

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

YASMIM DE MORAIS MENDONÇA

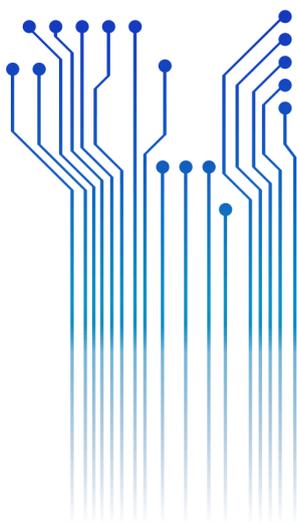


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
EFICIÊNCIA FOTOVOLTAICA: UM ESTUDO DA EVOLUÇÃO



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
Junho de 2016

YASMIM DE MORAIS MENDONÇA

EFICIÊNCIA FOTOVOLTAICA: UM ESTUDO DA EVOLUÇÃO

*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: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, D. Sc.

Campina Grande
Junho de 2016

YASMIM DE MORAIS MENDONÇA

EFICIÊNCIA FOTOVOLTAICA: UM ESTUDO DA EVOLUÇÃO

*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: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Leimar de Oliveira, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha mãe Lúcia e ao meu padrasto Ronaldo (*in memoriam*), aos quais dedico todo o meu amor e toda a minha gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, por me fornecer saúde, forças e determinação para enfrentar cada obstáculo que surgiu ao longo dessa caminhada.

À minha mãe, Lúcia, e ao meu padrasto Ronaldo (*in memoriam*) pela compreensão em alguns momentos em que estive ausente durante essa jornada. Pelos ensinamentos, incentivos, confiança, pelo amor, enfim, por estarem presentes em minha vida a cada instante. Sem dúvida, sem o apoio de ambos, essa caminhada teria sido mais difícil.

Agradeço também a toda minha família, em especial ao meu irmão Rodrigo, meu primo Júnior e minha tia Aparecida, que com todo carinho e apoio, sempre estavam torcendo por mim para eu chegar a esta etapa da minha vida.

À minha amiga Milene, a qual tive o prazer de conhecê-la no curso, por ter me dado todo o apoio para que eu não desistisse ao longo dessa jornada, e por ter tido toda a paciência nos momentos mais difíceis do curso.

As minhas amigas de longos anos, Laíla e Ionik, pela compreensão nos momentos em que não estive presente. Mesmo nesses momentos distantes estavam torcendo por mim para que tudo desse certo. Por todo o amor, apoio e paciência que tiveram comigo durante esses anos de graduação.

Ao professor Leimar pela orientação, apoio e empenho dedicado à elaboração deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

“Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho.”

Dalai Lama.

RESUMO

A geração de energia elétrica a partir das fontes renováveis está aumentando consideravelmente a cada ano, em especial a energia solar fotovoltaica. Menor elemento do sistema fotovoltaico, a célula solar fotovoltaica, é responsável por transformar a energia do sol em energia elétrica. Porém, nem toda a irradiação solar incidente na célula irá contribuir para a geração de uma corrente elétrica. Portanto, este trabalho tem como objetivo, apresentar alguns fatores que influenciam no rendimento da célula fotovoltaica, partindo do princípio, estrutura e funcionamento da célula até os elementos externos que não contribui para a conversão. A forma de abordagem é sistêmica, numa perspectiva multidisciplinar, por meio de estudos relativos à constituição da célula fotovoltaica e análise evolutiva da eficiência de algumas tecnologias. Através de um estudo detalhado sobre as eficiências das células fotovoltaicas ao longo de 40 anos, é possível constatar que a eficiência das células fotovoltaicas mais utilizadas, silício monocristalino e policristalino, pouco evoluiu nos últimos 20 anos. Em contrapartida, a eficiência das células de multijunção e células emergentes estão crescendo linearmente a cada ano. Porém pelo nível de dificuldade tecnológica, não será possível produzi-las em larga escala a curto prazo.

Palavras-chave: Célula fotovoltaica, Efeito fotovoltaico, Eficiência, Fator de forma, Perdas, Radiação incidente, Tecnologia da célula fotovoltaica, Temperatura da célula.

ABSTRACT

The electricity generation from renewable sources is increasing considerably each year, particularly photovoltaic solar energy. Smallest element of the photovoltaic system, photovoltaic solar cell, is responsible for transforming the sun's energy into electricity. However, not all the incident solar radiation in the cell will contribute to the generation of an electric current. Therefore, this paper aims to present some factors that influence the efficiency of the photovoltaic cell, assuming, structure and functioning of the cell to the external elements that do not contribute to the conversion. However, the approach is systemic, a multidisciplinary approach, through studies on the establishment of the photovoltaic cell and evolutionary analysis of the efficiency of some technologies. Through a detailed study on the efficiencies of solar cells over 40 years, it is clear that the efficiency of the used photovoltaic cells, monocrystalline silicon and polycrystalline, hardly changed in the last 20 years. However, the efficiency of multijunção and emerging cells are cells growing linearly every year. But the level of technological difficulty, you can not produce them on a large scale in the short term.

Keywords: Photovoltaic cell, Photovoltaic effect, Efficiency, Form factor, Losses, Incident radiation, The photovoltaic cell technology, Temperature cell.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - (a) Edmond Becquerel (b) Experiência realizada por Becquerel	19
Figura 2.2 - Amostra utilizada por Adams e Day	20
Figura 2.3 - Da esquerda para a direita: Gerald Pearson, Daryl Chapin e Calvin Fuller	20
Figura 2.4 - Célula solar fotovoltaica fabricada por Pearson, Chapin e Fuller	21
Figura 2.5 - Satélite Vanguard I	21
Figura 2.6 - Satélite Explorer VI	22
Figura 2.7 - Satélite Nimbus.....	22
Figura 2.8 - Satélite observatório astronômico.....	23
Figura 2.9 - Aeronave Gossamer Penguin.....	24
Figura 2.10 - Aeronave Pathfinder Plus	25
Figura 2.11 - Parte da tabela periódica	27
Figura 2.12 - Representação bidimensional da ligação covalente da rede cristalina do silício puro	28
Figura 2.13 - Esquema do diagrama de bandas de energia de um semicondutor intrínseco com o silício.....	29
Figura 2.14 - Representação esquemática da substituição (dopagem) de um átomo de silício por um átomo de boro.....	30
Figura 2.15 - Representação esquemática da substituição (dopagem) de um átomo de silício por um átomo de fósforo.....	30
Figura 2.16 - Estrutura cristalina do silício puro, do material dopado com boro e do material dopado com fósforo, respectivamente	31
Figura 2.17 - Difusão de elétrons na junção pn.....	31
Figura 2.18 - Estrutura de bandas de energia em (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolante.....	32
Figura 2.19 - Diagrama de bandas de energia de um semicondutor.....	33
Figura 2.20 - Aproveitamento da radiação solar pelas células fotovoltaicas	34
Figura 2.21 - Estrutura básica de uma célula solar fotovoltaica.....	35
Figura 2.22 - Princípio de funcionamento de uma célula solar fotovoltaica.....	37
Figura 2.23 - Tecnologias das células solares fotovoltaicas.....	38
Figura 2.24 - Da esquerda para a direita: célula de silício monocristalina e célula de silício policristalina	39
Figura 2.25 - Células mc-Si coloridas (a), célula pc-Si verde (b) e célula pc-Si dourada (c).....	40
Figura 2.26 - Da esquerda para a direita: célula fotovoltaica filme fino silício amorfo, CIGS e CdTe	41
Figura 2.27 - Da esquerda para a direita: célula fotovoltaica de <i>Grätzel</i> e orgânica.....	42
Figura 2.28 - Esquema explicativo do novo fotodíodo desenvolvido na Cornell University usando nanotubos	43
Figura 2.29 - Sistema concentrado fotovoltaico (CPV) com emprego de lentes de Fresnel	44
Figura 3.1 - Circuito elétrico equivalente simplificado de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z	46
Figura 3.2 - Curva característica típica de uma célula fotovoltaica	48
Figura 3.3 - Curva característica típica de uma célula fotovoltaica destacando o fator de forma.....	50

Figura 3.4 - Variação da curva I-V com a temperatura da célula com irradiação solar de 1000 W/m ²	51
Figura 3.5 - Variação da curva I-V com a radiação incidente em uma célula com uma temperatura de 25°C	52
Figura 3.6 - Resistências ôhmicas presentes na célula solar fotovoltaica	53
Figura 3.7 - Circuito elétrico equivalente real de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z	54
Figura 3.8 - Efeito da resistência série (Rs) na curva I-V de uma célula fotovoltaica, sendo todas as curvas para a mesma temperatura e irradiância (STC), considerando em aberto a resistência paralelo (Rp = ∞)	55
Figura 3.9 - Efeito da resistência paralelo (Rp) na curva I-V de uma célula fotovoltaica, sendo todas as curvas para a mesma temperatura e irradiância (STC), considerando nula a resistência série (Rs = 0).....	55
Figura 4.1 - Eficiência das células fotovoltaicas	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Evolução da eficiência das células solares fotovoltaicas	26
Tabela 2.2 - Valores de E_g para diversos semicondutor	33
Tabela 2.3 - Eficiência de células fotovoltaicas coloridas.....	40
Tabela 4.1 - Máxima eficiência da célula fotovoltaica (NREL).....	61
Tabela 4.2 - Descrições dos dados obtidos para obtenção da máxima eficiência das células fotovoltaicas	62
Tabela 4.3 - Descrições dos dados obtidos para obtenção da máxima eficiência dos módulos fotovoltaicos	63
Tabela 4.4 - Comparação das maiores eficiências de algumas tecnologias das células fotovoltaicas e dos módulos fotovoltaicos	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Air Mass
CPV	Concentrated Photovoltaics
CSG	Crystalline Silicon on Glass
DSSC	Dye-Sensitized Solar Cell
FF	Fator de forma
FV	Fotovoltaica
LED	Light Emitting Diode
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCPV	National Center for Photovoltaics
NREL	National Renewable Energy Laboratory
OA0	Observatórios Astronômicos Orbitais
OPV	Organic Photovoltaics
TCO	Transparent and Conductive Oxide
STC	Standard Test Conditions.

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
As	Arsênio
a-Si	Silício amorfo
a-Si/ μ c-Si	Multijunção de silício
a-Si:H	Silício amorfo hidrogenado
B	Boro
BC	Banda de condução
BV	Banda de valência
C	Carbono
Cd	Cádmio
CdTe	Telureto de cádmio
CIGS	Disseleneto de cobre, índio e gálio
CIS	Disseleneto de cobre - índio
cm ²	Centímetro quadrado
CSG	Crystalline Silicon on Glass
c-Si	Silício cristalino
Cu	Cobre
CuInSe	Disseleneto de cobre, índio e gálio
E _{BC}	Energia da banda de condução
E _{BV}	Energia da banda de valência
E _g	Energia da banda proibida
eV	Elétron-Volt
G	Radiação solar incidente
G ^r	Radiação incidente em STC
Ga	Gálio
GaAs	Arsenieto de gálio
GaInP	Fosforeto de índio gálio
GaN	Nitreto de gálio
Ge	Germânio

GW	Gigawatt
I_D	Corrente no diodo
I_{MP}^r	Corrente máxima para as condições de referencia
In	Índio
InGaAsP	Fosforeto de índio e gálio arsenieto
I_0	Corrente inversa máxima de saturação do diodo
I_s	Corrente na célula fotovoltaica
I_{SC}^r	Corrente de curto-circuito para as condições de referencia
J	Joule
K	Constante de Boltzmann
kW	Kilowatt
kW/m ²	Kilowatt por metro quadrado
m	Fator de idealidade do diodo
mc-Si	Monocristalino
mV	Milivolt
mW	Miliwatt
MW	Megawatt
N	Nitrogênio
P	Fósforo
pc-Si	Policristalino
P_{MP}^r	Ponto de máxima potência para as condições de referencia
q	Carga elétrica do elétron
R_p	Resistência paralelo
R_s	Resistência série
Se	Selênio
Si	Silício
Si-Cz	Método de Czochralski
SigS	Silício de grau solar
T	Temperatura absoluta da célula
TCO ³	Transparent and Conductive Oxide
Te	Telúrio
TiO ₂	Dióxido de titânio
V	Tensão nos terminais da célula

V_{MP}^r	Tensão máxima para as condições de referencia
V_{OC}^r	Tensão de circuito aberto para as condições de referencia
V_T	Potencial térmico
W	Watt
W/cm ²	Radiação solar incidente por centímetro quadrado
W/m ²	Radiação solar incidente por metro quadrado
Wp	Watt-pico
Z	Carga
μm	Micrometro
η	Eficiência
λ	Comprimento de onda
°C	Graus Celsius
°K	Grau Kelvin

SUMÁRIO

1	Introdução	17
2	Revisão Bibliográfica	19
2.1	Aspectos Históricos da Tecnologia de Células Solares	19
2.2	Efeito Fotovoltaico (entendendo o funcionamento de uma célula)	26
2.2.1	Princípio de Funcionamento de uma Célula Solar Fotovoltaica	28
2.2.2	Princípio Básico de uma Célula Solar Fotovoltaica	32
2.2.3	Estrutura Básico de uma Célula Solar Fotovoltaica	35
2.3	Tecnologia das Células Fotovoltaicas	38
2.3.1	Células Fotovoltaicas de Primeira Geração	38
2.3.2	Células Fotovoltaicas de Segunda Geração	40
2.3.3	Células Fotovoltaicas de Terceira Geração	41
2.3.4	Células Fotovoltaicas de Quarta Geração	42
2.3.5	Células Fotovoltaicas de Quinta Geração	43
3	Eficiência das Células Fotovoltaicas	45
3.1	Modelo Simplificado de uma Célula Fotovoltaica	45
3.2	Fatores que Limitam a Eficiência de uma Célula Fotovoltaica	48
3.2.1	Influência do Fator de Forma	49
3.2.2	Influência da Temperatura da Célula e do Vento	51
3.2.3	Influência da Radiação Incidente	52
3.2.4	Perdas no Circuito Elétrico da Célula	53
4	Evolução da Eficiência das Células Fotovoltaicas	57
5	Conclusão	65
	Referências	67

1 INTRODUÇÃO

Inesgotável e onipresente no planeta Terra, o Sol é a principal fonte de energia no mundo, seja ela como fonte de calor ou como fonte de luz. Aproveitar sua energia é sem sombra de dúvida uma das alternativas energéticas mais propícias para fornecer energia necessária ao desenvolvimento humano e da vida.

