



Painéis Solares e a Física de Semicondutores: A utilização de UEPS's no ensino de tópicos de Física Moderna e Contemporânea na educação básica

Caio Matheus Fontinele dos Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador(a):

Dra. Regina Lélis de Sousa

Araguaína - TO
2022

Caio Matheus Fontinele dos Santos


“PAINÉIS SOLARES E A FÍSICA DE SEMICONdutoRES: A UTILIZAÇÃO DE UEPS’S NO ENSINO DE TÓPICOS DE FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA NA EDUCAÇÃO BÁSICA”

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários a obtenção de título de Mestre em Ensino de Física.


Orientador(a): Dra. Regina Lélis de Sousa

Data da aprovação: 11/02/2022


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 Regina Lélis de Sousa
Data: 11/02/2022 19:58:24-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Dra. Regina Lélis de Sousa (UFT-MNPEF)
Participação por videoconferência

Documento assinado digitalmente
 RUBENS SILVA
Data: 12/02/2022 15:15:03-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Dr. Rubens Silva (UFPA)
Participação por videoconferência

Documento assinado digitalmente
 CLAUDIA ADRIANA DA SILVA
Data: 16/02/2022 17:34:49-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Dra. Cláudia Adriana da Silva (UFT-MNPEF)
Participação por videoconferência

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

S237p Santos, Caio Matheus Fontinele dos.
Painéis Solares e a Física de Semicondutores: A utilização de UEPS's no ensino de tópicos de Física Moderna e Contemporânea na educação básica. / Caio Matheus Fontinele dos Santos. – Araguaína, TO, 2022.
214 f.
Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Araguaína - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional Nacional em Ensino de Física, 2022.
Orientadora : Regina Lélis de Sousa
1. Semicondutores. 2. Células e painéis solares. 3. UEPS. 4. Ensino de Física. I. Título

CDD 530

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Agradecimentos

Ingressar em um programa de pós graduação sempre foi uma meta pessoal, mas com as condições que infelizmente tivemos que aprender a nos habituar, todos fomos forçados ao limite diversas vezes. Sem a ajuda de muitas pessoas nessa longa, porém ironicamente curta caminhada, eu jamais teria conseguido me manter no caminho e concluir essa árdua etapa da minha vida acadêmica.

Gostaria de agradecer aos meus pais pelo apoio e confiança em minhas decisões. Sem vocês não poderia continuar nessa caminhada.

Me sinto imensamente grato a minha orientadora prof^a. Dr^a Regina Lélis de Sousa pelo comprometimento, apoio e compreensão em relação ao trabalho que idealizamos e tornamos realidade juntos. Sua dedicação e atenção fizeram toda a diferença nessa intensa caminhada, aumentando cada vez mais minha admiração pela pessoa e profissional excepcional que sempre foi. MUITÍSSIMO OBRIGADO.

Nada disso seria possível sem a ajuda do professor Msc. Elves Silva de Sousa. Sem sua imensa disponibilidade e benevolência em ajudar a tornar possível e concretizar o principal intuito desse trabalho: Aplicá-lo e oferecer aos alunos da educação básica, talvez o primeiro e único contato com esse tipo de proposta educacional. Deixo aqui registrado meus sinceros agradecimentos.

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

Dedico aos que possuem ânsia pelo conhecimento,
pois esses retirarão a venda do mundo.

Resumo

Painéis Solares e a Física de Semicondutores: A utilização de UEPS's no ensino de tópicos de Física Moderna e Contemporânea na educação básica

Caio Matheus Fontinele dos Santos

Orientador(a): Dr^a. Regina Lélis de Sousa

O presente trabalho propõe a elaboração de unidades de ensino potencialmente significativas (UEPS's) aliada a metodologia dos três momentos pedagógicos (3MP) a fim de alicerçarem o processo de ensino aprendizagem de tópicos seletos de Física Moderna e Contemporânea (FMC), em específico os materiais semicondutores e sua principal aplicação: As células e painéis solares. Tal abordagem visa contribuir para um processo de ensino aprendizagem mais próximo da realidade do aluno, contextualizado e bem estruturado, consistindo assim, em uma proposta que ousa contribuir para a melhoria do ensino de Física da forma como é executado atualmente. Para tal, fez-se uso de recursos pertinentes como simuladores computacionais e experimentos assistidos utilizando a plataforma Arduino, a fim de enriquecer o processo de ensino aprendizagem. O produto educacional proveniente da pesquisa foi aplicado em uma turma de terceiro ano do ensino médio. Ao final do processo de aplicação do produto educacional, o objetivo de ofertar aulas de Física que, com foco na aprendizagem significativa, contribuam para a formação científica dos discentes foi alcançado.

Palavras-chave: Semicondutores; Célula solar; Painel solar; UEPS; Ensino de Física.

Abstract

Solar Panels and Semiconductor Physics: The use of UEPS's in teaching topics of Modern and Contemporary Physics in basic education

Caio Matheus Fontinele dos Santos

Advisor(a): Dr^a. Regina Lélis de Sousa

The present work proposes the elaboration of potentially significant teaching units (UEPS's) combined with the methodology of the three pedagogical moments (3MP) in order to support the teaching-learning process of selected topics of Modern and Contemporary Physics (FMC), in particular the materials semiconductors and their main application: Solar cells and panels. This approach aims to contribute to a teaching-learning process closer to the student's reality, contextualized and well structured, thus consisting of a proposal that dares to contribute to the improvement of Physics teaching in the way it is currently performed. To this end, relevant resources were used, such as computer simulators and assisted experiments using the Arduino platform, in order to enrich the teaching-learning process. The educational product from the research was applied to a third year high school class. At the end of the application process of the educational product, the objective of offering Physics classes that, with a focus on significant learning, contribute to the scientific training of students was achieved.

Keywords: Semiconductors; Solar cell; Solar panel; UEPS; Teaching Physics.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquema que exemplifica a aprendizagem subordinada e superordenada	28
Figura 2 – Inter-relações do eixo CTS	36
Figura 3 – Esquema de um átomo no modelo de Drude	43
Figura 4 – Estrutura cristalina do cloreto de sódio (<i>NaCl</i>)	45
Figura 5 – Modelo atômico de Thomsom	47
Figura 6 – Esquema representativo das bandas de energia	52
Figura 7 – Ilustração da junção P-N com acúmulos de carga	57
Figura 8 – Região de transição na junção P-N	58
Figura 9 – Comportamento do campo elétrico na junção P-N	58
Figura 10 – Esquema experimental para observar o efeito fotoelétrico	60
Figura 11 – Gráfico de corrente elétrica <i>versus</i> potencial elétrico	61
Figura 12 – Estrutura e composição de uma célula fotovoltaica	65
Figura 13 – Célula solar - visão externa	66
Figura 14 – Representação do efeito fotovoltaico em uma célula solar	66
Figura 15 – Distribuição espectral da radiação solar	68
Figura 16 – Representação do módulo fotovoltaico	70
Figura 17 – Associação de células fotovoltaicas	71
Figura 18 – Exemplo de células solares de silício	71
Figura 19 – Exemplo de célula fotovoltaica a base de filmes finos	73
Figura 20 – Potência mundial fotovoltaica gerada na ano de 2018	75
Figura 21 – Matriz energética brasileira (2021)	75
Figura 22 – Circuito LED + LDR	86
Figura 23 – Questão 05 do questionário 1 - gráfico de pizza	93
Figura 24 – Questão 06 do questionário 1 - Gráfico de pizza	94
Figura 25 – Mapa mental cujo conceito central é “efeito fotoelétrico”	96
Figura 26 – Questão 03 do questionário 2 - Gráfico de pizza	100
Figura 27 – Questão 04 do questionário 2 - Gráfico de pizza	101
Figura 28 – Questão 05 do questionário 2 - Gráfico de pizza	102
Figura 29 – Questão 07 do questionário 2 - Gráfico de pizza	103
Figura 30 – Mapa mental cujo conceito central é “Materiais semicondutores”	105

Lista de abreviaturas e siglas

FMC - Física Moderna e Contemporânea.

UEPS - Unidade de Ensino Potencialmente Significativa.

TAS - Teoria da Aprendizagem Significativa.

3MP - Três momentos pedagógicos.

PCN - Parâmetros curriculares nacionais.

PCNEM - Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio.

PCN+ - Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais.

CTS - Ciência, Tecnologia e Sociedade.

CTSA - Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente.

Cl - Cloro.

Na - Sódio.

H₂O - Água.

BV - Banda de valência.

BC - Banda de Condução.

Gap - Banda proibida de energia.

Cu - Cobre.

Ag - Prata.

Au - Ouro.

m-Si - Silício monocristalino.

p-Si - Silício policristalino.

PERC - Emissor passivo a célula traseira.

a-Si - Silício amorfo.

CIS - Disseleneto de índio e cobre.

CIGS - Disseleneto de cobre, índio e gálio.

CdTe - Telureto de cádmio.

USP - Universidade de São Paulo.

INT - Instituto Nacional de Tecnologia.

IME - Instituto Militar de Engenharia.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
2	FUNDAMENTOS TEÓRICO- METODOLÓGICOS	21
2.1	A pedagogia de Paulo Freire	21
2.2	A teoria da aprendizagem significativa	25
2.3	Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS's)	30
2.4	Os três momentos pedagógicos	31
2.4.1	Problematização inicial	32
2.4.2	Organização do conhecimento	33
2.4.3	Aplicação do conhecimento	33
2.5	O enfoque CTS e o ensino de Física Moderna e Contemporânea	34
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	41
3.1	O surgimento da Física do Estado Sólido	41
3.2	As Ligações atômicas e a estrutura cristalina dos sólidos	43
3.2.1	Ligação iônica	44
3.2.2	Ligação covalente	45
3.2.3	Ligação metálica	45
3.2.4	Pontes de hidrogênio	46
3.3	Os primeiros modelos atômicos e a instabilidade do elétron	46
3.4	O átomo de Bohr	48
3.5	A condutividade dos materiais	51
3.5.1	Condutores	51
3.5.2	Isolantes	52
3.5.3	Semicondutores	52
3.6	Propriedades dos semicondutores	53
3.6.1	Semicondutores intrínsecos e extrínsecos	53
3.6.2	Elétrons e buracos	54
3.6.3	As junções P-N	55
3.7	O efeito fotoelétrico	59
3.8	As células e painéis solares	63
3.8.1	O efeito fotovoltaico	63
3.8.2	Características elétricas das células solares	67
3.9	Principais tipos de células solares	71
3.9.1	Breve histórico da energia solar no Brasil e no mundo	73

4	A ELABORAÇÃO E APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL .	77
4.1	Descrição do produto educacional	77
4.1.1	UEPS nº 1	78
4.1.2	UEPS nº 2	79
4.2	A aplicação do produto educacional	80
4.2.1	Aula 1 - A concepção clássica do efeito fotoelétrico	84
4.2.2	Aula 2 - A concepção quântica do efeito fotoelétrico	85
4.2.3	Aula 3 - Introdução a física do estado sólido	86
4.2.4	Aula 4 - Os materiais semicondutores	87
4.2.5	Aula 5 - A tecnologia fotovoltaica	88
4.3	Resultados esperados	89
4.4	Resultados da UEPS nº 1	90
4.4.1	Questionário 1	90
4.4.2	Mapa mental 1	95
4.5	Resultados da UEPS nº 2	97
4.5.1	Questionário 2	97
4.5.2	Mapa mental 2	104
4.6	Considerações finais	106
	REFERÊNCIAS	107
	APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL	111
	APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO 1	205
	APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO 2	211

1 Introdução

É praticamente consensual que o ensino de física como é executado atualmente em nossas escolas pode ser considerado ineficiente, ou ainda em termos brandos, pouco proveitoso (YAMAZAKI; ANGOTTI; DELIZOICOV, 2017), (MOREIRA, 2021). Muitas vezes, e de forma errônea, a práxis pedagógica tradicional é posta como vilã e responsável pelo fracasso do processo de ensino aprendizagem. Para os pesquisadores em ensino, o problema está longe de ser identificado de forma tão simplória ou de ser causado por um único fator em específico. Por isso, muito tem se discutido em como alcançar o aluno, como exprimir uma metodologia e abordagem realmente significativa ao discente, que favoreça processo de ensino aprendizagem eficiente.

Daí, surgem as ditas teorias não tradicionais, pautadas em ousar diferentes técnicas, materiais e metodologias que forneçam meios para uma melhor aprendizagem dos educandos. Em um contexto conhecido como escola nova, essas metodologias não tradicionais quase sempre são consideradas ativas, permeadas justamente pela participação expressiva e efetiva do aluno no seu processo de aprendizagem (todos os termos específicos aqui expostos serão discutidos em detalhes mais adiante, no capítulo 1) (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2002).

Ainda assim, muito se engana quem imagina que apenas o viés clássico do ensino de física que se conserva há pelo menos três décadas no Brasil é o único que sofre críticas. Desde a simplificação excessiva de conceitos científicos (principalmente quando lidamos com a Física Moderna e Contemporânea - FMC) e a preocupação exacerbada com a interdisciplinaridade em detrimento do conteúdo e conceitos propriamente ditos (esses são apenas alguns exemplos), são deficiências apontados também como um dos grandes problemas dessa revolução que os processos de ensino vem sofrendo, já que acabam por perder o foco e esquecem o que deveria ser essencial, o entendimento da Física como cultura científica, o entendimento da ciência como fator agregador em nossa vida e na sociedade em que convivemos.

Por isso, cada vez mais teorias e metodologias de ensino oriundas da vertente desenvolvida por Paulo Freire (1921 - 1997) vem ganhando mais espaço, seja nas pesquisas científicas, sejam em suas aplicações em sala de aula. E é a comunicação entre esses dois polos, a pesquisa e sua utilização na escola, o objetivo máximo da produção bibliográfica na área. Partindo dessa premissa, a de tratar o aluno um indivíduo crítico, ciente de sua capacidade e possíveis limitações, de fazê-lo se interessar pelo processo de ensino aprendizagem ao qual ele é a peça chave, de apresentar conteúdos com significado real para o seu contexto, que cada vez mais é impulsionada no decorrer das

décadas a produção e divulgação de materiais que auxiliem o professor nessa tarefa.

Nesse contexto, surgem as Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS's), unidades didáticas pautadas na teoria da aprendizagem significativa (TAS) de David Ausubel (1918 - 2008) (AUSUBEL, 1963). Elas foram desenvolvidas por Marco Antonio Moreira na esfera da aprendizagem significativa crítica. Desse modo, elas são sequências didáticas que se estruturam compondo metodologias e materiais diversos, podendo assumir diversas formas.

É desse meio também que metodologias como as dos três momentos pedagógicos (3MP), idealizados por Delizoicov, Angotti e Penambuco surgem. Uma metodologia interativa que tem como origem nos temas geradores propostos por Freire, em Pedagogia do oprimido principalmente (FREIRE, 1994). Os momentos pedagógicos, assim sendo, são sistematizações da metodologia freiriana levando um conhecimento com significado ao aluno por meio de uma metodologia organizada e estruturada em situações que se completam e constroem gradualmente. (ANGOTTI, 2015).

Dito isso, cabe agora definir os aspectos sequenciais aos quais esse trabalho se dará. Ele propõe a elaboração de unidades de ensino potencialmente significativas sobre temáticas próprias da Física do Estado Sólido e da Física da Matéria Condensada, que são os materiais semicondutores e uma de suas principais aplicações, as células e painéis solares, para que sirvam de guia e auxiliem o professor em sua prática pedagógica. As UEPS's que são a base de aplicação da pesquisa tem como metodologia principal os 3MP utilizados nas duas UEPS's que foram desenvolvidas. Cada UEPS tem suas peculiaridades, utilizando materiais e organizações próprias, apresentando conceitos a priori isolados, mas que se completam e se complementam no final da aplicação, finalizando o ensino e aprendizagem dos conceitos que se almeja ensinar.

A organização do texto a partir daqui se dará da seguinte forma: No capítulo 1 abordaremos toda a gama de teorias e metodologias de ensino envolvidas na elaboração e aplicação da pesquisa, sendo seguida no capítulo 2 pela fundamentação teórica abordando os conteúdos de Física que serão trabalhados nas duas UEPS's. Por fim, no capítulo 3 iremos tratar dos detalhes da aplicação da pesquisa bem como os seus resultados e discussão. As considerações finais comporão o capítulo 4 e o produto educacional está disponível no Apêndice A.

2 Fundamentos teórico- Metodológicos

2.1 A pedagogia de Paulo Freire

Talvez, uma das maiores transformações promovidas no ramo do ensino no contexto brasileiro tenha ocorrido na segunda metade do século XX, possuindo como maior catalisador e expoente o educador e filósofo brasileiro Paulo Freire e sua pedagogia inovadora. A teoria freiriana foi amplamente difundida na época de seu surgimento, o que resultaria em uma extensa obra reconhecida internacionalmente inclusive, sendo o autor considerado um dos maiores pensadores da pedagogia a nível mundial.

Se pudéssemos resumir toda a fundamentalidade de sua teoria educacional em uma única palavra, a escolha certa seria libertadora. Ela possui um viés progressista, preocupada em extinguir autoritarismos, embasada na ética e respeito a dignidade do indivíduo, promovendo-o como responsável pelo seu próprio processo de libertação da condição de oprimido, condição essa imposta a esses desfavorecidos e renegados pelos opressores, em uma dinâmica tirana repleta de dicotomias (FREIRE, 1994).

Sua teoria é, portanto, centrada em dois pilares principais: A autonomia e a liberdade. Só em posse da autonomia de seu processo de aprendizagem, o indivíduos “esfarrapados do mundo” (nas palavras do próprio Freire) conseguiriam se libertar das mazelas que os afligem, acabando de vez com a mistificação da impotência em relação aos ditos opressores. Segundo o autor, uma vez que estivessem libertos, os oprimidos libertariam também seu opressor, destruindo a estrutura que os confinava estagnados em seus papéis (FREIRE, 1994).

Nas palavras do próprio Freire, o objetivo e a práxis da pedagogia do oprimido consiste em:

“A pedagogia do oprimido, como pedagogia humanista e libertadora, terá, dois momentos distintos. O primeiro, em que os oprimidos vão desvelando o mundo da opressão e vá comprometendo-se na práxis, com a sua transformação; o segundo, em que, transformada a realidade opressora, esta pedagogia deixa de ser do oprimido e passa a ser a pedagogia dos homens em processo de permanente libertação” (FREIRE, 1994).

Embora extremamente condizente com a realidade da época (e atualmente percebe-se semelhança ao contexto poçítico-social daquela época), a pedagogia freiriana sofreu forte resistência devido ao contexto político da época ao qual estava inserida, onde havia rejeição a qualquer ideologia ou corrente de pensamento que se assemelhasse de alguma forma as ideias e preceitos comunistas (embora Freire

nunca tenha se denominado de tal forma, em sua obra ele usa o termo humanista para definir sua pedagogia). Freire ciente disso e de que sua obra colocava em xeque ideais exacerbadamente nacionalistas e autoritários, fazia questão de abordar explicitamente os contextos sócio-políticos e contrapor esses com críticas pontuais. Segundo ele, a humanização como condição de libertação do ser humano é dele um direito, que só poderia ser alcançado através da educação em cooperação: “Ninguém liberta ninguém, ninguém se liberta sozinho: Os homens se libertam em comunhão” (FREIRE, 1994).

Embora Freire fosse um grande entusiasta das discussões e reflexões sociais e sua relação com a educação, o mesmo direcionava sua atenção também a certas práticas usadas no ensino, tecendo críticas pontuais as mesmas.

Em *Pedagogia do Oprimido*, nos é apresentado a metáfora mais famosa dessa obra. Nela, o autor estabelece uma reflexão sobre a prática pedagógica dos educadores, reduzindo essa a meras “narrações” de conteúdos, sem qualquer significado real a seus alunos, como uma máquina que executa sua função puramente mecânica. Daí o termo educação “bancária”, pois tudo ocorre como um depósito de valores em um banco, o professor deposita a informação em seus alunos que as aceitam sem qualquer criticidade e reflexão. O ensino mecânico implica em uma aprendizagem mecânica. O educador encara seus alunos como recipientes, e sua narração como o conteúdo que os irá preencher, quanto mais conteúdo conseguir depositar nesses, melhor profissional será.

Freire é ferrenho nesse ponto, pois ainda, segundo ele, esse tipo de prática nada agrega para o processo de libertação educacional. Aliás, é muito pelo contrário. Toda essa visão distorcida da educação só contribui para a alienação e conservação da dicotomia oprimido - opressor citada anteriormente. O educador ao se colocar acima de seus alunos como o detentor absoluto do conhecimento e único responsável pelo processo de aprendizagem, acaba por podar toda a inventividade e senso crítico de seus alunos, tornando-os peças, assim como ele provavelmente, igualmente mecânica sem relevância em si, apenas dispostas a serem organizadas nesse tabuleiro pelo educador. A concepção bancária estimula, portanto, a não transformação e não criticidade:

“Na medida em que esta visão “bancária” anula o poder criador dos educandos ou o minimiza, estimulando sua ingenuidade e não sua criticidade, satisfaz aos interesses dos opressores: para estes, o fundamental não é o desnudamento do mundo, a sua transformação” (FREIRE, 1994).

Em outra de suas obras, a *Pedagogia da Autonomia*, Freire disserta sobre os requisitos necessários ao ensinar no sentido mais puro da palavra. Em um série de ensaios, o autor discute inúmeras posturas e características que o educador deve adotar em sua prática pedagógica, e aqui podemos trazer a mais imediata ao tocarmos

nesse assunto: “Ensinar exige reflexão crítica sobre a prática”. Outros dois pontos que se encaixam no aforismo acima apresentado é o de que ensinar também exige respeito a autonomia dos educandos, respeito a ética e rejeição a preconceitos sobre eles. Superar a ideia imutável de hierarquia em sala de aula, e estar disposto, se entregar verdadeiramente ao processo. O ensino bancário confronta totalmente esses ideais, ele os anula (FREIRE, 2002).

Dessa forma, para antagonizar a tão deturpada educação bancária, surge como solução direta a educação problematizadora. Enquanto a concepção bancária serve aos opressores, a concepção problematizadora tem como escopo a libertação dos oprimidos, segundo o autor. A primeira encerra a dialogicidade e mantém a relação mecânica entre educador e educando, ao passo que a segunda explora justamente o diálogo, a conexão e situação de igualdade entre aluno professor no processo de ensino aprendizagem, promovendo a superação do *status quo* e a educação crítica do educando (FREIRE, 1994; FREIRE, 2002). Nas palavras de Freire, enquanto a educação bancária anestesia o poder criador dos alunos, a educação problematizadora implica no constante processo de desvelamento da realidade.

Seguindo nessa linha de raciocínio, ainda na obra *Pedagogia da Autonomia*, Freire determina que não há docência sem discência, ambas são igualmente necessárias e dependentes na construção do conhecimento, não a toa o nome desse processo é de ensino aprendizagem, o que está em perfeita concordância com a concepção da educação problematizadora. Mais precisamente, ensinar não é de forma alguma transferir conhecimento, mas criar junto ao educando, condições para que esse conhecimento seja construído. Esse é a essência da expressão ensino aprendizagem. Desse modo, percebemos que, a partir do momento em que o docente, ciente e reflexivo sobre sua prática pedagógica entende suas responsabilidades e considerações acerca do discente, a educação assume seu papel libertador (FREIRE, 2002).

Nesse mesmo livro, Freire prossegue com sua narrativa sobre as exigências e condições para que o processo de ensino aprendizagem libertador ocorra, elencando uma série de fatores que devem ser levados em consideração. Um que está diretamente ligado a sua obra e permeia seu discurso é o de que “ensinar exige respeito aos saberes dos educandos”. Esse pensamento exprime a característica fundamental, segundo o autor, para que o conhecimento seja construído de forma eficaz: Os conhecimentos prévios, desde a bagagem cultural às experiências cotidianas dos alunos, tudo isso é um fator extremamente impactante na assimilação dos novos conhecimentos. O contexto em que se insere o conteúdo e a forma como ele é trabalhado faz toda a diferença no processo de ensino aprendizagem.

Abordando mais profundamente as ideias acima expostas, a realidade na qual o aluno se insere e está habituado deve ser levada em consideração no planejamento e

na prática pedagógica do professor. É nesse contexto que surge o conceito de tema gerador, que denota a ideia, concepção, situação que serve como guia ao educador, interligando e agregando todos os conceitos que se deseja ensinar (FREIRE, 2002).

O tema gerador deve também estar estritamente ligado a realidade do aluno, ele norteará e dará sentido a toda a dialogicidade envolvida. Ao fazer isso o professor dá significado a aprendizagem de seus alunos, ao passo que os novos conhecimentos irão de encontro aos conhecimentos prévios e experiências dos mesmos. Dependendo da dinâmica adotada e de como os alunos interagem com a precisão do tema gerador envolvido, novos temas secundários podem surgir e enriquecer ainda mais o processo.

Um exemplo claro de como isso pode ser utilizado em prol da práxis pedagógica do professor é o que será apresentado mais adiante na discussão desse trabalho. Suponha que se almeje ensinar o conceito de efeito fotoelétrico e efeito fotovoltaico (claramente o nosso caso, fenômenos que serão estudados e devidamente diferenciados um do outro posteriormente). Suponha ainda que o local de ensino está situado na região Norte ou Nordeste. Um bom tema gerador pode ser as aplicações práticas desses conceitos, ou seja, a geração de energia usando os fenômenos fotoelétricos e fotovoltaicos: As células e painéis solares por assim dizer (FERREIRA et al., 2019), (FREIRE, 2002).

Provavelmente um aluno situado nessa região já deve ter ouvido falar ou mesmo observado esses dispositivos sobre residências, estabelecimentos comerciais etc. O tema gerador “células e painéis solares” teria muito a agregar pois e encaixa perfeitamente as condições climáticas e necessidades energéticas do lugar onde os alunos moram. Esse *link* é o fator determinante na aquisição de novos significados.

Analogamente, temas geradores que não conseguem interagir com a realidade e contexto dos educandos pouco tem a acrescentar no processo de ensino aprendizagem. Não faz sentido falar nas quatro estações do ano para alunos que vivem em um país tropical marcado pela alternância clara entre apenas duas estações principais: inverno e verão. Da mesma forma, abordar o tema gerador “avalanches” e o perigo que podem oferecer para discutir conteúdos relacionados a diferentes condições climáticas com alunos que nunca sequer presenciaram a neve em si, praticamente nada tem a agregar (FERREIRA et al., 2019), .

Em pedagogia do oprimido, Freire estabelece que a dinâmica em sala de aula deve ser regida pela três seguintes etapas: codificação, problematização e descodificação. Esses três alicerces do ato educativo pretendem, em sala de aula, exprimir as características dialógicas e problematizadoras que devem inseri-lo. A concepção de Delizoicov, Angotti e Pernambuco (1990, 2002) acerca da metodologia freiriana é organizada de forma semelhante. Para esses autores, a prática pedagógica deve ser executada seguindo as etapas:

1. Problematização inicial,
2. Organização do conhecimento,
3. Aplicação do conhecimento.

Esses três momentos pedagógicos que serão abordados com mais detalhes são a sistematização da metodologia freiriana, destinando cada um desses momentos a promover problematização, dialogicidade e o ensino com significado para o aluno. Antes de avançarmos para esses tópicos, vamos nos ater agora a teoria da aprendizagem significativa, que guia e embasa toda a proposta pedagógica desse trabalho. No decorrer dessa atividade, não será raro encontrarmos pontos de tangência entre essa e a pedagogia freiriana.

2.2 A teoria da aprendizagem significativa

O ponto de partida que devemos adotar ao iniciarmos nossa discussão sobre a teoria ausubeliana, sem dúvida nenhuma é a que o próprio David Ausubel considera a mais importante e sintetizante de toda sua obra voltada ao ensino e a aprendizagem: Os conhecimentos prévios do aprendiz. Segundo ele, o fator que mais influencia na aprendizagem é aquilo que o próprio aprendiz já sabe, portanto, o professor deve dispor e criar meios para averiguar tais conhecimentos e trabalhar os novos que pretende ensinar ao redor desses conhecimentos prévios. Tanto o processo de averiguação quanto o aproveitamento desses conhecimentos prévios não são de forma alguma tarefa simples, e iremos entender o porquê disso em partes, a partir de agora (MOREIRA; OSTERMANN, 2005).

De início, é importante elucidar o “habitat” daquilo que o aprendiz já sabe, ou seja, a “estrutura” que comporta todas as informações adquiridas pelo indivíduo. Ausubel a chama de estrutura cognitiva, e deve ser encarada como uma rede organizada de ideias, conceitos, sequências sobre determinado assunto e que evidentemente podem ser acessados pelo indivíduo que aprende. Ausubel concebe a estrutura cognitiva como extremamente organizada. Cabe destacar que aqui chamamos de conhecimento o que pode ser entendido como uma informação no sentido mais geral da palavra, justamente para enfatizar que aquilo que o aprendiz já sabe, seus conhecimentos prévios, podem assumir praticamente qualquer forma, seja um conceito, modelo, imagem, forma, enfim, qualquer produto mental (MOREIRA; OSTERMANN, 2005).

Quando Ausubel fala em uma aprendizagem efetiva, ele certamente está se referindo a aprendizagem significativa, que como o nome sugere, é aquela com significado para o indivíduo que aprende. A aprendizagem significativa ocorre sob o domínio de características, com respeito aos conceitos já existentes na estrutura cognitiva do

aprendiz, os chamados subsunçores, também nomeados por Moreira de ideias âncora. De forma objetiva, os subsunçores seriam os conhecimentos prévios que o aprendiz possui e que são de alguma forma relevantes para a aprendizagem significativa de determinado assunto, conteúdo ou tema. Novamente, entenda conhecimento como qualquer construto mental capaz de auxiliar ou se relacionar a aprendizagem.

Esses duas características supracitadas anteriormente são não-literalidade e não-arbitrariedade. Ou seja, os novos conhecimentos interagem com os conhecimentos prévios do aprendiz de forma não literal e não arbitrária. Isso significa que, respectivamente, essa interação não ocorre de uma mesma forma e com um mesmo conceito prévio para todos os indivíduos (não-literal) e que também não é com qualquer conhecimento prévio que a nova informação interage, mas sim com aqueles relevantes a aprendizagem (não-arbitrária) (MOREIRA; OSTERMANN, 2005); (MOREIRA, 2009).

De forma objetiva, a aprendizagem significativa ocorrerá quando esses novos conhecimentos interajam com os subsunçores do aprendiz, ou seja, esses conceitos prévios do indivíduo. Além de servirem de “ancoradouro” para os novos conhecimentos, os saberes prévios podem ainda, adicionar aos novos conhecimentos, significados completamente diferentes dos que se tinha, desenvolvendo-os por meio dessa interação, que nesse caso será não arbitrária e não literal.

O análogo oposto a aprendizagem significativa seria a aprendizagem mecânica. Ela é assim nomeada pois é regida por um processo quase que automático, onde os novos conceitos não interagem com os conhecimentos prévios específicos (que o indivíduo pode ou não ter), o que resulta em uma aprendizagem de curto prazo, volátil e sem significado. É a aprendizagem envolvida nas tão praticadas memorização de equações, leis ou conceitos, por exemplo, para uma avaliação que se aproxima.

Porém, é importante ressaltar que a aprendizagem mecânica não deve ser vista inteiramente como vilã ¹ ou um polo negativo de um sistema bipolarizado carregado de uma rígida dicotomia. Novak ² compreende que a aprendizagem mecânica pode ser preferível, em fases iniciais de ensino, pelo fato que pode auxiliar na criação de subsunçores quando o educandos não os possui, por exemplo. Uma solução alternativa para esse caso de ausência de subsunçores é tratada na obra de Ausubel, e é nesse contexto que surge a ideia dos organizadores prévios, consistindo em materiais introdutórios com níveis de abstração e generalidade mais elevados a fim de fornecer subsídios a aprendizagem dos conteúdos mais específicos que se deseja ensinar (MOREIRA; OSTERMANN, 2005).

¹ Pelo que foi discutido até aqui, já deve ter ficado evidente que para Ausubel a aprendizagem significativa é preferível, mas não em total detrimento a aprendizagem mecânica, por motivos que consequente vislumbraremos.

² Joseph Donald Novak (1932 -), educador americano, contemporâneo dos demais autores citados e conhecido pela teoria dos mapas conceituais.

Antes de prosseguirmos, é importante também destacar que o tipo de ensino envolvido (uma metodologia específica) não necessariamente implica em um aprendizado significativo ou mecânico. Não há uma relação clara ou determinada entre uma e outra. É o caso das tão populares aprendizagem por recepção e por descoberta, tão abordadas atualmente. No primeiro caso temos um grande exemplo da metodologia tradicional ainda tão presente nas salas de aula, onde o produto final é oferecido aos alunos em sua forma final, completamente esmiuçada por assim dizer. Na aprendizagem por descoberta o aluno assume uma posição mais ativa e será o responsável por explorar e descobrir o produto final de sua aprendizagem. Dito isso, uma metodologia não exclui a outra e em certos casos pode ser preferível uma ou outra, certamente (MOREIRA; OSTERMANN, 2005; MOREIRA, 2009).

Atrelado a esse esclarecimento, surge a reflexão que Moreira deseja levantar, a de que podemos ter uma aprendizagem por recepção mas que seja significativa como podemos ter uma aprendizagem por descoberta que se enquadre como mecânica e vice versa. Ambas não estão fadadas a uma ou outra aprendizagem, tudo dependerá de como o processo de ensino aprendizagem ocorrerá.

Retornando a aprendizagem significativa, Ausubel, assim como Moreira reconhecem que existem no mínimo duas condições fundamentais para a ocorrência da aprendizagem significativa: Uma se encontra no material envolvido e a outra, como não poderia deixar de ser, está no indivíduo que aprende. Um material previamente organizado, que interaja de forma não arbitrária e não literal com conhecimentos prévios específicos da estrutura cognitiva do aprendiz é chamado de potencialmente significativo (MOREIRA; OSTERMANN, 2005; MOREIRA, 2009; MOREIRA, 2012).

A palavra *potencialmente* indica justamente a relação com a segunda condição apontada anteriormente, já que o único que pode atribuir significado ao material é o próprio aprendiz. Assim sendo, a segunda condição é exclusivamente referente ao aprendiz. Ele só aprende se estiver disposto, precisa querer aprender, caso contrário de nada adiantará a potencialidade do material. Como afirma Moreira “o significado está nas pessoas e não nas coisas” (MOREIRA, 2012).

No âmbito da aprendizagem significativa, temos basicamente duas formas de assimilação dos novos conhecimentos por parte da estrutura cognitiva do indivíduo. São elas a aprendizagem subordinada e a aprendizagem superordenada. No primeiro caso, os conhecimentos mais específicos envolvendo um grande tema são ancorados em conceitos mais gerais já existentes na estrutura cognitiva do aprendiz. Ele possui, portanto, os subsunçores mais gerais. No segundo caso temos exatamente o contrário, os conceitos mais amplos são assimilados ao se associarem a conhecimentos mais específicos presentes na estrutura cognitiva do aprendiz (MOREIRA, 2009). Como representado por Moreira, podemos representar os dois casos seguindo o esquema

mostrado na figura (1). O processo de assimilação mencionado anteriormente seria

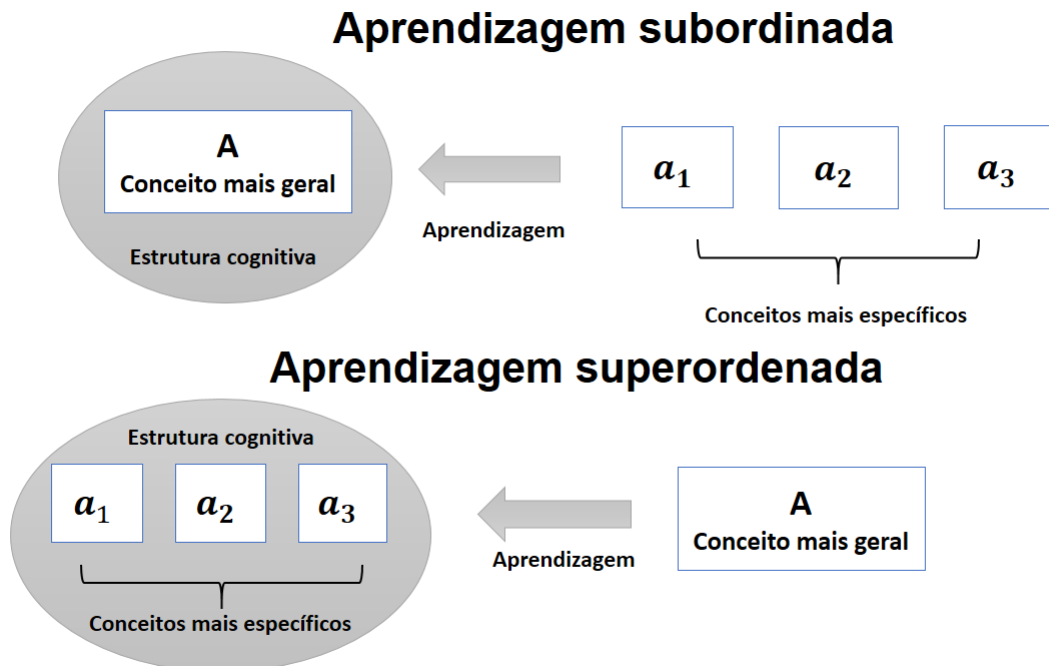


Figura 1 – Esquema que exemplifica o processo de aprendizagens subordinada e superordenada. Aqui, A representa o conceito mais geral e suas versões minúsculas a_1 , a_2 e a_3 , conhecimentos mais específicos que são relevantes para a aprendizagem, ou seja, relacionáveis com A . No primeiro caso a estrutura cognitiva dispõe de conceitos mais específicos e o mais geral é por eles assimilado. No segundo, os conceitos mais específicos são apreendidos por um conhecimento mais geral A na estrutura cognitiva do aprendiz.

Fonte: Elaborada pelo autor. (Inspirada nas discussões levantadas em (MOREIRA; OSTERMANN, 2005)).

então a interação entre os antigos e novos conhecimentos, sendo que ambos podem se modificar entre si e dar origem a novos conceitos e significados, ou seja, é uma relação bidirecional entre os novos conhecimentos e os conhecimentos prévios oriundos da estrutura cognitiva do aprendiz. Para exemplificar o exposto podemos citar um exemplo fornecido por Moreira e Ostermann (MOREIRA, 2009), em relação ao conceito de força. Inicialmente, suponha que o professor deseje ensinar o conceito de força nuclear. É quase certo que o aluno que presencia tal aula já deva ter uma ideia prévia ou conceitual do que é uma força, ainda que no sentido mais geral da palavra. Temos aqui a aprendizagem subordinada, já que conceitos mais específicos estão sendo agregados via conceitos mais abrangentes.

O que destoará nesse processo será o fato de que a força nuclear é uma força que se manifesta em magnitude relevante somente em pequenas escalas, diferente-

mente da gravidade com a qual o aluno está habituado, já que essa se evidencia de forma perceptível para massas exorbitantes (como o planeta terra o atraindo gravitacionalmente). Teremos assim um conflito conceitual, duas forças que se manifestam em escalas completamente diferentes.

Dessa forma tanto o conceito mais geral de força (possível subsunçor) será modificado quanto o conceito de força nuclear será assimilado e ganhará significado. Isso pode ser expresso pela seguinte equação:

$$A'a' \leftrightarrow A + a \quad (2.1)$$

A equação (2.1) acima representa a assimilação dos novos e antigos conhecimentos, onde A é o conceito subsunçor e a o novo conhecimento a ser assimilado. A condição bidirecional é expressa pela dupla seta, onde o resultado da assimilação pode ocorrer somando, integrando ou conciliando conhecimentos (representada pela seta que aponta para a esquerda) ou diferenciando-os gradualmente (seta que aponta para direita) após esse mesmo processo de assimilação (MOREIRA; OSTERMANN, 2005).

Como deve ter sido notável, tanto o produto final do processo de assimilação $A'a'$ como os conhecimentos antes isolados A e a estão sujeitos a modificações em seus significados, já que todo o exposto é um processo contínuo, que pode ocorrer sucessivas vezes mesmo após o processo de aprendizagem significativa, já que estamos expostos a experiências e conhecimentos o tempo todo.

A aprendizagem subordinada geralmente está relacionada ao conceito definido por Ausubel como diferenciação progressiva, citado sem grandes pormenores anteriormente. Nela, por exemplo, o subsunçor A , um conceito mais abrangente e geralmente rudimentar pode se diferenciar progressivamente e assumir novos significados a medida que a assimilação de novos conhecimentos vai ocorrendo, ele se modifica e acaba por alterar também os novos conhecimentos adquiridos. Esse processo não possui um limite específico e no decorrer da aprendizagem pode ocorrer sucessivas vezes (MOREIRA; OSTERMANN, 2005).

Na aprendizagem superordenada acontece geralmente o curso inverso, nela os conceitos mais específicos que acabam agregando os subsunçores mais abrangentes. Com a assimilação dos novos conhecimentos, acaba que os subsunçores já existentes podem se combinar aos recém adquiridos e resultar em novos conceitos. Essa é a reconciliação integrativa definida por Ausubel. Podem ainda se recombinar e continuarem se modificando em um processo quase que intermitente.

Por fim, encerramos as discussões envolvendo a TAS e suas peculiaridades. Na próxima seção discutiremos uma de suas principais aplicações práticas, as UEPS's.

Elas serão de vital importância para a proposta desse trabalho e seus aspectos sequencias, por esse motivo, precisam ser discutidos.

2.3 Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS's)

As Unidades de Ensino Potencialmente Significativas propostas por Moreira no âmbito da aprendizagem significativa tem por objetivo destituir o ensino de física da forma como é executado atualmente, dos paradigmas majoritariamente mecânicos (referentes a aprendizagem mecânica) e ainda que a passos curtos, modificar precisamente essa situação do Ensino de Física atual.

No domínio nacional, se pensarmos na pesquisa em ensino de Física como um meio e o produto de tais investigações aplicados em sala de aula com o fim, fica claro que algo nesse processo não está sendo executado como deveria. Embora muito se discuta sobre a temática de melhoria no Ensino de Física e pesquisas se desenvolvam nessa esfera, uma pequena porcentagem de toda essa gama chega ao professor da educação básica. E ainda quando este tem ciência da existência de tais materiais, há pouco incentivo para a inserção desses tópicos em salas de aula, onde o incentivo se voltam a executar sempre os mesmos processos básicos, sem nenhuma inovação. São muitos os problemas e as nuances realionadas a esse tema e refletir sobre eles a fim de obter soluções imediatas se torna cada vez mais uma tarefa desafiadora (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2002; MOREIRA, 2021; BRASIL; EDUCAÇÃO, 2002).

De acordo com Moreira (MOREIRA, 2021), estamos na era onde as escolas se assemelham muito a “centros de treinamento”. Neles, prioriza-se o ensino mecânico, engessado e linear, onde avaliações escritas cobram dos alunos respostas corretas e dos professores inércia pedagógicas e práticas estagnadas, focadas em despejar o conteúdo pronto nos educandos vistos nesse dinâmica como meros recipientes.

A dúvida entre fazer o aceitável ou colher frutos mais proveitosos não o convence e o medo de críticas e da falha acaba se sobressaindo. É evidente que a culpa desse cenário não é exclusivamente do professor, existe uma série de fatores que “justificariam” as ações dos educadores nessas situações e cita-los aqui exigiria páginas em abundância para a discussão (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2002). Nosso objetivo aqui é registrar os problemas e desafios encontrados no ensino de física e apresentar as UEPS's nesse contexto. Por isso não nos ateremos a tal pauta .

De todo o exposto acima, decorre que o panorama estigmatizado do ensino mecânico como sendo “o método” mais prático e facilmente trabalhado em sala de aula predomina, ocasionando em um processo de nulidade e sem mudanças satisfatórias no campo do ensino de física.

Dado o contexto de atuação das UEPS's, podemos agora retornar nossa discussão sobre as mesmas. Ainda, segundo Moreira, o ponto mais assertivo e que confere as UEPS's seu valor educacional reside no fato de que elas são previamente elaboradas e estruturadas, com uma base teórica bastante clara. Sintetizando em poucas palavras os principais preceitos teóricos das UEPS's, podemos argumentar que só há ensino quando existe aprendizagem e essa deve ser preferencialmente significativa, pelos motivos abordados na seção anterior. Para atingir esse objetivo, o material de ensino deve ser potencialmente significativo (MOREIRA, 2012).

De forma resumida, os aspectos sequenciais propostos por Moreira que guiam a elaboração das UEPS's são:

- Definir com precisão o tema ou conteúdo que se pretende ensinar. Procurar entender todos os pormenores que envolvem a temática principal e quais os melhores métodos e metodologias que poderiam se encaixar na proposta almejada;
- Conceber situações que expressem dos educandos seus conhecimentos prévios acerca do conteúdo estabelecido no item anterior;
- Em consonância com o item anterior, explorar organizadores prévios atrativos aos alunos e que se adequem a sua realidade, sejam eles, filmes, vídeos, livros, notícias, simulações computacionais, experimentos etc. Eles devem vir inicialmente em um nível mais contemplativo, de forma mais acessível e com o intuito de fazer os alunos se questionarem ou refletirem sobre o que está sendo tratado;
- Levar em conta, durante o desenvolvimento da UEPS, a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa. Deve-se adotar uma perspectiva linear, partindo dos aspectos mais simples e gerais do conhecimento envolvido e gradativamente especificar os mesmos, retornando a pontos-chaves quando necessário,
- Ao avaliar o desfecho da UEPS, implementar ambas as formas de avaliação (somativa e formativa). Buscar minuciosamente qualquer traço ou evidência de aprendizagem significativa.

Agora que vislumbramos a estrutura das sequências didáticas que serão trabalhadas, precisamos abordar a metodologia que permeará e guiará as discussões presentes nela, os três momentos pedagógicos.

2.4 Os três momentos pedagógicos

De forma geral, os momentos pedagógicos foram idealizados e sistematizados por Delizoicov, Angotti e Pernambuco (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO,

2002) com base no método freiriano de ensino. Eles consistem em três momentos especificamente delineados de forma a conjuntamente, guiar o processo de ensino e aprendizagem. São eles, respectivamente: Problematização inicial, Organização do conhecimento e Aplicação do Conhecimento. Conheçamos então as especificidades de cada um.

2.4.1 Problematização inicial

Consiste no primeiro contato do aluno, em relação ao que se pretende ensinar. Muito mais complexo e fundamental do que um mero fator introdutório, a problematização inicial deve além de fornecer a contextualização do conteúdo, se relacionar com a realidade do seu aluno, com o que ele conhece, presencia e pode reconhecer. Esse tipo de problematização é a mais efetiva pois possibilita a exploração da bagagem empírica de cada aluno frente ao processo de ensino aprendizagem (DELIZOICOV; ANGOTTI, 1990).

Segundo Vergnaud ³ *apud* Moreira (MOREIRA, 2012), “são as situações-problema que dão sentido a novos conhecimentos”. As situações problemas norteiam o que será trabalhado ao mesmo tempo que instiga os educandos a se questionarem, se desafiarem a entender o conteúdo abordado. São questões como “Por que isso ocorre?”, “Qual será a explicação científica para isso?”, “Eu já vi/ouvi isso em algum lugar?” que farão com que se interessem pelo que está sendo apresentado, ao passo que se não dispuser dos conhecimentos necessários para sanar suas dúvidas, se disporá a busca-los.

Podemos ter dois panoramas distintos para a estrutura cognitiva dos discentes: Se o aluno já possuir algum conhecimento em relação ao que será ensinado, esse provavelmente será permeado pelo já citado senso comum, ou seja, concepções alternativas ou não científicas do fenômenos envolvidos. Nesse primeiro caso, caberá ao professor delinear o que é ciência e o que não é, esclarecendo isso ao passo que as oportunidades surgirem.

Em uma segunda situação, pode-se ter uma ausência quase que completa de subsunçores por parte dos alunos, que possivelmente auxiliaria na adesão dos novos conhecimentos. Para esse caso, citando novamente Vergnaud, “situações-problema podem funcionar como organizadores prévios” *apud* Moreira (MOREIRA, 2012). Em harmonia com a proposta desse primeiro momento, a postura que o professor deve adotar é a de questionador, de instigar, mediar a relação alunos - situações problema. É preferível omitir as explicações e respostas explícitas por hora. Esse momento deve

³ Gérard Vergnaud (1933 -2021), matemático, filósofo e psicólogo francês. Conhecido pela teoria dos campos conceituais.

ser reservado para o mapeamento por parte do professor acerca dos conhecimentos prévios (ou a ausências deles) dos alunos (DELIZOICOV; ANGOTTI, 1990).

2.4.2 Organização do conhecimento

Esse segundo momento pedagógico é reservado totalmente ao estudo formal dos conteúdos pretendidos. Aqui serão apresentada a teoria, os conceitos, modelos, sistemas, fenômenos e tudo que for pertinente de forma objetiva e sistemática. O professor é totalmente livre para proceder da forma que achar mais conveniente ou eficaz para guiar a aula. Pode-se, por exemplo, elaborar uma sequência didática (ou UEPS, propriamente dita) a fim de organizar da melhor forma os conteúdos programáticos a serem ensinados, utilizar metodologias ativas, etc. Há uma gama de possibilidades (DELIZOICOV; ANGOTTI, 1990).

Nessa etapa, o aluno irá reconhecer os pontos de tangência entre os conteúdos estudados nesse momento com os itens abordados na problematização inicial. Ele mentalmente irá relacionar as explicações para os fenômenos discutidos aqui com os quais possuía anteriormente, percebendo quais ideias eram corretas e quais não. Por esse motivo, a organização do conhecimento é o momento pedagógico em que ocorrerão a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa (ou integradora) (DELIZOICOV; ANGOTTI, 1990).

