



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



GUIA DO PROFESSOR

CONVERTENDO A RADIAÇÃO SOLAR EM ENERGIA ELÉTRICA

Felipe Moreira Correia

Deise Miranda Vianna

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Felipe Moreira Correia, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Dezembro de 2019

Sumário

Capítulo 1: Introdução	3
Capítulo 2: Orientações para a aplicação da atividade	4
1.1 1º Dia: Problematização da Matriz Energética	4
1.2 2º Dia: Investigação da Radiação Solar utilizando um Forno Solar de Caixa 7	
1.3 3º Dia: Verificação dos efeitos da radiação Ultravioleta através de um fenômeno similar ao da nossa pele.....	9
1.4 4º Dia: Introdução do Efeito Fotoelétrico para explicar a tecnologia o Painel Solar.....	11
Capítulo 3: Referências Bibliográficas.....	13
Apêndice A: Física dos semicondutores.....	15
I. Estrutura de Banda de Energia	15
II. Condutores, Semicondutores e Isolantes.....	18
III. Os semicondutores e suas Impurezas	21
IV. Junção P/N e o painel fotovoltaico	25

Capítulo 1:

Introdução

Este material didático contém uma sequência de atividades que possuem como propósito principal contextualizar a conversão da energia solar em energia elétrica, onde o objetivo é introduzir os conceitos físicos responsáveis por essa conversão, tais como: capacidade de transformação energética da radiação solar e efeito fotoelétrico.

Ao final deste material, no Apêndice A, está disponível um aprofundamento conceitual da parte física sobre os semicondutores. Tentamos construir uma explicação que fugisse do desenvolvimento matemático pesado envolvido nesse tópico, mas que desse uma boa base para um professor do ensino médio ficar por dentro desses conceitos.

Capítulo 2:

Orientações para a aplicação da atividade

1.1 1º Dia: Problematização da Matriz Energética

O primeiro dia de atividade tem como objetivo motivar os alunos para trabalharem com este tema. Para isso é apresentado um problema envolvendo a matriz energética brasileira gerada por um fator climático, a falta de chuva, dando possibilidade para que eles encontrem uma saída para esta situação.

Sugerimos que inicie a atividade com a reprodução do vídeo "O Brasil e as mudanças climáticas"¹ (Figueiredo, 2017) do canal Nerdologia no Youtube, que aborda as metas e a participação do Brasil nas COPs (Conferência das Partes).

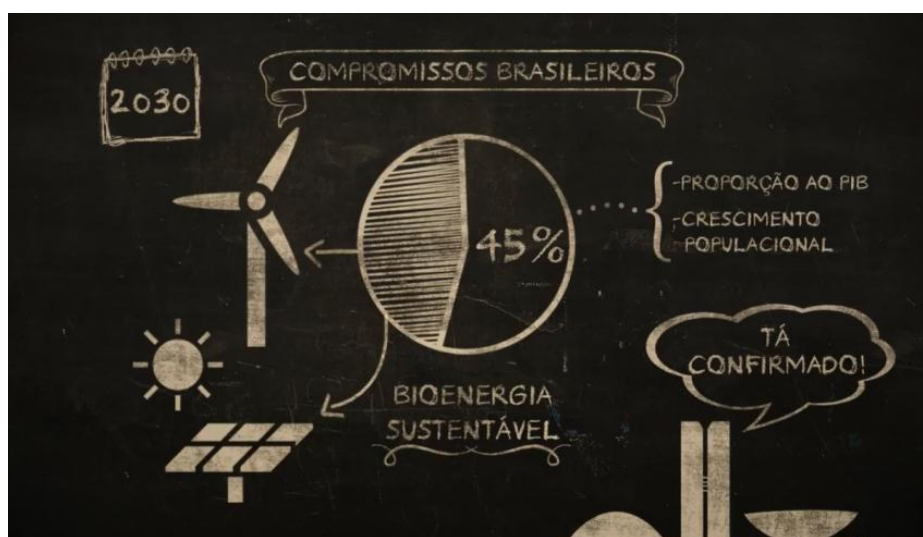


Figura 2: Compromissos brasileiros
Fonte: Nerdologia (2017)

Com isso divida a turma, para construir um Gráfico Humano (gráfico que tem como valores os próprios alunos, cabendo a eles fazerem a relação de quantos por cento cada aluno representa), de acordo com o gráfico da matriz energética que temos que alcançar em 2030, ou seja, 55% da turma estarão no grupo das não renováveis e 45% no grupo das fontes renováveis. Para assim, discutir as seguintes provocações:

¹ Sinopse: O vídeo aborda sobre a evolução histórica e política do combate ao aquecimento global trazendo o desenvolvimento das Conferências das Partes, começando na ECO92 ou RIO92 até a situação do ano de 2017. Apresentando a participação do Brasil nesse período.

- Vocês acham que o nosso país está perto de cumprir as metas do Acordo de Paris?
- Quais os melhores tipos de energias renováveis que podem ser aproveitadas no Brasil?
- Como podemos mudar esse quadro?
- Qual o principal meio de produção de energia do Brasil? Ele é renovável? É benéfico dependermos desse meio de produção?

Importante ressaltar que essas perguntas não devem ser realizadas de maneira "pergunta e resposta". Por ser uma atividade investigativa o professor deve inseri-las durante o debate, podendo aparecer com outra estrutura, porém trabalhando esses temas, sendo necessário estar atento para guiar os alunos para o objetivo da atividade.

Na sequência com a mesma dinâmica, apresente o gráfico de 2018 da matriz energética brasileira e refaça a distribuição do Gráfico Humano com base nesses dados, conforme ilustrado abaixo.

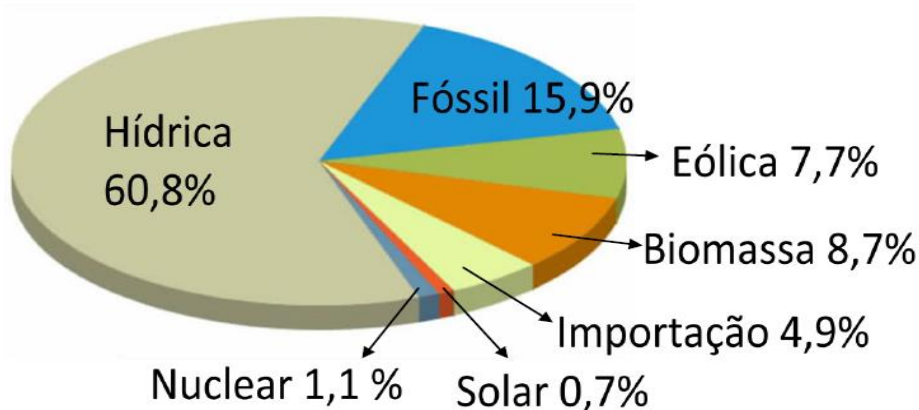


Figura 2: Matriz Energética 2018.
Fonte: ANEEL (2018)

A turma que estava dividida em dois grupos diferentes (Renováveis e não renováveis) é redistribuída de maneira proporcional em 6 grupos, um para cada forma de produção energética. Com essa nova divisão questione-os novamente sobre as metas e a situação do Brasil.