Atualmente, o fornecimento de energia elétrica no mundo se baseia na utilização de novas técnicas de geração de energia elétrica, a exemplo de fontes de energia renováveis.

Considerada com uma fonte de energia renovável, a energia solar é responsável por converter a radiação solar em energia elétrica. O sistema solar fotovoltaico é baseado em painéis ou módulos compostos por células fotovoltaicas, as quais são responsáveis por captar a luz do sol e transformá-la em corrente elétrica.

Neste trabalho são apresentados estudos relativos ao funcionamento, estrutura e princípio básico de uma célula fotovoltaica, incluindo os elementos básicos que a constituem, tendo como foco principal apresentar as maiores eficiências das células fotovoltaicas, compreendendo alguns fatores que a limitam.

Objetivando sistematizar o tema a ser abordado, o texto foi organizado em cinco capítulos.

O Capítulo 1 é introdutório, contextualiza-se o trabalho e apresenta sua motivação, principais objetivos e estrutura.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica e um breve histórico da célula fotovoltaica destacando o surgimento das primeiras tecnologias e suas eficiências. Para uma melhor compreensão do funcionamento da célula fotovoltaica, neste capítulo é apresentado o efeito fotovoltaico baseado no elemento mais simples e mais utilizado atualmente, o silício. Explica-se ainda a estrutura do material semicondutor para os cinco tipos de tecnologias das células fotovoltaicas.

O Capítulo 3 apresenta o modelo simplificado da célula fotovoltaica, abordando alguns fatores que limitam a eficiência da célula fotovoltaica, como a influência do fator de forma, da temperatura da célula e o vento, da radiação incidente e as perdas no circuito elétrico da célula fotovoltaica.

No Capítulo 4 é apresentado uma análise evolutiva da eficiência das células fotovoltaicas a partir de dados fornecidos pelo laboratório americano NREL até o ano de 2015. É feita ainda uma análise de algumas eficiências da mesma célula obtida por diferentes laboratórios.

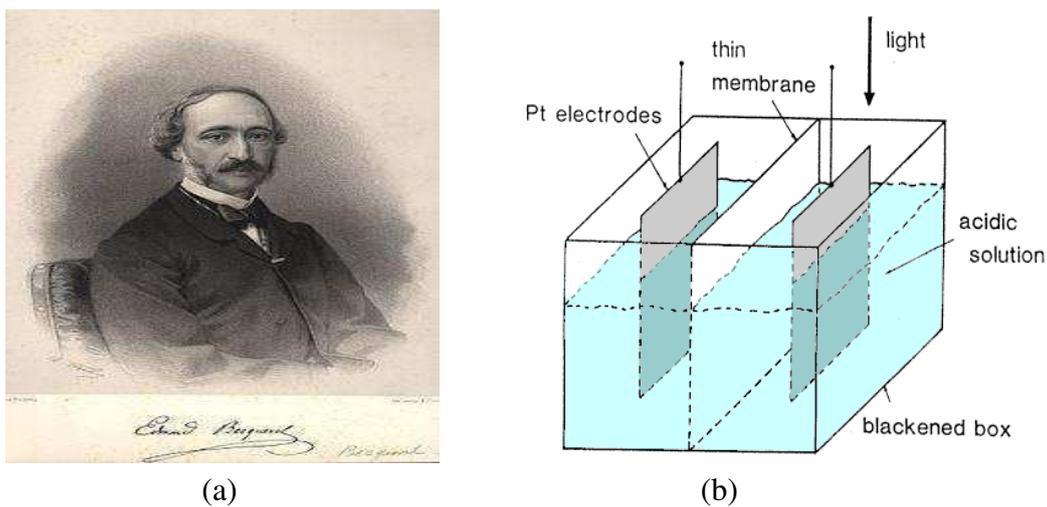
Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas algumas conclusões obtidas a partir da realização deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS DA TECNOLOGIA DE CÉLULAS SOLARES

A célula solar fotovoltaica é um dispositivo responsável por converter a radiação solar em energia elétrica. Esta conversão, denominada de efeito fotovoltaico, foi descoberta pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel em 1839, quando verificou que placas metálicas, de platina ou prata, imersas em uma solução ácida e expostas a luz solar produziam uma diferença de potencial.

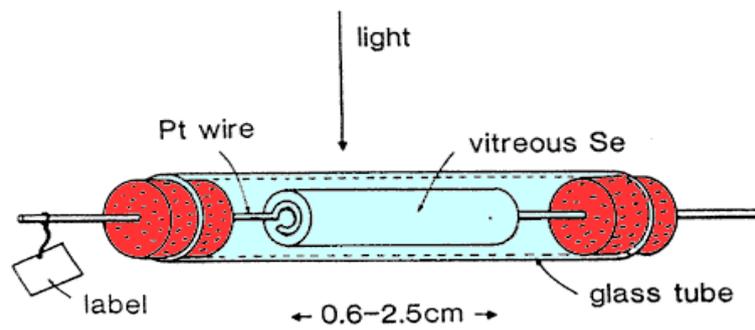
Figura 2.1 - (a) Edmond Becquerel (b) Experiência realizada por Becquerel



Fonte: (PINA, 2013).

William Grylls Adams e Richard Evans Day, em 1876, utilizaram o selênio (Se) para produzir energia elétrica apenas pela ação da luz. Adams e Day verificaram que quando expostos à radiação, os eletrodos de Se geravam uma corrente elétrica. Essa descoberta foi realizada utilizando amostras para investigar a fotocondutividade do selênio.

Figura 2.2 - Amostra utilizada por Adams e Day



Fonte: (NASCIMENTO, 2013).

No ano seguinte, Adams e Day, utilizaram esse material semicondutor para construir a primeira célula fotovoltaica (FV) com um rendimento aproximado de 1%.

Aproveitando-se dessa evolução à época, Charles Fritts, em 1883, apresentou uma célula solar a qual o selênio era usado como semicondutor e era revestida por uma fina camada de ouro.

Em 1918 enquanto pesquisava a velocidade de cristalização de alguns materiais, Jan Czochralski, desenvolveu, a partir de um único cristal, o processo de crescimento de cristais de silício (Si). Apenas na década de 50, esse processo possibilitou a produção de silício cristalino (c-Si).

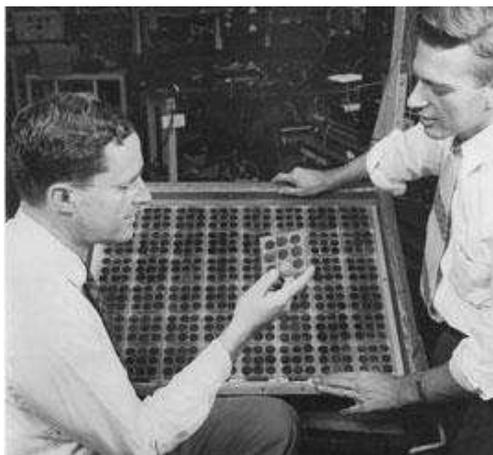
No ano de 1954, surge a primeira célula de Si fabricada por três cientistas dos laboratórios da Bell Telephone Company, nos Estados Unidos. Gerald Pearson, Daryl Chapin e Calvin Fuller produziram uma célula a partir de laminas de silício cristalino com aproximadamente 2cm² de superfície, gerando cerca de 5mW de potência e uma eficiência elétrica, relativamente alta para à época, de 6%.

Figura 2.3 - Da esquerda para a direita: Gerald Pearson, Daryl Chapin e Calvin Fuller



Fonte: http://www.nrel.gov/education/pdfs/educational_resources/high_school/solar_cell_history.pdf

Figura 2.4 - Célula solar fotovoltaica fabricada por Pearson, Chapin e Fuller



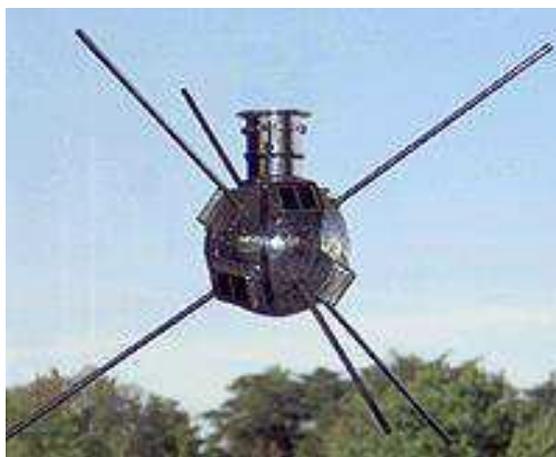
Fonte: <http://www.solarserver.com/index.php?id=18296>

O avanço de pesquisas e estudos em relação à energia solar fotovoltaica avançam com o decorrer do tempo, especialmente nas melhorias no que se refere à eficiência das células solares fotovoltaicas (FV) de silício. A partir da produção da primeira célula FV começam a surgir as primeiras aplicações como luzes de flash, sistemas de telecomunicações, boias de sinalização e aplicações na área espacial.

A Hoffman Electronics tornou-se a principal empresa na produção de células fotovoltaicas de silício na década de 1955 a 1960. Nesse intervalo, em 1957, a empresa fabricou uma célula com uma eficiência de aproximadamente 8% e cerca de 10% com dois anos depois. No ano seguinte, a Hoffman consegue alcançar uma eficiência perto de 14%.

No ano de 1958, surge o primeiro satélite alimentado por células solares, o Vanguard I, tendo funcionado por oito anos.

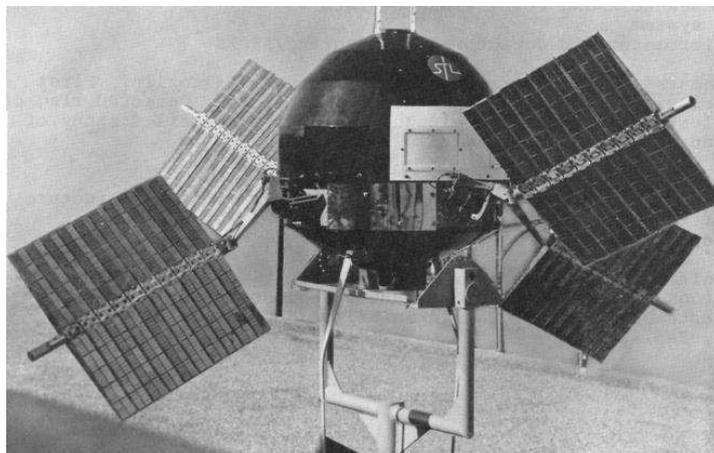
Figura 2.5 - Satélite Vanguard I



Fonte: (NASCIMENTO, 2013).

Um ano após, em 1959, é lançado um outro satélite o qual levava placas fotovoltaicas, o Explorer VI.

Figura 2.6 - Satélite Explorer VI

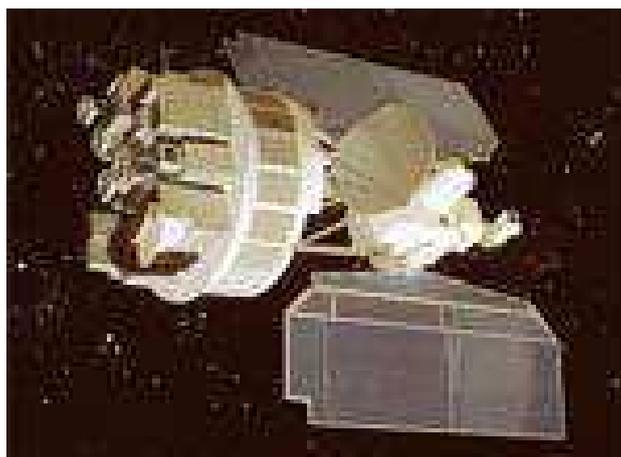


Fonte: (NASCIMENTO, 2013).