Se a aprendizagem dos conteúdos estudados for significativa, a partir daqui o aluno deve dominar o conteúdo em um nível aceitável, sendo capaz de perceber a relação entre os problemas iniciais e as concepções que detém agora, estabelecendo finamente o porquê dos fenômenos acontecerem como mostrado inicialmente. Em suma, ele será capaz de aplicar tal conteúdo para resolver as situações problema.

2.4.3 Aplicação do conhecimento

Esse é o último momento pedagógico, nele serão trabalhadas aplicações dos conteúdos sistematicamente introduzidos e organizados pelos momentos anteriores. Uma das perguntas que devem ter acometidos os discentes nos momentos anteriores são as que seguem a linha de “Onde eu posso encontrar uma aplicação desse conceito?”, “No meu dia a dia, posso encontrar aplicações desse fenômeno?”. O professor irá mostrar situações onde os conceitos e fenômenos estudados se aplicam, instigando os alunos, agora detentores dos preceitos básicos necessários, a interpretar tais acontecimentos sob a ótica científica.

Uma abordagem chamativa e interessante, pode ser uma que não se limite a uma aula expositiva, metodologia mais recomendada para o segundo momento. Nesta finalização, o professor pode ousar metodologias mais interativas e participativas,

que promovam o diálogo aberto e indagação coletiva. Pode-se apresentar fenômenos familiares ao contexto dos alunos, mas também é importante trabalhar aplicações que fogem totalmente a alçada cotidiana dos alunos. Isso servirá para romper a bolha intelectual dos mesmos mostrando que há uma gama de aplicações para os conteúdos estudados (DELIZOICOV; ANGOTTI, 1990).

Ao extrapolar as discussões dessa forma, pretende-se exemplificar aos alunos que a ciência é uma construção coletiva, histórica e que pode ser feita por todos, não exclusiva de um ou outro grupo específico. A história da ciência é muito convidativa e pode ser pertinente nesse último momento, favorecendo a visão da construção de um conhecimento que beneficia toda a sociedade através de suas aplicações (DELIZOICOV; ANGOTTI, 1990).

Encerramos por aqui a explanação acerca desse último tema, a influência da ciência e seus derivados na sociedade. Na seção a seguir entenderemos mais o papel da ciência e da tecnologia na sociedade. Ela tratará exclusivamente dessa discussão.

2.5 O enfoque CTS e o ensino de Física Moderna e Contemporânea

Desde os primórdios daquilo que hoje conhecemos como ciência, sempre pensou-se sobre o impacto de suas aspirações na forma de viver das pessoas, nas relações interpessoais características de uma sociedade. Em menos de dois séculos saímos dos primeiros veículos movidos a base de combustíveis fósseis proporcionados pela revolução industrial e fomos em direção ao espaço, pousando em nosso satélite natural através de veículos espaciais que se tornaram icônicos na história das construções humanas. Não reconhecer a tecnologia como fruto do conhecimento científico acumulado e sistematizado bem como sua influência no meio social é negar o elo inerente entre esses três polos que compõem a dinâmica dos avanços da humanidade.

Para os educadores em ensino de ciências, é mais do que orgânico pensar na importância e necessidade de se inserir em sala de aula a pauta *CTS* (Ciência, tecnologia e sociedade), visto a dimensão dos impactos desta na vida dos educandos. Assim como as revoluções industriais ocorridas a partir do século XIX, outros ramos da tecnologia se sucederam e concomitante a segunda revolução industrial tivemos o advento da eletrônica, segundo Rezende ⁴ (REZENDE, 2004), o ramo da tecnologia mais marcante do século XX.

É graças a ela que conhecemos o mundo da forma como é hoje, revolução essa que ainda perdura, se reinventando ano após ano. Não reconhecer o quão relevante é

⁴ Sérgio Machado Rezende, Físico e engenheiro brasileiro.

a relação entre ciência, tecnologia e sua influência na sociedade moderna é ignorar a forma como vivemos atualmente, como nos relacionamos e progredimos coletivamente.

Por isso a temática, ou enfoque *CTS* se faz tão necessária, ela deve fornecer ao aluno senso crítico, ético, para lidar com essa triangulação e suas especificidades, desenvolvendo ao mesmo tempo senso científico, entendendo a ciência como um conhecimento construído coletivamente que pode influenciar vidas e suas relações, ditando o rumo de uma sociedade. Em resumo e de acordo com os *PCN+*: “Compreender o conhecimento científico e o tecnológico como resultados de uma construção humana, inseridos em um processo histórico e social” (BRASIL; EDUCAÇÃO, 2002). Ou ainda “Reconhecer e avaliar o caráter ético do conhecimento científico e tecnológico e utilizar esses conhecimentos no exercício da cidadania” (BRASIL; EDUCAÇÃO, 2002).

Ainda de acordo com os *PCN+*, o ensino de ciências deve se ater a “Compreender a ciência e a tecnologia como partes integrantes da cultura humana contemporânea” além de:

“Reconhecer e avaliar o desenvolvimento tecnológico contemporâneo, suas relações com as ciências, seu papel na vida humana, sua presença no mundo cotidiano e seus impactos na vida social” (BRASIL; EDUCAÇÃO, 2002).

O acesso democrático ao ensino básico público no Brasil vem sendo iniciado, ao menos no que diz respeito ao ensino fundamental, desde a década de 1970 (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2002). Desde então cada vez mais o avanço da tecnologia proporciona o amplo acesso a informação por parte da sociedade. A todo momento somos bombardeados de informações, e muitas delas referentes a conhecimentos e conceitos científicos (algumas vezes, como tem se tornado comum, essas notícias e informações são pseudocientíficas) e a relevância de se implementar um ensino de ciências que atenda a necessidade de se reconhecer o que é ciência e o que não é, bem como compreender os processos químicos, físicos e biológicos de tudo que nos cerca se faz indispensável.

O ensino de Física, como ensino de uma das ciências da natureza, deve alfabetizar cientificamente os educandos nesse âmbito, fornecendo o mínimo necessário para que até aqueles que não prosseguirem no ramo acadêmico e/ou científico, que nunca mais tenham oportunidade de estudar Física, possam reconhecer, interpretar e compreender os fenômenos físicos de forma minimamente satisfatória (BRASIL; EDUCAÇÃO, 2002). De acordo com as orientações curriculares para o ensino médio (LINGUAGENS, 2006) (área de ciências da natureza e suas tecnologias), o conhecimento científico com o qual nossos alunos geralmente tem contato em seu cotidiano não vem acompanhado necessariamente das explicações corretas ou completas dos fenômenos, sendo preenchidas muitas vezes pelo senso comum.

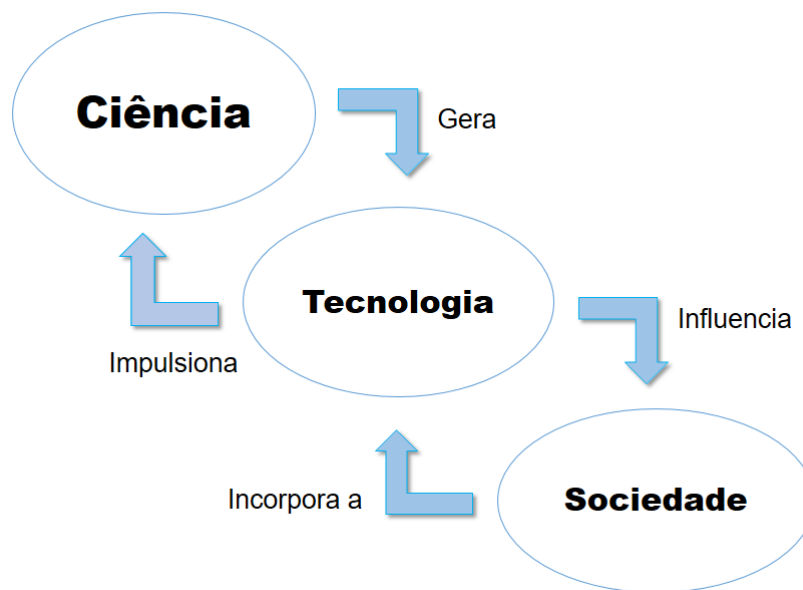


Figura 2 – Algumas das inter-relações entre o eixo Ciência, Tecnologia e Sociedade. O eixo ciência e tecnologia se auto alimenta, ao passo que esse desenvolvimento mútuo entre ambas acaba por influenciar de diversas formas a sociedade que usufrui dessa relação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

E é aqui que o papel do ensino de Física deve se focar. Ele deve fornecer aos discentes, uma alfabetização científica capaz de desmistificar a superficialidade dos conhecimentos propagados pela maioria das fontes midiáticas, subsidiando um reflexão crítica das situações com as quais já se depararam e ainda irão se deparar (LINGUAGENS, 2006).

Antes de prosseguirmos, é importante destacar que toda a gama de discussões envolvendo a temática *CTS* vem se desenvolvendo de forma rápida desde seu surgimento, por volta da década de 70, e já se tem uma nova perspectiva adicional ao eixo ciência-tecnologia-sociedade. Trata-se do novo eixo *CTSA*, que corresponde as inter-relações presentes entre ciência-tecnologia-sociedade-ambiente. Porém, para o debate que buscamos estabelecer aqui, esse último polo não será abordado em extensão como deveria. Nos limitaremos a comentar sobre quando possível, mas buscando desvelar a importância da temática *CTS* no ensino de Física, mais especificamente, no ensino de Física moderna e contemporânea.

Avançando mais na profundidade das questões que podem surgir ao trabalharmos o enfoque *CTS* em sala de aula, pode-se apontar a já citada característica ética e política oriunda a essas relações que corresponde a natureza cidadã de cada educando. De acordo com (PINHEIRO; SILVEIRA; BAZZO, 2007), o desenvolvimento da ciência, que por sua vez acarreta no progresso da tecnologia pode alterar drasticamente os

níveis políticos, éticos e sociais de uma sociedade. Assuntos considerados polêmicos e que estão a todo momento circundando e alimentando discussões na atualidade não são escassos, de alimentos transgênicos a geração de energia através de usinas nucleares, da repressão as campanhas de vacinação ao panorama ambiental cada vez mais preocupante.

Como integrante de uma sociedade organizada, como cidadão, o discente, público alvo do ensino de ciências deve ser instigado a pensar criticamente sobre cada uma dessas questões, sobre a ética envolvida nos mais variados temas, sobre o papel da ciência em nossa sociedade moderna, que muito vezes não é benéfico e apresenta graves consequências devido a índole das pessoas que a utilizam. Novamente, a relação presente na sigla se faz bastante clara (PINHEIRO; SILVEIRA; BAZZO, 2007).

A Física moderna e contemporânea (FMC), ou melhor, o seu ensino se insere exatamente entre essas proposições, a de compreender os fenômenos físicos característicos dessa, bem como as mudanças proporcionadas por elas na sociedade. No início do século XX, com o advento da Mecânica Quântica e da Relatividade Geral, a física passou de um estado de quase finalização para um vislumbre de uma infinidade de novos fenômenos e teorias das quais não se pensava existir. Do efeito fotoelétrico a dualidade onda-partícula, da radiação ao âmago da constituição da matéria. Dessa nova leva, ou melhor, dessa nova física é que provém grande parte da tecnologia que molda as sociedades atuais. Assim, a FMC constitui a temática apropriada para abordar a dinâmica CTS, tanto a nível fundamental quanto a nível médio.

A evidente relação entre a Física moderna e contemporânea no enfoque CTS é tratada nos PCNEM, onde são recomendados temas estruturadores que podem relacionar várias temáticas relevantes e induzir práticas pedagógicas inovadoras e impactantes ao ensino de ciências. Nesse contexto, o tema estruturador que mais aborda os conceitos de FMC alinhados a esse trabalho é o tema 5, *Matéria e radiação*. Ele nos apresenta as seguintes unidades temáticas: “matéria e suas propriedades, radiações e suas interações, energia nuclear e radioatividade, eletrônica e informática.” (LINGUAGENS, 2006).

Segundo o mesmo documento, a temática de FMC está diretamente ligada as novas tecnologias e pode contribuir substancialmente para a compreensão do seu surgimento, organização, funcionamento, e o papel dessas na sociedade moderna.

Apesar disso, não há tanta produção bibliográfica que aponte esses conteúdos como sendo as principais escolhas na hora da transposição didática para os discentes da educação básica. Discutir os motivos da ausência desses conteúdos no ensino médio bem como as dificuldades de sua transposição não fazem parte do escopo desse trabalho, já que pretendemos apresentar a FMC como conhecimento relevante a ser ensinado no contexto CTS.

Uma pequena parcela dessa discussão foi feita na seção anterior, embora essa temática seja bem mais profunda e necessite de um capítulo inteiro só para tratar dessas peculiaridades. Assim sendo, essas são questões que não podem ser ignoradas e muito tem a dizer sobre o ensino de Física como um todo.

Retornando ao segmento das contribuições do ensino de FMC na educação básica, os *PCNEM* apontam, no tema estruturador citado anteriormente, as seguintes competências e habilidades que devem-se buscar desenvolver nos educandos, nesse âmbito:

- “Identificar diferentes tipos de radiações presentes na vida cotidiana, reconhecendo sua sistematização no espectro eletromagnético (das ondas de rádio aos raios gama) e sua utilização por meio das tecnologias a elas associadas (radar, rádio, forno de microondas, tomografia, etc.)”;
- Compreender os processos de interação das radiações com meios materiais para explicar, por exemplo, os fenômenos envolvidos em **fotocélulas**, emissão e transmissão de luz, telas de monitores, radiografias; [...]”(Linguagens, 2006).

Os *PCN+* indicam que o tema estruturador *Matéria e radiação* é de suma importância já que põe os alunos em contato com conteúdos que vão do macro ao micro, da constituição da matéria as suas aplicações nos diversos materiais pertencentes ao ramo da eletrônica, microeletrônica e áreas tecnológicas afins. Seguindo a hierarquia dos temas estruturadores, eles se subdividem em unidades temáticas que organizam e especificam cada conteúdo em uma melhor sequência e contexto para o seu ensino. O tema *Matéria e radiação* contém as seguintes unidades temática mais pertinentes para a discussão pretendida aqui:

- Matéria e suas propriedade,
- Radiações e suas interações,
- Eletrônica e informática.

Nessa última unidade temática, o destaque vai para os seguintes conteúdos: “Identificar a presença de componentes eletrônicos, como **semicondutores**, e suas propriedades nos equipamentos contemporâneos” (BRASIL; EDUCAÇÃO, 2002). Pensando nas unidades temáticas distribuídas nos três anos do ensino médio, o documento ainda orienta que as unidades *Matéria e radiação* e *Universo, terra e vida* são mais recomendados para o terceiro ano do ensino médio, por serem conteúdos mais complexos e que exigem em certos momentos, conceitos pré requisitos trabalhados nos anos anteriores.

Vale ressaltar que embora esse tema seja o mais relacionado a FMC e aos objetivos desse trabalho, outros como *Som, imagem e informação* e *Equipamentos*

elétricos e telecomunicações também alvejam uma série de temáticas importantes ao enfoque *CTS* e podem ser trabalhados em outros contextos.

3 Fundamentação teórica

Nesse capítulo, iniciaremos o estudo da fundamentação teórica referente aos conteúdos de física abordados neste trabalho. Trata-se de conceitos e propriedades características da área conhecida como Física do Estado Sólido, aqui, direcionadas principalmente aos objetos de estudo da chamada física da matéria condensada.

Abordaremos, no domínio dessas duas áreas, os conceitos essenciais ao entendimento do processo fotovoltaico, fenômeno que guia a geração de energia nas células solares, resvalando também no efeito fotoelétrico. A sequência de apresentação dos conteúdos adotada segue um nível de fundamentalidade crescente, onde conceitos mais gerais são abordados primeiro, dando lugar em seguida para os conceitos mais específicos gradualmente.

3.1 O surgimento da Física do Estado Sólido

A Física do Estado Sólido é o ramo da Física teórico-experimental que estuda os fenômenos e propriedades referentes aos materiais sólidos. A Física da Matéria Condensada, por sua vez, se concentra na análise dos fenômenos e propriedades presentes em arranjos gigantescos de matéria, da ordem de 10^{20} átomos a cada centímetro cúbico. A Física da Matéria Condensada é, portanto, uma ampliação, uma extensão da Física do Estado Sólido que não se restringe unicamente aos materiais sólidos com arranjos cristalinos organizados. Ela se estende ao estudo de materiais com estruturas cristalinas mais desordenadas e complexas, como líquidos e materiais amorfos, por exemplo (REZENDE, 2004).

Um sólido, ou melhor, o estado sólido consiste em uma combinação ordenada de átomos, dispostos de modo a comporem um arranjo menos energético possível. São distribuições de átomos que possuem propriedades ímpares extremamente importantes para a tecnologia atual (a já citada eletrônica, por exemplo), principalmente os metais, materiais com ótima condutividade térmica e elétrica. Para entendermos o surgimento da física do estado sólido e sua importância no estudo dos materiais podemos nos ater a dois principais acontecimentos iniciais que deram o pontapé inicial no estudo das então estruturas cristalinas. São eles; a descoberta do elétron e o modelo de Drude ¹ para a condutividade dos metais (ASHCROFT; MERMIN et al., 1976).

Até a segunda metade do século XIX o conhecimento da estrutura da matéria ainda era rudimentar. Havia propostas da indivisibilidade da matéria até certo ponto,

¹ Paul Karl Ludwig Drude (1863 - 1906), físico alemão.

sendo os átomos a estrutura derradeira, as menores quantidades de matéria que edificariam tudo que existe. Tais estruturas eram vistas de forma muito diferente de como são atualmente.

Conseqüentemente, uma das maiores descobertas da física ocorreria em 1897 graças a J.J Thomson ² utilizando o tubo de raio catódicos. Tratava-se do elétron, uma partícula que compunha o átomo, dotada de carga elétrica negativa. Após isso, modelos atômicos focados na dicotomia de um núcleo dotado de carga positiva e elétrons circundantes carregados negativamente teria início, se distanciando cada vez mais da concepção fornecida por Demócrito, tendo o Thomson proposto seu próprio modelo.

A hipótese de Drude se baseava, de forma geral, na teoria cinética dos gases. De forma mais precisa, ele imaginava os metais como “gases de elétrons”. Em um gás confinado num recipiente fechado, as moléculas energéticas colidem umas com as outras e nas paredes que as cercam a alta velocidade. Nesse sistema, desconsidera-se o tempo das colisões molécula-molécula e as forças externas que atuam sobre as moléculas livres do “gás”, a não ser, claro, as forças momentâneas entre as moléculas envolvidas em uma colisão (ASHCROFT; MERMIN et al., 1976).

O ponto chave da sua teoria de condução elétrica dos metais se embasava justamente na presença dos recém descobertos elétrons no metal. Sua existência era fundamental para as postulações de Drude, já que em um metal eletricamente neutro, a boa nova significava que deveria haver algo dotado de carga elétrica positiva ao passo que a carga dos elétrons era negativa, para manter o átomo em equilíbrio. Para Drude, as cargas positivas eram mais pesadas e, portanto, imóveis. Isso simplificava enormemente o tratamento matemático do problema.

Dessa forma, a proposição mais notável presente no modelo do “gás de elétrons” de Drude consiste no seguinte fato: Quando os átomos que formam o metal estão reunidos nos arranjos cristalinos, elétrons fracamente ligados ao núcleo, os chamados elétrons de valência, conseguem se movimentar quase que livremente pela extensão do metal, sendo que os íons positivos oriundos dessa separação funcionam como as cargas positivas, mantendo o material nesta organização interna. É este o segredo da condutividade elétrica dos metais, os elétrons livres suscetíveis a campos elétricos externos podem compor a corrente elétrica que é tão fácil de impelir nesses materiais.

Além dos já citados elétrons livres, existem também os elétrons de caroço. Esses últimos são chamados assim pois estão mais firmemente ligados ao núcleo, e dessa forma, pouco contribuem para a condutividade elétrica do metal já que não podem se movimentar livremente. Dessa forma, a carga do núcleo pode ser expressa por

² Joseph John Thomson (1856 -1940), físico britânico, recebeu o prêmio nobel de Física em 1906 pela descoberta do elétron.

eZ , onde e é a quantidade elementar de carga $e = 1,6 \times 10^{-19}$ Coulombs e Z é o número atômico. Os elétrons que orbitam o núcleo tem carga líquida total dada por $-eZ$ (ASHCROFT; MERMIN et al., 1976).

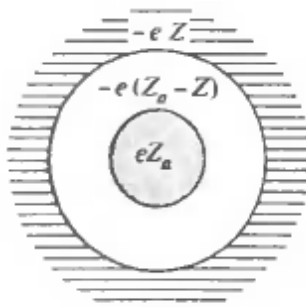


Figura 3 – Esquema da estrutura de um átomo do modelo de Drude (sem escala). Nele, $-eZ$ representa os elétrons de valência praticamente livres, $-e(Z_a - Z)$ os elétrons de caroço e eZ_a a carga líquida do núcleo.

Fonte: Retirado da referência (ASHCROFT; MERMIN et al., 1976).

Como última ressalva, vale destacar que não se discutirá os detalhes matemáticos e resultados oriundos do modelo do elétron livre aplicado à condução dos sistemas metálicos uma vez que tal debate foge ao escopo deste trabalho. Os livros didáticos usados na disciplina de Física do Estado Sólido (ASHCROFT; MERMIN et al., 1976) e (KITTEL, 1978) já o fazem. Ao leitor interessado, também existem vários artigos científicos dedicados ao tema como (PÉREZ, 2000). Aos que desejarem se aprofundar em tais conceitos, fica o convite.

3.2 As Ligações atômicas e a estrutura cristalina dos sólidos

Antes de entendermos as peculiaridades de cada uma das ligações e como elas ocorrem, é necessário responder a questão mais fundamental nesse momento: Porque os átomos se ligam? É esse questionamento que norteará as discussões posteriores iniciadas aqui.

Talvez a estrutura sólida mais conhecida seja a do cloreto de sódio, presente na maioria dos livros de química e física da educação básica, o tão conhecido sal de cozinha. Essa substância apresenta uma combinação ordenada de átomos compondo uma estrutura cristalina bem organizada, formado por átomos de cloro (Cl) e sódio (Na). Os átomos se ligam uns aos outros, basicamente, a fim de obter estabilidade, pois dessa forma configuram sistemas mais estáveis, ou seja, com menor energia total se comparados a quando estavam isolados uns dos outros (REZENDE, 2004).

Quando tratamos dos materiais sólidos, estamos falando de 10^{23} átomos de cloro ligados a 10^{23} átomos de sódio em volumes infinitesimais, ou seja, um amontoado organizado de moléculas no espaço, de forma a tornar mínima a energia do sólido como um todo. O tipo de ligação química influencia diretamente nas propriedades dos materiais, e, por isso, para a física do estado sólido é de vital importância conhecer o tipo de ligação que estrutura determinada substância pois tais propriedades se aplicam ao amontoado de moléculas que organizadamente compõem os sólidos, ou seja, podemos generalizar nossas conclusões ao analisa-las (REZENDE, 2004).

Uma análise mais completa e próxima da realidade, seria abordar os tipos de ligação química sob a ótica das bandas de energia, regiões que surgem a partir da superposição das camadas eletrônicas devido a um grande número de átomos em espaços compactos nas estrutura cristalina. Porém, por hora, omitiremos tal conceito e resguardaremos-as para a explicação da condutividade dos materiais, onde tal conceito é essencial. É igualmente necessário destacar que em uma determinada substância pode haver mais de um tipo de ligação química, contudo, quando classificamos determinados materiais como sendo formados por um ou outro tipo de ligação, estamos falando daquela que é predominante e responsável pelas principais características do material. Conheçamos então, os tipos de ligação química.

3.2.1 Ligação iônica

Como o nome sugere, se deve basicamente a atração eletrostática entre íons de cargas opostas. Utilizando o exemplo anterior, podemos ilustrar como ocorre a ligação iônica. O elemento cloro possui sete elétrons de valência e precisa de mais um para alcançar a estabilidade, completando a sua última camada eletrônica³ com oito elétrons, enquanto o átomo de sódio possui apenas um elétron de valência e é justamente esse que confere sua situação de instabilidade, precisando assim perdê-lo a fim de ter sua última camada remanescente completamente fechada, com oito elétrons.

A ligação química de ambos os elementos é ideal, já que o elétron de valência do sódio passa a ocupar a camada referente ao cloro, deixando assim uma carga líquida positiva na região do sódio e uma negativa no entorno do átomo de cloro. A força elétrica é muito intensa no domínio atômico e a ligação atômica proveniente da atração eletrostática dos íons é difícil de ser rompida, necessitando de uma energia considerável para tal feito, explicando assim o alto ponto de fusão desses materiais (REZENDE, 2004).

Graças a isso é ínfima a condutividade elétrica dos materiais que possuem esse tipo de ligação, já que os elétrons estão firmemente ligados a seus núcleos. Assim sendo, na ausência de elétrons livres, os materiais que possuem esse tipo de ligação

³ Aqui, estamos nos referindo a camadas eletrônicas tendo em vista o modelo atômico de Bohr.

são em grande parte, péssimos condutores de eletricidade sendo conhecidos como isolantes ou dielétricos.

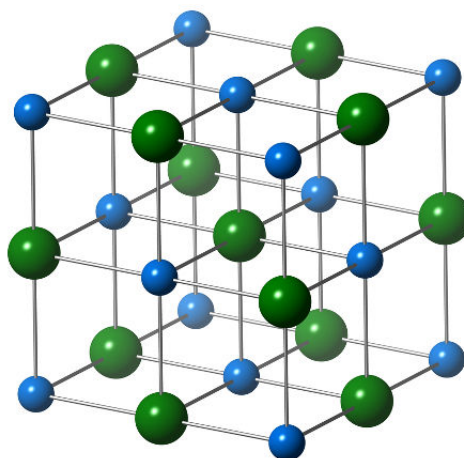


Figura 4 – Esquema da estrutura cristalina do cloreto de sódio, $NaCl$. Os átomos de cloro estão sendo representados em verde e os de sódio em azul.

Fonte: Retirado da referência (BRASIL... ,).

3.2.2 Ligação covalente

Nesse tipo de ligação, os elétrons não são “perdidos” ou “recebidos” durante o processo, mas sim, compartilhados. Dessa forma, a coesão do sólido cristalino com esse tipo de ligação se dará pela atração elétrica das regiões que possuem carga líquida positiva (ausência do elétron) com as regiões que possuem carga líquida negativa (presença do elétron). Devido a esse tipo de ligação química, os materiais que são estruturados dessa forma possuem pontos de fusão e ebulição menores se comparados aos sólidos iônicos, possuindo condutividade elétrica igualmente baixa, porém com maior susceptibilidade de adquirir capacidades condutoras, visto que neste caso é mais fácil romper as ligações e promover o movimento de elétrons antes compartilhados pelos elementos da ligação (REZENDE, 2004).

3.2.3 Ligação metálica

Os metais são talvez os materiais sólidos mais importantes para indústria como um todo. Conforme mencionado anteriormente, possuem um ótima condutividade elétrica que se dá principalmente pelos elétrons livres que transitam pela estrutura cristalina. Esse verdadeiro “mar” de elétrons livres mantém a coesão do sólido, ao passo que os núcleos positivos atraídos eletrostaticamente pelos elétrons carregados negativamente conservam o sólido unido (REZENDE, 2004).

Esse tipo de ligação não é tão forte como a iônica ou covalente, o que implica em materiais com baixos pontos de fusão e ebulição. No entanto, sua condutividade elétrica é extremamente acentuada, visto a liberdade dos portadores de carga (elétrons) para se movimentarem no material e se ordenarem a partir de um campo elétrico externo.

3.2.4 Pontes de hidrogênio

São ligações fortes que tem como protagonista os átomos de hidrogênio. Eles funcionam como elos e mediarão as junções das moléculas por meio da atração eletrostática, muito comum nas moléculas de água (e do gelo), por exemplo. Os átomos de oxigênio são mais eletronegativos, ou seja, possuem uma maior capacidade de atrair os pares de elétrons de uma ligação química para o seu entorno. Assim sendo, nas moléculas de água (H_2O) os átomos de oxigênio atraem os de hidrogênio fortemente, mantendo-os sob seu domínio quase como se fossem um elétron atraindo um próton (REZENDE, 2004).

Disso, resulta que cada átomo de oxigênio atrairá um par de elétrons por vez para o seu domínio, ou seja, dois átomos de hidrogênio, se estabilizando já que este possui seis elétrons de valência. Então tudo ocorre a partir do hidrogênio com carga líquida positiva atraído pelo oxigênio de carga líquida negativa, conectando as moléculas e formando um emaranhando bastante coeso e rigidamente estável.

Com isso, finalizamos aqui a breve explanação sobre as principais interações intermoleculares. Não se pretendeu, por óbvio, esgotar o vasto tópico relativo às interações que resultam nas estruturas cristalinas dos sólidos. O objetivo foi, sucintamente, descrever as características relevantes associadas aos principais tipos de interação química que são importantes para a maioria dos materiais que temos contato cotidianamente. Há muito para se discutir, entretanto, este não é o propósito desta dissertação.

3.3 Os primeiros modelos atômicos e a instabilidade do elétron

Com a descoberta do elétron, Thomsom tratou de elaborar seu próprio modelo atômico com base nas recém descobertas partículas e sua interação elétrica com o núcleo. Em sua visão, o átomo seria esférico, com raio finito e possuindo um núcleo maciço de carga positiva com elétrons acoplados a ele, esses últimos de carga negativa. Nesse arranjo, o núcleo do átomo seria estático e não ofereceria qualquer resistência ao movimento dos elétrons em seu domínio. Assim, as forças eletrostáticas de atração entre núcleo-elétrons e de repulsão elétron-elétron manteria o sistema coeso e em harmônia. Dessa forma, o átomo se manteria estável (PARENTE; SANTOS; TORT,

2013).

O modelo do “pudim de ameixas”, como ficou conhecido, a primeira vista poderia parecer bem simples e até eficaz na forma de organizar os portadores de carga, porém haviam alguns problemas o envolvendo quem não tinham respostas de forma alguma triviais. A medida que mais elétrons eram inseridos no modelo, mais difícil se tornava encontrar situações de estabilidade energética. Tinham-se ainda, problemas mais elementares que esse, questões que consistiam em um verdadeiro breu para as teorias físicas da época, que não podiam ser solucionadas utilizando a física clássica. Era o problema da instabilidade eletromagnética do átomo (PARENTE; SANTOS; TORT, 2013).

Para comenta-lo, precisaremos falar sobre outro modelo que se tornava cada vez mais conhecido na época e era praticamente uma concepção alternativa ao modelo de Thomsom: o átomo “planetário”.

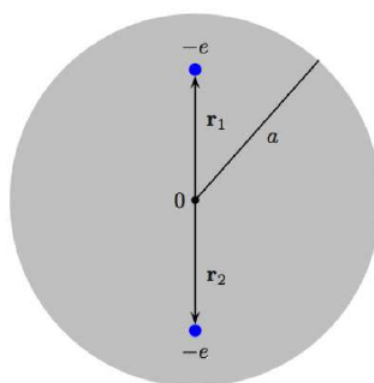


Figura 5 – O modelo do “pudim de ameixas” de Thomsom, para o caso de dois elétrons. Nele r_1 e r_2 são as respectivas distâncias dos elétrons ao centro do átomo, enquanto a é justamente a medida do raio atômico.

Fonte: Retirado da referência (PARENTE; SANTOS; TORT, 2013).

O modelo planetário recebeu este nome pois se assemelharia a organização dos planetas orbitando o sol. Nele, os elétrons circundariam o núcleo percorrendo órbitas circulares e concêntricas. Tendo em vista esse modelo e de acordo com as leis do eletromagnetismo propostas por Maxwell ⁴ no século XIX, cargas elétricas emitem, quando em movimento, ondas eletromagnéticas. O grande ponto é que ao passo que emitem ondas eletromagnéticas, energia por assim dizer, o átomo se torna menos energético, perdendo energia gradativamente. Isso implica que em um momento futuro o elétron teria perdido tanta energia que cairia espiralando até se chocar com o núcleo.

⁴ James Clerk Maxwell (1831 -1879) físico e matemático britânico, pai da teoria moderna do eletromagnetismo.

A equação que mensura a perda de energia por unidade de tempo, ou seja, a taxa de energia irradiado pelo elétron é conhecida como fórmula de Larmor:

$$P(t) = \frac{-2q^2 a(t)^2}{12\pi\epsilon_0 c^3} \quad (3.1)$$

Na equação (3.1), $P(t)$ é a potência eletromagnética irradiada pelo elétron no instante de tempo t . Já q é a carga do elétron, $a(t)$ o módulo da aceleração instantânea da partícula, enquanto c é a velocidade da luz. A conclusão que coloca em cheque tanto o modelo planetário, quanto o de Thomson é o fato de que simplesmente a matéria não deveria existir, ao passo que entraria em colapso graças a instabilidade natural do elétron (PARENTE; SANTOS; TORT, 2013). Utilizando ainda a equação de Larmor (3.1) podemos estimar o tempo de vida do átomo, tomando como exemplo, o átomo de hidrogênio. O resultado, após as manipulações matemáticas é:

$$\tau = \frac{1}{4} \left(\frac{4\pi\epsilon_0}{e^2} \right)^2 c^3 m^2 (r_0)^2 \quad (3.2)$$

Na equação (3.2), τ seria o tempo de vida do átomo de hidrogênio, e r_0 a constante conhecida como raio de Bohr $r_0 = 0,53 \times 10^{-10}$ metros. Uma boa aproximação para esse cálculo, substituindo o valor das constantes, seria o de $\tau \approx 1,6 \times 10^{-9}$ segundos (PARENTE; SANTOS; TORT, 2013).

3.4 O átomo de Bohr

Antes de prosseguirmos, precisamos comentar a teoria base adotada por Bohr para pensar em um novo modelo atômico que sustentasse sua própria existência, ou seja, que resolvesse o problema da instabilidade do elétron: A teoria quântica.

No início do século XX, a física teve uma mudança de ares bastante brusca e repentina tendo em vista os rumos que se pensava que esta seguiria naquela época. Isso se deveu principalmente ao surgimento da mecânica quântica em 1900 com Max Planck (1858 -1947) propondo a teoria da quantização da energia. O fato é que, até meados de 1900 haviam três grandes problemas que a física conhecida até então era incapaz de lidar. Eles eram: A catástrofe do ultravioleta, o efeito fotoelétrico e o já comentado problema da instabilidade energética do átomo. Nos ateremos aqui, principalmente ao terceiro, porém o segundo também será tratado posteriormente. Quanto ao primeiro, nos restringiremos apenas a citá-lo, explicando o princípio fundamental que o guia (HEWITT, 2015).

O ponto chave da teoria de Planck consistia em tratar a energia em trânsito, como o calor, por exemplo, não mais como um contínuo, algo ininterrupto, mas sim como algo discreto, quantizado, subdividido em pequenas partes. Assim, a energia transferida

seria transmitida em pequenos pacotes aos quais Planck nomeou de *quantum* (cujo plural é *quanta*).

Essas quantidades discretas de energia possuiriam valores mínimos específicos enquanto que os demais valores possíveis permitidos a esses pacotes seriam múltiplos dessa quantidade. Planck, com sua teoria extremamente inusitada, indo em direção oposta ao que era praticamente uma lei imutável na época, resolveu o problema da radiação de corpo negro, corrigindo a catástrofe do ultravioleta e propondo uma nova teoria de radiação diferente da de Rayleigh e Jeans (HEWITT, 2015).

A peculiaridade do modelo de Bohr consistia justamente em utilizar as proposições de Planck e aplicá-las no problema do átomo de hidrogênio. Para isso, Bohr fez uso também das concepções de Einstein do efeito fotoelétrico (ao qual nos dedicaremos em breve). De forma resumida, Einstein via a luz não como uma onda eletromagnética, mas como um feixe de partículas dotadas de quantidades quantizadas de energia. Posteriormente, os componentes quânticos da luz seriam conhecidos como fótons, termo que se popularizaria nos anos seguintes. Essa seria a dualidade onda-partícula para o caso da luz.

Para Bohr, as órbitas dos elétrons ao redor do núcleo não seriam quaisquer órbitas, mas sim, órbitas quantizadas, ou seja, cada uma delas comportaria até certa quantidade de energia. Ele se referia a elas como camadas. Assim sendo, os elétrons que excedessem a capacidade energética de uma camada específica, avançariam para camadas mais energéticas, enquanto elétrons que porventura perdessem energia, passariam a ocupar camadas menos energéticas. Dessa forma, não haveria colapso do átomo, já que ao emitirem radiação eletromagnética, os elétrons perderiam energia mas não colidiriam com o núcleo, ela apenas se deslocariam pelas camadas disponíveis do átomo em questão (REZENDE, 2004). Esse deslocamento dos elétrons ao receber e perder energia poderia se dar via absorção ou emissão de fótons conforme previsto pela proposta de Einstein como indicado pela equação a seguir:

$$E_f - E_i = E_{fóton} \quad (3.3)$$

$$E_f - E_i = h\nu \quad (3.4)$$

na equação (3.4), E_f e E_i são respectivamente as energias final e inicial referente as camadas energéticas enquanto h é a constante de Planck, inserida por ele próprio durante a elaboração de sua teoria quântica. Por fim, ν é a frequência do fóton emitido ou absorvido, ou seja a energia de um fóton é dada por $E_{fóton} = h\nu$. A equação (3.4) nada mais é que uma forma de escrever a lei de conservação de energia para nosso sistema específico. Nela, para que um elétron avance para uma camada de

maior energia ele precisa absorver um fóton de energia equivalente a diferença de energia entre as referidas camadas (REZENDE, 2004).

O modelo atômico de Bohr é apropriado para entendermos a dinâmica dos elétrons pelas camadas energéticas e para a formação das bandas de energia. Basicamente, cada átomo possui certa quantidade de elétrons e cada um deles ocupa determinados níveis de energia, representados por Linus Pauling (1901 - 1994) através de orbitais atômicos $1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d, 4s, 4p, 4d, 4f, \dots$ organizados de forma a priorizar a ocupação dos níveis mais baixos de energia primeiro. Os orbitais e a ordem de ocupação é ilustrado no diagrama de Pauling (REZENDE, 2004). Todavia, o modelo atômico atualmente aceito é aquele descrito pela nova Mecânica Quântica e complementado pelo modelo proveniente da Teoria de Partículas Elementares.

Resolvendo a equação de Schrodinger, a equação fundamental da Mecânica Quântica podemos obter as características básicas dos átomos. A padronização e nomenclatura proposta por Pauling é utilizada para exprimir os números quânticos resultantes da solução matemática da equação de Schrodinger. Os orbitais e a ordem de ocupação são ilustrados, de forma prática e mnemônica no esquema denominado diagrama de Pauling (REZENDE, 2004). Não apresentaremos mais detalhes sobre os modelos atômicos atuais, mas utilizaremos alguns conceitos em conjunto com o modelo de Bohr para prosseguirmos com nossas discussões.

Assim sendo, o estado eletrônico fundamental de um átomo pode ser obtido distribuindo os elétrons conforme do diagrama de Pauling, completando os orbitais menos energéticos primeiramente e avançando para os mais energéticos posteriormente. Tendo em vista os números quânticos, o princípio da exclusão de Pauling garante que em cada orbital não tenhamos elétrons com todos os números quânticos idênticos, inclusive o número de spin. Mas isso é para quando tratamos de átomos isolados. Na física da matéria condensada estamos falando de estruturas compactas de átomos, da ordem de $10^{23}/cm^3$. Como os estados orbitais se comportam em situações como essa? É disso que iremos tratar agora (REZENDE, 2004).

Ao trazermos tantos átomos para a vizinhança um do outro, certamente teremos uma perturbação dos níveis energéticos. A nível quântico, haverá a formação de faixas contínuas de energia resultado da sobreposição das camadas de tantos átomos próximos uns dos outros. A uma distância infinita do sólido cristalino, tudo ocorre como se estivéssemos observando um átomo isolado, e ao passo que diminuimos essa distância, observaremos a distinção das bandas de energia (REZENDE, 2004). Dito isso, ao invés de termos estados orbitais de energia teremos bandas representando cada um dos estados orbitais de energia. Os níveis nos quais se subdividem cada uma delas é dada pela equação:

$$n = 2(2l + 1)N \quad (3.5)$$

Na equação (3.5), n é o número de níveis de cada banda de energia e l é o número quântico orbital (ou azimutal, como também é conhecido) e N o número quântico principal. Em se tratando das bandas de energia, sabe-se que não há estados eletrônicos entre elas, ou seja, esses locais são inacessíveis aos elétrons, por essa razão essas regiões são conhecidas como zonas proibidas. Os conceitos de bandas e zonas proibidas serão extremamente relevantes na discussão sobre a condutividade dos materiais (REZENDE, 2004).

Por fim, cabe destacar que essa é uma explicação simplificada do esquema de bandas, e para esmiuçarmos em detalhes toda a complexidade do surgimento, formação e comportamento das bandas necessitaríamos de uma matemática para dizer no mínimo espessa. A abordagem trazida aqui servirá para o nosso principal propósito: Analisar a condutividade dos materiais de forma simples e efetiva.

3.5 A condutividade dos materiais

Antes de comentarmos a característica de cada tipo de material, precisamos discutir a condição preponderante para a condutividade dos mesmos: O preenchimento da banda de valência (BV) e da banda de condução (BC). Em um sólido cristalino, no estado fundamental dos átomos, as bandas menos energéticas serão preenchidas primeiro e a última banda de energia poderá estar parcialmente ou completamente ocupada pelos elétrons. Dito isso, essas duas bandas de energia desempenham um papel fundamental na condutividade os materiais (REZENDE, 2004).

Para que os elétrons abandonem a banda de valência em direção a banda de condução, eles precisam adquirir certa quantidade de energia para vencer a barreira energética existente entre as referidas bandas, o *gap*, comentado anteriormente. Há situações nas quais o valor de *gap* seja nulo. A principal diferença entre os três tipos de materiais é o valor do *gap* e a situação de preenchimento com elétrons na banda de condução. Somente os elétrons da banda de condução contribuem efetivamente para a condutividade elétrica do metal. Na figura abaixo, segue a representação esquemática das bandas de energia para os três tipos de materiais:

3.5.1 Condutores

Nessa extensa categoria se situam principalmente os metais da tabela periódica. São materiais que possuem a banda de valência semi preenchida e a banda de condução completamente vazia. Assim sendo, os elétrons a uma temperatura ambiente,

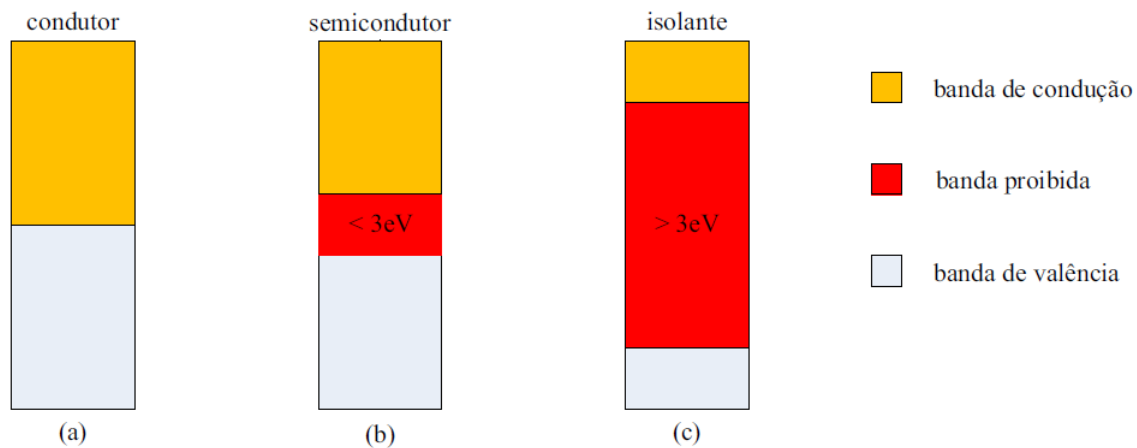


Figura 6 – Representação das bandas de valência, condução e da zona proibida aos elétrons *gap* nos três tipos de materiais.

Fonte: Retirada da referência (PINHO; GALDINO et al., 2014).

por exemplo, tem energia térmica suficiente para migrarem com facilidade da banda semi completa para a BC devido especialmente a ausência do intervalo de energia entre elas. Os metais alcalinos e os metais nobres como o cobre (*Cu*), prata (*Ag*) e ouro (*Au*) são bons representantes desse grupo (MELLO; INTRATOR, 1980; REZENDE, 2004).

3.5.2 Isolantes

Os materiais isolantes, ou dielétricos são aqueles que possuem a banda de valência completamente preenchida e a banda de condução inteiramente vazia. Isso configuraria uma ótima capacidade de condução, visto a quantidade de elétron aptos a migrar da BV para a BC, não fosse pelo valor considerável de *gap*. Graças a isso, nesses materiais, os elétrons tem muita dificuldade de movimentação da banda completa para a banda vazia, praticamente não sendo estimulados eletricamente por um campo elétrico externo, por exemplo. Pelo fato de não possuírem elétrons livres, essa característica torna-os péssimos condutores (MELLO; INTRATOR, 1980; REZENDE, 2004).

3.5.3 Semicondutores

Os materiais semicondutores, como o nome sugere, são aqueles têm capacidades condutoras intermediárias, se situando entre os condutores e isolantes. Assim como os materiais isolantes, a banda de valência está cheia e a de condução completamente livre. Por isso, a diferença fundamental entre estes e os isolantes está no valor de *gap*.

A uma temperatura de 0 K (zero Kelvin) os materiais semicondutores são considerados isolantes, porém, por possuírem um valor de *gap* menor que de 2 eV (elétron-volt), os elétrons se tornam suscetíveis a movimentação entre as bandas de energia nessas condições. Nesses materiais, o número de elétrons na banda de valência, fator fundamental para a condutividade, é significativo, mas bem menor se comparado aos condutores. Os principais representantes desse grupo, utilizados exaustivamente pela indústria atualmente são o germânio (*Ge*) e o silício (*Si*) (MELLO; INTRATOR, 1980; REZENDE, 2004).

Em temperaturas superiores a 0 K (zero Kelvin), os materiais semicondutores podem exibir alguma condutividade em decorrência da promoção de elétrons para a BC por meio da energia térmica. Este fenômeno será discutido na próxima seção.

3.6 Propriedades dos semicondutores

Antes de entendermos o quão importantes são os materiais semicondutores para a tecnologia fotovoltaica, precisamos essencialmente entender as principais propriedades que os colocam em uma posição de destaque na indústria moderna. A partir de agora, trataremos especificamente dos materiais semicondutores e suas características.

3.6.1 Semicondutores intrínsecos e extrínsecos

Talvez a principal diferencial entre os semicondutores e demais tipos de materiais seja a relação inerente entre sua condutividade elétrica e a temperatura. Mais precisamente, a resistividade elétrica dos semicondutores diminuem conforme a temperatura deles aumenta, exatamente o contrário do que ocorre com os metais, fato que os tornou tão inusitados e interessantes quando estudados inicialmente no século XIX (REZENDE, 2004).

Porém, essa dependência com a temperatura pode ser um problema e acaba por restringir a aplicação desses materiais, pelo menos em sua forma original, pura⁵ por assim dizer. Semicondutores desse tipo são chamados de intrínsecos e não possuem muito espaço no mercado justamente pela restrição em suas aplicações.

Como mencionado anteriormente, o pequeno valor de *gap* desses materiais acaba por favorecer a migração ainda em temperatura ambiente dos elétrons da banda de valência para a banda de condução, elétrons esses em menor quantidade que nos metais mas que já configuram um valor expressivo para a condutividade elétrica.

⁵ A rigor, não existe um semicondutor essencialmente “puro”, pois haverá ainda que mínima, uma porcentagem de impurezas. Porém, cabe a aproximação para casos em que essa quantidade é ínfima.

Assim, para contornar as possíveis problemáticas de se utilizar semicondutores puros e para manipulá-los a adquirir determinadas características ou funções que se tenham interesse é que existe o processo de dopagem⁶ de semicondutores. Ele consiste basicamente em adicionar impurezas a esses materiais puros. Essas impurezas nada mais são que substâncias inseridas propositalmente e que desempenham funções específicas na rede cristalina do semicondutor (MELLO; INTRATOR, 1980).

Para entendermos a função de cada uma dos tipos de impureza, precisamos antes de mais nada, discutir o rompimento das ligações covalentes nos semicondutores e liberação dos portadores de carga. Outra característica bastante específica dos semicondutores.

3.6.2 Elétrons e buracos

Já foi informado que o silício e o germânio compõe os principais materiais semicondutores intrínsecos utilizados amplamente na atualidade. O sólido cristalino desses materiais são estruturados por ligações covalentes entre os átomos, que como também já vimos, são ligações químicas com força mediana, se rompendo com mais facilidade que as ligações iônicas. A uma temperatura próxima do zero kelvin, sabe-se que os materiais semicondutores se comportariam como isolantes, já que a excitação térmica dos elétrons nessa situação seria praticamente nula (REZENDE, 2004).

Em suma, esses elétrons não possuiriam energia suficiente para romper as ligações covalentes e vencer o *gap* para conseguirem atingir a banda de condução. Porém, a medida que a temperatura aumenta, as ligações químicas ainda que de forma mínima, vão sendo gradualmente rompidas e os elétrons aos poucos vão se libertando da rede cristalina e se tornando livres para se movimentarem. E é nesse ponto que reside a peculiaridade desses materiais (MELLO; INTRATOR, 1980).

