

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

JÔNATAS DOURADO CARVALHO DE SOUZA



Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
ESTADO DA ARTE DA CÉLULA FOTOVOLTAICA:  
TECNOLOGIA ATUAL E SUA PERSPECTIVA



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande  
2016





JÔNATAS DOURADO CARVALHO DE SOUZA

ESTADO DA ARTE DA CÉLULA FOTOVOLTAICA:  
TECNOLOGIA ATUAL E SUA PERSPECTIVA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Energias Renováveis

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Campina Grande  
2016

JÔNATAS DOURADO CARVALHO DE SOUZA

Estado da arte da célula fotovoltaica:

Tecnologia atual e sua perspectiva

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Energias Renováveis

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**

Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.**

Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

## AGRADECIMENTOS

Ao meu bom Deus, por me dar sabedoria, oportunidade de viver, paciência e fôlego para concluir mais essa difícil etapa em minha vida.

Dedico esta, bem como todas as minhas demais conquistas, aos meus amados pais, João de Ari e Neide, pela força, incentivo a lutar pelos meus ideais, carinho e muito amor que me deram durante toda a minha vida pessoal e acadêmica. Por sempre serem meus melhores amigos, e mesmo sem perceberem, foram meus heróis nos meus momentos mais difíceis, e com uma simples conversa ao celular me deram a força para chegar até aqui. Obrigado pela paciência, valeu a pena toda distância, Valeu a pena esperar... Hoje estamos colhendo, juntos, os frutos do nosso empenho!

Agradeço também a minha irmã Vanessa, pelo apoio e companheirismo ao longo dessa caminhada. A minha doce namorada, Maiara, por todo o carinho a mim direcionado e por me manter sempre de cabeça erguida em busca desse objetivo.

Ao meu orientador, Professor Leimar de Oliveira, pelo suporte e ensinamentos de vida. Será um dos poucos que sentirei saudade, a Universidade precisa de mais professores assim.

Por fim, agradeço aos inúmeros amigos que fiz na universidade durante esse longo caminho. Vibramos, comemoramos e choramos juntos. Mas o principal, aprendemos a superar tudo isso, torço por todos vocês! Vocês foram massa, vocês foram 10! Obrigado, de coração.

Vai Corinthians!

*“Pouco damos, quando damos o que temos,  
mas muito damos, quando damos o que somos.”*

João de Ari.

## RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo o estudo do Estado da Arte de Célula Fotovoltaica, ou seja, o estado mais avançado das tecnologias de produção das células fotovoltaicas. Ao longo do desenvolvimento deste, será apresentada uma breve introdução histórica das Células Fotovoltaicas, se estendendo a caracterização do efeito fotovoltaico e a influência da radiação solar em seu funcionamento, chegando assim às novas tecnologias de Células Fotovoltaicas, como as células sensibilizadas por corantes e células orgânicas, onde a ênfase será no estado da arte das células solares com heterojunção entre Carbono e Silício, especificamente nas Células de nano tubos de Carbono e seus atuais projetos ópticos e tecnologias empregadas, assim como suas perspectivas e sua influência no cenário da tecnologia fotovoltaica.

**Palavras-chave:** Célula, Solar, Célula Solar, Fotovoltaica, Nano Tubos, Carbono, Estado da Arte;



# ABSTRACT

This work aims to study the state of art of photovoltaic cells, ie, the most advanced stage of the production technology of photovoltaic cells. Throughout this development, a brief historical introduction of Photovoltaic Cells will be presented, extending the characterization of photovoltaic effect and the influence of solar radiation in its operation, thus reaching the new technologies of photovoltaic cells, such as cells sensitized by dyes and Cells organic, where the emphasis will be on the state of the art solar cells with heterojunction between carbon and silicon, specifically in nano cells carbon tubes and their current optical designs and technologies used, as well as its prospects and its influence in the setting of photovoltaic technology.

**Keywords:** Cell, Solar, Solar Cell, Photovoltaic, Nanotubes, Carbon, State of art

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Extrato da patente da primeira célula solar, registrada em março de 1954.....	17
Figura 2.2 - Pearson, Chapin, Fuller e sua primeira célula solar, em 1954 .....	17
Figura 2.3-órbita da terra em torno do sol, com seu eixo n-s inclinado de um angulo de 23, 5°.....	21
Figura 2.4 - Fluxo de potência global (em w/m <sup>2</sup> ). O valor da irradiância solar incidente no topo da atmosfera aqui apresentado é um fluxo médio anual recebido ao longo das 24 horas de um dia (341,3 w/m <sup>2</sup> ) no topo da atmosfera.....	22
Figura 2.5 - Espectro Eletromagnético .....	23
Figura 2.6- Espectros De Absorção .....	25
Figura 2.7 - componentes da radiação solar em uma superfície inclinada .....	26
Figura 2.8 - trajetória dos raios do sol na atmosfera.....	27
Figura 2.9 - influência do coeficiente AM na irradiação solar em nível do solo .....	27
Figura 2.10- Mapa brasileiro da irradiação solar em média anual .....	28
Figura 2.11 - media anual de insolação diária no Brasil (horas) .....	30
Figura 3.1 – Exemplo de ligação covalente para um semicondutor com quatro elétrons na camada da valência. Os elétrons dos seus vizinhos são compartilhados entre si, onde todos Formam um total de oito elétrons. ....	31
Figura 3.2 - Tamanho Da Banda Proibida Em Isolantes, Condutores E Semicondutores .....	32
Figura 3.3 - Dopagem tipo n. Rede de Silício dopada com fósforo.....	34
Figura 3.4- Dopagem tipo p. Rede de Silício dopada com boro.....	35
Figura 3.5 - Campo Elétrico Formado na Junção pn .....	36
Figura 3.6 - estrutura básica de uma célula fotovoltaica de Silício: .....	37
Figura 3.7 - Conversão De Energia Luminosa E Uma Celula De Silício ( Gtes; Cepel-Cresesbb;2004)..	38
Figura 3.8- Células de Silício monocristalino .....	40
Figura 3.9- Célula Policristalina- (a) em camada anti refexão; (b) com camada anti reflexão; (c) com AR e filamentos elétrico .....	41
Figura 3.10 - modulo Silício amorfo .....	43
Figura 3.11 –(a) Estrutura em camadas de uma célula CIS e (b) Filme fino de Disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS).....	44
Figura 3.12- Filme fino de Telureto De Cádmiio .....	44
Figura 3.13 - (a) Célula orgânica. (b) Células sensibilizadas por corantes .....	46
Figura 3.14 - Corrente elétrica em função da diferença de potencia aplicada em uma célula fotovoltaica de Silício de 156 Mm X 156 Mm, sob condições - padrão de ensaio.....	47
Figura 3.15 - Potência elétrica em função da tensão elétrica de uma célula fotovoltaica de Silício cristalino de 156 mm x 156 mm, sob condições - padrão de ensaio. Os principais parâmetros elétricos estão destacados .....	49
Figura 3.16 - Curvas I-V de duas células fotovoltaicas de Silício cristalino conectadas (a) em série e (b) em paralelo .....	50
Figura 31 – (a) Influencia da variação da irradiância solar e (b) – Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (para irradiância de 1000 W/m <sup>2</sup> , espectro Am1,5) .....	51
Figura 4.1 - Estrutura típica de uma célula com heterojunção Carbono/ Silício .....	53
Figura 4.2 – Desenvolvimento das células solares de heterojunção Carbono/Silício .....	54
Figura 4.3 – Desenvolvimento das células solares de heterojunção Carbono/Silício .....	55
Figura 4.4- Nano Tubos De Parede: (A) Simples - (B) Dupla - (C) Múltipla .....	56
Figura 4.5 - Esquema De Uma Câmara De Síntese De Nano Tubos Por Descarga Por Arco .....	58
Figura 4.6 - Esquema De Um Equipamento Utilizado No Método De Ablação Por Laser .....	58
Figura 4.7 - Esquema De Um Reator De Deposição Química Na Fase Vapor.....	59
Figura 4.8 - Ilustração Da Célula Solar NTCs/Silício e a infiltração do acido nítrico na rede de NTCs para formar a unidade Foto-Eleto-Quimica Silício-Ácido-NTC na interface. ....	60
Figura 4.9 - Esquema do funcionamento do aprisionamento de Luz, usando nano fios de Silício.....	62
Figura 4.10 - Esquema Da Reflexão E Transmissão Da Radiação No Silício.....	63
Figura 4.11 – Célula com Revestimento AR. A componente refletida (R) ao atingir o Revestimento AR é minimizada, e uma parcela maior da luz é absorvida e direcionada pelo Silício.....	64
Figura 4.12 - Ilustração Da (A) Interferência Construtiva E (B) Interferência Destrutiva Das Ondas.....	65

Figura 4.13- (a) Luz refletida tem uma mudança de $180^\circ$ em sua fase (b) Luz refletida não tem mudança em sua fase. Em ambos os caso a luz refratada não tem alteração em sua fase. ....	66
Figura 4.14 - Esquema da reflexão e refração da luz ao incidir em uma célula básica de Silício com revestimento ar, com detalhe para a formação da interferência destrutiva. ....	66
Figura 4.15 - Célula com heterojunção Carbono/Silício e seu comportamento com a camada ar. Detalhe para a camada de Carbono agindo como mais uma camada ar, e as interferências destrutivas. ....	68
Figura 4.16 - (a) Imagem óptica de uma célula NTCs/Silício com e sem revestimento com PMMA (b) Ilustração da redução de reflexão da luz com camada de PMMA. Interferência destrutiva ocorre na camada de superfície (c) Refletância da célula com e sem a camada de PMMA .....	68
Figura 4.17-(A) Ilustração e imagem microscópica de uma célula com NTC/Silício com revestimento AR de $\text{TiO}_2$ (B) Refletância da célula com e sem $\text{TiO}_2$ .....	69

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Comparação da irradiação das cidades brasileiras com as melhores regiões do mundo .....	29
Tabela 2 - Bandas Proibidas De Alguns Semicondutores .....	33

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>3G</b>	Terceira Geração
<b>ABENS</b>	Associação Brasileira de Energia Solar
<b>ABINEE</b>	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
<b>AgNW</b>	Ag nanowires – nano fios de prata
<b>AM</b>	<i>Air Mass</i> – Massa de Ar
<b>AR</b>	Antirreflexão
<b>As</b>	Arsênio
<b>a-Si</b>	Silício amorfo
<b>C</b>	Carbono
<b>CB-Solar</b>	Centro Brasileiro para Desenvolvimento de Energia Solar Fotovoltaica
<b>CIS-CIGS</b>	Disseleneto de cobre e índio (gálio)
<b>CT-ENERG</b>	Fundo Setorial de Engenharia
<b>CVD</b>	<i>Chemical Vapor Deposition</i> – Deposição de Vapor Químico
<b>Dye</b>	<i>Dye-sensitized solar cell</i> -Células sensibilizadas por corantes
<b>FF</b>	Fator de forma
<b>Gap</b>	Banda proibida
<b>Ge</b>	Germânio
<b>NTC</b>	NanoTubos de Carbono
<b>P</b>	Fósforo
<b>P&amp;D</b>	Pesquisa e Desenvolvimento
<b>PPMA</b>	Polimetil-metacrilato
<b>PV</b>	<i>Photovoltaics</i> - Fotovoltaica
<b>Se</b>	Selênio
<b>Si</b>	Silício
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Silício
<b>Te</b>	Telúrio
<b>TiO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Titânio

# LISTA DE SÍMBOLOS

$\delta$	Declinação Solar
<b>Io</b>	Constante Solar
$\lambda$	Comprimento de onda
<b>Voc</b>	Tensão de circuito aberto
$\eta$	Índice de refração

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	14
1.1	Objetivos.....	15
1.2	Estrutura Do Trabalho .....	15
2	Energia Solar Fotovoltaica .....	16
2.1	Histórico .....	16
2.1.1	Breve Histórico Da Energia Solar Fotovoltaica No Brasil.....	19
2.2	Recurso Solar.....	20
2.2.1	Radiação Solar .....	20
2.2.2	Radiação Solar Sobre A Terra.....	22
2.2.3	Situação Da Radiação Solar No Brasil.....	28
3	Tecnologia Fotovoltaica .....	31
3.1	Efeito Fotovoltaico .....	31
3.2	Célula Fotovoltaica.....	38
3.2.1	Primeira Geração – Silício Cristalino.....	39
3.2.1.1	Células De Silício Monocristalino .....	39
3.2.2	Segunda Geração: Filmes Finos.....	42
3.2.2.1	O Silício Amorfo (a-Si).....	42
3.2.2.2	Disseleneto De Cobre E Índio/Galio (Cis-Cigs).....	43
3.2.2.3	Telureto De Cádmio (Cdte).....	44
3.2.3	Terceira Geração (3G): Materiais Orgânicos E Nano Estruturados .....	45
3.3	Características Elétricas Das Células Fotovoltaicas.....	47
3.3.1	Curva Tensão X Corrente (I-V) .....	47
3.3.2	Associação de células fotovoltaicas .....	49
3.3.3	Efeito Dos Parâmetros Externos .....	50
4	O Estado Da Arte das células solares com Heterojunção Carbono/Silício .....	52
4.1	Introdução.....	52
4.2	Heterojunção Carbono/Silício.....	53
4.3	Heterojunção Nano tubos de Carbono/Silício.....	54
4.3.1	Preparação dos NTCs de parede simples .....	56
4.3.1.1	Descarga por arco elétrico.....	57
4.3.1.2	Ablação a laser .....	58
4.3.1.3	Deposição química a vapor .....	59
4.4	Dopagem Química Dos Nano Tubos De Carbono .....	59
4.5	Revestimento antirreflexo (AR).....	61
4.6	Desafios e perspectivas.....	69
4.6.1	Área Ativa e estabilidade Das Células Solares.....	70
4.6.2	Perspectiva.....	71
5	Conclusão.....	73
	Referências.....	74

# 1 INTRODUÇÃO

No início do século XXI, em alguns meses dos anos de 2001 e 2002, o Brasil enfrentou a maior crise de energia da história. Fenômeno que ficou conhecido por: “Crise do Apagão”. Uma vez que a maior parte da energia no país é gerada por hidrelétricas, a ausência de investimentos no transporte e na distribuição de energia foram causas cruciais para o ocorrido, apresentando assim um cenário preocupante para os próximos anos.

Na busca de soluções para o problema, o Brasil teve que superar problemas ambientais como a diminuição das reservas de combustíveis fósseis, assim como lidar com o crescimento do consumo energético causado pelo aumento da atividade econômica, o que fez com que a busca por fontes alternativas de energias renováveis e não poluentes alcançasse um patamar de maior importância para o desenvolvimento e complemento do setor elétrico do país.

Uma das fontes de energia renovável que atualmente chama atenção por suas características é a Energia Solar Fotovoltaica, onde sua principal matéria prima é a luz do sol (não escassa) e que pode ser usada em residências, comércios e indústrias. Essa energia é obtida através da conversão da luz solar em eletricidade (efeito Fotovoltaico), processo relatado em 1839 pelo físico Francês Edmond Becquerel, e que foi a base para os estudos que deram origem as células fotovoltaicas (ou células solares), estruturas semicondutoras à base de Silício que, ao serem expostas a incidência de luz, surgem em suas extremidades uma diferença de potencial elétrico.

Apesar de o Brasil estar localizado na sua maior parte na região intertropical e apresentar uma radiação solar média acima de 2500 horas/ano (Nascimento, 2004), o que beneficiam a sua implementação, aspectos técnicos e econômicos como investimentos iniciais, instalação e eficiências das células fotovoltaicas, ainda inviabilizam sua utilização em maior escala. As células fotovoltaicas mais difundidas no mercado em relação a sua eficiência são as de Silício monocristalino, com eficiência superior a 12%. Contudo, a energia fotovoltaica tem sido vista internacionalmente como uma tecnologia bastante promissora e estudos em relação à melhora das células continua em andamento, contribuindo com ganhos na escala de produção, redução de



custos e surgimento de novos tipos de células, com maior eficiência, o que em muita melhora sua competitividade e sua expansão no mercado.

Diante dessa busca por novos materiais e tecnologias para o avanço das células solares, destacam-se os nano materiais de Carbono, especificamente os nano tubos de Carbono, que vem ganhando espaço em laboratórios de pesquisa pela formação de uma célula solar com o Silício, apresentando resultados animadores e se validando como uma das células da nova geração mais promissoras.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho de conclusão de curso tem como foco o estudo do estado da arte da célula fotovoltaica, ou seja, o estado atual das tecnologias de produção das células fotovoltaicas, dando destaque a uma das novas tecnologias mais promissoras, as Células Solares de Heterojunção Carbono/Silício, com ênfase nas células usando nano tubos de Carbono (NTC), abordando seus avanços e melhorias para a tecnologia fotovoltaica, assim como suas perspectivas.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco Capítulos. O Primeiro destina-se a introdução, onde é apresentada a energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de energia e sua contextualização com o cenário socioeconômico do Brasil. No Capítulo 2 constará a caracterização do efeito fotovoltaico, apresentando um breve histórico da utilização da energia solar fotovoltaica, além de alguns conceitos sobre a radiação solar com ênfase no território brasileiro. No Capítulo 3, a abordagem será na revisão bibliográfica da célula fotovoltaica, contendo também o histórico de sua tecnologia, além de seu funcionamento na conversão de energia elétrica, materiais usados na fabricação, tipos de células, eficiências e características em relação ao aproveitamento da radiação solar. O tema principal desse trabalho estará no Capítulo 4, e o foco será no estado da arte das células solares com heterojunção Carbono/Silício, especificamente das células de nano tubo de Carbono (NTC), assim como melhorias na tecnologia dessas células, desde sua fabricação até seus novos projetos ópticos. Por fim, o Capítulo 5 é conclusivo e apresenta os aspectos mais relevantes e principais conclusões extraídas desse trabalho.

## 2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Energia Solar Fotovoltaica é o nome dado à energia elétrica produzida através da conversão direta da radiação eletromagnética solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico, que ocorre na célula fotovoltaica, a unidade fundamental desse processo, constituída por materiais semicondutores – normalmente o Silício – ao qual são adicionadas substâncias dopantes a fim de criar um meio adequado ao estabelecimento do efeito fotovoltaico.

### 2.1 HISTÓRICO

O efeito fotoelétrico foi observado pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel em 1839. Becquerel, enquanto conduzia experimentos eletroquímicos, observou que placas metálicas de platina ou prata, ao serem mergulhadas em um eletrólito, quando expostas a luz, produziam uma pequena diferença de potencial.

Anos mais tarde, em 1877, utilizando as propriedades foto condutoras do selênio, foi desenvolvido o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade por exposição à luz, pelos inventores americanos W. G. Adams e seu aluno Richard E. Day, com baixa eficiência de conversão, da ordem de 0,5%, que encontraram sua primeira aplicação no final do século XIX pelo engenheiro Werner Siemens (fundador do império com seu nome) que os comercializou como fotômetros para máquinas de fotografias.

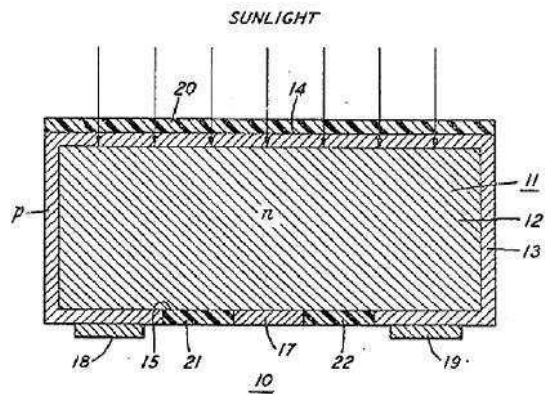
A energia fotovoltaica só deu um novo passo na primeira metade do século XX, com os grandes desenvolvimentos científicos, como a explicação do efeito fotoelétrico por Albert Einstein em 1905, assim como o advento da mecânica quântica e, em particular, a teoria de bandas e a física dos semicondutores, assim como as técnicas de purificação e dopagem associadas ao desenvolvimento do transistor de Silício.

Somente em 25 de Abril de 1954, a primeira célula solar foi apresentada na reunião anual da *National Academy of Sciences*, em Washington produzida pelo engenheiro Daryl Chapin, o químico Calvin Fuller e o físico Gerald Pearson, que tiveram seus resultados publicados e registraram a patente, mostrada na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Extrato da patente da primeira célula solar, registrada em março de 1954

Feb. 5, 1957  
 D. M. CHAPIN ET AL  
 2,780,765  
 SOLAR ENERGY CONVERTING APPARATUS  
 Filed March 5, 1954

FIG. 1



Fonte: Pearson, 1957 *apud* Vallêra, 2006.

A primeira aplicação da célula solar produzida por Chapin, Fuller e Pearson (Figura 2.2) foi à alimentação de uma rede telefônica local, em Americus, no Estado da Georgia, usando um painel, com nove células com 30 mm de diâmetro, montado em outubro de 1955 e removido em Março de 1956, com resultados considerados promissores. (Vallêra, 2006)

Figura 2.2 - Pearson, Chapin, Fuller e sua primeira célula solar, em 1954



Fonte: Pearson, 1957 *apud* Vallêra, 2006.

Logo ficou notório que o alto custo das células era um forte fator limitante para sua aplicação, só sendo economicamente competitiva em situações especiais, como no caso do satélite *Vanguard I*, que após muita relutância da NASA foi o primeiro a usar células solares, lançado em Março de 1958. O pequeno painel usado no satélite, com cerca de 100cm<sup>2</sup>, que produzia cerca de 0,1 W, manteve o transmissor de 5 mW em funcionamento após a falha da pilha química que o alimentava, durante oito anos, mostrando uma alta durabilidade, fiabilidade e baixo peso. Desse dia até os dias atuais, células solares foram adotadas como fonte de energia para os satélites.

Com a “corrida espacial” que acontecia na Guerra Fria, a necessidade de desenvolvimento de células solares cada vez mais eficientes para o uso em satélites impulsionou os avanços tecnológicos que possibilitaram as primeiras aplicações terrestres. As aplicações, por conta do custo, eram específicas, como sistemas de telecomunicações remotos e boias de navegação. Em 1973 a chamada “crise petrolífera”, que quadruplicou o preço do petróleo, levou a mais um súbito investimento em programas para reduzir o custo das células solares, e algumas tecnologias revolucionaram as ideias sobre o processamento das células solares, com a utilização de novos materiais, com células de Silício monocristalino ultrapassando a barreira de 20% de eficiência em ensaios de laboratório.

A alta queima de combustíveis fósseis nos anos 80 e 90 e conseqüentemente a consciência crescente da ameaça das alterações climáticas foram os novos motivadores de novos investimentos e financiamentos em células solares. Em 1982, foi instalada a primeira central solar de grande envergadura (1 MWp) na Califórnia, e o lançamento dos programas “telhados solares” na Alemanha (1990) e Japão (1993).

Contudo, os avanços das células solares não pararam, em 1998 a produção mundial de células fotovoltaicas atingiu a marca de 150 MWp, resultado do rápido aumento da produção chinesa, que em 2009 já ocupava a liderança na fabricação de módulos. Com os incentivos concedidos para a instalação de sistemas fotovoltaicos em países desenvolvidos, a evolução mundial de produção de células fotovoltaicas chegou em 2012, a cerca de 36,2 GWp, que equivale a mais de duas vezes e meia a potencia da usina hidrelétrica de Itaipu, a maior do Brasil.