A empresa japonesa Sharp Corporation dá início a comercialização dos módulos fotovoltaicos em 1963. Considerado o maior sistema FV instalado da época, a Sharp realizou uma instalação de 242W em um farol.

No ano seguinte, equipado com placas fotovoltaicas ao seu redor para alimentar uma potência instalada de 470W, a NASA lança o satélite Nimbus.

Figura 2.7 - Satélite Nimbus



Fonte: (NASCIMENTO, 2013).

Com pouco tempo depois, a NASA lança quatro satélites observatórios astronômicos orbitais (OAO), entre os anos de 1966 a 1972, equipados com painéis

solares fotovoltaicos com o objetivo de alimentar os equipamentos do observatório astronômico. O primeiro satélite dentre os quatros é mostrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Satélite observatório astronômico



Fonte: (NASCIMENTO, 2013).

A crise do petróleo no ano de 1973 não foi empecilho para as empresas de óleo pararem de crescer. As principais empresas petrolíferas abriram diversas empresas de energia solar passando a serem os maiores fabricantes de módulos. Isso se deve ao fato dessas empresas estarem com muito capital necessitando diversificar seus negócios para continuarem lucrativas.

Até então os estudos da célula solar fotovoltaica estavam direcionados para o silício cristalino. Entre a década de 70 e 80 as pesquisas e estudos passaram a ser voltados para o CuInSe, telureto de cádmio (CdTe) e o silício amorfo (a-Si) obtendo uma eficiência de conversão de energia solar elétrica de aproximadamente 10% para as células solares de filme fino. Durante este intervalo, em 1976, surge o primeiro trabalho sobre células fotovoltaicas de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), apresentadas por David Carlson e Christopher Wronski, com uma eficiência inicial entre 1% e 2%, atingindo 5% tempos depois.

Entre 1978 e 1984, a NASA foi responsável pelo projeto, fabricação, instalação e suporte operacional de 57 sistemas de energia fotovoltaica em 27 países. Estes sistemas foram instalados em locais não servidos por um sistema de energia central e variaram em tamanho de 40 W para a alimentação 7 lâmpadas de rua a 29 kW para fornecer energia elétrica a uma aldeia completa.

Construída por Paul MacCready em 1981, a aeronave experimental Gossamer Penguin, era movida por um motor elétrico alimentado por um sistema solar fotovoltaico com uma potência de 2,5 kW.

Figura 2.9 - Aeronave Gossamer Penguin



Fonte: (NASCIMENTO, 2013).

Na década de 90 a produção de células solares de filme fino passa a crescer e em 1992, na Universidade do Sul da Florida desenvolve-se uma célula fotovoltaica de filme fino, mais especificamente constituída por uma película fina de telureto de cádmio (CdTe), com uma eficiência de conversão de energia elétrica de 15,9%. Neste mesmo ano, a produção de módulos fotovoltaicos alcançava uma potência instalada de 60MW.

A Escola Politécnica Federal de Lausanne na Suíça em 1996, a partir de uma tecnologia simples, barata e inovadora, desenvolve as *dye-cells* que são células solares fotovoltaicas produzidas por TiO_2 e carbono (C) num processo sem vácuo e sensibilizadas por corante, as quais possuíam uma eficiência de 11%.

Uma nova geração de célula solar fotovoltaica surge no ano de 1999 em uma parceria de Spectrolab Inc. e NREL, fabricando uma célula constituída por três junções (GaInP/GaAs/Ge) com uma eficiência de 32,3% quando exposta a uma radiação solar 47 vezes superior à utilizada nos testes padrões¹.

No ano de 2001, através de cálculos, Martin Green consegue obter 24,7% de eficiência em células de silício cristalino com 1 μm de espessura.

Em 2002 é instalado na cobertura da Casa Branca, na presidência de George W. Bush, um sistema fotovoltaico com um valor de potência de pico de 9 kW.

¹ Radiação incidente (G^r) = 1000 W/m² a 25°C e AM 1.5 – Air Mass 1.5

Nesse mesmo ano, em 2002, é lançada pela NASA a aeronave Pathfinder Plus, a qual aproveitava a energia elétrica de origem fotovoltaica dirigida por controle remoto.

Figura 2.10 - Aeronave Pathfinder Plus



Fonte: (NASCIMENTO, 2013).

Devido à grande produção de células fotovoltaicas no ano de 2004, foi possível alcançar uma capacidade instalada mundialmente superior a 8,2 GW de potência de pico.

Neste mesmo ano surge uma nova tecnologia, o CSG². A diferença dessa tecnologia para as demais até então descobertas, se deve ao fato de um processo de fabricação simples, da não utilização do TCO³ e de sua durabilidade. Um mini módulo fabricado com este tipo de célula solar alcançou uma eficiência elétrica de 8% a 9%. Dois anos depois, a eficiência atinge cerca de 12% a 13%.

A pesquisa, o desenvolvimento, e principalmente as aplicações industriais e comerciais das células solares fotovoltaicas tem crescido rapidamente, porém de forma limitada devido à escassez de fabricas de silício policristalino, especificamente nos anos compreendidos de 2004 a 2006. Em contrapartida, foi em 2006 em que mais da metade da produção mundial de silício policristalino foi destinado para o mercado fotovoltaico, antes a hegemonia era da indústria de componentes eletrônicos. O que permitiu, em 2007, um aumento da produção mundial de mais de 50%.

De acordo com a Nanosolar Inc. a célula solar mais eficiente no ano de 2006 foi a de tecnologia CIGS (disseleneto de cobre, índio e gálio). Medida pela NREL, essa alcançou uma eficiência de conversão de 14,5%. No ano seguinte, em 2007, a Nanosolar

² Crystalline Silicon on Glass - deposição direta do silício em um substrato de vidro

³ Transparent and Conductive Oxide

Inc. exporta os primeiros painéis fotovoltaicos dessa tecnologia com fins comerciais, com uma instalação na Alemanha.

Diante do desenvolvimento da célula solar fotovoltaica vista até então, a Tabela 2.1 reflete a evolução da eficiência das células FV para diferentes tecnologias com o passar dos anos.

Tabela 2.1 - Evolução da eficiência das células solares fotovoltaicas

Ano	Desenvolvido	Tecnologia	Eficiência
1877	Adams e Day	Se	1%
1954	Pearson, Chapin e Fuller	Si	6%
1957	Hoffman Electronics	Si	8%
1959	Hoffman Electronics	Si	10%
1960	Hoffman Electronics	Si	14%
Década de 70 e 80	-----	Filme fino	10%
1976	Carlson e Wronski	a-Si:H	1% a 2%
1992	Univ. do Sul da Florida	CdTe	15,9%
1996	Escola Politécnica Federal de Lausanne	Corante (TiO ₂ e C)	11%
1999	Spectrolab Inc. e NREL	GaInP/GaAs/Ge	32,3%
2001	Martin Green	Si	24,7%
2004	-----	CSG	8% a 9%
2006	-----	CSG	12% a 13%
2006	-----	CIGS	14,5%

Fonte: autoria própria.

Desenvolver células solares e dispositivos de alta eficiência e baixo custo são um dos maiores desafios da indústria solar fotovoltaica.

No capítulo 4, será visto e analisado detalhadamente a eficiência das células FV ao longo dos anos.

2.2 EFEITO FOTOVOLTAICO (ENTENDENDO O FUNCIONAMENTO DE UMA CÉLULA)

O termo fotovoltaico é a união de duas palavras: “photo”, do grego, que significa luz, e “volt”, do sobrenome do cientista italiano Alessandro Volta, pioneiro nos estudos da eletricidade.

O efeito fotovoltaico é um fenômeno que converte diretamente a energia solar em energia elétrica, através da transferência de energia dos fótons da radiação solar incidente para os elétrons da estrutura atômica do material.

Esse fenômeno é possível apenas em células solares fotovoltaicas constituídas de material semicondutor com adição de substância, ditas dopantes, o que altera as suas propriedades elétricas.

Pode-se verificar na Figura 2.11 que os elementos semicondutores pertencem aos grupos de 13 a 16 da tabela periódica (antigos grupos IIIA a VIA), incluindo o silício (Si), selênio (Se), telúrio (Te), arsênio (As), germânio (Ge), fósforo (P), boro (B) e carbono (C), considerados como os principais semicondutores. Ressaltando que, os elementos que compõem esses grupos possuem respectivamente três, quatro, cinco e seis elétrons na sua camada de valência. Além desses elementos, existem os compostos conhecidos como binário, ternário e quaternário. O telureto de cádmio (CdTe) é conhecido como semicondutor do tipo II-VI. Isto quer dizer que, a partir da Figura 2.11, é possível verificar que Cd pertence à família IIB e o Te à família VIA. O disseleneto de cobre-índio (CIS) é denominado de I – III – (VI)₂. Ainda na tabela periódica, verifica-se que cobre (Cu), índio (In) e selênio (Se) pertence à família IB, IIIA e VIA, respectivamente. O arsenieto de gálio (GaAs) e o nitreto de gálio (GaN) são conhecidos como semicondutores do tipo III-V, o que é possível verificar na Figura 2.11 que gálio (Ga) pertence à família IIIA e nitrogênio (N) e arsênio (As) à família VA. O InGaAsP e o AlInGaN são exemplos de semicondutores quaternários utilizados para fabricação de LEDs.

Figura 2.11 - Parte da tabela periódica

10	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
10	11	12	13	14	15	16	17	18
							516	2 He Hélio 4,002602
			5 B Boro 10,81	6 C Carbono 12,011	7 N Azoto 14,007	8 O Oxigênio 15,999	9 F Fluor 18,9984...	10 Ne Néon 20,1797
			13 Al Alumínio 26,9815...	14 Si Silício 28,085	15 P Fósforo 30,9737...	16 S Enxofre 32,06	17 Cl Cloro 35,45	18 Ar Árgon 39,948
	29 Cu Cobre 63,546	30 Zn Zinco 65,38	31 Ga Gálio 69,723	32 Ge Germânio 72,63	33 As Arsênio 74,9215...	34 Se Selênio 78,971	35 Br Bromo 79,904	36 Kr Cripton 83,798
	47 Ag Prata 107,8682	48 Cd Cádmio 112,414	49 In Índio 114,818	50 Sn Estanho 118,710	51 Sb Antimônio 121,760	52 Te Telúrio 127,60	53 I Iodo 126,904...	54 Xe Xenônio 131,293
	79 Au Ouro 196,966...	80 Hg Mercúrio 200,59	81 Tl Tálio 204,38	82 Pb Chumbo 207,2	83 Bi Bismuto 208,980...	84 Po Polônio (209)	85 At Astató (210)	86 Rn Rádón (222)
	111 Rg Roentgênio (280)	112 Cn Copernício (285)	113 Uut Ununtrio (284)	114 Fl Fleróvio (289)	115 Uup Ununpênio (288)	116 Lv Livermório (293)	117 Uus Ununseptio (294)	118 Uuo Ununoctio (294)

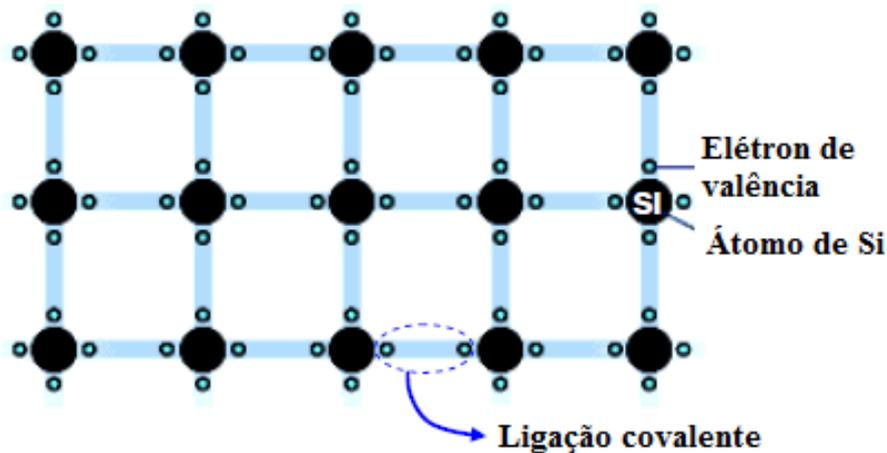
Fonte: adaptado de <http://www.ptable.com/?lang=pt>

Porém, nas células solares fotovoltaicas o material mais utilizado é o silício. Embora exista apenas associado a areia de sílica, e não como um elemento químico isolado, o silício apresenta uma disponibilidade quase ilimitada.

2.2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UMA CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA

Pertencente ao grupo 14 da tabela periódica, o átomo de silício possui quatro elétrons na camada mais externa, conhecida como banda de valência. Portanto, em um cristal de Si tem-se a formação de quatro ligações covalentes com quatro átomos vizinhos. Como resultado desse compartilhamento de elétrons, a banda de valência pode conter até oito elétrons tornando o átomo estável.