Após essa discussão inicial, crie um Júri-Simulado para debater a situação energética do nosso país. Para isso eleja através de sorteio 3 ministros:

- Ministro (a) de Minas e Energia.
- Ministro (a) da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação.

- Ministro (a) do Meio Ambiente.

Para completar o Júri, o professor faz o papel do Ministro da Fazenda e mediador do debate. Eles terão que dar suas opiniões e escolhas sobre qual tipo de produção de energia que teremos que investir para sair do problema que estamos. Já os alunos em cada grupo se tornam representantes dessa forma de produção energética, tendo que defendê-la e enaltecê-la para que seja escolhida.

É aconselhável montar o Júri-Simulado antes de apresentar o problema, pois, dependendo o tamanho da turma pode ser que gaste um tempo considerável e pode influenciar os alunos na decisão dos grupos.

A dinâmica do Júri-Simulado é similar ao debate político eleitoral:

1. Um representante terá que tirar uma ficha de “argumento” para iniciar sua pergunta, tendo somente 1 minuto e 30 segundos para finalizá-la.
2. O representante questionado irá ter 1 minuto para responder.
3. Após a resposta o representante terá tirar outra ficha dando continuidade ao debate.

Todo o material de consulta (Quadro de Vantagens e Desvantagens e as Fichas de Argumento) para o Júri-Simulado está disponibilizado no material do aluno ou na dissertação. É aconselhável distribuí-lo pelo menos uma semana antes para que os alunos possam se abastecer com argumentos e fontes.

Para iniciar o debate, reproduzia o vídeo da notícia de Janeiro de 2018 do Bom dia Brasil (Carvalho, 2018), que aborda o problema energético pelo qual o país passou devido à prolongada falta de chuvas, com uma reflexão crítica sobre a nossa dependência com as usinas hidrelétricas. Então, o primeiro sorteio tem que ser feito pelos representantes da energia Hídrica.

Ao final do debate, peça aos ministros que elaborarem uma saída para o problema que foi colocado, levando em conta o ministério que representam e os argumentos apresentados durante o júri-simulado.

Como o professor está fazendo o papel de Ministro da Fazenda, que é responsável pela distribuição de verba do país, sua decisão é de extrema importância, praticamente é o voto de minerva. Adotamos essa estratégia para que a energia solar esteja dentro das soluções para que o restante das

atividades se desenrole, sem que seja necessário influenciar o debate dos alunos.

1.2 2º Dia: Investigação da Radiação Solar utilizando um Forno Solar de Caixa

Nesta aula é realizado o aprofundamento da discussão sobre energia solar, onde o objetivo é investigar a capacidade energética da radiação solar fazendo uso de experimento e questionamentos.

Divida a turma em grupos e inicie a atividade com o roteiro, a primeira pergunta presente é referente à comparação das temperaturas máximas e mínimas da Terra e Lua, na aproximação em que recebem a mesma intensidade de radiação solar. Tendo como objetivo fazer com que os alunos exponham o que eles sabem sobre a formação da atmosfera de nosso planeta, pois, é ela a grande responsável por regular a temperatura na Terra. O espaço dado para os alunos responderem permite a criação de desenhos ou esquemas.

Na sequência, distribua para cada grupo um Forno Solar de Caixa (figura 3), é necessário que este material já esteja construído (disponibilizamos no apêndice A da dissertação um roteiro de construção). A tarefa proposta para os alunos é periciar o forno para identificar todos os materiais utilizados e encontrar a função de cada um.



Figura 3: Forno solar de caixa
Fonte: Os autores

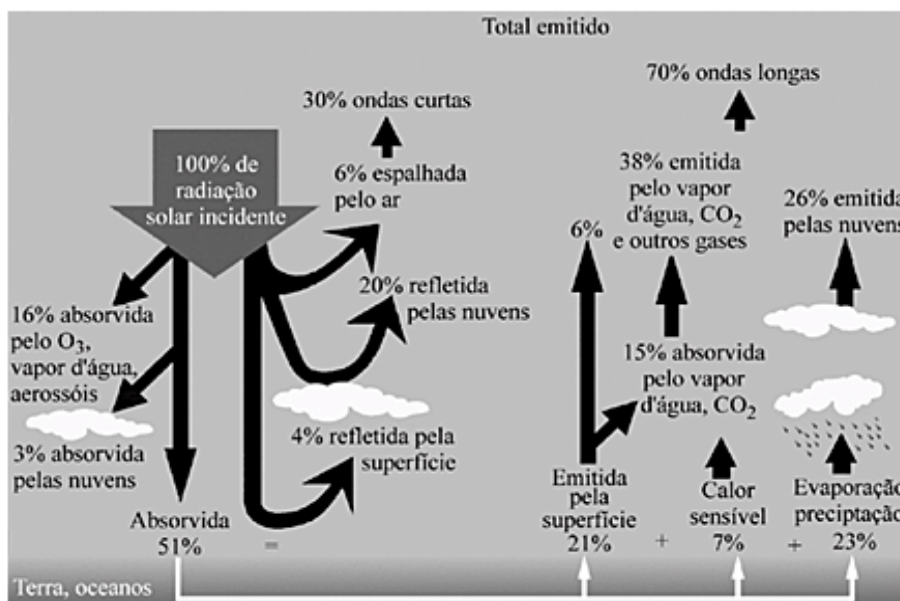
Ainda na sala de aula, o roteiro traz uma pergunta onde cada grupo terá que escolher, justificando sua opção, a receita para cozinhar utilizando o Forno Solar de Caixa. E ainda, é necessário que o grupo opte por utilizar ou não o "adereço especial".

Aconselhamos testar o forno antes da aplicação, pois, é necessário que seja possível cozinhar estas receitas em pelo menos 1 tempo de aula (50 minutos). Nossas indicações de receitas são: banana assada, aquecimento de água para fazer chá ou café ou queijo quente.

Uma vez com as escolhas tomadas, leve a turma para um lugar em que esteja incidindo luz do Sol diretamente, para que possam executá-las. Durante o preparo, auxilie os alunos com o roteiro, pois este traz perguntas que abordam o funcionamento do forno e sua possível otimização, comparação do forno solar com a atmosfera e o fogão de casa comum e o tipo de radiação que estão utilizando.

Destaco uma atenção especial para a pergunta número 4, 10 e 11, que estão abaixo, pois é necessária uma análise gráfica para respondê-las. Dada a minha experiência em sala, os alunos apresentaram uma dificuldade a mais com esse tipo de situação.