### 2.1.1 BREVE HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Apesar de o Brasil ter um grande potencial para a energia solar fotovoltaica no que se diz respeito à irradiação solar e matéria prima para o Silício (principal material usado na confecção das células fotovoltaicas), o avanço dessa tecnologia ainda esta em fase de crescimento, com algumas dificuldades.

Nos anos 50, teve-se o inicio do desenvolvimento de módulos fotovoltaicos no Instituto Nacional de Tecnologia (INT) e no centro Tecnológico da Aeronáutica (CTA) - hoje Centro Técnico Aeroespacial, sendo realizado o primeiro Simpósio Brasileiro de Energia Solar em 1958. Em 1970, no Instituto Militar de Engenharia (IME) começou-se com colaboração internacional o desenvolvimento de tecnologias de filmes finos.

A produção de maior destaque foi a de um módulo fotovoltaico de 30 x 30 cm com 5% de eficiência. Como o desenvolvimento tecnológico do Brasil no setor de energia solar fotovoltaica nos anos 70 coincidia com a época da “crise do petróleo”, o Brasil nessa época tinha suas pesquisas equiparadas aos países de vanguarda do mundo. Porém nos anos 80, devido a falta de incentivos, muitos grupos de pesquisas se direcionaram para outras áreas e as fabricas reduziram a sua produção ao ponto de serem extintas. (Pinho e Galdino, 2014)

Em 1978 foi criada a Associação Brasileira de Energia Solar (ABENS) e no inicio dos anos 90, foram desenvolvidas células solares de Silício cristalino para serem testadas no primeiro satélite brasileiro. Porém, ainda na década de 90, o Brasil estava com a difusão da tecnologia fotovoltaica defasada em relação à Alemanha, Japão e outros países que tinham suas aplicações associadas ao uso de energia solar em residências e os incentivos eram direcionados ao desenvolvimento tecnológico e industrial.

No inicio do século XXI o Brasil se encontrava em uma situação que não conseguia acompanhar a evolução industrial na fabricação de células fotovoltaicas e no numero de sistemas fotovoltaicos interligados a rede elétrica, mesmo assim, em 2001 uma iniciativa do Governo Federal, caracterizada pela criação do Fundo Setorial de Engenharia (CT-ENERG), resultou em um crescimento das atividades de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) em energia solar e na formação de grupos de pesquisas e programa de pós-graduação, nesse contexto foi criado o Centro Brasileiro para Desenvolvimento de Energia Solar Fotovoltaica (CB-Solar).

Atualmente, no Brasil, apesar de todos os esforços no desenvolvimento da tecnologia dos centros de pesquisa e empresas, assim como especialistas em universidades públicas e privadas, o país ainda não atingiu o nível de aperfeiçoamento dos países desenvolvidos nessa área e, portanto, esforços ainda precisam ser direcionados por todos os atuantes nesse setor.

O Brasil tem uma capacidade de sistemas fotovoltaicos instalados, incluindo sistemas isolados e conectados a rede, na ordem de 30 a 40 MWp (Abinee,2012). Apesar disso o país ainda não apresenta atratividade para indústrias de módulos fotovoltaicos, que precisam de um mercado anual da ordem de centenas de MWp. Sem políticas públicas e incentivo, estima-se um tímido crescimento de alguns megawatts ao ano no mercado fotovoltaico brasileiro.

Segunda a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (Abinee), em seu relatório publicado em 2012, devido ao custo de geração do sistema fotovoltaico não competitivo, o alto investimento para instalações residências, falta de políticas específicas de financiamentos e de modelos de comercialização, são fatores que manterão lento o crescimento da demanda nacional, sem falar no pouco conhecimento sobre essa fonte de energia alternativa por parte da população consumidora.

## 2.2 RECURSO SOLAR

O sol fornece energia na forma de radiação, que é à base de toda a vida terrestre, e a principal fonte de energia da Terra.

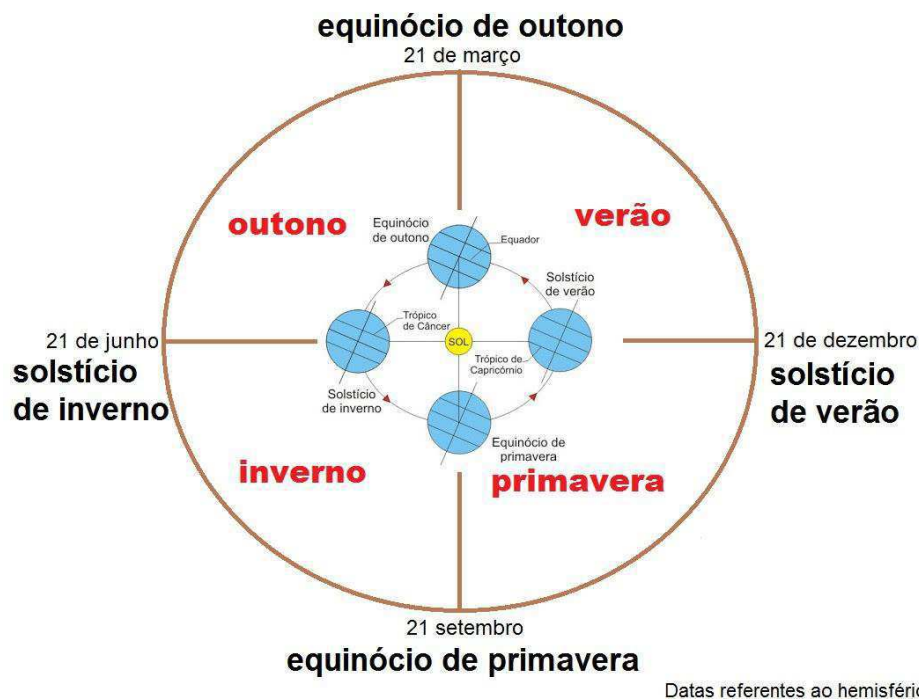
Apesar da grande distância existente entre a o Sol e a Terra, a atmosfera recebe anualmente  $1,5 \times 10^{18}$  KWh de energia (Greenpro, 2004), um valor considerável que se mostra com um grande potencial para utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia, como por exemplo a elétrica, já que se caracteriza como uma fonte inesgotável de energia.

### 2.2.1 RADIAÇÃO SOLAR

O planeta Terra, e seu movimento anual em torno do sol, descreve em trajetória elíptica um plano com uma pequena excentricidade com um ângulo de aproximadamente 23,45 graus entre o plano normal à elipse e seu eixo. Essa inclinação

junto com o movimento de translação é a responsável pelas estações do ano. A posição angular do sol, ao meio dia, em relação ao horizonte é chamada de Declinação Solar ( $\delta$ ) e varia de acordo com o dia do ano, entre os limites  $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ . A órbita da terra esta ilustrada na Figura 2.3.

Figura 2.3-Órbita da terra em torno do sol, com seu eixo n-s inclinado de um angulo de  $23,5^\circ$ .



Fonte: Disponível em :<[http://aprenderhistorianaescola.blogspot.com.br/2012\\_12\\_01\\_archive.html](http://aprenderhistorianaescola.blogspot.com.br/2012_12_01_archive.html)> .  
Acesso em: 25 De Março De 2016.

Na Figura 2.3 pode-se observar a influencia da inclinação da Terra na duração dos dias, assim como nas estações do ano. Em localidades do hemisfério Sul, os dias são mais longos no solstício de verão e dias mais curtos no solstício de inverno. No Equador terrestre a duração dos dias durante todo o ano é a mesma, o que implica em uma radiação solar constante durante todo o ano. É possível também observar que nos equinócios, as durações dos dias são as mesmas pra qualquer localidade.

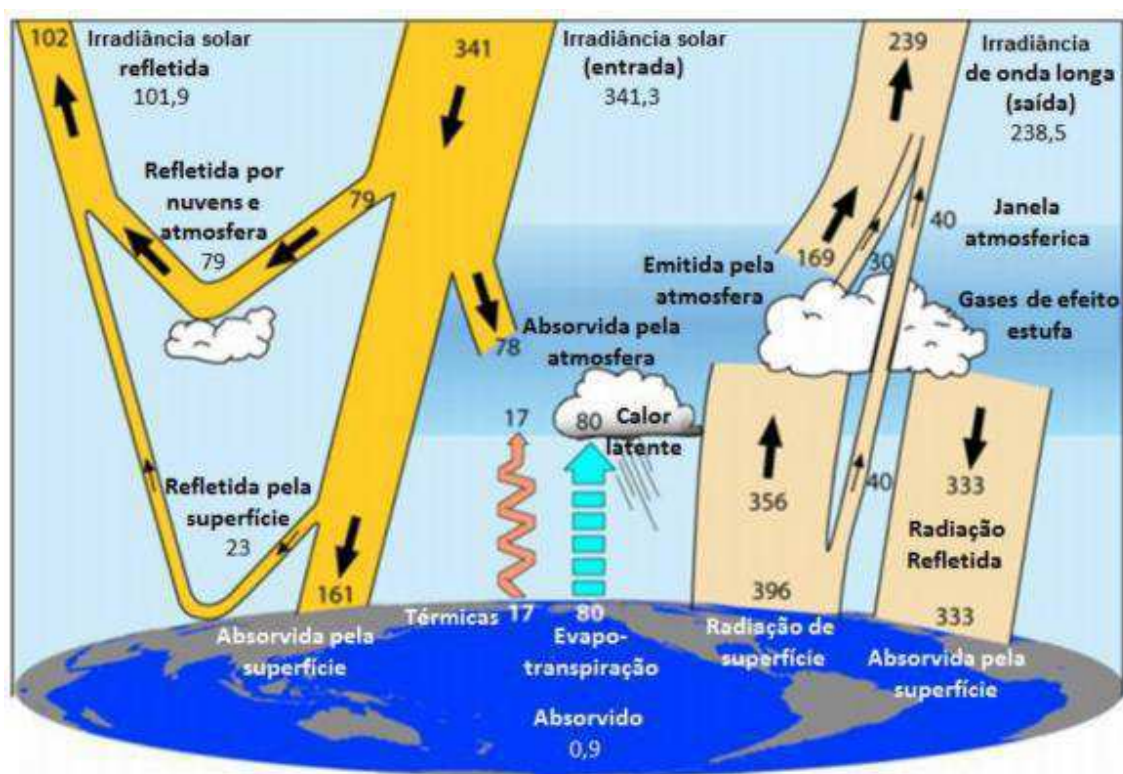
A irradiância solar que atinge a Terra, no topo da camada atmosférica, é denominada irradiância extraterrestre. Por definição, o valor da irradiância extraterrestre que chega sobre a superfície perpendicular aos raios solares, é chamado de Constante Solar ( $I_0$ ), e tem o valor aproximado de  $1.367 \text{ W/m}^2$  (adotado pela WRC - *World Radiation Center*).

## 2.2.2 RADIAÇÃO SOLAR SOBRE A TERRA

De acordo com o valor de  $1.367 \text{ W/m}^2$  da “constante solar”, que é a irradiância solar incidente sobre a área projetada da Terra, e o valor raio médio da Terra de  $6.371 \text{ Km}$ , pode-se concluir que a potência total disponibilizada pelo Sol à Terra, no topo da atmosfera é de aproximadamente  $174 \times 10^3 \text{ TW}$  (terawatts). (Pinho e Galdino,2014).

Observações feitas periodicamente no espaço permitiram análises mais qualitativas dos fluxos de energia da Terra, com base em medições de março de 2000 a novembro de 2005, Trenberth *et al.*, (2009) atualizaram o diagrama de fluxo de potencia global, como pode ser visto na Figura 2.4, onde o fluxo médio anual da irradiância solar incidente no topo da atmosfera ao longo de um dia é de  $341,3 \text{ w/m}^2$ .

Figura 2,4 - Fluxo de potência global (em  $\text{w/m}^2$ ). O valor da irradiância solar incidente no topo da atmosfera aqui apresentado é um fluxo médio anual recebido ao longo das 24 horas de um dia ( $341,3 \text{ w/m}^2$ ) no topo da atmosfera



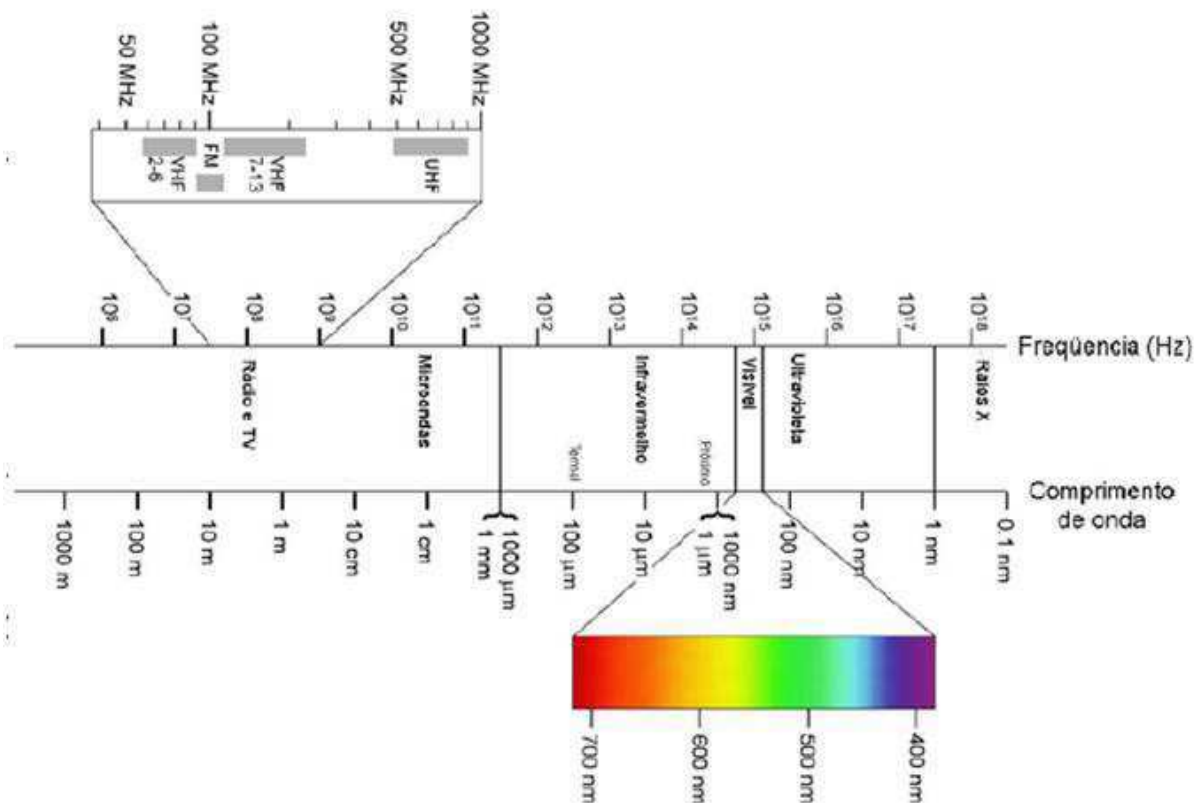
Fonte: Modificado de Trenberth *et al.* 2009.

De acordo com o diagrama da Figura 2.4, 54% da irradiância solar que incide no topo da atmosfera, ao chegar à superfície terrestre, 7% é refletida e 47% é absorvida (os outros 46% são absorvidos ou refletidos pela atmosfera). Assim, cerca de  $94 \times 10^3 \text{ TW}$  de toda a potência solar chegam efetivamente à superfície.



Pode-se dizer que o sol emite energia, em praticamente todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético, como pode ser visto pela Figura 2.5.

Figura 2.5 - Espectro Eletromagnético



Disponível em: <a href="http://www.solar.unifei.edu.br/pdf/EAM10\_CAP2.pdf">http://www.solar.unifei.edu.br/pdf/EAM10\_CAP2.pdf</a> . Acesso em: 25 De Março De 2016

De toda energia emitida, 44% se concentra entre 400 e 700 nm, que é denominada como a faixa de espectro visível. O restante é dividido entre radiação ultravioleta (<math>< 400\text{ nm}</math>) com 7%, infravermelho próximo de 37% (entre 700 e 1500 nm) e 11% de infravermelho (<math>> 1500\text{ nm}</math>). Micro-ondas e ondas de rádio, (que se situam acima da região de infravermelho), raios X e raios  $\gamma$  (que se situam abaixo da região ultravioleta), compõem menos de 1%.

Quando a radiação solar que atinge o topo da atmosfera e viaja até a superfície, sofre atenuações devido à interação com elementos que compõem a atmosfera, e uma fração do fluxo incidente sofre uma atenuação por meio da absorção ou do espalhamento da radiação ao interagir com moléculas, gases, nuvens, etc., e também com os elementos que estão na superfície. A absorção se dá pela parte do fluxo incidente que incorpora o meio atravessado, causando um aumento da energia interna do mesmo (por esse motivo, existe o aquecimento das camadas atmosféricas). Os

corpos que absorvem essa parcela emitem parte da mesma em diferentes comprimentos de onda. O espalhamento é a parte do fluxo incidente que ao entrar em contato com um meio é re-irradiada em diferentes direções do espaço, inclusive a própria superfície. Parte da radiação não sofre nenhuma interação e é inteiramente transmitida normalmente através do volume de matéria.

Assim, em um caso típico da radiação solar atravessando a atmosfera, a radiação em um determinado alvo terá a seguinte relação:

$$\text{Radiação alvo} = \text{Radiação incidente} - \text{Radiação espalhada por corpo qualquer} - \text{Radiação absorvida por corpo qualquer} + \text{Radiação emitida por corpo qualquer} + \text{Radiação recebida de espalhamentos.}$$

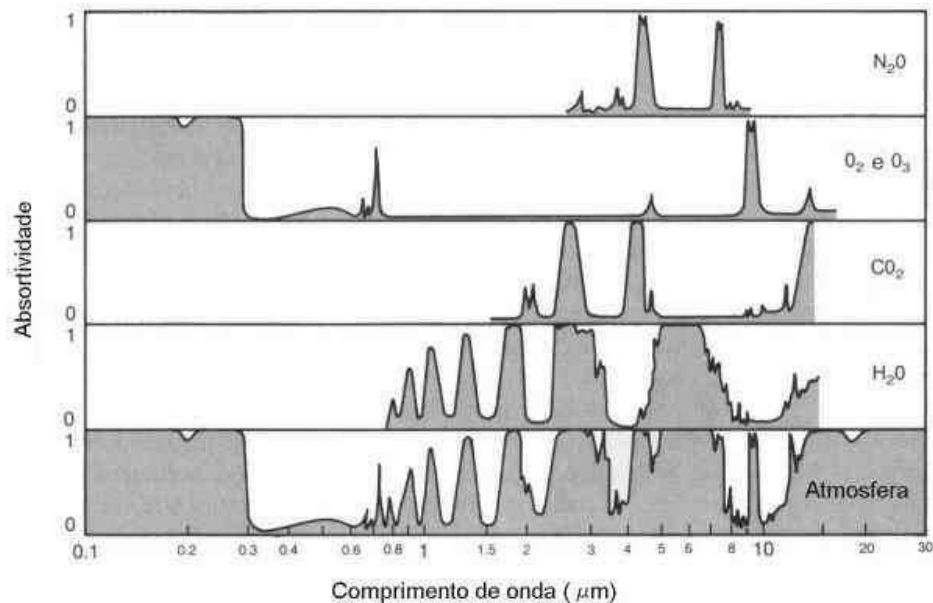
A característica do espalhamento depende do tipo comprimento de onda e a natureza do agente que realiza tal fenômeno. Quando o espalhamento acontece pela interação com partículas muito pequenas, onde o raio da partícula é muitas vezes menor que o comprimento de onda ( $\lambda$ ) da radiação ( $r \ll \lambda$ ), como moléculas e micro partículas atmosféricas, o fenômeno é chamado de *Espalhamento de Rayleigh* ou espalhamento molecular, que tem a intensidade do espalhamento inversamente proporcional á quarta potência do comprimento de onda, relação responsável pela coloração azul do céu. No caso de partículas maiores, como aerossóis e gotas em nuvens, o espalhamento recebe o nome de *Espalhamento Mie*.

Os principais gases absorvedores no espectro solar são o vapor d'água, oxigênio, ozônio, nitrogênio, gás carbônico, além das espécies monoatômicas do oxigênio e nitrogênio.

De acordo com a Figura 2.6, onde são apresentados os espectros de absorção, pode-se observar algumas propriedades da atmosfera em relação aos comprimentos de ondas absorvidos. Abaixo de 0,3  $\mu\text{m}$  a radiação é completamente absorvida pelo oxigênio e ozônio na estratosfera, logo podemos considerar que a atmosfera é como opaca nesse intervalo espectral, ou seja, as ondas nesse intervalo não chegaram a superfície terrestre. Entre 0,3 e 0,8  $\mu\text{m}$ , que inclui a região visível e o final do espectro Ultravioleta, a atmosfera pode ser considerada transparente, permitindo que quase toda a radiação nessa faixa chegue até a superfície. O gás carbônico e o vapor d'água absorvem fortemente a região infravermelha, e uma grande região transparente pode ser vista também entre 8 e 12  $\mu\text{m}$ , com exceção a banda 9,6  $\mu\text{m}$  que o ozônio absorve fortemente. Essa região transparente é chamada de *Janela Atmosférica*. Após a radiação

ser re-irradiada na superfície terrestre e ter sua forma de onda modificada, parte do fluxo irradiado é absorvido pelos gases na “saída” da radiação do planeta, o que explica o efeito estufa.

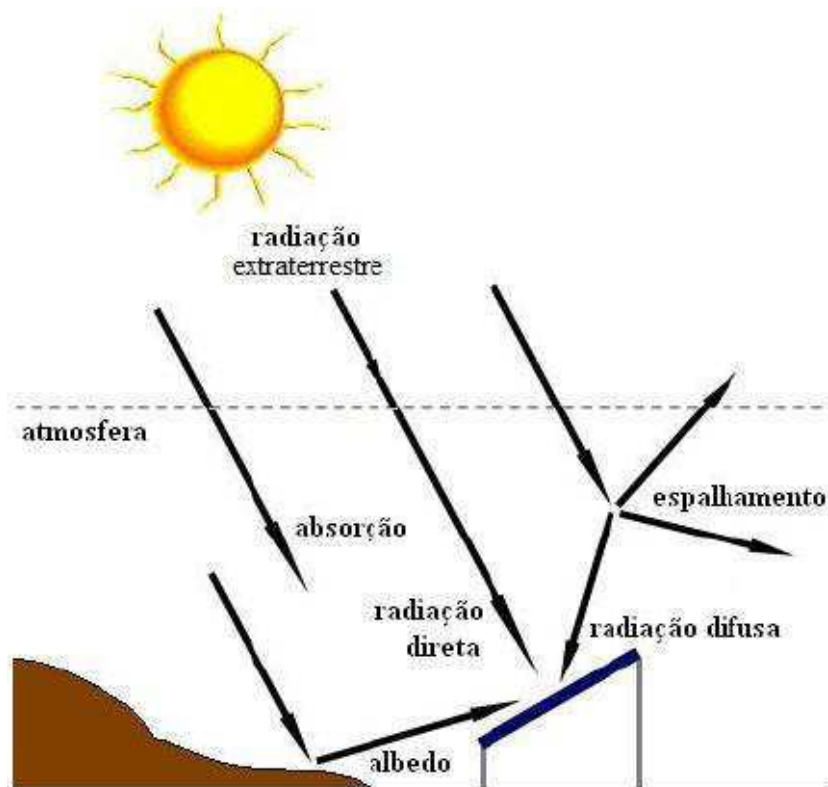
Figura 2.6- Espectros De Absorção



Fonte: Disponível em: < <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-7.html> > . Acesso em: 25 De Março De 2016

Em relação a radiação solar que chega a superfície terrestre e incide sobre uma superfície receptora para geração de energia, temos duas componentes, a direta e uma difusa. A radiação direta é a que vem diretamente do Sol, sem nenhum desvio, já a difusa é aquela que chega até a superfície via espalhamento do fluxo pela atmosfera terrestre. Em dias de muito sol, por exemplo, 20% da radiação que atinge a superfície é difusa, chegando a 100% em dias nublados. No caso de superfícies inclinadas com relação a horizontal, pode-se adicionar uma terceira componente, que é a reflexão do ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, etc.). A soma de todas as componentes que incidem na superfície é chamada de *radiação global*, e pode ser observada na Figura 2.7.