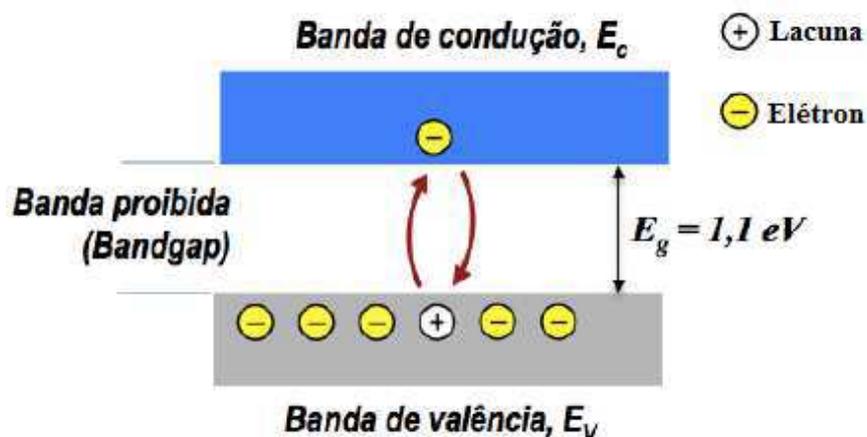
Figura 2.12 - Representação bidimensional da ligação covalente da rede cristalina do silício puro



Fonte: adaptado de (CARNEIRO, 2010).

Caso uma célula solar fotovoltaica constituísse de cristais de silício puro, essa não seria capaz de produzir energia elétrica. Quando um cristal de silício é submetido à temperatura de aproximadamente 20°C, a energia térmica fornecida ao elétron, é capaz de excita-lo, fazendo com que o elétron passe da banda de valência para a banda de condução, deixando uma lacuna na banda de valência, a qual se comporta como uma carga positiva. Dessa forma, por não possuir uma diferença de potencial, o elétron se recombinaria imediatamente com a lacuna, não dando origem a qualquer corrente elétrica. Esse fenômeno pode ser visto na Figura 2.13.

Figura 2.13 - Esquema do diagrama de bandas de energia de um semiconductor intrínseco com o silício

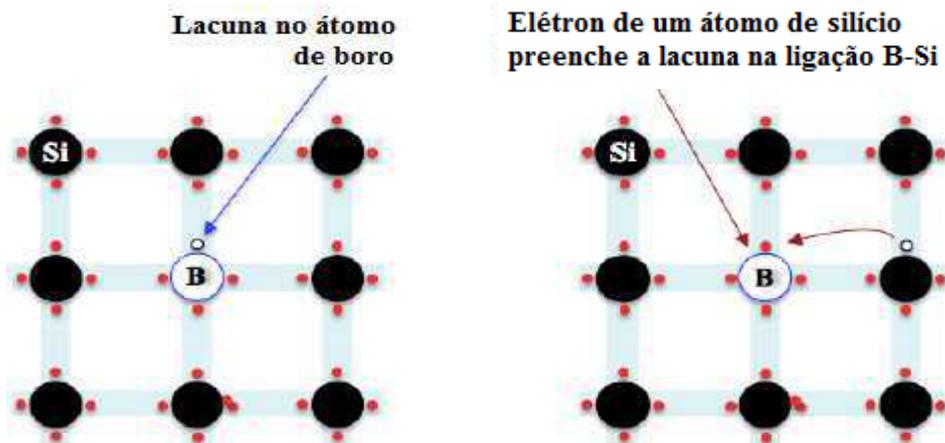


Fonte: adaptado de (CARNEIRO, 2010).

Para induzir uma corrente elétrica é necessário que exista uma diferença de potencial entre duas zonas da célula. Essas zonas são uma camada tipo p, com excesso de cargas positivas, e uma camada tipo n, com excesso de cargas negativas.

Para criar uma camada tipo p é necessário que o silício seja dopado com algum elemento que possui três elétrons na sua banda de valência. Geralmente essa substância é o boro (B), o qual substitui o átomo de silício na estrutura. A ausência de um elétron no átomo de boro, como pode ser vista na Figura 2.14, é considerada uma lacuna. Quando fornecido uma quantidade de energia térmica suficiente, o elétron do átomo de silício se desloca para o átomo vizinho do boro preenchendo a lacuna desde, resultando em uma lacuna no átomo de Si, a qual se comporta como carga positiva. Cada vez que um elétron vizinho do átomo de boro preenche uma lacuna, novas lacunas se formam em outro lugar, movendo-se livremente no cristal de silício, como pode-se verificar na Figura 2.14 .

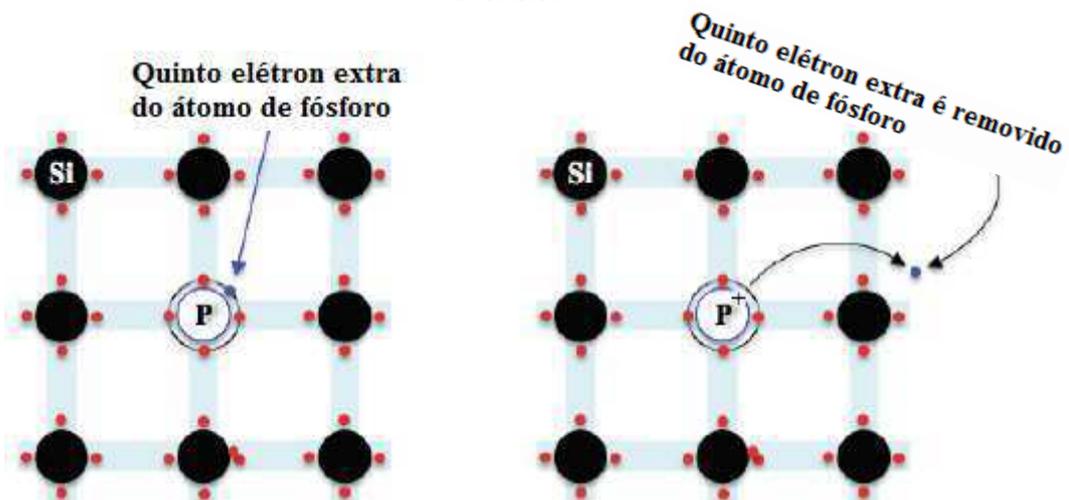
Figura 2.14 - Representação esquemática da substituição (dopagem) de um átomo de silício por um átomo de boro



Fonte: adaptado de (CARNEIRO, 2010).

O fósforo (P) é o material usado para criar a camada tipo n, pois ele possui cinco elétrons na banda de valência (um elétron a mais que o átomo de silício). Quando o átomo de fósforo substitui o átomo de silício na estrutura, haverá excesso de elétron quando estabelecido a ligação covalente. Este elétron livre pode-se mover livremente no cristal de silício, tornando o material capaz de conduzir corrente elétrica. Esse processo pode ser verificado na Figura 2.15.

Figura 2.15 - Representação esquemática da substituição (dopagem) de um átomo de silício por um átomo de fósforo

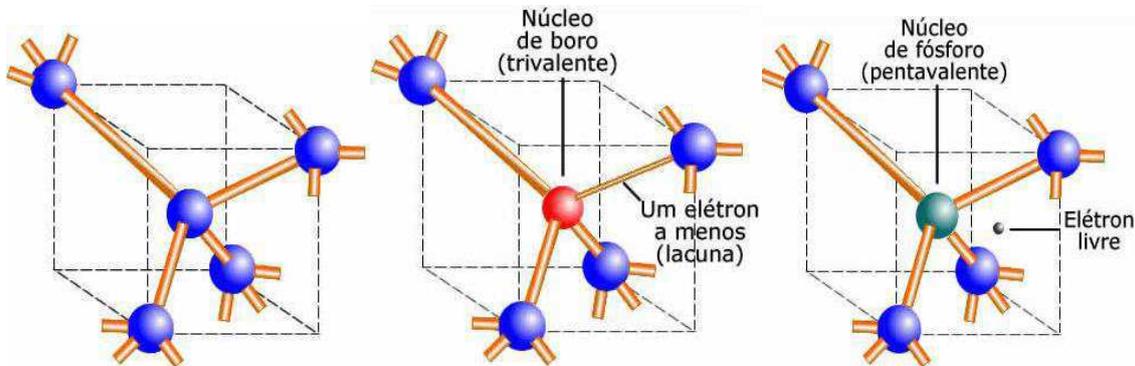


Fonte: adaptado de (CARNEIRO, 2010).

Verifica-se na Figura 2.16 que a ausência de elétrons nos orbitais ligantes, quando o átomo de boro é introduzido na rede cristalina do silício, é representada pela lacuna na ligação tetraédrica da rede cristalina do silício. Quando o fósforo é introduzido na rede

cristalina do silício, verifica-se ainda na Figura 2.16, que o elétron livre, quando estabelecido a ligação covalente, encontra-se solto na rede cristalina do silício.

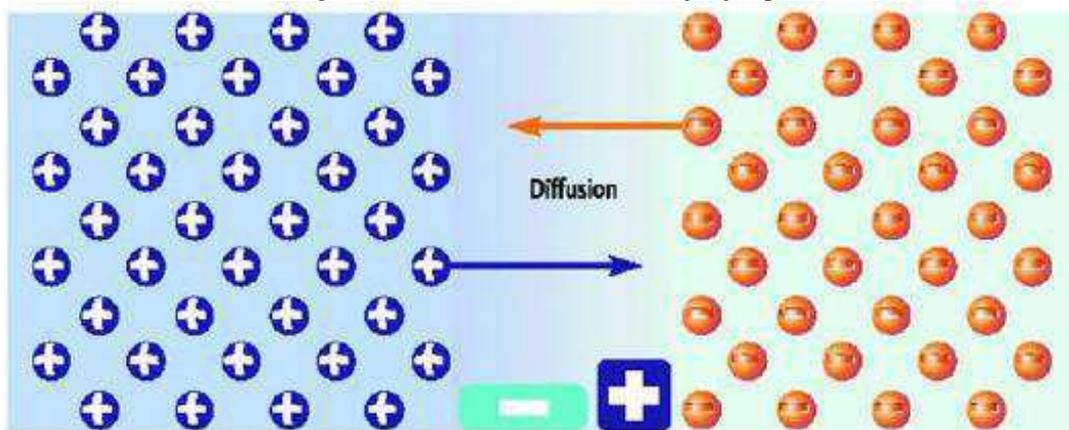
Figura 2.16 - Estrutura cristalina do silício puro, do material dopado com boro e do material dopado com fósforo, respectivamente



Fonte: adaptado de http://www.bpiropo.com.br/ilustraFPC20081020_a1.htm

No material do tipo p e tipo n as cargas livres se movimentam sem direção definida. Porém, se for introduzido átomo de boro em um lado do silício puro e na outra metade átomos de fósforo, será formado uma região de transição pn, que é central para o funcionamento da célula. Na área de contato da junção, ocorre um processo de difusão dos elétrons livres do semiconductor tipo n para as lacunas do semiconductor tipo p, criando assim, uma barreira de potencial com poucos portadores de carga. Essa difusão de elétrons leva a acumulação de íons positivos na zona n e negativos na zona p. Isto acontece até o momento em que um campo elétrico é formado (sentido contrário ao movimento dos portadores de carga), impedindo o fluxo permanente de elétrons, como pode-se verificar na Figura 2.17. Este campo elétrico surge devido ao excesso de carga positivas e negativas na junção das regiões n e p, respectivamente.

Figura 2.17 - Difusão de elétrons na junção pn



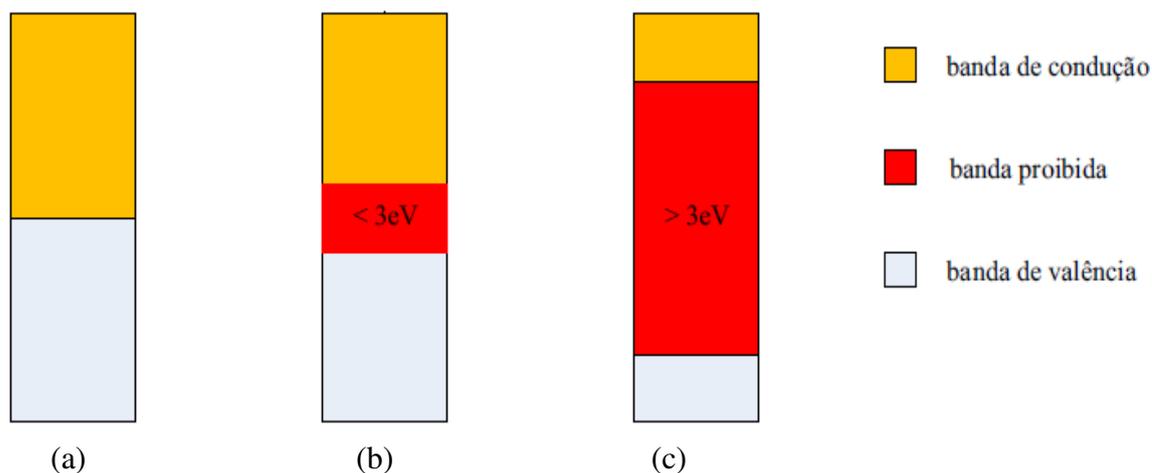
Fonte: adaptado de (ALTENER, 2004).