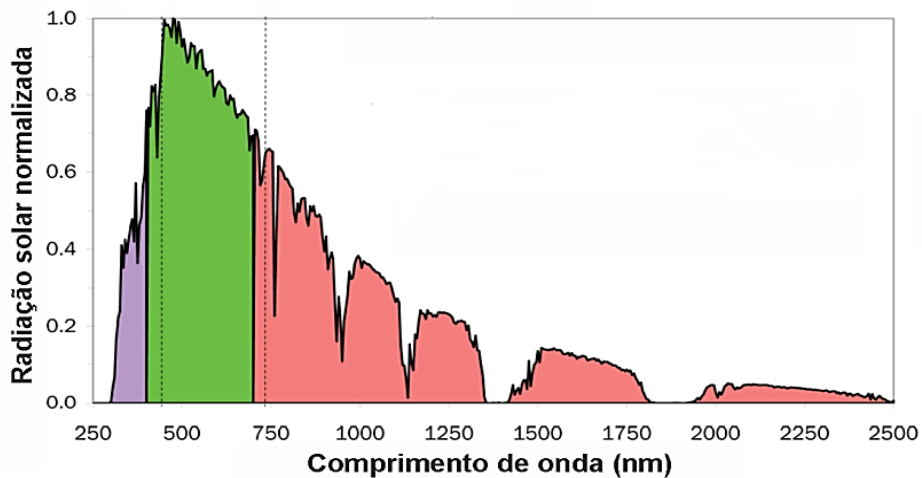
Abaixo temos em seguida um diagrama que ilustra o balanço das radiações que a atmosfera proporciona:



fonte: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172004000200010

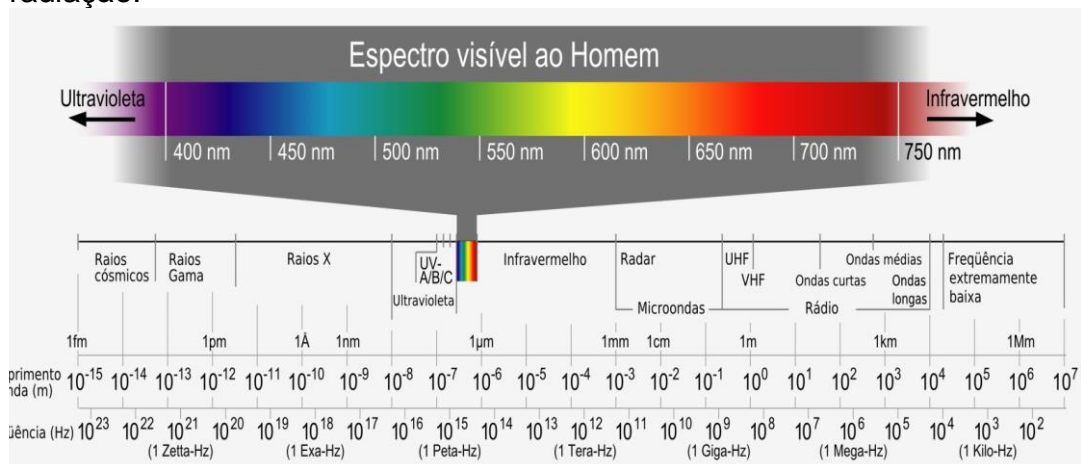
4) Discutindo com seu grupo, relacione os materiais do forno com os elementos principais da figura (Radiação incidente, Terra/Oceanos, Nuvens, Gases)

Abaixo temos duas figuras, a primeira apresenta o Espectro da Radiação Solar incidente na superfície da Terra no nível do mar.



Fonte: Editada pelos autores - https://www.researchgate.net/figure/FIGURA-4-Espectro-de-radiacao-solar-que-atinge-a-superficie-da-Terra_fig4_308185915

A segunda mostra o todo o espectro eletromagnético, mostrando as características de frequência e comprimento de onda de cada faixa de radiação.



Fonte: http://www.apoioescolar24horas.com.br/salaaula/estudos/fisica/035_ondas/#pag4-tab

10) Comparando as duas figuras anteriores, quais são as radiações que o Sol emite predominantemente?

11) Das radiações destacadas anteriormente pelo seu grupo, quais delas provoca predominantemente o efeito no Forno Solar.

1.3 3º Dia: Verificação dos efeitos da radiação Ultravioleta através de um fenômeno similar ao da nossa pele

Inicie a aula dividindo a turma em grupo para a distribuição do roteiro, primeiramente só entregue a parte "Outras formas de aproveitar a energia em

forma de Calor". Para começar são apresentadas duas tecnologias: o painel para aquecer água e a usina hélio térmica, com as explicações de seus funcionamentos. Ambos utilizam um processo semelhante ao do Forno Solar de Caixa, transformam energia solar em energia térmica.

É pedido para analisarem a transformação energética que ocorre em cada caso e comparar com o Forno Solar. Além disso, é levantada a questão dessas tecnologias serem ou não utilizadas no Brasil, o preço completo do aquecedor d'água e o efeito da radiação Infravermelho nesses casos.

Quando os grupos terminarem a primeira parte, reproduza o vídeo da propaganda de protetor solar (figura 3), servindo como atração para a continuação do tema. Nele é relatado o perigo de ficar exposto ao Sol, para resolver esse problema a marca traz um adesivo junto com o protetor solar, que muda de cor devido ao tempo exposto ao Sol.



Figura 3 Propaganda do Protetor Solar
Fonte: Larissa (2019)

Então, entregue para os grupos a outra parte do roteiro onde são realizados alguns questionamentos em relação à proteção solar envolvendo, os cuidados, impactos e os produtos utilizados. Se achar conveniente faça um debate com toda a turma para verificar as preocupações respondidas.

Uma vez discutidos os efeitos de exposição, passe para a parte experimental. Para isso é preciso de papel jornal, protetores solares de fatores diferentes e pedaço de tecidos. Proponha para os grupos criarem um "projeto" que possa verificar as precauções discutidas anteriormente, a fim de estudar o efeito de ficar no Sol por longos períodos, conforme indica o roteiro.

As perguntas que acompanham o experimento visam verificar a postura dos alunos em relação a um experimento, se conseguem prever o resultado, as preocupações que precisam levar em conta para o sucesso e como coletar os dados para verificar o processo experimental.

É necessário expor esses projetos ao Sol, por isso é importante verificar a previsão do tempo para a aplicação. Fizemos vários testes e aconselhamos pelo menos dois dias de exposição para que a diferença entre os fatores de proteção fique claramente visível. E não é necessário deixar exposto diretamente ao Sol, um lugar com bastante luz natural é o suficiente para enxergar o efeito.

1.4 4º Dia: Introdução do Efeito Fotoelétrico para explicar a tecnologia o Painel Solar

Neste dia, ultimo dia de atividade, é abordado o Efeito Fotoelétrico, através da discussão sobre o painel fotovoltaico, trabalhando assim com o fenômeno físico responsável pela conversão da luz em energia elétrica.

. Com a turma dividida em grupo, entregue somente a primeira parte do roteiro, "Transformando a energia solar em Energia Elétrica". Que é uma série de perguntas, cujo objetivo é buscar as ideias que os alunos possuem do painel, explorando assuntos como a dependência com a quantidade de luz, o tipo de material, o preço, a radiação necessária e principalmente o funcionamento do painel solar.