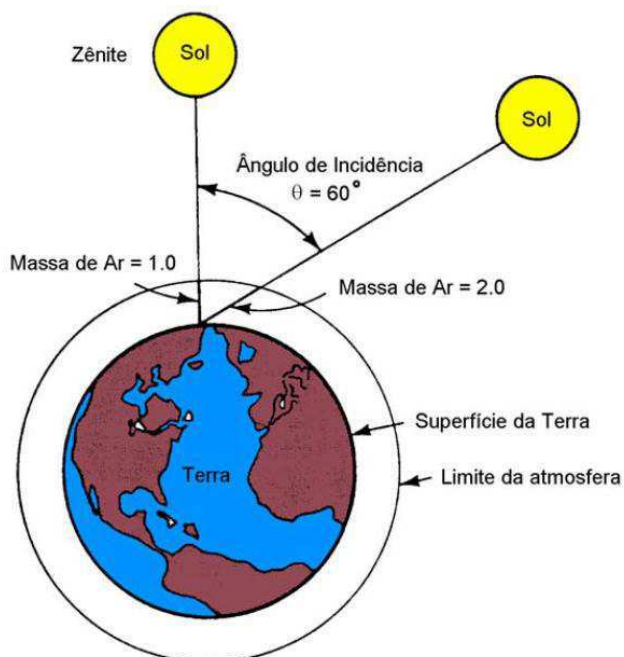
Figura 2.7 - Componentes da radiação solar em uma superfície inclinada.



Fonte: Morais e Barbosa, 2015

Como parte da radiação solar é absorvida ao atravessar a atmosfera e também é refletida pelas nuvens, a radiação que chega ao nível do mar é menor que a radiação acima da atmosfera. O percurso que a radiação toma, através da atmosfera até a superfície, dá-se o nome de massa de ar (*Air Mass* – AM). À ausência de atenuação atmosférica ou modificação na irradiância solar dá-se o nome de massa e ar zero (AM 0), e é aquela que se considera para aplicações espaciais. AM 1 corresponde ao percurso perpendicular à superfície terrestre, e a massa de ar AM 1.5 é considerada para o espectro de referência para o teste de módulo fotovoltaicos para aplicações terrestres, e corresponde à distribuição espectral da irradiância que chega a uma superfície inclinada a  $37^\circ$  para a sul, com ângulo de zênite de  $48.19^\circ$ , como é mostrado na 2.8.

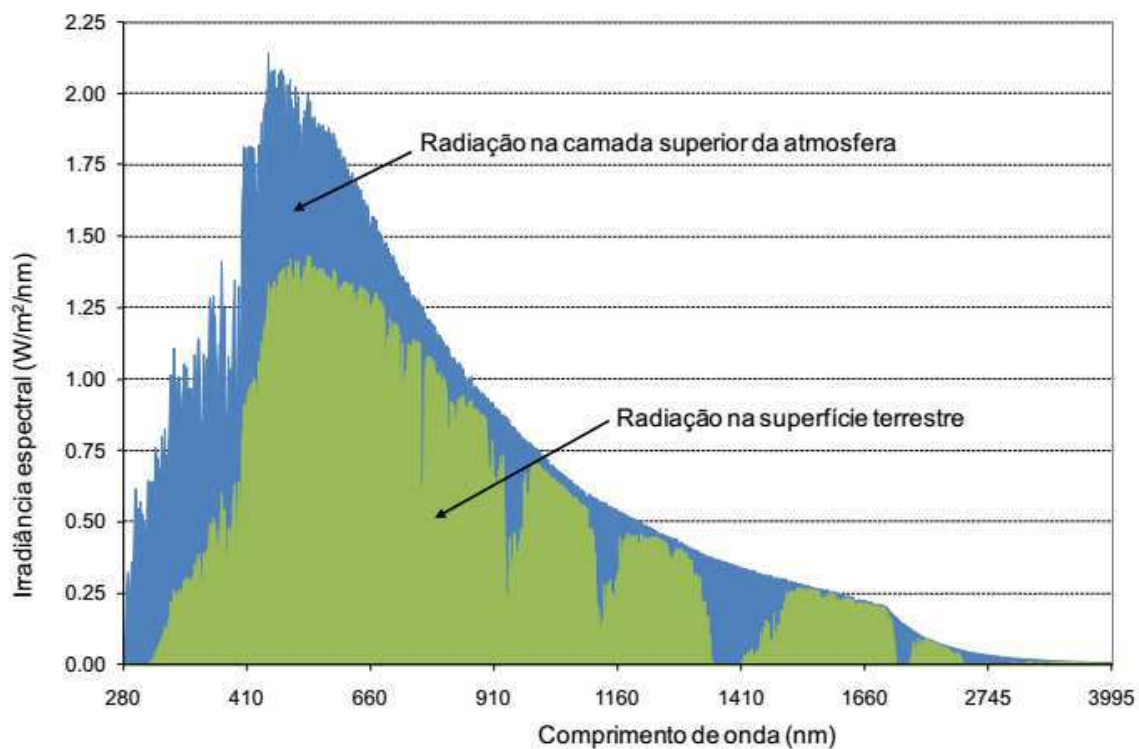
Figura 2.8 - Trajetória dos raios do sol na atmosfera



Fonte: Disponível em: <[http://cresesb.cepel.br/images/tutorial\\_solar/Image39.gif](http://cresesb.cepel.br/images/tutorial_solar/Image39.gif)> . Acesso em: 25 De Março De 2016

A Figura 2.9 a seguir mostra a influência do coeficiente AM na irradiação solar em nível do solo.

Figura 2.9 - Influência do coeficiente AM na irradiação solar em nível do solo



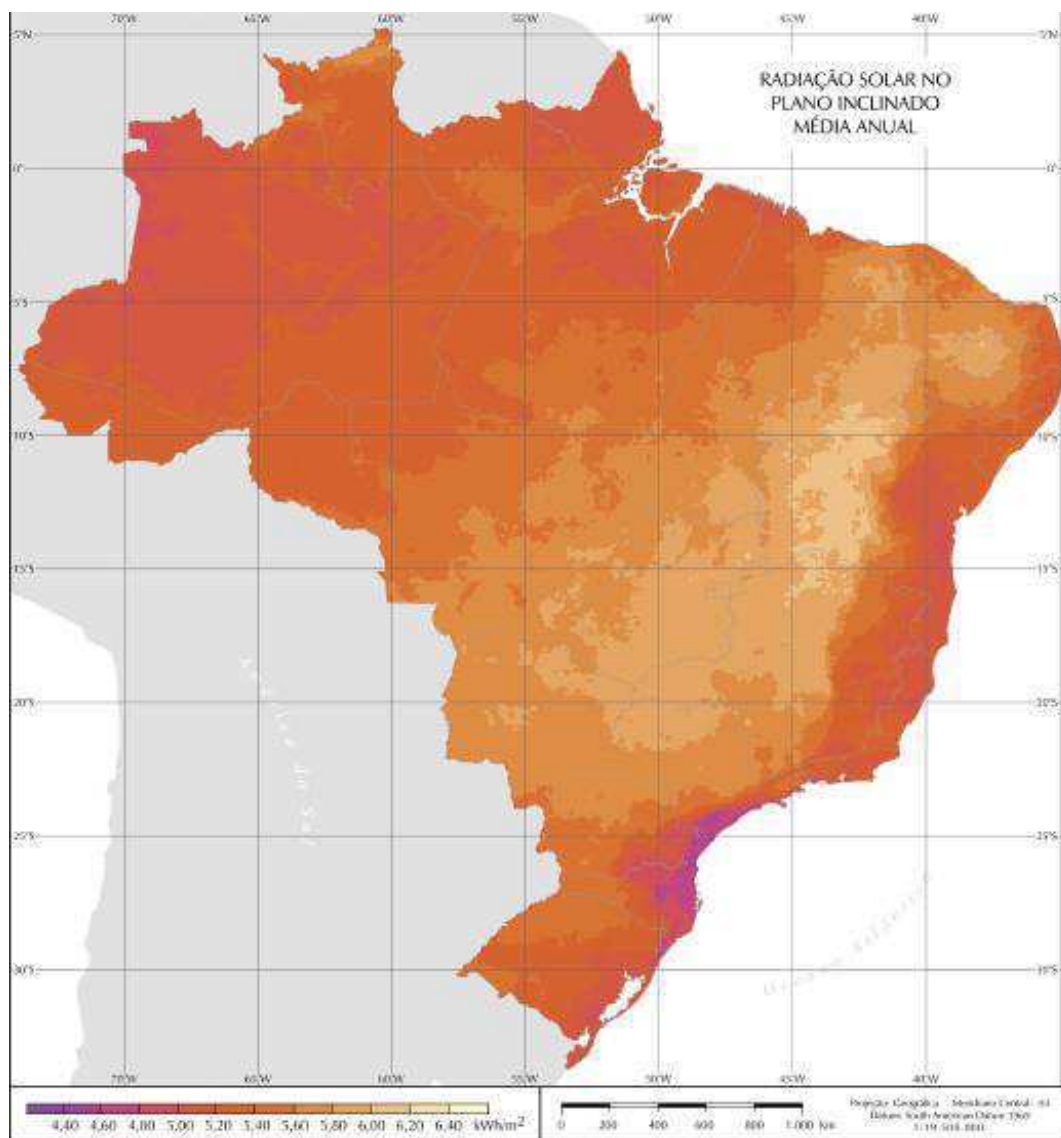
Fonte: NASA *apud* Perloti, 2012

### 2.2.3 SITUAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL

O Brasil tem o privilégio geográfico de se localizar próximo à linha do Equador, de modo que a duração solar do dia – período de visibilidade da luz solar – pouco varia, e o sol aparece em média 280 dias por ano. Por conta disso, o Brasil possui um ótimo índice de radiação solar, chegando a um dos maiores do mundo, com média anual de energia incidente na maior parte do país variando entre 4 KWh/m<sup>2</sup>.dia e 5 KWh/m<sup>2</sup>.dia.

De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, lançado em 2006, o nordeste brasileiro concentra o maior índice, mais precisamente ao norte da Bahia, próximo à fronteira com o Piauí (6,5 KWh/m<sup>2</sup>), e a região de valor mínimo, no litoral norte de Santa Catarina (4,25 KWh/m<sup>2</sup>), como pode ser visto na Figura 2.10.

Figura 2.10- Mapa brasileiro da irradiação solar em média anual



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2006.

Essa característica põe o país em vantagem com relação aos países industrializados no que tange a utilização da energia solar fotovoltaica, já que a região de pior índice no território brasileiro (4,25 kWh/m<sup>2</sup>) apresenta potencial superior a maioria dos países da União Europeia, como Alemanha (9,0 - 1,250 kWh/m<sup>2</sup>), França (9,0 - 1,650 kWh/m<sup>2</sup>) e Espanha (1,2 - 1,850 kWh/m<sup>2</sup>) onde os incentivos em energia solar são amplamente disseminados, porém, apesar de apresentar melhores condições climáticas, na comparação mercadológica, o Brasil está atrás dos países europeus.

Além disso, as regiões desérticas do mundo são as mais bem dotadas de recurso solar. Assim a região da cidade de Dongola, localizada no Deserto Árábico no Sudão, e a região de Dagget no Deserto de Mojave, Califórnia nos Estados Unidos, são exemplos de localidades bem servidas de radiação solar. (Atlas Solarimétrico Brasileiro, 2006) A Tabela 2.1 apresenta essa comparação entre os índices de radiação.

Tabela 2.1- Comparação da irradiação das cidades brasileiras com as melhores regiões do mundo

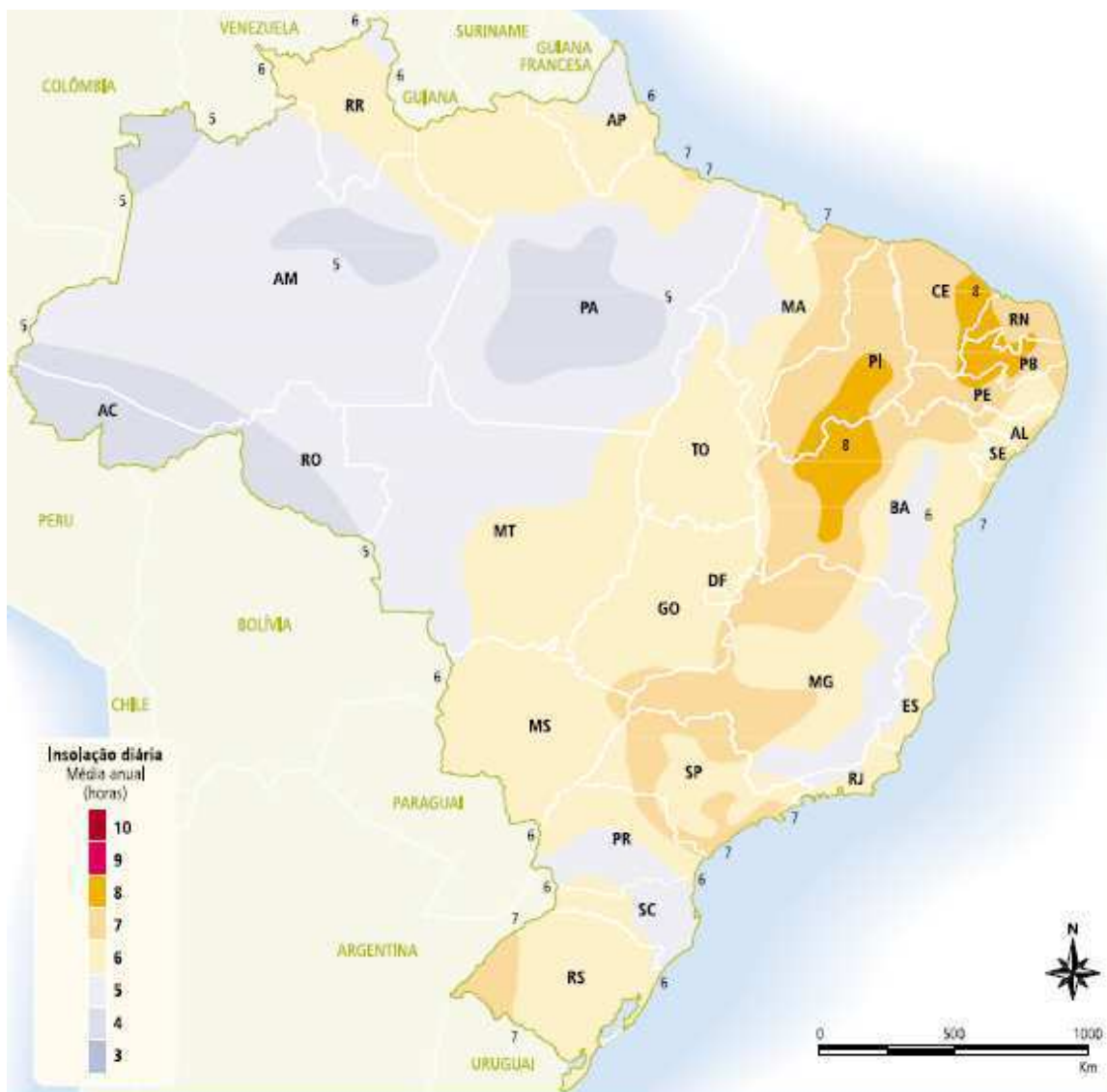
<b>Localidade</b>	<b>Radiação mínima (MJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Radiação máxima (MJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Média anual (MJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Radiação máx./ Radiação mín.</b>
<b>Dongola(Sudão)</b>	19.1(Dez)	27.7(Mai)	23.8	1.4
<b>Dagget(EUA)</b>	7.8 (Dez)	31.1 (Jun)	20.9	4.0
<b>Belém</b>	7.8 (Dez)	19.9 (Set)	17.5	1.4
<b>Floriano – PI</b>	17.0 (Jun)	22.5(Out)	19.7	1.3
<b>Petrolina-PE</b>	16,2 (Jun)	22.7(Out)	19.7	1.4
<b>B.J. Lapa – BA</b>	15.9 (Jun)	21.1(Out)	19.7	1.3
<b>Cuiabá – MT</b>	14.7 (Jun)	20.2(Out)	18.0	1.4
<b>B. Horizonte – MG</b>	13.8 (Jun)	18.6 ( Out)	16.4	1.3
<b>Curitiba – PR</b>	9.7 (Jun)	19.4 (Jan)	14.2	2.0
<b>P. Alegre – RS</b>	8.3 (Jun)	22.1 (Dez)	15.0	2.7

Fonte: Adaptado do Atlas Solarimétrico Brasileiro, 2006.

Já a Figura 2.11 ilustra a média anual da insolação diária no Brasil, em horas, onde fica destacada a grande potência do nordeste do país, onde os dias tem praticamente a mesma quantidade de horas durante todas as estações do ano. Ao se comparar com a Figura 2.10, pode-se notar que a região do norte da Bahia que faz divisa com o Piauí, além de um maior índice de radiação também é uma das regiões do

país onde se tem a maior quantidade de horas de insolação diária, assim como a região que engloba a Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Ceará.

Figura 2.11 - média anual de insolação diária no Brasil (horas)



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2006.

Fica evidenciado neste Capítulo que o Brasil além de ter um grande potencial na matéria prima das células solares (Silício, existente praticamente em toda areia, rocha, barro e solo), apresenta uma grande vantagem comparativa de intensidade de radiação quando comparada a outras regiões do mundo, principalmente a Europa, além de uma ótima insolação média diária, em horas.



## 3 TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica (*photovoltaics- PV*) é a tecnologia que gera energia elétrica em corrente contínua a partir de semicondutores quando estes são expostos aos fótons contidos na luz solar. Quando a luz incide na célula solar, há uma conversão direta de energia.

### 3.1 EFEITO FOTOVOLTAICO

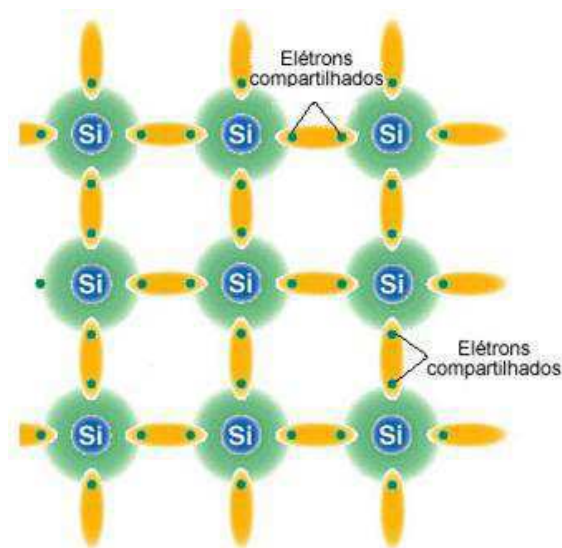
Semicondutores podem ser considerados como materiais que tem propriedades intermediárias entre os condutores e isolantes e são a principal matéria prima das células solares fotovoltaicas, que é o elemento base para a transformação da luz do sol em energia elétrica.

Na Tabela periódica, os elementos semicondutores pertencem principalmente aos grupos 14 a 16 (antigos grupos IVA a VIA), e como exemplo temos o Carbono (C), Silício (Si), Germânio (Ge), Arsênio (As), Fósforo (P), Selênio (Se) e Telúrio (Te), entre outros compostos. Os semicondutores dos grupos anteriormente citados têm como característica sua camada de valência parcialmente preenchida, com quatro, cinco e seis elétrons, respectivamente, e uma banda de condução totalmente vazia (sem elétrons livres).

Para os semicondutores se tornarem eletricamente estáveis necessitam de oito elétrons em sua camada de valência, e para isso realizam a chamada ligação covalente (Figura 3.1), onde os átomos compartilham seus elétrons entre si, formando um total de oito elétrons na camada de valência, adquirindo estabilidade.

Os elétrons da camada de valência podem ser excitados por uma fonte de energia externa, como a luz, e saltarem para a *Banda de Condução*, e uma vez nessa banda, o elétron não estará mais ligado ao átomo e se desloca livremente pelo cristal, deixando uma *lacuna* no local onde anteriormente estava alocado, para esse elétron dá-se o nome de *elétron livre*. Entre a camada de valência e a camada de condução, existe uma banda proibida (*gap*), e sua largura é o que define se o material é semicondutor ou isolante.

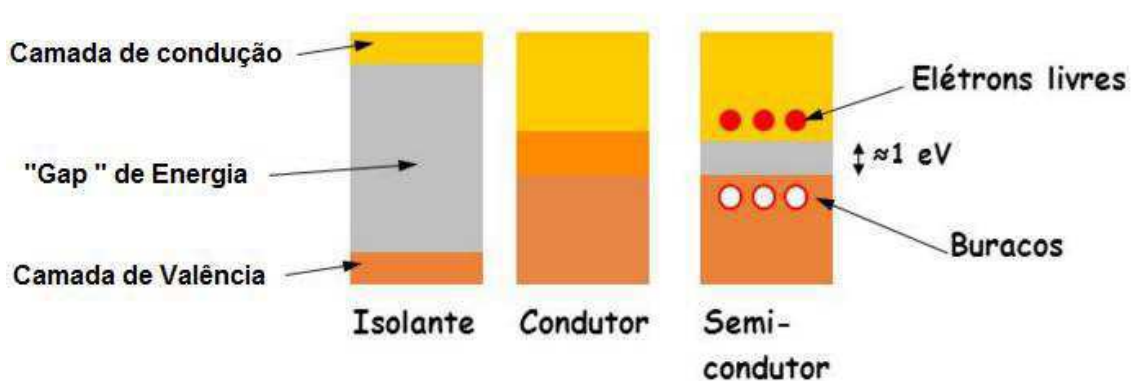
Figura 3.1 – Exemplo de ligação covalente para um semiconductor com quatro elétrons na camada da valência. Os elétrons dos seus vizinhos são compartilhados entre si, onde todos formam um total de oito elétrons.



Fonte: Modificado do Disponível em <<http://www.infoescola.com/quimica/dopagem-eletronica/>>. acesso em 09 de abril de 2016

Enquanto semicondutores apresentam uma faixa proibida média, da ordem de 1 eV ( $1,60 \times 10^{-19}$  J), isolantes têm uma faixa proibida larga, da ordem de 6 eV, e os condutores na ordem de 0 eV ( Figura 3.2). Assim, os materiais ao serem expostos a luz do sol, os fótons na faixa de luz visível, com energia superior a energia da banda proibida (gap) do material semiconductor podem excitar elétrons da faixa de valência para a faixa de condução.