2.2.2 PRINCÍPIO BÁSICO DE UMA CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA

Até então, foi visto que as células solares são feitas normalmente de matérias semicondutores. Estes se comportam como isolantes a uma temperatura de 0°K . Isto quer dizer que, a uma temperatura tendendo ao zero absoluto (0°K), nos semicondutores a banda de valência é preenchida totalmente por elétrons e a banda de condução “vazia” (sem elétrons).

O espaço que existe entre a banda de valência e a banda de condução (bandas de energia permitidas) é denominada de banda proibida (*bandgap* ou *gap*⁴) representada por E_g ⁵. Dependendo deste valor, as bandas de energia possuem distâncias diferentes para cada tipo de material, como pode-se verificar na Figura 2.18.

Figura 2.18 - Estrutura de bandas de energia em (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolante



Fonte: (PINHO e GALDINO, 2014).

A energia, ou *gap*, é um parâmetro fundamental e único para cada material semicondutor. “Para ser um bom absorvedor da energia solar, um semicondutor deve ter uma banda proibida entre cerca de 1 e 2 eV.” (HANDBOOK OF PHOTOVOLTAIC SCIENCE AND ENGINEERING - SECOND EDITION, 2011, p. 5).

Na Tabela 2.2 é possível verificar diferentes valores de energia da banda proibida (E_g) para os materiais mais usados em células solares fotovoltaicas.

⁴ Intervalo de energia em um sólido sem a presença de elétrons

⁵ Este valor é expresso normalmente em elétron-Volt (eV) e $1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$

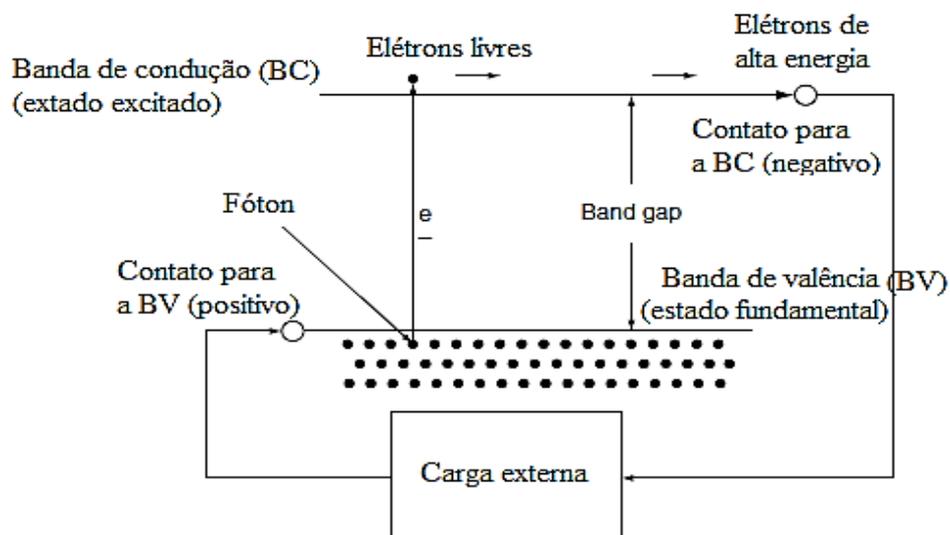
Tabela 2.2 - Valores de E_g para diversos semicondutor

Semicondutor	E_g (eV)	Semicondutor	E_g (eV)
Si	1,12	CdS	2,42
Ge	0,66	PbS	0,35
GaAs	1,43	PbTe	0,30
InSb	0,18	CdTe	1,45
InP	1,35	a-Si: H	>1,5
GaP	2,26		

Fonte: adaptado de (PINHO e GALDINO, 2014).

O diagrama das bandas de energia de um semicondutor é apresentado na Figura 2.19. Quando submetido a radiação solar, a energia dos fótons incidentes é diretamente transferida para o material, podendo excitar o elétron, permitindo vencer a energia da banda proibida (*band gap*), possibilitando a passagem do elétron da banda de valência (BV) para a banda de condução (BC). Com isso, o elétron se movimenta livremente na BC, enquanto a BV possui ausência de elétron, dando origem a criação de pares elétron-lacunas. Analisando a Figura 2.19 verifica-se claramente que, a energia da banda proibida, E_g , é a diferença entre os níveis E_{BC} e E_{BV} , em que E_{BC} possui energia superior à E_{BV} . Ao colocar um contato na banda de condução e outro na banda de valência, faz-se necessário inserir um circuito externo para que esses elétrons livres se desloquem da BC e retornem para a BV, dando origem a uma corrente elétrica.

Figura 2.19 - Diagrama de bandas de energia de um semicondutor



Fonte: adaptado de (LUQUE e HEGEDUS, 2011).

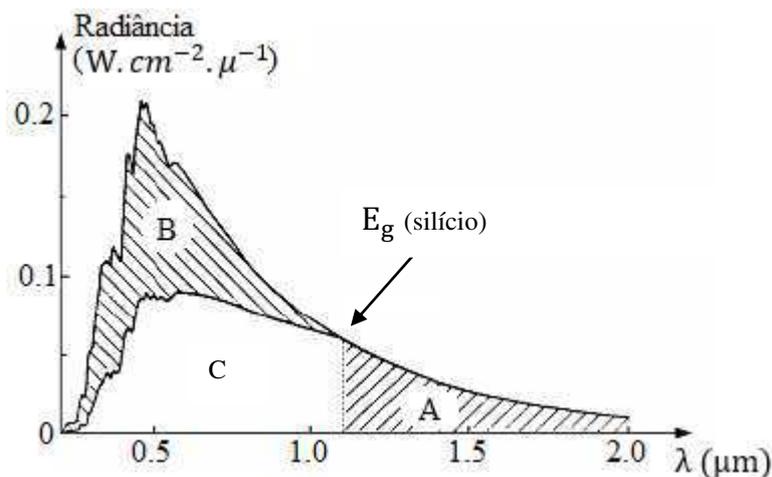
Caso a absorção do fóton possua energia superior a E_g resultará em dissipação da energia em excesso como forma de calor no material, fenômeno este denominado de

termalização. Ao contrário desse processo, tem-se quando a energia do fóton for inferior a E_g , caso em que a energia não é suficiente para que o elétron consiga vencer o *gap*, impossibilitando o elétron passar da banda de valência para a banda de condução.

Quando o silício é exposto à incidência de radiação solar, a absorção dos fótons ocorre apenas para comprimentos de onda inferior a $\lambda = 1,1 \mu\text{m}$ (próximo a zona do infravermelho), não sendo aproveitada para a conversão fotovoltaica entre $1,1 \mu\text{m}$ e $3,0 \mu\text{m}$ (domínio do infravermelho). Esta faixa compreende a área A, que se mostra na Figura 2.20.

Como pode ser visto ainda na Figura 2.20, a área A pertence ao comprimento de onda correspondente ao infravermelho. Isto quer dizer que, a onda tem energia insuficiente para deslocar o elétron. Logo, é uma energia perdida. A área B corresponde a uma energia muito superior a energia do *gap*, resultando em um efeito térmico. Por fim, a área C, é a região que compreende uma energia efetivamente aproveitável.

Figura 2.20 - Aproveitamento da radiação solar pelas células fotovoltaicas



Fonte: adaptado de (VIANA, 2010).

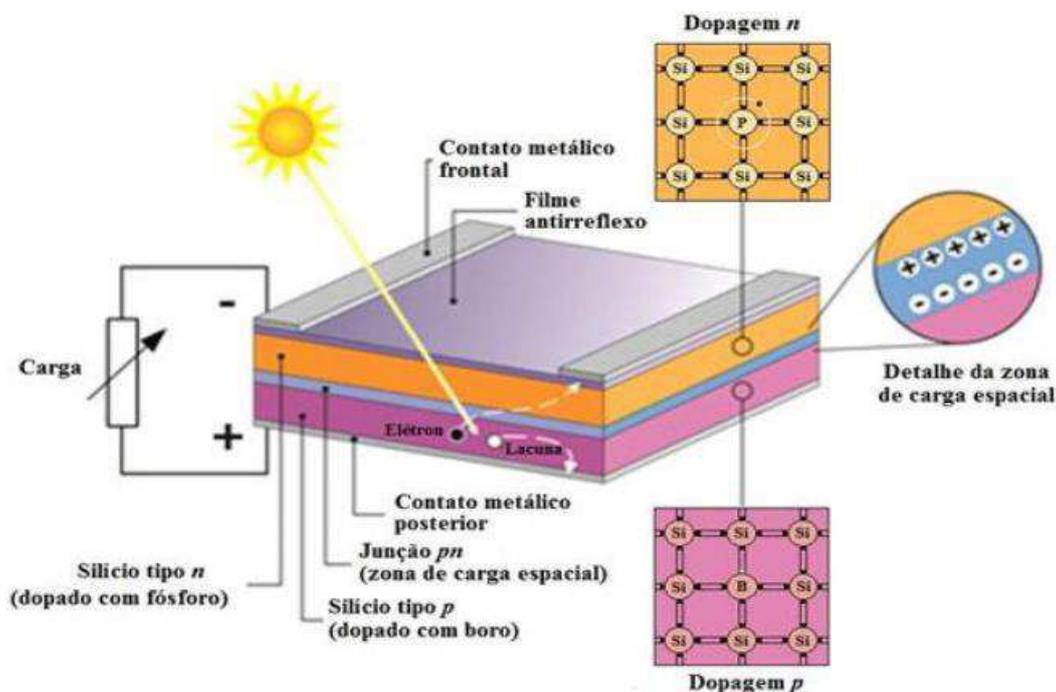
Assim, percebe-se que os fótons que possuem uma alta energia fornecem parte de sua energia para o elétron, para que este possa vencer a energia do *gap* e outra parte, chamada de excedente, é transformada em calor não contribuindo para a geração de energia elétrica. Neste caso, o semiconductor ao ser aquecido gera uma redução do rendimento por diminuição de tensão e conseqüentemente diminuição da potência gerada pela célula fotovoltaica.

Logo, pode-se concluir que a energia interna de cada par gerado por um fóton será sempre igual a E_g . O que realmente se constitui o efeito fotoelétrico.

2.2.3 ESTRUTURA BÁSICO DE UMA CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA

A célula solar de silício cristalino é composta por duas camadas de silício dopada com impurezas diferentes, a exemplo do fósforo (P) e boro (B), com a finalidade de obter uma diferença de potencial entre duas zonas da célula, para que possa induzir uma corrente elétrica. Assim, a camada superior da célula, esta dopada negativamente e a posterior dopada positivamente. Ao juntar esses dois tipos de camada, é produzido um campo elétrico na junção destas, que conduz a separação das cargas ao serem atingida pela radiação solar. É necessário que utilize uma camada antirreflexiva na parte superior da célula para que se reduza a reflexão da radiação incidente, aumentando a quantidade de luz transmitida para o semiconductor. Para que a célula solar gere energia elétrica, é indispensável a ligação de uma carga nos terminais do contato metálico, localizado na parte superior e inferior da célula, para que possa conduzir corrente elétrica.

Figura 2.21 - Estrutura básica de uma célula solar fotovoltaica



Fonte: adaptado de (PINHO e GALDINO, 2014).

Na Figura 2.21 é possível ver os seguintes elementos:

- Contato metálico:
 - Frontal, constitui o terminal negativo da célula. O contato frontal deverá ocupar a célula numa menor área possível, facilitando a

radiação que chega à esta, contribuindo positivamente para o fator de forma⁶ (FF). Além disso, é importante que este contato possua uma menor resistência ôhmica possível, para que a queda de tensão não seja elevada. De acordo com Castro (2002, p.13), esse contato é constituído de cobre. Além de permitir a condução da corrente elétrica esse contato também é utilizado para fazer contato com outras células.

- Posterior, constitui o terminal positivo da célula. Diferentemente do contato metálico frontal, esse contato ocupa toda a área posterior da célula.
- Filme antirreflexo: esta película minimiza as perdas por reflexão de radiação na superfície da célula. Segundo Castro (2002, p.14): “[...] sem este revestimento a célula refletiria cerca de um terço da radiação.” Essa película é responsável pelas cores encontradas nas células de diferentes tecnologias. A exemplo, tem-se a cor azul para as células policristalinas, tonalidade de azul escuro ao preto para as células monocristalinas e a cor preta para as células de filme fino. Quanto ao material que o constitui, essa película é “[...] feita de nitreto de silício ou de dióxido de titânio.” (ALTENER, 2004)
- Tipos de camadas:
 - Tipo n, como visto anteriormente, esta camada constitui-se a região negativa da célula, obtida da dopagem de fósforo ao silício. De acordo com a Figura 2.21, verifica-se que a espessura desta camada é maior do que a camada do tipo p.
 - Tipo p, como analisado anteriormente, esta camada constitui-se a região positiva da célula, obtida da dopagem de boro ao silício.