Quando um elétron abandona seu lugar na ligação química, existe a formação de uma região vazia que era antes preenchida pelo elétron. Esse local possui carga líquida positiva devido a ausência do elétron, são os chamados “buracos”⁷. Dessa forma, nos semicondutores e diferentemente do que ocorre no caso dos metais, temos dois portadores de carga na estrutura cristalina suscetíveis a movimentação devido a um campo elétrico externo, já que os buracos funcionam como “prótons livres” e podem se movimentar também (REZENDE, 2004; MELLO; INTRATOR, 1980).

Quando temos, por exemplo, um campo elétrico externo com sentido para a direita, podemos prever que os elétrons se moverão para esquerda, uma vez que o campo elétrico aponta no sentido do movimento das cargas positivas, e portanto, nesse caso, dos buracos. A partir do momento em que o elétron avança para a esquerda

⁶ Termo que deriva da expressão em inglês *doping*, que significa, em uma tradução livre, “adulterar”.

⁷ do inglês *hole*.

o buraco remanescente pode ser ocupado por um elétron que também acabou de abandonar a ligação e se movimentar, deixando assim outro buraco mais a direita na estrutura ⁸.

Esse processo ocorre repetidas vezes de forma indefinida. A esse encontro elétron-buraco dá-se o nome de recombinação. É nesse sentido que ocorre a movimentação dos portadores de carga sob a influência de um campo elétrico externo, conhecido como *drift* (REZENDE, 2004; MELLO; INTRATOR, 1980). Por fim, é importante destacar que os materiais dopados são eletricamente neutros. O processo de dopagem não resulta em formação de íons porque o balanço de cargas positivas e negativas não é afetado.

3.6.3 As junções P-N

Como já foi dito, manipular um semicondutor adicionando impurezas a esse pode ser muito vantajoso, visando potencializar ou inibir certas propriedades. Em relação a condutividade elétrica, podemos dopar um semicondutor adicionando a esse, impurezas específicas. As impurezas podem ser, basicamente, de dois tipos distintos: As doadoras (do tipo *n*) e as aceitadoras (do tipo *p*) (MELLO; INTRATOR, 1980; KASAP, 2006; SZE, 1981).

No primeiro caso, e utilizando como exemplo o próprio silício, se adicionarmos impurezas doadoras em sua estrutura cristalina, estaremos combinamos o silício (grupo 14), elemento tetravalente, com outros elementos que possuam uma configuração eletrônica que apresente elétrons fracamente ligados ao núcleo, como os pentavalentes do grupo 15. Tomando como exemplo o fósforo (P), que possui cinco elétrons na camada de valência, ao ser combinado com o silício resulta em uma molécula com um elétron praticamente livre, visto que os outros se arranjam por meio de uma ligação covalente (MELLO; INTRATOR, 1980; KASAP, 2006; SZE, 1981).

O processo de dopagem, nesse caso, aumenta a quantidade de portadores de carga (os elétrons) amplificando assim a condutividade elétrica do material. As impurezas são chamadas de doadoras exatamente por doarem elétrons para a estrutura cristalina do material, sendo chamados também de impurezas do tipo *n*, por estarem associados aos elétrons, de carga negativa ⁹. O semicondutor submetido ao processo de dopagem com esse tipo de impureza é nomeado de semicondutor do tipo *n* (MELLO; INTRATOR, 1980; KASAP, 2006; SZE, 1981).

⁸ É importante lembrar que os buracos não são literalmente partículas e nem podem se movimentar a esmo como os elétrons. Eles se originam essencialmente da ausência de elétrons e pensá-los como prótons é apenas uma analogia que facilita o entendimento do processo. Sob a ação de um campo externo, através da recombinação o buraco não “avança” rigorosamente pela rede, apenas novos buracos são formados cada vez mais no sentido do campo, e isso pode ser considerado como movimento de prótons, por exemplo.

⁹ O *n* provém originalmente do inglês *negative*.

O segundo processo de dopagem citado foi o referente a impurezas do tipo aceitadoras. Analogamente ao exemplo anterior, podemos compreender o processo ao imaginarmos a combinação do silício, um semiconductor puro, como o índio (In), elemento do grupo 13, e portanto, uma substância trivalente (com três elétrons na camada de valência). Ao se ligar quimicamente ao silício, o índio com apenas três elétrons não supre a estabilidade necessária ao silício e deixa um buraco na estrutura cristalina. O quarto elétron livre do silício que não se ligou pode agora facilmente abandonar a estrutura e se movimentar deixando também um buraco. Por isso esse tipo de impureza é chamada de aceitadora, já que os buracos apreendem os elétrons favorecendo a recombinação. Elas são chamadas de tipo p como uma referência a carga líquida do buraco ¹⁰. Os semicondutores expostos a esse tipo de dopagem são chamados de semicondutores do tipo p (MELLO; INTRATOR, 1980; KASAP, 2006; SZE, 1981).

Em um semiconductor puro, elétrons e buracos existem em mesma quantidade. Porém, intuitivamente, no processo de dopagem, há um desregulação na quantidade dos portadores de carga e conseqüentemente existirá a predominância de um em detrimento do outro. Em um semiconductor do tipo n , haverão mais elétrons que buracos e os portadores de carga são, majoritariamente elétrons. Já em semicondutores do tipo p , os portadores de carga são em maioria buracos, já que proporcionalmente teremos dois buracos para cada elétron proveniente do silício, ainda utilizando o exemplo anterior (MELLO; INTRATOR, 1980). Em um semiconductor puro, ambos os portadores estão quantitativamente em equidade, e podem ser calculados através da relação

$$n_i^2 \approx B \cdot e^{-\left(\frac{E_g}{K_b \cdot T}\right)} \quad (3.6)$$

Ou seja,

$$n = p = n_i \quad (3.7)$$

Na equação (3.6) e (3.7), n_i representa a concentração de portadores intrínsecos, K_b é a constante de Boltzmann cujo valor numérico é $1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, E_g é o valor da energia de *gap*, T a temperatura do semiconductor e B uma constante para os semicondutores de forma geral, com valor numérico aproximadamente correspondendo a 10^{39} cm^6 .

Em todas os dispositivos semicondutores utilizados atualmente existe, em algum grau, a aplicação da tecnologia conhecida como junção $p-n$ (REZENDE, 2004). Ela consiste em combinar por meio de uma junção, um semiconductor do tipo n com um

¹⁰ Do inglês *positive*.

do tipo p a fim de compor um sistema com características condutoras especialmente interessantes (LIMA et al., 2020).

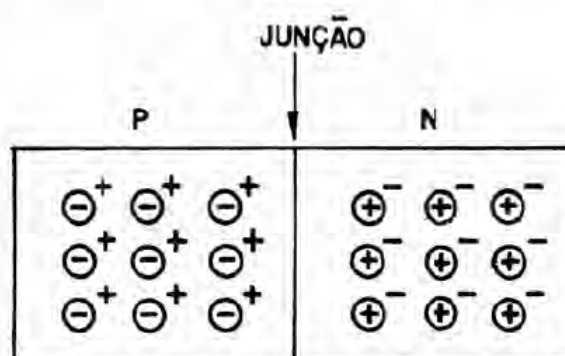


Figura 7 – Representação da junção P-N em um semicondutor, com acúmulos de elétrons no lado N e de buracos no lado P.

Fonte: Retirada da referência (MELLO; INTRATOR, 1980)

Como exemplificado na figura (7), do lado direito temos um semicondutor do tipo n e a esquerda um semicondutor do tipo p . Nesse tipo de junção, um dos processos mais fundamentais a temperatura ambiente é conhecido como difusão. Sabemos que em temperaturas acima do zero kelvin teremos elétrons livres devido ao rompimento das ligações covalentes. Do lado direito temos abundância de elétrons pela inserção do elemento pentavalente e do lado esquerdo, é justamente o contrário, os portadores de carga em maioria são buracos devido a inserção do elemento trivalente.

Devido a isso, naturalmente teremos elétrons se desvencilhando da rede cristalina a direita, onde são os portadores de carga em maioria, avançando para a esquerda onde existe excesso de buracos pela atração eletrostática. É nisso que consiste o processo de difusão, o trânsito de partículas carregadas da região de maior concentração para o local de menor concentração. Havendo a recombinação dos pares elétron-buraco, o processo continuará até que haja equilíbrio das regiões envolvidas, em termos de carga líquida total (MELLO; INTRATOR, 1980).

Esse processo não é interminável, e em algum momento deve cessar. Isso ocorre devido a região da junção se configurar de forma a repelir o trânsito dos portadores de cargas, com o decorrer do processo de difusão. Esse local é conhecido como região de transição ou região de depleção. Nela, na extremidade referente ao semicondutor do tipo n , haverá um acúmulo de buracos, de carga líquida positiva devido a perda de elétrons para o lado p da junção, que por sua vez apresentará elétrons em abundância em sua extremidade da junção, ocasionado pela migração dos buracos ao lado n da junção pela recombinação (MELLO; INTRATOR, 1980; KASAP, 2006; SZE, 1981).

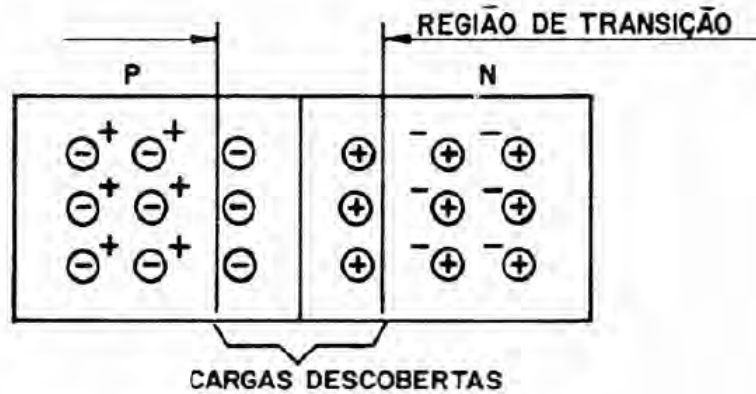


Figura 8 – Representação da junção P-N com acúmulos de portadores de carga na região de transição, o que acaba por dar origem a barreira de potencial que cessa o fenômeno de difusão.

Fonte: Retirada da referência (MELLO; INTRATOR, 1980)

Por causa dos acúmulos de cargas opostas em cada uma das extremidades, há repulsão elétrica das mesmas e a interrupção da movimentação dos elétrons e buracos. Isso acontece porque ocorre a formação de uma diferença de potencial V que freia o processo de difusão, como mostrado na figura (8), a barreira de potencial.

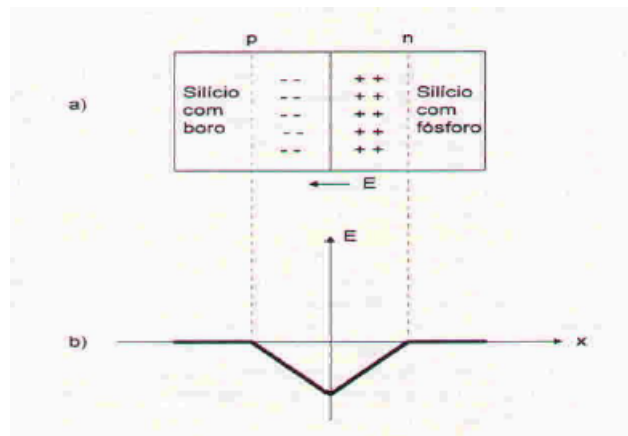


Figura 9 – Em (a), separação dos portadores de carga em uma junção P-N e em (b), comportamento do campo elétrico em uma junção P-N.

Fonte: Retirada da referência (FADIGAS, 2012)

As junções $p-n$ estão presentes em diversos dispositivos amplamente utilizados na eletrônica, e talvez a categoria mais fundamental deles seja o diodo, que recebe esse nome por ter justamente dois polos, dois eletrodos compostos por semicondutores do tipo n e p que também são subdivididos em diversos outros grupos. Nosso alvo nas próximas seções serão os fotodiodos, que estão diretamente ligados aos fenômenos

envolvendo a luz e aos processos físicos que abordaremos agora, o efeito fotoelétrico e fotovoltaico.

3.7 O efeito fotoelétrico

O século XIX foi particularmente especial para a física, dado que nesse período veio a se consolidar umas das teorias mais bem estruturadas e completas que se tinha disponível até então, e grande parte desse sucesso coube a Maxwell, que unificou os fenômenos elétricos e magnéticos estabelecendo assim o eletromagnetismo, uma das últimas teorias completamente concebidas sob um viés clássico. Heinrich Hertz (1857-1894) teve um papel fundamental na consolidação da teoria ao detectar as ondas eletromagnéticas utilizando antenas específicas elaborados por ele, confirmando assim a existência das ondas eletromagnéticas (NUSSENZVEIG, 2014; HEWITT, 2015).

Segundo Maxwell, a luz seria uma onda eletromagnética que viajaria no vácuo a uma velocidade c de $3,0 \times 10^8$ m/s. Ela seria composta pela entrelaçamento de campos elétricos e magnéticos que se sucederiam indefinidamente transportando energia, sem, no entanto, transportar matéria do meio. Por volta de 1887, Hertz ainda experimentando a detecção das ondas eletromagnéticas, percebeu que os eletrodos envolvidos em seus experimentos, liberavam entre eles uma descarga elétrica na forma de faísca que se apresentava mais intensa quando expostos a luz, sendo também emitida com menos intensidade na ausência da mesma (NUSSENZVEIG, 2014; HEWITT, 2015; REZENDE, 2004)

Ironicamente, este acontecimento é considerado como um dos primeiros indícios experimentais do efeito fotoelétrico, fenômeno físico que evidenciaria uma nova natureza para a luz, desafiando o conhecimento da época ao reconsiderar a teoria eletromagnética e pôr em xeque os ideias clássicos acerca da composição da luz.

Ao incidir luz sobre determinados placas metálicas organizadas em circuitos elétricos, detectava-se a ejeção de elétrons da placa. Esse acontecimento não era absurdo, já que, pela física clássica, ondas eletromagnéticas deveriam fornecer energia aos elétrons presentes nos átomos do material até que esses se tornassem energéticos o suficiente para estarem fracamente atraídos pelo núcleo e se tornassem livres. A grande surpresa residia no fato de que deveria haver um tempo hábil para que os elétrons adquirissem energia suficiente e se libertassem do metal. Contudo, os primeiros elétrons eram ejetados quase que instantaneamente a incidência de radiação luminosa (NUSSENZVEIG, 2014; HEWITT, 2015).

Outro fator igualmente intrigante era a energia dos elétrons emitidos, que deveriam ter uma energia total proporcional a intensidade da radiação luminosa utilizada, porém, não era isso que acontecia. Na verdade, haviam indícios de que essa dependên-

cia não seria com a intensidade da radiação mas sim com sua frequência. Essas eram questões que não possuíam explicações clássicas. Dessa forma, apesar de radiações mais intensas arrancarem mais elétrons do metal, radiações com altas frequências, na faixa do ultravioleta, por exemplo, arrancavam elétrons mais energéticos ainda que em menor quantidade se comparado ao caso anterior. Nesse contexto, a física da época já estava estagnada a um bom tempo e nenhuma solução satisfatória era apresentada, pelo menos até meados de 1905, com Albert Einstein (1879-1955) (HEWITT, 2015).

Utilizando as ideias de Planck a respeito da energia propôs uma nova composição para luz. Segundo ele, a luz não se comportaria unicamente como uma onda, mas também como um feixe de partículas, pequenos pacotes dotados unicamente de energia que viajariam no vácuo a velocidade c . Essa era a proposta da quantização da luz, trazendo a tona a dualidade onda-partícula. Na teoria corpuscular da luz, os pacotes de energia seriam posteriormente chamados de fótons e renderiam ao físico o Prêmio Nobel em 1921. Um aparato experimental utilizado na época para detectar o efeito fotoelétrico é mostrado a seguir

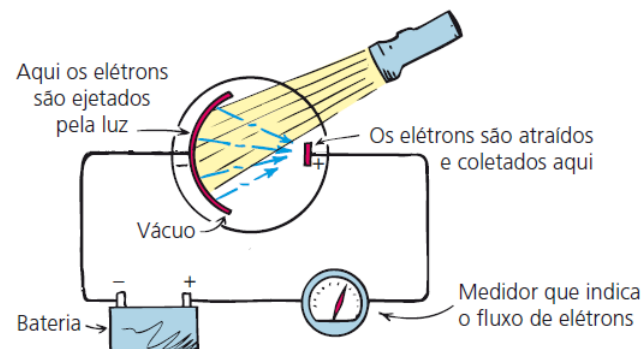


Figura 10 – Aparato genérico para detectar o efeito fotoelétrico.

Fonte: Retirada da referência (HEWITT, 2015).

Cada fóton carregaria uma energia dada por

$$E = h \cdot \nu \quad (3.8)$$

Na equação (3.8), h é a constante de Planck e ν é a frequência do fóton em questão. Como os elétrons são mantidos na estrutura cristalina do metal por forças eletrostáticas, é necessário obter certa quantidade de energia para romper tais ligações. A esse valor energético específico inerente ao material dá-se o nome de função trabalho W_0 . Portanto, a equação (3.8) fica

$$E = h \cdot \nu - W_0. \quad (3.9)$$

Ao observar a equação (3.9) fica evidente o porquê dos elétrons ejetados sob incidência de radiação eletromagnética violeta serem tão energéticos, isso se deve justamente ao fato de que esse tipo de radiação possui alta frequência. Os fótons que compõem a radiação ultravioleta, por exemplo, são os mais propícios a executar o efeito fotoelétrico e vencer a função trabalho do metal (NUSSENZVEIG, 2014).

Utilizando a figura (10) como exemplo para nossa análise do efeito fotoelétrico, vemos um circuito arranjado em série com um amperímetro para medir a corrente elétrica proveniente dos elétrodos de polaridades opostas em uma ampola conservada em vácuo. A radiação luminosa é aplicada sobre o cátodo que terá em seguida seus elétrons ejetados e devido a diferença de potencial V_0 seguem em direção ao ânodo, sendo então feita a leitura pelo amperímetro. A radiação que incide sobre o cátodo tem intensidade I_0 e frequência ν . Um gráfico de corrente elétrica i em função do potencial V tem o aspecto exibido a seguir (NUSSENZVEIG, 2014)

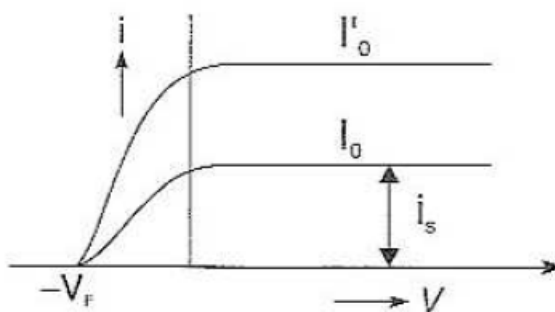


Figura 11 – Gráfico de i versus V para um dado material que compõe o cátodo.

Fonte: Retirada da referência (NUSSENZVEIG, 2014).

Com base no gráfico da figura (11) podemos elencar as seguintes observações a respeito do gráfico que ilustra o efeito fotoelétrico:

1. Mantendo constante o valor da intensidade de radiação luminosa I e da frequência ν percebe-se que sob uma diferença de potencial positiva V os elétrons liberados do cátodo vão em direção ao ânodo formando uma corrente de módulo constante, chamada de corrente de saturação i_s .
2. Quando há a inversão da polaridade na diferença de potencial V , os elétrons são retardados e induzidos a retornar ao cátodo, compondo uma corrente de mesmo sentido que no caso anterior, diminuindo proporcionalmente quanto mais negativo se tornar V , até se anular completamente em $-V_f$, o potencial de corte.

3. Se dobrarmos, por exemplo, a intensidade da radiação I_0 para I'_0 aumentamos proporcionalmente o número de fotoelétrons (elétrons livres devido ao efeito fotoelétrico), arrancados do material. O aspecto das curvas exibidos no gráfico (11) não se altera.
4. Se alterarmos a frequência ν da radiação incidente, percebemos que o aspecto das linhas do gráfico mostrado em (11) não sofre alteração, porém o valor do potencial de corte muda, sendo esse diretamente proporcional a frequência da radiação luminosa incidente. Essa relação entre $-V_f$ e ν é característico de cada material.

Quando invertemos a polaridade a fim de parar instantaneamente os elétrons e fazê-los retornarem em seu curso, precisamos que ocorra, em termos de energia, a seguinte situação:

$$E_{cinética} = E_{potencial} \quad (3.10)$$

Ou seja, a energia cinética do elétron deve ser equivalente a sua energia potencial elétrica:

$$\frac{1}{2}m_e v_e^2 = -eV \quad (3.11)$$

Em (3.11), m_e e v_e são respectivamente, a massa do elétron e sua velocidade ao ser ejetado. A carga do elétron é representada por $-e$ e V o potencial ao qual o sistema está submetido.

Concluindo nossa expressão para os fotoelétrons ejetados do cátodo, ou seja, compilando (3.9) e (3.11), obtemos;

$$\frac{1}{2}m_e v_e^2 = -eV = h \cdot \nu - W_0 \quad (3.12)$$

que é a equação geral do efeito fotoelétrico. Assim, com base na interpretação de Einstein do efeito fotoelétrico. A partir de então estavam elucidadas as principais inconsistências entre as observações experimentais e a teoria clássica do efeito fotoelétrico, resolvidas pela quantização da energia:

- A energia de cada fóton depende diretamente de sua frequência. Dito isso, radiações de altas frequências retiram elétrons mais energéticos do cátodo, mas não necessariamente faz com que mais elétrons sejam retiradas do metal, não influenciando, portanto numa corrente de maior ou menor intensidade no circuito.

Como vimos, essa característica está ligada a intensidade da radiação luminosa, apenas.

- Quanto mais intensa é a radiação luminosa que incide sobre o cátodo, mais fótons são imprimidos sobre esta e, portanto, mais elétrons serão ejetados. Por isso a intensidade da corrente está ligada a intensidade, e não a frequência, como se acreditava ser.
- O processo de ejeção dos elétrons é instantâneo, já que cada fóton ao colidir com os elétrons fariam com que esses, agora mais energéticos, se libertassem, fenômeno guiado pela conservação do momento linear, propriedade que envolve partículas e que também se aplica no domínio quântico.
- O fenômeno da fotocondutividade era nitidamente observado quando se utilizava principalmente a radiação ultravioleta, já que esta conferia aos elétrons, fótons mais energéticos, o que facilitava bastante o seu processo de abandono do catodo, vencendo a função trabalho com mais facilidade. Por outro lado, radiações de frequências menores, como o vermelho, não conferia energia suficiente ao elétrons, como evidenciado em (3.8).

As ideias de Einstein eram completamente ousadas, contrariavam a tão bem estabelecida teoria eletromagnética. Não foram poucos os físicos da época que desdenhavam do viés quântico do efeito fotoelétrico, apesar de ainda receber apoio de alguns outros, como Max Planck. Einstein recebeu o prêmio nobel de física em 1926 por suas inestimáveis contribuições na elucidação do intrigante efeito fotoelétrico.

3.8 As células e painéis solares

Nesta última seção do capítulo, nos focaremos nos dispositivos fotovoltaicos e em discussões que os envolvem diretamente. Começaremos discutindo o efeito fotovoltaico para em seguida explicar a participação nacional e o desenvolvimento e investimento internacional nesse tipo de tecnologia.

3.8.1 O efeito fotovoltaico

Os primeiros indícios do efeito fotovoltaico, assim como do efeito fotoelétrico foram registrados ainda no século XIX por Becquerel ¹¹, em 1839. Na ocasião, Becquerel notou que dois eletrodos imersos em uma solução eletrolítica favorecia a conversão de energia luminosa em elétrica. Alguns anos mais tarde esse mesmo fenômeno foi sendo

¹¹ Antoine Henri Becquerel (1852-1908), físico francês. Recebeu o prêmio nobel de física em 1903 por seus estudos pioneiros acerca do fenômeno de radioatividade.

observado em outros países e os estudos a seu respeito foram sendo intensificados (PINHO; GALDINO et al., 2014). O efeito fotovoltaico em estado sólido, como o empregado nas células solares de silício, resultou dos trabalhos de Russell Ohl com os materiais semicondutores e as junções $p-n$ (tudo isso antes da descoberta do transistor). No ano de 1939, Ohl patenteou o modelo moderno das células solares, utilizadas em grande escala atualmente (LIMA et al., 2020).

Conforme apresentada na subseção referente as junções $p-n$, apontamo-as como as principais responsáveis para a ocorrência do efeito fotovoltaico. Outro fator igualmente preponderante para a o funcionamento desses dispositivos é o efeito fotoelétrico. Agora, prosseguiremos para a abordagem do tema por partes.

A temperatura ambiente, a excitação térmica das moléculas fornece energia suficiente para que haja elétrons livres e trânsitos de portadores de cargas em um semicondutor puro dopado através de uma junção $p-n$. E é exatamente pensando no fortalecimento dessa mecânica que surge a ideia dos dispositivos fotossensíveis. Quando um semicondutor desse tipo é exposto a luz solar, temos fótons interagindo diretamente com o material, ou seja, ganho de energia propriamente dita. Caso esses fótons carreguem uma quantidade de energia maior que a de gap , ou seja, $E_f \geq E_g$, teremos mais portadores de carga livres do que comumente teríamos para um semicondutor isolado de luminosidade, fator que amplia a capacidade condutiva do semicondutor (PINHO; GALDINO et al., 2014; FADIGAS, 2012).

Como vimos também em relação ao trânsito de portadores de carga, teremos basicamente dois tipos de correntes elétricas percorrendo o material sem que haja uma polarização externa, ou seja, elas se devem a própria organização atômica dos semicondutores dopados com uma junção $p-n$: A corrente de difusão i_D e a corrente de deriva i_d . A corrente de difusão se deve ao fato dos portadores se movimentarem das regiões de maior concentração para as menos concentradas, tendo elétrons da região n para a p e inversamente, buracos da região p para a n . Tudo isso, na formação da junção $p-n$, vale destacar (PINHO; GALDINO et al., 2014).

A corrente de deriva se dá via atração e repulsão eletrostática dos portadores de carga, se movendo em fluxo através de campos elétricos das regiões onde são minoria para as que são maioria. Contrariamente a corrente elétrica oriunda do processo de difusão, teremos agora elétrons saindo de p e avançando para o lado n e buracos da região n retornando para a parte p da junção. A seguir, segue a esquematização da composição de uma célula solar, onde observamos a junção $p-n$

Na figura (12) vemos a representação das principais componentes de uma célula solar. A primeira componente a ser levada em consideração e que servirá de sustentação para a célula como um todo é o contato de base. Trata-se de uma camada metálica de sustentação que pode funcionar como um contato elétrico da célula. Em

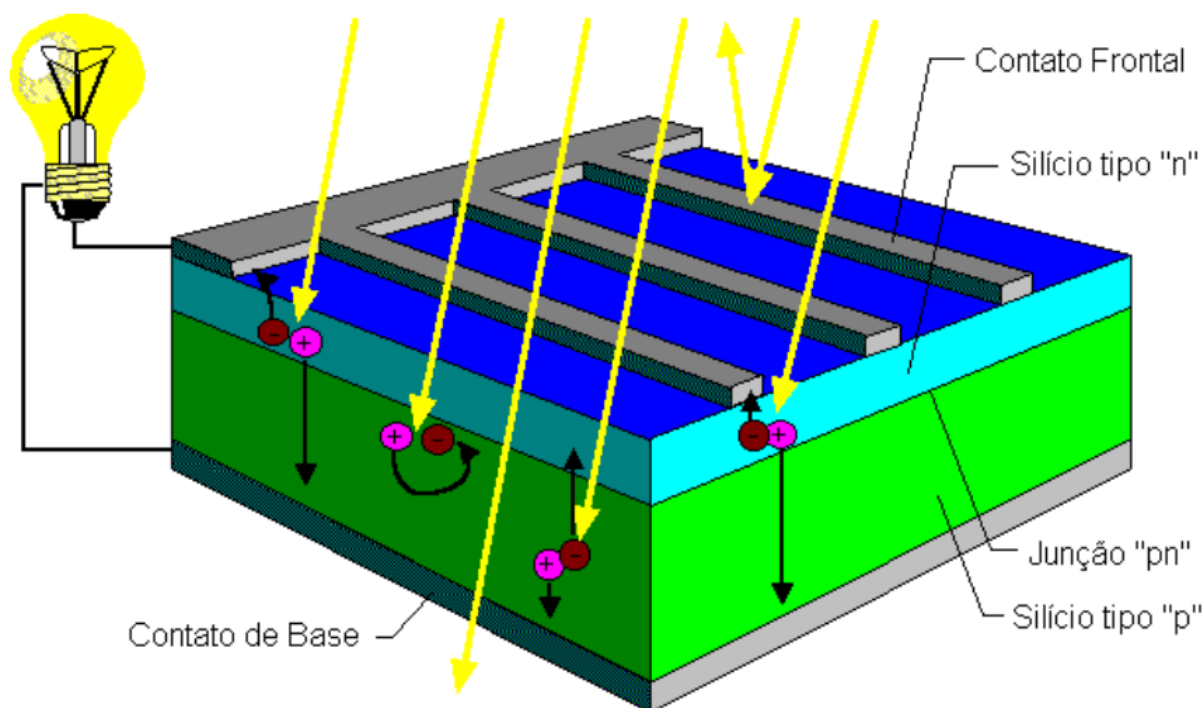


Figura 12 – Esquema da estrutura e composição de uma célula fotovoltaica.

Fonte: Retirada da referência (BRITO, 2019)

seguida é adicionada uma lâmina de silício dopada com uma impureza aceitadora (em verde), ou seja, do tipo p (silício com impurezas do elemento Boro, por exemplo). Em azul claro, vemos que é adicionado sobre a dopagem do tipo p uma lâmina de silício dopada com uma impureza doadora (do tipo n, pode ser o elemento fósforo, por exemplo). Entre ambas as camadas de silício dopado de formas diferentes é que se encontra a junção $p-n$. Por fim, a estrutura principal é finalizada pela camada anti-reflexo (em azul escuro), com o intuito de reduzir a porcentagem de radiação luminosa refletida e os eletrodos de contato frontal, que servem para coletar os elétrons que chegam da junção. Essa eletrodos coletores devem ser dispostos com contato mínimo em relação a célula solar, para evitar que a junção $p-n$ seja sombreada, impedindo o contato com a luz solar.

A seguir na figura (13) encontra-se esquematizado a visão externa de uma célula solar, com destaque para os eletrodos que compõem o contato frontal (*Finger electrodes* e *Bus electrode*):

Na figura (14) vemos de forma concisa, a representação de como ocorre a interação da radiação solar com a célula solar de silício, em nosso exemplo. Pela camada dopada com impurezas doadoras (n -region), os fótons conseguem atravessá-la facilmente, fornecendo energia aos elétrons que ao se destacarem do material,

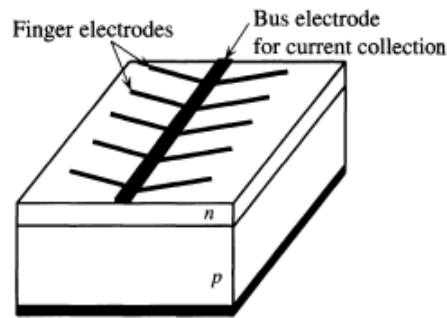


Figura 13 – Visão externa de uma célula solar com foco no contato frontal, onde vemos os eletrodos responsáveis por coletar a corrente elétrica gerada (*Bus electrode*).

Fonte: Retirada da referência (KASAP, 2006).

deixam buracos de carga positiva. Para que o efeito fotovoltaico aconteça, é preciso que não haja a recombinação imediata dos recém criados pares elétron-buraco. Nesse sentido a junção *p-n* é essencial, já que separa ambos os portadores de carga antes que eles se recombinem, através do potencial elétrico inerente a ela.

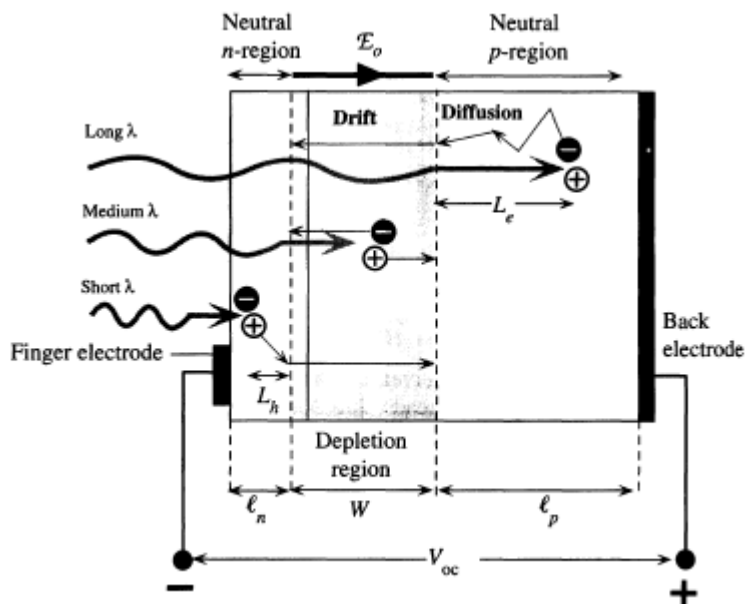


Figura 14 – Princípio de operação de uma célula solar. Na figura, observamos que as radiações mais energéticas penetram profundamente na estrutura, além da zona de depleção (*depletion region*), destacando os elétrons e deixando como remanescentes os buracos.

Fonte: Retirada da referência (KASAP, 2006).

Após a criação dos pares, os elétrons se movem para a parte superior da

junção (em direção a *n-region*) enquanto os buracos ocupam a parte de baixo da célula (*p-region*). O princípio básico que guia o funcionamento das células solares é a conservação da energia: Temos elétrons na parte superior que se movem até a parte inferior da célula se recombinando com os buracos. Os fótons conferem energia aos elétrons que no processo, geram os buracos, ou seja, eles perdem a energia recém adquirida e é por isso que ocorre a recombinação na parte inferior da célula solar, reiniciando o processo indefinidamente, o que justifica de certa forma a longevidade das células solares. É nesse sentido que temos a conservação da energia.

É importante deixar claro que a formação da camada de depleção (ou zona de transição) é responsável por produzir um campo elétrico forte o suficiente para dissociar os pares elétron-buraco formados após a absorção de fótons via incidência de radiação solar. Em toda célula solar esse é o desafio primordial e fundamental: Induzir a separação de pares elétron-buraco. Se isso não for possível, teremos a ocorrência do fenômeno de recombinação e o efeito fotovoltaico não terá a efetividade desejada.

Dessa forma, entendemos que a causa do efeito fotovoltaico nada mais é que a polarização natural que uma junção *p-n* sofre devido a composição dos materiais semicondutores, ou seja, de seus portadores de carga que passam a se movimentar livremente devido a interação com os fótons da radiação luminosa. A diferença de potencial oriunda do movimento das cargas na região de depleção é que caracteriza o efeito fotovoltaico em si. Esse potencial V_0 em função da temperatura T da junção *p-n* pode ser calculada através da relação (PINHO; GALDINO et al., 2014)

$$V_0(T) \approx \frac{K_b \cdot T}{e} \cdot \ln \left(\frac{N_n \cdot N_p}{n_i^2} \right) \quad (3.13)$$

Na equação (3.13) acima, além das constantes já mencionadas, temos que e é a carga do elétron, N_n a concentração de substância dopante do tipo *n* presente na junção e N_p a concentração da substância dopante do tipo *p*. Esse é o principal fenômeno responsável pela conversão da energia solar em energia elétrica através das células e painéis solares. Logicamente, os dispositivos hoje empregados com esse intuito são formados por vários outros componentes, compostos dos mais diversos elementos. Vamos conhecê-los a partir de agora (FADIGAS, 2012).

3.8.2 Características elétricas das células solares

Tendo em vista o espectro eletromagnético, sabe-se que em termos de incidência na atmosfera terrestre, as radiações do espectro correspondentes a região visível e infravermelho correspondem as maiores taxas, representando respectivamente 46% e 47% da quantidade de radiação total incidente, sendo que o restante é ocupado pela radiação ultravioleta e demais componentes do espectro. Com base nesses dados,

as células solares são construídas de forma a se beneficiar dessas porcentagens de radiação incidente. Os semicondutores escolhidos para compor as células também devem ter um valor de *gap* relativamente pequeno, menor que $2eV$ de preferência (VIAN et al.,). Na figura a seguir se encontra o gráfico da distribuição espectral da radiação solar

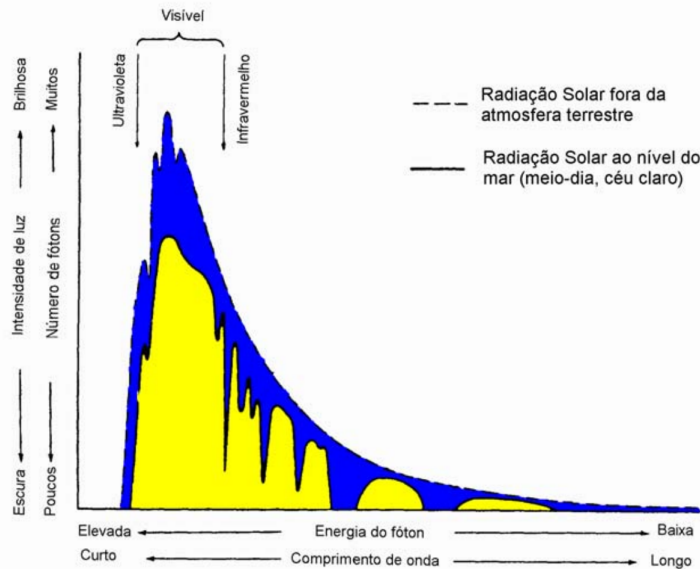


Figura 15 – Distribuição espectral da radiação solar na atmosfera terrestre, em três principais faixas de frequência/comprimento de onda: Ultravioleta, espectro visível e infravermelho. No gráfico, podemos observar a enorme representatividade da radiação do espectro visível.

Fonte: Retirada da fonte (BRITO, 2019)

As primeiras células solares foram elaboradas ainda no século XIX, junto as primeiras informações que se tinham notícia tanto do efeito fotoelétrico, quanto do efeito fotovoltaico. Utilizando o elemento químico selênio, os primeiros protótipos já elaborados no século XX não obtinham 1% de eficiência na conversão de radiação luminosa em eletricidade (VIAN et al.,). Nessa época, não se tinham teorias modernas que respaldassem o entendimento das descobertas desses fenômenos e avanços significativos envolvendo o estudo das células fotovoltaicas só ocorreriam na segunda metade do século XX, com a consolidação da física do estado sólido e da teoria das junções *p-n* (VIAN et al., ; PINHO; GALDINO et al., 2014).

A eficiência de uma célula fotovoltaica mede basicamente o quão eficaz é tal dispositivo ao converter energia luminosa em energia elétrica. Indicada por η , a eficiência pode ser equacionada como

$$\eta = \frac{P_f}{P_i} \quad (3.14)$$

Na equação (3.14) acima, P_f representa a potência elétrica fornecida/produzida pela célula solar e P_i a potência energética contida na radiação que incide sobre o dispositivo fotovoltaico. Como abordado anteriormente, a corrente elétrica em uma junção $p-n$ será composta das correntes próprias do semicondutor dopado (i_D e i_d) em conjunto com a corrente dos portadores de carga foto gerados (SZE, 1981; REZENDE, 2004). Matematicamente, podemos expressá-la a partir da equação de corrente elétrica em um diodo ideal ¹² (3.15) (PINHO; GALDINO et al., 2014)

$$I = I_l - I_0 \left[e^{\left(\frac{e^- \cdot V}{n \cdot K_b \cdot T} \right)} - 1 \right] \quad (3.15)$$

Na equação (3.15), I_l é a fotocorrente gerada a partir do fenômeno fotoelétrico, I_0 é a corrente de saturação, própria do diodo e n uma constante experimental adimensional, própria dos diodos, além das demais constantes já descritas. Note que, se a célula fotovoltaica não estiver exposta a qualquer radiação luminosa, I_l vale zero e a célula solar equivale a um diodo comum. Para uma equação mais próxima da realidade, devemos levar em consideração a resistência elétrica inerente da junção $p-n$ que compõem as células solares, bem como as que surgem devido as associações em série e paralelo que comumente esses dispositivos são organizados (PINHO; GALDINO et al., 2014). Conforme o exposto, a equação (3.15) (PINHO; GALDINO et al., 2014) assume a forma

$$I = I_l - I_0 \left[e^{\left(\frac{e^- \cdot (V + IR_s)}{n \cdot K_b \cdot T} \right)} - 1 \right] - \frac{V + (IR_s)}{R_p} \quad (3.16)$$

Onde R_s é o valor da resistência em série, e R_p da resistência em paralelo. É comum ao se trabalhar com células fotovoltaicas, organizá-las em sistemas integrados chamados de módulos. Módulos fotovoltaicos são organizações compactas de células solares que podem conter de dezenas a centenas de células em um único módulo, associadas em série ou paralelo dependendo da funcionalidade as quais se destinam. Para os módulos ligados em série, a corrente elétrica que perpassa todos os dispositivos possui o mesmo valor, já que o terminal negativo de uma célula é ligado ao terminal positivo da vizinha e assim por diante. Porém, o potencial elétrico V é obtido ao somar individualmente cada um dos respectivos valores V de cada célula, ou seja, algebricamente obtido pela soma dos potenciais (PINHO; GALDINO et al., 2014).

¹² Não entraremos em detalhes sobre a obtenção da equação (3.15), mas os interessados podem encontrar uma discussão detalhada na referência (REZENDE, 2004).

$$\text{Potencial : } V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \quad (3.17)$$

$$\text{Corrente : } I_T = I_1 = I_2 = I_3 \dots = I_n \quad (3.18)$$

Contrariamente, na associação em paralelo, terminais positivos são ligados entre si assim como os negativos. Nesse caso, portanto, teremos todos os dispositivos fotovoltaicos submetidos ao mesmo potencial V , porém, cada um sujeito a valores de corrente elétrica distinta.

$$\text{Potencial : } V = V_1 = V_2 = V_3 \dots = V_n \quad (3.19)$$

$$\text{Corrente : } I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (3.20)$$

A seguir, na figura (16), vemos o símbolo que representa o módulo fotovoltaico em um circuito. Já na figura (17) se encontra esquematizado um circuito elétrico que possui associação de células fotovoltaicas das duas formas supracitadas, ou seja, em série e paralelo

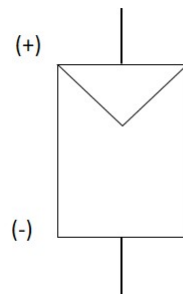


Figura 16 – Símbolo de representação de um módulo fotovoltaico em um circuito elétrico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

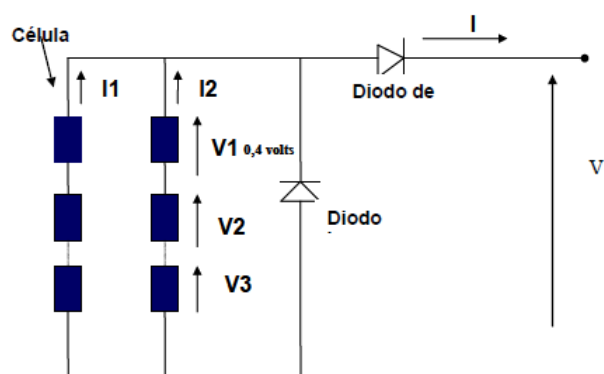


Figura 17 – Circuito contendo células solares associadas em série e em paralelo.

Fonte: Retirada da referência (FADIGAS, 2012).

3.9 Principais tipos de células solares

Na década de 1950, os dispositivos fotovoltaicos encontraram sua primeira aplicação, sendo instalados nos primeiros veículos espaciais com intuito de se tornar um meio efetivo para a obtenção de energia quando estes estavam a deriva no espaço, acontecimento que impulsionou aos poucos o reconhecimento desse tipo de tecnologia como potencialmente viável (PINHO; GALDINO et al., 2014; SILVA et al., 2004). Aos poucos o perfil industrial deste ramo foi se moldando e as cadeias de produção de dispositivos fotovoltaicos presentes atualmente no mercado podem ser, de forma geral, divididas em três gerações. A primeira geração é representada pelas células e painéis solares desenvolvidos a base de silício, compostas pelas células monocristalinas (m-Si) e policristalinas (p-Si).

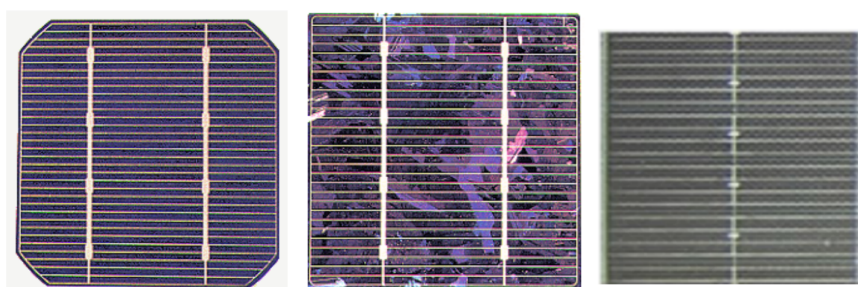


Figura 18 – Exemplo dos três tipos mais populares de células solares de silício. Da esquerda para a direita temos: Silício monocristalino, Silício policristalino e Silício amorfo.

Fonte: Retirada do site: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=381>

As células de primeira geração ocupam um lugar de destaque na produção mundial, e é estimado que ocupem de 80% a 95% do total de produtos desse nicho

disponíveis no mercado. Isso se deve, dentre outros fatores, ao fato de serem as mais antigas a se consolidarem como tecnologias confiáveis e de apresentarem eficiência aceitável para os padrões das células solares. Elas possuem, de forma geral, eficiências bem próximas uma da outra se diferenciando basicamente no número de cristais solidificados que compõe a célula: Nas monocristalinas com apenas um cristal que preenche toda a célula e nas policristalinas vários cristais separados que em conjunto ocupam a área total célula fotovoltaica.

Além das características individuais que distinguem os dois tipos de células a base de silício cristalino, há ainda, tecnologias específicas que buscam intensificar a eficiência dessas células, ampliando o processo de aproveitamento de radiação solar e da subsequente conversão. São elas, a tecnologia PERC ¹³ e as células ditas híbridas (ou em *tandem*) (PINHO; GALDINO et al., 2014; VIAN et al.,).

As células solares que utilizam a tecnologia PERC possuem uma camada responsável pela passivação, que em termos das células fotovoltaicas consiste em reduzir a taxa de recombinação dos portadores de carga, intensificando o trânsito de um maior número deles na célula. A camada adicional possui ainda a função de servir como uma estrutura derradeira de reflexão da radiação solar, fazendo com que a luz solar atravesse mais vezes o silício dopado, impulsionando assim o processo fotovoltaico (PINHO; GALDINO et al., 2014; VIAN et al.,).

As células híbridas, ou organizadas no modelo *tandem* são células solares estratificadas, onde cada camada é responsável por converter especificamente uma região do espectro eletromagnético, deixando o excedente para a parte final da hierarquia, sendo assim uma tecnologia que aumentaria consideravelmente a eficiência das células uma vez que potencializa o fenômeno de conversão fotovoltaica. Ao contrário da tecnologia PERC que já está praticamente consolidada no mercado, principalmente quando falamos em células de silício monocristalinas, a tecnologia *tandem* devido ao alto custo de produção ainda é um bônus distante de ser financeiramente acessível (PINHO; GALDINO et al., 2014; VIAN et al.,).

A segunda geração de células fotovoltaicas é composta principalmente de dispositivos a base de filmes finos (termo derivado do inglês *thin film*). São assim denominadas em virtude da espessura das camadas dos materiais semicondutores que as compõem, da ordem de micrômetros, depositados uns sobre os outros de forma padronizada. Embora financeiramente sejam bem acessíveis se comparadas as anteriores e o mercado de forma geral tenha aberto possibilidades de sua inserção, a baixa eficiência dessas células, dentre outros problemas ainda é o principal fator que impede sua disseminação. As três principais linhas de produção das células solares

¹³ Do inglês *Passivated Emitter Rear Cell/Contact*. Significa, em tradução livre, “Emissor Passivado na Célula (ou contato) Traseira”.

a base de filmes finos são: Silício amorfo (a-Si), Disseleneto de cobre e índio (CIS) ou Disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e Telureto de cádmio (CdTe) (PINHO; GALDINO et al., 2014; VIAN et al.,).



Figura 19 – Visão em corte de célula solar de filmes finos (Telureto de Cádmio) CdTe.

Fonte: Retirada da referência (FADIGAS, 2012)

A terceira geração de células fotovoltaicas é caracterizada por ainda está em fase de desenvolvimento, e tudo que se tem ainda são projeções fornecidas por protótipos. Dentro dessa linha de pesquisa, talvez as que mais chamem atenção pela natureza díspar sejam as células sensibilizadas por corantes e as chamadas orgânicas ou poliméricas que apresentam um promissor potencial de eficiência (PINHO; GALDINO et al., 2014).

3.9.1 Breve histórico da energia solar no Brasil e no mundo

Desde a descoberta do efeito fotovoltaico por Becquerel, houve o desejo de aproveitar a energia proveniente do sol para suprir as crescentes necessidades energéticas nas mais diversas aplicações. Inicialmente, a indústria de telecomunicações ansiava por fontes de energia que pudessem ser efetivas e ao mesmo tempo operadas de forma remota. Este foi um dos primeiros fatores relevantes que incentivou o estudo e desenvolvimento de dispositivos que pudessem realizar tal feito (PINHO; GALDINO et al., 2014).