Nesse ultimo assunto trabalhado, esperamos que os alunos respondam levando em conta a característica ondulatória da luz, afinal, durante toda a atividade estamos trabalhando com a luz sendo uma onda eletromagnética.

Na sequência, com a segunda parte do roteiro é inserido através de texto as características dessa tecnologia e os conceitos do efeito fotoelétrico e quantização da energia. A primeira pergunta dessa parte se "opõe" a ultima pergunta respondida, pois, como foi introduzida a ideia de fóton esperamos que os alunos mudem sua forma de interpretar a luz, passando de onda para partícula.

O roteiro ainda trabalha através de perguntas os seguintes conceitos: análise do espectro de absorção do Painel Solar, Função Trabalho, aproveitamento da radiação pelo Painel, a relação energética do fenômeno. Aconselhamos atenção ao trabalho dos grupos, auxilie-os com a interpretação de texto e com análise gráfica, pois eles podem apresentar dificuldades com essas situações. Esperamos que a construção e a sequência dessas perguntas

contribuam de tal maneira que os alunos consigam alcançar a formalização da equação do efeito fotoelétrico.

Capítulo 3:

Referências Bibliográficas

ANAEEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil), Matriz de Energia Elétrica. ANAEEEL, 2018. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acessado em: 13 de out. 2018.

BACCARO, A. L. B.; GUTZ, I. G. R.. FOTOELETROCATÁLISE EM SEMICONDUTORES: DOS PRINCÍPIOS BÁSICOS ATÉ SUA CONFORMAÇÃO À NANOESCALA. Quím. Nova, São Paulo , v. 41, n. 3, p. 326-339, Mar. 2018 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422018000300326&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 11 de Setembro 2019.

DOITPOMS, University of Cambridge, 2019 Disponível em: <<https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/semiconductors/compound.php>>. Acessado em: 06 de out. 2019.

ELETRÔNICA SEM LIMITES, Gabriel Demétrio, 2013. Diodos. Disponível em: <<http://eletronicasemlimites.blogspot.com/2013/07/diodos.html>>. Acessado em: 06 de out. 2019.

FELMAN, B.J, An Introduction to Solar Cells - The Physics Teacher, vol 48, 2010.

FERNANDES, F.M.S.S. Potencial Químico, Fugacidade e Atividade, Rev. Ciência Elem., V5(4):053, p.2, 2017.

KITTEL, C. Introdução à Física do Estado Sólido. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

LARISSA, Propaganda Protetor Solar Turma da Mônica - Peixinho, 2009. (31s). Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=rIRpel5bvms>>. Acessado em: 03 de out. 2019.

MUNDIM,K. Aula 19 - Interpretação Física da Função de onda molecular. Disponível em: <<http://www.ensinoadistancia.pro.br/EaD/QQ/aula-19/aula-19.htm>>. Acessado em: 06 de out. 2019.

NERDOLOGIA, O Brasil e as mudanças climáticas. 2017.(9m42s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=eurz_TPwXlw&t=39s>. Acessado em: 03 de out. 2019.

SIMON, H. S, Solid state basics. Reino Unido: Oxford University Press, 2013.
SOUZA, Reinaldo de Melo. Aula 19.3 - Junções pn. Youtube, 12 nov, 2018. Disponível em < <https://www.youtube.com/watch?v=bIB2vXfXHKY&t=153s> >. Acessado em: 05 de jan 19

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Física IV: ótica e física moderna. 12^a ed. São Paulo: Addison Wesley, 2009.

WIKIPÉDIA, Wikipédia A enciclopédia Livre, 2019. Dopaje (semicondutores). Disponível em: < [https://es.wikipedia.org/wiki/Dopaje_\(semicondutores\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Dopaje_(semicondutores))>. Acessado em: 06 de out. 2019.

Apêndice A:

Nos tópicos seguintes iremos apresentar alguns conceitos que nos permitirão entender introdutoriamente os semicondutores, com intuito de compreender a estrutura do material de onde acontece a conversão da radiação solar em energia elétrica.

Para isso iremos tomar como ponto de partida os conteúdos geralmente trabalhados em um curso de Licenciatura em Física, nas disciplinas envolvendo Física Moderna e Química, onde é estudado o átomo de hidrogênio, a função de onda, ligações químicas e princípio de exclusão de Pauli.

I. Estrutura de Banda de Energia

Esse conceito aparece quando se busca entender os estados de energia possíveis para elétrons ficam na estrutura de um sólido. Para fins de simplificação discutiremos a situação em uma dimensão e sem condições de contorno que limitam o tamanho do material.

Para tanto, em vez de uma cadeia atômica começemos considerando apenas o caso de dois átomos de Hidrogênio. Em virtude da interação entre estes átomos, cada estado de energia de um átomo de Hidrogênio isolado se desdobra em dois estados com distintas energias. Isso se dá devido à sobreposição das funções de ondas de cada átomo de Hidrogênio isolado. O mais importante é estudarmos os níveis que advêm do nível de energia fundamental (i.e. o de menor energia) dos átomos isolados. Para a molécula de Hidrogênio apenas este nível estará ocupado. Ao somar as funções do nível fundamental é encontrado o estado ligante (Figura 1a e 1b). Se forem subtraídos é obtido o estado antiligante (Figura 2a e 2b). Sendo o primeiro caso menos energético em comparação ao segundo, pois quanto mais entre os prótons o elétron estiver, mais ele serve para “colar” os prótons (uma vez que ele atrai a ambos) e, portanto, promover a ligação química.

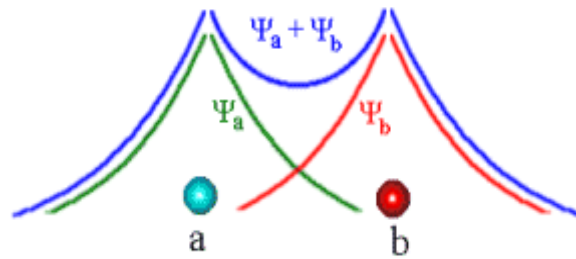


Figura 1.a - Função de onda atômica e molecular
 Fonte: Mundim, K. (2016)

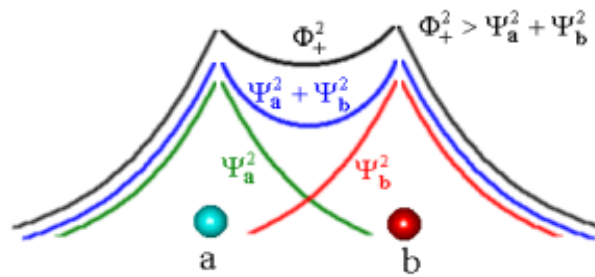


Figura 1.b - Densidade eletrônica no átomo e na molécula
 Fonte: Mundim, K. (2016)