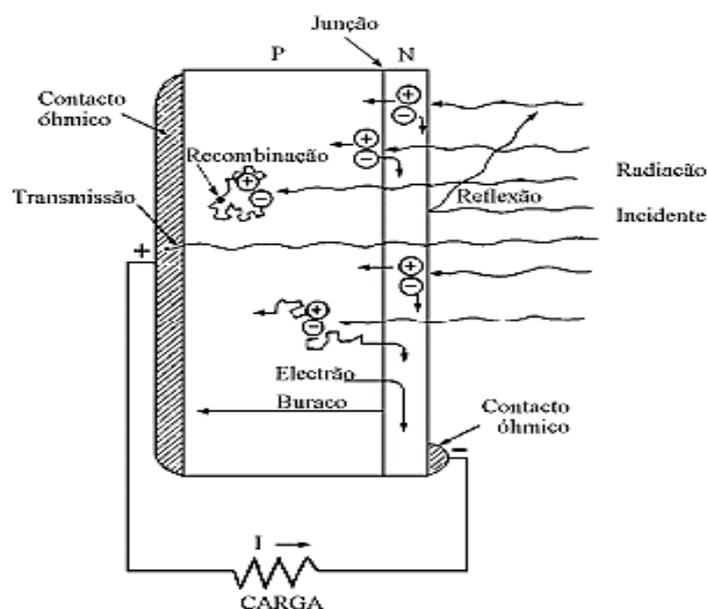
⁶ Indicador de qualidade da célula

Analisando a Figura 2.22, pode-se verificar que quando o fóton incide na célula solar fotovoltaica três situações pode acontecer:

- i. O fóton reflete na superfície da célula ou incide sobre o contato metálico frontal;
- ii. O fóton passa direto, devido a possuir maior comprimento de onda, resultando em uma baixa energia, não sendo utilizada para gerar um par elétron-lacuna;
- iii. A energia do fóton é absorvida pelo material.

Neste último caso, foi visto anteriormente que, os fótons com energia suficiente conseguem excitar os elétrons da banda de valência para a banda de condução. Portanto, verifica-se ainda na Figura 2.22, que os elétrons são acelerados para o terminal negativo da célula solar, através do campo elétrico, e as lacunas seguem o direcionamento oposto, migrando para o terminal positivo, originado assim uma corrente elétrica. Existe casos em que, o fóton excita o elétron, mas este se recombina imediatamente com a lacuna, não contribuindo para a geração de energia elétrica. Logo, os contatos metálicos presente em cada lado da célula e uma carga, é suficiente para conduzir a corrente elétrica induzida pelos fótons.

Figura 2.22 - Princípio de funcionamento de uma célula solar fotovoltaica



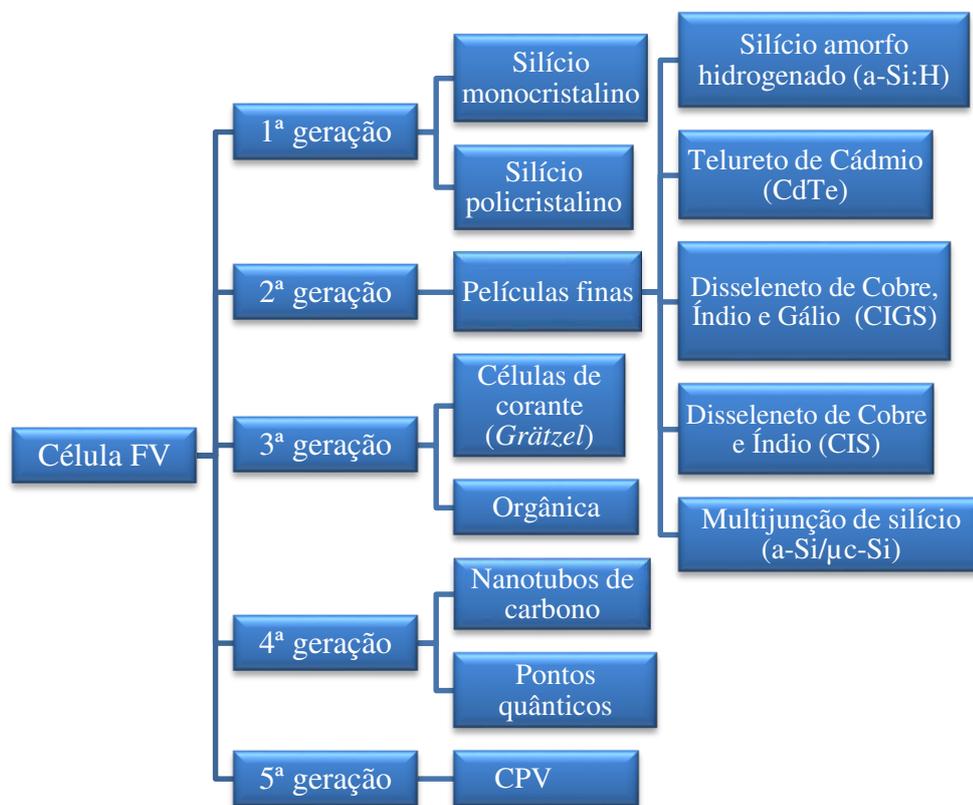
Fonte: (VIANA, 2010).

2.3 TECNOLOGIA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Para uma melhor compreensão das eficiências de algumas células fotovoltaicas, faz-se necessário introduzir informações pertinentes aos principais tipos de células.

As células solares fotovoltaicas comerciais distinguem-se em várias categorias face a estrutura do material semicondutor e a tecnologia e processo de fabricação. Essas se subdividem em cinco grupos como pode-se verificar no esquema abaixo apresentado na Figura 2.23.

Figura 2.23 - Tecnologias das células solares fotovoltaicas



Fonte: autoria própria adaptado de (KARAGIORGIS, 2014).

2.3.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE PRIMEIRA GERAÇÃO

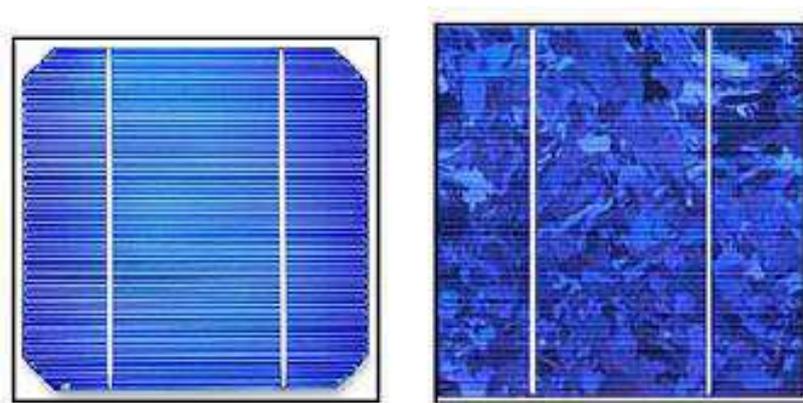
Atualmente, a tecnologia de primeira geração ainda domina a indústria fotovoltaica e detém a maior participação no mercado fotovoltaico.

Essa geração se caracteriza pela composição de material semicondutor de silício cristalino, subdividindo em dois:

- Monocristalino (mc-Si): caracterizado por ter um aspecto uniforme (estrutura homogenia). As células de silício monocristalina são as mais eficientes, porém a mais cara. Isto se deve ao fato de que o silício possui um grau de pureza de 99,9999%⁷, assim como, o monocristal de silício passará por um processo de crescimento conhecido como método de Czochralski (Si-Cz). Devido a célula possuir uma camada anti reflexiva, esta pode apresentar uma coloração azulada ou preta.
- Policristalino (pc-Si): utiliza-se a mesma matéria prima do monocristalino, porém, é formado por um aglomerado de inúmeros cristais (imperfeição do cristal), com orientações espaciais e tamanhos diferentes, tornando esse material menos eficiente em termos de conversão fotovoltaica. Comparado ao mc-Si, o pc-Si possui um custo de produção inferior, pois possui um processo de fabricação mais simples. Entretanto, esses dois tipos de tecnologia apresentam relação custo-benefício próximos.

Na Figura 2.24 pode-se ver a diferença entre a célula fotovoltaica monocristalina e policristalina. Entretanto, alguns fabricantes de células fotovoltaicas oferecem células com várias cores diferentes. A Figura 2.25 mostra cores diferente para os dois tipos de tecnologias citadas acima.

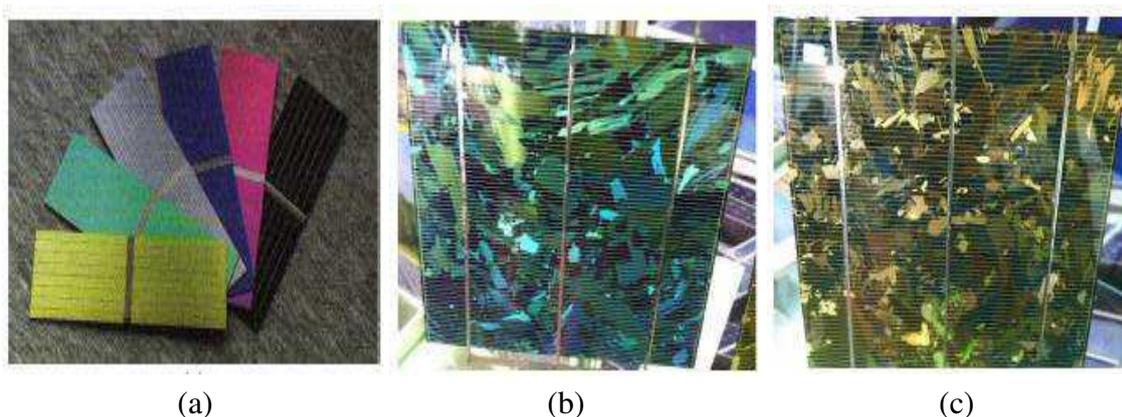
Figura 2.24 - Da esquerda para a direita: célula de silício monocristalina e célula de silício policristalina



Fonte: (ORTEGA, 2013).

⁷Matéria prima é o silício grau solar (SigS)

Figura 2.25 - Células mc-Si coloridas (a), célula pc-Si verde (b) e célula pc-Si dourada (c)



Fonte: (ALTENER, 2004).

Na Tabela 2.3 pode-se verificar que para cada tipo de cor existe diferentes eficiências.

Tabela 2.3 - Eficiência de células fotovoltaicas coloridas

Cor	Eficiência (%)	Cor	Eficiência (%)
Azul	13,6	Magenta	11,3
Marrom	12,2	Verde	11,5
Dourado	11,7	Prateada	10,4
Cinza	12,4		

Fonte: adaptado de (ALTENER, 2004).

2.3.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE SEGUNDA GERAÇÃO

Também denominado de tecnologia de filme fino, as células de segunda geração surgem com o objetivo de diminuir os custos no processo de fabricação em relação às células fotovoltaicas de primeira geração. Atualmente, essa tecnologia domina uma faixa de 15% do mercado da energia fotovoltaica.

Essas células não têm uma estrutura cristalina, todavia, uma fina película é depositada sobre substratos de baixo custo como metais, vidros, cerâmicas e alguns polímeros.

Comparada às células cristalinas, as células de filme fino apresentam eficiência de conversões mais baixas, sendo necessário uma maior área para atingir a mesma potência, são menos sensíveis a altas temperaturas (tornando mais adequados para locais com temperaturas muito elevadas) e sua eficiência não sofre alterações consideráveis relacionado ao sombreamento da célula.

Devido a versatilidade e por serem mais leves, essas células são utilizadas desde cobertura de telhados ou fachadas de edifícios até em relógios ou calculadoras.

As células de filme fino podem ser classificadas como: a-Si:H (silício amorfo hidrogenado), CdTe, CIGS, CIS (disseleneto de cobre e índio), a-Si/ μ c-Si. As três primeiras podem ser vistas na Figura 2.26.

Figura 2.26 - Da esquerda para a direita: célula fotovoltaica filme fino silício amorfo, CIGS e CdTe



Fonte: (ORTEGA, 2013).

Dentre as células da segunda geração o CdTe e o CIGS são as células que possuem uma maior eficiência, porém ainda não são difundidas em larga escala no mercado. Isso se deve ao fato do cádmio (Cd) ser um elemento tóxico e o telureto (Te) um material raro. Já o CIGS por possuir um custo muito elevado durante o processo de fabricação.

2.3.3 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE TERCEIRA GERAÇÃO

Esta geração, ainda em fase de testes, pesquisas e desenvolvimentos, é dividida em duas tipos: células sensibilizadas por corante (DSSC⁸) e células orgânicas ou poliméricas (OPV⁹).

As células solares foto-eletróquímicas (células de *Grätzel*) são células sensibilizadas por corantes nano-cristalinos, o qual utiliza um mecanismo de regeneração rápida foto-eletróquímica. O nano-cristal semi-condutor tem por função captar a luz solar, e a molécula de corante realiza o processo da separação de cargas.

As células solares orgânicas utilizam em sua fabricação um material de baixo custo e alto rendimento de produção, uma vez que ele é, em grande parte feito de plástico.