Figura 3.2 - Tamanho da Banda Proibida em Isolantes, Condutores e Semicondutores.



Fonte: Modificado de - Jun Takahashi. Disponível em <<http://slideplayer.com.br/slide/1846887/>> . Acesso em: 09 de Abril de 2016

A Tabela 3.2 a seguir apresenta alguns exemplos de materiais e os valores de energia para vencer sua banda proibida.

Tabela 3.2 - Bandas Proibidas De Alguns Semicondutores.

<b>Material</b>	<b>Energia para vencer a banda proibida (eV)</b>
Boro (B)	1,1
Silício (Si)	1,12
Germânio (Ge)	0,72
Fósforo (P)	1,5
Arsênio (As)	1,2
Enxofre (S)	2,5
Selênio (Se)	1,7
Telúrio (Te)	0,36
Iodo (I)	1,25
GaAs	1,43
CdTe	1,45

Fonte: Modificado de Barbosa,2014

Como boa parte da radiação solar que não é absorvida pela atmosfera se encontra na faixa de luz visível, que é entre 400 nm e 700 nm, apenas um intervalo de energia é possível ser absorvido. O comprimento de onda está relacionado com a energia por meio da seguinte equação:

$$\Delta E = hc \frac{1}{\lambda}, \quad (1)$$

onde  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s, é a constante de Planck;  $c = 3 \times 10^8$  m.s<sup>-1</sup> é a velocidade da luz; e  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação. Lembrando que 1,0 eV é igual a  $1,6022 \times 10^{-19}$  J.

Para os valores de comprimento de ondas de 400nm e 700nm temos os valores de energia de 3,1 eV e 1,7 eV, respectivamente. Dessa forma, como cada material apresenta uma sensibilidade diferente a radiação, os semicondutores apresentam uma banda proibida dentro dessa faixa, sendo fortes candidatos para serem utilizados como camada doadora de elétrons em células fotovoltaicas.

Esse intervalo de energias também influencia nos valores de tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito das células solares: Quanto menor a energia de *gap* do material, maior a absorção de fótons, e maior será a corrente. Quanto maior a energia

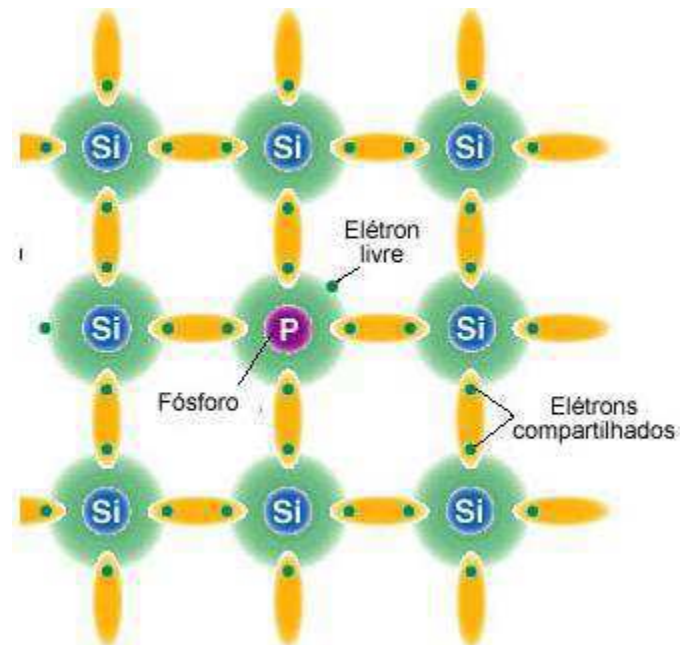
de *gap* do material, maior será a tensão de circuito aberto, já que a energia de banda está relacionada com a magnitude do campo elétrico da junção de materiais da célula, e determinará qual a tensão produzida pela célula.

O Semicondutor mais usado na fabricação de células solares é o Silício. Sua estrutura atômica se caracteriza por ter quatro elétrons na camada de valência, que se ligam aos átomos vizinhos, formando uma rede cristalina.

O Silício pertence aos elementos da família 14 (Ou IVA na notação antiga). Os elementos dessa família são caracterizados por terem quatro elétrons em sua camada de valência, ou seja, necessitam de quatro elétrons para se tornarem estáveis.

Se a essa rede do Silício for adicionado átomos de Fósforo, que pertence a família 15 (ou VA na notação antiga) da Tabela periódica, caracterizado por ter cinco elétrons em sua camada de valência, ao se formarem as ligações entre os átomos de Fósforo e Silício, um elétron ficará desemparelhado e fracamente ligado ao seu átomo de origem, como ilustrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Dopagem tipo *n*. Rede de Silício dopada com fósforo.



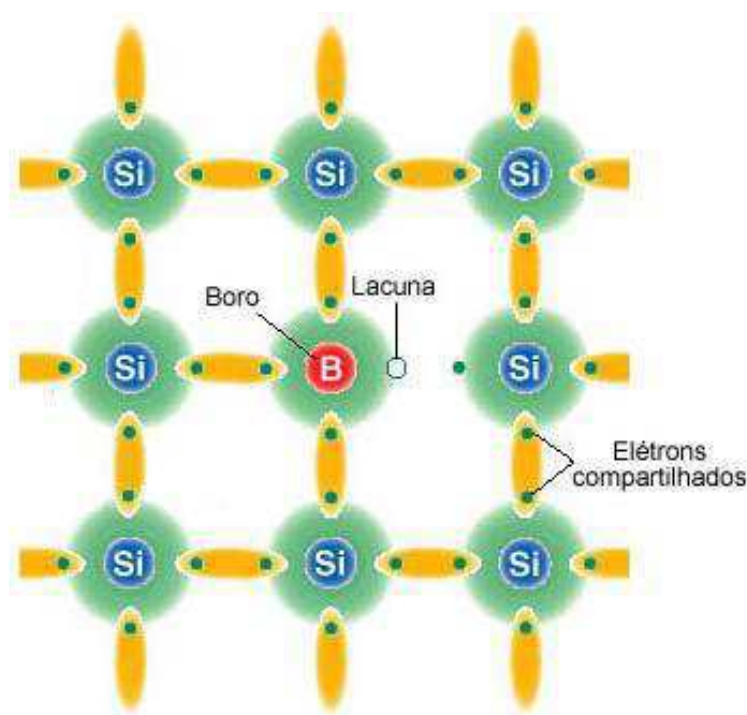
Fonte: Disponível em <<http://www.infoescola.com/quimica/dopagem-eletronica/>>. acesso em 09 de abril de 2016

Essa fraca ligação pode ser quebrada com facilidade e o elétron passará da camada de Valência para a camada de condução, ou seja, o fósforo será um dopante doador de elétrons, sendo denominado de dopante tipo *N* ou impureza tipo *N*.

Se no lugar de Fósforo, átomos de Boro, elemento da família 13 (IIIA na notação antiga), caracterizado por conter três elétrons na camada de valência, forem introduzidos à rede cristalina do Silício, haverá uma falta de um elétron para satisfazer as ligações entre os átomos, como ilustrado na Figura 3.4.

Nessa configuração o Boro passa a ser considerado um receptor de elétrons, um dopante ou impureza do tipo P, e essa falta de elétron é chamada de lacuna e ocorre que, com pouca energia, um elétron de um sítio vizinho pode se deslocar e ocupar esse lugar “vazio” da lacuna, fazendo com que o “buraco” se desloque.

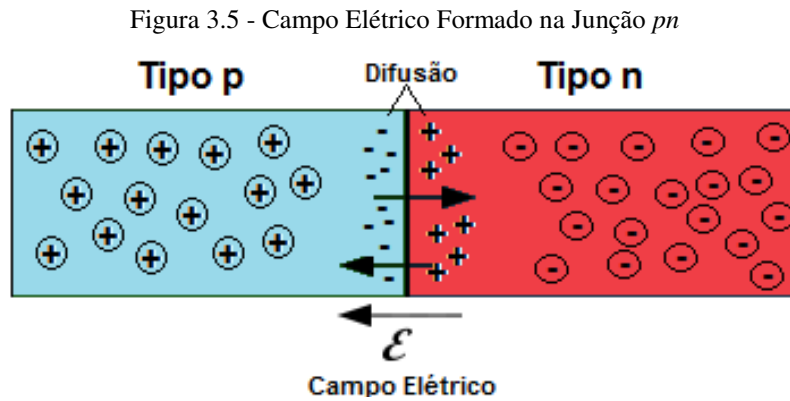
Figura 3.4- Dopagem tipo p. Rede de Silício dopada com boro.



Fonte: Disponível em <<http://www.infoescola.com/quimica/dopagem-eletronica/>>. Acesso em 09 de abril de 2016

A partir daí, ao se unirem dois cristais de Silício, um cristal de Silício tipo-n (Silício com impurezas tipo N) e um cristal de Silício tipo-p (Silício com impureza tipo P), teremos uma *junção pn*, que é o nome dado a região de contato entre os cristais tipo *n* e *p*. Nessa junção, os elétrons em excesso do lado *n* vão para o lado *p* onde são capturados pelas lacunas, deixando pra traz no lado *n* uma lacuna no lugar onde ocupava, dessa forma, o lado *p* torna-se negativamente carregado, por conta dos elétrons vindouros do lado *n*, que se torna agora positivamente carregado, por conta da redução dos seus elétrons. Esse processo não acontece indefinidamente, pois como as cargas elétricas negativas se movimentam no sentido contrario a um campo elétrico, quando as

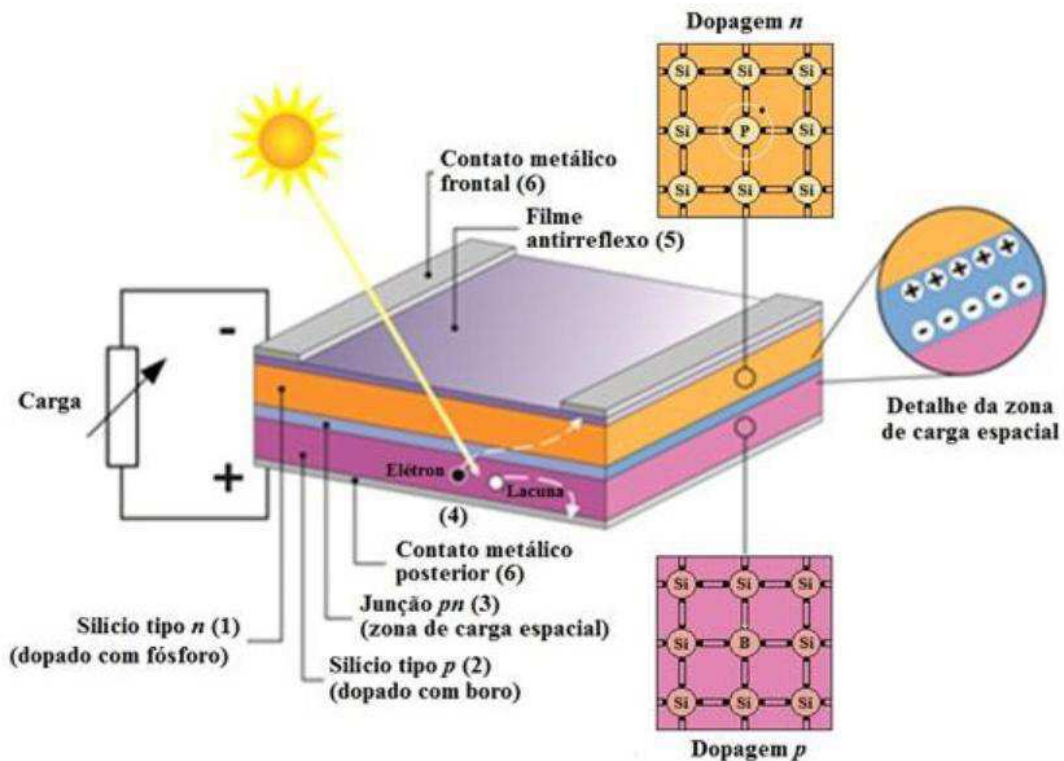
cargas aprisionadas na junção  $pn$  formam um campo elétrico com certa magnitude, forma-se uma barreira capaz de impedir o movimento dos elétrons livres remanescentes do lado  $n$ , como ilustrado na Figura 3.5.



Fonte: Modificado do Disponível em:  
 <[https://en.wikibooks.org/wiki/Analogue\\_Electronics/pn\\_Junctions](https://en.wikibooks.org/wiki/Analogue_Electronics/pn_Junctions)>. Acesso em: 05 de Maio de 2016.

Quando a junção  $pn$  é exposta a luz solar, fótons são absorvidos pelos elétrons do lado  $n$ , e caso a energia desse fóton seja maior que a energia do  $gap$ , as ligações dos elétrons são quebradas, assim, os elétrons são atraídos pelas lacunas do lado  $p$ , e como o campo embutido na junção os impede de se movimentarem diretamente para o lado das lacunas, eles então se tornam elétrons livres no lado  $n$ , enquanto a lacuna formada pela sua separação da camada de valência é atraída pelo campo elétrico (lembrando que cargas elétricas positivas se movimentam a favor do sentido do campo elétrico) para o lado  $p$ . Todo esse processo é chamado de *efeito fotovoltaico*. A difusão dos portadores de carga até os contatos elétricos da célula solar geram uma diferença de potencial. Se a célula não estiver ligada a nenhuma carga, teremos a tensão de circuito aberto na célula fotovoltaica. Caso a célula esteja ligada a uma carga, agora os elétrons livres do lado  $n$  passaram a ter um caminho pra seguir até o lado  $p$  para se recombinarem com as lacunas, ou seja, uma corrente continua fluirá pelo fio. Durante o efeito fotovoltaico, alguns elétrons não alcançam os contatos e são recombinados. A Figura 3.6 mostra a estrutura física de uma junção  $pn$  de uma célula fotovoltaica, onde 1 é região tipo  $n$ ; 2 é região tipo  $p$ , 3 é a zona de carga espacial, onde se formou a junção  $pn$  e o campo elétrico; 4 é geração de par elétron-lacuna; 5 é o filme antirreflexo, e 6 os contatos metálicos.

Figura 3.6 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de Silício:



Fonte: Pinho e Galdino, 2014

Contudo, nem todos os fótons absorvidos pela célula são úteis. Como já foi discutido, para o elétron passar da banda de valência para a banda de condução, a energia do fóton precisa ser maior que a energia do *gap*, e isso só acontece para alguns comprimentos de onda. O comprimento de onda do fóton ( $\lambda_c$ ) está relacionado com sua energia, quanto maior o comprimento de onda, menor a energia. A fórmula correlaciona a energia da banda proibida e o comprimento de onda da radiação.

$$E_{\text{energia do gap do material}} = \frac{12400}{\lambda_c} \text{ (eV)}. \quad (2)$$

O valor mínimo da energia do fóton é o valor da energia do *gap*, e o comprimento de onda limite é  $\lambda_c$ . Nesse caso, para uma célula de Silício, que tem o valor de energia do *gap* igual a 1,12, temos que:

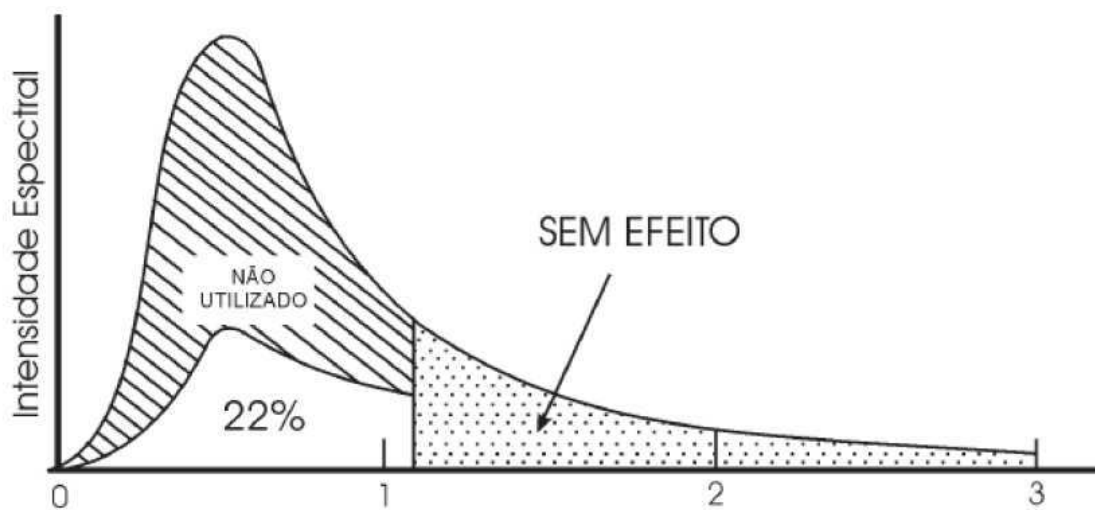
$$E_{\text{Silício}} = 1,12 \text{ (eV)}, \text{ e} \quad (3)$$

$$\lambda_c \approx 1,13 \mu\text{m} \quad (4)$$

Portanto, para que o fóton arranque o elétron da camada de Valência na célula de Silício, o comprimento de onda não deve ser maior que  $1,13 \mu\text{m}$ . Como só uma parte do espectro do sol atinge a superfície, temos um fator limitante para o processo de

conversão de energia, já que só a parcela do espectro de comprimento de onda menor que  $1,13 \mu\text{m}$  será efetiva no processo de arranque de elétrons para a camada de condução, além da parcela da luz que é refletida. Cada elétron é energizado por somente um fóton, ou seja, fótons com energia maiores que o *gap* poderão fornecer uma energia excessiva para a célula, ocasionando um aumento de temperatura. A Figura 3.7 mostra o percentual do espectro solar útil em uma célula de Silício.

Figura 3.4 - Conversão De Energia Luminosa E Uma Célula De Silício)



Fonte: Disponível em <<http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-o-efeito-fotovoltaico/>>. Acesso em 09 de abril de 2016

## 3.2 CÉLULA FOTOVOLTAICA

Células solares típicas têm cerca de  $100 \text{ cm}^2$  de área e produzem correntes de 3 Ampères a uma tensão de 0,5 V. É na célula que ocorre o efeito fotovoltaico responsável pela transformação da radiação solar em energia elétrica, e podem ser combinadas em série e em paralelo, formando assim os chamados *módulos fotovoltaicos*, com valores de potência típicos entre 50-200 W. Os módulos combinados com outros elementos como inversores, baterias, e outros componentes elétricos formam um sistema fotovoltaico.

De acordo com o desenvolvimento histórico, as diversas tecnologias de células fotovoltaicas podem ser classificadas de acordo com o material e suas características. As principais são:

- Primeira geração: Silício cristalino;
- Segunda geração: Filmes finos;



- Terceira geração (3G): Materiais orgânicos e sensibilizados com corantes.

Na tentativa de aumentar a eficiência e diminuir o custo de células solares, novos materiais têm sido exaustivamente estudados, sobretudo na área dos filmes finos, no qual o Silício amorfo se enquadra, e na área de materiais orgânicos e nano estruturados que apesar de recente, vem se mostrando uma área de pesquisa bastante promissora. Novos materiais mais eficientes para absorver a luz solar, novas técnicas de captura de todo o espectro solar e novas abordagens baseadas em arranjos nano estruturais podem revolucionar a tecnologia.

Há quatro tipos de Silício cristalino que diferem entre si em relação ao nível de impurezas, o menos puro é o grau metalúrgico, seguido do grau químico, grau solar e por ultimo, o mais puro, o grau eletrônico. O Silício é extraído do quartzo da natureza na forma de cristal de dióxido de Silício ( $\text{SiO}_2$ ) e então desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado para fornecer o chamado Silício grau metalúrgico, de pureza entre 98 e 99%.

### 3.2.1 PRIMEIRA GERAÇÃO – SILÍCIO CRISTALINO

As células solares com a fabricação baseadas em Silício cristalino (c-Si) são as mais difundidas no mercado, e representam aproximadamente 95% de toda a capacidade instalada. As células de c-Si são relativamente eficientes, quando comparadas as outras, porém muito caras. Dentre as células fotovoltaicas que utilizam o Silício como base, as monocristalinas são as que apresentam a maior eficiência, com valores de até 18%. Analogamente, as células de Silício policristalino (pc-Si) são mais baratas, entretanto, menos eficientes.

#### 3.2.1.1 CÉLULAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

A produção das células de Silício monocristalinas é um processo básico e bem difundido, o que explica o fato dessas células serem historicamente as mais usadas, além de ter uma maior eficiência comparada às outras, variando de 15-18%.

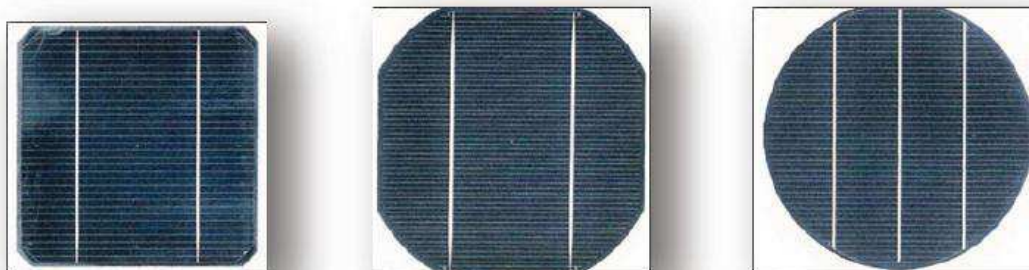
A fabricação dessas células começa com a extração do cristal de dióxido de Silício, após passar pelo processo de desoxidação e solidificação, ele é purificado até chegar aos valores razoáveis de eficiência, sob o ponto de vista energético e de custo,

entre 98 e 99%. Porém esse Silício após dopagem com outros semicondutores e um grau de pureza maior, chega a uma eficiência na faixa de 99,9999%.

O processo chamado *Czochralski* é o mais utilizado para que o Silício além de um alto grau de pureza, tenha uma baixa densidade de defeitos de rede, sendo assim utilizado na indústria eletrônica. Durante o processo, o Silício é banhado com uma pequena quantidade de dopante do tipo *p*, normalmente o boro. Após o Silício ser fundido com o boro, e com um fragmento de cristal devidamente orientado e sob rígido controle de temperatura, se extrai do material fundido um grande cilindro de Silício monocristalino com um diâmetro de 30 cm e vários metros de largura, esse cilindro é cortado em finas fatias de aproximadamente 0,3 mm de espessura. Após a limpeza das células uma fina camada de impureza negativa é produzida por difusão com fósforo, a temperaturas de 800-1.200 C°. Após isso, as células são equipadas com os contatos elétricos e uma camada antirreflexão (AR) na parte frontal.

As células de Silício monocristalino tem formato geralmente arredondado ou em formato de pizza, seu tamanho é geralmente 10x10 cm<sup>2</sup> ou 12,5x12,5 cm<sup>2</sup>; diâmetro de 10, 12,5 ou 15 cm, com 0,3 mm de espessura. Quando estão com camada antirreflexo, a cor da célula geralmente é azul-escuro ou quase preto e cinza ou azul-acinzentado sem antirreflexo. Na Figura 3.8, alguns exemplos de células solares monocristalinas.