Cronologicamente, e como já anteriormente citado, a corrida espacial favoreceu a ampla pesquisa no setor fotovoltaico, já que uma vez no espaço, satélites e veículos espaciais tripulados necessitavam de um meio para obter energia de forma rápida e fácil, a fim de alimentar os mais diversos equipamentos levados a bordo, e nesse sentido, a energia fotovoltaica talvez fosse o único meio viável. A crise do petróleo em 1973 ¹⁴ e mais tarde as propostas do protocolo de Kyoto ¹⁵ fizeram com que

¹⁴ Crise político-econômica que afetou as principais potências da época e a economia mundial como um todo, caracterizada pelo aumento excessivo do preço do combustível fóssil, principal produto de exportação dos países do oriente médio. A ação foi tomada sobre o pretexto do recurso natural não ser renovável, mas possuía também motivos políticos, sendo uma resposta direta aos apoiadores de Israel na guerra de *Yom Kippur*, como os Estados Unidos, por exemplo.

¹⁵ Assinado no ano de 1997, acordava que os países participantes deveriam reduzir drasticamente a

busca por fontes renováveis de energia que não agredissem o meio ambiente fossem intensificadas, implicando também na procura por soluções imediatas dos principais problemas da tecnologia fotovoltaica, como o alto custo de materiais e de produção (PINHO; GALDINO et al., 2014).

De início, era quase unânime a escolha do silício como principal material semicondutor utilizado na fabricação das células solares, e mesmo hoje, com a descoberta e exploração dos mais diversos materiais, sua predominância no mercado mundial ainda se mantém. Até a década de 1980 quando era dominada pelos Estados Unidos, hoje a Europa possui uma posição de destaque, sendo a grande campeã quando tratamos de potência fotovoltaica instalada, sendo a Alemanha e Itália os grandes expoentes desse continente. Em se tratando de fontes renováveis, a energia gerada por meios fotovoltaicos só perde para a eólica e gás natural. Esse destaque europeu se deveu em grande parte, aos incentivos fornecidos por políticas públicas em relação a produção de energia nessa modalidade (PINHO; GALDINO et al., 2014; VIAN et al.,).

Esse *boom* vivenciado pelos países europeus se refletiu em outros locais do planeta, tendo talvez a China como maior exemplo. Estima-se que desde 2006 vem ocorrendo neste país um grande investimento na produção de energia fotovoltaica e a China hoje está totalmente consolidada como a maior produtora de módulos fotovoltaicos a nível mundial (PINHO; GALDINO et al., 2014; VIAN et al.,). Na figura (20), podemos observar graficamente a potência fotovoltaica instalada em diversos países no ano de 2018, período em que o aproveitamento desse tipo de fonte renovável só foi superado pela energia obtida por meios eólicos e a proveniente de hidrelétricas:

Partindo para um contexto nacional, a potencialidade do Brasil em se aproveitar desse meio de obtenção de energia é gigantesca. Como fatos que corroboram esta perspectiva, podemos citar os altos níveis de insolação durante todo o ano, ampla extensão territorial que pode abrigar de pequenos centros a extensas usinas fotovoltaicas, bem como um clima uniforme e sem grandes alterações bruscas. Aliada a atividades econômicas de destaque nacional como a agricultura, pode vir a se tornar uma prática de imensa importância para a economia vigente (PINHO; GALDINO et al., 2014; VIAN et al., ; FADIGAS, 2012).

Em um país onde a maior parte da energia utilizada pela população provém de fontes renováveis (como as hidrelétricas, por exemplo), outras formas de obtenção de energia limpa são muitas vezes deixadas de lado. Porém, a grande potencialidade da energia fotovoltaica em território nacional se encontra justamente no fato de que ela é tão viável e efetiva quanto a obtida por meios hídricos.

Abaixo, na figura (21), se encontra um gráfico do ano de 2019 que exhibe a

emissão de gases poluentes como o dióxido de carbono (CO_2), um dos principais responsáveis pelo efeito estufa e o aquecimento global.

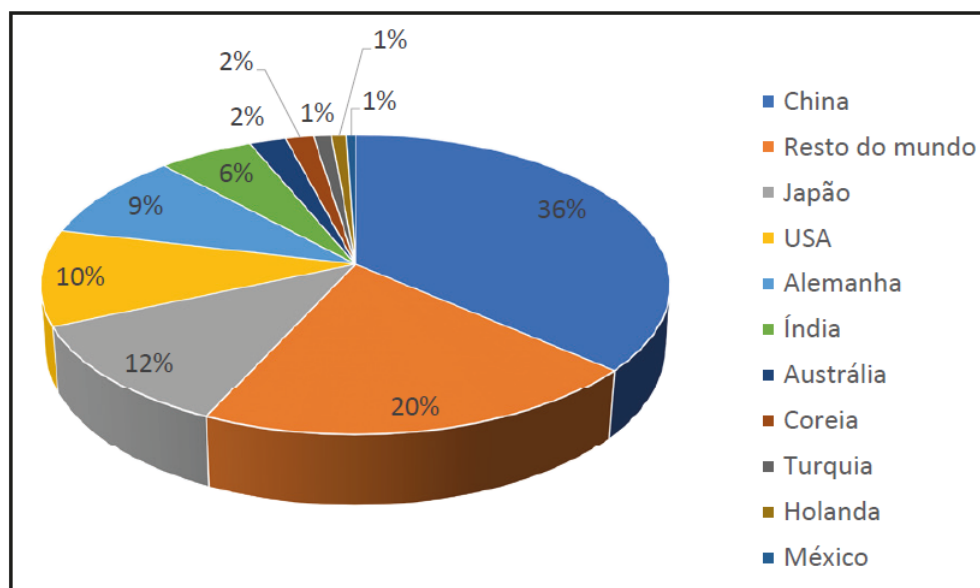


Figura 20 – Gráfico que resume a produção de energia por meios fotovoltaicos (em termos de potência) no ano de 2018.

Fonte: Retirada da referência (VIAN et al.,)

ainda baixa porcentagem da energia solar em âmbito nacional, sendo representada por apenas 2,1 % do total (VIAN et al.,).

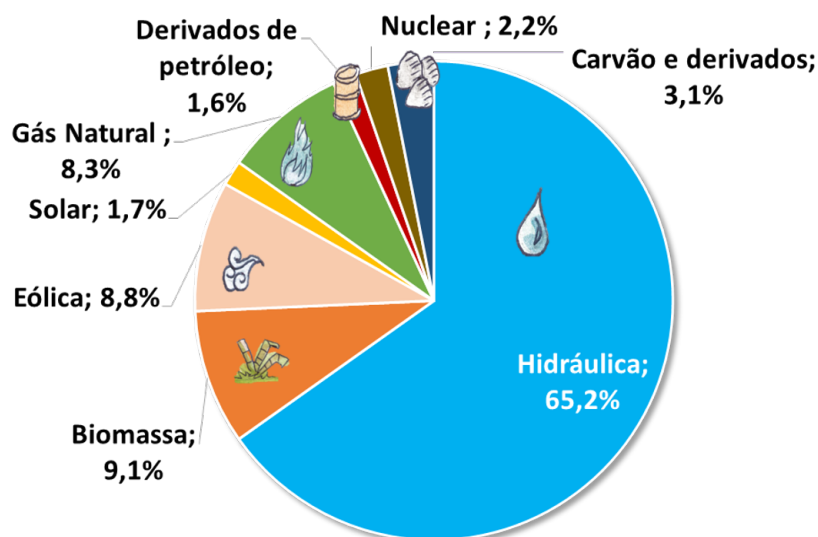


Figura 21 – Matriz energética brasileira em 2021.

Fonte: Retirada da referência (BALANCE, 2021)

A história da tecnologia fotovoltaica no Brasil tem um repertório complexo, permeado por épocas de grande desenvolvimento e outras de declínio e estagnação. Na década de 1950, a temática era trabalhada principalmente em universidades e

institutos especializados como a Universidade de São Paulo (USP) e o Instituto Nacional de Tecnologia (INT). Tendo como foco inicial a produção de células fotovoltaicas a base de silício monocristalino, os filmes finos como matéria prima só seriam explorados na década de 1970 principalmente pelo Instituto Militar de Engenharia (IME). Nessa época o mundo vivenciava a crise mundial do petróleo e o Brasil não estava muito atrás das grandes potências da época em termos de pesquisa e desenvolvimento de tecnologia fotovoltaica, sendo que no início dos anos 80 já se tinha em território nacional, duas fábricas de células fotovoltaicas a base de silício cristalino (PINHO; GALDINO et al., 2014).

Contudo, com o passar do tempo, vários grupos de pesquisa foram dissolvidos principalmente devido a falta de incentivos na área e o veloz processo de desenvolvimento tecnológico aos poucos foi conhecendo certo declínio, cessando, o que acarretou na diminuição do ritmo de produção de várias fábricas e no fechamento de tantas outras. Atualmente existem grupos especializados neste ramo tanto no meio público quanto no privado, pesquisando desde a purificação de células de silício até novas possíveis aplicações dessa tecnologia. Mas com tamanha defasagem em relação ao resto do mundo, a pesquisa e indústria brasileira ainda tem um longo caminho pela frente (PINHO; GALDINO et al., 2014).

Segundo (VIAN et al.,), as principais aplicações da energia fotovoltaica em âmbito nacional atualmente são:

- Bombeamento de água,
- Uso coletivo (Geração de energia em escolas, postos de saúde etc.),
- Uso residencial e comercial,
- Telefonia e atendimento remoto.

4 A elaboração e aplicação do produto educacional

Este capítulo será voltado exclusivamente para a descrição e aplicação do produto educacional (Apêndice A) elaborado sob a vigência do programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF). Nas três principais seções que o compõem, abordaremos, nessa mesma ordem: A descrição do produto educacional, a aplicação do mesmo na educação básica e os resultados esperados e obtidos através dos métodos avaliativos que o compõem.

4.1 Descrição do produto educacional

Como um trabalho inteiramente pensado em prol da teoria da aprendizagem significativa, o principal objetivo configurava-se, portanto em detectar indícios desse tipo de aprendizagem. Sendo assim, o conteúdos que seriam abordados, próprios da Física moderna e contemporânea, ensinados de forma sequencial a fim construir com os alunos um conhecimento sólido em relação ao funcionamento das células e painéis solares foram implementados em uma metodologia adequada para o ensino dos mesmos, tendo em vista a TAS. Por isso o uso das UEPS's. De forma a complementá-las e torná-las mais dinâmicas, planejou-se para cada uma das UEPS's elaboradas (duas, no total), o uso dos três momentos pedagógicos (3MP), que além de organizar cada aula em um conjunto de momentos específicos para cada atividade, conversam entre si a fim de tornar o conhecimento apresentado, conciso e claro para o aluno.

A primeira UEPS com duração de duas aulas (2 horas-aula de 50 minutos cada) voltada ao ensino do efeito fotoelétrico (fenômeno de extrema importância para o entendimento do efeito fotovoltaico nas células solares) e a segunda UEPS com duração de 3 aulas (3 horas-aula de 50 minutos cada) focada no estudo dos materiais semicondutores (que culmina no entendimento do funcionamento das células solares).

Cada UEPS é uma sequência didática bem estruturada, construída com base em um tema específico que se deseja ensinar, incorporando as mais diversas metodologias e materiais no processo. Nas duas UEPS's elaboradas, a metodologia implementada em todas as cinco aulas foram os três momentos pedagógicos, com a ausência de um ou outro momento em algumas aulas, além de simulações computacionais, vídeos e demais recursos auxiliares úteis. Devido ao contexto pandêmico atual, todas as aulas foram pensadas para o modelo remoto, ou seja, para serem ministradas por videoconferência. Dito isso, cada aula foi preparada utilizando um programa para

confeção, edição e exibição de arquivos gráficos, justamente para serem apresentadas via chamada de vídeo para os alunos, utilizando o *Google meet*.

O público alvo almejado para a aplicação do produto foram alunos do terceiro ano do ensino médio, visto que esses em específico já provavelmente tiveram contato com os conteúdos de eletricidade, essenciais para o entendimento dos conceitos mais avançados de Física Moderna e Contemporânea que serão trabalhados em aula. A avaliação de ambas as unidades de ensino foram feitas de duas formas: Via questionários aplicados pela plataforma *Google forms* e mapas mentais (um para cada UEPS), a fim de diagnosticar o entendimento dos conteúdos por partes dos alunos.

Durante a elaboração e planejamento das aulas prezou-se pela dinamicidade das mesmas, no sentido de não serem encaradas pelos alunos como algo monótono ou extenso demais. Nesse sentido, embora cada UEPS merecesse ser bem maior e abranger mais aulas a fim de abordar um maior número de conteúdos com muito mais detalhes, prezou-se por compor cada UEPS com o mínimo de aulas possíveis. Por isso cada aula tem início, meio e fim, iniciando um conteúdo e finalizando-o, contando ainda (algumas delas, pelo menos) com aplicações do que está sendo estudado. A seguir se encontram as respectivas estruturas gerais das UEPS's mencionadas. O produto educacional pode ser acessado no Apêndice A. Na próxima seção destinada a descrição da aplicação do produto educacional, abordaremos em detalhes o andamento de cada uma das aulas.

4.1.1 UEPS nº 1

Tema: Efeito fotoelétrico.

Turma indicada para a aplicação: 3º ano (série) do Ensino Médio.

Duração da UEPS: 2 aulas.

Objetivo Geral: Ensinar o conceito e as principais características do fenômeno conhecido como efeito fotoelétrico.

Objetivos específicos:

- Apresentar o conceito de quantização, elaborada por Max Planck, em meados de 1900;
- Explicar a dualidade onda-partícula e a diferença entre ambas as formulações, tendo como temática para estudo, aplicações como os painéis solares;
- Apresentar a explicação fornecida por Einstein para o efeito fotoelétrico, mostrando sua eficácia em sanar as principais inconsistências do modelo clássico.

Materiais necessários para a realização da UEPS: Além de todos os recursos necessários para executar uma aula expositiva remota, a sequência didática utilizará também recursos experimentais como a placa Arduino em um experimento previamente executado e apresentado aos alunos.

Metodologia base da UEPS: Tem-se como teoria de ensino base, a aprendizagem significativa (TAS) de David Ausubel. A metodologia que fundamenta a UEPS são os três momentos pedagógicos (3MP), idealizados por Delizoicov, Angotti e Pernambuco, procedimento esse que tem como referência o método Freiriano de ensino.

Avaliação da UEPS: A avaliação se dará no âmbito formativo e somativo, esse último na forma de questionário contendo questões discursivas e objetivas sobre o tema, além de mapas mentais para investigar a aprendizagem dos conceitos por parte dos alunos. A avaliação pode contar ainda com questionários auxiliares contendo questões objetivas sobre a metodologia e a prática pedagógica adotada no decorrer das atividades desenvolvidas.

4.1.2 UEPS nº 2

Tema: Os materiais semicondutores, as células solares e suas aplicações.

Turma indicada para a aplicação: 3º ano (série) do Ensino Médio.

Duração da UEPS: 3 aulas.

Objetivo Geral: Apresentar a definição e as principais características dos materiais semicondutores, com foco especial em uma de suas maiores aplicações atuais; as células e painéis solares.

Objetivos específicos:

- Apresentar aos alunos o conceito de condutividade elétrica, e quais fenômenos, estruturas e processos são responsáveis por essa característica;
- Conscientizar os alunos sobre o desenvolvimento sustentável e a importância ambiental ao se considerar novos meios de obtenção de energia;
- Situar os educandos sobre o contexto, aplicações, vantagens e desvantagens de se utilizar a tecnologia fotovoltaica como fonte de energia elétrica;
- Instigar a reflexão sobre as aplicações regionais e locais da energia solar onde vivem, traçando um elo entre o que foi aprendido e o que podem vivenciar na cidade/Estado onde moram.

Materiais necessários para a realização da UEPS: Além de todos os recursos necessários para executar uma aula expositiva remota, a sequência didática utilizou

também recursos experimentais assistidos, ou seja, as simulações computacionais executadas pelo professor e demonstrada aos alunos em aula.

Metodologia base da UEPS: Tem-se como teoria de ensino base, a aprendizagem significativa de David Ausubel. A metodologia que fundamenta a UEPS são os três momentos pedagógicos, idealizados por Delizoicov, Angotti e Pernambuco, procedimento esse que tem como referência o método Freiriano de ensino.

Avaliação da UEPS: A avaliação se dará no âmbito formativo e somativo, esse último na forma de questionário contendo questões objetivas e discursivas sobre o tema, além de mapas mentais para investigar a aprendizagem dos conceitos por parte dos alunos. A avaliação pode contar ainda com questionários auxiliares contendo questões objetivas sobre a metodologia e a prática pedagógica adotada no decorrer das atividades desenvolvidas.

4.2 A aplicação do produto educacional

O produto educacional em questão foi aplicado em uma turma de terceiro ano do ensino médio da cidade de Imperatriz, estado do Maranhão, de forma 100% remota, via plataforma *Google meet*. Como mencionando anteriormente, as unidades didáticas consumiram ao todo cinco aulas de 50 minutos, dispostas em duas semanas consecutivas com intuito de não sobrecarregar os alunos, visto que esses estudavam no turno vespertino e o horário para aplicação do produto decidido em consenso com os mesmos foi pela manhã. Todas as aulas foram ministradas no mês de outubro de 2021 (10/2021), sendo ao todo, compreendidas em cinco dias diferentes de duas semanas diferentes e consecutivas, mais especificamente nos dias 20, 22, 25, 27 e 29 de outubro, ou seja, uma aula por dia. O horário escolhido foi o das 09:00 às 10:00 horas da manhã.

Como também já mencionado na seção anterior, as cinco aulas estão dispostas em duas UEPS's, a primeira composta de duas aulas tendo como conteúdo alvo o efeito fotoelétrico e a segunda UEPS com duração de três aulas focada nos materiais semicondutores, células e painéis solares. Após todas as aulas das respectivas UEPS's terem sido ministradas, os alunos foram submetidos a processos avaliativos para diagnosticar seu aprendizado em relação aos conteúdos abordados. As aulas ainda contaram com artifícios interativos como aplicações do efeito fotoelétrico feita com a placa Arduino (aula 2 da UEPS nº 1) e simulações computacionais a fim de exemplificar como ocorre o processo de dopagem dos semicondutores a nível atômico e molecular (aula 2 da UEPS nº 2). A seguir, quando tratarmos especificamente de cada aula e as atividades desenvolvidas na mesma, entraremos em detalhes sobre cada uma dessas aplicações didáticas.

Todas as avaliações foram feitas *offline*, após o encerramento de cada UEPS, sendo compostas de questionários (um para cada UEPS), e elaboração de mapas mentais (da mesma forma, um para cada UEPS). Na seção seguinte discutiremos todos os detalhes da avaliação e os resultados obtidos.

As aulas, de forma geral contaram com um bom quantitativo de alunos, sempre possuindo mais de dez (10) estudantes presentes. Embora não se manifestassem tanto durante as aulas, os alunos, talvez pela timidez, vinham sempre após as aulas tirar dúvidas ou saber mais detalhes sobre o que havia sido discutido em cada aula por meio de um aplicativo de mensagem instantânea, plataforma onde também tínhamos um grupo destinado a organização, informes e discussões sobre as atividades do produto educacional. Coletar informações mais subjetivas como expressões faciais ou até mesmo dúvidas mais pessoais de cada um foi um verdadeiro desafio, visto que o modelo remoto nos impõe apenas supor o que está acontecendo, uma vez que não podemos ver os alunos (eles não estavam com as câmeras ativas) e raramente os mesmos se comunicavam por áudio, só quando solicitado. Dessa forma, a avaliação formativa não foi tão proveitosa quanto deveria.

Na tabela a seguir se encontram descritas, de forma resumida, todas as atividades desenvolvidas em cada aula bem como os momentos pedagógicos utilizados em cada aula.

Tabela 1 – Resumo das atividades desenvolvidas no produto educacional

Estrutura geral das UEPS's do Produto Educacional			
Aula	Tema	Momento Pedagógico	Atividades desenvolvidas
Aula 1/ UEPS nº 1	A concepção clássica do efeito fotoelétrico	Primeiro momento pedagógico	Questões de problematização inicial: O que é a luz? Qual a sua composição? Já ouviram falar do efeito fotoelétrico? Conhecem alguma aplicação do efeito fotoelétrico?
		Segundo momento pedagógico	Aulas expositivas sobre os conteúdos de Física ondulatória (princípios básicos), noção geral de ondas eletromagnéticas, a descoberta do elétron, o modelo atômico de Thomsom e o efeito fotoelétrico (visão clássica).

Aula 2/ UEPS nº 1	A concepção quântica do efeito fotoelétrico	Primeiro momento pedagógico	Utilização de uma aplicação do efeito fotoelétrico apresentada aos alunos através de um vídeo gravado pelo professor. Utilizando a placa Arduino, simulou-se o mecanismo de acendimento automático dos postes de iluminação pública.
		Segundo momento pedagógico	Aula expositiva abordando os conteúdos de introdução a teoria quântica, catástrofe do ultravioleta, radiação de corpo negro (como mais um dos problemas que a física clássica não conseguia lidar), a quantização da energia e a proposta de Einstein para o efeito fotoelétrico (comportamento corpuscular da luz).
		Terceiro momento pedagógico	Voltado aos detalhes do funcionamento do mecanismo presente nos postes de energia e de outras aplicações semelhantes do efeito fotoelétrico utilizadas em larga escala em nossa sociedade.
Aula 3/ UEPS nº 2	Introdução a Física do estado sólido	Primeiro momento pedagógico	Questões de problematização inicial: Por que os semicondutores são tão importantes para a tecnologia fotovoltaica que estudaremos adiante? Qual o fator que os torna tão especiais frente a outros tipos de materiais?
		Segundo momento pedagógico	Aula expositiva abordando os seguintes conteúdos: Introdução a Física do estado sólido e da matéria condensada (principal diferença entre ambas e objetos de estudo), ligações atômicas, estados básicos da matéria e condutividade dos materiais

Aula 4/ UEPS nº 2	Os materiais semiconduto- res	Primeiro mo- mento peda- gógico	Questões utilizadas para a problematiza- ção inicial: Qual a relação entre os materi- ais semicondutores e os painéis solares? Qual a relação do efeito fotoelétrico e a geração de energia através das células e painéis solares? Como vocês acham que essa tecnologia funciona?
		Segundo mo- mento peda- gógico	Aula expositiva envolvendo os conteúdos referentes aos semicondutores como: Principais propriedades dos semicondu- tores, dinâmica dos portadores de carga em materiais semicondutores, impurezas e dopagem de semicondutores.
		Terceiro mo- mento peda- gógico	Simulação computacional ¹ apresentada aos alunos, envolvendo o processo de dopagem dos semicondutores, exemplifi- cando como tal fenômeno ocorre a nível atômico.
Aula 5/ UEPS nº 2	A tecnologia fotovoltaica	Primeiro mo- mento peda- gógico	Voltado a discussões referentes ao eixo CTSA, como: O que vocês sabem so- bre sustentabilidade? A energia obtida através da radiação solar é uma energia renovável? Pode ser benéfica ou preju- dicial de alguma forma? Qual/Quais das cinco regiões do nosso país seria a mais propícia para esse tipo de tecnologia?
		Segundo mo- mento peda- gógico	Aula expositiva abordando os conteúdos de: Junções <i>p-n</i> , o efeito fotovoltaico e princípios gerais de funcionamento das células solares.
		Terceiro mo- mento peda- gógico	Apresentação das células e painéis sola- res como uma aplicação direta de tudo que foi estudado até então nas aulas, apresentando a tecnologia fotovoltaica como uma das mais promissoras no que- sito energia sustentável.

¹ As animações/simulações podem ser baixadas no *Link*: <<http://science.sbcc.edu/physics/flash/>>. Tratam-se de animações que guiam o executor nos processos de dopagem dos materiais, interações dos elétrons com os fótons e o surgimento dos buracos na estrutura cristalina.

Nos itens a seguir se encontram de forma detalhada, a descrição completa das atividades desenvolvidas em cada aula:

4.2.1 Aula 1 - A concepção clássica do efeito fotoelétrico

A primeira aula do produto educacional (e primeira aula da UEPS nº 1, ministrada no dia 20/10) contou antes de tudo com um momento de apresentação e contextualização com os alunos do que se tratava as atividades que estaríamos desenvolvendo nessas duas semanas. Após a apresentação pessoal do professor, seguiu-se para os detalhes do produto, ou seja, quantas aulas disporíamos, os conteúdos que seriam ministrados, além da metodologia utilizada. Foi explicado o que seria uma UEPS e os três momentos pedagógicos, que seriam utilizados em todas as aulas. Sendo assim, os alunos logo na primeira aula ficaram a par de tudo que aconteceria nesse período de aplicação do produto, bem como as atividades avaliativas que eles seriam submetidos ao final de cada UEPS.

Esta aula iniciou-se com questionamentos (de certa forma, retóricos) sobre o que seria a luz, sua real natureza, além de serem indagados se já tinham ouvido falar do famigerado efeito fotoelétrico e suas aplicações, assunto principal dessa e da aula seguinte. Obtendo como resposta um unânime “não”, o momento destinado a problematização inicial não durou mais que dez minutos. O próximo momento, a organização do conhecimento, contou com aulas expositivas elaboradas em programas digitais, onde foram abordados os conteúdos de princípios da Física ondulatória (período de uma onda, frequência de uma onda, cristas, vales etc.), ondas eletromagnéticas (o princípio geral), ondas mecânicas (ondas que necessitam de um meio para se propagar) e descoberta do elétron (bem como o modelo atômico de Thomsom, o descobridor da partícula elementar) antes de chegar no efeito fotoelétrico.

O efeito fotoelétrico foi abordado logo em seguida, partindo das primeiras observações (por Heinrich Hertz) até as descrições mais precisas do mesmo (fornecidas principalmente por Philipp Lenard), bem como resultados que eram obtidos experimentalmente naquela época. É nesse ponto que reside o foco da aula, mostrar aos alunos que a visão clássica do efeito fotoelétrico não condizia com os dados experimentais observados naquela época, ou seja, havia inconsistências que não eram sanadas pela Física conhecida até então.

Ao final da aula, o “gancho” para a próxima foi deixado ao citar que veríamos como as inconsistências do efeito fotoelétrico clássico foram sanadas pelas contribuições da teoria quântica de Max Planck (1858-1947), utilizadas pelo famoso físico Albert Einstein (1879 -1845) em seu modelo corpuscular da luz. Esta aula não contou com o terceiro momento pedagógico, voltado a aplicação do conhecimento. Foi a aula

com maior frequência de todas do produto educacional como um todo, contando com dezesseis (16) alunos.

4.2.2 Aula 2 - A concepção quântica do efeito fotoelétrico

A segunda aula do produto educacional (e a última da UEPS nº 1, ministrada no dia 22/10) foi iniciada com uma aplicação do efeito fotoelétrico bem comum ao cotidiano de cada um: O acendimento “automático” das lâmpadas dos postes de iluminação pública. Essa atividade pode ser encarada tanto como um momento de problematização inicial, já que suscita nos estudantes indagações que serão relevantes as discussões sobre o fenômeno físico abordado, como um momento de aplicação do conhecimento, sendo uma óbvia utilização da teoria estudada em uma situação prática. A aplicação trata-se de como as luzes acendem e apagam. De forma resumida: Acoplado a cada um existe um dispositivo que é sensível a luz solar (um sensor de resistência dependente da luz, por exemplo) que identifica se o ambiente está iluminado ou não basicamente. Assim, quando está claro (durante o dia) o sensor aumenta drasticamente a resistência e impede a corrente de passar, abrindo o circuito e mantendo a lâmpada do poste apagada. Quando o sol se põe e anoitece, o sensor tem resistência elétrica muito inferior ao que tinha anteriormente e por isso o circuito é fechado e a lâmpada acende.

A ideia inicial era trazer o experimento utilizando a placa Arduino e executá-lo junto aos alunos em chamada de vídeo (pelo Google meet, onde todas as aulas foram realizadas), mas por questão de praticidade, optou-se por executar o programa no Arduino que simularia o que acontece nos postes de iluminação pública *offline*, sendo apresentado aos alunos apenas o vídeo da simulação executada pela placa gravado previamente pelo professor, acompanhado das explicações sobre tudo que estava ocorrendo (além dos detalhes do que seria uma placa Arduino, programa a ser executado no arduino, componentes do circuito etc.). O programa executado no Arduino basicamente acenderia um LED na ausência de luz, e o apagaria na presença da mesma, tudo graças ao sensor LDR (Light Dependent Resistor) utilizado no circuito. Esse tipo especial de resistor altera seu valor de resistência elétrica conforme a luminosidade do local, como descrito acima. Esse primeiro momento de aula consumiu cerca de 20 minutos da aula.

O segundo momento da aula, destinado a organização do conhecimento foi voltado para uma aula expositiva, abordando os seguintes conteúdos: O surgimento da teoria quântica, catástrofe do ultravioleta e o problema da radiação de corpo negro, quantização da energia e por fim, a descrição quântica do efeito fotoelétrico. O principal foco dessa aula era mostrar aos alunos como a nova teoria surgida em meados de 1900, utilizada de forma astuta por Albert Einstein, explicava de forma concisa as deficiências que o modelo clássico do fenômeno possuía.

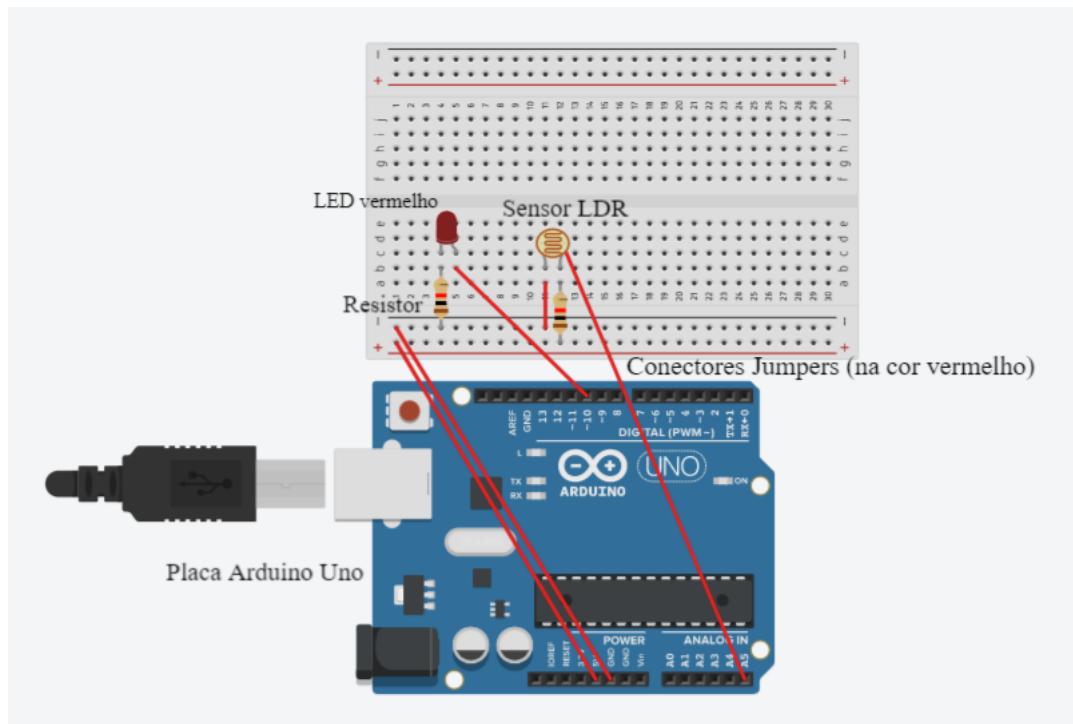


Figura 22 – Montagem do circuito LED + LDR no Arduino.

Fonte: Elaborada e editada pelo autor no *software Tinkercad*.

Os alunos foram então expostos a natureza dual da luz, a dualidade onda-partícula. O terceiro momento pedagógico foi abordado junto ao primeiro, no início da aula, apresentando uma aplicação presente em nosso dia a dia do efeito fotoelétrico, além de outras aplicações citadas e discutidas superficialmente. Com isso, teve fim a primeira UEPS. Agora os alunos estavam aptos a responderem o questionário de perguntas que abordavam o que foi visto em aula, além de terem plena capacidade de relacionar os conceitos estudados através de um mapa mental. A aula contou com 10 alunos ao todo. Todos os detalhes do processo avaliativo dessa etapa e da posterior será abordado nas próximas seções.

4.2.3 Aula 3 - Introdução a física do estado sólido

Na terceira aula do produto educacional (e primeira da UEPS nº 2, ministrada no dia 25/10), o foco seria os conteúdos que antecedem o estudo dos materiais semicondutores propriamente ditos, por isso, o primeiro momento pedagógico voltado a problematização inicial indagava justamente isso: Por que os semicondutores são tão importantes para a tecnologia fotovoltaica que estudaremos adiante? Qual o fator que os torna tão especiais frente a outros tipos de materiais? Foram perguntas feitas diretamente aos alunos presentes na aula. Poucos se manifestaram (um acontecimento que se estenderia por toda a aplicação), e os que o fizeram responderam basicamente

“não faço ideia professor!”. Apesar de não responderem as questões, o intuito delas era fazê-las questionar a si mesmos sobre as discussões levantadas, instigando-os a relacionar mais facilmente os conceitos que seriam posteriormente abordados.

O segundo momento se seguiu conforme as aulas passadas, com uma aula expositiva sobre os conteúdos que condizem com a física do estado sólido e a organização atômica e molecular dos materiais. Os conteúdos abordados foram: Panorama geral sobre a Física do estado sólido e Física da matéria condensada, ligações atômicas (iônica, covalente e metálica), diagrama de Pauling, estados básicos da matéria (a organização atômica dos gases, líquidos e sólidos) e condutividade dos materiais (em termos das bandas de energia e dos valores de *gap* dos materiais).

O foco dessa aula era abordar a propriedade de condutividade elétrica dos materiais, explicando-as com base no conceito de bandas e *gap's* de energia, evidenciando a diferença primordial entre os materiais condutores, semicondutores e isolantes nesse quesito. A aula não contou com o terceiro momento pedagógico voltado a aplicação do conhecimento. Essa, de todas as aulas foi a mais densa, em termos de novos conteúdos abordados, o que pode ter deixado os alunos inibidos, visto que *offline*, não houve procura para entender melhor os conceitos trabalhados como houve anteriormente. A aula seguiu com a mesma quantidade de alunos em média que as anteriores, contando com 12 estudantes ao todo.

4.2.4 Aula 4 - Os materiais semicondutores

Na quarta aula do produto educacional (e segunda da UEPS nº 2, ministrada no dia 27/10), contou com o primeiro momento de problematização inicial voltado a relacionar tudo que havíamos visto até então. Perguntas como: Qual a relação entre os materiais semicondutores e os painéis solares? Qual a relação do efeito fotoelétrico e da geração de energia através das células e painéis solares? Como vocês acham que essa tecnologia funciona? foram feitas aos alunos que após dois minutos de silêncio nada responderam. O intuito aqui era fazê-los perceber que o efeito fotoelétrico e os materiais semicondutores seriam de vital importância para o entendimento do fenômeno responsável pela produção de energia elétrica em uma célula solar, conteúdo da próxima aula. Após as perguntas serem feitas pelo professor, o mesmo forneceu pistas para que os alunos fossem aos poucos estabelecendo essas conexões.

O segundo momento destinado a organização do conhecimento contou novamente com uma aula expositiva sobre os seguintes tópicos: Principais propriedades dos materiais semicondutores (resistência elétrica variável com a temperatura, de forma diferente dos condutores, por exemplo), portadores de carga em um semicondutor (elétrons e buracos), impurezas e dopagem de semicondutores (dopagem do tipo *n* e *p*, especificamente) e a diferença fundamental entre semicondutores intrínsecos e

extrínsecos (puros e dopados, respectivamente). O foco aqui era fazer com os alunos entendessem a dopagem de semicondutores e o porquê delas serem tão importantes para a indústria, além de demonstrar a especificidade desses materiais ao terem elétrons e buracos livre sujeitos a campos elétricos.

Partindo para o terceiro momento, o de aplicação do conhecimento, os alunos foram apresentados a uma simulação executada pelo professor (compartilhando a tela, via *Google meet*) sobre a dopagem de semicondutores. Embora a simulação referida estivesse em inglês, o intuito principal era exemplificar através de um recurso visual como acontecia a dopagem de semicondutores na prática, o que foi muito bem aceito pelos alunos, visto que esses interagiram nesse momento e vieram tirar dúvidas em relação aos conteúdos vistos em aula, posteriormente. Antes de finalizar a aula, o professor fez questão de mencionar as junções *p-n*, um tipo híbrido de dopagem extremamente importante para o funcionamento das células e painéis solares. Com esse “gancho” para o próximo encontro, o tempo de aula chegou ao fim. A aula contou com 10 alunos ao todo.

4.2.5 Aula 5 - A tecnologia fotovoltaica

Nesta quinta e última aula do produto educacional (terceira aula da UEPS nº 2, ministrada no dia 27/10) a problematização inicial proposta foi diferente das anteriores, focada nas questões ambientais e sustentáveis envolvendo a tecnologia fotovoltaica. Perguntas como: Vocês acham que a utilização de energia solar é uma boa opção para a obtenção de energia? A energia elétrica produzida dessa forma é uma energia renovável? Qual/Quais das cinco regiões seria a mais propícia para esse tipo de tecnologia? foram o foco desse primeiro contato. Aqui, o intuito era trazer em pauta o diálogo CTS e CTSA, além de induzi-los a constatar que as regiões Norte e Nordeste (onde residem) são as mais propícias ao uso dessa tecnologia. Após dez minutos de conversação sobre esses aspectos, a aula expositiva foi iniciada.

O segundo momento pedagógico foi executado através de uma aula expositiva abordando os seguintes conteúdos: Junções *p-n*, dinâmica de elétrons e buracos em uma junção *p-n*, efeito fotovoltaico e funcionamento geral de uma célula solar. Alguns conteúdos extras também foram apresentados nesta aula, mas de forma resumida, apenas para complementar o entendimento da tecnologia fotovoltaica. São eles: Características dos semicondutores indicados a compor as células solares (*gap*, coeficiente de absorção etc.), principais tipos de células solares (silício monocristalino, policristalino, amorfo, de filmes finos etc.), vantagens e desvantagens da tecnologia solar da forma como utilizamos atualmente, além de um breve panorama da tecnologia solar no Brasil e no mundo. Talvez por ser a última aula do produto educacional, os alunos tenham ficado mais focados, o que rendeu ótimas perguntas mais tarde, ao fim da

aula, como: “Por que uma célula solar funciona intermitentemente? A energia não deveria acabar em algum momento?” (pergunta transcrita com minhas palavras, não representam especificamente as que o aluno/aluna utilizou).

O terceiro momento pedagógico, destinado a aplicação do conhecimento utilizado em aula condiz exatamente com a principal aplicação do efeito fotovoltaico e fotoelétrico nas junções $p-n$, o funcionamento das células solares. Aos alunos foram apresentadas imagens que esquematizavam a composição de uma célula solar, indicando exatamente onde se situava cada componente e como ocorria o trânsito das cargas quando exposta a luz solar. A aula contou com doze (12) alunos no total. Após o fim da UEPS nº 2, os alunos que participaram das aulas estavam aptos a realizarem a avaliação (resolução de questionário e confecção de um mapa mental). Nas próximas seções discutiremos explicitamente os resultados obtidas em cada processo avaliativo.

4.3 Resultados esperados

Foi pensando em melhorar a qualidade do ensino de física e ainda tornar viável o contato dos alunos da educação básica com tópicos de física moderna e contemporânea que esse trabalho foi idealizado. Avaliar a aprendizagem desses alunos com base em uma metodologia que tem por base a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, configura, como afirma (MOREIRA, 2012), uma busca por indícios de aprendizagem significativa. Esses indícios podem ser obtidos das mais diversas formas e diversificar o processo avaliativo pode ser uma boa maneira de identificar até os mais sutis padrões de aprendizado dos nossos estudantes.

Com base nisso, o processo de avaliação das duas UEPS's utilizadas neste trabalho consistiu de questionários, com questões discursivas e objetivas, além de mapas mentais envolvendo as principais temáticas abordadas em aulas. Cada uma será abordada separadamente, parte por parte, no intuito de torná-la mais organizada. Antes de partirmos para a investigação desses indícios de aprendizagem significativa, é preciso fazer algumas considerações que impactam na forma de analisar os resultados obtidos.

O modelo de ensino remoto por si só configura um enorme desafio, tanto para os professores, quanto para os alunos envolvidos nele. Em se tratando de um produto educacional, na forma aulas *online*, onde não há o contato direto com os educandos, percebeu-se que esse distanciamento foi fator preponderante para o desenvolvimento das atividades, e algumas delas seriam mais proveitosas se estivéssemos em um modelo presencial, como atividades experimentais, utilizando o arduino, por exemplo, que precisaram ser adaptadas para a nossa situação.

Uma das partes mais prejudicadas foi a avaliação formativa, sendo muito difícil

identificar traços que evidenciassem aprendizagem, dúvida ou até mesmo displicência por parte dos alunos. Quase não houve contato oral ou visual com eles (pelo menos, não como o professor gostaria) pelas chamadas realizadas no *Google meet*, o que dificultava a ocorrência de aulas mais dialogadas ou dinâmicas. Sem tantas alternativas, o foco avaliativo foi voltado quase que inteiramente as avaliações que serão abordadas a seguir. Nelas, se encontrarão todos os detalhes da avaliação e os resultados obtidos devidamente analisados.

4.4 Resultados da UEPS nº 1

A avaliação da primeira UEPS se iniciou após a finalização da mesma, compreendendo duas aulas de 50 minutos. Aos alunos participantes da aplicação da UEPS nº 1, foi disponibilizado via grupo do *WhatsApp* o *link* para o questionário que todos os participantes deveriam responder. O conteúdo do questionário era o efeito fotoelétrico, com questões voltadas ao que foi abordado em aula (Apêndice B). No mesmo grupo foi disponibilizado o *e-mail* do professor aplicador, para que os alunos enviassem o mapa mental feito a mão, ou em programas e aplicativos digitais (como o *Picsart*). O tema central dos mapas mentais era “O efeito fotoelétrico”. Falaremos de cada um separadamente, primeiro, o questionário e por fim, o mapa mental.

4.4.1 Questionário 1

O questionário elaborado na plataforma *Google forms* e disponibilizado aos alunos contava com seis (6) questões, as quatro (4) primeiras perguntas discursivas e as duas últimas, questões objetivas. Antes de tudo, de resolverem as questões, os estudantes deveriam preencher um cabeçalho de identificação com suas informações pessoais. Apesar de uma boa média de alunos durante as aulas, de 10 a 12 geralmente, apenas 7 alunos responderam o questionário 1. As questões não estavam no modo obrigatório, ou seja, caso o aluno não se sentisse confortável, poderia deixar em branco as questões que optasse por não responder, e ainda sim, conseguir enviar sua resposta final do questionário.

Os alunos a seguir serão representados por letras maiúsculas a fim de preservar suas identidades. A letra utilizada em uma questão e posteriormente em outra não necessariamente corresponde ao mesmo aluno, visto que muito deles não responderam a todas as questões. Dito isso, a partir de agora, discutiremos cada questão individualmente, ressaltando os pontos fortes, mas também delineando os erros porventura cometidos, na busca de indícios de aprendizagem significativa.

O enunciado da primeira questão era: “A imagem abaixo (figura 10) ilustra um aparato experimental para a observação do efeito fotoelétrico. Explique, com suas

palavras, o que seria este fenômeno”. As respostas obtidas estão transcritas a seguir. Para essa questão houve seis (6) respostas, dispostas de forma aleatória e anônima, a fim de preservar os alunos envolvidos nas atividades:

Aluno A: “É um fenômeno que consiste na emissão de elétrons por certos materiais, quando expostos a certas frequências de luz”.

Aluno B: “É um fenômeno quântico no qual a luz comporta-se como partículas, conhecidas como fótons”.

Aluno C: “Quando a luz interage com os elétrons faz com que eles se “soltem” do material condutor”.

Aluno D: “As placas metálicas são submetidas ao vácuo, a luz é aplicada sobre o metal carregando-o negativamente fazendo ele perder elétrons”.

Aluno E: “Isso era uma forma de mostrar que energia era quantizada”.

Aluno F: “Efeito fotoelétrico”.

Com base nas respostas obtidas percebe-se certo entendimento do conceito geral do efeito fotoelétrico. Muitos alunos utilizaram como exemplo o aparato experimental mostrada em aula, o da figura (10), para embasar suas explicações. De forma geral, a maioria dos alunos que responderam os questionários conseguiram identificar que o fenômeno fotoelétrico se deve basicamente a emissão de elétrons de um metal quando exposto a radiações eletromagnéticas. Alguns utilizaram o conceito de corpuscular da luz, citando os fótons e demonstrando entendimento da natureza dual da luz apresentada em aula. A taxa de acertos dessa questão ultrapassa os 70%, evidenciando o entendimento dos alunos em relação a descrição básica do que seria o efeito fotoelétrico. As respostas dos alunos **E** e **F** são imprecisas ou não condizem com o que foi questionado neste item.

O tema da segunda questão era justamente o comportamento dual da luz, de certa forma abordado na questão anterior. O enunciado era: “A luz possui uma natureza única, podendo ser entendida com base em duas vertentes completamente diferentes. Com base nisso, o que seria a dualidade onda-partícula?”. Para essa questão houve sete (7) respostas, quase todas possuem em suma o mesmo sentido que o apresentado abaixo escolhido de forma aleatória para representar todas as respostas recebidas nessa questão:

Aluno A: “A luz seria uma onda eletromagnética, e ao mesmo tempo seria composta por partículas chamadas de fótons, por isso o termo onda-partícula”.

Em um contexto geral, nesse item, verificou-se que a maioria dos alunos que a responderam, fizeram-no a partir da apresentação do aparato experimental para detectar o efeito fotoelétrico, e das explicações de Einstein para o fenômeno. De forma geral,

eles entenderam que a luz pode ser compreendida tanto como uma onda eletromagnética, quanto como um feixe de partículas, denominados fótons. Apenas uma resposta das sete recebidas não condizia exatamente com o exposto acima, entretanto, pode-se considerar que o entendimento da luz como um feixe de partículas foi compreendida pela maioria.

A terceira questão buscava identificar justamente o entendimento dos alunos a respeito do conceito de quantização, apresentado em aula como fruto dos trabalhos de Planck e utilizados por Einstein em sua teoria do efeito fotoelétrico. Aqui, observou-se uma pequena confusão nos conceitos e a maioria identificou os *quanta* de energia como os próprios fótons, literalmente, e não como mais um exemplo destes. Porém, houveram alunos que responderam a questão corretamente, identificando os *quanta* como pacotes fundamentais de energia, conferindo a essa energia um caráter discreto, e não unicamente contínuo como se pensava até então. A seguir, se encontram respectivamente, uma resposta não tão direta a questão, e uma resposta certa. A pergunta a ser respondida era: “O que significa o termo “*quantum*”? Descreva detalhadamente com suas palavras”.

Aluno A: “Unidades de energia emitidas mediante a radiação eletromagnética”.

Aluno B: “*Quantum* foi o termo utilizado por Max Planck para propor que a energia não se transmitia de forma contínua, e sim de pouco em pouco. E esse pouco são os “pacotes de energia”.

A última questão discursiva, tratava exatamente de uma das principais características do efeito fotoelétrico antes do século XX, as inconsistências quando analisados sob a ótica clássica. A questão era: “Cite uma ou mais inconsistências do efeito fotoelétrico da forma como era entendido antes da teoria quântica”. As respostas foram muito positivas, com os alunos se concentrando nas principais características abordadas em aula, como a instantaneidade do fenômeno, muito citada durante as aulas, bem como a estranha dependência da energia dos fotoelétrons emitidos e a frequência da radiação eletromagnética utilizada. Os alunos demonstraram um ótimo entendimento dessa parte do conteúdo, respondendo as questões adequadamente. A seguir, se encontram transcritas todas as respostas obtidas para essa questão:

Aluno A: “O fato dele acontecer instantaneamente, e a crença de que a energia liberada estava relacionada com a intensidade da luz”.

Aluno B: “Os elétrons deveriam levar um tempo para se libertarem e quanto mais intensa a luz, mais energético seus elétrons seriam”.

Aluno C: “Velocidade de ejeção dos elétrons, a não dependência da energia dos elétrons ejetados e a intensidade da luz”.

Terminada a parte discursiva do questionário, as próximas duas questões obje-

tivas focavam justamente na característica quântica do efeito fotoelétrico. O objetivo principal era fazê-los identificar as características fundamentais da teoria de Einstein, notar a diferença de paradigma ao deixar de considerar a luz como ondas eletromagnéticas e passar a entendê-las como um conjunto de partículas fundamentais, como o elétrons e prótons (daí o nome fótons, analogia explicada em aula). A quinta pergunta presente no questionário indagava o seguinte: “De acordo com a visão moderna do efeito fotoelétrico, complete a seguinte sentença: "Quanto maior for a frequência da luz que incide em uma superfície fotossensível, maior será..."

- a) O comprimento de onda dos elétrons ejetados”.
- b) O intervalo de tempo dos elétrons ejetado”.
- c) A massa dos elétrons ejetados”.
- d) A energia dos elétrons ejetado”.

Para essa questão houve sete (7) respostas recebidas, dispostas de forma organizada no gráfico a seguir:



Figura 23 – Gráfico que representa as repostas obtidas na questão 05, cujo enunciado foi a apresentado acima. Três (3) alunos acertaram a questão e marcaram a opção correta, a opção d). Quatro alunos responderam erroneamente a questão, com três (3) alunos marcando a letra a) e apenas um (1) aluno escolheu o item b)

Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos resultados obtidos.