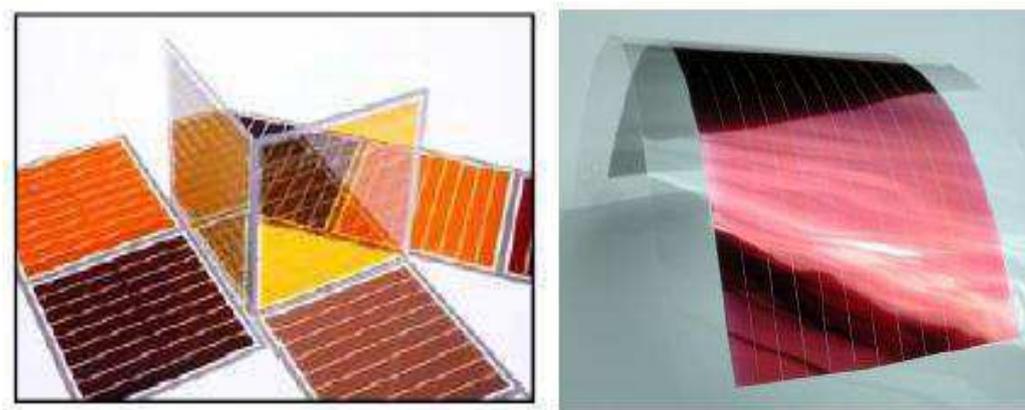
⁸ *Dye-Sensitized Solar Cell*

⁹ *Organic Photovoltaics*

Conseqüentemente, essas células possuem uma flexibilidade mecânica e sejam descartáveis.

Na Figura 2.27 é possível verificar as duas células de terceira geração, também chamada de células de nova tecnologia.

Figura 2.27 - Da esquerda para a direita: célula fotovoltaica de *Grätzel* e orgânica



Fonte: (NASCIMENTO, 2013).

2.3.4 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE QUARTA GERAÇÃO

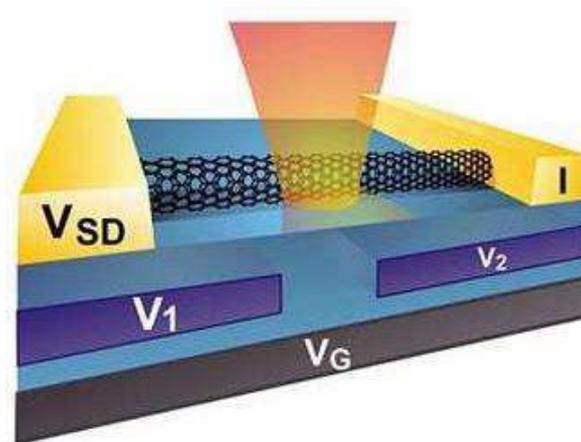
As células fotovoltaicas de quarta geração são divididas em dois tipos, são elas: os nanotubos de carbono e pontos quânticos.

As células compostas de nanotubos de carbono são construídas de uma rede hexagonal de carbono com excelentes propriedades mecânicas e eletrônicas. Sua eficiência é uma das mais baixas dentre todas as tecnologias existentes, alcançando cerca de 3% a 4%. Entretanto pesquisas, estudos e desenvolvimento está sendo realizado neste campo.

As células de pontos quânticos são compostas por um sistema de semicondutores especial que consiste de uma combinação de grupos periódicos de materiais moldados numa variedade de diferentes formas. O seu tamanho é de escala nanométrica e possui um *band gap* ajustável de níveis de energia atuando como uma classe especial de semicondutores.

Na Figura 2.28 é possível visualizar um esquema de funcionamento de um novo tipo de célula solar que substitui o silício por nanotubos de carbono.

Figura 2.28 - Esquema explicativo do novo fotodíodo desenvolvido na Cornell University usando nanotubos



Fonte: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=celula-solar-nanotubo-carbono-eficiencia-maxima&id=010115090922>

2.3.5 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE QUINTA GERAÇÃO

A célula fotovoltaica para concentração (CPV¹⁰) compõe a quinta geração das células fotovoltaicas.

O concentrador fotovoltaico é composto de dispositivos óticos como lentes e espelhos, os quais têm por função concentrar a radiação solar. Devido a essas lentes estarem expostas a temperaturas elevadas, é necessário, em alguns casos, um sistema de arrefecimento. Como as lentes tem que permanecer orientadas para o sol, é necessário um sistema de rastreamento, conhecido como *sun-tracking*.

Embora ainda não seja competitiva com as tecnologias que dominam o mercado atualmente, a célula fotovoltaica para concentração demonstrou ter altas eficiências e máximo desempenho alcançado quando a irradiância é direta.

Na Figura 2.29 é apresentado o sistema de concentração solar.

¹⁰ *Concentrated Photovoltaics*

Figura 2.29 - Sistema concentrado fotovoltaico (CPV) com emprego de lentes de Fresnel



Fonte: <http://macariobatista.blogspot.com.br/2010/09/agua-corre-pro-mar.html>

3 EFICIÊNCIA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

No primeiro capítulo deste trabalho, foi apresentado uma breve história da célula solar fotovoltaica desde seu surgimento, em meados do século XIX, até o início deste século. A cada descoberta de novas tecnologias de células FV e/ou novas construções de células já fabricadas, pode-se verificar que a eficiência destas experimentou expressivos aumentos.

No que se refere a energia solar fotovoltaica, desde o começo da sua história até os dias atuais, estudos, pesquisas e desenvolvimento vem tendo como foco principal os ganhos da eficiência da conversão FV e conseqüentemente a diminuição dos custos.

Neste capítulo, será discutido a evolução da eficiência de todas as gerações de células fotovoltaicas a partir do gráfico publicado pela NREL¹¹ com dados atualizados até o ano de 2015.

Vale ressaltar que a eficiência da célula solar fotovoltaica é substancialmente afetada por efeitos adversos. Assunto este, que também será abordado neste capítulo.

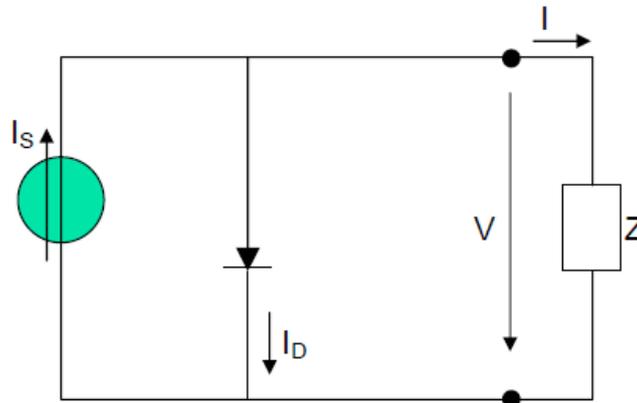
3.1 MODELO SIMPLIFICADO DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA

Antes de discutir alguns fatores que limitam a eficiência da célula solar fotovoltaica, é de suma importância estabelecer um modelo matemático simplificado da célula fotovoltaica para um melhor entendimento.

A Figura 3.1 representa a descrição de uma célula através de um circuito elétrico equivalente em termos de um modelo simplificado.

¹¹ O NREL é um laboratório localizado nos Estados Unidos, o qual possui o *National Center for Photovoltaics* (NCPV), sendo este o responsável pelas pesquisas da eficiência das melhores células fotovoltaicas desenvolvida no momento.

Figura 3.1 - Circuito elétrico equivalente simplificado de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z



Fonte: (CASTRO, 2002).

O circuito descrito acima é constituído por um gerador de corrente elétrica (fonte de corrente) I_s acionado pelo feixe de radiação luminosa ao atingir a superfície superior da célula fotovoltaica. Para uma dada radiação incidente esta corrente unidirecional é constante. Sua amplitude depende da intensidade de luz incidente na célula.

Paralelo e de sentido contrário a I_s , verifica-se a corrente I_D . Esta corrente é referente a corrente interna unidirecional da junção pn (equivalente a um diodo), o qual depende da tensão V nos terminais da célula. A corrente que passa pelo o diodo é:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (1)$$

em que I_0 é a corrente inversa máxima de saturação do diodo; V é a tensão nos terminais da célula e m é o fator de idealidade do diodo¹². Sendo V_T designado por potencial térmico, tem-se que:

$$V_T = \frac{KT}{q}, \quad (2)$$

em que K é a constante de Boltzmann ($K = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$); T é a temperatura absoluta da célula [$^\circ\text{K}$] ($0^\circ\text{C} = 273,16 \text{ }^\circ\text{K}$) e q é a carga elétrica do elétron ($q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$).

¹² Diodo ideal: $m = 1$; diodo real: $m > 1$. O fator m é um parâmetro de ajuste da curva I-V.

¹³ Para $T = 298,16 \text{ }^\circ\text{K}$ ($\theta = 25^\circ\text{C}$), obtém-se $V_T = 25,7 \text{ mV}$.

Verifica-se facilmente pela primeira lei de Kirchoff que, a corrente elétrica em uma célula solar fotovoltaica pode ser considerada a corrente I_S subtraída da corrente I_D , a qual é representada por:

$$I = I_S - I_D$$

$$I = I_S - I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right). \quad (3)$$

A Figura 3.2 representa a curva I-V típica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino, também chamada de curva característica. Esta curva é obtida fazendo variar a carga aos seus terminais. Dela é possível obter os principais parâmetros elétricos, são eles:

- I_{SC}^{14} (corrente de curto-circuito): corresponde ao “[...] valor máximo da corrente na carga, igual, portanto, à corrente gerada por efeito fotovoltaico (I_S)” (CASTRO, 2002, p. 16). Este valor é obtido a partir da Equação (3) quando $V = 0$, resultando em $I_D = 0$;
- V_{OC}^{15} (tensão de circuito aberto): corresponde ao “[...] valor máximo da tensão aos terminais da célula, que ocorre quando esta está em vazio.” (CASTRO, 2002). “O valor de V_{oc} varia conforme a tecnologia utilizada nas células: c-Si (0,5 V – 0,7 V), CdTe (0,857 V), a-Si (0,886 V), DSSC (0,744 V), InGaP/GaAs/InGaAs (3,014 V)” (PINHO e GALDINO, 2014, p. 119);
- P_{MP}^{16} (ponto de máxima potência): ponto da curva de corrente versus tensão. Corresponde a potência máxima que a célula fotovoltaica pode produzir;
- I_{MP} (corrente máxima): corrente máxima obtida para o qual a potência será máxima);

¹⁴ Valor característico da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante nas condições de referências (STC).

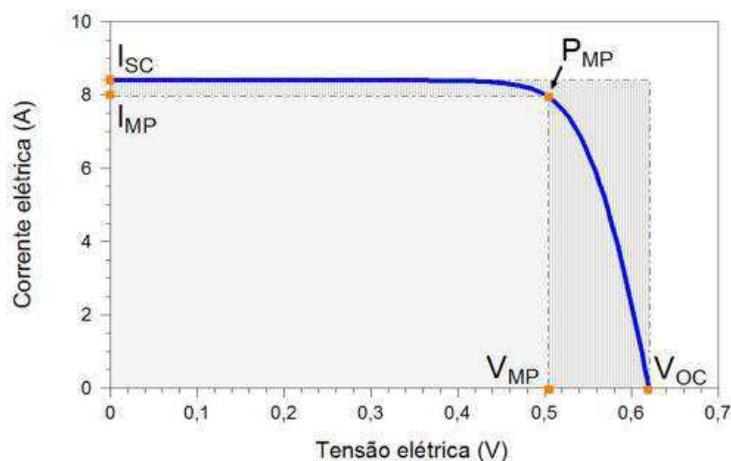
¹⁵ Valor característico da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante nas condições de referências (STC).

¹⁶ A unidade de potência de saída de uma célula é o Wp (watt-pico). É a máxima potência obtida considerando as condições-padrão de ensaio.

- V_{MP} (tensão máxima): tensão máxima obtida para o qual a potência será máxima).

Mais dois outros parâmetros podem ser obtidos a partir da curva característica, são eles: o fator de forma (FF) e a eficiência da célula. Esses dois parâmetros serão discutidos detalhadamente a seguir.

Figura 3.2 - Curva característica típica de uma célula fotovoltaica



Fonte: (PINHO e GALDINO, 2014).

3.2 FATORES QUE LIMITAM A EFICIÊNCIA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA

A eficiência da célula solar fotovoltaica pode ser entendida como um “[...] parâmetro que define o quão efetivo é a conversão de energia solar em energia elétrica.” (PINHO e GALDINO, 2014, p. 120).

Foi visto até então como se procede a conversão da energia solar em energia elétrica. Se bem analisado, pode-se perceber que a eficiência da conversão fotovoltaica pode ser substancialmente afetada por efeitos adversos, dentre eles:

- Sombreamento na célula solar fotovoltaica;
- Presença de contatos metálicos na parte frontal da célula FV, diminuindo a área da célula, reduzindo dessa forma, a quantidade de radiação incidente nesta. Assim como, presença de resistência ôhmica resultando em uma

queda de tensão. E por fim, radiação solar incidente sobre os contatos metálicos, não contribuindo para a conversão da energia;

- Absorção de fótons com energia superior e inferior do que o *gap*;
- Recombinação dos portadores de carga.

Outros fatores que influenciam na eficiência da célula fotovoltaica serão discutidos mais adiante.

Cada célula possui sua curva característica, porém, a curva I-V é medida em condições-padrão de ensaio (STC¹⁷), considerando uma radiação incidente de 1000 W/m² (100 W/cm²) sob uma temperatura da célula de 25°C (T = 298,16°K) e um espectro solar AM 1,5¹⁸.