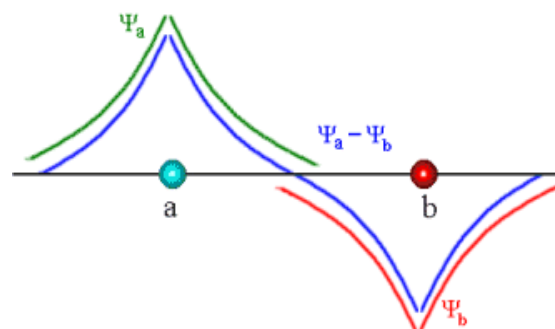


Figura 2.a - Função de onda atômica e molecular
 Fonte: Mundim, K. (2016)

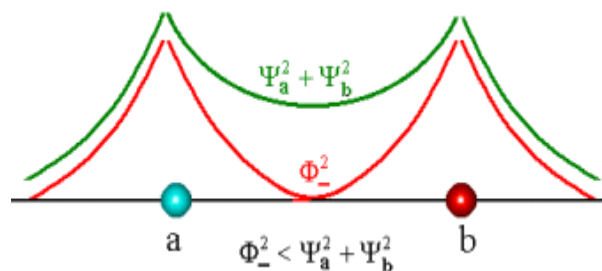


Figura 2.b - Densidade eletrônica no átomo e na molécula
 Fonte: Mundim, K. (2016)

Fazendo o mesmo com três átomos de hidrogênio, teremos a combinação de três funções de ondas. No entanto encontraremos apenas três

estados independentes, onde cada estado terá três níveis de energia diferentes.

$$\psi(x) = \pm\psi_1 \pm \psi_2 \pm \psi_3$$

1º Estado $\psi(x) = +\psi_1 + \psi_2 - \psi_3$
2º Estado $\psi(x) = +\psi_1 - \psi_2 + \psi_3$
3º Estado $\psi(x) = -\psi_1 + \psi_2 + \psi_3$

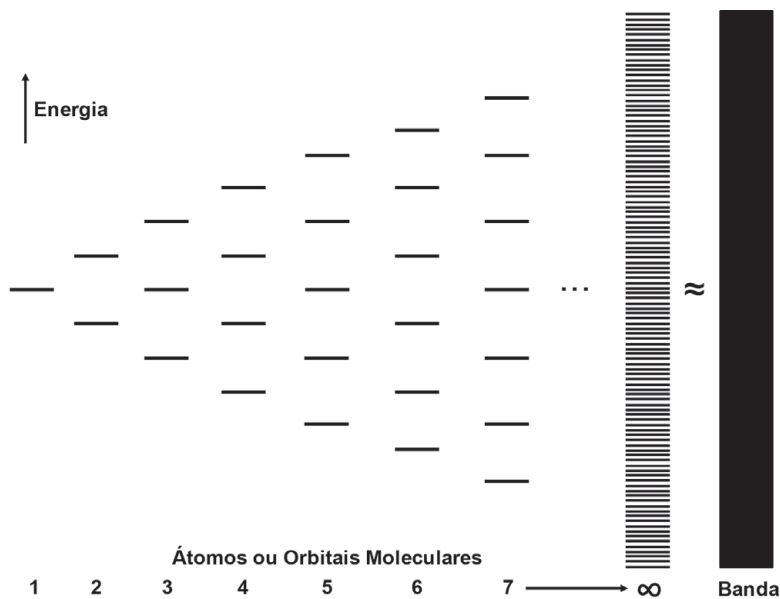
Então quando dois átomos são ligados, dão origem a dois níveis de energia para cada estado da função de onda. Quando usamos três átomos encontramos três níveis de energia para cada estado da função de onda. Se ligarmos N átomos encontraremos N níveis de energia, isso dá origem a uma Banda de Energia. Aqui é fundamental realizarmos uma discussão das ordens de grandeza envolvidas.

O que faz os níveis de energias serem distintos dos níveis originais (i.e., dos átomos isolados) é a interação entre os átomos. Assim, o máximo que os níveis na cadeia podem diferir do nível isolado é por algo da mesma ordem de grandeza do que a energia de interação envolvida. Pela lei de Coulomb e para as distâncias típicas envolvidas em um cristal (~ ångströms) vemos que o valor típico da energia eletrostática de interação é da ordem de elétron-volt (eV). Assim, a distância entre a energia máxima e a mínima advindas de um dado nível atômico deve ser desta ordem de grandeza.

Como argumentado acima, quando temos N átomos em uma cadeia cada nível de energia deve se desdobrar em N níveis energéticos. A distância entre os níveis de energia será então, na média, da ordem de eV/N. Para um número grande de átomos, a distância é tão pequena entre os níveis de energia que, para todos os efeitos, podemos dizer que cada nível discreto de energia atômico dá origem a um contínuo de energia, denominado banda de energia, conforme representado na figura 3.

Em alguns casos a banda de energia oriunda de um dado nível de energia se superpõe com a banda de energia oriunda do nível de energia seguinte. Em outros casos, há uma lacuna de energia entre uma banda e a seguinte a qual costuma ser denotada na literatura pela sua terminologia inglesa *gap*.

Figura 3 - Formação de bandas num sólido



Fonte: Baccaro e Gutz (2018)

De acordo com Baccaro e Gutz (2018):

"A diferença de energia delimitada pela sua largura é chamada de *Band Gap* (E_g). A existência da banda proibida (*Band Gap*) está condicionada à largura das bandas consecutivas e à separação energética dos tipos de orbitais envolvidos na formação de cada uma. Forças interatômicas elevadas e energias de orbitais atômicos similares geralmente induzem a sobreposição de bandas. A ocupação dos orbitais em bandas é ditada pela distribuição de Fermi-Dirac, um algoritmo estatístico sigmoideal semelhante à distribuição de Boltzmann, mas com a restrição de ocupação de apenas dois elétrons por nível." (p.326-327)

II. Condutores, Semicondutores e Isolantes

Com o conceito de Estrutura de Banda é possível diferenciar os materiais em relação a sua resposta à ação de um campo elétrico, essa distinção se baseia na estrutura de banda completa do material.

Pelo princípio da exclusão de Pauli dois elétrons não podem ocupar o mesmo estado. Nada impede, contudo, a existência de vários níveis com mesma energia. Para temperatura nula, os estados são progressivamente ocupados a partir da menor energia, até colocarmos o último elétron. Para uma temperatura não nula, os elétrons podem ser excitados para estados mais energéticos, mas a probabilidade disto ocorrer é bem pequeno para estados

distem energeticamente muito mais do que $k_B T^2$ dos estados ocupados à temperatura nula. Para temperatura ambiente, $k_B T$ vale cerca de 25 meV, um valor bem pequeno, como vimos, comparado com as larguras típicas das bandas e com a largura típica dos gaps de energia. Assim, mesmo à temperatura ambiente, é conveniente estudarmos o preenchimento das bandas para temperatura nula e considerarmos o efeito térmico como uma pequena correção.

As bandas de menor energia estarão completamente preenchidas e os elétrons que ocupam estas bandas mais internas (pois menor energia corresponde a estados que na média estão mais próximos dos átomos) são denominados elétrons de caroço, a banda ocupada pelos elétrons de valência é chamada de Banda de Valência (BV), e a seguinte e não ocupada é a Banda de Condução (BC). É o tipo da rede, de átomo e das ligações que determinam a energia de cada banda e o Gap de energia entre elas.