Percebe-se que grande parte dos alunos (três deles) acabou por confundir qual grandeza física está diretamente relacionada com a frequência dos fótons, apesar da expressão (3.8) ter sido bastante trabalhada nas aulas, marcando equivocadamente a

característica comprimento de onda, alternativa a), que é inversamente proporcional a frequência (que era a resposta correta). Com isso, três (3) alunos acertaram a questão e marcaram a opção correta, a opção d), tendo apenas um (1) aluno escolheu o item b).

O último item e portanto, última questão objetiva, também abordava a hipótese de Einstein do efeito fotoelétrico, agora utilizando o conhecimento da questão anterior de uma nova forma. A pergunta girava em torno da contribuição do físico para o entendimento do efeito fotoelétrico, onde o objetivo era fazê-los associar a frequência da radiação a energia do fóton liberados por ela, tal como feita na questão anterior. Essa é uma característica importante a se guardar, principalmente em se tratando do que seria abordado posteriormente. O enunciado era: “Após as contribuições de Einstein, o efeito fotoelétrico passou a ser entendido de uma nova forma. Segundo sua teoria, qual dessas grandezas está diretamente relacionada a energia dos fótons de uma radiação luminosa?”

- a) Intensidade da luz.
- b) Comprimento de onda.
- c) Frequência.
- d) Velocidade.

Um compilado das respostas obtidas para essa última questão podem ser conferidos no gráfico a seguir

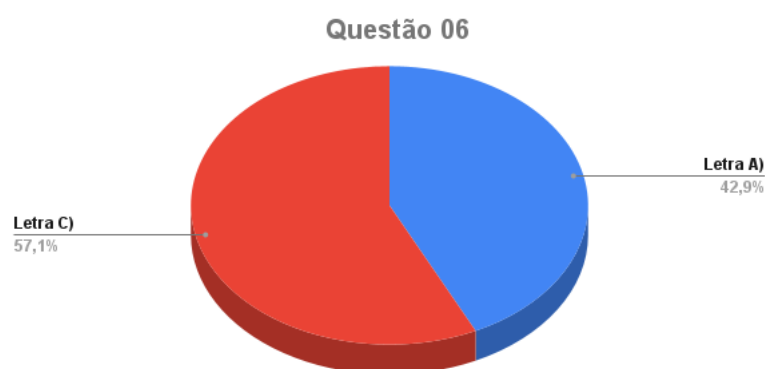


Figura 24 – Gráfico que representa as repostas obtidas na questão 06, cujo enunciado foi a apresentado acima. Nela, quatro (4) alunos marcaram a opção c) “frequência”, e acertaram a questão. Três (3) alunos marcaram a opção a) “Intensidade da luz” e infelizmente, erraram a questão.

Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos resultados obtidos.

Embora parte dos alunos possam ter confundido e relacionado a energia com a intensidade da radiação luminosa erroneamente (talvez confusos pela concepção clássica do efeito fotoelétrico, onde acreditava-se que essa relação seria verdadeira), a maioria identificou corretamente que após a concepção de Einstein, a energia dos fótons de uma radiação luminosa passaram a se relacionar com a frequência dessa mesma radiação luminosa. Isso era justamente o que sanava as inconsistências do modelo clássico do efeito fotoelétrico que eles haviam respondido na questão 04 apresentada anteriormente. Quatro (4) alunos marcaram a opção c) frequência, e acertaram a questão. Três alunos marcaram a opção a) e infelizmente, erraram a questão.

A verificação da aprendizagem dos alunos, através desse primeiro questionário foi bastante proveitosa, constatando-se que de forma geral, os alunos compreenderam o essencial do fenômeno fotoelétrico e da teoria quântica, que eram os principais focos dessa UEPS. O aproveitamento das questões discursivas foi melhor, visto que foram as que apresentaram maior taxas de acertos, além de serem respondidas de forma mais claras em relação ao tema exigido, uma vez que os alunos podem se expressar livremente e assim, podemos constatar exatamente o que os mesmos entenderam do conteúdo.

4.4.2 Mapa mental 1

Essa atividade avaliativa complementar foi proposta aos alunos como mais uma forma de obter indícios de aprendizagem significativa dos conteúdos abordados. Nesse sentido, os mapas mentais são ferramentas de grande utilidade, já que por meio deles, podemos identificar como os conceitos e conteúdos ensinados, se dispõem e conectam com os conceitos que o indivíduo já possui, e como ele os organiza em sua estrutura cognitiva. Outro motivo para a escolha dos mapas mentais é a liberdade nas relações que podem ser estabelecidas entre os conceitos, não necessariamente devendo obedecer uma ordem ou hierarquia, qualquer que seja ela. Os mapas mentais são completamente livres, onde partindo de um conceito central, a possibilidade de relações e de conexões entre os conceitos é quase incalculável. Essas características são as que diferem os mapas mentais dos mapas conceituais, esses últimos concentrados na hierarquia dos conceitos e nas palavras de ligação entre um conceito e outro (MOREIRA, 2012).

Para esse mapa mental o conceito central era “efeito fotoelétrico”. Após a finalização da UEPS nº 1 (das duas primeiras aulas), essa tarefa foi passada aos estudantes. O modo de confecção dos mapas mentais era livre, e os alunos poderiam tanto fazê-los a mão, quanto utilizar meios digitais para elaborá-los. O prazo para a entrega da atividade foi de até o início da segunda UEPS (quatro dias), mas teve

que ser estendido devido ao pedido dos alunos. O local de envio dos mapas era o *e-mail* pessoal do professor responsável pela aplicação do produto. Para essa atividade não houve tanto retorno, visto que após sucessivas cobranças é que os trabalhos começaram a chegar na caixa de entrada do endereço de *e-mail* fornecido. A seguir se encontra um dos mapas recebidos, editado no aplicativo *PicsArt* (a aplicativo de edição de fotos e vídeos, basicamente. Durante a aula não foi indicado aos alunos nenhum aplicativo ou programa, os alunos foram proativos nesse sentido e buscaram eles mesmos as plataformas para elaborarem os mapas):

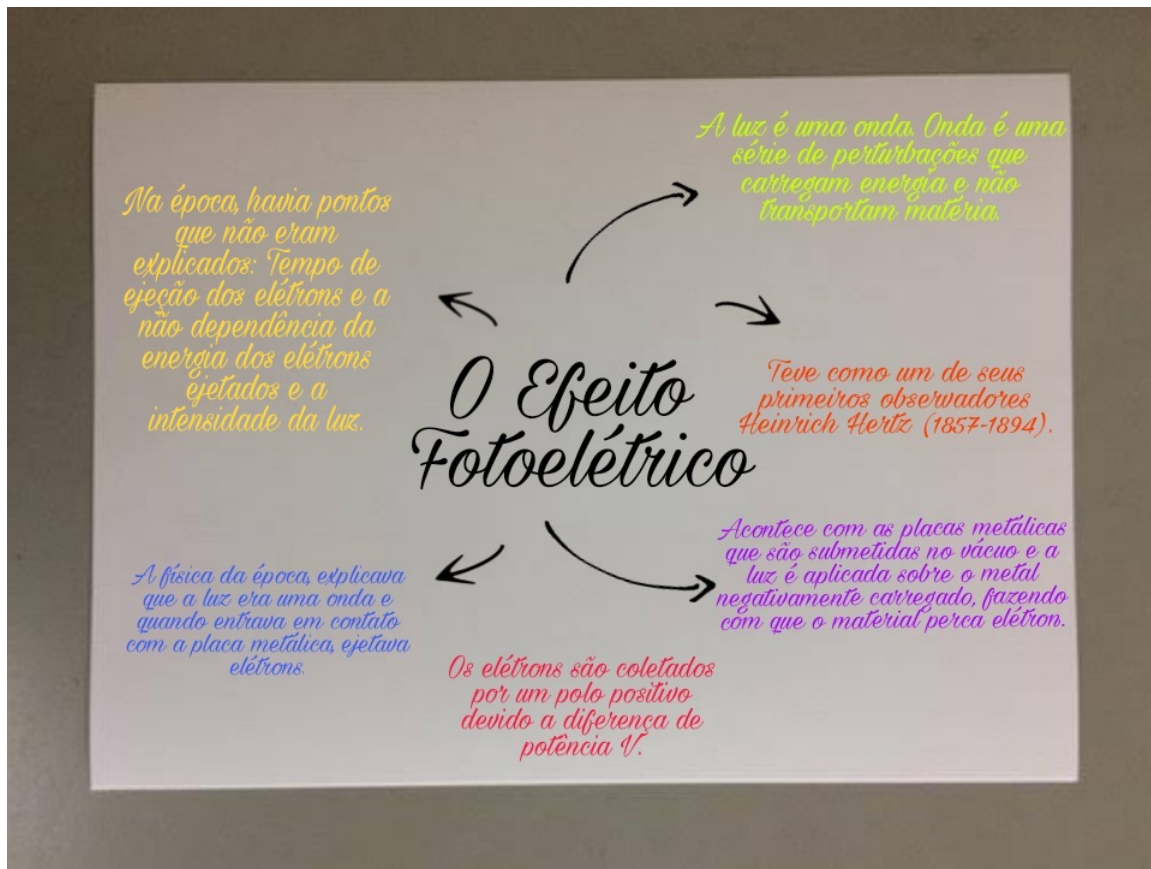


Figura 25 – Mapa mental enviado por um dos alunos que participaram da aplicação da UEPS nº 1. Para customiza-lo, o aluno utilizou um aplicativo digital.

Fonte: Acervo do autor.

De acordo com o mapa mental recebido, percebemos que o/a estudante conseguiu registrar os principais pontos abordados em aula. Das primeiras detecções do efeito fotoelétrico, devido aos experimentos de Heinrich Hertz, a descrição do fenômeno com base na aparato experimental apresentado em aula. Houve ainda menção as inconsistências da teoria clássica do efeito fotoelétrico (conteúdo abordado na primeira aula) e da dualidade onda-partícula (abordado na segunda aula). Em acréscimo ao mapa apresentado, poderia-se ter adicionado conceitos e informações referentes a concepção quântica do efeito fotoelétrico e das contribuições de Einstein, conteúdos

esses, abordados na segunda aula. Todavia, percebe-se que houve pleno entendimento das principais características do fenômeno abordado nessa primeira unidade didática.

4.5 Resultados da UEPS nº 2

A avaliação da segunda UEPS se iniciou após a finalização da mesma, que compreendeu três aulas de 50 minutos/1 hora. Aos alunos participantes da aplicação da UEPS nº 2 (os mesmos presentes na aplicação da UEPS nº 1), foi disponibilizado via grupo do *WhatsApp* o *link* para o questionário que todos os participantes deveriam responder. As perguntas versavam sobre os conteúdos vistos nessa segunda parte, os materiais semicondutores e a geração de energia elétrica através das células solares. No mesmo grupo foi disponibilizado o *e-mail* do professor aplicador, para que os alunos enviassem o mapa mental feito a mão, ou em programas e aplicativos digitais de sua preferência. O tema central dos mapas mentais era “Os materiais semicondutores”. Falaremos de cada um separadamente, primeiro, o questionário e por fim, o mapa mental.

4.5.1 Questionário 2

O primeiro grande diagnóstico para avaliar o andamento da UEPS nº 2 consistiu em um questionário (disponível no Apêndice C) elaborado e disponibilizado aos alunos na plataforma *Google forms*. Ele continha sete (7) questões, sendo as duas primeiras, questões discursivas, e as cinco últimas objetivas, sobre os conteúdos abordados nessa segunda UEPS. Embora o número de alunos presentes nas aulas tenha se mantido constante de forma geral no decorrer das cinco aulas, para essa atividade obtivemos a resposta de apenas quatro (4) alunos.

Durante o planejamento das aulas do produto, já era esperado um baixo contingente de participação efetiva nos processos avaliativos durante a aplicação do produto (visto que a maioria, ainda que compareça as aulas, não estão dispostos a participar ativamente, muitas vezes ocupados pelas próprias atividades escolares), e a ideia de utilizar questões objetivas em maior quantidade, bem como padronizar as perguntas em um nível intermediário a fim de tornar a atividade mais convidativa aos alunos foi pensada de antemão, embora, ainda sim, o nível de participação tenha sido abaixo do esperado.

Os alunos a seguir serão representados por letras maiúsculas a fim de preservar suas identidades. A letra utilizada em uma questão e posteriormente em outra não necessariamente corresponde ao mesmo aluno, visto que muito deles não responderam a todas as questões (elas não estavam no modo “obrigatório”).

A primeira questão tratava de um dos principais temas da aula inicial da UEPS, sobre introdução a Física do estado sólido e condutividade dos materiais. O questionamento direto consistia em “Qual a principal diferença entre os materiais condutores, semicondutores e isolantes. Explique utilizando os conceitos vistos em aula”. As respostas foram bastante satisfatórias e os alunos de forma geral, demonstraram ter compreendido a principal diferença entre os três tipos de materiais, citando inclusive os conceitos chaves vistos em aula (BC, BV e *gap*). O **Aluno C** parece ter entendido que a condição dos materiais semicondutores é de alterar a propriedade de condutividade elétrica livremente, sendo por isso chamados de “semicondutores”, talvez confuso pelo processo de dopagem discutido na aula 02. Apesar de outras leves confusões cometidas por outros alunos, a questão contou com um alto índice de acerto conceitual.

Aluno A: “Condutores e isolantes são materiais elétricos que se comportam de maneiras opostas no que respeita à passagem de corrente elétrica. Enquanto os condutores permitem a movimentação dos elétrons, os isolante dificultam essa movimentação, ou seja, a passagem da eletricidade”.

Aluno B: “O Condutor possui *gap* quase inexistente e uma banda de valência semipreenchida. O Isolante possui uma banda de valência cheia, mas um *gap* muito grande. O Semicondutor possui uma banda de valência cheia e *gap* pequeno”.

Aluno C: “Condutores são materiais que possibilitam a movimentação de cargas elétricas em seu interior com grande facilidade. Isolantes são aqueles que oferecem grande oposição à passagem de cargas elétricas. Semicondutores são sólidos capazes de mudar sua condição de isolantes para condutores com grande facilidade”.

Aluno D: “Condutores: Eles possuem sua banda de valência meio preenchida e a banda de condução vazia e não possui o *gap*. Isolantes: Possuem a banda de valência cheia e um alto valor de *gap*. Semicondutores: Possuem a banda de valência cheia, banda de condução vazia e um valor razoável de *gap*”.

A segunda questão discursiva (e última desse tipo), exigia dos alunos que exprimissem em suas palavras, a importância das junções *p-n* no contexto das células solares, temática essa discutida na terceira aula da UEPS nº 2. De forma mais precisa, o enunciado questionava: “Explique com suas palavras o que seria uma junção *p-n*, que é muito importante para a composição das células solares”. Para essas questão, obteve-se as seguintes respostas:

Aluno A: “Uma junção *p-n* é produzida quando dois semicondutores do tipo P e do tipo N são ligados de forma que se mantenha a continuidade do reticulado cristalino”.

Aluno B: “Junção *p-n* é um semicondutor dopado sendo que de um lado temos uma dopagem do tipo p e do outro uma do tipo n. A importância dela vem por causa da difusão gerada, criando uma corrente elétrica”.

Aluno C: “É um processo de dopagem”.

Aluno D: “É uma junção onde temos dois lados com portadores de carga opostos e há um movimento onde acontece recombinação entre eles”.

Para essa questão, houve diversas respostas distintas e que merecem ser comentadas. Enquanto o **Aluno C** identificou as junções $p-n$ como um simples processo de dopagem (o que não deixa de estar correto), ele nada argumentou sobre sua composição ou principal função destas. Já o **Aluno B**, além de mencionar de forma resumida a composição das junções do tipo $p-n$, citou o processo de difusão dos portadores de carga, essencial para o funcionamento das células solares. Nesse sentido o **Aluno D** trata o as junções $p-n$ com relação as quantidade de portadores de carga em excesso de cada lado da junção, citando outro processo físico extremamente relevante para a produção de energia elétrica pelas células solares e que até agora não havia sido mencionado: A recombinação. O **Aluno A** explica o que seria uma junção $p-n$, se referindo a estrutura de um semiconductor como “reticulado cristalino”, termo que provavelmente designa a estrutura cristalina dos sólidos. Apesar da variedade de respostas e da superficialidade de algumas, no sentido de escassez de detalhes, de forma geral, os alunos compreenderam o que seria uma junção $p-n$ e sua função na célula solar.

A terceira questão era de múltipla escolha, e tratava da geração de energia elétrica no interior de uma célula solar. Seu enunciado consistia em: “Tendo em vista o que foi estudado sobre o efeito fotoelétrico, os materiais semicondutores e o efeito fotovoltaico, qual das alternativas descreve de forma resumida o princípio de conversão da energia solar em energia elétrica em uma célula solar:”. O intuito dessa questão era fazê-los refletir sobre a abordagem quântica do efeito fotoelétrico discutido em aula, e de como ele influencia no processo de difusão em um célula solar dotada de uma junção $p-n$. As opções disponíveis eram:

- a) As ondas eletromagnéticas, ao incidirem sobre as células solares, rompem a junção $p-n$ e geram elétrons livres que formam uma corrente elétrica que pode ser aproveitada.
- b) Os fótons provenientes da luz solar, destacam os elétrons das ligações químicas e conseqüentemente dão origem a buracos que, devido a processo de difusão de portadores de carga, criam uma diferença de potencial na célula solar, o efeito fotovoltaico.
- c) As ondas eletromagnéticas purificam a dopagem presente na junção $p-n$ e dão origem a elétron e buracos livres, que a partir do momento em que se tornam livres, formam uma corrente elétrica que pode ser aproveitada.
- d) Os fótons oriundos da luz solar sobrecarregam a junção $p-n$ da célula solar, interrompendo o processo de difusão de portadores de carga, dando origem a uma diferença de potencial V , chamada de efeito fotovoltaico.

Embora a opção a) parecesse correta, por abordar outra vertente de composição da luz, a energia fornecida a junção $p-n$ não a rompe, como mencionado, ela só desencadeia o processo de liberação de elétrons no material, via fótons de luz fornecendo energia. A resposta correta era portanto a letra b), que de forma resumida, aborda a interação dos fótons com a junção $p-n$. O gráfico a seguir (figura 26) resume as quatro (4) respostas recebidas para essa questão:



Figura 26 – Gráfico que representa as repostas obtidas na questão 03, cujo enunciado foi a apresentado acima. Nela, dois (2) alunos escolheram a letra a), um (1) aluno escolheu a letra b) e um (1) aluno marcou a letra c). Apenas um aluno dos quatro que responderam a questão obteve êxito.

Fonte: Elaborada pelo autor, a partir dos resultados obtidos.

Embora todo o conhecimento trabalhado antes das células solares tivesse o intuito de fornecer aos alunos subsídios necessários para que entendessem o processo de produção de energia elétrica realizado por uma célula solar, a maioria aparentemente fixou melhor os conteúdos introdutórios e muitas vezes demonstrou pouco entendimento dos fenômenos que envolviam diretamente as células solares. Conclusões como essa podem ser deduzidas de questões como a seguinte, que trata justamente os dois tipos de semicondutores abordados em aula. A questão é “O que é um semicondutor dopado?”. As opções para essa questão eram:

- a) Um semicondutor puro.
- b) Um semicondutor intrínseco.
- c) Um semicondutor com “impurezas”.
- d) Um semicondutor sem mais utilidade.

Nesta, dos quatro (4) alunos que responderam, apenas um aluno marcou incorretamente, enquanto os outros três acertaram-na. O gráfico que representa o desempenho dos alunos nessa questão se encontra a seguir, na figura (27).



Figura 27 – Gráfico que representa as repostas obtidas na questão 04, cujo enunciado foi a apresentado acima. Nela, três (3) alunos escolheram corretamente a letra c) e um (1) aluno escolheu a letra a).

Fonte: Elaborada pelo autor, a partir dos resultados obtidos.

Apesar de a maioria ter entendido o que seria um semicondutor dopado, dopagens especiais como as junções $p-n$, os mesmos, apesar disso, não compreenderam de forma eficiente como as células solares operam, com base nesses princípios iniciais discutidos. Na próxima questão vemos mais um conceito introdutório sendo posto a prova: O de portadores de carga. O objetivo era descobrir se os alunos haviam mesmo compreendido quais os portadores de carga que podem se locomover no interior da célula e através da junção $p-n$. O enunciado era bem direto e questionava: “Um dos principais diferenciais de um material semicondutor, em relação aos condutores e isolantes é que estes possuem dois tipos distintos de portadores de carga que podem formar uma corrente elétrica nesses materiais em determinadas situações. Os dois tipos de portadores de carga presentes neles são:

- a) Elétrons e buracos.
- b) Prótons e elétrons.
- c) Fótons e elétrons.
- d) Nêutrons e elétrons.
- e) Fótons e prótons.

Aqui, notou-se a pequena confusão feita com base em uma analogia proposta em aula. Sabe-se que os elétrons ao romperem a ligação química que os mantém unidos na estrutura cristalina devido ao ganho de energia, deixam buracos de carga positiva que se comportam como prótons, uma vez que podem se mover, quando submetidos a um campo elétrico externo. Apesar de, na hora da explicação, ter sido enfatizado que os buracos não são prótons literalmente, mas apenas funcionam como se fossem cargas positivas em movimento, alguns alunos podem não ter entendido muito bem a comparação, errando a questão. Contudo, metade dos alunos que responderam a questão a fizeram corretamente. A seguir, na figura (28) o gráfico que resume as respostas dos alunos.



Figura 28 – Gráfico que representa as repostas obtidas na questão 04, cujo enunciado foi a apresentado acima. Nela, dois (2) alunos escolheram corretamente a letra a), os demais optaram pela letra b).

Fonte: Elaborada pelo autor, a partir dos resultados obtidos.

As duas últimas questões tratavam dos aspectos complementares ao ensino dos fenômenos e conceitos referentes as células e painéis solares. Abordavam assuntos como a temática da geração de energia no Brasil, bem como o tipo de tecnologia mais utilizada a nível mundial. Primeiramente, a sexta questão possuía o seguinte enunciado: “A maior parte da energia elétrica produzida e utilizada no Brasil é de origem...”. o intuito era verificar se os alunos haviam assimilado a informação mais básica tartada na última aula da UEPS nº 2, onde foi abordado a matriz energética brasileira, a potencialidade da tecnologia fotovoltaica no Brasil, bem como as principais células utilizadas atualmente. Para essa questão as opções eram:

a) Eólica.

- b) Nuclear.**
- c) Solar.**
- d) Hídrica.**

Nela, todos os alunos responderam-na corretamente marcando a opção d), conforme ressaltado em aula (por isso o gráfico não está aqui representado).

Por fim, a última questão do questionário de diagnóstico da UEPS nº 2 consistia em verificar o entendimento dos alunos sobre os materiais utilizados na composição das células solares. Na última aula, foi apresentado aos mesmos um panorama sobre a eficiência das primeiras células e os diversos materiais que podiam ser utilizados em sua confecção. Desses, um, recebia destaque e era o mais utilizado na construção das células solares. O enunciado questionava: “Qual dos materiais abaixo é o mais utilizado na fabricação de células solares atualmente?”:

- a) Germânio (Ge).**
- b) Silício (Si).**
- c) Ferro (Fe).**
- d) Cobre (Cu).**

O gráfico que compila as respostas obtidas para essa questão se encontram a seguir:



Figura 29 – Gráfico que representa as repostas obtidas na questão 07, cujo enunciado foi apresentado acima. Nela, três (3) alunos escolheram corretamente a letra b), optando pelas células de silício (Si). Apenas uma aluno respondeu a questão incorretamente, optou pela letra a), Germânio (Ge).

Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos resultados obtidos.

O saldo final desse questionário foi bastante positivo. Os alunos demonstraram um bom domínio do conteúdo trabalhado, obtendo um desempenho aceitável frente a grande leva de conteúdos complexos trabalhados. As duas UEPS's foram muito proveitosas e seus respectivos diagnósticos apresentam inúmeros indícios de aprendizagem significativa.

4.5.2 Mapa mental 2

O segundo mapa mental a ser realizado pelos alunos como, novamente, mais uma forma de diagnosticar sua aprendizagem dos conteúdos abordados foi proposta ao final da UEPS nº 2, após a última aula teórica. O conceito central que os alunos deveriam considerar como ponto de partida era “materiais semicondutores”. As orientações eram basicamente as seguintes: relacionar o maior número de conceitos, ideias, exemplos...etc vistos em aula a partir do conceito central, devendo citar especificamente as células e painéis solares.

Inicialmente, a ideia era haver a confecção de um mapa mental a cada aula, sendo que cada aluno, dessa forma, deveria redigir seu mapa com o que havia aprendido ao final da referida aula. Ao final das atividades, em posse dos sucessivos mapas produzidos, o professor responsável poderia obter um panorama geral da aprendizagem de cada um, comparando os desempenhos individuais a cada momento da UEPS, para no final obter uma visão completa do desenvolvimento de cada aluno. Porém, uma vez que foi observado a baixa participação dos alunos nessa e nas demais atividades avaliativas e para não sobrecarregá-los, optou-se apenas por um mapa mental por aluno, que deveria ser entregue ao final de cada UEPS.

Outra ideia que foi concebida nos primeiros momentos de preparação das UEPS's era a de propor aos alunos o preenchimento de um questionário extra que investigaria a opinião de cada um sobre a metodologia utilizada (UEPS, 3MP, mapas mentais, questionários...etc), mas, devido aos motivos já citados, a ideia também não foi levada a diante e concretizada. Para essa atividade foram recebidos apenas dois (2) mapas pelo *e-mail* previamente designado. Ao final de cada aula os alunos eram alertados sobre os mapas, bem como os questionários, que deveriam responder assim que cada UEPS fosse finalizada. Apesar de tudo, houve pouca dedicação por parte dos alunos nesse quesito.

Ainda que por um lado, a baixa frequência de recebimentos tenha sido um fator de desânimo durante a aplicação das aulas, a qualidade dos mapas recebidos foi tão surpreendente quanto satisfatória. Neles, notamos o aprendizado dos alunos, que realmente compreenderam os conteúdos abordados (uma grande quantidade de conteúdos, por sinal) ainda que esses apresentassem uma experiência totalmente nova a esses discentes. A maioria nunca teve e talvez, a partir dessa aplicação do

produto educacional, nunca mais terá um contato formal com a Física moderna e contemporânea. Trazer esse tipo de experiência e contribuir para a formação científica desses estudantes é sem dúvida alguma um desafio muito gratificante que eles parecem ter aproveitado.

O mapa mental a seguir foi elaborado de forma digital por um dos alunos que participaram da segunda UEPS (esse cujo o mapa mental está exposto abaixo compareceu as três aulas) com uma riqueza de detalhes impressionante. Nele, o aluno não só envolveu os conceitos exigidos, mas os expandiu e relacionou com outros trabalhados durante as três aulas da UEPS nº 2, como as ligações químicas, vantagens e desvantagens da tecnologia fotovoltaica, dopagem e condutividade elétrica dos materiais. O entendimento por parte do aluno é notório e demonstra o quão nitidamente ele fixou os conteúdos abordados, relacionando-os de forma certa e concisa.

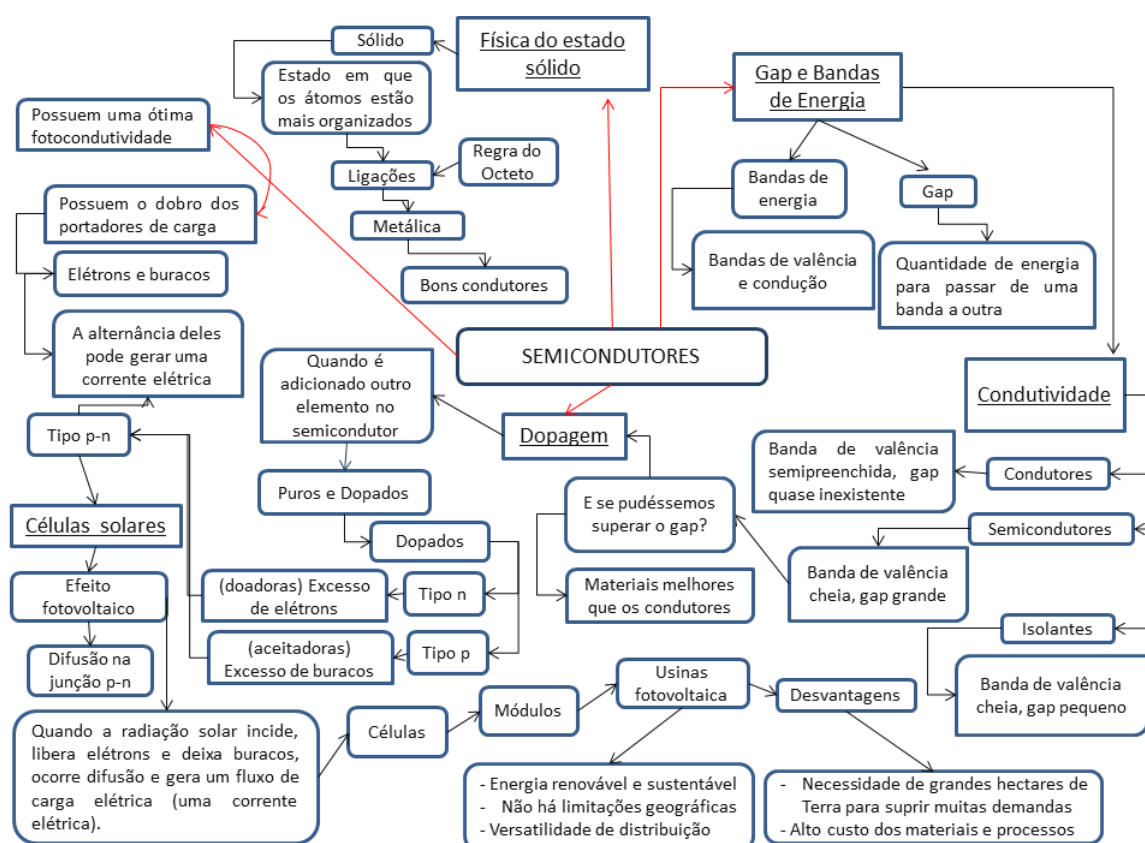


Figura 30 – Mapa mental enviado por um dos alunos que participaram da aplicação da UEPS nº 2, cujo conceito central é “Materiais semicondutores”. O aluno o elaborou utilizando um programa.

Fonte: Acervo do autor.

4.6 Considerações finais

Como antes mencionado, ensinar Física por si só já configura um desafio enorme, e fazê-lo sob a vigência de um programa que visa a melhoria do Ensino de Física no país ao qualificar os profissionais que atuam na área não poderia ter sido mais desafiador e enriquecedor ao mesmo tempo. Teorias e metodologias de ensino como as utilizadas aqui têm bastante a acrescentar no Ensino de Física, em torná-lo mais acessível, mais atraente, mais facilmente palatável aos alunos, de forma a apresentar a eles um processo de ensino aprendizagem bem estruturado. A todos os professores que hoje lecionam Física nas escolas espalhadas pelo país, este trabalho tem como objetivo fornecer subsídios teóricos e organizacionais para o melhor desenvolvimento de tópicos de Física Moderna e Contemporânea na educação básica, em especial os materiais semicondutores e suas aplicações.

Durante a aplicação do produto, percebi que os alunos respondem muito bem a simulações e experimentos (ainda que em vídeo). Há dificuldade de abstração com os temas de Física do Estado Sólido e isso costuma se traduzir em desinteresse por parte dos mesmos. Assim sendo, um detalhe que pode fazer alguma diferença durante a discussão de tópicos de Física Moderna e Contemporânea é o uso destas ferramentas.

Devido as circunstâncias pandêmicas em que o produto foi aplicado, essa pesquisa em ensino de Física pode ainda contemplar uma área que antes, talvez não tivesse sido tratada como principal alvo e foco de trabalhos como esse: O ensino remoto. Este trabalho também se destina ao professor da educação básica que está atualmente ensinando nessas condições e que tenha interesse em inserir esses tópicos de FMC na grade curricular de seus alunos, de forma sequencial e organizada.

Apesar dos contratemplos e das limitações que a distância e o contato indireto com os estudantes nos impôs, a aplicação foi muito gratificante e os resultados obtidos mais ainda. Os objetivos traçados e almejados com cada UEPS foram atingidos e tal como, notou-se durante a análise dos processos avaliativos a evidente aprendizagem significativa dos conceitos e conteúdos trabalhados em aula. Grande parte desse êxito deveu-se a sólida estruturação das aulas nas UEPS's, bem como sua organização utilizando os três momentos pedagógicos, sendo portanto, considerada por nós, exitosa.

Referências

- ANGOTTI, J. A. P. Ensino de física com tdoc. *Florianópolis: UFSC/EAD/CFM/CED*, 2015. Citado na página 20.
- ASHCROFT, N. W.; MERMIN, N. D. et al. *Solid state physics*. [S.l.]: holt, rinehart and winston, new york London, 1976. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42 e 43.
- AUSUBEL, D. P. The psychology of meaningful verbal learning. Grune & Stratton, 1963. Citado na página 20.
- BALANCE, B. E. Balanço energético nacional. 2021. Citado na página 75.
- BRASIL; EDUCAÇÃO, M. da. *PCN+ ensino médio: orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais: ciências da natureza, matemática e suas tecnologias*. [S.l.]: MEC Brasília, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 30, 35 e 38.
- BRASIL Escola. <<https://s4.static.brasilecola.uol.com.br/img/2016/05/cloreto-de-sodio.jpg>>. Acesso em 12 de maio de 2021. Citado na página 45.
- BRITO, S. d. S. Tutorial de energia solar—princípios e aplicações. 2006. *CRESESB—Centro de Referência para Energia Solar e Eólica*. Disponível em:< <http://www.cresesb.cepel.br/index.php>, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 68.
- DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A. *Metodologia do ensino de ciências*. [S.l.: s.n.], 1990. Citado 3 vezes nas páginas 32, 33 e 34.
- DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A.; PERNAMBUCO, M. M. C. A. Ensino de ciências: fundamentos e métodos. In: . [S.l.]: Cortez, 2002. Citado 4 vezes nas páginas 19, 30, 32 e 35.
- FADIGAS, E. Energia solar fotovoltaica: Fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica. *Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo*, p. 32, 2012. Citado 6 vezes nas páginas 58, 64, 67, 71, 73 e 74.
- FERREIRA, M. et al. Uma proposta de ensino investigativo sobre a física moderna e contemporânea: O efeito fotoelétrico. *Revista Pesquisa e Debate em Educação*, v. 8, n. 2, 2019. Citado na página 24.
- FREIRE, P. *Pedagogia do oprimido*. [S.l.]: Paz e Terra, 1994. Citado 4 vezes nas páginas 20, 21, 22 e 23.
- FREIRE, P. *Pedagogia da autonomia: Saberes necessários à prática educativa*. [S.l.]: Paz e Terra, 2002. ISBN 85-219-0243-3. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- HEWITT, P. G. *Física Conceitual. 12ª*. [S.l.]: Porto Alegre: Bookman, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 48, 49, 59 e 60.
- KASAP, S. O. *Principles of electronic materials and devices*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2006. v. 2. Citado 4 vezes nas páginas 55, 56, 57 e 66.

- KITTEL, C. Introdução à física do estado sólido, 5ª edição. Editora Guanabara Dois, 1978. Citado na página 43.
- LIMA, A. A. et al. Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 42, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 64.
- LINGUAGENS, C. *Orientações curriculares para o ensino médio*. [S.l.]: Brasília: MEC/SEB, 2006. Citado 4 vezes nas páginas 35, 36, 37 e 38.
- MELLO, H. A.; INTRATOR, E. Dispositivos semicondutores. Editora Livros Técnicos e Científicos, 1980. Citado 7 vezes nas páginas 52, 53, 54, 55, 56, 57 e 58.
- MOREIRA, M. A. Comportamentalismo, construtivismo e humanismo. *Subsídios teóricos para o Professor Pesquisador em ensino de ciências*. Porto Alegre: IF-UFRGS, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.
- MOREIRA, M. A. Unidades de ensino potencialmente significativas - ueps. *Textos de Apoio ao Professor de Física*, v. 23, n. 2, p. 1–27, 2012. ISSN 1807-2763. Citado 5 vezes nas páginas 27, 31, 32, 89 e 95.
- MOREIRA, M. A. Desafios no ensino da Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, sciELO, v. 43, 00 2021. ISSN 1806-1117. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172021000500216&nrm=iso>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 30.
- MOREIRA, M. A.; OSTERMANN, F. Teorias construtivistas. *Textos de Apoio ao Professor de Física*, n. 10, p. 1–62, 2005. ISSN 1807-2763. Citado 5 vezes nas páginas 25, 26, 27, 28 e 29.
- NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica: Ótica, relatividade, física quântica (vol. 4)*. [S.l.]: Editora Blucher, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 61.
- PARENTE, F.; SANTOS, A. dos; TORT, A. C. Os 100 anos do átomo de bohr. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 35, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.
- PÉREZ, C. A. S. O modelo do elétron livre de drude completa 100 anos. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 17, n. 3, p. 348–359, 2000. Citado na página 43.
- PINHEIRO, N. A. M.; SILVEIRA, R. M. C. F.; BAZZO, W. A. Ciência, tecnologia e sociedade: a relevância do enfoque cts para o contexto do ensino médio. *Ciência & Educação (Bauru)*, SciELO Brasil, v. 13, p. 71–84, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. et al. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *Rio de Janeiro*, v. 1, p. 47–499, 2014. Citado 11 vezes nas páginas 52, 64, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74 e 76.
- REZENDE, S. M. *Materiais e Dispositivos Eletrônicos*. 1st. ed. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2004. Citado 16 vezes nas páginas 34, 41, 43, 44, 45, 46, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 59 e 69.


SILVA, R. d. et al. Células solares"caseiras". *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 26, p. 379–384, 2004. Citado na página 71.

SZE, S. *Physics of semiconductor devices*. Wiley-Interscience, New York, NY, 1981. Citado 4 vezes nas páginas 55, 56, 57 e 69.

VIAN, Â. et al. *Energia Solar: Fundamentos Tecnologia e Aplicações*. [S.l.]: Editora Blucher. Citado 6 vezes nas páginas 68, 72, 73, 74, 75 e 76.

YAMAZAKI, S. C.; ANGOTTI, J. A. P.; DELIZOICOV, D. Aprender como ensinar física através do livro texto de ciclo básico universitário: um fenômeno didático em questão. *Amazônia: Revista de Educação em Ciências e Matemáticas*, v. 13, n. 28, p. 05–22, 2017. Citado na página 19.

APÊNDICE A – Produto Educacional



**Painéis Solares e a Física de
Semicondutores: A utilização de
UEPS's no ensino de tópicos de Física
Moderna e Contemporânea
na educação básica**

Caio Matheus Fontinele dos Santos



Universidade Federal do Norte do Tocantins - UFNT

Araguaína - 2021

Caio Matheus Fontinele dos Santos

*Painéis Solares e a Física de Semicondutores:
A utilização de UEPS's no ensino de tópicos
de Física Moderna e Contemporânea na
educação básica*

Universidade Federal do Norte do Tocantins - UFNT

2021

Caio Matheus Fontinele dos Santos

*Painéis Solares e a Física de Semicondutores:
A utilização de UEPS's no ensino de tópicos
de Física Moderna e Contemporânea na
educação básica*

Universidade Federal do Norte do Tocantins - UFNT

2021

© 2021 Caio Matheus Fontinele dos Santos

Qualquer parte desta publicação pode ser reproduzida, desde que citada a fonte.

Agradecimentos

Esse produto educacional não seria possível sem o incondicional apoio da minha estimada professora e orientadora Dr^a. Regina Lélis de Sousa. Sua tutoria se tornou fator preponderante para a elaboração e êxito desse material

Gostaria ainda de registrar aqui minhas gratulações ao Prof. Msc. Elves Silva de Sousa, por toda atenção e apoio incondicional na aplicação deste produto educacional. Sua consideração e confiança contribui diretamente para a completude dessa etapa.

Por fim, findo aqui meus sinceros agradecimentos a todos que de forma direta e indireta, se fizeram presente até nos mínimos aspectos deste trabalho.

Muito obrigado!

Lista de ilustrações

Figura 1 – Mapa conceitual: UEPS	13
Figura 2 – Catástrofe do Ultravioleta	21
Figura 3 – Esquema experimental para observar o efeito fotoelétrico	23
Figura 4 – Gráfico de corrente elétrica <i>versus</i> potencial elétrico . . .	25
Figura 5 – Placa Arduino Uno	30
Figura 6 – Interface IDE	31
Figura 7 – Circuito LED + LDR	33
Figura 8 – Programa LDR + LED na IDE do Arduino	33
Figura 9 – Esquema do circuito elétrico dos postes de energia du- rante o dia	34
Figura 10 – Esquema do circuito elétrico dos postes durante a noite .	35
Figura 11 – Exemplo de estrutura cristalina dos sólidos - NaCl	42
Figura 12 – Esquema representativo das bandas de energia	43
Figura 13 – Ilustração da junção P-N com acúmulos de carga	47
Figura 14 – Comportamento do campo elétrico na junção P-N	49
Figura 15 – Estrutura e composição de uma célula fotovoltaica	50
Figura 16 – Exemplo de célula solar de silício	52
Figura 17 – Módulos fotovoltaicos	53
Figura 18 – Potência mundial fotovoltaica gerada na ano de 2018 . .	55
Figura 19 – Matriz energética brasileira (2019)	56
Figura 20 – radiação solar global diária (média anual)	56
Figura 21 – Insolação Diária, Média Anual (horas)	57
Figura 22 – Simulador do esquema de bandas, elétrons e buracos . .	61
Figura 23 – Trecho do simulador mostrando uma célula de silício . . .	64

Sumário

1	Apresentação	7
2	Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS's)	9
2.1	A teoria da Aprendizagem Significativa (TAS)	10
2.2	Estrutura das UEPS's	11
3	Os Três Momentos Pedagógicos	15
3.1	Problematização inicial	16
3.2	Organização do Conhecimento	16
3.3	Aplicação do Conhecimento	17
4	UEPS Nº 1 – O ensino do efeito fotoelétrico	19
4.1	O surgimento da Física Quântica	19
4.2	Einstein e o efeito fotoelétrico	22
4.3	Metodologia da UEPS Nº 1	27
4.3.1	Aula 01 - A apresentação do tema	27
4.3.2	Aula 02 - O desenvolvimento do tema	29
4.3.2.1	A placa Arduino e o sensor LDR	29
4.3.3	Avaliação da UEPS Nº 1	36
4.3.4	Resumo da UEPS Nº 1	38
5	UEPS Nº 2 - Os materiais semicondutores: Das células aos painéis solares	41
5.1	Os materiais semicondutores	42
5.2	Elétrons e “buracos”	44
5.3	As junções P-N	46
5.4	O efeito fotovoltaico	48
5.5	Os painéis e as células solares	50
5.6	A energia fotovoltaica no Brasil e no mundo	54
5.7	Metodologia da UEPS Nº 2	58
5.7.1	Aula 1 - Conhecendo os materiais semicondutores	59
5.7.2	Aula 2 - Estudo das junções P-N e do efeito fotovoltaico	62
5.7.3	Aula 3 - As células e painéis solares e suas aplicações	63
5.7.4	Avaliação da UEPS Nº 2	65

5.8	Resumo da UEPS nº 2	67
5.9	Considerações finais	68
	Referências	71
Apêndices		73
	APÊNDICE A Planos de Aula	75

Apresentação

Esse produto educacional é um derivado direto da dissertação intitulada “Painéis Solares e a Física de Semicondutores: A utilização de UEPS’s no ensino de tópicos de Física Moderna e Contemporânea na educação básica”, ambos, idealizados sob minha permanência enquanto discente no programa de pós-graduação Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF). Este trabalho, portanto, tem como objetivo principal apresentar uma abordagem didática plausível para o ensino de tópicos de Física Moderna e Contemporânea utilizando métodos e metodologias como os três momentos pedagógicos de Delizoicov, Angotti e Pernambuco, que por sua vez é respaldada pela pedagogia Freiriana, além de ser construída e idealizada com base também na teoria da Aprendizagem significativa (TAS) de David Ausubel.

Mais especificamente, o projeto que deu origem a tais trabalhos é guiado pelo ensino de conteúdos que são propriamente objetos de estudo da Física do Estado Sólido e da Física da Matéria Condensada: os materiais semicondutores. Ele é pautado em uma abordagem local, utilizando uma aplicação destes materiais: As células fotovoltaicas que compõem os módulos solares, ou como são popularmente chamadas, placas solares.

Nele foram utilizadas sequências didáticas dinâmicas, firmemente estruturadas e conectadas entre si, as Unidades de Ensino Potencialmente

Significativas, ou em abreviação, UEPS's, frutos do extenso trabalho do Professor Marco Antonio Moreira e sua ampla contribuição para o Ensino de Física no Brasil, sendo ele uma das principais referências desse projeto.

Cada UEPS tem um objetivo próprio e agrega metodologias e abordagens que melhor exprimem as habilidades e competências que se almejam ensinar ao final da aplicação do produto. Assim sendo, embora cada uma das duas UEPS's apresentadas aqui funcionem perfeitamente de modo isolado, elas se complementam no sentido de se somarem mutuamente a fim de atingir um resultado final: o de ensinar conceitos próprios dos materiais semicondutores e suas aplicações, de forma significativa.

A UEPS nº 1 é uma sequência didática introdutória que trata do efeito fotoelétrico e sua relação direta com as placas fotovoltaicas. Na UEPS nº 2, que será maior que a primeira, trataremos propriamente dos materiais semicondutores e sua relação com essa aplicação, principal foco do trabalho.

Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS's)

Segundo Moreira ([MOREIRA, 2012](#)), as Unidades de Ensino Potencialmente significativas são sequências didáticas pautadas em teorias de ensino, principalmente na Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) de David Ausubel (1918 - 2008). Para tal, essas sequências são concebidas tendo em mente certos preceitos que a estruturam inteiramente, sendo o mais fundamental deles, talvez, o de que “não há ensino sem aprendizagem”, ou seja, “o ensino é o meio e a aprendizagem é o fim” ([MOREIRA, 2012](#)).

Antes de avançarmos para a concepção e estruturação das UEPS's, se faz necessário ainda que resumidamente, uma discussão sobre a teoria da Aprendizagem Significativa, tema do próximo item.

2.1 A teoria da Aprendizagem Significativa (TAS)

Neste item, iremos apresentar uma breve explanação sobre a teoria da aprendizagem significativa, de forma a justificar a construção das UEPS's e subsidiar as discussões provenientes dela, que envolverão diretamente essa teoria.

De forma resumida, aprendizagem significativa é aquela que possui significado e é adquirida também com significado pelo indivíduo que aprende, ou seja, é uma aprendizagem dinâmica, no sentido de interagir com os conhecimentos prévios desse, se apoiando e nutrindo deles e se **diferenciando progressivamente** (voltaremos a esse termo posteriormente), até se mostrar como um novo conhecimento que é plenamente entendido e abstraído pela estrutura cognitiva do sujeito que aprende (MOREIRA, 2012).

Nesse tipo de aprendizagem ocorre um nível de assimilação e compreensão do conteúdo ou assunto em questão de uma forma completamente diferente, e após esse processo, o indivíduo é capaz de aplicar tal conhecimentos em situações teóricas e concretas, formular questões e modelos, sendo capaz de utiliza-lo com mais clareza e eficácia.

Um outro tipo de aprendizagem que é geralmente mencionada quando tratamos da TAS é a **aprendizagem mecânica**. Nessa, o novo conhecimento não interage eficazmente ou de fato não interage com os conhecimentos prévios do indivíduo, sendo caracterizada como uma simples memorização mecânica de novas informações, sem qualquer significado ao indivíduo que a pratica.

As informações apreendidas dessa forma, quase sempre possuem um curto tempo de duração e ficam vinculadas as nossas memória de trabalho (antes, chamada mais popularmente de memória de curto prazo), sendo provavelmente esquecidas pouco tempo depois. Ela é a popular “decoreba”, tão famosa décadas atrás, mas que ainda encontra espaço nas salas de aula das escolas nos dias de hoje, segundo Moreira (MOREIRA; OSTERMANN, 2005).

Ainda, segundo ele, é importante destacar que a aprendizagem Mecânica e Significativa não são dois polos extremos e incomunicáveis, separados por um abismo intransponível. Ambas são partes de um mesmo processo onde a aprendizagem mecânica se encontra como opção mais fácil pelos estudantes já que muitas vezes ao não entenderem o conteúdo

proposto e o propósito deste, acabam memorizando equações, conceitos, símbolos, sem saberem de fato o que estão decorando. Infelizmente no ensino de Física, é o que geralmente ocorre, a aprendizagem mecânica é, portanto, predominante (MOREIRA, 2021).

Em contrapartida a aprendizagem mecânica, a aprendizagem significativa é dita **progressiva**, pois não ocorre instantaneamente, ela é uma construção, um processo contínuo que comunica e interage com diversas informações presentes na estrutura cognitivas do aprendiz, nomeadas por Ausubel de subsunçores (em tradução livre), muitas vezes chamadas de ideias ancora por Moreira. Segundo Ausubel, esse é o fator que mais influencia a aprendizagem significativa.

A TAS ainda apresenta as características de ser **não literal(substantiva)** e **não arbitrária**. Não literal significa, que ela não ocorre exatamente da mesma forma para todos e com subsunçores bem definidos, há uma subjetividade tremenda nesse processo. Não arbitrária significa que não é com qualquer conhecimento prévio que os novos conhecimentos se “ancoram”, mas apenas com os subsunçores relevantes para aprendizagem de determinado conhecimento (MOREIRA; OSTERMANN, 2005).