Figura 3.5- Células de Silício monocristalino



Fonte: Modificado de GreenPro,2004

### 3.2.1.2 CELULAS DE SILÍCIO POLICRISTALINO

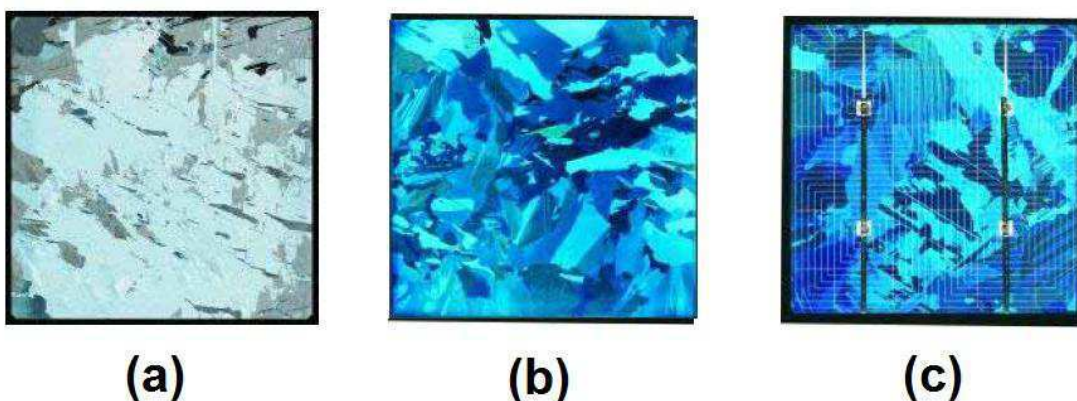
As células de Silício policristalino, exigem um processo mais simples em de fabricação em relação às monocristalinas, o que reflete em seu menor preço, e também menor eficiência, cerca de 2% mais baixa.

Sua produção mais comum é o de fundição de lingotes. Mas também pode ser preparada por cortes de fitas ou depositando o filme em um substrato, tanto por transporte de vapor ou imersão.

Na fundição de lingotes (massa de metal ou semicondutor, que após ser aquecido a uma temperatura superior ao seu ponto de fusão é vertida num molde para facilitar aplicações futuras), o Silício bruto é aquecido no vácuo até uma temperatura de 1.500°C e depois arrefecido na direção da base do cadinho (recipiente em forma de pinte, no qual são fundidos materiais a altas temperaturas), a uma temperatura aproximada de 800°C. Após isso são criados blocos de Silício de 40x40 cm<sup>2</sup> com espessura de 30 cm, que são serrados em pastilhas de 0,3 mm. Depois da introdução das impurezas de fósforo, os contatos são unidos à pastilha, assim como a camada AR.

As células de Silício policristalino tem formato quadrado, seu tamanho geralmente é de 10x10 cm<sup>2</sup>, 12,5x12,5 cm<sup>2</sup>, ou 15x15 cm<sup>2</sup>, com 0,3 mm de espessura. Quando estão com camada antirreflexo, a cor da célula geralmente é azul e cinza-prateada sem antirreflexo. Na Figura 3.9, alguns exemplos de células policristalinas.

Figura 3.6 - Célula Policristalina- (a) em camada anti reflexão; (b) com camada anti reflexão; (c) com AR e filamentos elétrico



Fonte: Modificado de GreenPro, 2014

### 3.2.2 SEGUNDA GERAÇÃO: FILMES FINOS

A segunda geração de células é formada pelos chamados filmes finos, e seu desenvolvimento vem desde os anos 90. O material semicondutor é aplicado em um substrato, geralmente vidro, através de deposição por vaporização, banho eletrolítico ou deposição catódica. O Silício Amorfo (a-Si), Disseleneto de Cobre e Índio (gálio) (CIS-CIGS) e o Telureto de Cádmio (CdTe) são os semicondutores mais utilizados.

Devido à alta absorção luminosa, teoricamente, camadas de menores espessuras são suficiente para converter luz solar em eletricidade, dessa forma o tamanho das camadas é mais fina do que a espessura das células tradicionais usadas. Como referência, semicondutores típicos de filmes finos tem espessura 10 vezes menor que um fio de cabelo (por volta de 0,001 mm).

Entre as principais vantagens dessa tecnologia, podemos citar, além do menor gasto material e menor peso por consequência do menor tamanho, um menor gasto na fabricação (são mais facilmente dopados e requerem menores temperaturas, entre 200-500°C, além de automação para produção em larga escala), e potencial para fabricação de células flexíveis, que podem ser usadas de forma integrada a materiais convencionais de construção, como em fachadas e coberturas de telhados. Porém, os filmes finos ainda apresentam eficiências inferiores em relação às células da primeira geração, além de estarem em um menor estágio de desenvolvimento do conhecimento e da tecnologia.

#### 3.2.2.1 O SILÍCIO AMORFO (A-SI)

O Silício amorfo possui uma rede irregular no lugar de uma estrutura cristalina, por ter a vantagem de ser fabricado mediante deposição sobre diversos tipos de materiais, por apresentarem uma absorção da radiação solar na faixa do visível e vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo mais barato de fabricação, as células de Silício amorfo vêm se mostrando uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. Porém, as células amorfas tem uma eficiência mais baixa quando comparadas as células da primeira geração (O módulo fotovoltaico chega a 9%), e sofrem um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo sua eficiência ao longo do tempo. A Figura 3.10 mostra um exemplo de módulo formado por células de Silício Amorfo

Figura 3.7 - modulo Silício amorfo



Fonte: GreenPro, 2014

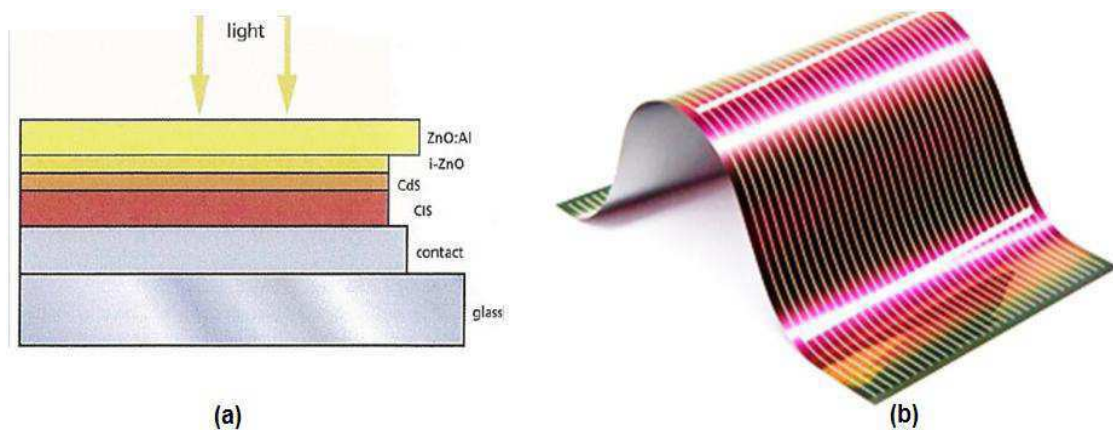
### 3.2.2.2 DISSELENETO DE COBRE E ÍNDIO/GALIO (CIS-CIGS)

As células de CIS-CIGS são consideradas as mais promissoras dentre os filmes finos para o aumento da eficiência e diminuição do custo. Altas eficiências já foram alcançadas em laboratório, tanto para as células quanto para os módulos (superiores a 12%). Dentre as principais vantagens dessas células, está o fato de apresentarem excelente estabilidade de longo prazo, resistência a altos níveis de radiação e podem ser muito leves, e apoiadas sobre substratos flexíveis. O principal gargalo dessa tecnologia se dá ao fato do alto custo de fabricação, embora exista uma possibilidade de redução com o decorrer das pesquisas e evolução da tecnologia.

O Disseleneto de cobre e índio é o semicondutor das células solares CIS, esse composto forma uma liga com o gálio e/ou enxofre. Quando as células são fabricadas, uma fina camada de molibdênio é depositada sobre um substrato de vidro, como contato reverso, utilizando o processo de deposição catódica. Uma camada absorvente do tipo *p* é fabricada através da vaporização simultânea dos elementos Cobre, Índio e Selênio numa câmara de vácuo, a temperaturas de 500°C. O óxido de zinco dopado com alumínio (ZnO:Al) é utilizado como contato frontal (camada transparente). Este material dopado negativamente é utilizado para reduzir perdas das camadas CIS e ZnO ocasionadas pela combinação inadequada dos retículos cristalinos. A espessura da célula é de 3 mm para o substrato com revestimento de 0,003 mm

A Figura 3.11 a seguir mostra: (a) a estrutura em camadas de uma célula CIS, e (b) um Filme fino de Disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS).

Figura 3.8–(a) Estrutura em camadas de uma célula CIS e (b) Filme fino de Disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS).



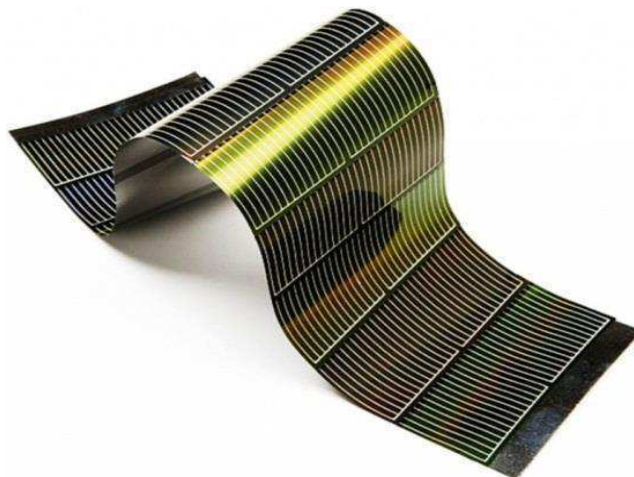
Fonte: Modificado de GreenPro, 2014

### 3.2.2.3 TELURETO DE CÁDMIO (CDTE)

As células de *CdTe* são fabricadas sobre um substrato de vidro. Uma camada de óxido de estanho índio (OTI) revestido por uma camada transparente de sulfato de cádmio (CdS) do tipo *n* e depois com uma camada de Telureto de cádmio (CdTe) do tipo *p*, forma o contato frontal da célula.

Com a evolução da tecnologia é esperado que o custo da produção da células de CdTe diminua. O principal problema se encontra no fato de que o CdTe é um composto atóxico estável, mas pode apresentar um risco para o ambiente e a saúde na condição de gás. A eficiência dos módulos de células de CdTe varia de 6-9%, e tem espessura de 3mm para o substrato com 0,008 mm de revestimento. A Figura 3.12 a seguir mostra um filme fino de CdTe.

Figura 3.9- Filme fino de Telureto De Cádmio



Fonte: GreenPro,2014

### 3.2.3 TERCEIRA GERAÇÃO (3G): MATERIAIS ORGÂNICOS E NANO ESTRUTURADOS

Atualmente, existe uma grande quantidade de pesquisa solar acontecendo no que está sendo referido na indústria como células solares de terceira geração. Para superar as dificuldades encontradas na primeira e segunda geração, como a baixa eficiência e o alto custo dos equipamentos que compõem o sistema fotovoltaico, essa nova linha de células solares tem como objetivo uma utilização mais eficaz da luz solar, sendo altamente eficiente, utilizar materiais de grande abundância e possuir um baixo custo/watt. Boa parte do trabalho sobre células solares da terceira geração ainda está sendo feito em laboratórios, e conseqüentemente as células não estão disponíveis comercialmente.

Embora ainda tenham uma baixa eficiência, as células 3G têm um grande potencial e vantagens em relação às outras gerações: baixo custo sobre grandes áreas, flexibilidade mecânica, possível semitransparência e baixo peso. Segundo o pesquisador Fernando Ely, do Grupo de Eletrônica Orgânica do Centro de Tecnologia da Informação (CTI) Renato Archer, de Campinas: “De modo geral, as células de terceira geração, nas quais também se incluem as feitas com pontos quânticos (minúsculos cristais semicondutores), multijunção e portadores quentes (de carga altamente energética), fazem um melhor aproveitamento dos fótons que incidem sobre elas”. Ele ainda comenta: “Além de enfrentar as principais limitações que impedem a comercialização desses dispositivos, nosso grupo busca gerar propriedade intelectual para, posteriormente, transferir esse conhecimento para o setor produtivo. Nossas atividades incluem, ainda, estudos para aumentar a eficiência de conversão das novas células solares por meio do uso de aditivos funcionais, o desenvolvimento de novas técnicas de fabricação por processo contínuo – a chamada técnica *roll – to – roll* – e a produção de eletrodos transparentes à base de nano tubos de Carbono. As atividades no CTI Renato Archer são apoiadas pela FAPESP, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep). (Vasconcelos, 2013)

Os principais tipos de células de terceira geração, (além das feitas de pontos quânticos, multijunção e portadores quentes, anteriormente citadas) são de dois tipos:

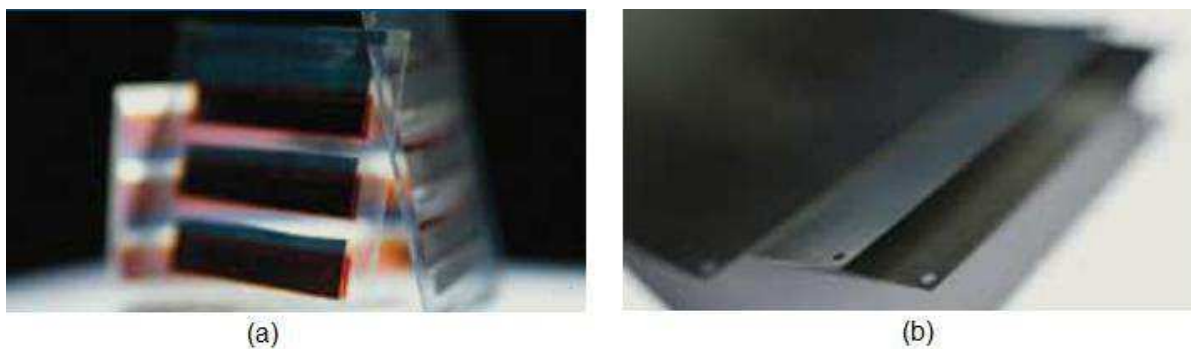
- Células sensibilizadas por corantes (*Dye-sensitized solar cell – DSSC*).

As células DSSC funcionam através de uma reação química de oxidação-redução. Também podem ser chamadas de Híbridas, pois são feitas de matérias inorgânicos e orgânicos. A Figura 3.13 (a) ilustra um exemplo de Célula DSSC: leves e flexíveis, essas células fazem o aproveitamento de fótons via nanotecnologia. Material- semicondutor à base de Carbono

- Células Orgânicas (*OrganicPhotovoltaic – OPV*)

Células OPV levam esse nome por usarem materiais semicondutores à base de Carbono. Os materiais orgânicos são atraentes devido ao seu baixo potencial de custo, processo de fabricação simples e de elevado rendimento, o que sugere que os materiais orgânicos têm o potencial de fazer um grande impacto sobre o mercado de energia solar fotovoltaica. A Figura 3.13(b) ilustra um exemplo de célula OPV: - também chamadas de híbridas, pois usam materiais orgânicos e inorgânicos. Material – corante e eletrólito.

Figura 3.103 - (a) Célula orgânica. (b) Células sensibilizadas por corantes



Fonte: Modificado Vasconcelos, 2013.

Materiais orgânicos diferentes, incluindo moléculas orgânicas, polímeros conjugados e quatro materiais de Carbono típicos (por exemplo, Carbono amorfo, fulerenos ( $C_{60}$ ), o nano tubo de Carbono (NTC) e grafeno) são usados para células solares orgânicas e híbridas. Entre estes, a pesquisa recente mostra os nano tubos de Carbono como um material de grande potencial para as células solares, além disso, exibem propriedades optoeletrônicos, físicas e químicas interessantes.



Pelo fato de a combinação entre matérias de Carbono e Silício terem se mostrado como promissoras na aplicação em energia solar fotovoltaica, o estado da arte da célula fotovoltaica será focado na heterojunção Carbono/Silício, com foco específico em células solares com nano tubos de Carbono e Grafeno, contemplando assim o estado atual de uma das tecnologias da célula fotovoltaica orgânica de terceira geração.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS CÉLULAS

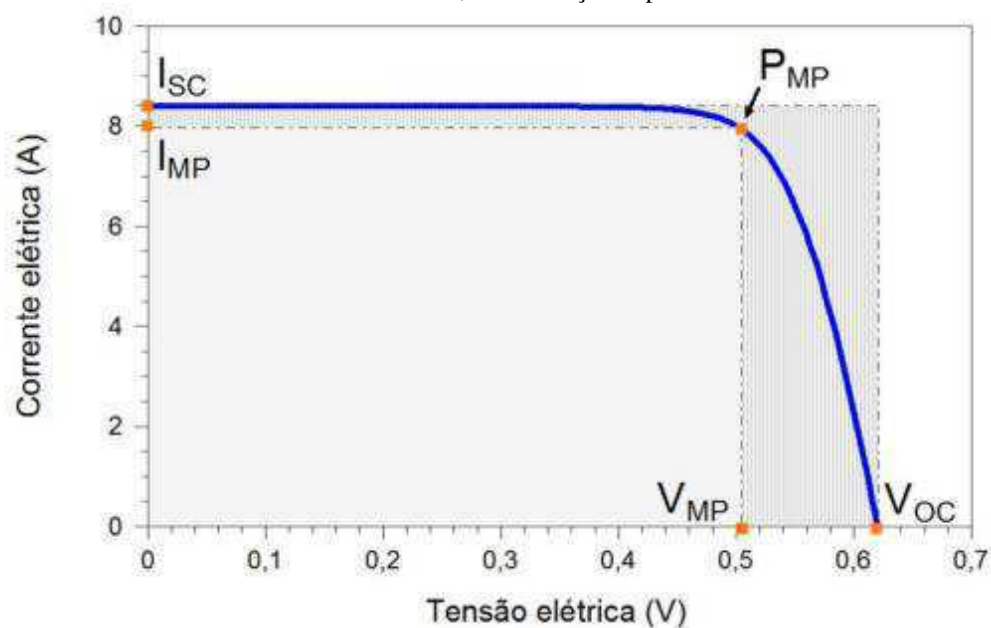
#### FOTOVOLTAICAS

##### 3.3.1 CURVA TENSÃO X CORRENTE (I-V)

A representação da característica de uma célula fotovoltaica é dada pela curva da corrente em função da tensão no dispositivo, denominada de curva I-V ou curva característica. A temperatura ambiente, características da carga alimentada pela célula, e a radiação incidente são fatores que determinam diretamente a corrente e tensão em que opera o dispositivo fotovoltaico.

Na Figura 3.14 a seguir, temos uma curva I-V típica de uma célula fotovoltaica de Silício.

Figura 3.11 - Corrente elétrica em função da diferença de potencia aplicada em uma célula fotovoltaica de Silício de 156 Mm X 156 Mm, sob condições - padrão de ensaio.



Fonte: Pinho et al, *apud* Pinho e Galdino, 2014.

Na Figura 3.13, podemos observar em destaque, os principais parâmetros elétricos que caracterizam as células fotovoltaicas, são eles:

- $I_{sc}$  – É a corrente elétrica de curto circuito. É a máxima corrente que pode ser entregue pela célula, com tensão nula, e conseqüentemente, potência nula.
- $V_{oc}$  – É a tensão de circuito aberto. É a máxima tensão que pode ser entregue pela célula, com corrente nula, e conseqüentemente, potência nula.
- $P_{MP}$  – É o ponto de potência máxima. Ponto da curva onde o produto  $V_{MP}$  x  $I_{MP}$  é máximo
- $I_{MP}$  – Corrente no ponto de potência máxima, utilizado como corrente nominal da célula.
- $V_{MP}$  – Tensão no ponto de potência máxima, utilizado como tensão nominal da célula.

De posse dos parâmetros acima listados, podem-se definir outros, como a eficiência e o fator de forma:

- Fator de Forma (FF) – O fator de forma expressa o quanto a curva característica se aproxima de um retângulo, de acordo com a Figura 3.14, o fator de forma esta representado graficamente como a razão entre a área dos dois retângulos destacados, e pode ser definida pela equação 5:

$$FF = \frac{I_{MP} \cdot V_{MP}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (5)$$

Quanto melhor a qualidade da célula (menor a sua resistência interna), mais próxima da forma retangular será a curva I-V.

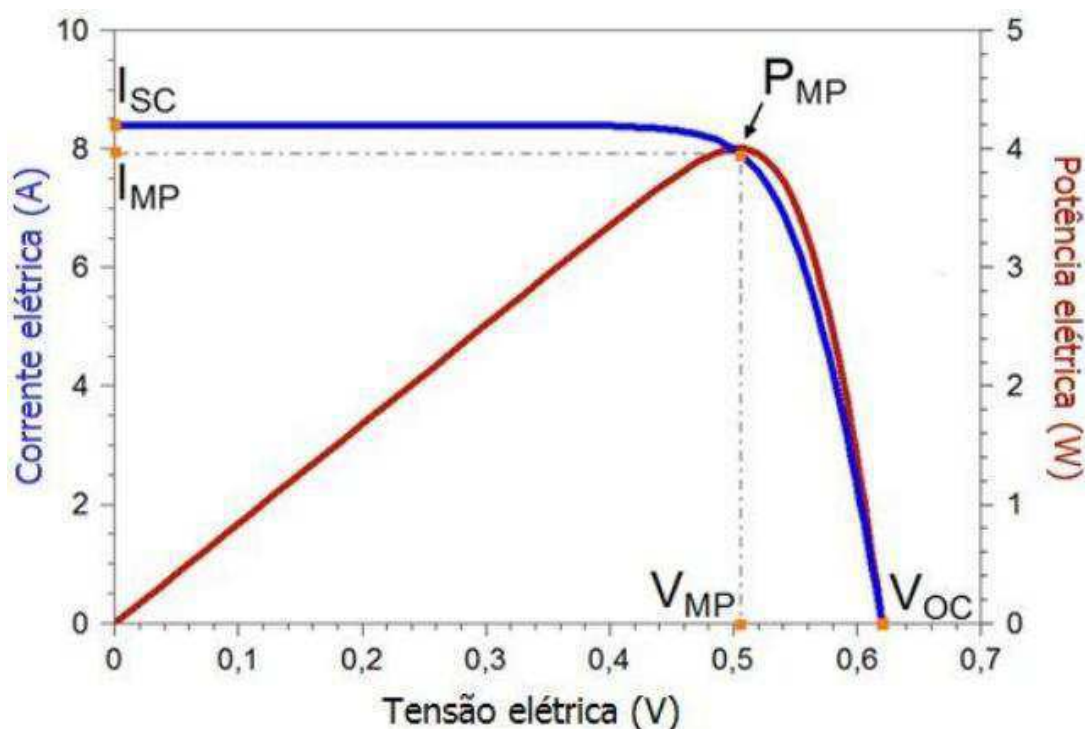
- Eficiência ( $\eta$ ) – A eficiência expressa quanto da energia solar incidente foi convertida em energia elétrica. É uma relação entre a potência elétrica produzida e a potência da energia solar incidente na célula, definida pela equação 6:

$$\eta = \frac{I_{cc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{A \cdot G} \cdot 100\% = \frac{P_{MP}}{A \cdot G} \cdot 100\% \quad (6)$$

Onde  $A(m^2)$  é a área da célula e  $G (W/m^2)$  é a irradiância solar incidente. A unidade da potência da célula é o  $W_p$ (watt-pico).