Para temperaturas diferentes de zero, a ocupação média de cada nível de energia é dada pela distribuição de Fermi-Dirac³, sendo um número entre 0 e 1 devido ao fato dos elétrons serem férmions e satisfazerem, portanto, ao princípio da exclusão de Pauli. Na expressão anterior μ é o potencial químico, que de acordo com Fernandes (2017) pode ser definido como:

"Se o sistema tiver um único componente (gás, líquido ou sólido puros) o potencial químico, μ , é definido como a energia livre molar, a determinada pressão e temperatura: $\mu = G/n$

Para sistemas com vários componentes, o potencial químico de cada componente define-se como a energia livre molar parcial (...) que é a taxa de variação da energia livre causada por uma variação do número de moles do componente mantendo constantes a pressão, temperatura e o número de moles das outras espécies." (p.2)

Note que com a temperatura nula todos os estados com energia abaixo de μ estão totalmente ocupados enquanto os estados acima de μ estão

² Energia térmica: onde K_B corresponde à constante de Boltzmann T corresponde à temperatura absoluta do sistema.

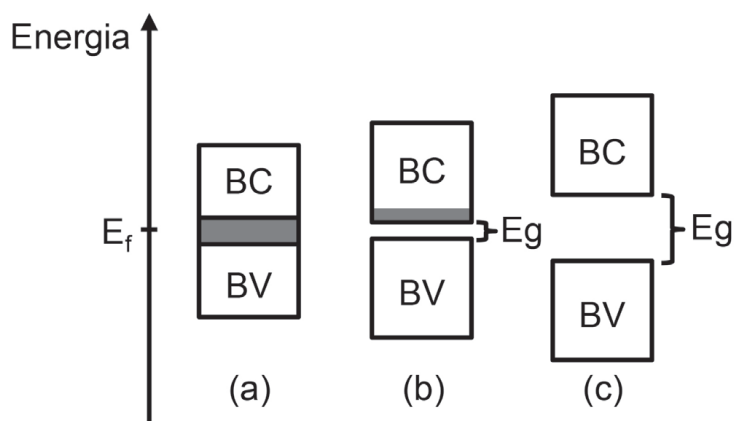
³ $f(E) = \frac{1}{1+e^{(E-\mu)/kT}}$; T representa a temperatura absoluta do sistema, k é a constante de Boltzmann, E o estado de energia e μ representa o potencial químico total dos elétrons.

desocupados, na linha do que discutimos no parágrafo anterior. Definimos o nível de Fermi (E_f) como sendo o potencial químico a temperatura zero.

"O nível de Fermi não corresponde necessariamente a um nível real, podendo se localizar no meio da banda proibida (falha) onde não há orbitais. É um parâmetro de suma importância na caracterização de materiais, pois, juntamente com a estrutura, possibilita prever seu comportamento elétrico. A banda localizada imediatamente acima do nível de Fermi é chamada de Banda de Condução (BC ou Banda Vazia), e por se constituir de orbitais de maior energia, apresenta níveis de baixa probabilidade de ocupação. A banda localizada imediatamente abaixo do nível de Fermi é chamada de Banda de Valência (BV ou Banda Cheia) e, por constituir-se de orbitais de menor energia, encontra maior probabilidade de ocupação." (Baccaro e Gutz, 2018. p.327)

Quando o material é submetido a uma diferença de potencial, o elétron somente vai adquirir energia extra (se promover) se existir níveis de energia que possam ser ocupados por ele, dentro do intervalo dado pela intensidade do potencial. Assim classificamos os materiais em condutores, semicondutores e isolantes.

No caso dos metais, que são condutores (Figura 4a), há casos na qual ocorre a superposição da BV com BC, como por exemplo, os metais da família 2A⁴, entretanto há situações onde uma banda não está totalmente preenchida. Em ambos os casos é possível que os elétrons naveguem sem nenhum problema ao receber uma pequena energia, pois, há uma banda com preenchimento incompleto, tornando o conceito de BV e BC não tão útil para os metais, como é para os isolantes e semicondutores.



⁴ Família 2A é composta pelos seguintes elementos: berílio (Be), magnésio (Mg), cálcio (Ca), estrôncio (Sr), bário (Ba) e rádio (Ra).

Figura 4 - Diagrama de bandas típica para (a) condutores eletrônicos, (b) semicondutores e (c) isolantes (nesse exemplo o nível de Fermi foi calculado na temperatura de 298,15 K)

Fonte: Baccaro e Gutz (2018)

Para os Isolantes (Figura 4c) os elétrons permanecem isolados na situação onde a BV está totalmente preenchida não há mais estado de energia para irem, logo não haverá condução. Sabemos que se submetermos uma tensão muito forte há possibilidade de rompermos a rigidez elétrica do material, fazendo-o conduzir, ou seja, damos energia suficiente para superar o Gap entre as bandas.

Agora na situação onde o Gap assume um valor razoável, da ordem de 4eV, o material é chamado de Semicondutor (Figura 4b), pois com uma excitação (térmica ou fóton) pode levar o elétron até a BC, por exemplo, no caso da luz visível a energia é em torno de 1,6 eV (vermelho) e 3,2 eV (violeta). Mesmo à temperatura ambiente já há alguma população térmica da BC. Com o aumento da temperatura ocorre um aumento na ocupação dessa banda. Assim, a condutividade dos semicondutores aumenta com a temperatura, ao contrário do que ocorre com metais. Esta é uma diferença fenomenológica macroscópica entre estes dois tipos de materiais.

Comparando o semicondutor e isolante Baccaro e Gutz (2018) conclui que o *Gap* de energia entre o fundo da BC e o nível de Fermi ($E_{BC} - E_f$) é um parâmetro determinante da condutividade de um semicondutor intrínseco ou isolante, qualquer que seja a temperatura de estudo. E ainda, esse pode ser o principal parâmetro de diferenciação, uma vez que isolantes até podem ser considerados semicondutores em temperaturas elevadas e, em zero Kelvin, todo semicondutor será um isolante.

III. Os semicondutores e suas Impurezas

Nos semicondutores quando o elétron é excitado até a BC cria-se um buraco na BV, uma ausência de elétrons, que age como se fosse uma carga positiva, criando o que é chamado de par elétron-buraco. Ao submetermos um campo elétrico no material, como a carga negativa se movimenta contra o campo e a positiva (buraco) a favor, no ponto de vista do movimento das

cargas elétricas, isso provocaria uma corrente elétrica no mesmo sentido, conforme ilustrado pela Figura 5.