Os subsunçores, integrantes do conhecimentos prévios (e muitas vezes tidos como os próprios conhecimentos prévios) podem assumir a forma de absolutamente qualquer coisa (caso o indivíduo os tenha, se não os possuir o professor deverá suprir essa necessidade), seja uma ideia, um modelo mental, qualquer construto proveniente da experiência do indivíduo que possa influenciar a aprendizagem de um novo conhecimento. Pode ser caracterizado como um subsunçor, essa gama de possibilidades que servirá como ancoradouro, como base agregadora para os novos conhecimentos.

Para a compreensão do propósito das UEPS's, esse nível de entendimento da TAS será suficiente, mas caso se faça necessário conhecer ou discutir mais detalhes sobre a teoria, voltaremos a ela imediatamente.

2.2 Estrutura das UEPS's

Tal como dito anteriormente, as Unidades de Ensino Potencialmente Significativas recebem esse nome justamente por serem sequências didáticas que apoiadas sobre a TAS, apresentam um enorme potencial de serem materiais que contribuam para a aprendizagem significativa. Esses materiais

recebem esse nome “potencialmente significativos” pois como afirma Moreira, o significado está nas pessoas e não nas coisas (MOREIRA, 2012). É por isso que, continuando em seu raciocínio, não há sentido em falar de um “livro significativo” ou uma “aula significativa”. Contudo, esses materiais podem ser potencialmente significativos a medida que o indivíduo que aprende atribui significado a esses materiais com base nos subsunçores presentes em sua estrutura cognitiva.

Tratando especificamente da estrutura das UEPS's, podemos enumerar características e situações que são fundamentais para sua elaboração e execução, como sugere Moreira (MOREIRA, 2012). De forma resumida aqui, considerando os aspectos sequenciais ou passos, podemos elencar as seguintes ideias guia:

1. Definir previamente, e de forma consistente, os tópicos que se pretendem ensinar;
2. Elaborar e propor qualquer tipo de atividade ou situação que leve o educando a externalizar os conhecimentos prévios que possui; geralmente por **situações problema** como explicado a seguir;
3. Investir e trabalhar com base em situações problema, elas são de extrema importância pois exprimem do indivíduo seus conhecimentos prévios, preparando o “terreno” para a aprendizagem dos novos conhecimentos;
4. Os conceitos e conteúdos apresentados nas UEPS's devem ser tratados de forma decrescente, ou seja, dos mais gerais e simples aos mais específicos e complexos. Esse processo deve ser gradual, o professor deve estar preparado para transitar entre eles, avançando quando necessário e voltando em conteúdos já discutidos, aumentando o grau de complexidade caso haja necessidade;
5. A avaliação é o último passo da aplicação de uma UEPS, e idealmente, ela deve ser do tipo **formativa** e **somativa**. Explicando de forma mais direta, o professor ao longo de toda a aplicação deve se manter alerta para cada sinal de aprendizagem, de dúvida e de qualquer outra situação ou característica que possa contribuir para avaliar a aprendizagem de seus alunos ao final da UEPS (avaliação formativa), sendo que no final ele deve examinar seus alunos com

uma avaliação formal (avaliação somativa) para que, com ambos os resultados das avaliações, possa obter o veredito de sua unidade de atividades.

Os passos citados acima configuram um resumo dos passos apresentados por (MOREIRA, 2012) para a elaboração e execução ideal de uma UEPS. Esse tipo de sequência didática, por apresentar essas características se encaixa com uma metodologia de ensino pautada em passos, sequenciada logicamente, a teoria dos três momentos pedagógicos (3MP), utilizadas em ambas as UEPS's apresentadas nesse produto educacional. E é sobre ela que trataremos no próximo capítulo.

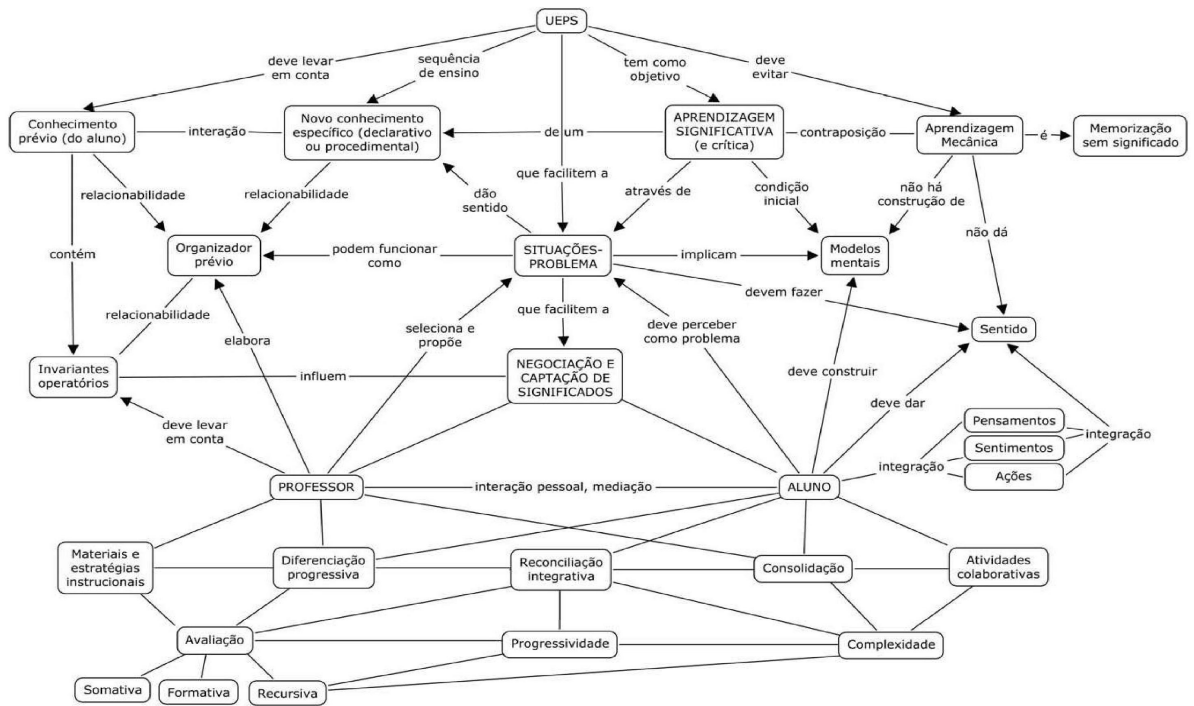


Figura 1 – Mapa conceitual: Aspectos sequenciais das UEPS's.

Fonte: Retirada da referência (MOREIRA, 2012).

Os Três Momentos Pedagógicos

Dando prosseguimento ao estudo das teorias e metodologias de ensino que embasam esse produto educacional, vamos discutir brevemente a teoria dos três momentos pedagógicos (3MP), idealizada por Delizoicov, Angotti e Pernambuco. Esta é uma metodologia desenvolvida sob a ótica Freiriana de ensino, se apresentando como uma aplicação da mesma em um algoritmo eficaz e delineado nas três partes. Os três momentos são: **Problematização inicial, Organização do Conhecimento e Aplicação do Conhecimento**. Cada um deles possui um objetivo específico que os diferenciam entre si, e nos itens a seguir vamos conhecer mais sobre cada um deles ([MUENCHEN; DELIZOICOV, 2018](#)).

Porém, antes de prosseguirmos é importante destacar que aqui não será discutido a teoria Freiriana de ensino em toda sua profundidade e detalhes, visto que o objetivo é apresentar inicialmente todas as teorias de ensino e metodologias que embasam as UEPS's. Apesar disso, como essa teoria está diretamente ligada aos 3MP, caso seja necessário, faremos menção a ela e apresentaremos as ideias fundamentais para que o leitor acompanhe o desenvolvimento da sequência didática.

3.1 Problematização inicial

A problematização inicial é conhecida como primeiro momento pedagógico. Aqui, ao invés de adotar uma postura discursiva e explanadora, o professor deve instigar seus alunos com situações problema (questões orais, na maioria das vezes) para que esses apresentem seus conhecimentos prévios sobre o conteúdo que se pretende ensinar, sempre buscando fomentar discussões, com uma posição mediadora (ANGOTTI, 2015; MUENCHEN; DELIZOICOV, 2018).

O professor não precisa se limitar apenas a propor questões orais. Imagens, vídeos, textos lidos por eles ou em grupos pelos alunos, as opções são vastas. Qualquer tipo de situação problema que cumpra seu papel de incitar e aguçar a curiosidade dos alunos, de fazê-los pensar e repensar sobre suas concepções frente a situação apresentada são igualmente válidos.

Segundo (ANGOTTI, 2015; MUENCHEN; DELIZOICOV, 2018), e já pensando na aprendizagem com significado, foco da TAS, essas situações problema, presentes nesse momento pedagógico se tornam mais enriquecedores e significativamente importantes a medida que mais atreladas ao cotidiano de seus alunos elas estejam. Ao analisar situações familiares ao dia a dia de seus educandos, do seu cotidiano, essa etapa apresentará resultados mais consistentes para o educador.

Ainda segundo (ANGOTTI, 2015; MUENCHEN; DELIZOICOV, 2018), o clímax desse momento de problematização é alcançado quando o educando percebe que não dispõe de conhecimentos suficientes para explicar tal fenômeno, ou conceber uma resposta aceitável para determinado questionamento. Essa situação de insuficiência trará ânsia pela obtenção de mais conhecimentos que o levarão as respostas que busca.

3.2 Organização do Conhecimento

A organização do conhecimento é conhecida como o segundo momento pedagógico. Aqui, o professor irá apresentar gradualmente os conhecimentos necessários a resolução da questões e problemas levantados no momento pedagógico anterior. Para tanto, o professor pode dispor das metodologias e artifícios (como TDIC's (Tecnologias Digitais da Informação e Comunicação), exercícios do livros didático, experimentos virtuais ou de

baixo custo, etc.) que quiser, para apresentar tal conteúdo aos seus alunos (ANGOTTI, 2015).

Nessa etapa, o conhecimento científico deve ser apresentado como um recurso que os educandos identifiquem como necessários a fim de sanar as lacunas identificadas por eles, ao falharem em solucionar as situações problemas apresentadas. O professor deve sempre buscar começar pelos aspectos mais gerais e ir diferenciando progressivamente a medida que avançam as discussões, ou seja, os subsunçores mais gerais e abrangentes vão sendo moldados e lapidados em subsunçores mais específicos com o prosseguimento do processo de ensino-aprendizagem.

Esse processo de **diferenciação progressiva**, explicado acima e característico da TAS, pode ocorrer concomitantemente a outro, conhecido como **reconciliação integrativa** (ou integradora). Neste último, os conhecimentos pré-existentes em relação ao que se pretende ensinar se recombina a medida que o indivíduo que aprende, estabelece novas relações entre os novos e antigos conceitos, reconhecendo entre eles, semelhanças e diferenças, obtendo assim novos subsunçores ao reconcilia-los e integra-los gradativamente (MOREIRA; OSTERMANN, 2005).

3.3 Aplicação do Conhecimento

A aplicação do conhecimento é o terceiro e último momento pedagógico. Esta etapa é caracterizada por compilar os avanços obtidos nos dois momentos anteriores, direcionando-os para um objetivo comum: aplicar o conhecimento obtido nas mais diversas situações.

Angotti (ANGOTTI, 2015) destaca que o objetivo principal desta etapa é muito mais que treinar o aluno a aplicar algoritmos, modelos e conceitos para de simplesmente solucionar problemas. Na verdade, o que se almeja é preparar o aluno com base no repertório científico adquirido por ele, aplicá-lo em situações reais, cotidianas e em modelos teóricos, uma vez que estes conhecimentos tenham sido plenamente entendidos pelos educandos.

É importante lembrar que geralmente, nesse momento pedagógico, dúvidas são frequentes já que justamente quando os alunos precisam aplicar o conhecimento trabalhado no momento de organização do conhecimento, é que o que aprenderam (se aprenderam) é posto a prova e os questionamentos mais fundamentais surgem. Diante dessa situação, o professor

deve, com base na organização que preferir, sanar os questionamentos finais favorecendo a reconciliação integrativa citada anteriormente. Essa parte é o arremate e finalização dos três momentos pedagógicos, que conversam diretamente e organicamente entre si.

UEPS Nº 1 – O ensino do efeito fotoelétrico

Após o breve vislumbre das teorias e metodologias de ensino que embasam as Unidades de Ensino Potencialmente Significativas que apresentaremos aqui, agora nosso foco se volta aos princípios físicos que pretendemos trabalhar em cada uma das sequências didáticas. A seguir se encontra uma breve explanação histórica e científica sobre o famigerado efeito fotoelétrico, tema principal da UEPS número um (UEPS Nº 1), que trata justamente do ensino do efeito fotoelétrico.

4.1 O surgimento da Física Quântica

Até meados do fim do século XIX, a Física Clássica (a física desenvolvida por Galileu, Newton, Maxwell, dentre outros grandes nomes) e seu grande êxito, baseada em várias comprovações experimentais, já era mais que unanimemente aceita. James Klerk Maxwell (1831 - 1879) acabara de unificar a eletricidade e o magnetismo em quatro equações que descreviam completamente todos os fenômenos elétricos e magnéticos, bem como explicitava a ligação direta entre esses dois ramos, tornando o termo eletromagnetismo conhecido. No meio científico da época, pairava a sensação

de que a física, como ciência, já estava finalizada, completa por assim dizer, e não haveria mais nada de significativo a se propor teoricamente e se comprovar experimentalmente.

Entretanto, ainda existiam alguns fenômenos que permaneciam sem explicação, quando analisados sob a interpretação clássica, dentre eles o mais importante para a nossa discussão é o da **catástrofe do ultravioleta**, que “obrigaria” Max Planck (1858 - 1947) a propor a **teoria da quantização da energia**, dando o primeiro pontapé oficial rumo ao surgimento da Física Quântica (NUSSENZVEIG, 2014).

Sabe-se que um corpo dotado de temperatura (ou, seja, com temperatura acima do zero Kelvin) emite radiação térmica na forma de ondas eletromagnéticas. Isso é perfeitamente entendível sob uma ótica clássica, já que a temperatura de um corpo nada mais é que uma medida da agitação térmica das partículas que o compõem. Como a matéria é composta essencialmente de átomos cujos constituintes são partículas com cargas elétricas, a agitação destas resulta na emissão de ondas eletromagnéticas.

Um exemplo bem claro disso é o carvão incandescente em churrasqueiras, por exemplo. O carvão em si não emite radiação eletromagnética, mas ao ser aquecido a uma temperatura suficiente, adquire uma cor característica (brasas) e passa a emitir radiação eletromagnética por irradiação, na sua maior parte (ainda há transferência de calor por convecção, só que em menor escala). Sua alteração de cor, devido ao aquecimento indica que a radiação está na parte do espectro visível, já que podemos observá-la ¹.

Segundo a predição fornecida pela Física Clássica, um gráfico de distribuição espectral de radiação térmica, estabelecido pelo eixo de intensidade luminosa $I(\nu)$ em função frequência ν , deveria crescer com ν^3 , ou seja, o gráfico apresentaria uma tendência crescente ao infinito. Porém, isso não era observado experimentalmente. A tendência registrada pelos experimentos da época, era a intensidade aumentar com a frequência até um valor de pico, e depois cair gradativamente, como representado na figura (2). Tinha-se então um problema teórico em mãos.

Para baixas frequências os fenômenos eram explicáveis empregando a teoria clássica, porém para altas frequências, ela falhava completamente em descrever o que acontecia, daí o nome “catástrofe do ultravioleta” (visto a alta frequência dessa radiação).

¹ Mais detalhes em <https://www.if.ufrgs.br/~betz/iq_XX_A/radTerm/aRadTermText.htm>

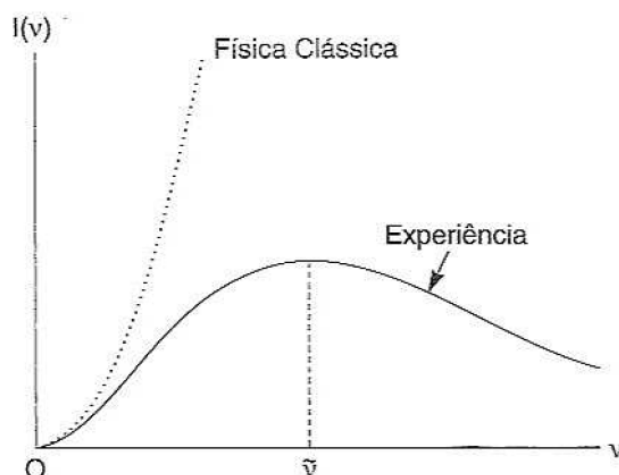


Figura 2 – Distribuição espectral da radiação térmica.

Fonte: Retirada da referência (NUSSENZVEIG, 2014).

Encarando esse grande empecilho, soluções envolvendo a teoria foram sendo discutidas, apesar da enorme devoção e certo conservadorismo em relação a todo o conhecimento organizado e sistematizado até ali, já que os cientistas da época estavam relutantes em alterar as teorias clássicas a fim de adequá-las aos fenômenos experimentais observados. Foi então que, com uma proposta bastante ousada e igualmente inovadora, Max Planck em 1900 propôs uma nova equação para $I(\nu)$ que estava bastante alinhado com as observações experimentais da época (NUSSENZVEIG, 2014).

O grande impasse era que, para conceber tal expressão, Planck assumiu que a energia era transmitida não de forma ininterrupta e contínua como se pensava unicamente até então, mas sim, de forma discretizada, em pequenos “pacotes” de energia, os quais ele nomeou de *quantum* (cujo plural é *quanta*, o que deu nome a teoria), dando origem a uma nova forma de pensar, e igualmente, a uma das teorias físicas mais bem sucedidas de todos os tempos, a Física Quântica (NUSSENZVEIG, 2014).

Essa mesma ideia chave envolvendo a energia seria utilizada por Albert Einstein (1879 - 1955) em sua explicação do efeito fotoelétrico, o que lhe renderia o prêmio nobel de Física, em 1921. Esse será justamente o foco da próxima seção.

4.2 Einstein e o efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico foi detectado primeiramente por Heinrich Hertz (1857 - 1894) em 1887, ao observar faíscas que saltavam entre dois eletrodos, quando ele estava trabalhando com descargas elétricas. Hertz já havia se destacado no meio científico ao detectar ondas eletromagnéticas por meio de seu próprio aparato experimental, corroborando a tão estimada teoria eletromagnética de Maxwell (NUSSENZVEIG, 2014) (CAVALCANTE et al., 2002).

Sua constatação certa e de grande valia, seria a observação que essas mesmas descargas elétricas aconteciam com menos assiduidade e de forma mais branda, quando os eletrodos não estavam expostos a radiação luminosa. Porém, quando fazíamos exatamente o contrário, ou seja, caso os eletrodos estivessem expostos a radiação luminosa, a descarga ocorria com mais intensidade e um maior número de vezes. Esse é, de forma bem ilustrativa, o efeito fotoelétrico, que consiste essencialmente na ejeção de elétrons dos metais quando esses são submetidos a radiação luminosa.

Em uma configuração bastante comum desse experimento, mostrada na figura (3), temos dois eletrodos, geralmente isolados em vácuo, onde um amperímetro que está incluso no circuito é o responsável por medir a corrente oriunda da diferença de potencial do sistema. Ao iluminar o cátodo com radiação ultravioleta (na maioria dos casos, e ao final dessa seção vamos entender o porquê), observava-se que elétrons eram liberados dessa região quase que instantaneamente, produzindo uma corrente elétrica que se apresentava mais intensa, quanto mais intensa fosse a radiação luminosa aplicada sobre o cátodo (HEWITT, 2015).

Pensando classicamente, o efeito fotoelétrico não era nenhuma novidade. O fator mais intrigante que o envolvia eram algumas peculiaridades constatadas experimentalmente e que não possuíam explicação pelas teorias vigentes. A principal inconsistência talvez fosse o fato de que a energia dos elétrons ejetados **não dependia da intensidade** da radiação incidente, mas em contrapartida, havia indícios experimentais de que essa dependência ocorria, na verdade, com a **frequência** das radiações luminosas envolvidas.

Como a luz, até então, era vista apenas como um fenômeno ondulatório, as ondas que comportam energia deveriam conferir aos elétrons do metal certa quantidade de energia que os fariam oscilar até terem energia sufici-

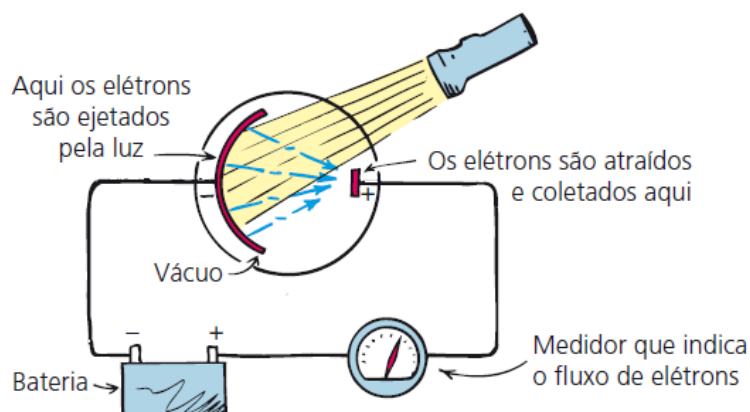


Figura 3 – Aparato genérico para detectar o efeito fotoelétrico.

Fonte: Retirada da referência (HEWITT, 2015).

ente para se desprender do metal (CAVALCANTE et al., 2002; HEWITT, 2015). Essa era a explicação do fenômeno utilizando a física conhecida na época, mas não era isso que acontecia experimentalmente.

Além disso, o fato do efeito insistentemente acontecer quase que imediatamente após a incidência da radiação luminosa era bastante intrigante, já que, segundo novamente, a física clássica, e como já citado anteriormente, os elétrons ejetados deveriam levar certo tempo até adquirir energia necessária para se libertar do metal e passarem a se movimentar.

Dessa forma, ondas com menores frequências, mas impostas sobre o metal com mais intensidade não “arrancavam” elétrons mais energéticos e velozes, enquanto radiações ultravioletas impostas sobre o metal, só que em intensidade menor, arrancavam menos elétrons, mas estes sendo mais energéticos e velozes que no caso anterior. Não havia explicação clássica para esse fenômeno e respostas satisfatórias para essas questões intrigantes só seriam dadas em 1905, por Einstein (HEWITT, 2015).

Da mesma forma que Planck, e talvez, de forma mais ousada ainda, Einstein propôs que a luz, no caso do efeito fotoelétrico, se comportaria como um **feixe de partículas** ao invés de seu comportamento ondulatório usual, ou seja, em sua concepção, a luz era quantizada. Assim sendo, os *quanta* de luz seriam transmitidos ao eletrodo, onde os elétrons os absorveriam totalmente ou não, não sendo possível a absorção de meio *quantum* de energia. Ao tratar a luz como um feixe de corpúsculos, Einstein mostrou uma nova interpretação desse fenômeno que mexeu repentinamente com

o meio científico da época.

Cada um desses *quantuns* de energia viria mais tarde a ser chamado de **fóton**, dando a entender que assim como os prótons e elétrons, a luz agora, também deveria ser vista como um conjunto de partículas.

Segundo Einstein, era justamente essa energia fornecida pelos fótons que fazia com que os elétrons se desprendessem do metal e passassem a se mover. Para esses **fotoelétrons** embebidos de energia, cabia apenas realizar certa quantidade de trabalho para se libertarem do catodo, portanto a energia cedida ao elétron pelo fóton tem que ser suficiente para fazê-lo vencer essa quantidade específica de energia (que é inerente ao material do catodo) chamada de função trabalho W_0 (NUSSENZVEIG, 2014). Dessa forma, cada fóton de luz carregaria a energia de:

$$E = h \cdot \nu \quad (4.1)$$

Onde em (4.1), h é a constante de Planck, inserida pelo próprio Planck em sua teoria quântica e ν seria a frequência do fóton em questão. Se considerarmos a energia perdida para que o fóton possa se desprender do metal, W_0 :

$$E = h \cdot \nu - W_0. \quad (4.2)$$

Para fecharmos nossa discussão sobre a o efeito fotoelétrico, precisamos ainda, discutir um pouco mais sobre o aparato citado anteriormente e as características da corrente elétrica e do potencial elétrico nesse processo.

Voltando ao experimento mostrado em (3), podemos traçar um gráfico de corrente *versus* potencial elétrico ($I \times V$) e observar o seguinte comportamento (4): O valor da corrente elétrica i aumenta proporcionalmente com o potencial elétrico V (são diretamente proporcionais), até a primeira atingir um valor de saturação I_s . Esse processo é específico para uma dada radiação de intensidade I_0 e frequência ν , onde o material que compõe o cátodo influencia diretamente nesse processo. Dessa forma, todos os elétrons ejetados do catodo, dos mais velozes aos menos velozes, serão coletados pelo ânodo (NUSSENZVEIG, 2014).

Outro aspecto interessante desse mesmo gráfico, é que para zerarmos o valor da corrente elétrica (ou seja, para termos $i = 0$), precisamos inverter a polaridade do potencial elétrico V . O significado físico disso é que, ao

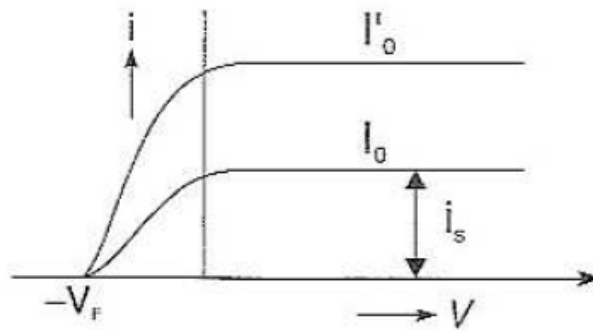


Figura 4 – Gráfico de i versus V para um dado material que compõe o cátodo.

Fonte: Retirada da referência (NUSSENZVEIG, 2014).

invés de serem atraídos do cátodo para o ânodo, os elétrons irão ser “freados”, ou seja, em meio a seu processo de atração até o ânodo, eles serão repentinamente repelidos pelo ânodo e irão agora em direção ao cátodo. Nesse processo, a corrente continuará fluindo no mesmo sentido, só que, concomitantemente irá diminuir quanto mais negativo se tornar V , até que tenhamos um potencial específico onde i vale zero (0), esse é o **potencial de corte**, $-V_F$ (NUSSENZVEIG, 2014).

Por fim, vale destacar que aumentando a intensidade luminosa de I_0 para I'_0 , o comportamento da corrente com o potencial é o mesmo, só o módulo da corrente que irá aumentar, já que o fluxo de elétrons arrancados será maior.

Agora, voltando ao comentário anterior, sobre fazer os elétrons pararem instantaneamente e retornarem em seu movimento, precisamos que ocorra, em termos de energia, a seguinte situação:

$$E_{cinética} = E_{potencial} \quad (4.3)$$

Ou seja, a energia cinética do elétron deve ser equivalente a sua energia potencial elétrica:

$$\frac{1}{2} m_e v_e^2 = -eV \quad (4.4)$$

Em (4.4), m_e e v_e são respectivamente, a massa do elétron e sua velocidade ao ser ejetado. A carga do elétron é representada por $-e$ e V o potencial ao qual o sistema está submetido.

Concluindo nossa expressão para os fotoelétrons ejetados do cátodo, ou seja, compilando (4.2) e (4.4), obtemos;

$$\frac{1}{2}m_e v_e^2 = -eV = h \cdot \nu - W_0 \quad (4.5)$$

que é a equação geral do efeito fotoelétrico. Assim, com base na interpretação de Einstein do efeito fotoelétrico, estavam elucidados as principais inconsistências do fenômeno:

- A energia de cada fóton depende diretamente de sua frequência. Dito isso, radiações de altas frequências retiram elétrons mais energéticos do cátodo, mas não necessariamente faz com que mais elétrons sejam retiradas do metal, não influenciando, portanto numa corrente de maior ou menor intensidade no circuito. Como vimos, essa característica está ligada a intensidade da radiação luminosa, apenas.
- Quanto mais intensa é a radiação luminosa que incide sobre o cátodo, mais fótons são imprimidos sobre esta e, portanto, mais elétrons serão ejetados. Por isso a intensidade da corrente está ligada a intensidade, e não a frequência, como se acreditava ser.
- O processo de ejeção dos elétrons é instantâneo, já que cada fóton ao colidir com os elétrons fariam com que esses, agora mais energéticos, se libertassem, fenômeno guiado pela conservação do momento linear, propriedade que envolve partículas e que também se aplica no domínio quântico.
- O fenômeno era nitidamente observado quando era utilizada principalmente a radiação ultravioleta, já que esta conferia aos elétrons, fótons mais energéticos, o que facilitava bastante o seu processo de abandono do cátodo, vencendo a função trabalho com mais facilidade. Por outro lado, radiações de frequências menores, como o vermelho, não conferia energia suficiente ao elétrons, como evidenciado em (4.1).

É importante destacar que as ideias de Einstein não foram prontamente aceitas, sofrendo uma considerável rejeição, já que as ideias clássicas, bastante arraigadas a cultura científica da época faziam com que os físicos daquele tempo fossem bem resistentes a novas propostas. Porém, com

a consolidação crescente da Mecânica Quântica e com cada vez mais evidências experimentais de que a dualidade onda partícula era real, a comunidade científica teve que dar o braço a torcer, dando a Einstein grande credibilidade no meio científico daquela época.

4.3 Metodologia da UEPS Nº 1

A UEPS número um (Nº 1) é uma unidade didática inicial, com o objetivo de apresentar uma ferramenta útil e bem estruturada para o ensino do efeito fotoelétrico, fenômeno cujo conceito integra e é essencial para a UEPS número 2, focada no ensino dos materiais semicondutores e a geração de energia por meio dos painéis solares que é o foco deste trabalho.

Visando o ensino remoto, a sequência didática foi previamente planejada e pensada para ser aplicada nesse âmbito, porém, não se restringindo somente a esse tipo de abordagem, podendo sim ser aplicada no ensino presencial.

Essa unidade de ensino potencialmente significativa tem duração prevista para **2 aulas (2 horas/aula) de 50 minutos**. Em cada aula será utilizada a metodologia dos três momentos pedagógicos, sendo que um ou outro dos três momentos pode ou não estar presente, dependendo da sua necessidade. A seguir, se encontra a descrição das atividades que devem ser desenvolvidas em cada aula e suas etapas.

4.3.1 Aula 01 - A apresentação do tema

Na primeira aula de aplicação da UEPS, o principal objetivo é situar o aluno sobre o tema. Começando sempre pelo primeiro momento pedagógico, ou seja, a problematização inicial, chamando a atenção dos mesmos e suscitando as primeiras indagações e discussões. Após uma breve e clara apresentação da UEPS, conteúdos e outras dúvidas pertinentes que os alunos possam vir a ter, o professor está apto a começar.

O intuito da parte inicial da aula, além de exprimir os conhecimentos prévios dos alunos é fazê-los pensar sobre o tema e sua relação com ele em seu cotidiano. Guiando a aula como preferir, o professor pode em momentos que achar oportuno, questionar:

1. O que vocês sabem ou ouviram falar sobre a energia proveniente do sol?
2. Já tinham ouvido falar de algo assim antes?
3. Vocês conhecem alguém ou local que utiliza tais painéis?
4. Já haviam se perguntando ou notado o processo automático da iluminação pública?
5. Existe alguma relação entre o sistema de acendimento automático dos postes e os painéis solares?
6. Qual (ou quais) princípios físicos vocês acreditam que estejam envolvidos nos painéis e postes de energia?

Após 10 ou 15 minutos desse momento de interação e inicial, o professor procederá com uma aula expositiva sobre os conteúdos e conceitos introdutórios, esse é o segundo momento pedagógico, a organização do conhecimento. A aula poderá ser ministradas no formato de apresentação em *slides*, abordando os seguintes temas:

- Histórico sobre o surgimento da mecânica quântica e os problemas da Física Clássica - Aqui, pode-se mencionar os outros dois problemas que a física clássica não conseguia lidar, mas dando ênfase a catástrofe do ultravioleta, já mencionada anteriormente.
- Primeiras detecções do efeito fotoelétrico e suas implicações, principalmente, devido a Hertz, podendo citar também Philipp Lenard, que teve um papel importante elucidação do efeito fotoelétrico estudando os raios catódicos.
- Explicar como a física clássica via o efeito fotoelétrico e quais suas inconsistências.
- Dualidade onda-partícula - Nesse tópico, o professor pode avançar diretamente para a ideia da quantização da luz, ou somente explicar o comportamento dual das ondas e partículas.

Essa segunda etapa deverá cobrir a maior parte do tempo de aula disponível, cabendo ao professor a responsabilidade de administrá-la da melhor maneira possível. A partir daqui, o terceiro momento pedagógico

implica em utilizar a bagagem de conhecimento adquirida até aqui em questões teóricas.

Nessa parte, o professor pode dispensar formalidades para registrar as respostas dos alunos, podendo simplesmente observá-los e guiar as discussões, levantando questões como:

- Como vocês acham que as inconsistências poderiam ser resolvidas? Os experimentos estariam equivocados ou seria a teoria que estaria incorreta?
- Qual é a verdadeira natureza da luz, do que ela é formada?
- Como vocês explicariam esse fenômeno espontâneo de ejeção dos elétrons?

Ao fim da aula, os alunos terão assimilado o ritmo da aula e das discussões. Na aula 2, teremos o conteúdo sendo explicitamente ministrado, bem como uma aplicação experimental que servirá como “gancho” para os conceitos que serão apresentados.

4.3.2 Aula 02 - O desenvolvimento do tema

A aula 2 da unidade didática se iniciará novamente com a problematização inicial, dessa vez, inserida em uma atividade experimental assistida utilizando a placa Arduino. Trata-se de uma abordagem pautada em uma TDIC's, que tem como intuito demonstrar aos alunos um sistema fotosensível, como aplicação do que já foi mencionado e do que será visto posteriormente.

Antes de prosseguirmos, se faz necessário ainda que superficialmente, um breve aprofundamento sobre o projeto Arduino, suas principais características e o programa que será utilizado nessa etapa da aula. Após isso, retomaremos com a UEPS.

4.3.2.1 A placa Arduino e o sensor LDR

A placa Arduino provém de um projeto italiano lançado oficialmente em 2005. Ela consiste basicamente em um microcontrolador que permite a aquisição de dados, e portanto, pode ser conectada a um computador, via USB, por exemplo.

Por seu código fonte ser totalmente livre (*open source*) e de fácil acesso e programação através de um ambiente próprio, nomeado de IDE² (Ambiente de desenvolvimento integrado, ou *Integrated Development Environment*), o Arduino acabou se tornando extremamente popular no mundo inteiro. Outro ponto de destaque é o custo benefício dessa ferramenta, tornando-a mais viável financeiramente se comparada a outros tipos de aparatos com igual finalidade. Sua aplicação é vasta, sendo utilizada inclusive por alunos e professores, desde experimentos assistidos utilizando o computador até programações mais avançadas em robótica.

Como é fácil supor, um projeto de tal tamanho não se limitaria a pouco modelos, já que, como dito anteriormente, uma de suas principais características é a versatilidade nas formas com que pode ser utilizada. Dessa forma, a plataforma Arduino possui várias placas no mercado, algumas mais robustas que outras, embora as mais “simples” também desempenhem satisfatoriamente seus papéis, atendendo os mais variados projetos. A seguir, se encontra um exemplo de placa Arduino Uno, onde são mostradas suas entradas analógicas bem como as entradas e saídas digitais (RODRIGUES; CUNHA, 2015; SOUZA et al., 2011).

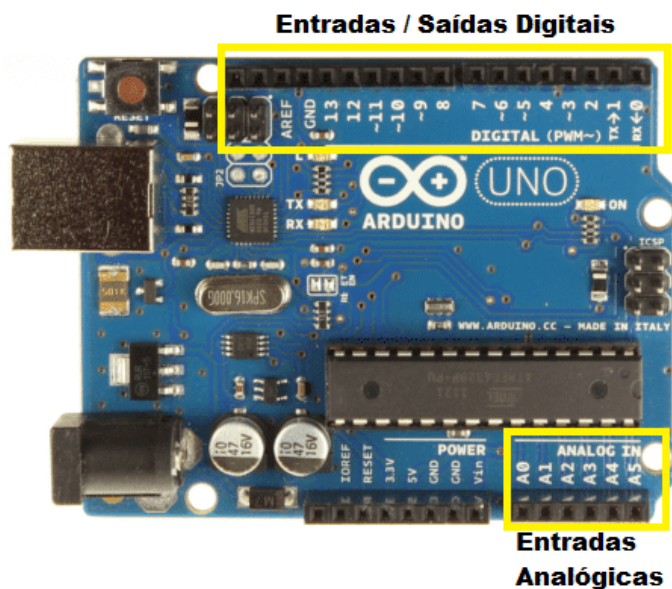


Figura 5 – Placa Arduino Uno com pinos de entrada e saída indicados

Fonte: Retirada do site *O Embarcados* (SOUZA... ,)

² Download da versão mais recente em <<https://www.arduino.cc/en/software>>

A linguagem de programação utilizada no IDE é baseada em outras linguagens já amplamente utilizadas, sendo mais semelhante a linguagem C e C++ como aponta (RODRIGUES; CUNHA, 2015). Antes de começar a executar os primeiros programas utilizando a placa, é importante lembrar de configurar na interface do computador o tipo de placa que se está utilizando (Uno, Duemilanove, etc...), bem como a porta de saída dos dados.

Após finalizar a redação do programa, é só compilar e fazer o *upload* do programa na placa. Se houver erros na compilação, o programa não será executado até que seja corrigido. Os erros são reportados na parte inferior da IDE. A seguir (figura 6), se encontra ilustrada a interface IDE executada no computador, onde a placa Arduino Uno está selecionada

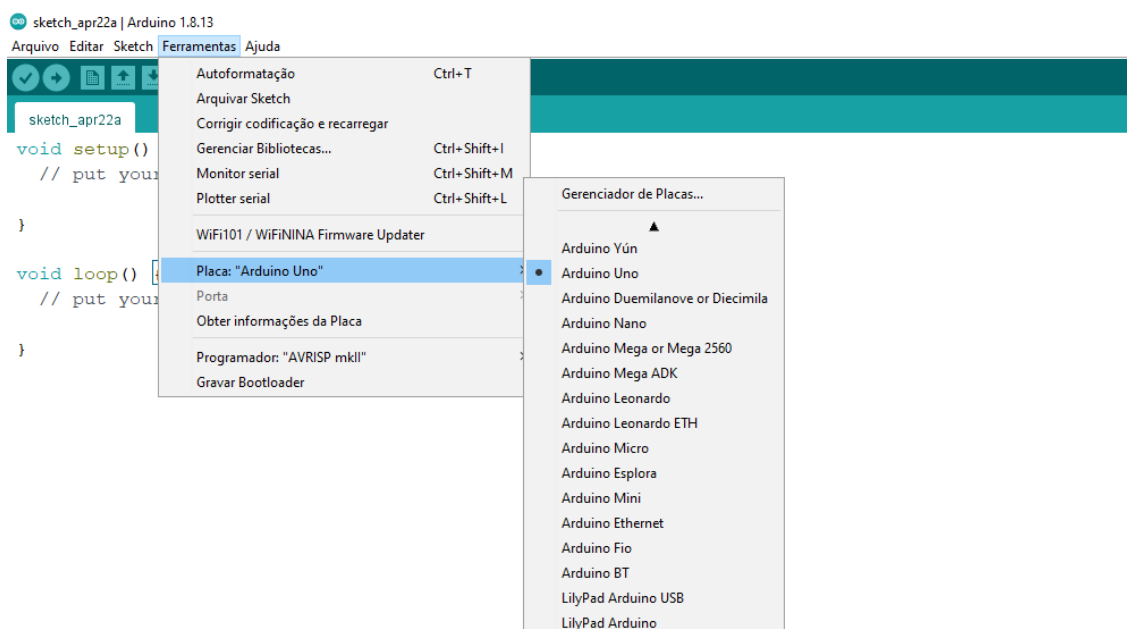


Figura 6 – Interface IDE do Arduino

Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

O programa que a UEPS embasada no efeito fotoelétrico propõe, é um sistema simples utilizando como peça chave o sensor LDR (*Light Dependent Resistor*) que, instalado em nossa *proto-board*, irá simular o mesmo processo de acendimento automático dos postes de iluminação pública. Mas antes disso, vamos conhecer um pouco mais sobre o sensor LDR e os materiais envolvidos.

O sensor LDR é um dispositivo eletrônico que, como indica a sigla, tem sua resistência elétrica variável. Essa variação depende da luminosidade que incide sobre ele, ou seja, a medida que mais iluminado, observa-se

que sua resistência diminui (PEREIRA; AGUIAR, 2006). Sua função em nosso circuito é fazer um LED, também parte do nosso circuito, acender-se quando não há luminosidade incidindo sobre o sensor (em um local pouco iluminado), e observá-lo apagar quando o ambiente está mais iluminado. Os materiais necessários estão elencados a seguir:

- Uma placa Arduino;
- Uma placa para agregar os conectores, a *proto-board*;
- Cinco (5) cabos conectores (*jumpers*);
- Um LED (o vermelho, por exemplo);
- Dois resistores, um para conectar ao LED, e outro que será conectado ao LDR.

A seguir, na figura (7), está exibido o esquema de montagem do circuito utilizando a placa Arduino Uno, com cada um dos componentes especificados. O esquema foi montado utilizando o *software* Tinkercad³. Os *jumpers* foram representados na cor vermelha. Outro detalhe importante são os resistores, e antes de utilizá-los é essencial verificar a resistência dos mesmos para evitar eventuais transtornos, como a danificação do LED e de outros componentes do circuito.

Ainda abaixo, na figura (8), encontra-se o programa completo digitado na IDE do Arduino com alguns comentários pertinentes.

Para calcular a resistência do resistor necessário para nossos objetivos, basta descobrir a alimentação fornecida pelo seu computador $V_{\text{alimentação}}$, em Volts, assim como a voltagem necessária para a alimentação do LED (V_{LED}) e a corrente elétrica que ele suporta (I_{LED}). Com essas informações mãos, utilizamos uma equação derivada da lei de Ohm:

$$R = \frac{(V_{\text{alimentação}} - V_{LED})}{I_{LED}} \quad (4.6)$$

Para um LED de características padrão (2 Volts e corrente de 20 mA), e considerando que nossa alimentação via USB será de 5 V, substituímos esses valores em (4.6) e descobrimos que a resistência mínima necessária é de

³ Acesso em: <<https://www.tinkercad.com/>>

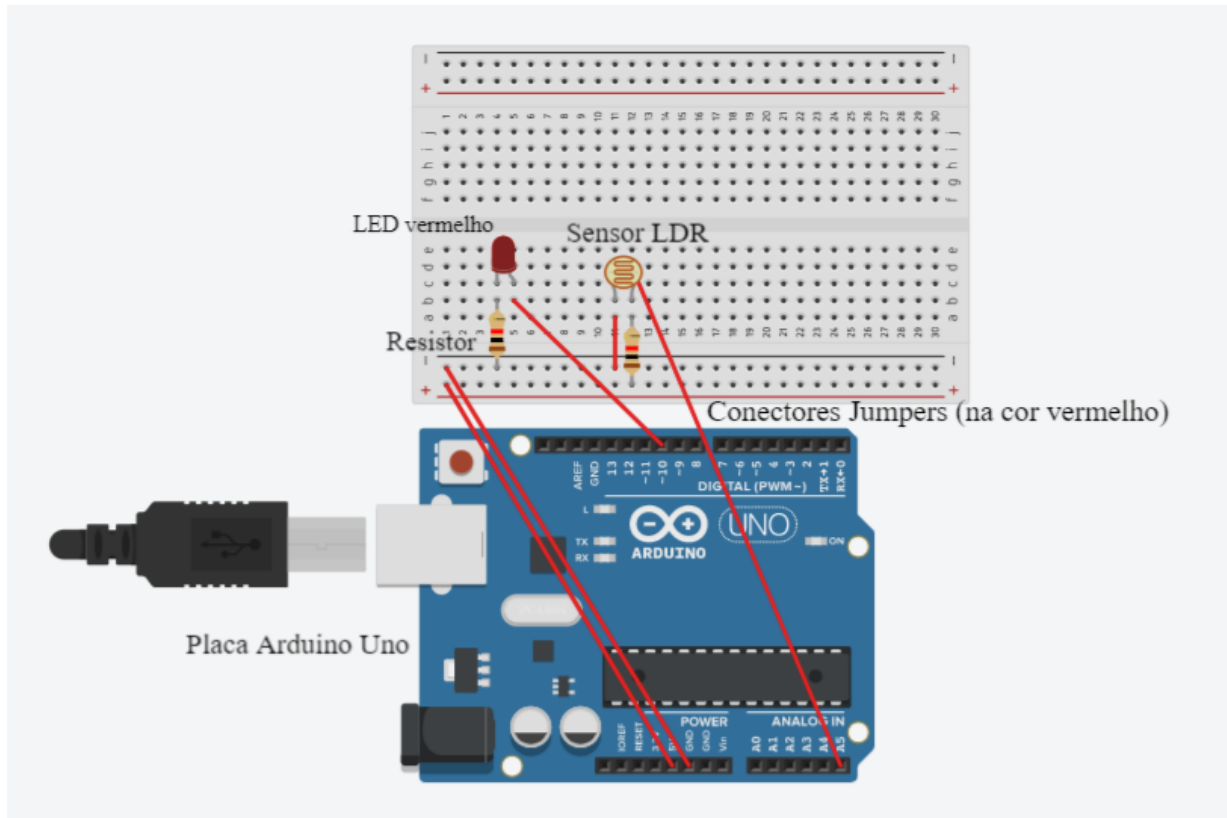


Figura 7 – Montagem do circuito LED + LDR no Arduino

Fonte: Elaborada pelo autor no *software Tinkercad*.

```
// Programa LDR + LED (Demonstração do Rele fotoelétrico, UEPS 1)

int portaLed = 10; // Porta a ser utilizada para ligar o Led
int portaLDR = A5; // porta analógica utilizada pelo LDR

void setup() {pinMode (portaLed, OUTPUT); // Define a porta do Led como saída
}
void loop() {int estado = analogRead (portaLDR); // Lê o valor fornecido pelo LDR

// Caso o valor lido na porta analógica seja maior que 800, acende o Led
// Observação : Ajuste esse valor de acordo com o seu circuito!

if (estado > 800)
{digitalWrite (portaLed, HIGH);}
else // Caso contrário, o Led apaga!
digitalWrite (portaLed, LOW);}
```

Figura 8 – Programa do LDR + LED comentado

Fonte: Elaborada pelo autor.

$$R = \frac{(5V - 2V)}{2 \times 10^{-3}A} \quad (4.7)$$

Dessa forma, a resistência R será;

$$R = 150\Omega. \quad (4.8)$$

Se não possuir um resistor com esse valor específico de resistência (o que é bem provável), podemos utilizar uma montagem de resistores em série ou um resistor com resistência um pouco maior que esta, já que essa adaptação não deve interferir significativamente em seu projeto.

A seguir, nas figuras (9) e (10) se encontram duas imagens que resumem os circuitos reais dos postes de energia elétrica, durante o dia e a noite respectivamente:

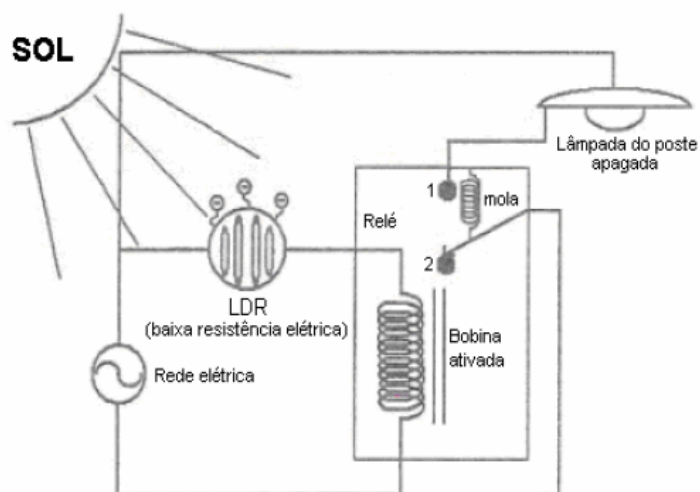


Figura 9 – De forma resumida, durante o dia a resistência elétrica do sensor LDR diminui, fazendo com que a corrente elétrica que atravessa a bobina gere um campo magnético que mantém a chave do relé na posição (2), bloqueando a passagem de corrente elétrica pelo resto do circuito e mantendo a luz apagada.

Fonte: Retirada da referência (PEREIRA; AGUIAR, 2006).

Para mais detalhes sobre o Arduino e suas características, pode ser interessante consultar as referências (RODRIGUES; CUNHA, 2015) e (SOUZA et al., 2011). Agora estamos aptos a retomar o curso da unidade didática.