A partir dos parâmetros acima citados, é possível determinar a curva da potência em função da tensão, chamada de curva P-V. A Figura 3.15 mostra a curva I-V sobreposta com a curva da potência, na cor vermelha, onde se destaca o ponto de máxima potência.

Figura 3.12 - Potência elétrica em função da tensão elétrica de uma célula fotovoltaica de Silício cristalino de 156 mm x 156 mm, sob condições-padrão de ensaio. Os principais parâmetros elétricos estão destacados



Fonte: Pinho et al *apud* Pinho e Galdino, 2014

### 3.3.2 ASSOCIAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

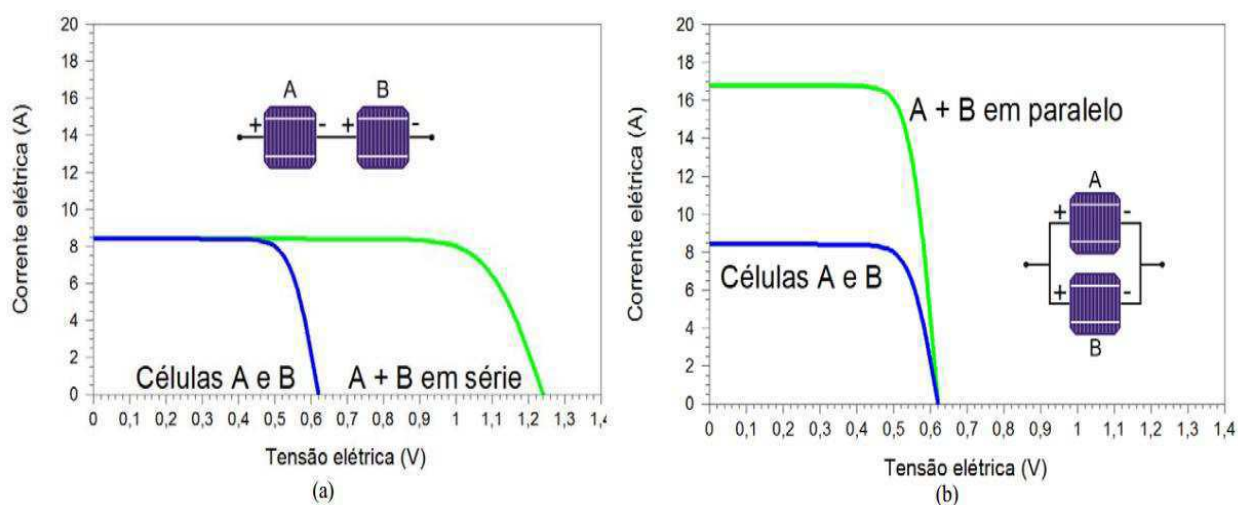
Células podem ser associadas em série e paralelo para formarem os módulos ou arranjos fotovoltaicos, e assim se obter níveis de tensão e correntes desejados.

Na associação em série, o terminal positivo de uma célula é ligado ao terminal negativo de outra célula fotovoltaica, e assim por diante. Caso as células fotovoltaicas estejam sob as mesmas condições de radiação, temperatura, e se produzidas pelo mesmo material, quando ligados em série, as tensões são somadas, e a corrente se mantém igual.

Já na ligação em paralelo, as células são ligadas em forma paralela, onde cada terminal positivo é ligado ao terminal positivo das outras células, e a mesma coisa ocorre com os terminais negativos. Caso os dispositivos sejam idênticos, e sob as mesmas condições de radiação e temperatura, ao serem ligadas em paralelo, as correntes serão somadas, enquanto a tensão será a mesma.

A Figura 3.16 a seguir ilustra a conexão em série e paralelo das células fotovoltaicas.

Figura 3.13 - Curvas I-V de duas células fotovoltaicas de Silício cristalino conectadas (a) em série e (b) em paralelo



Fonte: Modificado de Pinho et al *apud* e Galdino, 2014.

### 3.3.3 EFEITO DOS PARÂMETROS EXTERNOS

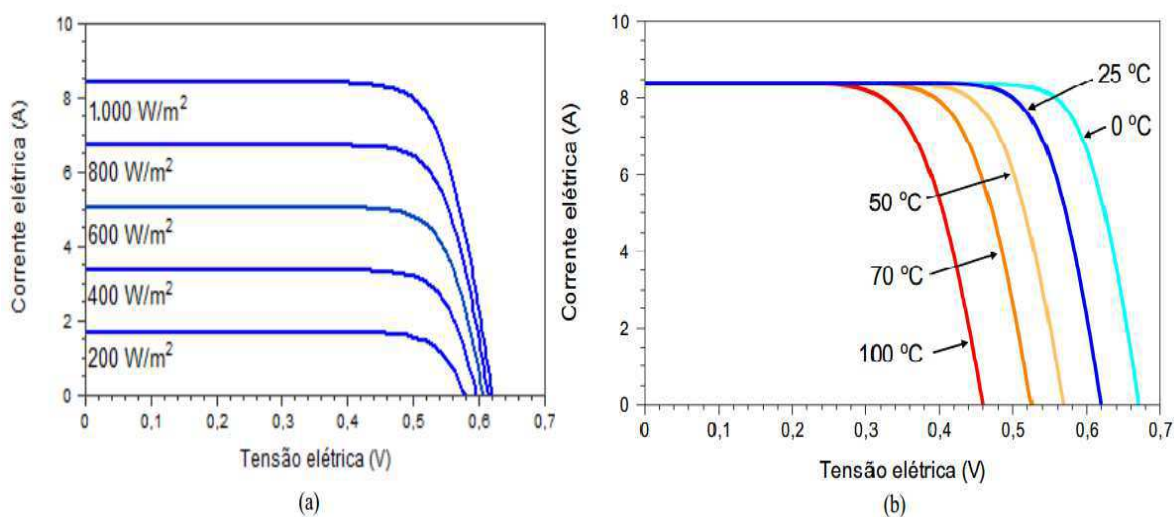
O desempenho das células fotovoltaicas está diretamente relacionado à irradiância solar e à temperatura. Muitos dispositivos ópticos são empregados para obtenção de valores de irradiância maiores, e se não forem usados de maneira correta, podem diminuir a eficiência da célula, principalmente se a temperatura não for controlada.

A corrente de uma célula fotovoltaica, mantida a temperatura de 25 °C (condição padrão de ensaio), aumenta linearmente com o valor da irradiância a qual está exposta o dispositivo, enquanto a tensão de circuito aberto se mantém praticamente constante. Esse fenômeno é ilustrado na Figura 3.17(a).

Além do aumento da temperatura do ambiente, às vezes a exposição de uma célula fotovoltaica a uma grande irradiância também pode ocasionar um aumento de temperatura do dispositivo. O aumento da temperatura afeta diretamente a redução da tensão da célula, enquanto sua corrente sofre um pequeno incremento, quase desprezível.

Para ambientes com alta temperatura, são adequados módulos que possuam maior quantidade de células ligadas em série, a fim de ter uma tensão de saída suficiente para a carga a que esta conectada. A Figura 3.17(b) ilustra o efeito do aumento da temperatura em uma célula fotovoltaica.

Figura 3.14–(a) Influência da variação da irradiância solar e (b) – Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (para irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, espectro Am1,5)



Fonte: Fonte: Modificado de Pinho et al *apud* Pinho e Galdino, 2014

## 4 O ESTADO DA ARTE DAS CÉLULAS SOLARES COM HETEROJUNÇÃO CARBONO/SILÍCIO

### 4.1 INTRODUÇÃO

O Estado da Arte foi um tipo de pesquisa muito utilizado nos anos 90, principalmente por cientistas americanos, que se caracterizava pela necessidade de reunir as informações de diversos autores que privilegiavam um determinado assunto, procurando, mapeando e reunindo o conhecimento científico em temáticas específicas. O termo “estado da arte” é utilizado como uma representação de um nível mais alto de desenvolvimento de um determinado tema, seja aparelho, técnica ou área científica, que pode mudar com o surgimento de algo que melhore o nível do tema abordado.

Atualmente, motivado pela necessidade de energias mais renováveis, muitos países vem investindo nessa área, os mais avançados na pesquisa solar fotovoltaica são: Alemanha (35.5 GW instalados), China (18.3 GW, com uma meta de 70 GW até 2017), e Itália (17.6 GW). Por conta desses investimentos, e conseqüentemente da constante evolução tecnológica e técnica das células fotovoltaicas, seu Estado da Arte muda a cada nova descoberta. Por existirem várias pesquisas com abordagens em pontos diferentes da célula solar (diferentes elementos químicos, dopagens, revestimentos, etc) e essas pesquisas estão longe de chegarem a um ponto em comum em relação a um único tipo específico de célula que apresenta melhor qualidade, pode-se dizer que para cada ponta desse leque de pesquisas, existe um Estado da Arte específico.

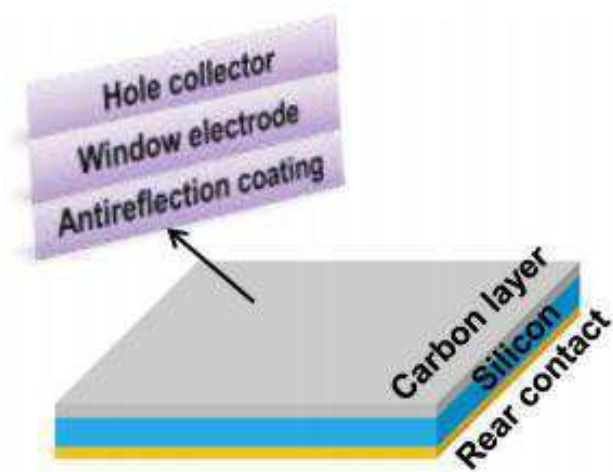
Por conta de ser um tipo de célula fotovoltaica nova (menos de dez anos), e por apresentar bons resultados além de um futuro promissor, o Estado da Arte aqui abordada será em relação às células solares com Heterojunção entre Carbono e Silício, dando ênfase especificamente as células com heterojunção entre Nano tubos de Carbono e Silício.

## 4.2 HETEROJUNÇÃO CARBONO/SILÍCIO

Semelhante ao Silício, o Carbono (C) é um elemento abundante na natureza. Nano materiais de Carbono, que tem seu tamanho ou estrutura controlada em nano escala, se tornaram um dos campos de pesquisa científicos mais ativos, e existem em uma variedade de alótropos, como os fulerenos, nano tubos de Carbono, Grafeno e outros. Uma das principais vantagens do uso de nano materiais de Carbono esta na flexibilidade, área de superfície, estabilidade química, mobilidade e propriedades optoeletrônicas, assim os alótropos de Carbono com propriedades semicondutoras passaram a ser estudados no uso de células solares com o Silício, surgindo assim as células de heterojunção Carbono/Silício.

Os materiais de Carbono são altamente versáteis, assim, se camadas de Carbono com diferentes bandas proibidos e alótropos variados podem ser preparados, uma célula fotovoltaica pode ser produzida, onde o Carbono serve de múltiplas funções, como eletrodo superior, zona coletora (lacunas) e também como camada antirreflexão. A Figura 4.1 ilustra uma célula típica com heterojunção.

Figura 15 - Estrutura típica de uma célula com heterojunção Carbono/ Silício



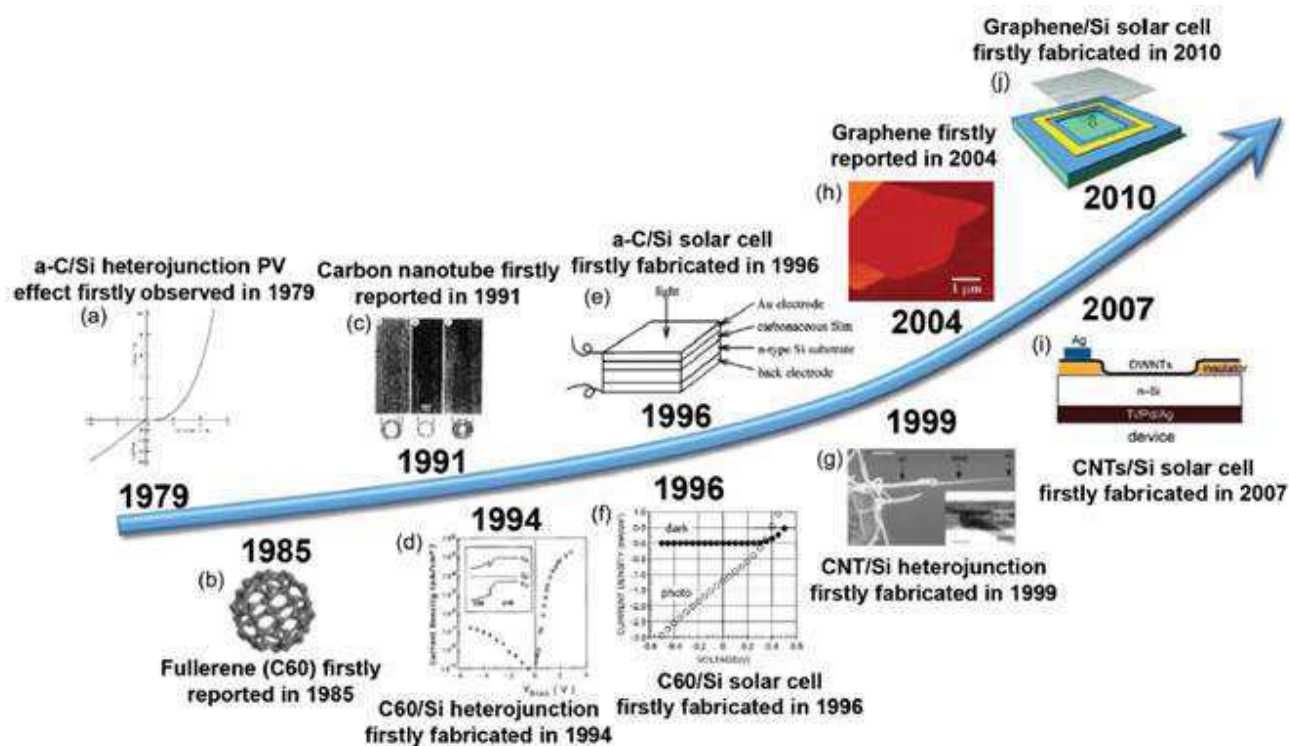
Fonte : Modificada de Li et al, 2015

A heterojunção é o nome dado a uma junção entre metal – semicondutor, ou entre dois semicondutores diferentes, e não mais entre dois semicondutores iguais com dopagens diferentes, que é o caso da heterojunção entre o Carbono e o Silício, que vem reacendendo o entusiasmo na pesquisa em células solares, principalmente com os nano tubos de Carbono e o Grafeno, materiais primeiramente relatados em 1991 e 2004,

respectivamente. A revolução nessa área se deu pelo fato de que na heterojunção tem-se um aumento na eficiência da dissociação de elétrons na junção  $pn$ , e que esse processo é bem mais rápido do que na homojunção, devido à estrutura atômica do Carbono.

A Figura 4.2 a seguir ilustra a evolução e pontos significativos das heterojunções Carbono/Silício.

Figura 16 – Desenvolvimento das células solares de heterojunção Carbono/Silício



Fonte: Li et al,2015.

Os materiais de Carbono formam dois tipos de ligações quando em contato com substratos de Silício: Junção  $p-n$ , que ocorre entre dois semicondutores e a junção Schottky, que ocorre entre um metal e um semicondutor. A junção  $p-n$  na heterojunção do Carbono/Silício abordada nesse trabalho, funciona com o Carbono funcionando como o elemento portador de lacunas, ou seja, o Carbono tem uma dopagem do tipo  $p$ , e o efeito fotovoltaico ocorre da mesma forma da Junção de Silício tipo  $p$  e tipo  $n$ .

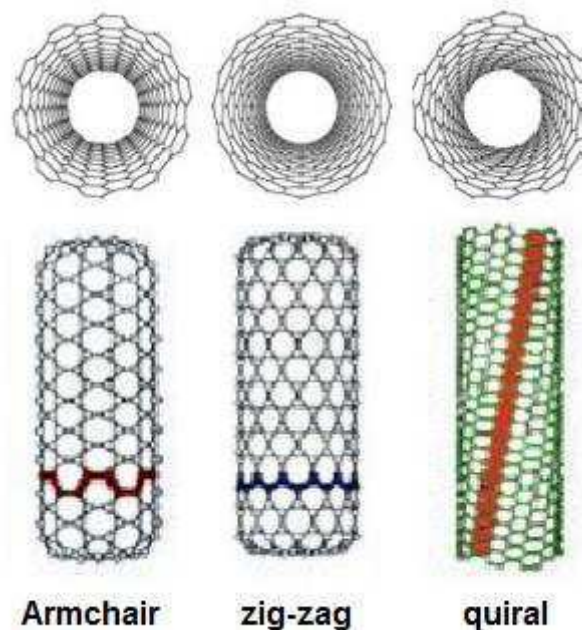
### 4.3 HETEROJUNÇÃO NANO TUBOS DE CARBONO/SILÍCIO

Nano tubos de Carbono (NTC) são estruturas cilíndricas formadas por alótropos de Carbono organizados em geometria hexagonal contínua. Pode-se dizer de forma



simplificada que os NTCs são camadas de grafeno enroladas em forma de cilindro e “tampada” com estruturas de fulereno. Dependendo da forma como a camada de Grafeno é enrolada (zigzag, armchair ou quiral), os nano tubos podem ter propriedades metálicas ou semicondutoras (com bandgaps variáveis entre 0,4-2,0 eV), sendo na maioria das vezes 40% metálicos. A Figura 4.3 ilustra as formas da camada de Grafeno enrolada.

Figura 17 – Desenvolvimento das células solares de heterojunção Carbono/Silício



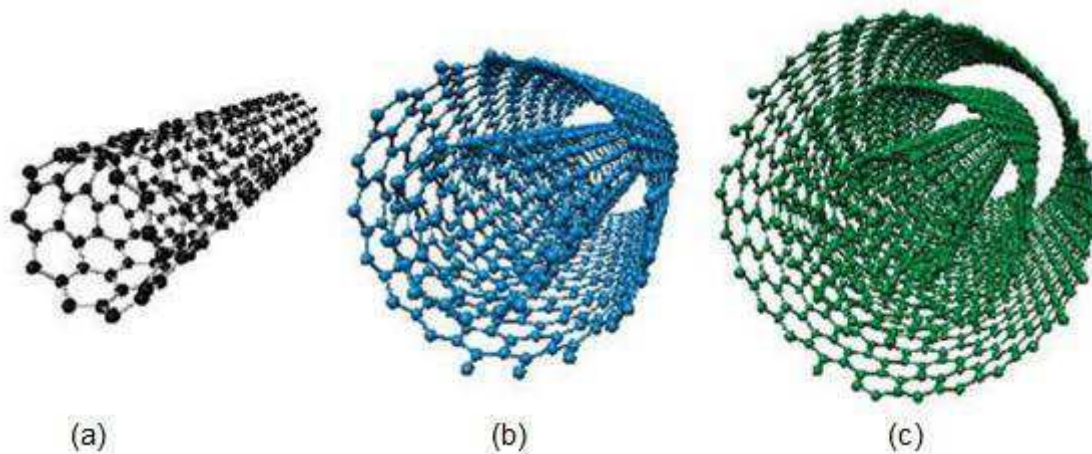
Fonte: Modificado do Disponível em <<http://pt.slideshare.net/materiaissustentabilidade/nanomateriais/>>. Acesso em 26 de abril de 2016

Os tubos apresentam diâmetros que vão desde valores menores de 1nm a valores em torno de 50nm e são classificados em três principais tipos segundo o numero de camadas:

- Nano tubos de paredes simples (*Single Walled Nano Tubes – SWNT*)
- Nano tubos de paredes múltiplas (*Multi Walled Nano Tubes – MWNT*)
- Nano tubos de paredes duplas (*Double Walled Nano Tubes – DWNT*)

A Figura 4.4 a seguir ilustra os principais tipos de NTC de acordo com seu número de camadas.

Figura 18- Nano Tubos De Parede: (A) Simples - (B) Dupla - (C) Múltipla



Fonte: Dumé *apud* Carvalho et al, 2015.

Os nano tubos de Carbono de paredes múltiplas (dos quais os nano tubos de parede dupla fazem parte) foram relatados pela primeira vez em 1991 por Lijima, em seguida os nano tubos de parede simples foram sintetizados em 1993 (Zhuet al, 2015).

A primeira célula de heterojunção NTC/Si foi fabricada pela primeira vez em 1999, porém a primeira aplicação de sucesso foi relatada em 2007, onde NTCs de parede dupla foram usadas com Silício com dopagem-n, com uma eficiência de apenas 1,3%. Assim novos projetos ópticos e novas tecnologias foram empregados para melhorar a heterojunção, chegando a eficiência de 7,4% em 2008, e a 17% apenas oito anos depois, em 2015.

Após o uso de nano tubos de parede dupla, foi à vez dos nano tubos de paredes simples e múltiplas serem testadas no uso de células solares com Silício, por conta de sua banda proibida sintonizável e melhor transporte de portadores os NTCs de parede simples foram considerados mais adequados. As propriedades dos NTCs de parede simples se mostraram extremamente sensíveis ao ambiente, pois ao serem expostos ao ar, os nano tubos absorveriam o oxigênio e sofreriam uma dopagem do tipo-*p*, por conta da afinidade com os elétrons do ar.

#### 4.3.1 PREPARAÇÃO DOS NTCs DE PAREDE SIMPLES

As primeiras células solares com junções *p-n* com heterojunção entre os NTCs e Silício tinha uma baixa eficiência, que era responsabilizada, também, pela alta resistividade entre os feixes dos nano tubos de parede simples. A tentativa de melhorar a eficiência das células fotovoltaicas, e o processo de preparação dos filmes de nano tubos de Carbono de parede simples, que até então tinha sido por um processo de aerografia, foram otimizados.

Os principais métodos usados são: Arco elétrico, ablação a laser e método de deposição química de vapor (*CVD – Chemical Vapor Deposition*).

Arco elétrico e ablação a laser foram as primeiras técnicas utilizadas para a produção dos NTCs de paredes simples e múltiplas, e são usados até hoje. Enquanto o processo de Arco elétrico é capaz de produzir nano tubos em grande escala, o mesmo não ocorre com o processo de ablação a laser, porém, tem-se nano tubos mais puros como resultado.

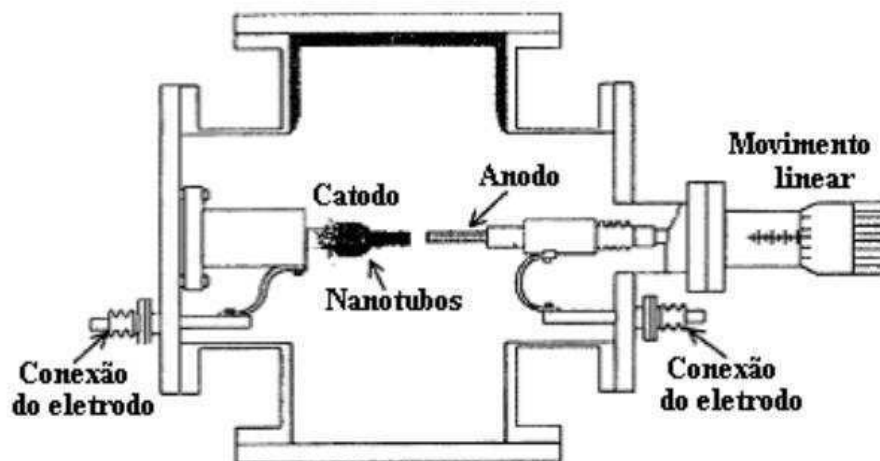
O método de CVD vem sendo mais amplamente utilizado recentemente, pois permite melhor controle dos nano tubos a temperaturas menores comparativamente a outros processos (Fernandes, 2008).