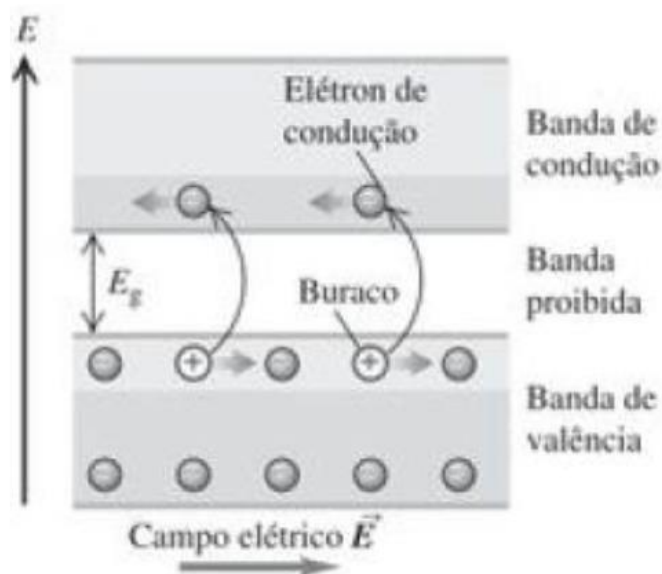


Figura 5 - Movimento do par elétron-buraco
 Fonte: Young e Freedman (2009).

Entretanto, ao analisarmos os semicondutores intrínsecos, como por exemplo, Silício (Si) e Arsenieto de gálio (GaAs), seu Gap de energia é alto em comparação energia de excitação térmica da temperatura ambiente (300K), que é por volta de 0,0257 eV (elétrons-Volts), apresentando uma baixa condutividade em temperatura ambiente, conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1 - Energia de Gap na temperatura ambiente

	MATERIAL	GAP DE ENERGIA NA TEMPERATURA DE 300K (eV)
ELEMENTOS	C (diamante)	5.47
	Ge (germânio)	0.66
	Si (Silício)	1.12
	Sn (Estanho)	0.08
COMPOSTOS DOS GRUPOS III-V	GaAs	1.42
	InAs	0.36
	InSb	0.17
	GaP	2.26
	GaN	3.36
COMPOSTOS DOS GRUPOS IV-IV	InN	0.70
	α -SiC	2.99
COMPOSTOS DOS GRUPOS II-VI	ZnO	3.35
	CdSe	1.70
	ZnS	3.68

Fonte: DoITPoMS (tradução própria) -

<https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/semiconductors/compound.php>

Com isso é necessário aumentar a condutividade desses materiais para torná-los bons condutores. A estratégia geralmente utilizada é a dopagem, que consiste na mistura de impurezas nas estruturas dos semicondutores. Por exemplo, a condutividade do silício pode ser aumentada por um fator de 10^3 ao adicionarmos Boro na sua estrutura na proporção de 1 átomo de Boro para 10^5 átomos de Silício (KITTEL, 2006). Utilizando como exemplo uma estrutura de Silício, vamos explicar o processo de dopagem.

Um átomo dessa estrutura vai ser trocado por um átomo de Fósforo (P), que tem um elétron a mais que o Silício, Figura 6.

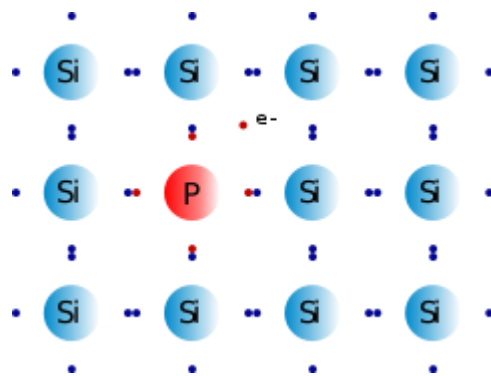


Figura 6 - Dopagem Tipo N
Fonte: Wikipédia (2019)

Também é possível fazer outro tipo de substituição, ao invés de usar Fósforo (P) ou Antimônio (Sb) que possuem um elétron a mais, pode-se utilizar Alumínio (Al) ou Boro (B) que possuem um próton e um elétron a menos que o Silício (Si), Figura 7.

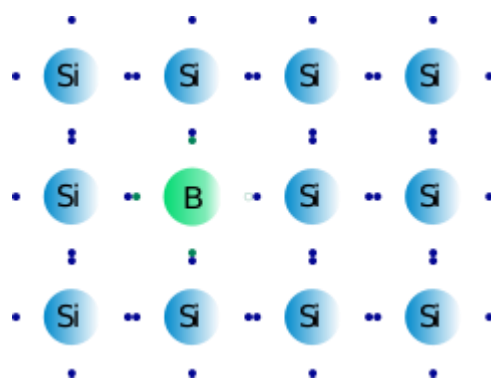


Figura 7 - Dopagem Tipo P
Fonte: Wikipédia (2019)

Com essas alterações criamos os materiais dopados em dois tipos diferentes: Tipo N, que possui excesso de elétrons e Tipo P, que está com falta de elétrons.

Conforme podemos ver na figura 6 o fósforo (devido ao seu próton adicional) representa uma região mais positiva que seus vizinhos e que então irá prender o elétron. No entanto, é possível mostrar que ele prende de uma maneira muito fraca, da ordem de décimos de eV, ao ponto do elétron estar na média a uma distância de dezenas parâmetros de rede do sítio ocupado pelo fósforo. Sendo representados na figura 8, abaixo da BC, na forma de linha pontilhada ou uma sub-banda doadora (SBD). Para um melhor aprofundamento desses conceitos é indicado capítulo 17 do livro do Steven H. Simon (2013), Solid State Basics.

Para a dopagem tipo N de acordo com Bacarro e Gutz (2018):

É importante ressaltar que os transportadores de carga majoritários aqui são os elétrons (e^-). Nos semicondutores do tipo p , a inserção de níveis aceptores de elétrons pela introdução de átomos com um elétron de valência a menos induz ao transporte de carga majoritário por lacunas [Buraco], de modo que esses níveis são representados por uma sub-banda receptora (SBA) logo acima da banda de valência (Figura 8). (p.328)

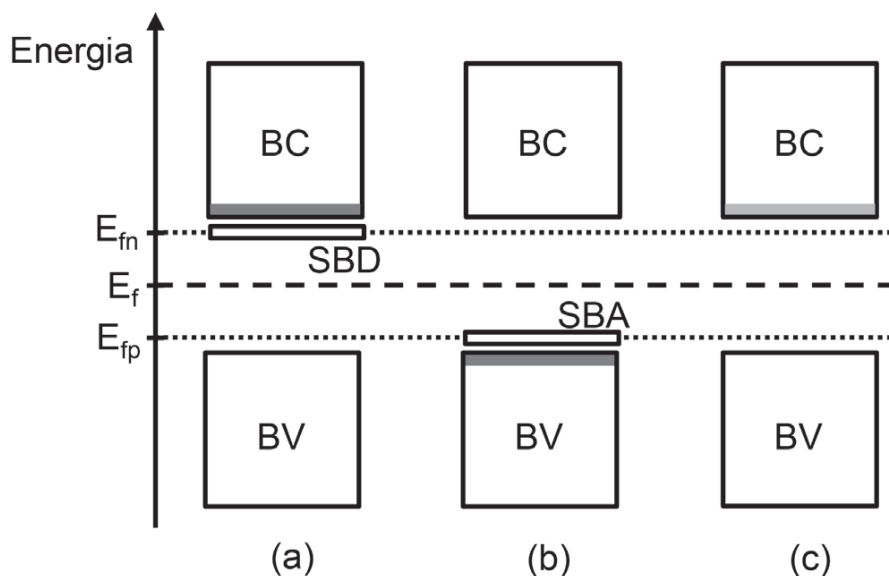


Figura 8 - Diagrama de banda em semicondutores dopados (a) tipo P (b) tipo N (c) sem dopagem

Fonte: Bacarro e Gutz (2018)

Com a criação das sub-bandas a passagem das cargas da BV para a BC necessitará de menos energia, por isso que é interessante utilizar a dopagem nesse tipo de material. Ao combinarmos dois materiais com dopagem

diferente, P e N, o transporte das cargas acontecerá mais facilmente comparado com o semicondutor intrínseco.