Na segunda aula da UEPS, o diálogo será iniciado com o primeiro momento de problematização inicial, mediada pelo experimento com o Arduino. A ideia é apresentar o circuito, bem como as aplicações dele,

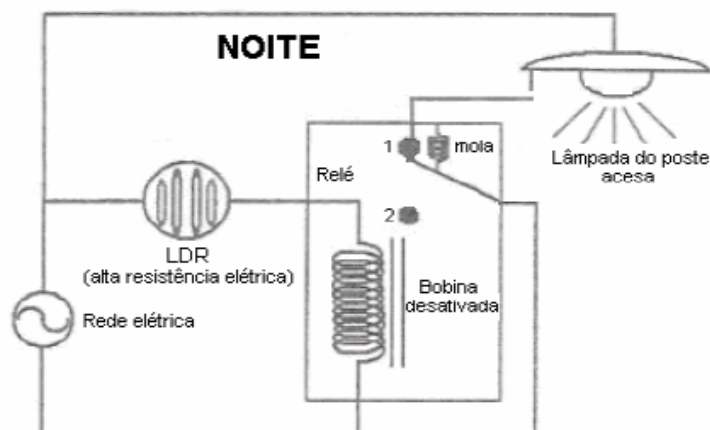


Figura 10 – Durante a noite, ocorre justamente o contrário do que foi mostrado em (9). Como não há incidência de luz solar, a resistência do LDR aumenta, fazendo com que nenhuma corrente elétrica percorra a bobina, nesse caso não há atração magnética e a mola fecha o circuito na posição (1), acendendo a lâmpada. Ao raiar do dia, com a presença da luz solar o circuito volta para a configuração mostrada em (9) e o processo todo reinicia.

Fonte: Retirada da referência (PEREIRA; AGUIAR, 2006).

tornando a falar, ainda que de forma omissa aos detalhes, sobre o efeito fotoelétrico.

Uma contextualização relevante para a aprendizagem significativa dos conceitos seria uma que trate sobre a incidência solar na região norte e seu grande potencial para a produção de energia via placa fotovoltaica, como exibido nos vídeos da aula anterior. Ao estabelecer esse tipo de “link” o professor aproxima o conteúdo abordado a realidade dos alunos, resgatando ou mesmo atraindo ainda mais a atenção do mesmo para sua unidade de ensino potencialmente significativa.

No segundo momento, o de organização do conhecimento, serão finalmente apresentados os conteúdos teóricos principais. De forma sucinta, eles são:

- Natureza da Luz (elucidar, finalmente o que são os fótons e todas as implicações da dualidade onda-partícula),
- Apresentar os principais aparato experimentais utilizados, como o mostrado na figura (3), bem como discutir sobre os fenômenos ob-

servados por Lenard.

- Tornar clara a explicação proposta por Einstein para o efeito fotoelétrico e,
- Trazer a definição formal do efeito fotoelétrico e suas demais particularidades (função trabalho, corrente de saturação, gráficos e equações...etc).

Por fim, na aplicação do conhecimento, o professor pode abordar as implicações da proposta de Einstein e a dificuldade da aceitação de suas ideias. Nada disso foi imediato ou instantâneo, assim, pode-se adotar uma postura ao mesmo tempo que problematizadora e elucidativa em relação a construção do ciência como patrimônio de conhecimento de construção gradual e mútua.

Retomando as aplicações vastas do efeito fotoelétrico em nossa sociedade, pode-se ainda tornar a falar de outras aplicações relevantes, trabalhando a consciência do CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade) e seu grande impacto em nossa forma de viver. Esse momento é de reflexão, desconstrução e reconstrução.

A última aula da sequência didática, fica, dessa forma, reservada apenas para a avaliação. Nela, serão dispensados por não se fazerem necessários os dois primeiros momentos pedagógicos, ou seja, teremos apenas a aplicação do conhecimento.

4.3.3 Avaliação da UEPS Nº 1

Para determinar se houve êxito na aplicação e nos objetivos da UEPS, serão utilizados dois tipos de avaliação: a avaliação formativa e a somativa.

A avaliação formativa consiste em observar, analisar e registrar (ou não, fica a critério do professor) qualquer sinal de aprendizagem significativa dos conceitos e fenômenos apresentados, desde os diálogos mais rápidos às repostas mais elaboradas. Consiste em um tratamento mais subjetivo das entrelinhas de cada desdobramento da unidade didática. A avaliação somativa, pelo contrário, tem por objetivo mensurar o aprendizado dos alunos, ou seja, quantificá-lo. É o tipo mais comum de avaliação, usado exaustivamente nas escolas espalhadas pelo país.

Ao final de cada aula o professor pode registrar em um bloco de notas ou em um diário de bordo, todos os avanços e dificuldades apresentados

pelos alunos, os pontos que podem ser melhorados, as estratégias e metodologias mais eficazes etc. É nesse âmbito que a avaliação formativa acontece.

Para a avaliação somativa, propomos o seguinte conjunto de questões discursivas que podem avaliar bem os pontos chave das UEPS's. Elas são adaptações de questões teóricas retiradas da referência ([HEWITT, 2015](#)) e o professor pode se sentir livre para adicionar mais questões ou retirar uma ou outra, se achar necessário.

A seguir se encontram sugestões para as questões conceituais que estarão presentes na atividade mediada pelo *google forms*:

1. O que significa o termo *quantum*? Descreva detalhadamente.
2. Um *quantum* é a menor unidade elementar de uma grandeza. A energia radiante, por exemplo, é composta por muitos *quanta*, cada qual chamado de fóton. Portanto, quanto mais fótons houver no feixe, mais energia ele conterá? Explique.
3. O que é o efeito fotoelétrico? Escreva o que você sabe.
4. Uma luz mais brilhante ejetará mais elétrons de uma superfície fotosensível do que uma luz mais fraca de mesma frequência? Explique.
5. Uma luz de alta frequência ejetará um maior número de elétrons do que uma luz de baixa frequência? Explique.
6. Qual o princípio físico fundamental por trás do acender e desligar "automático" dos postes? Como isso acontece?

Para mais questões teóricas, bem como metodologias e métodos de aplicação, pode ser interessante consultar a referência ([FERREIRA et al., 2019](#)). Trata-se de uma sequência didática pautada no efeito fotoelétrico e que também utiliza os três momentos pedagógicos.

De forma a complementar a avaliação individual de cada aluno, será proposto ao mesmo elaborar um mapa mental registrando todo o conteúdo visto em aula. O tema central do mapa será "Efeito fotoelétrico" e cada um será livre para construir da maneira que preferir, visto que uma das principais características desses mapas é justamente a liberdade na forma de organizar o conteúdo abordado.

Por fim, como uma última atividade interessante, o professor pode exigir que os alunos respondam um questionário online, elaborado na plataforma *Google forms* por exemplo, a fim de obter a opinião dos alunos acerca do andamento das atividades da sequência didática. Nesse caso, o intuito é selecionar questões objetivas a fim de consolidar a avaliação somativa com uma abordagem diferente. Um questionário sobre a metodologia utilizadas e aproveitamento das atividades da UEPS podem contribuir para a avaliação também. O resumo de cada atividade discutida em aula se encontra a seguir

Após a o fim da aula 2, está finalizada a primeira unidade de ensino potencialmente significativa cujo foco principal era o efeito fotoelétrico e suas nuances. A partir do próximo capítulo, trataremos da UEPS n° 2, que finalmente introduzirá os materiais semicondutores e os painéis solares. As metodologias de ensino serão as mesmas apresentadas nos capítulos 1 e 2. Prossigamos então.

4.3.4 Resumo da UEPS N° 1

Tema: Efeito fotoelétrico.

Turma indicada para a aplicação: 3° série do Ensino Médio.

Duração da UEPS: 2 aulas.

Objetivo Geral: Ensinar o conceito e as principais características do fenômeno conhecido como efeito fotoelétrico.

Objetivos específicos:

- Apresentar o conceito de quantização, elaborada por Max Planck, em meados de 1900;
- Explicar a dualidade onda-partícula e a diferença entre ambas as formulações, tendo como temática para estudo, aplicações como os painéis solares;
- Apresentar a explicação fornecida por Einstein para o efeito fotoelétrico, mostrando sua eficácia em sanar as principais inconsistências do modelo clássico.

Materiais necessários para a realização da UEPS: Além de todos os recursos necessários para executar uma aula expositiva remota, a sequência didática utilizará também recursos experimentais como a placa Arduino em

um experimento assistido. Caso não a possua, o professor pode utilizar simuladores da mesma em sites gratuitos como o *Tinkercad*.

Metodologia base da UEPS: Tem-se como teoria de ensino base, a aprendizagem significativa de David Ausubel. A metodologia que fundamenta a UEPS são os três momentos pedagógicos, idealizados por Delizoicov, Angotti e Pernambuco, procedimento esse que tem como referência o método Freiriano de ensino.

Avaliação da UEPS: A avaliação se dará no âmbito formativo e somativo, esse último na forma de questionário contendo questões discursivas sobre o tema, além de mapas mentais para investigar a aprendizagem dos conceitos por parte dos alunos. A avaliação pode contar ainda com questionários auxiliares contendo questões objetivas sobre a metodologia e a prática pedagógica adotada no decorrer das atividades desenvolvidas.

UEPS Nº 2 - Os materiais semicondutores: Das células aos painéis solares

Esse capítulo será unicamente dedicado aos materiais semicondutores e suas aplicações em células solares. O procedimento de apresentação dos tópicos relevantes para as discussões que estabeleceremos aqui seguirá o mesmo modelo adotado no capítulo anterior. Conceitos como condutividade, bandas de energia, constituição e propriedades dos semicondutores, bem como o efeito fotovoltaico inerente ao funcionamento das células solares serão apresentados sequencialmente.

Após isso, iniciaremos a discussão da metodologia da UEPS número 2. Cabe ressaltar que a fundamentação teórica que será apresentada é uma amostra que introduz os principais conceitos relevantes, muitas vezes discutidos de forma reduzida, visto a proposta do trabalho e o zelo pela praticidade desse material. Para maior aprofundamento, recomenda-se consultar as referências específicas citadas nesse material.

5.1 Os materiais semicondutores

Os materiais semicondutores, como o nome sugere, apresentam condutividade elétrica intermediária, tendo como parâmetros de comparação os materiais condutores e isolantes. Eles apresentam uma série de propriedades que os tornam tão diferentes e especiais, propriedades essas que serão discutidas mais adiante. Por agora, nos restringiremos a diferenciar os materiais condutores, semicondutores e isolantes com base no conceito **bandas de energia** e de **gap de energia**.

Os materiais de forma geral, quando no estado sólido, possuem uma organização microscópica bastante peculiar conhecida como **estrutura cristalina** (ver figura 11). Sabe-se que os átomos a nível quântico apresentam uma distribuição eletrônica em camadas ($1s$, $2s$, $2p$, $3s$ etc.) que são ocupadas pelos seus elétrons, obedecendo o princípio da exclusão de Pauli ¹. Esse é o modelo atômico da nova Mecânica Quântica. Em um sólido cristalino composto por vários átomos, da ordem de 10^{22} a cada centímetro cúbico, a descrição de cada estado que pode ser ocupado pelos elétrons não é uma tarefa simples, visto que teremos uma infinidade de átomos e níveis energéticos interagindo entre si (REZENDE, 2004).

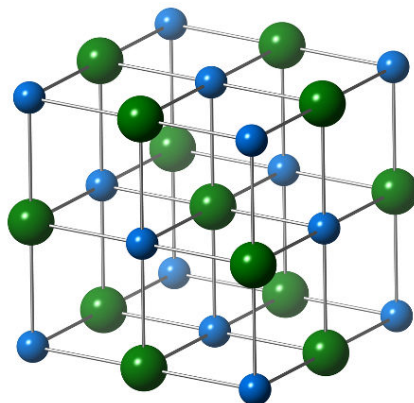


Figura 11 – Estrutura cristalina do cloreto de sódio, NaCl.

Fonte: Retirada do site Brasil escola: (DIAS... ,)

Devido ao número exorbitante de átomos próximos um do outro, cada orbital citado anteriormente começa a coincidir e perturbar os níveis energéticos dos átomos vizinhos, criando verdadeiras faixas ou bandas contínuas

¹ Princípio elaborado por Linus Pauling (1901-1994), estabelece que dois elétrons de um átomo não podem possuir os quatro números quânticos idênticos. São eles, o número quântico principal (n), azimutal (l), magnético (m) e de Spin (m_s).

de energia ao invés de níveis eletrônicos simples como teríamos em um átomo isolado (REZENDE, 2004).

Agora, ao invés de níveis discretos de energia como $1s$, $2s$, ... teremos bandas de energia $1s$, $2s$, e assim sucessivamente. Esse é o ponto crucial para entendermos a condutividade dos materiais. Ela está diretamente ligada as bandas de energia, a **banda de valência (BV)** e a **banda de condução (BC)**. Essas são as últimas bandas de energia do material e podem estar vazias, cheias ou parcialmente cheias de elétrons (LIMA et al., 2020).

Entre as bandas de energia existem regiões inacessíveis aos elétrons, chamadas de **gap**. Para que um elétron se locomova de uma banda para outra ele precisa ter um valor de energia igual ou superior ao valor do **gap** para poder vencê-la. O que diferencia essencialmente um condutor, um semiconductor e um isolante é o estado de ocupação das últimas bandas de energia, assim como o valor do **gap**. Na figura (??) se encontra a rerepresentação esquemática das bandas BV e BC em cada um dos três tipos de materiais.

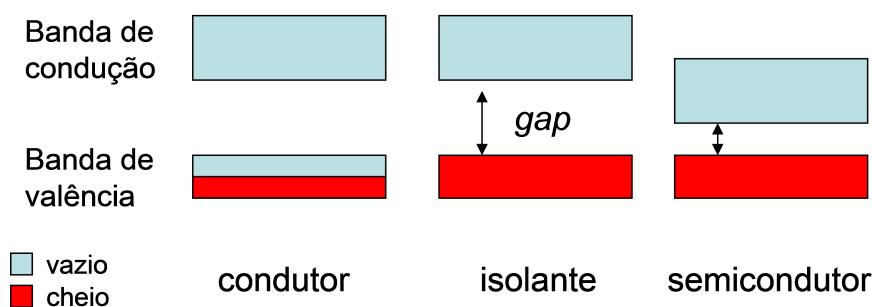


Figura 12 – Representação das bandas de valência e de condução nos materiais condutores, isolantes e semicondutores.

Fonte: Retirada do site (MARCIO... ,)

Os materiais condutores, conhecidos popularmente como metais, possuem uma banda de valência parcialmente preenchida, não havendo um valor de **gap** entre a BV e a BC. Isso favorece o deslocamento dos elétrons da banda de valência para a banda de condução, já que não há degrau de energia algum a ser vencido. Em suma, nesses materiais é muito fácil o trânsito de elétrons, o que é favorecido pela ausência de **gap** (ver figura 12), gerando um enorme número de elétrons livres, tornando esses materiais ótimos condutores e suscetíveis a geração de corrente elétrica (REZENDE,

2004; LIMA et al., 2020).

Já nos materiais semicondutores e isolantes, temos a organização das bandas de valência e condução idêntica, sendo a banda de valência completamente cheia, seguida por uma banda de condução completamente vazia. A diferença consistirá fundamentalmente no valor do *gap*. Os materiais que não conduzem corrente elétrica possuem um valor de *gap* elevado, fator que não favorece o trânsito dos elétrons da BV para a BC, já que para se deslocarem eles precisam adquirir certa quantidade de energia para isso (um valor alto) (REZENDE, 2004; LIMA et al., 2020).

Nos semicondutores também há o valor de *gap* entre as bandas, porém esse valor é bem menor se comparado ao valor presente nos materiais isolantes. Por isso a condutividade mediana desses materiais, sendo mais fácil um elétron desse, vencer a barreira do *gap* se comparado aos elétrons de um material isolante nas mesmas condições (ver figura 12) (LIMA et al., 2020; REZENDE, 2004).

Dessa forma os materiais semicondutores conduzirão eletricidade de forma moderada se comparados aos materiais condutores, enquanto os isolantes executam muito mal essa propriedade devido a organização de suas bandas.

5.2 Elétrons e “buracos”

Como dito na seção anterior, a diferença essencial entre os isolantes e os semicondutores é o valor do *gap* entre a banda de valência e a banda de condução. Enquanto esse valor para os semicondutores está próximo de $2eV$ ou $3eV$ (elétron-volt), nos isolantes esse valor é cerca de $5eV$ (REZENDE, 2004; LIMA et al., 2020).

Embora a quantidade de elétrons na banda de condução desses materiais seja menor quando comparada aos condutores, eles possuem uma condutividade apreciável relacionada diretamente a temperatura. Ao variar a temperatura de um material semicondutor, variamos também sua característica de conduzir eletricidade, fazendo-o se assemelhar a um isolante ou a um condutor dependendo da aplicação que almejamos. Em altas temperaturas, tem-se o comportamento mais próximo a de um condutor.

Devido a isso, os semicondutores são classificados em duas grandes categorias: os **semicondutores intrínsecos** e **extrínsecos**. Os do tipo

intrínseco possuem esse nome pois suas propriedades são determinadas pela sua constituição pura, não havendo outro material combinado a ele. Por isso eles também são chamados de semicondutores **puros**.² (REZENDE, 2004; MELLO; INTRATOR, 1980).

Já os semicondutores extrínsecos, são aqueles que possuem combinações com outros tipos de materiais (conhecidos como **impurezas**) a fim de potencializar ou inibir alguma propriedade física que se tenha interesse. O processo de adição das impurezas é chamado de **dopagem** e um semicondutor submetido a esse processo é chamado agora de **dopado**.

Outro fator relevante que precisamos comentar em relação a condutividade dos semicondutores é aquele que reside em suas ligações químicas. Átomos se ligam uns aos outros a fim de adquirirem estabilidade, já que isso minimiza a energia total do sistema. Nos principais semicondutores que são utilizados amplamente na indústria, o Silício (Si) e Germânio (Ge), a ligação química estabelecida é a covalente.

Acima do zero Kelvin temos agitação térmica das moléculas que acaba por conferir energia suficiente para que arranjos cristalinos se rompam gradualmente e os elétrons se tornem livres (a temperatura ambiente, isso acontece, por exemplo). O elétron, ao deixar seu local da ligação para se locomover, acaba por deixar locais na estrutura cristalina, lacunas que funcionam como cargas positivas (ausência de elétrons). A essas estruturas nomeou-se “buracos” (do inglês *hole*) (MELLO; INTRATOR, 1980).

Dessa forma, um acontecimento em cadeia bastante provável é que elétrons de outras ligações podem se desvencilhar da estrutura pelo mesmo processo supracitado, ocupando o buraco deixado pelo primeiro elétron a se libertar, dando origem a um novo buraco, e assim por diante. O processo de encontro de um elétron-buraco é chamado de **recombinação** (MELLO; INTRATOR, 1980).

Assim, fica claro que quando tratamos de semicondutores, temos dois portadores de carga que podem se mover em função de um campo elétrico externo. Esses portadores são iguais em módulo, mas possuem sinais contrários. Estes são os elétrons e os buracos. É devido a essa característica que se deve a tamanha importância dos semicondutores para a eletrônica.

² A rigor, não existe um semicondutor essencialmente “puro”, pois haverá ainda que mínima, uma porcentagem de impurezas. Porém, cabe a aproximação para casos em que essa quantidade é ínfima.

Enquanto nos metais temos apenas elétrons livres como portadores de cargas, nos semicondutores temos dois tipos diferentes de portadores.

Na próxima seção entenderemos mais sobre o processo de dopagem e sua enorme importância para a eletrônica moderna, sendo os semicondutores extrínsecos os mais utilizados atualmente devido a sua grande versatilidade.

5.3 As junções P-N

Comentamos anteriormente que os semicondutores mais utilizados atualmente são o silício (Si) e o germânio (Ge). Se você está familiarizado com a tabela periódica, já deve ter notado o ponto de tangência que une esses dois elementos: ambos são do grupo 14 (antiga família 4A, nomenclatura muito utilizada tempos atrás). Ou seja, possuem 4 elétrons em sua camada de valência (são conhecidos também como elementos tetravalentes).

Imagine agora que precisamos potencializar a propriedade de condutividade elétrica de um material feito de silício, e para isso precisamos fazer a dopagem desse material adicionando a ele uma impureza. Uma boa inserção seria um elemento pentavalente (cinco elétrons na camada de valência), já que quatro dos elétrons deste se ligariam por ligação covalente com o silício, enquanto um elétron permaneceria praticamente livre, já que estaria fracamente ligado ao núcleo de seu átomo, sobrando nesse processo (MELLO; INTRATOR, 1980).

Dessa forma, teríamos um elétron a mais para compor a corrente elétrica e aumentaríamos a condutividade do semicondutor em questão. O elemento fósforo (P) e arsênio (As)³ se encaixariam como impurezas pentavalentes para serem combinadas com o silício, por exemplo.

As impurezas com a capacidade de doar elétrons ao semicondutor puro são conhecidas como impurezas doadoras, ou do tipo N (já que doam elétrons e esse possuem carga **negativa**). Um semicondutor intrínseco dopado dessa forma é conhecido de **semicondutor do tipo N** (MELLO; INTRATOR, 1980).

Trazendo uma situação análoga, semicondutores de silício combinados com impurezas de substâncias do grupo 13, resultam em uma ligação

³ Ambos, fósforo e Arsênio são do grupo 15 (antiga família 5A).

covalente incompleta, pois teremos 4 elétrons de valência do silício com três elétrons de valência do índio, por exemplo. Isso dá origem a um buraco, que posteriormente será ocupado pelo elétron remanescente do silício, dando origem a mais buracos e assim sucessivamente.

Impurezas capazes de dar origem a buracos em um semicondutor intrínseco através da dopagem são chamadas de impurezas aceitadoras (pelo fato do buraco “aceitar” o elétron) ou impurezas do tipo P (pelo mesmo motivo citado anteriormente em relação as do tipo N). Os semicondutores combinados com impurezas do tipo P são chamados de **semicondutores do tipo P** (MELLO; INTRATOR, 1980).

Com base na explicação acima, fica fácil perceber que os portadores de carga nos semicondutores do tipo N são majoritariamente elétrons, enquanto nos do tipo P são buracos. Esse é um detalhe muito importante para o entendimento da mistura desses materiais, ou seja, da combinação de ambos os tipos de semicondutores, P e N.

Uma junção P-N nada mais é que a dopagem de um semicondutor puro, onde ambos os tipos de impurezas são adicionadas, de um lado a do tipo P e do outro do tipo N como mostrado abaixo, na figura (13). Aqui, ocorre um dos processos mais importantes dentre as propriedades dos semicondutores dopados, a difusão dos portadores de carga.

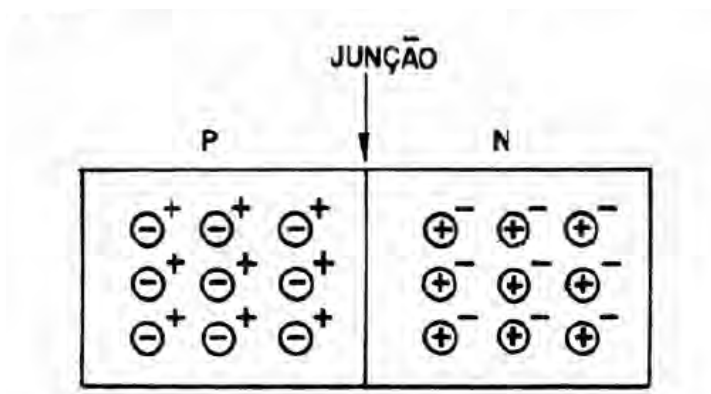


Figura 13 – Representação da junção P-N em um semicondutor, com acúmulos de elétrons no lado N e de buracos no lado P.

Fonte: Retirada da referência (MELLO; INTRATOR, 1980)

O processo de difusão consiste no trânsito de elétrons e buracos de um extremo do material para o outro devido a atração elétrica. Assim sendo, elétrons abandonam o lado N e se recombinam aos buracos no lado P, bem como os buracos deixam o lado P e aparecem agora no lado N. Esse

é um processo que continuará a acontecer até que ocorra a saturação elétrica, ou seja, haverá uma carga líquida neutra em cada um dos lados da junção, e os portadores de carga de um lado irão repelir os do outro, reciprocamente (MELLO; INTRATOR, 1980).

As junções P-N são de extrema importância na indústria e nas aplicações tecnológicas modernas, e essa seção tem justamente esse intuito, o de fornecer subsídios teóricos para a aplicação que será apresentada nas seções seguintes, as células e painéis solares. Falaremos um pouco mais das junções P-N e sua interação com os fótons quando formos discutir sobre a produção de energia elétrica através do efeito fotovoltaico na próxima seção.

5.4 O efeito fotovoltaico

Agora que estamos familiarizados com a junção P-N, vamos nos aprofundar nos detalhes para abordar o funcionamento das células solares, cujo agrupamento em módulos integrados compõem os painéis solares.

Como já foi mencionado anteriormente, os semicondutores são materiais que tem sua condutividade elétrica diretamente ligada a sua temperatura. Mais precisamente, ela aumenta conforme a sua temperatura aumenta também. Em relação ao efeito fotoelétrico, já é sabido do capítulo anterior, que os fótons podem muito bem fornecer a energia para que os elétrons de um semicondutor superem a barreira de energia do *gap* e se libertem da interação com o núcleo do seu átomo. A própria energia térmica em temperatura ambiente já fornece certa energia para que as ligações covalentes se rompam pouco a pouco e libertem uma certa quantidade de elétrons (FADIGAS, 2012).

Mas somente isso, em se tratando de um condutor puro não garante o funcionamento de uma célula solar. Precisamos organizar e potencializar esse processo, e é aí que entram as dopagem de semicondutores. De forma resumida, precisamos que os elétrons libertos se organizem em uma corrente elétrica útil. Esse é o papel que será desempenhado pelas junções P-N.

Na dopagem de uma célula de silício, por exemplo, utilizando uma junção P-N de substâncias trivalentes (aceitadora) e pentavalentes (doadora) respectivamente. Os elétrons do lado N se recombina com os buracos do

lado P, até que essa polarização atinga um valor de pico e crie um campo elétrico que irá barrar elétrons que normalmente atravessariam o limite da junção.

Agora, imaginemos que essa junção P-N supracitada esteja exposta a luz solar. Teremos fótons propriamente falando, incidindo sobre a célula de silício dopada. Esse processo irá criar pares elétron-buracos que estarão expostos ao campo elétrico criado, sendo acelerados por ele através da junção (onde o campo elétrico não é nulo, obviamente). A incidência de fótons, ocasiona a superação do *gap* e o deslocamento desses portadores de carga, criando uma diferença de potencial (ddp) (ver figura 14). Todo esse processo é conhecido como **efeito fotovoltaico** (FADIGAS, 2012).

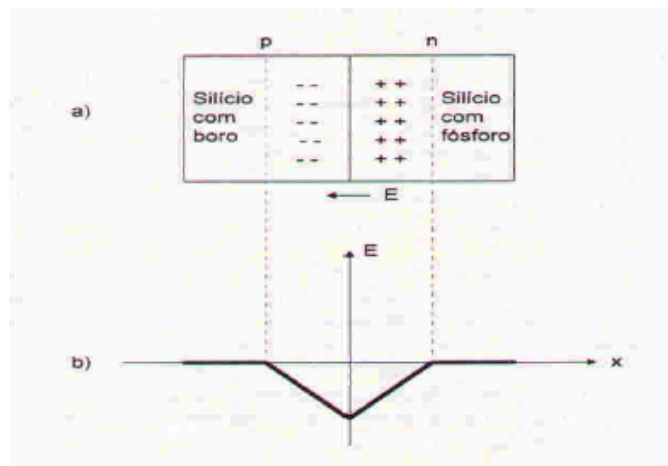


Figura 14 – Em (a), separação dos portadores de carga em uma junção P-N e em (b), comportamento do campo elétrico em uma junção P-N.

Fonte: Retirada da referência (FADIGAS, 2012)

Cabe aqui ressaltar a diferença entre células fotocondutoras, fotoelétricas e fotovoltaicas (ver figura 15). Nas fotoelétricas, o princípio fundamental de funcionamento ainda é o efeito fotoelétrico, porém os materiais envolvidos geralmente são metais e nesse caso temos o efeito fotoelétrico padrão onde há apenas a emissão de fotoelétrons, como descrito no capítulo anterior. Já as células fotocondutoras são dispositivos compostos por semicondutores que quando expostos a luz, produzem pares elétron-buraco, aumentando assim a condutividade do material, já que assim aumentam também os portadores de carga (MELLO; INTRATOR, 1980).

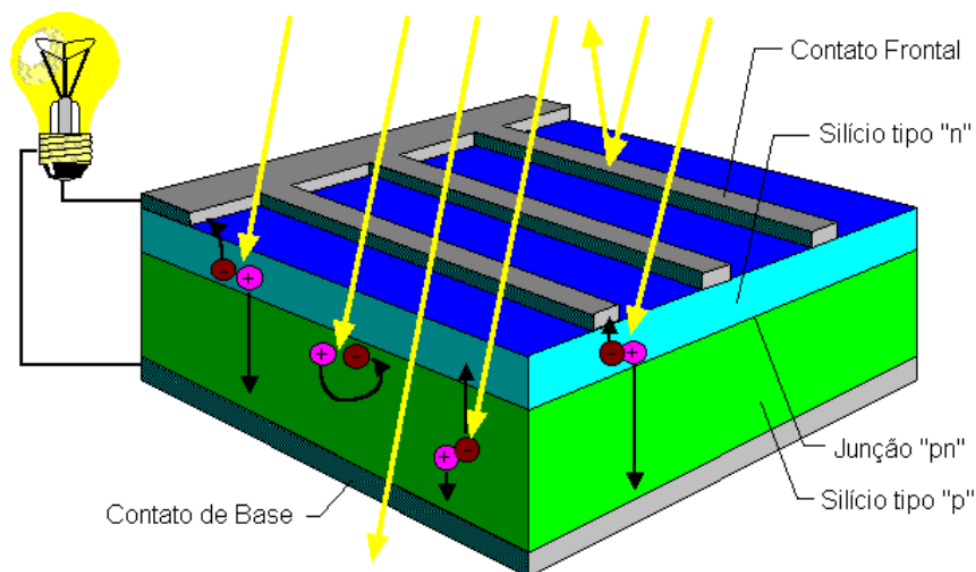


Figura 15 – Esquema da estrutura e composição de uma célula fotovoltaica.

Fonte: Retirada da referência (FADIGAS, 2012)

As células fotovoltaicas, por fim, nada mais são que células fotocondutoras (**foto diodos**, tecnicamente falando), porém dopadas com uma junção P-N, de forma a produzir uma diferença de potencial ao entrarem em contato com a luz solar ⁴.

5.5 Os painéis e as células solares

No mundo moderno, tem-se buscado cada vez mais fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis justamente pela preocupação com o meio ambiente e o desenvolvimento sustentável. Nesse âmbito, um dos ramos que desde as últimas décadas vem se destacando é o da tecnologia fotovoltaica, que transforma a energia solar em elétrica pelos processos físicos mencionados anteriormente.

Muito do seu sucesso se deve exatamente pelo baixíssimo impacto ambiental e na facilidade de operação e manutenção, bem como na sua versatilidade em relação as formas que pode ser aplicada. Um ponto negativo e muito importante de início pode ser o custo de tais aparatos, não sendo tão acessível pela população em geral. Porém, com os avanços nas

⁴ Para mais detalhes sobre os foto diodos, as características das células solares e seus respectivos funcionamentos, consultar a referência (MELLO; INTRATOR, 1980), capítulo 5.

pesquisas espalhadas pelo mundo envolvendo materiais, êxitos significativos vem sendo alcançados e o custo - benefício vem sendo melhorado anualmente (VIAN et al., ; FADIGAS, 2012).

Pelo viés ondulatório, sabemos que o espectro eletromagnético é constituído de faixas bem delineadas de radiações com frequências (ν) e comprimentos de onda (λ) específicos. De toda essa radiação solar que incide na atmosfera terrestre, constata-se que grande parte dela está na região do infravermelho e do espectro visível, sendo respectivamente denotados por 46% e 47% do percentual total. A menor quantidade, restante, está na região do ultravioleta, sendo representada por 7%. Quando se pretende produzir uma célula solar, é preciso levar em consideração esses dados para que elas possam ser eficientes em captar exatamente esse tipo de radiação.

Os materiais semicondutores que serão escolhidos para compor as células solares também precisam ter um bom coeficiente de absorção a fim de maximizar a conversão de energia solar em elétrica e um valor relativamente pequeno de *gap* (entre 1,1 eV e 1,7 eV geralmente). Outros fatores a serem levados em consideração é a toxicidade do material, disponibilidade de obtenção e, claro, as condições naturais (climáticas, por exemplo) a que serão expostas. Resumindo, são muitas variáveis a se considerar (VIAN et al., ; LIMA et al., 2020).

No final do século XX, as pesquisas envolvendo os materiais para células solares caminhava a passos curtos e a eficiência dos primeiros dispositivos não passava de 1%. Isso foi sendo melhorado progressivamente e hoje é comum termos células solares com registro de eficiência que ultrapassam e muito os 10% (VIAN et al.,).

As células mais comuns no mercado são as de **silício**, subdivididas em **silício monocristalino** e **silício policristalino**. As de Si monocristalinas são compostas por uma única camada do material, geralmente crescido com antecedência e disposto em fatias (ver figura 16). Já as de Si policristalino também são originárias de uma única fatia do material, porém, ao contrário do que foi descrito anteriormente, são solidificadas em blocos contendo diversos cristais. Na prática, a eficiência desses dois tipos de células é bem próxima (FADIGAS, 2012).

Outro tipo bastante comum de célula solar são as produzidas a base de **filmes finos** (do inglês *Thin film*). Seu processo de fabricação consiste em uma técnica de deposição de camadas extra finas de material

semicondutor, da ordem de microns (10^{-6} metros). Embora os filmes finos sejam materiais em evidência nas pesquisas científicas, sua eficiência como célula fotovoltaica é menor que as de silício cristalino, ainda que se destaque em relação ao seu custo de produção: por serem bem mais simples de fabricar que as mencionadas anteriormente, as células solares a base de filmes finos são bem mais acessíveis, financeiramente (FADIGAS, 2012).

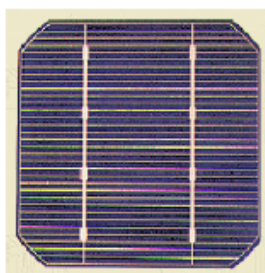


Figura 16 – Exemplo de célula solar de silício monocristalino.

Fonte: Retirada da referência (FADIGAS, 2012)

As principais substâncias dos filmes finos utilizados na deposição são o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), o disseleneto de cobre e índio (CIS) e o telureto de cádmio (CdTe). As **células de Arseneto de Gálio (GaAs)** também se destacam em relação a sua grande eficiência, embora tenham aplicações ainda restritas de certa forma, sendo mais utilizadas em sistemas espaciais (FADIGAS, 2012).

Além dos materiais que compõem as células, precisamos mencionar a tecnologia envolvida na estruturação de cada dispositivo, já que isso influencia diretamente na potência e eficiência das células solares. As células de silício mono e policristalino dominam o mercado e representam facilmente mais de 50% dos materiais fotovoltaicos utilizados no mundo. Dois tipos de tecnologia principais estão envolvidas na fabricação destes aparatos: A PERC (sigla em inglês para “Emissor Passivado na Célula Traseira”) e as células híbridas (*Tandem*) (VIAN et al.,).

A tecnologia PERC consiste em adicionar na parte traseira da célula fotovoltaica uma camada extra, que gera uma reflexão do raio solar ao incidir sobre ela, fazendo-o atravessar o silício mais vezes, gerando mais energia e reduzindo a velocidade da recombinação dos elétrons-buraco. Essa técnica inovadora é a responsável pelo aumento da eficiência das

células de silício padrão, tornando-as exemplos dos avanços das pesquisas recentes em semicondutores direcionados a produção de fotoenergia (VIAN et al.,).

As células *Tandem* possuem uma abordagem diferente, organizadas em camadas seletivas sobrepostas capazes de converter em energia elétrica partes específicas do espectro eletromagnético, deixando o excedente ser convertido pela última camada do amontoado. Esse método é o responsável pelas células solares mais eficientes do mundo, ultrapassando os 40% de eficiência, mas devido a processos de fabricação muito caros, ainda não é tao viável comercialmente (VIAN et al.,).

As células solares são arranjadas em **módulos**, onde são justapostas e protegidas por outras estruturas, para evitar danificações provenientes de eventos naturais, como chuva ou umidade excessiva do ar, principalmente. Os painéis solares disponíveis comercialmente são exatamente isso, módulos fotovoltaicos (ver figura 17) prontos para realizar sua função primordial: executar eficazmente o efeito fotovoltaico (FADIGAS, 2012).

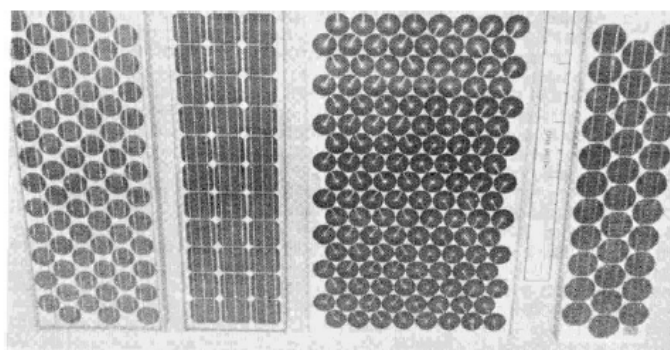


Figura 17 – Alguns exemplos de módulos fotovoltaicos em diferentes arranjos.

Fonte: Retirada da referência (FADIGAS, 2012)

Organizando em tópicos, de acordo com (VIAN et al.,), podemos elencar as principais vantagens e desvantagens em geral, quando se adere a geração de energia por sistemas fotovoltaicos;

Vantagens:

- A energia solar é uma fonte renovável e sustentável de energia,
- Não há limitações geográficas, ou seja, está disponível em todos os locais do planeta (embora sejam mais viáveis em determinadas

localizações),

- Versatilidade de distribuição, quer seja para uma residência, quer seja para uma empresa,
- Facilidade de instalação e manutenção.

Desvantagens:

- As condições climáticas de certos locais são desfavoráveis a instalação de sistemas fotovoltaicos,
- Para exigências energéticas maiores, necessita-se de grandes hectares de terra para a instalação de uma usina fotovoltaica, por exemplo,
- Alto custo dos materiais e processos, ainda que os avanços nessa tecnologia venham favorecendo a redução desses custos,
- Apesar de tudo que foi alcançado, essa tecnologia ainda está em fase de aperfeiçoamento e a eficiência das células solares que temos hoje ainda está distante do ideal.

5.6 A energia fotovoltaica no Brasil e no mundo

A produção em grande escala de células solares e investimentos nessa área foi liderada pelos Estados Unidos durante muito tempo, chegando sozinho a representar 85% da produção de painéis solares mundialmente, no ano de 1980. Essa monopólio expressivo norte americano foi ultrapassado aos poucos pelos países europeus, e em 2012, a liderança de instalações de novas fontes fotovoltaicas era do continente europeu. Grande parte dessa ascensão europeia se deve a Alemanha e a Itália que em sua disputa pela liderança, em 2011, representavam juntas cerca de 60% das novas instalações a nível mundial (VIAN et al.,).

A figura (18) a seguir, ilustra a relação percentual mundial de potência produzida por meios fotovoltaicos no ano de 2018. Nesse ano, dentre as fontes de energias renováveis e sustentáveis utilizadas a nível global, a energia solar ficou em terceiro lugar como a mais utilizada, perdendo apenas para a energia proveniente de meios hídricos (primeiro lugar) e para a energia eólica (segundo lugar).

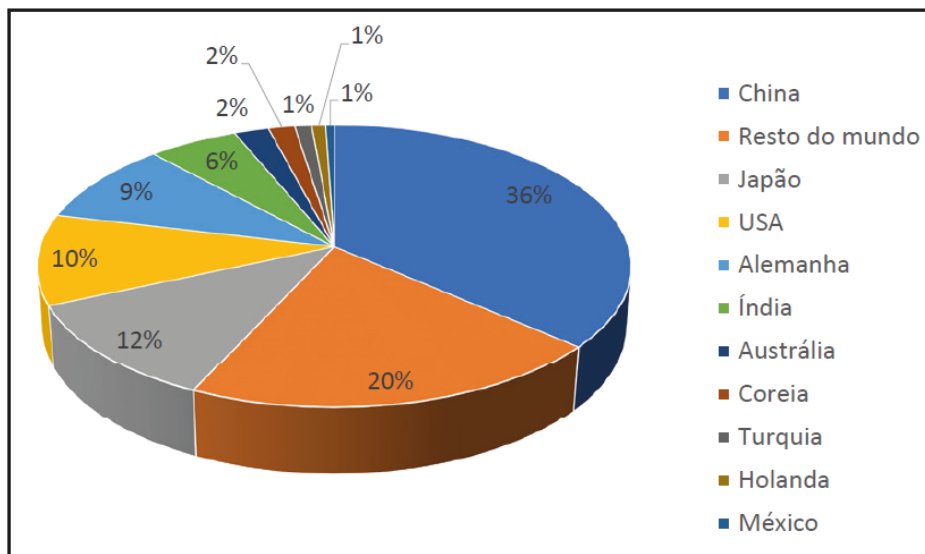


Figura 18 – Gráfico que resume a produção de energia por meios fotovoltaicos (em termos de potência) no ano de 2018.

Fonte: Retirada da referência (VIAN et al.,)

Como já deve ter ficado evidente pela figura (18), a China é o país com a maior quantidade de potência gerada por meios fotovoltaicos, possuindo também a maior usina fotovoltaica individual (com apenas uma conexão com a rede) do mundo que está em operação desde 2016. Trata-se do *Yanchi Solar Park*, com uma potencia estimada em 820 MW (*megawatts*).

Traçando um panorama nacional, a matriz energética brasileira ainda é ocupada predominantemente pela contribuição hídrica, sendo mais de 60% da energia, em âmbito nacional, suprida e distribuída pelas usinas hidrelétricas espalhadas pelo país. A extensão geográfica, as condições climáticas favoráveis bem como as altas taxas de incidência solar só evidenciam o enorme potencial nacional para esse tipo de obtenção de energia limpa. Abaixo, na figura (19), se encontra um gráfico do ano de 2019 que corrobora a ainda baixa porcentagem da energia solar em âmbito nacional, sendo a energia proveniente da radiação solar representando apenas 2,1 % do total (VIAN et al.,).

O território nacional, de forma geral, possui ótimos índices de incidência solar anual, principalmente nas regiões **Norte** e **Nordeste** onde esses níveis de incidência são sobressalentes. Por isso, a tecnologia fotovoltaica se encaixa perfeitamente com as nossas necessidades energéticas, ainda que estejamos distantes de fazê-la ocupar pelo menos 50% da matriz

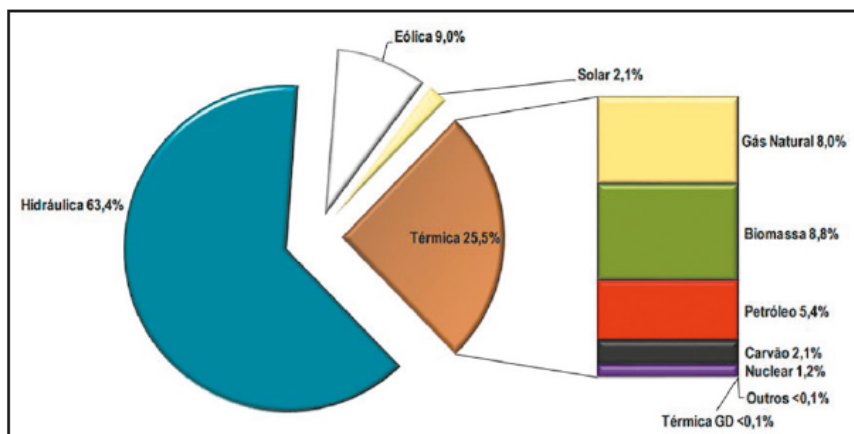


Figura 19 – Gráfico do Ministério de Minas e Energia que esquematiza a matriz energética brasileira em 2019.

Fonte: Retirada da referência (VIAN et al.,)

energética mostrada em (19). Abaixo, se encontra graficamente representada na figura (20) a taxa de radiação solar global diária (média anual), assim como na figura (21) a média diária de insolação solar mensal (horas), respectivamente.

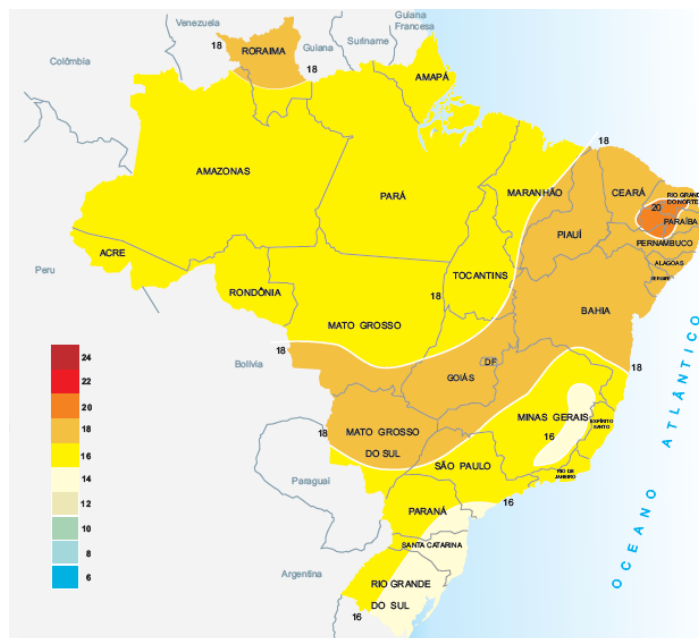


Figura 20 – Representação da radiação solar global diária (média anual)
 Fonte: Retirada da referência (CHIGUERU TIBA E COLABORADORES., 2000)

De acordo com os registros gráficos do atlas solarimétrico brasileiro

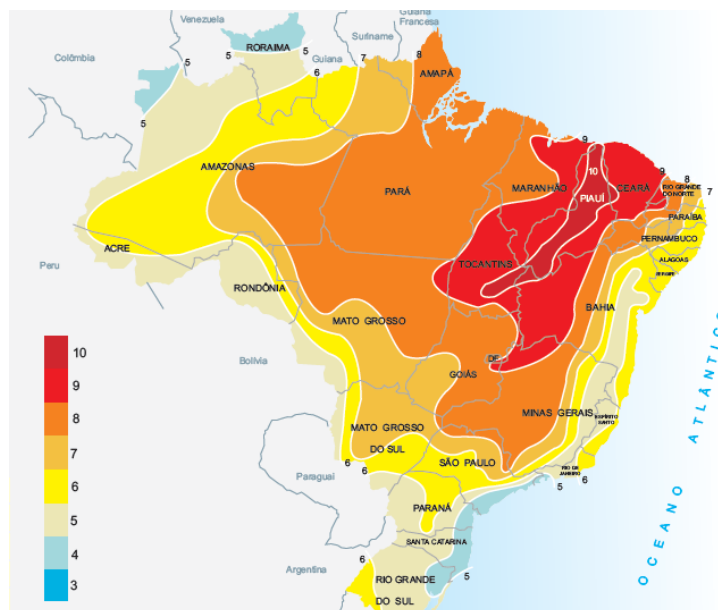


Figura 21 – Registro nacional da média diária de insolação solar mensal (horas). Observe a posição de destaque da região Norte e Nordeste

Fonte: Retirada da referência ([CHIGUERU TIBA E COLABORADORES., 2000](#))

([CHIGUERU TIBA E COLABORADORES., 2000](#)), durante o período compreendido entre os meses de julho e setembro ocorre os maiores registros de radiação solar na região Norte e Nordeste.

Os altos registros de incidência solar no Brasil podem ser explicados, de forma simplificada, pelo fato de estarmos próximos a linha do equador e recebermos os raios solares quase que perpendicularmente (embora existam processos de reflexão, difusão e absorção de radiação solar na atmosfera. Então nem toda a radiação que parte do sol chega até nós diretamente). Por isso a região Nordeste é a mais favorecida nesse aspecto. Outro fator preponderante é a leve inclinação do globo terrestre em relação a reta normal ao planeta através dos polos. Essa inclinação de pouco mais de 23° é suficiente para garantir uma boa média de radiação incidente durante todo o ano ([VIAN et al.,](#)).

Embora as instalações de módulos e sistemas fotovoltaicos cresçam a cada ano no Brasil, a principal aplicação ainda é na agricultura (utilizada em sistemas de irrigação, por exemplo), certos ramos da pecuária (piscicultura) e em menor escala, em sistemas residenciais e empresariais. Nesses dois últimos casos, boa parte das novas instalações provém de incentivos

governamentais para aqueles que podem optar por esse tipo de obtenção de energia. Com certos benefícios garantidos, como redução nas taxas de alguns tipos de impostos, essa metodologia alternativa de obtenção de energia vem cada vez mais sendo requisitada (VIAN et al.,).

As instalação dos módulos fotovoltaicos podem ser divididos em duas grandes categorias: as *stand alone* e as *grid connect*. No primeiro caso, temos uma instalação que não é conectada a uma rede de distribuição elétrica, sendo basicamente consumida por completo em uma base local (casas, prédios etc.), por isso elas são também conhecidas como **isoladas**.

No segundo caso temos a conexão com uma rede de distribuição elétrica e o intuito é geralmente abastecer uma grande área ou vários pontos a partir da instalação. O termo *grid connect* significa justamente isso, “**conectada a rede**”. As instalações do tipo isoladas, são as mais comuns de vermos na forma de painéis solares sobre residências, estabelecimentos comerciais etc (VIAN et al.,).

5.7 Metodologia da UEPS Nº 2

A unidade de ensino potencialmente significativa de número 2 tem por objetivo principal o estudo das células e painéis solares em um contexto local, sendo abordados diversos aspectos das mesmas, desde sua composição as vantagens e desvantagens de sua utilização.

