorTopDir);
    int leituraBotDir = analogRead(sensorBotDir);
    int leituraTopEsq = analogRead(sensorTopEsq);
    int leituraBotEsq = analogRead(sensorBotEsq);
    // Tolerância para evitar movimentações desnecessárias
    int tolerancia = 50;
    // Cálculo das médias das leituras para cada eixo
    int mediaSuperior = (leituraTopDir + leituraTopEsq) / 2;
    int mediaInferior = (leituraBotDir + leituraBotEsq) / 2;
    int mediaDireita = (leituraTopDir + leituraBotDir) / 2;
    int mediaEsquerda = (leituraTopEsq + leituraBotEsq) / 2;
```

```

// Diferença entre as leituras para decisão de movimento
int deltaVertical = mediaSuperior - mediaInferior;
int deltaHorizontal = mediaDireita - mediaEsquerda;

// Controle do servo vertical (altura)
if (abs(deltaVertical) > tolerancia) {
    if (mediaSuperior > mediaInferior) {
        posAltura++;
        if (posAltura > maxAltura) {
            posAltura = maxAltura;
        }
    } else {
        posAltura--;
        if (posAltura < minAltura) {
            posAltura = minAltura;
        }
    }
    motorAltura.write(posAltura);
}

// Controle do servo horizontal (azimute)
if (abs(deltaHorizontal) > tolerancia) {
    if (mediaDireita > mediaEsquerda) {
        posAzimute--;
        if (posAzimute < minAzimute) {
            posAzimute = minAzimute;
        }
    } else {
        posAzimute++;
        if (posAzimute > maxAzimute) {
            posAzimute = maxAzimute;
        }
    }
    motorAzimute.write(posAzimute);
}

delay(100); // Intervalo de 100 milissegundos entre as leituras
}

```

Apêndice C – Questionário inicial

Questionário 1 - Energia Solar e Tecnologia

1. O que é energia solar?

- (A) Energia térmica proveniente do núcleo da Terra.
- (B) Energia obtida através da luz do sol.
- (C) Energia química liberada em reações orgânicas.
- (D) Energia produzida pelo movimento das ondas.

2. Como a energia solar pode ser convertida em eletricidade?

- (A) Utilizando placas magnéticas.
- (B) Através de motores a combustão.
- (C) Através de turbinas eólicas.
- (D) Com o uso de painéis fotovoltaicos.

3. O que é o efeito fotovoltaico?

- (A) O armazenamento de luz solar em baterias.
- (B) A geração de corrente elétrica por meio da luz solar em um material semicondutor.
- (C) A reflexão da luz solar em superfícies espelhadas.
- (D) A conversão da luz em calor.

4. Qual das opções a seguir representa um dispositivo que funciona com energia solar?

- (A) Lâmpada fluorescente.
- (B) Calculadora Solar.
- (C) Fogão a gás.
- (D) Micro-ondas.

5. Por que é importante usar um sistema de rastreamento solar?

- (A) Para aquecer o painel no inverno.
- (B) Para manter o painel solar sempre limpo.
- (C) Para garantir que o painel esteja sempre voltado para o sol, maximizando a geração de energia.
- (D) Para reduzir a quantidade de luz recebida.

6. O que você sabe sobre efeito fotovoltaico?

7. O que você sabe sobre energia solar?

8. O que você sabe sobre microcontroladores, como o Arduino?

Apêndice D – Questionário final

Após responderem as perguntas abaixo, produzam um relatório final sobre o projeto.

1. Explique com suas palavras o que foi o projeto do rastreador solar.
2. Qual era o objetivo principal do projeto?
3. Qual a importância de estudar e aplicar a energia solar?
4. Como você participou do desenvolvimento do projeto?
5. Quais atividades você realizou ao longo das aulas práticas?
6. Você encontrou dificuldades? Quais foram e como superou?
7. O que você aprendeu com esse projeto?
8. Quais conceitos de Física, eletrônica, programação e sustentabilidade foram trabalhados?
9. Você acha que o projeto ajudou a entender melhor esses conteúdos? Justifique.
10. Como foi a colaboração com os colegas?
11. Vocês dividiram tarefas? Como foi o trabalho em grupo?
12. Você acredita que evoluiu em termos de conhecimento e habilidades?
13. O que mais gostou no projeto?
14. O que poderia ser melhorado para as próximas turmas?
15. Faça um resumo da sua experiência com o projeto.
16. O que esse projeto representou para você?
17. Você gostaria de participar de outros projetos assim?