#### 4.3.1.1 DESCARGA POR ARCO ELÉTRICO

O método de descarga por arco foi utilizado na obtenção dos primeiros nano tubos, tanto de paredes simples como de parede múltipla, com diâmetros de cerca de 0,5 nm até 20 nm e comprimentos que vão de 0,5  $\mu\text{m}$  até mais de 10 0,5  $\mu\text{m}$ . (Fernandes, 2008).

O princípio de funcionamento do método de descarga por arco elétrico está baseado numa descarga elétrica gerada entre dois eletrodos de grafite, porém, um deles (anodo) está preenchido com partículas metálicas catalisadoras de metais de transição (principalmente Fe, Ni, Co e suas combinações por dissolverem facilmente o Carbono e formarem carbonetos). A alta temperatura entre os eletrodos permite a sublimação do Carbono formando-se em volta do catodo um colar frágil com aspecto de flor, altamente denso em NTC de paredes simples (Silva, 2006). A Figura 4.5a seguir ilustra um sistema utilizando o método de descarga por arco.

Figura 19 - Esquema De Uma Câmara De Síntese De Nano Tubos Por Descarga Por Arco



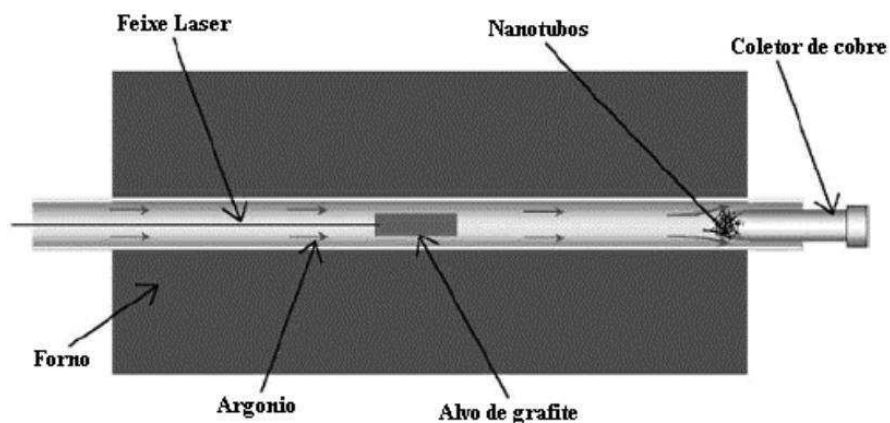
Fonte: Thostenson et al *apud* Silva, 2006

#### 4.3.1.2 ABLAÇÃO A LASER

O processo de descarga a laser também é capaz de produzir tanto nanotubos de paredes simples como de paredes múltiplas, e teve seu desenvolvimento estimulado pela necessidade de uma produção de maior quantidade de fulerenos.

Nesses métodos, o Carbono é vaporizado a partir da superfície de um disco de grafite mistura também com metais de transição, utilizando um laser pulsado e focalizado. O alvo de grafite é inserido no meio de um tubo de quartzo mantido numa temperatura controlada da ordem de 1200°C. Os NTCs de paredes simples formados são arrastados mediante um fluxo de hélio e posteriormente condensados numa superfície coletora refrigerada de cobre (Silva, 2009). O Esquema de um equipamento usado no método de ablação a laser é ilustrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Esquema De Um Equipamento Utilizado No Método De Ablação Por Laser



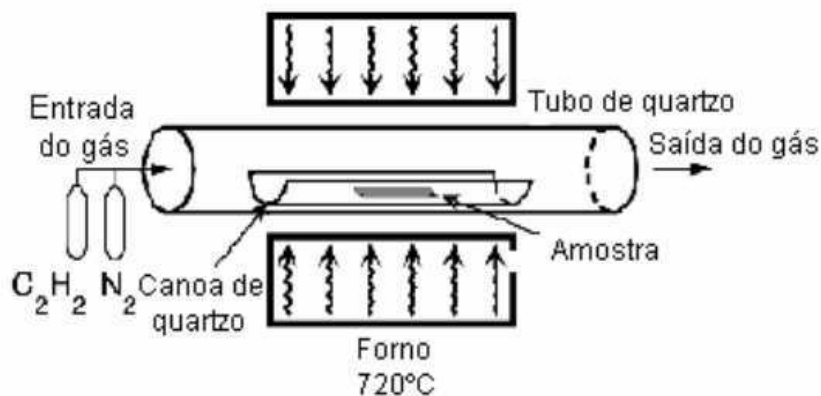
Fonte: Thostenson et al *apud* Silva, 2006

#### 4.3.1.3 DEPOSIÇÃO QUÍMICA A VAPOR

No método de CVD, representado na Figura 4.7, o substrato contendo partículas metálicas (Fe, Ni ou Co) é colocado em uma canoa de quartzo e introduzido em um forno tubular sob atmosfera inerte ou redutora. Em seguida introduzem hidrocarbonetos insaturados (acetileno, etileno), que se decompõem. As partículas dos metais atuam como núcleos de crescimento dos NTC (Silva, 2009).

Um maior controle das variáveis de síntese é possível com esse método, principalmente quando comparado aos métodos anteriores. Com isso, ficou possível a obtenção de grandes quantidades de NTC de boa qualidade e com baixa quantidade de impurezas.

Figura 20.7 - Esquema De Um Reator De Deposição Química Na Fase Vapor



Fonte: Modificado de Silva, 2009.

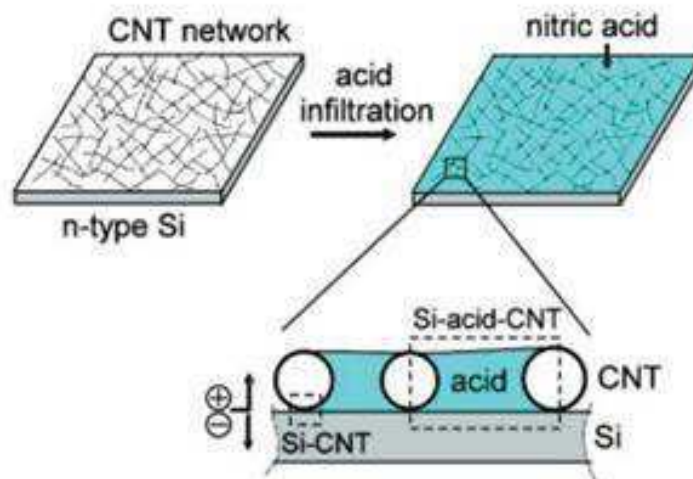
## 4.4 DOPAGEM QUÍMICA DOS NANO TUBOS DE CARBONO

Após a síntese dos nano tubos de Carbono, a maior eficiência de células solares sem nenhum tratamento adicional chegou a apenas 11%. Essa baixa eficiência se dava, também, pela mistura de semicondutores e nano tubos metálicos e a baixa condutividade dos feixes de nano tubos de Carbono.

Na tentativa de melhorar a qualidade da heterojunção e dos NTCs, muitos esforços têm sido dedicados nos estudos de dopagens químicas dos nano tubos para a melhoria das células solares, tais como ácidos, compostos inorgânicos, polímeros, entre outros.

Uma das abordagens mais eficazes foi a dopagem dos NTCs no “*estado molhado*”. Jia et al *apud* Li et al, 2015 relatou uma dopagem de nano tubos de Carbono com HNO<sub>3</sub> (ácido nítrico) fluido, onde, após a infiltração no ácido na rede de nano tubos a eficiência da célula solar chegou a 13,8%, de uma antiga eficiência de 6,2% com uma densidade de corrente de 36,3 mA cm<sup>-2</sup>, tensão de circuito aberto (V<sub>oc</sub>) de 528 mV, e fator de forma (ou fator de preenchimento) (FF) de 0,72. A alta eficiência foi beneficiada, acima de tudo, pela diminuição da resistência da membrana de NTC devido a sua dopagem *p* e remoção de moléculas residuais, e pela formação de uma célula foto-eleto-química na interface Silício/eletrólito. Além do ácido líquido, líquidos iônicos eletrólitos poderiam também melhorar a eficiência. A Figura 4.8 ilustra uma célula com dopagem ácida.

Figura 21 - Ilustração Da Célula Solar NTCs/Silício e a infiltração do ácido nítrico na rede de NTCs para formar a unidade Foto-Eleto-Química Silício-Ácido-NTC na interface.



Fonte: Modificado de Li et al, 2015

Apesar da melhoria na eficiência, a dopagem por “*estado molhado*” sofria com a volatilidade do líquido, sendo o novo desafio estabilizar o desempenho, dessa forma, métodos de dopagem em “*estado seco*” passaram a ser introduzidos, além da combinação dos dois estados *seco/molhado*.

De acordo com Li et al, 2015, o desempenho das células foi aprimorada, com a melhoria no transporte dos portadores após serem lançados diretamente nano fios de prata (*AgNW – Ag nano wires*) sobre uma junção de NTC de parede simples e Silício.

Após essa dopagem a seco, a eficiência da célula aumentou de 4,31% para 7,89% devido aos percursos dos foto portadores fornecidos pelo filme de nano fios de prata (Y. Jung et al, 2014 *apud* Li et al ,2015).

Como teste de combinação dos dois métodos molhado/seco, ácido nítrico e sais de ouro foram usados para uma dopagem *p* dos NTCs de paredes simples e otimizar as propriedades fotovoltaicas, assim, a célula solar exibiu uma eficiência de 11,2% com uma densidade de corrente de 28,6 mA cm<sup>-2</sup>, V<sub>oc</sub> de 530 mV, e FF de 0,74.( Li et al 2015)

Além da dopagem tipo-*p*, a dispersão óptica das nano partículas de ouro também participava no reforço da absorção de luz.

Dopagem para se conseguir NTCs tipo *n* foram obtidas para uma heterojunção com o Silício tipo *p*. Porém sem muito sucesso, atingindo uma eficiência Record de apenas de 7,53%.

#### 4.5 REVESTIMENTO ANTIRREFLEXO (AR)

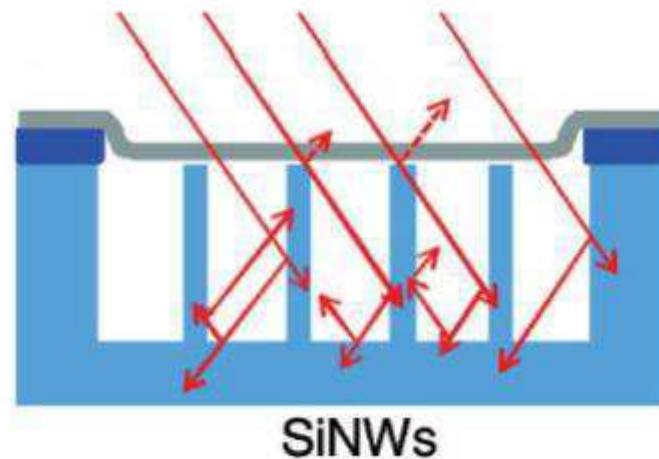
A refletância pode ser definida como a fração de energia refletida sobre a fração de energia incidente em uma superfície, geralmente dado em porcentagem, e no caso das células solares, é um fator que influencia diretamente a eficiência da absorção da luz solar para o efeito fotovoltaico.

O Silício plano tem uma alta refletância, de cerca de 30-40% da gama de luz visível (Li et al, 2015), o que impede o uso eficiente da luz incidente. Dessa forma, projetos ópticos de nano estruturas foram desenvolvidos para um *revestimento antirreflexo* (AR) das células solares, para assim, ao formar uma camada de revestimento com uma baixa refletância, aumentar a fração de luz absorvida, e conseqüentemente diminuir a perda de fótons pela célula.

O comprimento de onda da luz visível incidente também afeta sua absorção, e ao mesmo tempo, nas camadas antirreflexão foi empregado o efeito de aprisionamento de luz (*light trapping*) que são “armadilhas” na estrutura, em formato de “buracos”, criados para aprisionar a luz absorvida. A ideia básica consiste no fato de que a refletividade da onda depende do ângulo em que a luz incide no meio, dessa forma, com uma estrutura com vários “buracos”, existiria uma maior chance de quando refletidos ao atingirem certos locais da nano estrutura, ele seja refletido mas continue excitando os elétrons,

evitando que os fótons escapem sem gerar energia. Dessa forma, o aprisionamento de luz acaba melhorado também o a absorção igualitária de todos os comprimentos de onda como a luz vermelha, por exemplo, que tem um maior comprimento de onda e uma menor energia, e que acaba sendo menos absorvida. A Figura 4.9 demonstra a ideia das armadilhas na estrutura do aprisionamento de luz.

Figura 22 - Esquema do funcionamento do aprisionamento de Luz, usando nano fios de Silício.



Fonte: Modificado de Li et al, 2015

Nesse caso, a pastilha de Silício normal foi substituída por nano fios de Silício (*SiNW*), que são produzidos a partir das pastilhas de Silício tipo-n, e tem como maior vantagem suprimir a reflexão da luz e aumentar a sua absorção.

Relacionado à refletância, tem-se a refração, que é o desvio na direção de propagação da luz quando surge uma interface no caminho óptico de propagação, ocorre devido a uma diminuição da velocidade da luz no interior dos materiais transparentes, devido polarização eletrônica do meio material. Efeito esse que também define o índice de refração.(Oliveira, Ferreira, 2009). O índice de refração representado pela letra  $n$  é uma grandeza adimensional, dado pelo quociente entre a velocidade de propagação de um raio de luz no vácuo ( $c$ ) e sua velocidade de propagação no meio ( $v$ ):

$$n = \frac{c}{v} \quad (7)$$

O índice de refração é sempre maior que 1, já que ele representa o quanto a velocidade da luz diminui, em relação a velocidade da luz no vácuo ao atravessar aquele

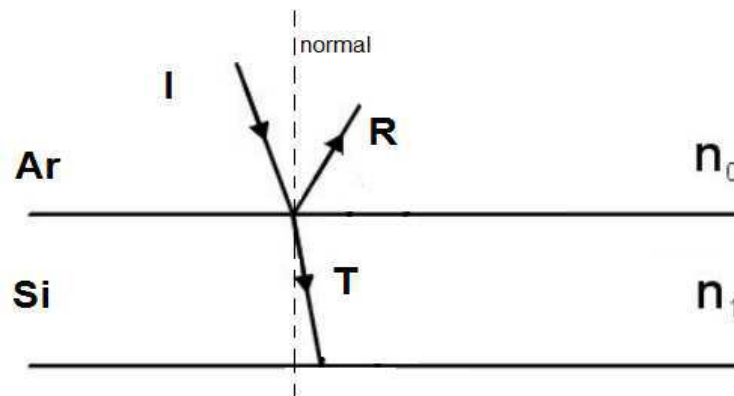


meio. Lembrando que quanto maior a velocidade, menor a frequência de cada cor, e quanto menor a frequência, menor sua energia.

A camada de antirreflexão, como já foi dito, é usada para diminuir a perda da absorção da luz pela reflexão ao tocar o vidro protetor das células solares. A redução dessa reflexão é semelhante as mesmas usadas nos equipamentos ópticos das lentes das câmeras.

Por uma maior facilidade didática, será usada uma célula simples com homojunção de Silício para abordar o fenômeno, porém, o seu entendimento faz-se suficiente para tratar das células com heterojunção NTCs/Silício. Na Figura 4.10 têm-se um esquema simples de uma célula de homojunção de Silício, exemplificando o fenômeno:

Figura 23 - Esquema Da Reflexão E Transmissão Da Radiação No Silício



Fonte: Modificado de Ly, 2007.

Onde,  $I$  é Radiação incidente no Silício,  $R$  é Fração da radiação refletida pela camada do Silício,  $T$  é Fração da radiação transmitida para o Silício,  $n_0$  é Índice de refração do ar que é igual a 1, e  $n_1$  é Índice de refração do Silício que é igual a 3,8.

Segundo a *Lei de Snell-Descartes*, no caso simples de uma incidência normal em um meio não observador, a intensidade da luz refletida depende dos índices de refração do meio, e pode ser dada por:

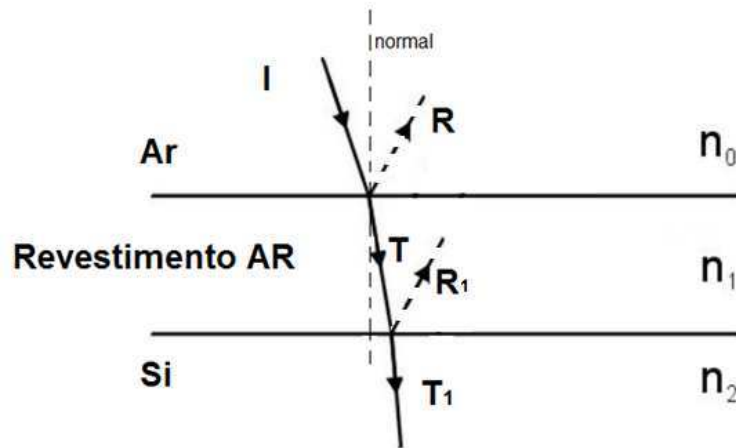
$$R = \left( \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2 \quad (8)$$

A fração da luz transmitida, por não ter nenhuma parcela absorvida é

$$T = 1 - R \quad (9)$$

Como a ideia é minimizar o máximo possível a componente Refletida (R), e aplicando o revestimento antirreflexo, tem-se o seguinte esquema ilustrado na Formula 4.11.

Figura 24—Célula com Revestimento AR. A componente refletida (R) ao atingir o Revestimento AR é minimizada, e uma parcela maior da luz é absorvida e direcionada pelo Silício



Fonte: Modificado de Ly, 2007.

Onde  $I$  é Radiação incidente no Silício,  $R$  é Fração da radiação refletida pelo revestimento AR,  $R_1$  é fração da radiação refletida pela camada do Silício,  $T$  é Fração da radiação transmitida para o Silício,  $T_1$  é Fração da radiação transmitida pelo o Silício,  $n_0$  é Índice de refração do ar que é igual a 1,  $n_1$  é o Índice de refração do Revestimento AR e  $n_2$  é Índice de refração do Silício igual a 3,8.

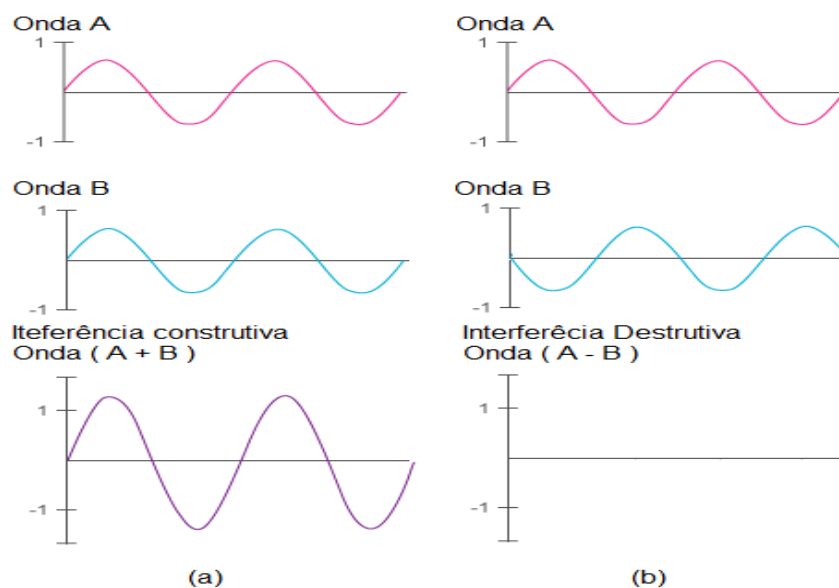
Desta forma, torna-se claro que a ideia é maximizar o Máximo possível as componentes  $T$  e  $T_1$  e minimizar a componente  $R$ . Logo, de acordo com derivações das formulas da Lei de Rayleigh-Jeans, pode-se ser encontrado a melhor índice de refração para o revestimento AR, de acordo com a fórmula a seguir:

$$n_1 = \sqrt{n_0 \cdot n_2} \quad (10)$$

Como o  $n_0=1$ , por ser o índice de refração do ar, e como o índice de refração do Silício é  $n_2=3,8$ , tem-se que o valor ideal do ponto de vista da refletância, para uma célula solar, deveria ter o índice de refração de 1,9 (Nitreto de Silício), e absorção desprezível como foi considerado na dedução. A formula anterior funciona somente como uma aproximação, já que não são consideradas a distribuição espectral da radiação solar.

De acordo com a Figura 4.11 pode-se observar a existência de uma componente  $R_1$  que representa a fração da luz refletida ao encontrar o Silício, assim sendo, outra forma de observar essa camada de antirreflexão é entendendo o fenômeno de interferência destrutiva das ondas de luz. Interferência destrutiva ocorre quando duas ondas de fase diferentes interagem entre si, elas se somam destrutivamente, onde a onda resultante terá uma amplitude que é a diferença entre as amplitudes das duas ondas originais, chegando a ser zero, caso as ondas estejam totalmente defasadas. Analogamente a interferência construtiva é a interação de ondas em fase, que se somam construtivamente, tendo como resultado uma onda com amplitude igual a soma das duas ondas originais. A Figura 4.12 ilustra as interferências destrutivas e construtivas.

Figura 25 - Ilustração Da (A) Interferência Construtiva e (B) Interferência Destrutiva Das Ondas

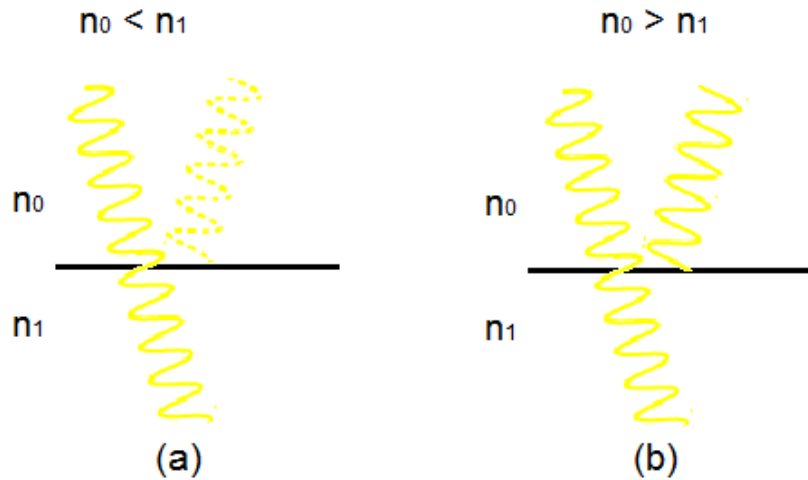


Fonte: Modificado de Ly, 2007.