Para tal, essa unidade didática é composta por **3 aulas (3 horas/aula de 50 minutos cada)**, mais a avaliação dessa unidade. Serão três aulas para trabalhar o conteúdo e uma aula exclusivamente dedicada a avaliação, através de questionários e outras metodologias remotas.

Na primeira aula (aula 1) serão abordados os conteúdos de materiais semicondutores, condutividade dos materiais bem como as impurezas e dopagem. Na aula 2 trataremos explicitamente sobre o efeito fotovoltaico, as células e módulos solares. Na penúltima aula (aula 3) serão trabalhados principalmente as aplicações da energia fotovoltaica em termos locais, nacionais e mundiais e por fim, na aula 4, teremos uma avaliação na forma de questionário com questões objetivas e discursivas somada a outros métodos avaliativos auxiliares (no item Aula 4 - Avaliação, isso será explicado em detalhes).

A metodologia utilizada é a mesma da UEPS Nº 1, os três momentos

pedagógicos pautados sob a teoria de ensino de David Ausubel, a aprendizagem significativa. Nas subseções a seguir, se encontram detalhadas cada uma das etapas da unidade didática.

5.7.1 Aula 1 - Conhecendo os materiais semicondutores

A prática pedagógica nessa primeira aula pode ser iniciada com uma breve explanação aos alunos sobre o propósito e organização dessa segunda unidade didática, como foi feito na UEPS N° 1. Espera-se que os alunos já estejam habituados a metodologia, então o professor pode ser sucinto e dedicar pouco tempo de aula a essa tarefa.

Após isso, o espaço para o primeiro momento pedagógico está aberto. Esse será embasado em uma discussão sobre a matriz energética nacional e mundial (um breve panorama sobre isso foi trabalhado na seção 5.6). Os pontos chave aqui são apresentar os gráficos da divisão energética de outros países em comparação a do Brasil, e observar a porcentagem de energia que é produzida por meios solares.

Dessa forma, o professor pode optar pelas ferramentas e abordagens que mais achar conveniente, como uma apresentação em *slides*, ou apenas utilizando imagens, vídeos, etc, auxiliando a sua explicação

Decorrido o tempo de contextualização, pode-se partir para o diálogo levantando as seguintes questões:

- De quais materiais vocês supõem que os dispositivos fotovoltaicos são oriundos?
- Vocês veem com frequência esses aparatos em casas e estabelecimentos comerciais?
- Qual o custo de produção vocês acham que esses materiais devem ter (baixo, médio ou alto?)
- Vocês acham que o efeito fotoelétrico discutido anteriormente tem algo a ver com a geração de energia nas células e painéis solares?
- Quais conceitos físicos estariam envolvidos na geração de energia fotovoltaica? Poderiam citar?

Esse primeiro diálogo também não deve consumir tanto tempo de aula. Os conteúdos que serão trabalhados em seguida, na organização do

conhecimento são o foco da aula 1, que a partir daqui, pode ser uma aula expositiva tradicional, abordando necessariamente os conteúdos

- Organização atômica dos sólidos (estrutura cristalina),
- A condutividade dos materiais: tratar da forma que achar melhor as bandas de energia e ligações atômicas,
- Dopagem de semicondutores,
- As junções P-N.

Com o fim da organização do conhecimento, a aplicação dele nessa primeira aula consistirá em rever alguns conteúdos teóricos vistos em aula, com o intuito de aprofundá-los e garantir que sejam entendidos. Resumindo em três tópicos, a aplicação do conhecimento consistirá em:

- Exemplificar com imagens ou **simulações** a organização dos sólidos cristalinos e como os buracos surgem nas ligações a partir da dopagem,
- Mostrar explicitamente o esquema de bandas no *Phet colorado*, por exemplo,
- Com base no que foi visto, o professor pode explicar o motivo do “sucesso” dos semicondutores atualmente e de como sua versatilidade pode ser usada nas mais diversas aplicações.

Uma abordagem bastante iterativa e interessante, pode ser alcançada utilizando simulações que exemplifiquem a estrutura dos sólidos cristalinos e como os buracos surgem nas ligações covalentes dos semicondutores a partir da dopagem.

Para isso, um simulador de experimentos de ciência em geral que pode ser muito útil é o *Phet Colorado*, disponibilizado gratuitamente pela Universidade do Colorado (USA) ([WIEMAN; PERKINS; ADAMS, 2008](#)). Nele podemos encontrar uma gama de experimentos virtuais que podem ser utilizados em sala de aula, principalmente pelo seu fácil acesso e viés didático. Uma simulação bastante útil que o professor pode empregar para

apresentar o esquema de bandas de energia e os *gaps* pode ser encontrada lá. Nela, pode-se trabalhar também a condutividade dos materiais e mostrar como tudo ocorre na “prática”.⁵

Caso se faça necessário, o professor pode explicar com base também em uma simulação, como se organiza uma estrutura cristalina nos materiais semicondutores e como surgem os buracos na dopagem dos materiais. Para esse caso, uma escolha satisfatória é um simulador que pode ser executado *offline* no programa *Adobe Flash Player*⁶. Trata-se de animações⁷ que guia o observador nos processos de dopagem dos materiais, interações dos elétrons com os fótons e o surgimento dos buracos na estrutura cristalina. A seguir, na figura (22), se encontra uma imagem da simulação em questão.

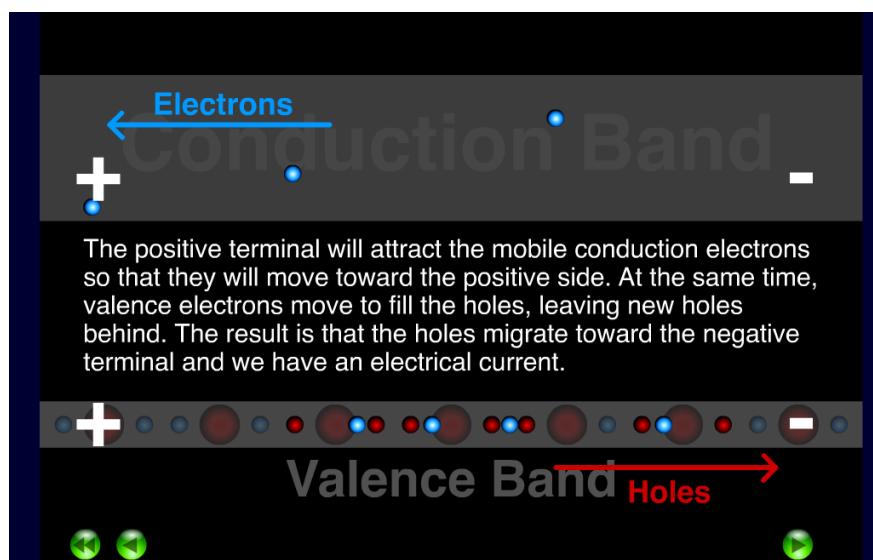


Figura 22 – Recorte de uma das partes da simulação envolvendo as ligações na dopagem. Simulação executada no programa *Adobe Flash Player*.

Fonte: elaborada pelo autor.

Essa sem dúvidas, será a maior aula da UEPS Nº 2. Após trabalhar tudo que se pretende nessa aula, partiremos para uma das inúmeras aplicações

⁵ Link do simulador sobre as bandas de valência e condução que está disponível no site do *Phet colorado* <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/conductivity>

⁶ versão mais recente em <https://www.adobe.com/support/flashplayer/debug_downloads.html>

⁷ As animações/simulações podem ser baixadas no *Link*: <<http://science.sbccc.edu/physics/flash/>>

dos semicondutores dopados, as células e painéis solares. A aula 2 será exclusivamente voltada a essa temática.

5.7.2 **Aula 2 - Estudo das junções P-N e do efeito fotovoltaico**

A aula 2, como dito anteriormente, será focada em apresentar, finalmente, os conceitos e aplicações dos módulos solares. Uma proposta de problematização inicial que pode ser aplicada, antes dos conteúdos teóricos a serem ministrados, é uma que envolve a temática Ciência, Tecnologia e Sociedade.

O professor pode levantar essa vertente ao discutir o problema ambiental da humanidade na busca por fontes de energias limpas e renováveis por exemplo, discussão essa que encontra um amplo respaldo e está em plena concordância com a BNCC (Base Nacional Comum Curricular). O docente deve agir como um mediador, problematizando o fato da energia solar ser mesmo ou não uma boa solução para a demanda energética a nível mundial. Os questionamentos relevantes nesse momento tratam das vantagens e desvantagens de se utilizar o método fotovoltaico . As questões pertinentes são:

- Quais as vantagens, na concepção de vocês, de se utilizar a energia fotovoltaica?
- Quais as desvantagens, na concepção de vocês, de se utilizar a energia fotovoltaica?
- A energia fotovoltaica é uma boa opção de geração energética em qualquer um dos países do mundo? Quais características regionais, climáticas etc. podem implicar na produção de energia através dos sol?

O professor pode citar uma vantagem e desvantagem de cada um dos polos do diálogo e notar qual a direção da argumentação dos alunos, se eles citam mais vantagens e desvantagens. O docente também pode deixar claro caso haja unanimidade por uma das vertentes, que há tantas vantagens e desvantagens.

Após esse primeiro contato com as informações e ideias compartilhadas, os alunos devem assistir o vídeo *O que é energia solar?*⁸. É um vídeo

⁸ <<https://bitly.com/Lzwnn>>

curto (devido a curta duração das aulas, recomenda-se vídeos de até no máximo 5 minutos) que apresenta a composição das células solares e de como elas são utilizadas na obtenção de energia, seja em pequena ou grande escala.

Após esse organizador prévio, terá início a aula teórica, como de praxe, com objetivo de ensinar os conceitos envolvendo as células solares e seu funcionamento, bem como a composição desses painéis. Ela deverá abordar os seguintes conteúdos:

- A dinâmica dos elétrons e buracos nos semicondutores,
- O efeito fotovoltaico,
- As células e painéis solares,
- Estrutura e composição dos módulos solares.

Finalizado o contato formal com o fenômeno do efeito fotovoltaico, e os materiais que compõem as células, os alunos terão que entrar em contato com as principais tecnologias implementadas nas células solares (PERC, *Tandem*, etc.). Pelos meios que achar conveniente, o professor pode apresentar cada uma das tecnologias envolvidas, sua vantagens e desvantagens, econômicas e de desempenho. Esse é o terceiro momento pedagógico, a aplicação do conhecimento dessa segunda aula.

Os simuladores *offline* utilizados anteriormente também são bem vindos aqui, assim como qualquer recursos audiovisual que auxilie os alunos no entendimento dos processos e tecnologias envolvidas. Na figura (23) abaixo, segue um trecho da simulação intitulada *The silicon solar cell* que também pode ser utilizada nessa segunda aula.

5.7.3 Aula 3 - As células e painéis solares e suas aplicações

Na terceira aula da Unidade didática, a proposta é trazer um reflexão sobre a potencialidade da região Norte e Nordeste em utilizar a tecnologia fotovoltaica na produção de energia. Por isso, uma problematização inicial eficiente a esse objetivo é uma que promova a reflexão por parte dos alunos sobre a conveniência de se utilizar sol como fonte de energia elétrica e o enorme potencial da região Norte e Nordeste nesse quesito.

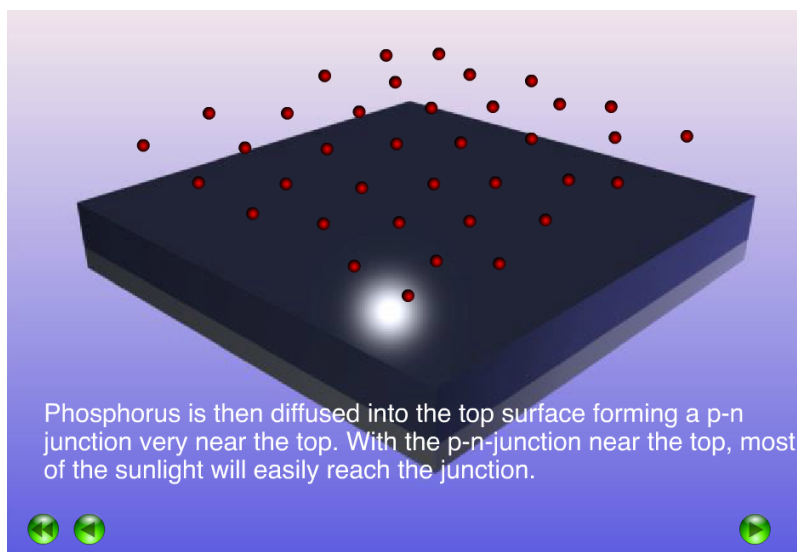


Figura 23 – Recorte de uma das partes da simulação envolvendo as células de silício. Simulação executada no programa *Adobe Flash Player*. O professor pode utilizá-la no curso da aula ou somente no final. Nessa simulação é possível encontrar a estrutura das células solares e sua interação com os fótons.

Fonte: elaborada pelo autor.

O professor pode apresentar o atlas solarimétrico do Brasil indicando como se situam as cinco regiões no mesmo, evidenciado as médias elevadas de incidência solar encontrada nas duas citadas anteriormente. Uma abordagem diferente das utilizadas outrora é a leitura de *web* notícias que tratam dos benefícios oferecidos pelo governo a quem pode optar por esse tipo de energia. Essa atividade funcionará como organizador prévio e também poderá fundamentar a argumentação posterior a leitura, tanto do professor como dos alunos.

Após isso, questionamentos interessantes que podem fomentar discussões e ampliar a perspectiva dos alunos sobre o tema são:

- Qual o nível de potencialidade da energia solar nas regiões Norte e Nordeste, na sua opinião (alto, mediano, baixo)?
- Vocês conhecem outras aplicações do efeito fotovoltaico?
- Pensando localmente, em nossa região, além da aplicação empresarial e residencial, vocês tem ideia de que outras aplicações que poderíamos dispor?

Reservado para o segundo momento pedagógico, a aula expositiva trará conhecimentos e conteúdos relevantes a geração de energia fotovoltaica. São assuntos secundários que complementam todo o conteúdo visto anteriormente. São eles:

- Principais materiais que compõem as células solares, as mais comuns e o que uma célula precisa ter para ser mais eficiente,
- Tipos de sistemas fotovoltaicos (puros - conversão solar diretamente em elétrica, sistemas heliotérmicos etc.),
- Apresentar os diferentes tipos de instalações de energia fotovoltaica (isoladas e conectadas a rede).

Com todo os conteúdos já discutidos, o professor pode tratar das aplicações da energia fotovoltaica mais comuns no Brasil. Esse contexto local pode criar a familiaridade dos alunos em relação a essa tecnologia, mostrando diversos exemplos além da utilização em residências e estabelecimentos comerciais. Por fim, o professor pode trazer, se achar interessante para complementar a discussão, dados sobre as aplicações mais específicas dos sistemas fotovoltaicos. A título de exemplo, pode-se tratar da estação espacial internacional (ISS) e suas atividades desempenhadas que envolvem a energia solar.

5.7.4 Avaliação da UEPS N° 2

Essa será a única avaliação formal do conteúdo trabalhado e servirá para constatar se a unidade didática foi exitosa. Um procedimento que pode ser interessante para avaliar formativamente e somativamente os alunos e colocar no questionário final perguntas que foram utilizadas na problematização inicial das aulas anteriores. Assim o professor pode comparar as repostas dadas anteriormente e agora e traçar um perfil de aprendizagem dos alunos.

A seguir se encontram sugestões, 8 questões objetivas e discursivas que o professor pode aplicar com seus alunos no horário da última aula da UEPS N° 2. O docente tem a autonomia de omitir ou acrescentar mais questões caso ache necessário, a partir de sua experiência aplicando a UEPS:

1. O que é condutividade elétrica? O que diferencia os materiais condutores, semicondutores e isolantes. Explique.
2. O que é um semicondutor dopado? Porque esse tipo de arranjo é mais preferível do que um semicondutor puro na geração de energia por meio do efeito fotovoltaico?
3. Como surge um “buraco” na estrutura cristalina dos semicondutores? Explique o fenômeno ao considerar a luz como um feixe de partículas (teoria corpuscular da luz).
4. Explique o que é o efeito fotovoltaico. Qual a sua relação com o efeito fotoelétrico estudado anteriormente? Comente.
5. Qual material semicondutor mais utilizado na produção de células solares atualmente? (Marque apenas uma alternativa)
 - a) Germânio (Ge)
 - b) Ferro (Fe)
 - c) Silício (Si)
 - d) Cobre (Cu)
6. Cite dois exemplos de aplicações do efeito fotovoltaico.
7. A maior parte da energia produzida no Brasil é de origem:
 - a) Eólica
 - b) Nuclear
 - c) Hídrica (em hidrelétricas, por exemplo)
 - d) Solar
8. Cite duas vantagens e desvantagens em geral de se utilizar a energia fotovoltaica.

Os mapas mentais também serão utilizados nessa segunda avaliação. O conceito central será "Semicondutores". No decorrer das três aulas teóricas dessa UEPS, os alunos deverão ser capazes de relacionar o efeito fotoelétrico e fotovoltaico com a produção de energia elétrica através da radiação solar nas células solares.

Como feito anteriormente, um formulário com questões objetivas em relação a metodologia pode ser aplicado aos alunos utilizando a plataforma *Google forms*. Nele, o professor pode elaborar questões com objetivo de constatar a clareza, consistência e aceitação da unidade didática. Esses dados podem ser importantes para entender como os alunos lidaram com os novos conteúdos e as metodologias. Essa é uma atividade particular a cada docente, visto que a aplicação pode ter resultados diferentes por se tratar de uma atividade com seres humanos. Portanto, cabe a cada professor-aplicador, selecionar e elaborar as questões relevantes nesse questionário sobre a execução da UEPS N° 2.

5.8 **Resumo da UEPS nº 2**

Tema: Os materiais semicondutores, células solares e suas aplicações.

Turma indicada para a aplicação: 3° série (ano) do Ensino Médio.

Duração da UEPS: 3 aulas.

Objetivo Geral: Apresentar a definição e as principais características dos materiais semicondutores, com foco especial em uma de suas maiores aplicações atuais, as células e painéis solares.

Objetivos específicos:

- Apresentar aos alunos o conceito de condutividade elétrica, e quais fenômenos, estruturas e processos são responsáveis por essa característica;
- Conscientizar os alunos sobre o desenvolvimento sustentável e a importância ambiental de se utilizar fontes limpas;
- Situar os educandos sobre o contexto, aplicações, vantagens e desvantagens de se utilizar a tecnologia fotovoltaica como fonte de energia elétrica;
- Instigar a reflexão sobre as aplicações regionais e locais da energia solar onde vivem, traçando um elo entre o que foi aprendido e o que podem vivenciar no estado onde moram.

Materiais necessários para a realização da UEPS: Além de todos os recursos necessários para executar uma aula expositiva remota, a sequência didática utilizará também recursos experimentais assistidos, ou seja, as

simulações computacionais *online* e *offline* disponibilizadas gratuitamente e de fácil acesso.

Metodologia base da UEPS: Tem-se como teoria de ensino base, a aprendizagem significativa de David Ausubel. A metodologia que fundamenta a UEPS são os três momentos pedagógicos, idealizados por Delizoicov, Angotti e Pernambuco, procedimento esse que tem como referência o método Freiriano de ensino.

Avaliação da UEPS: A avaliação se dará no âmbito formativo e somativo, esse último na forma de questionário contendo questões objetivas discursivas sobre o tema, além de mapas mentais para investigar a aprendizagem dos conceitos por parte dos alunos. A avaliação pode contar ainda com questionários auxiliares contendo questões objetivas sobre a metodologia e a prática pedagógica adotada no decorrer das atividades desenvolvidas.

5.9 Considerações finais

Esse produto educacional foi elaborado com o intuito de ser uma ferramenta útil ao professor que pretende ensinar os tópicos de física moderna e contemporânea abordados aqui. O ponto de destaque que tratamos em focar foi a praticidade, a didática e a eficiência. Por isso a preocupação com que as UEPS's não fossem tão longas, bem como a utilização de ferramentas e materiais de fácil uso e acesso.

Vale ressaltar novamente que os conteúdos teóricos abordados aqui precisaram ser, muitas vezes, resumidos e tratados de forma simplificada, pois tratar cada conteúdo com a extensão ideal não só seria inviável, como fugiria da nossa proposta, que é a de trazer um materiais práticos, porém sem abandonar o rigor científico na escrita e no tratamento dos fenômenos. Ao educador que tenha sentido falta de aprofundamento em um assunto ou tópico específico, fica o convite novamente a consultar as principais referências desse trabalho.

Por fim, é importante destacar que as práticas e escolhas tomadas no decorrer das duas UEPS's não são absolutas e imutáveis. O professor, caso se sinta confortável com outras abordagens e ache necessário fazer alterações nos processos apresentados tem total autonomia para isso. Se este produto conseguir êxito em auxiliar o docente em sua prática pedagógica no ensino de Física, ainda que seja um pequeno auxílio, já

terá cumprido o seu papel.

Referências

- ANGOTTI, J. A. P. Ensino de física com tdoc. *Florianópolis: UFSC/EAD/CFM/CED*, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- CAVALCANTE, M. A. et al. Uma aula sobre o efeito fotoelétrico no desenvolvimento de competências e habilidades. *Física na Escola*, v. 3, n. 1, p. 24–29, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- CHIGUERU TIBA E COLABORADORES. *Atlas Solarimétrico do Brasil : banco de dados solarimétricos*. Recife, Brasil, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 57.
- DIAS, Diogo Lopes. Cloreto de sódio (sal de cozinha); Brasil Escola. <<https://s4.static.brasilecola.uol.com.br/img/2016/05/cloreto-de-sodio.jpg>>. Acesso em 12 de maio de 2021",,. Citado na página 42.
- FADIGAS, E. Energia solar fotovoltaica: Fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica. *Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo*, p. 32, 2012. Citado 6 vezes nas páginas 48, 49, 50, 51, 52 e 53.
- FERREIRA, M. et al. Uma proposta de ensino investigativo sobre a física moderna e contemporânea: O efeito fotoelétrico. *Revista Pesquisa e Debate em Educação*, v. 8, n. 2, 2019. Citado na página 37.
- HEWITT, P. G. *Física Conceitual. 12^o*. [S.l.]: Porto Alegre: Bookman, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 37.
- LIMA, A. A. et al. Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 42, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 43, 44 e 51.
- MARCIO.PERON. <<https://sites.google.com/site/marcioperon/ufscar/pesquisa/semicondutores>>. Acesso em 12 de maio de 2021",,. Citado na página 43.
- MELLO, H. A.; INTRATOR, E. Dispositivos semicondutores. *Editores Livros Técnicos e Científicos*, 1980. Citado 6 vezes nas páginas 45, 46, 47, 48, 49 e 50.

MOREIRA, M. A. Unidades de ensino potencialmente significativas - ueps. *Textos de Apoio ao Professor de Física*, v. 23, n. 2, p. 1–27, 2012. ISSN 1807-2763. Citado 4 vezes nas páginas 9, 10, 12 e 13.

MOREIRA, M. A. Desafios no ensino da Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, sciELO, v. 43, 00 2021. ISSN 1806-1117. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172021000500216&nrm=iso>. Citado na página 11.

MOREIRA, M. A.; OSTERMANN, F. Teorias construtivistas. *Textos de Apoio ao Professor de Física*, n. 10, p. 1–62, 2005. ISSN 1807-2763. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11 e 17.

MUENCHEN, C.; DELIZOICOV, D. Os três momentos pedagógicos na edição de livros para professores. *Revista ENCITEC*, v. 1, n. 1, p. 84–97, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica: Ótica, relatividade, física quântica (vol. 4)*. [S.l.]: Editora Blucher, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 20, 21, 22, 24 e 25.

PEREIRA, D. R. de O.; AGUIAR, O. Ensino de física no nível médio: tópicos de física moderna e experimentação. *Revista Ponto de Vista*, v. 3, n. 1, p. 65–81, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 32, 34 e 35.

REZENDE, S. M. *Materiais e Dispositivos Eletrônicos*. 1st. ed. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 42, 43, 44 e 45.

RODRIGUES, R. F. de; CUNHA, S. L. S. *Arduino para físicos*. 2015. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 34.

SOUZA, A. R. d. et al. A placa arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo pc. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 33, n. 1, p. 01–05, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 34.

SOUZA, Fábio. O Embarcados, 2013. <<https://www.embarcados.com.br/arduino-uno/>>. Acessado em 22/04/2021. Citado na página 30.

VIAN, Â. et al. *Energia Solar: Fundamentos Tecnologia e Aplicações*. [S.l.]: Editora Blucher. Citado 8 vezes nas páginas 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57 e 58.

WIEMAN, C. E.; PERKINS, K. K.; ADAMS, W. K. *Am. J. Phys.*, v. 76, p. 393, 2008. Citado na página 60.

Apêndices

APÊNDICE

A

Planos de Aula

Aula 1 - A concepção clássica do efeito fotoelétrico

Dados de Identificação	
Professor:	Caio Matheus Fontinele dos Santos
Disciplina:	Física
Tema:	O efeito fotoelétrico clássico
Data:	20/10/2021
Duração da aula:	50 minutos (1 hora/aula)

1 Objetivos

1.1 Geral

Ensinar o conceito e as principais características do fenômeno conhecido como efeito fotoelétrico sob a visão clássica do mesmo.

1.2 Específicos

- Apresentar a natureza da luz sob o viés clássico (como fenômeno eletromagnético);
- Estudar as principais inconsistências do efeito fotoelétrico em razão de como era entendido;
- Explicar de forma simples e objetiva o princípio de elaboração e características dos mapas mentais.

2 Conteúdos

- Natureza da luz (visão clássica);
- Efeito fotoelétrico (visão clássica e principais inconsistências);

3 Procedimentos metodológicos

A aula é iniciada com a apresentação do docente, da temática geral das UEPS's e do que seria um mapa mental. Tendo em vista a metodologia dos três momentos pedagógicos, a aula será iniciada com um momento de contextualização e problematização sobre a temática fotovoltaica e suas aplicações, seguida da apresentação expositiva do conteúdo, sendo finalizada com a avaliação individual de cada aluno por meio dos mapas mentais.

4 Recursos didáticos

No contexto do ensino remoto, os principais recursos utilizados são:

- Computador;

- Recursos audiovisuais mediados pelo computador, como imagens, vídeos, slides etc.

5 Avaliação

Os alunos deverão demonstrar uma compreensão satisfatória do conteúdo, além de participação nas discussões travadas, elaborando um mapa mental com o conceito central **efeito fotoelétrico** como avaliação somativa no final da aula. No decorrer de todo o tempo de aula ocorrerá a avaliação formativa, buscando os mais diversos indícios de aprendizagem significativa.

Referências

- [1] HEWITT, Paul G. **Física conceitual**, Porto Alegre: Bookman, 2015.
- [2] CAVALCANTE, M. A. et al Uma aula sobre o efeito fotoelétrico no desenvolvimento de competências e habilidades, **Física na Escola**, v. 3, n. 1, p. 24–29, 2002.

Aula 2 - A concepção quântica do efeito fotoelétrico

Dados de Identificação	
Professor:	Caio Matheus Fontinele dos Santos
Disciplina:	Física
Tema:	A teoria de Einstein do efeito fotoelétrico
Data:	22/10/2021
Duração da aula:	50 minutos (1 hora/aula)

1 Objetivos

1.1 Geral

Apresentar o fenômeno do efeito fotoelétrico sob viés quântico, tal como proposto por Albert Einstein (1879-1955) em 1905.

1.2 Específicos

- Estudar a proposta de Einstein a fim de explicar o efeito fotoelétrico;
- Apresentar a concepção moderna da luz, regida pela dualidade onda-partícula;
- Elucidar como os conceitos quânticos presentes na teoria de Einstein sanavam os problemas existentes no entendimento clássico do fenômeno.

2 Conteúdos

- Introdução a teoria quântica;
- Efeito fotoelétrico (visão quântica);
- A dualidade onda-partícula da luz;
- Solução das principais inconsistências do entendimento clássico do efeito fotoelétrico.

3 Procedimentos metodológicos

Tendo em vista a metodologia dos três momentos pedagógicos, a aula é iniciada com um momento de recapitulação dos conteúdos abordados na aula anterior, seguida pela problematização do tema baseada em uma simulação utilizando a placa Arduino. Após isso, com a metodologia expositiva dos conteúdos programáticos, a aula será finalizada com a avaliação individual de cada aluno através de mapas mentais.

4 Recursos didáticos

No contexto do ensino remoto, os principais recursos utilizados são:

- Computador;
- Placa Arduino;
- Recursos audiovisuais mediados pelo computador, como imagens, vídeos, slides etc.

5 Avaliação

Os alunos deverão demonstrar uma compreensão suficiente do conteúdo e dos temas presentes nas discussões que foram travadas, elaborando um mapa mental com o conceito central **efeito fotoelétrico**, como avaliação somativa ao final da aula. No decorrer de toda aula ocorrerá a avaliação formativa, buscando os mais diversos indícios de aprendizagem significativa.

Referências

- [1] HEWITT, Paul G. **Física conceitual**, Porto Alegre: Bookman, 2015.
- [2] CAVALCANTE, M. A. et al Uma aula sobre o efeito fotoelétrico no desenvolvimento de competências e habilidades, **Física na Escola**, v. 3, n. 1, p. 24–29, 2002.

Aula 3 - Avaliação da UEPS nº 1 (O efeito fotoelétrico)

Dados de Identificação	
Professor:	Caio Matheus Fontinele dos Santos
Disciplina:	Física
Tema:	Avaliação da UEPS nº 1 - O efeito fotoelétrico
Data:	xx/10/2021
Duração da aula:	50 minutos (1 hora/aula)

1 Objetivos

1.1 Geral

Avaliação somativa por meio de lista de exercícios referentes aos conteúdos trabalhados na UEPS nº 1 utilizando a plataforma *Google forms*.

1.2 Específicos

- Acumular indícios de aprendizagem significativa por parte dos alunos;
- Verificar a eficácia das metodologias adotadas.

2 Procedimentos metodológicos

Após um momento inicial de recapitulação dos principais conceitos e fenômenos trabalhados em aula, se dará início a avaliação individual somativa de cada aluno.

3 Recursos didáticos

No contexto do ensino remoto, os principais recursos utilizados são:

- Computador;
- Recursos audiovisuais mediados pelo computador, como imagens, vídeos, slides etc;
- Ferramenta digital *Google forms*.

4 Avaliação

A avaliação somativa de cada aluno ocorrerá através de lista de exercícios na plataforma *Google forms*, atividade essa que deverá ser finalizada no período de aula. As questões abordarão diversos aspectos dos conteúdos discutidos no decorrer da unidade didática. Os alunos responderão ainda um questionário adicional a fim de coletar a opinião de cada um acerca dos materiais e metodologias utilizados no decorrer das aulas.

Referências

- [1] FERREIRA, M. et al Uma proposta de ensino investigativo sobre a física moderna e contemporânea: O efeito fotoelétrico, **Revista Pesquisa e Debate em Educação**, v. 8, n. 2, 2019.

Aula 4 - Introdução a Física do estado sólido

Dados de Identificação	
Professor:	Caio Matheus Fontinele dos Santos
Disciplina:	Física
Tema:	Os sólidos cristalinos e os materiais semicondutores
Data:	25/10/2021
Duração da aula:	50 minutos (1 hora/aula)

1 Objetivos

1.1 Geral

Estudar a estrutura cristalina dos sólidos, além da condutividade dos materiais tendo em vista as bandas de energia e as ligações químicas, com foco nos materiais semicondutores.

1.2 Específicos

- Estudar a organização atômica dos materiais sólidos;
- Elucidar a condição de condutividade dos materiais com base no conceito de bandas de energia e nas ligações atômicas;
- Apresentar os materiais semicondutores.

2 Conteúdos

- Organização atômica dos materiais sólidos;
- Bandas de energia, *gap* e ligações atômicas;
- Propriedades dos semicondutores.

3 Procedimentos metodológicos

Tendo em vista a metodologia dos três momentos pedagógicos, a aula é iniciada com um momento de apresentação da UEPS e dos conteúdos que serão trabalhados, seguida pela problematização do tema baseada na matriz energética brasileira e as fontes de energia sustentável. Após isso, com a metodologia expositiva dos conteúdos programáticos supracitados, a aula será finalizada com a avaliação individual de cada aluno através de mapas mentais.

4 Recursos didáticos

No contexto do ensino remoto, os principais recursos utilizados são:

- Computador;
- Recursos audiovisuais mediados pelo computador, como imagens, vídeos, slides etc.

5 Avaliação

Os alunos deverão demonstrar uma compreensão suficiente do conteúdo e dos temas presentes nas discussões travadas, elaborando um mapa mental com o conceito central **Energia solar**, como avaliação somativa ao final da aula. No decorrer de toda aula ocorrerá a avaliação formativa, buscando os mais diversos indícios de aprendizagem significativa.

Referências

- [1] REZENDE, S. M **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**, 1st. ed. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2004.
- [2] MELLO, H. A.; INTRATOR, E. **Dispositivos semicondutores** Editora Livros Técnicos e Científicos, 1980.

Aula 5 - Os materiais semicondutores

Dados de Identificação	
Professor:	Caio Matheus Fontinele dos Santos
Disciplina:	Física
Tema:	A dinâmica dos elétrons e buracos, junções $p-n$ e efeito fotovoltaico
Data:	27/10/2021
Duração da aula:	50 minutos (1 hora/aula)

1 Objetivos

1.1 Geral

Entender a dinâmica dos portadores de carga nos materiais semicondutores, as dopagens conhecidas como junções $p-n$ e o efeito fotovoltaico.

1.2 Específicos

- Utilizar simulações para exemplificar processos de dopagens e interação dos fótons com a junção $p-n$;
- Apresentar as células e painéis solares como uma das principais aplicações das dopagens de semicondutores, bem como das junções $p-n$.

2 Conteúdos

- Dopagem de semicondutores;
- As junções $p-n$;
- A dinâmica dos elétrons e buracos nos semicondutores.

3 Procedimentos metodológicos

Tendo em vista a metodologia dos três momentos pedagógicos, a aula é iniciada com um momento de recapitulação dos conteúdos abordados na aula anterior, seguida pela problematização da potencialidade da tecnologia fotovoltaica, suas vantagens e possíveis desvantagens. Após isso, com a metodologia expositiva dos conteúdos programáticos supracitados, a aula será finalizada com a avaliação individual de cada aluno através de mapas mentais.

4 Recursos didáticos

No contexto do ensino remoto, os principais recursos utilizados são:

- Computador;
- Recursos audiovisuais mediados pelo computador, como imagens, vídeos, slides etc.

5 Avaliação

Os alunos deverão demonstrar uma compreensão suficiente do conteúdo e dos temas presentes nas discussões travadas, elaborando um mapa mental com o conceito central **Energia solar**, como avaliação somativa ao final da aula. No decorrer de toda aula ocorrerá a avaliação formativa, buscando os mais diversos indícios de aprendizagem significativa.

Referências

- [1] REZENDE, S. M **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**, 1st. ed. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2004.
- [2] MELLO, H. A.; INTRATOR, E. **Dispositivos semicondutores** Editora Livros Técnicos e Científicos, 1980.

Aula 6 - A tecnologia fotovoltaica

Dados de Identificação	
Professor:	Caio Matheus Fontinele dos Santos
Disciplina:	Física
Tema:	Composição e principais aplicações dos células e painéis solares
Data:	29/10/2021
Duração da aula:	50 minutos (1 hora/aula)

1 Objetivos

1.1 Geral

Estudar o efeito fotovoltaico, os tipos de células solares e principais materiais utilizados e as diversas aplicações dos módulos fotovoltaicos no mundo contemporâneo.

1.2 Específicos

- Tipos de sistemas fotovoltaicos (puros - conversão solar diretamente em elétrica, sistemas heliotérmicos etc.);
- Apresentar os diferentes tipos de instalações referentes a energia fotovoltaica (isoladas e conectadas a rede).

2 Conteúdos

- Efeito fotovoltaico;
- Composição das células e painéis solares;
- História e contexto atual da tecnologia fotovoltaica no Brasil e no mundo;

3 Procedimentos metodológicos

Tendo em vista a metodologia dos três momentos pedagógicos, a aula é iniciada com um momento de recapitulação dos conteúdos abordados na aula anterior, seguida pela problematização da potencialidade da tecnologia fotovoltaica na região Norte e Nordeste. Após isso, com a metodologia expositiva dos conteúdos programáticos supracitados, a aula será finalizada com a avaliação individual de cada aluno através de mapas mentais.

4 Recursos didáticos

No contexto do ensino remoto, os principais recursos utilizados são:

- Computador;
- Recursos audiovisuais mediados pelo computador, como imagens, vídeos, slides etc.

5 Avaliação

Os alunos deverão demonstrar uma compreensão suficiente dos conteúdos e dos temas presentes nas discussões travadas, elaborando um mapa mental com o conceito central **Energia solar**, como avaliação somativa ao final da aula. No decorrer de toda aula ocorrerá a avaliação formativa, buscando os mais diversos indícios de aprendizagem significativa.

Referências

- [1] REZENDE, S. M **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**, 1st. ed. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2004.
- [2] MELLO, H. A.; INTRATOR, E. **Dispositivos semicondutores** Editora Livros Técnicos e Científicos, 1980.

Aula 7 - Avaliação da UEPS nº 2

Dados de Identificação	
Professor:	Caio Matheus Fontinele dos Santos
Disciplina:	Física
Tema:	Avaliação da UEPS nº 2 - Os semicondutores e as células solares
Data:	xx/10/2021
Duração da aula:	50 minutos (1 hora/aula)

1 Objetivos

1.1 Geral

Além da avaliação formativa durante toda a aplicação da UEPS nº 2, a aula se voltará a avaliação somativa por meio de lista de exercícios referentes aos conteúdos trabalhados nas aulas anteriores da unidade didática utilizando a plataforma *Google forms*.

1.2 Específicos

- Acumular indícios de aprendizagem significativa por parte dos alunos;
- Verificar a eficácia das metodologias adotadas.

2 Procedimentos metodológicos

Após um momento inicial de recapitulação dos principais conceitos e fenômenos trabalhados em aula, se dará início a avaliação individual somativa de cada aluno.

3 Recursos didáticos

No contexto do ensino remoto, os principais recursos utilizados são:

- Computador;
- Recursos audiovisuais mediados pelo computador, como imagens, vídeos, slides etc;
- Ferramenta digital *Google forms*.

4 Avaliação

A avaliação somativa de cada aluno ocorrerá através de lista de exercícios na plataforma *Google forms*, atividade essa que deverá ser finalizada no período de aula. As questões abordarão diversos aspectos dos conteúdos discutidos em aula. Os alunos responderão ainda um questionário adicional a fim de coletar a opinião de cada um acerca dos materiais e metodologias utilizados no decorrer das aulas.

Referências

- [1] REZENDE, S. M **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**, 1st. ed. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2004.
- [2] MELLO, H. A.; INTRATOR, E. **Dispositivos semicondutores** Editora Livros Técnicos e Científicos, 1980.

APÊNDICE B – Questionário 1

Avaliação da UEPS nº 1 - O Efeito fotoelétrico

Responda cada questão atentamente. Só será válida uma resposta por aluno. Ao clicar em enviar, você não poderá fazer uma nova tentativa. Muito obrigado por participar!

*Obrigatório

1. E-mail *

Cabeçalho

Preencha de acordo com seus dados.

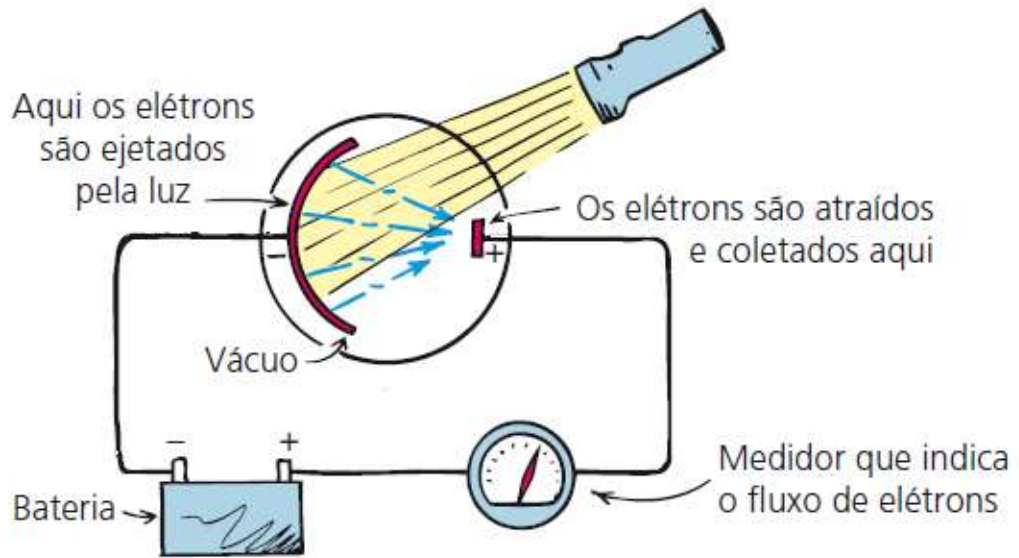
2. Nome completo *

3. Escola/Instituição *

4. Turma *

Responda todas as questões a seguir

5. A imagem abaixo ilustra um aparato experimental para a observação do efeito fotoelétrico. Explique, com suas palavras, o que seria este fenômeno.

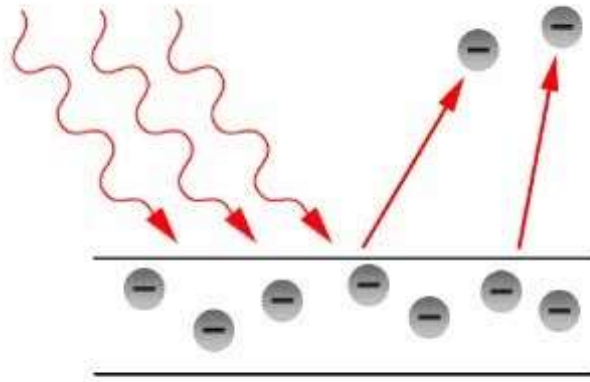


Aparato experimental genérico para se detectar o efeito fotoelétrico.

6. A luz possui uma natureza única, podendo ser entendida com base em duas vertentes completamente diferentes. Com base nisso, o que seria a dualidade onda-partícula?

7. O que significa o termo "quantum"? Descreva detalhadamente com suas palavras.

8. Cite uma ou mais inconsistências do efeito fotoelétrico da forma como era entendido antes da teoria quântica.



Elétrons ejetados por uma onda eletromagnética.

9. De acordo com a visão moderna do efeito fotoelétrico, complete a seguinte sentença: "Quanto maior for a frequência da luz que incide em uma superfície fotossensível, maior será..."

Marcar apenas uma oval.

- O comprimento de onda dos elétrons ejetados".
- O intervalo de tempo dos elétrons ejetados".
- A massa dos elétrons ejetados".
- A energia dos elétrons ejetados".

10. Após as contribuições de Einstein, o efeito fotoelétrico passou a ser entendido de uma nova forma. Segundo sua teoria, qual dessas grandezas está diretamente relacionada a energia dos fótons de uma radiação luminosa?

Marcar apenas uma oval.

- Intensidade da luz
- Comprimento de onda.
- Frequência.
- Velocidade.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

APÊNDICE C – Questionário 2

Avaliação da UEPS nº 2 - Os materiais semicondutores e as células solares

Responda cada questão atentamente. Só será aceita uma resposta por aluno. Responda o máximo de questões que conseguir, por favor!!!

*Obrigatório

1. E-mail *

2. Nome completo *

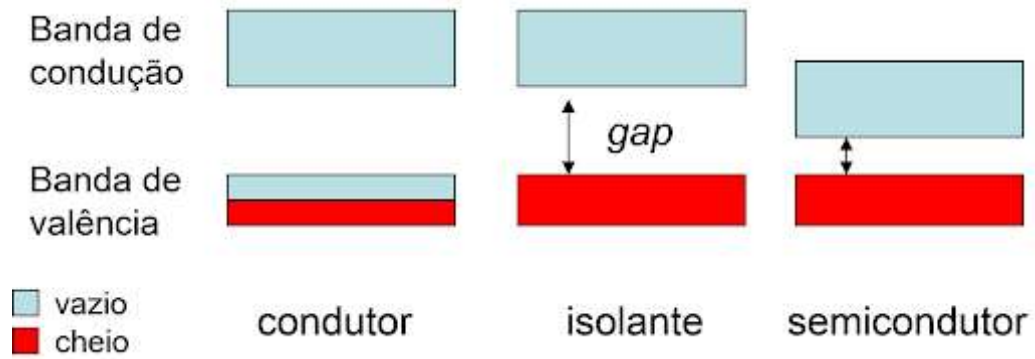
3. Escola *

4. Turma *

Responda as
questões a
seguir:

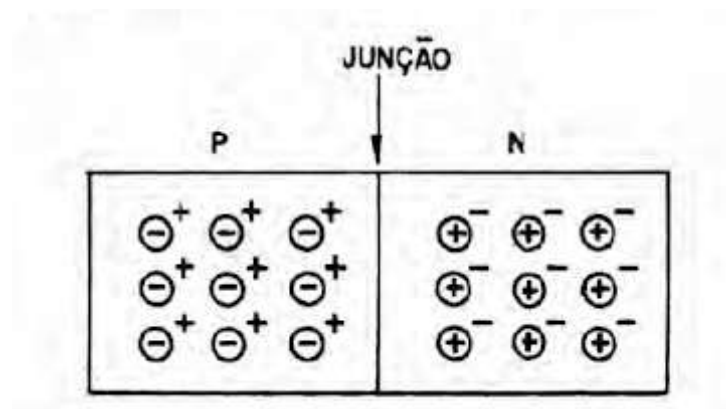
Responda cada questão atentamente. Só será aceita uma resposta por aluno.
Responda o máximo de questões que conseguir, por favor!!!

5. Qual a principal diferença entre os materiais condutores, semicondutores e isolantes. Explique utilizando os conceitos vistos em aula.



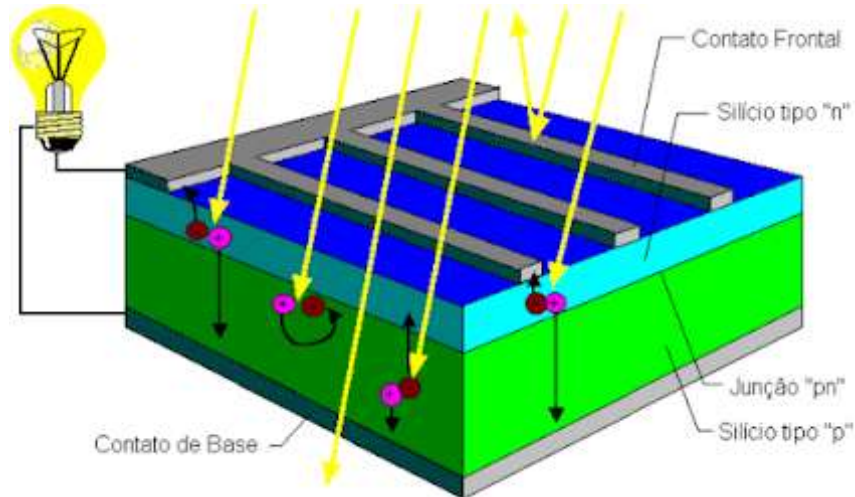
Preenchimento das bandas de energia nos três tipos de materiais.

6. Explique com suas palavras o que seria uma junção p-n, que é muito importante para a composição das células solares.



Exemplo de uma junção p-n. Do lado esquerdo temos uma dopagem do tipo p (aceitadora), e na direita uma dopagem do tipo n (doadora).

7. Tendo em vista o que foi estudado sobre o efeito fotoelétrico, os materiais semicondutores e o efeito fotovoltaico, qual das alternativas descreve de forma resumida o princípio de conversão da energia solar em energia elétrica em uma célula solar: *



Exemplo da estrutura de uma célula solar de silício, onde temos indicado a junção p-n e a incidência dos raios solares.

Marcar apenas uma oval.

- As ondas eletromagnéticas, ao incidirem sobre as células solares, rompem a junção p-n e geram elétrons livres que formam uma corrente elétrica que pode ser aproveitada.
- Os fótons provenientes da luz solar, destacam os elétrons das ligações químicas e consequentemente dão origem a buracos que, devido a processo de difusão de portadores de carga, criam uma diferença de potencial na célula solar, o efeito fotovoltaico.
- As ondas eletromagnéticas purificam a dopagem presente na junção p-n e dão origem a elétron e buracos livres, que a partir do momento em que se tornam livres, formam uma corrente elétrica que pode ser aproveitada.
- Os fótons oriundos da luz solar sobrecarregam a junção p-n da célula solar, interrompendo o processo de difusão de portadores de carga, dando origem a uma diferença de potencial V , chamada de efeito fotovoltaico.

8. O que é um semicondutor dopado? *

Marcar apenas uma oval.

- Um semicondutor puro.
- Um semicondutor intrínseco.
- Um semicondutor com "impurezas".
- Um semicondutor sem mais utilidade.

9. Um dos principais diferenciais de um material semicondutor, em relação aos condutores e isolantes é que estes possuem dois tipos distintos de portadores de carga que podem formar uma corrente elétrica nesses materiais em determinadas situações. Os dois tipos de portadores de carga presentes neles são: *

Marcar apenas uma oval.

- Elétrons e buracos.
- Prótons e elétrons.
- Fótons e elétrons.
- Nêutrons e elétrons.
- Fótons e prótons.

10. A maior parte da energia elétrica produzida e utilizada no Brasil é de origem... *

Marcar apenas uma oval.



Eólica.



Nuclear.



Solar.



Hídrica.