IV. Junção P/N e o painel fotovoltaico

Utilizando todos os conceitos trabalhados até o momento podemos explicar o funcionamento do Painel Solar Fotovoltaico. Ele é uma combinação de duas placas de semicondutores dopados, uma com dopagem Tipo N (com excesso de elétrons) e outra com dopagem tipo P (com excesso de buracos).

Essa combinação de semicondutores dopados é chamada de Junção P/N, devido à diferença de sinais, a junção gera um movimento das cargas entre as placas. Os elétrons da região Tipo N irão se fundir com os buracos da região Tipo P, eliminando alguns pares elétrons-buracos próximos da junção. Mas não serão eliminados todos os pares, pois inicialmente as placas dopadas são eletricamente neutras. Quando um elétron aniquila um buraco, a placa Tipo N fica carregada positivamente e a placa Tipo P fica carregada negativamente, quanto mais aniquilações acontecem mais carregadas as placas ficam, resultando na criação de um campo elétrico que estabiliza o movimento das cargas, conforme a representação na Figura 9.

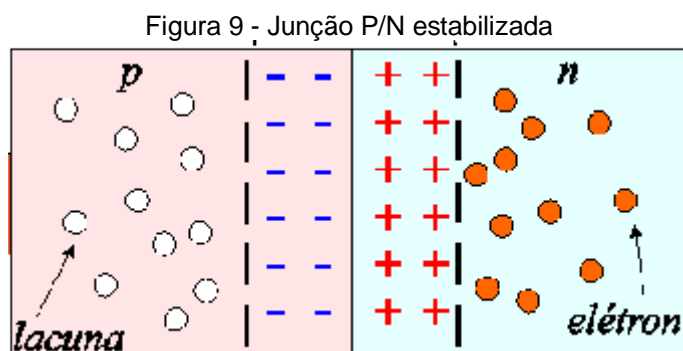


Figura 9 - Junção P/N estabilizada
Fonte: Eletrônica Sem Limites (2013)

Na região da junção aparece uma região empobrecida de cargas moveis, região chamada de Zona de Depleção (região entre as linhas pontilhadas da Figura 9). Nota-se que ainda temos regiões com elétrons e buracos nas devidas placas, no equilíbrio eles não conseguem superar o campo elétrico para se aniquilarem.

Há uma representação mais fiel do caso estacionário (Figura 10). De acordo com Souza (2018), devido à aniquilação dos pares elétrons-buracos

apareceu um campo elétrico que fez a energia da BV da placa Tipo P ficar maior que a do Tipo N porque tem uma diferença de potencial entre elas. Ainda de acordo com o autor:

"A ideia é que no equilíbrio, justamente, o que acontece é que o potencial químico da esquerda e da direita são iguais, ou seja, essa rampa tem que ter uma altura, para os potenciais químicos se igualarem, justamente a energia do Gap" (Souza,2018)

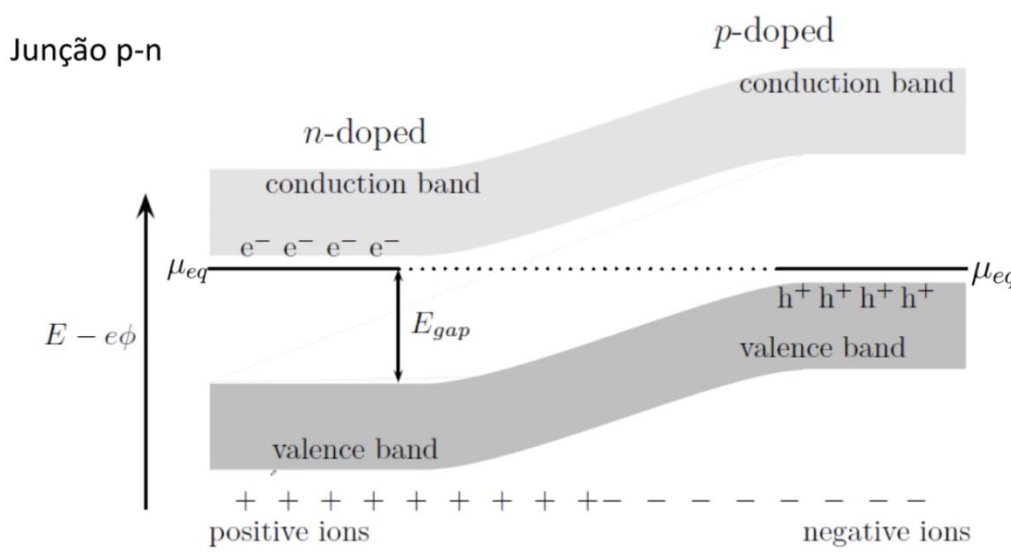


Figura 10 - Junção P/N
Fonte: Simon (2013)

Analisando o painel fotovoltaico podemos explicar como é feita a conversão da energia solar em energia elétrica. De acordo com Feldman B.J (2010) precisamos entender as três etapas.

"Primeiro, um quantum de luz (fóton) deve ser absorvido por um elétron, aumentando a energia potencial elétrica do elétron; segundo, que o elétron energético deve ser separado de seu estado inicial de energia inferior (chamado de buraco) antes que a energia potencial elétrica seja toda perdida para o calor; e terceiro, esse elétron energético deve contribuir para uma corrente através de um circuito externo." (Feldman, 2010 , tradução própria)

Ao incidir um fóton sobre o painel fotovoltaico é necessário que ele tenha energia suficiente para excitar o elétron levando-o da BV para BC. Só é vantajoso quando o elétron, que absorve o fóton, estiver dentro da Zona de Depleção, caso contrário ao ser promovido ele vai se aniquilar rapidamente.

Quando acontece dentro da Zona de Depleção (Rampa da figura 10), devido ao campo elétrico presente dentro dessa região, o elétron será acelerado para a esquerda (descendo a rampa) e o buraco para a direita (subindo a rampa) se baseando na Figura 10. Fazendo com que esse par não se recombine, provocando a corrente elétrica, explica-se assim a ideia essencial do painel fotovoltaico: absorver luz e transformar em corrente elétrica. Basta apenas ligar o painel em um circuito externo para usufruir dessa corrente gerada.