O uso da ideia da interferência destrutiva no revestimento antirreflexo passa pelo comportamento das ondas ao atravessarem materiais de diferentes índices de refração.

Quando a luz viaja e atinge um meio que tem um índice de refração maior que o meio que a luz está percorrendo, a luz refletida terá uma mudança em sua fase de  $180^\circ$ , e no caso contrário, onde irá atingir um meio com um índice menor do que o do meio percorrido, a forma de onda não será afetada. Em ambos os casos a luz refratada não sofrerá mudança em sua fase, como é ilustrado na Figura 4.13:

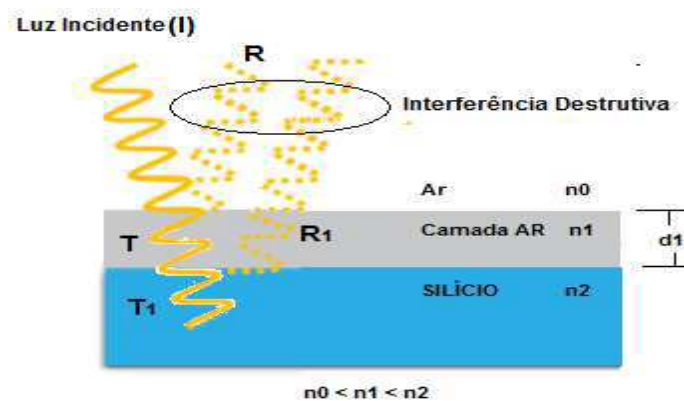
Figura 26- (a) Luz refletida tem uma mudança de  $180^\circ$  em sua fase (b) Luz refletida não tem mudança em sua fase. Em ambos os caso a luz refratada não tem alteração em sua fase.



Fonte: Modificado de Li et Al,2015

Quando a luz vindoura da atmosfera ( $n_0 = 1$ ) e atinge a camada AR ( $n_1 > 1$ ), sua parcela refletida (R) sofre uma mudança na fase de sua onda de  $180^\circ$ , enquanto sua parcela refratada (T) segue seu caminho sem nenhuma mudança na fase até atingir o Silício. Aqui, novamente, ocorrerá mais uma reflexão e uma refração. Como o índice de refração do Silício é maior que o índice de refração do revestimento AR ( $n_2 > n_1$ ), a parcela refletida ( $R_1$ ) terá uma mudança de  $180^\circ$  em sua fase, e a parcela refratada ( $T_1$ ) não sofrerá nenhuma mudança. Lembrando que a parcela refletida  $R_1$  não sofrera mudança ao passar dos meios de maior para menor índice (do revestimento AR para o ar), como ilustra a Figura 4.14.

Figura 27 - Esquema da reflexão e refração da luz ao incidir em uma célula básica de Silício com revestimento ar, com detalhe para a formação da interferência destrutiva.



Fonte: Modificado de Li et Al,2015.

A interferência destrutiva ocorre quando as duas parcelas refletidas ( $R$  e  $R_1$ ) se interceptam, e por estarem defasadas, elas se somam de forma destrutiva, ou seja, sem ondas refletidas. Porém, como pode ser visto pelo esquema da Figura 4.14 inicialmente as duas ondas refletidas ( $R$  e  $R_1$ ) estão igualmente defasadas de  $180^\circ$  em relação a luz incidente ( $I$ ), não havendo nenhuma defasagem entre si, e a ocorrência ou não dessa defasagem depende da distancia que a onda  $R_1$  percorre até sair do revestimento AR, ou seja, é necessário dimensionar o valor de  $d_1$  para que a onda ao sair do meio de revestimento AR esteja 100% defasado em relação a  $R$ .

Uma vez que você tenha o índice de refração do material desejado para o revestimento AR ( $n_1$ ), o valor de  $d_1$  pode ser encontrado pela formula abaixo:

$$n_1 d_1 = \lambda_0 / 4 \quad (11)$$

Onde  $\lambda_0$  é o comprimento de onda no qual ocorre o mínimo de reflexão.

Dessa forma fica claro que a interferência destrutiva ocorre para um comprimento de onda, e é geralmente usado para os comprimentos de onda menos absorvidos pela célula, como o vermelho e outras cores de menor energia.

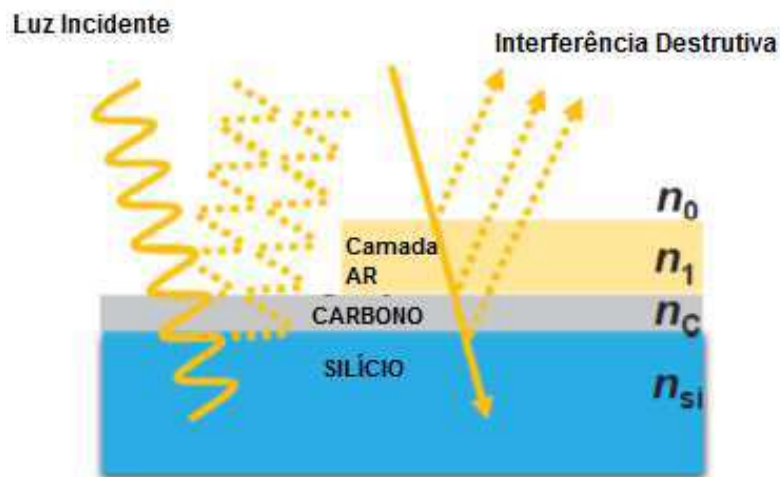
Para as células de heterojunção NTC/Silício, a análise é semelhante, com a diferença da camada de Carbono que também terá que ser levada em consideração o seu tamanho e seu índice de refração, que no caso do Carbono pode ser variado de acordo com a espessura de suas camadas (Por exemplo, o índice de refração é 1,86-2,78 para o Carbono amorfo, 2,58-2,73 para Grafeno, e 2,0-3,0 de Grafeno esfoliada). Dessa forma a própria camada de Carbono deve ser considerada como uma camada de antirreflexão.

A Figura 4.15 ilustra o comportamento de uma célula com heterojunção NTCs/Silício e as respectivas interferências destrutivas.

Polímeros e óxidos de metais foram usados como materiais para o revestimento AR em células com heterojunção NTCs/Silício.

Como exemplo de polímero, temos o polimetil-metacrilato (*PMMA*), ou Acrílico como é mais conhecido. Um Material termoplástico rígido dentre os mais modernos do mercado, por sua alta resistência e leveza. O PMMA com um índice de refração de 1,49 foi usado como revestimento AR na superfície das células solares com heterojunção NTCs/Silício, e a refletância chegou a ser reduzida para menos de 10% na gama de comprimento de onda de 600-1000nm, aumentando a eficiência da célula de 7% para 11,5%.

Figura 28 - Célula com heterojunção Carbono/Silício e seu comportamento com a camada ar. Detalhe para a camada de Carbono agindo como mais uma camada ar. e as interferências destrutivas.

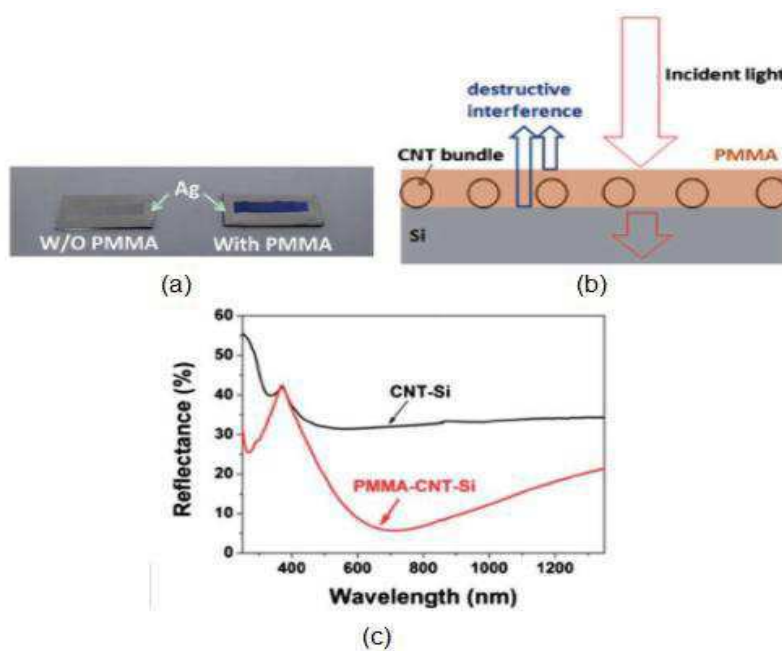


Fonte: Modificado de Li et Al, 2015

A Figura 4.16 ilustra a célula com revestimento PMMA, assim como um esquema da interferência destrutiva e um gráfico com a diminuição da refletância de alguns comprimentos de onda.

Apesar da melhora na eficiência e absorção com o revestimento, polímeros podem ser sensíveis a radiação luminosa de longa duração, sendo assim necessário o uso de materiais mais estáveis.

Figura 29 - (a) Imagem óptica de uma célula NTCs/Silício com e sem revestimento com PMMA (b) Ilustração da redução de reflexão da luz com camada de PMMA. Interferência destrutiva ocorre na camada de superfície (c) Refletância da célula com e sem a camada de PMMA

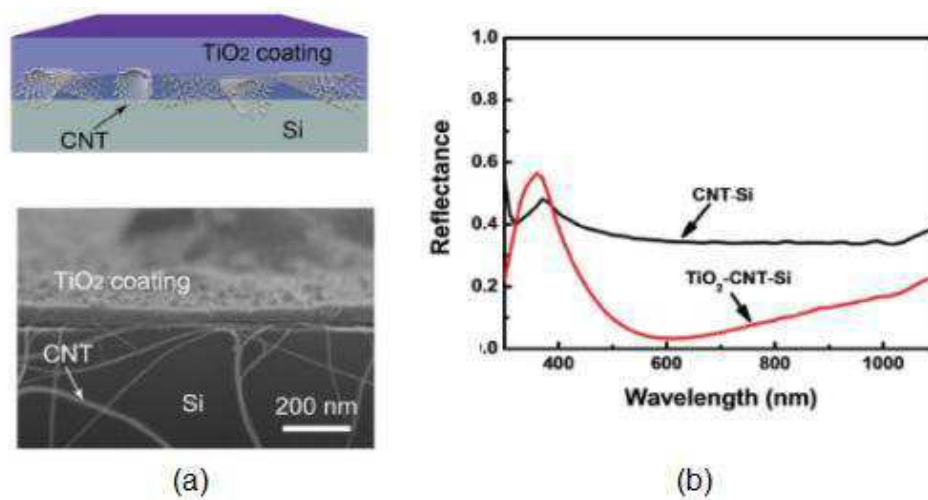


Fonte: Modificada de Li et al, 2015

Como alternativa, o Dióxido de Titânio ( $\text{TiO}_2$ ) foi usado para formar uma camada AR ( $n = 2,2$ , chegando a uma eficiência de 15%. Com uma espessura de 70nm da camada de  $\text{TiO}_2$ , a refletância da luz caiu para menos de 5% para as ondas de 600nm.(Shi et al, 2012)

A camada AR de  $\text{TiO}_2$  está ilustrada a seguir, assim como um gráfico mostrando a diminuição da refletância para alguns comprimentos de onda

Figura 30.17-(A) Ilustração e imagem microscópica de uma célula com NTC/Silício com revestimento AR de  $\text{TiO}_2$ (B) Refletância da célula com e sem  $\text{TiO}_2$ .



Fonte: Modificado de Li et al,2015

O Revestimento Antirreflexo é de grande importância, pois como uma melhor eficiência é um dos pontos cruciais que se busca em uma célula solar, e como essa eficiência está diretamente ligada à absorção de fótons para a dissociação de elétrons, uma melhor absorção de luz solar, e conseqüentemente uma menor perda de fótons, influenciará diretamente na geração de portadores de carga, em um melhor aproveitamento da luz incidente, e em uma melhora significativa da eficiência da célula

## 4.6 DESAFIOS E PERSPECTIVAS

Apesar de todo o avanço alcançado no estudo de nano materiais de Carbono desde sua descoberta, ainda existe muito caminho pela frente. Movidos pelas mudanças dramáticas e descobertas importantes, as pesquisas forneceram um grande conhecimento, sendo a célula solar de Heterojunção Carbono/Silício um exemplo de

aplicação de utilidade pública promissora, porém, alguns gargalos ainda existem na estrada de desenvolvimento dessa tecnologia.

Apesar das células de Carbono/Silício já terem alcançado uma eficiência de 17%, muito dos valores encontrados na bibliografia correspondem a análises de laboratório. Às vezes os materiais da célula tendem a ser instáveis quando expostos a ambientes externos, a área da célula testada é muito reduzida, e até processo de preparação dos nano materiais de Carbono de nano escala para macroescala é um grande desafio, mostrando que o caminho no estudo de melhores células de heterojunção Carbono/Silício ainda é longo.

#### 4.6.1 ÁREA ATIVA E ESTABILIDADE DAS CÉLULAS SOLARES

À área efetiva das células solares de heterojunção e sua eficiência tem uma relação bastante estreita. Apesar do recorde de eficiência da célula de NTC//Silício relatado por Wang et al de 17%, esse resultado não pode ser superestimado, pois sua área ativa era de somente  $0,008 \text{ cm}^2$ . (Wang et al, 2015 apud Li et al, 2015)

A relação entre a área ativa da célula solar e sua eficiência se da pelo fato de que, para aumentar a eficiência da célula, a resistência interna deve ser minimizada, para que o transporte de carga seja maximizado. Por outro lado, os materiais de Carbono são limitados por sua condutividade elétrica para ampliar o tamanho de sua área ativa. A consequência disso é que quando se aumenta a área ativa dos materiais de Carbono, aumentam também sua resistência, diminuindo fortemente as eficiências das células com heterojunção Carbono/Silício, enquanto que áreas muito pequenas dificultariam o seu manuseio e tratamento para outras melhorias.

Uma célula solar de NTC/Silício de 12,2% de eficiência com uma área ativa de  $0,008 \text{ cm}^2$  quando teve sua área aumentada para  $0,07 \text{ cm}^2$  teve uma queda em sua eficiência para menos de 5%. Atualmente, a maior eficiência de células de NTC/Silício de tamanho grande ( $0,49 \text{ cm}^2$ ) é de aproximadamente 11%. (Wang et al, 2015 apud Li et al, 2015).

Na tentativa de melhorar a eficiência das células solares de heterojunção Carbono/Silício, abordagens diferentes de dopagem foram experimentadas, e apesar de algumas já citadas melhoras, as células também passaram a sofrer com a instabilidade dos processos de dopagem, e queda de eficiência da célula.



Segundo investigações sobre a estabilidade das células solares de NTC/Silício realizadas por Weng et al. *apud* Li et al(2015), o doping pode durar várias horas, mas o fator de preenchimento caiu de 0,77 para 0,49 após 146 horas de exposição ao ambiente.

A estabilidade dos materiais está diretamente relacionada a estabilidade a longo prazo da células solares. Na tentativa de melhorar essa estabilidade Jiad et al. *apud* Li et al.(2015) reforçou a estabilidade de NTC por uma camada do polímero dimetil polissiloxano(*PDMS*), e a eficiência sofreu uma ligeira queda de 10,9% para 9.1% durante 20 dias expostas ao ambiente. Cui et al. *apud*Li et al(2015), relatou células solares de NTC/Silício superestáveis com uma eficiência acima de 10% depois de 10 meses de exposição ao ambiente, sem qualquer proteção externa. Foi atribuída a pureza dos NTC de parede simples o motivo dessa alta estabilidade.

A estabilidade das células de heterojunção Carbono/Silício ainda merecem uma enorme atenção e discussão, já que o ambiente de aplicação é um parâmetro de forte influência na estabilidade da célula, já que umidade, radiação e outros fatores devem ser levados em consideração em ambientes externos.

#### 4.6.2 PERSPECTIVA

A célula solar com heterojunção NTC/Silício tem-se mostrado como um campo promissor para o uso de nano tecnologias em células solares, além de fomentar a procura de novos materiais que levem a células cada vez mais eficientes e baratas.

A otimização da qualidade da célula solar com heterojunção NTC/Silício está diretamente relacionada ao controle de qualidade e uniformidade dos materiais de Carbono. Di et al *apud* Li et al(2015)relatou valores estatísticos de células solares de NTC de paredes alinhadas/Silício,e revelou uma eficiência média de 10,1% com um desvio-padrão de 0,32, atribuindo à uniformidade e continuidade dos filmes de NTC. Apesar da dificuldade na qualidade das estruturas do Carbono, os avanços já alcançados levam a uma boa perspectiva de melhora das células NTC/Silício.

Outro caminho está relacionado a compatibilidade das heterojunções Carbono/Silício com as bases de Silício já existentes, podendo ser aproveitadas na indústria de semicondutores, e tendo como base as propriedades ópticas e elétricas da heterojunção, ser alargada para outras aplicações como diodos, moduladores ópticos, foto eletrodos, células foto-eleto-químicas, e assim por diante.

Além do Silício, os nano tubos de Carbono também podem montar heterojunções com outros semicondutores, como o Seleneto de Cádmio (*CdSe*), Arsenieto de Gálio (*GaAs*), Óxido de Zinco (*ZnO*), entre outros.

Além dos nano tubos de Carbono, o Silício também poderia montar uma heterojunção com o Grafeno. O Grafeno é um nano tubo de Carbono “aberto” em formato de folha, e também vem desenvolvendo um papel de grande importância no estudo da nano tecnologia, principalmente pelo seu potencial em aplicações em células fotovoltaicas.

A heterojunção Grafeno/Silício já vem sendo estudada e teve sua primeira célula fabricada em 2010 com uma eficiência de 1,65%. Graças ao desenvolvimento no estudo e pesquisa da heterojunção NTC/Silício, o desenvolvimento da heterojunção usando Grafeno foi rápido chegando a atingir uma eficiência de 15,6% em Junho de 2015, após melhorias em dopagem e projetos ópticos, como revestimento antirreflexo. Suas propriedades elétricas e ópticas, além de seu alto valor de eficiência em apenas 5 anos de estudo, valida célula com heterojunção Grafeno/Silício como uma célula de futuro promissor, e aumenta a perspectiva de células mais baratas e eficientes, além de fomentar a buscar por novas e melhores tecnologias.

## 5 CONCLUSÃO

As células solares já fazem parte, apesar de timidamente, da parte da alimentação de muitas cargas elétricas ao redor do mundo, principalmente no setor Rural, onde levar a energia elétrica da rede fica mais caro.

Tendo em vista aspectos observados, evidencia-se que na busca de células solares cada vez mais viáveis economicamente, as células com heterojunção Carbono/Silício vem se mostrando como uma nova oportunidade de célula solar portátil, mais leve, flexível e mais eficiente, principalmente pelo fato de já ter chegado a uma eficiência de 17%, que é a eficiência média das células de Silício disponíveis no mercado, em apenas oito anos, mostrando que a jornada dos nano materiais está apenas começando, com uma promissora capacidade de alcançar valores de eficiência mais altos com a continuidade de seu estudo.

Em virtude do que foi mencionado, as células de Heterojunção Carbono/Silício ainda passam por algumas dificuldades para saírem dos laboratórios e chegarem até o mercado consumidor, dentre todas as desvantagens das células seus principais gargalos encontram-se na qualidade dos materiais, instabilidade dos dopantes, controlabilidade do cristal, tamanho e estrutura dos materiais de Carbono

Conclui-se que o uso prático dessas células ainda levarão algumas décadas de melhorias e colaborações entre engenheiros e cientistas, se concentrando principalmente na melhora da eficiência, materiais de uso e complexidade de fabricação, pois como foi dito anteriormente, o grande salto na eficiência das células de heterojunção em pouco tempo se deve principalmente a tecnologia já existente das células com homojunção de Silício da primeira geração, sendo a síntese de nano materiais de Carbono atual a oportunidade para melhorias no futuro, desempenhando um grande papel principalmente no campo de películas fotovoltaicas finas e portáteis, onde cada nova tecnologia encontrada ou projeto estrutural encontrado daria um passo adiante para a aplicação prática de uma célula mais fina, eficiente e barata.

## REFERÊNCIAS

- Aramizu, Juliana. "Modelagem e Análise de Desempenho de um Sistema Fotovoltaico em Operação Isolada e em Paralelo com uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica."
- Braga, Renata Pereira. "Energia solar fotovoltaica: Fundamentos e aplicações." *Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Elétrica* (2008).
- BRITO, Sérgio de Salvo. "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>.
- Carvalho, Alan Bianchi de, Henrique Wallace Vieira Rodrigues, and Marcella Conceição dos Santos Azeredo. "Caracterização de catalisadores de Co-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para produção de SWNT a partir da deposição química a vapor do CH<sub>4</sub>." (2015).
- Coord. TIBA. *Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres*. UFPE, 2001.
- Disciplina: *Fundamentos de Meteorologia* (EAM-010) – Prof. Marcelo de Paula Corrêa – v.1.0.1 Universidade Federal de Itajubá – Instituto de Recursos. Disponível em: [http://www.solar.unifei.edu.br/pdf/EAM10\\_CAP2.pdf](http://www.solar.unifei.edu.br/pdf/EAM10_CAP2.pdf).>
- do Nascimento, Cássio Araújo. *princípio de funcionamento da célula fotovoltaica*. Diss. Universidade Federal de Lavras, 2004.
- Fernandes, Fernando Massa. *Síntese de nanotubos de Carbono orientados e aplicação na produção de pontas de AFM*. Diss. Universidade de São Paulo, 2008.
- Greenpro, Altener Programa Comunitário. "Energia Fotovoltaica-Manual sobre tecnologias, projecto e instalação." *Europa: Comissão Europeia* (2004).
- Li, Xinming, ZhengLv, and Hongwei Zhu. "Carbon/Silicon Heterojunction Solar Cells: State of the Art and Prospects." *Advanced Materials* 27.42 (2015): 6549-6574.
- Ly, Moussa. "Desenvolvimento e análise de filme anti-reflexo de sulfeto de zinco para células solares." (2007).
- Moraes, Bruno Carlos dos S., and Charles Renato Pinto Barbosa. "PROJETO DE AQUECIMENTO SOLAR TÉRMICO–FOTOVOLTAICO OFF GRID DE PISCINAS."
- Pereira, E. B., et al. *Atlas brasileiro de energia solar, INPE, São José dos Campos, Brasil*. ISBN 978-85-17-00030-0, 2006.
- Pinho, João T., and Marco A. Galdino. "Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos." *Rio de Janeiro: CEPTEL–CRESESB* (2014).
- Santos, Marcelo Reis dos. "Nanocompósitos polímero condutor / nanotubos de Carbono: síntese, caracterização e aplicação em músculos artificiais", 2014.
- Silva, Cristiane Abrantes. "Purificação e caracterização de nanotubos de Carbono para utilização como suporte de catalisadores em eletrodos de células a combustível." *Monografia de Final de Curso, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/SP, Brasil* (2006).
- Vallêra, Antônio M., and Miguel Centeno Brito. "Meio século de história fotovoltaica." *Gazeta da física* 29 (2006).
- VASCONCELOS, Y. *Odesafio do sol: Nova geração de células flexíveis tenta superar dificuldades para aumentar o uso de energia fotovoltaica no mundo*. Pesquisa Fafesp Eletrônica, ed. 207. p. 72-75, 2013
- Barbosa, Igor Smale Barros. "Dimensionamento De Um Sistema Solar Fotovoltaico Isolado" (2014)