A eficiência (rendimento) nas STC é definida pela relação entre a potência elétrica produzida pela célula fotovoltaica e a potência de energia solar incidente na célula:

$$\eta = \frac{P_{MP}^r}{A \cdot G} \times 100\% , \quad (4)$$

em que P_{MP}^r é o ponto de máxima potência para as condições de referência; A é a área da célula [m²] e G é a radiação solar incidente [W/m²].

3.2.1 INFLUÊNCIA DO FATOR DE FORMA

O fator de forma (FF) é a relação entre a máxima potência da célula fotovoltaica e o produto da tensão de circuito aberto e a corrente de curto circuito, como pode-se verificar na Equação (5). A partir desta expressão observa-se a influência do fator de forma no cálculo do rendimento. O FF é dado por:

$$FF = \frac{V_{MP}^r I_{MP}^r}{V_{OC}^r I_{SC}^r} , \quad (5)$$

$$FF = \frac{P_{MP}^r}{V_{OC}^r I_{SC}^r} . \quad (6)$$

¹⁷ *Standard Test Conditions.*

¹⁸ *Air Mass – massa de ar de 1,5*

Dessa forma, P_{MP}^r é dado por:

$$P_{MP}^r = FF \times V_{OC}^r I_{SC}^r . \quad (7)$$

Substituindo a Equação (7) na Equação (4), tem-se:

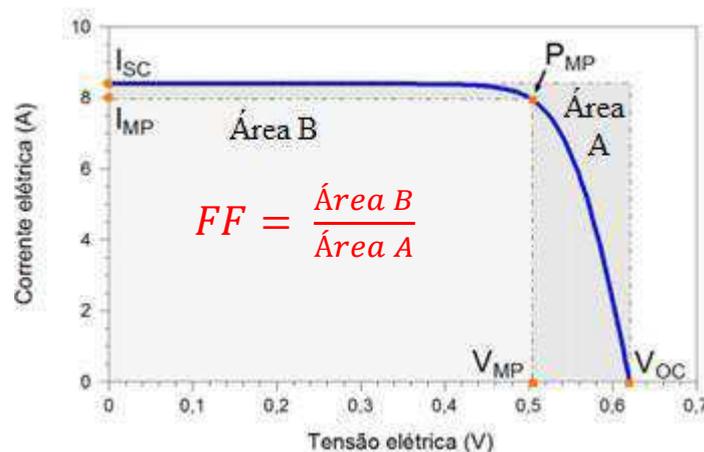
$$\eta = \frac{FF \times V_{OC}^r I_{SC}^r}{A \cdot G} \times 100\% , \quad (8)$$

em que FF é o fator de forma; V_{MP}^r é a tensão máxima para as condições de referência; I_{MP}^r é a corrente máxima para as condições de referência; V_{OC}^r é a tensão de circuito aberto para as condições de referência e I_{SC}^r é a corrente de curto circuito para as condições de referência.

Verifica-se assim que, para obter um bom rendimento da célula fotovoltaica, é desejável que o fator de forma seja o maior possível. Assim, o FF é considerado um indicador de qualidade das células FV. Segundo Castro (2002, p. 20) “[...] As células em uso comercial apresentam um fator de forma entre 0,7 e 0,85.”

A partir da Figura 3. é possível verificar que o fator de forma é definido pela razão entre as áreas dos dois retângulos. Dessa forma, observa-se que quando a potência máxima P_{MP} diminui, o fator de forma também diminui, logo, o rendimento obtido será menor.

Figura 3.3 - Curva característica típica de uma célula fotovoltaica destacando o fator de forma



Fonte: (PINHO e GALDINO, 2014).

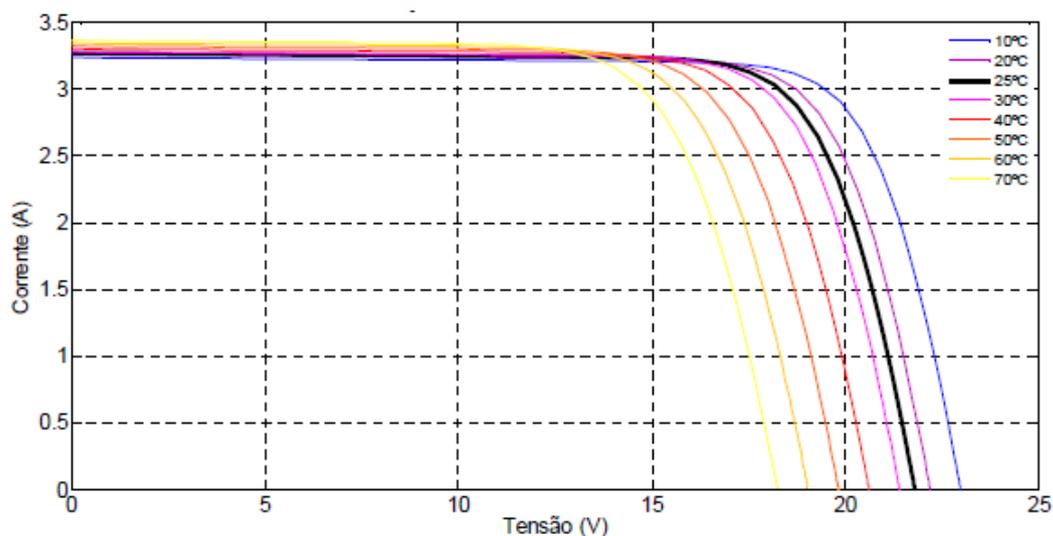
De acordo com Pinho e Galdino (2014, p. 120), “[...] valores de FF dependem da tecnologia usada, como por exemplo: c-Si (80,9% – 82,8%), CdTe (77%), a-Si (67,8%), DSSC (71,2%), InGaP/GaAs/InGaAs (86%).”

3.2.2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DA CÉLULA E DO VENTO

Devido ao fato da célula solar fotovoltaica está exposta a todo instante a radiação solar, temperatura ambiente, temperatura devido a energia excedente do fóton e vento, tem-se variação de temperatura neste elemento. Por exemplo, em dias de sol com vento, as células fotovoltaicas aquecem menos comparado em dia de sol sem vento. Portanto, para evitar uma diminuição de eficiência, faz-se necessário manter as células as mais ventiladas possíveis. A partir da Figura 3.4 é possível fazer algumas considerações a respeito dos parâmetros da curva característica com a temperatura. São elas:

- Na medida que a temperatura da célula aumenta, a tensão de circuito aberto e a potência de saída diminui. Verifica-se ainda na Figura 3.4 que o aumento da temperatura na célula, devido a parte da energia que foi dissipada sob forma de calor e da energia que não foi totalmente absorvida, tende a reduzir a eficiência da célula fotovoltaica (área abaixo da curva diminui);
- A corrente de curto circuito aumenta muito pouco com o aumento da temperatura.

Figura 3.4 - Variação da curva I-V com a temperatura da célula com irradiação solar de 1000 W/m²



Fonte: (ORTEGA, 2013).

Conclui-se, portanto, que as células cristalinas atingem melhores eficiências a baixas temperaturas.

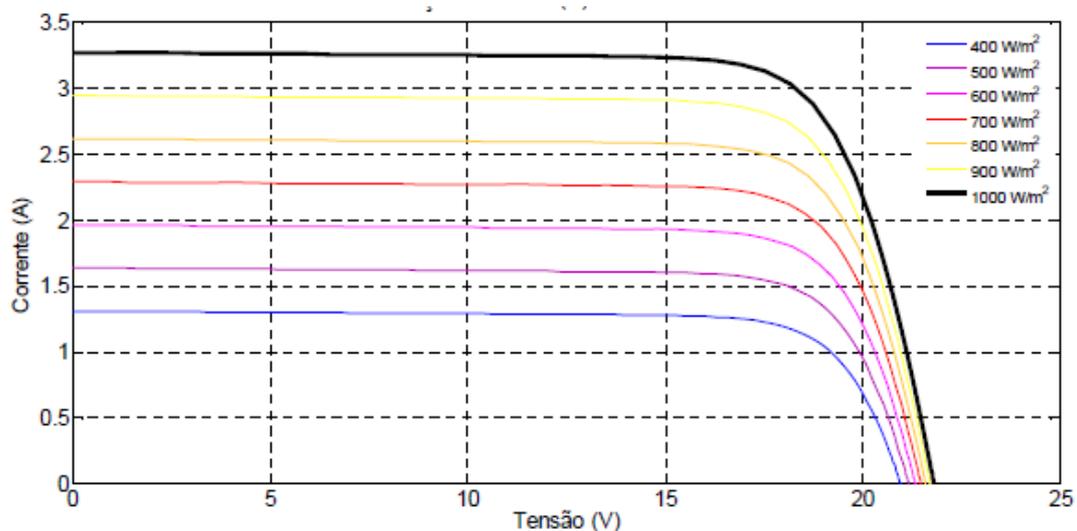
“Em uma célula de silício cristalino, um aumento de 100 °C na temperatura produz uma variação da ordem de -0,2 V (-30%) em V_{OC} e de +0,2% em I_{SC} .” (PINHO e GALDINO, 2014).

3.2.3 INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO INCIDENTE

A partir da Figura 3.5 é possível verificar as seguintes considerações:

- O aumento da radiação incidente faz com que a corrente aumente linearmente;
- A potência aumenta com o aumento da radiação incidente;
- A variação de tensão de circuito aberto é muito pequena à medida que a radiação incidente aumenta.

Figura 3.5 - Variação da curva I-V com a radiação incidente em uma célula com uma temperatura de 25°C



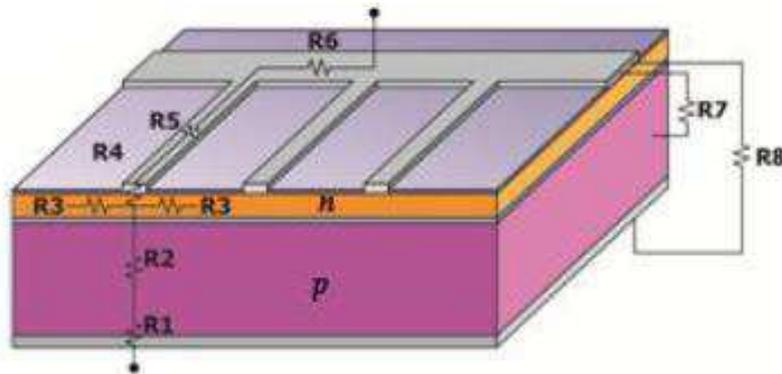
Fonte: (ORTEGA, 2013).

Verifica-se a forte dependência da potência máxima com a radiação incidente, assim como, uma redução expressiva na energia produzida a medida que a radiação incidente diminui.

3.2.4 PERDAS NO CIRCUITO ELÉTRICO DA CÉLULA

O modelo simplificado da célula solar fotovoltaica vista no início deste capítulo, não representa verdadeiramente a célula fotovoltaica. Esta possui resistências ôhmicas em toda a sua estrutura como pode-se ver na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Resistências ôhmicas presentes na célula solar fotovoltaica



Fonte: (PINHO e GALDINO, 2014).

Em relação as resistências existentes na célula fotovoltaica têm-se as seguintes perdas:

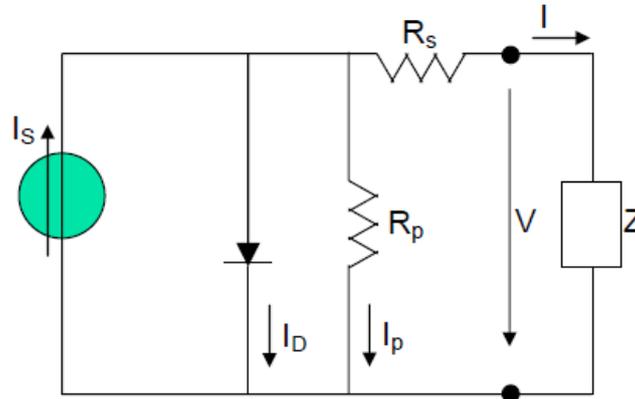
- “Perdas por resistência em série nas junções metal-semicondutor (R4 e R1) existentes nos contatos metálicos frontal e traseiro.” (PINHO e GALDINO, 2014, p. 115);
- Perdas nos contatos metálicos superior, representado por R5 e R6;
- Perdas nas regiões n e p, representada respectivamente por R3 e R2;
- “[...] perdas por resistência em paralelo entre o contato metálico frontal (malha metálica) e a região tipo p (R7).” (PINHO e GALDINO, 2014, p. 115);
- Perdas entre os contatos superior e inferior da célula fotovoltaica (R8).

Portanto, o modelo simplificado da célula fotovoltaica, visto no início deste capítulo, possui mais dois elementos em sua estrutura para representar as perdas comentadas acima.

Pode-se verificar na Figura 3.7 uma resistência em série R_S a qual representa uma queda de tensão no circuito até aos contatos externos, e uma resistência em paralelo R_p ,

a qual representa as correntes de fuga existente no circuito da célula fotovoltaica e imperfeições do próprio material semiconductor.

Figura 3.7 - Circuito elétrico equivalente real de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z



Fonte: (CASTRO, 2002).

Logo, uma nova corrente I é estabelecida:

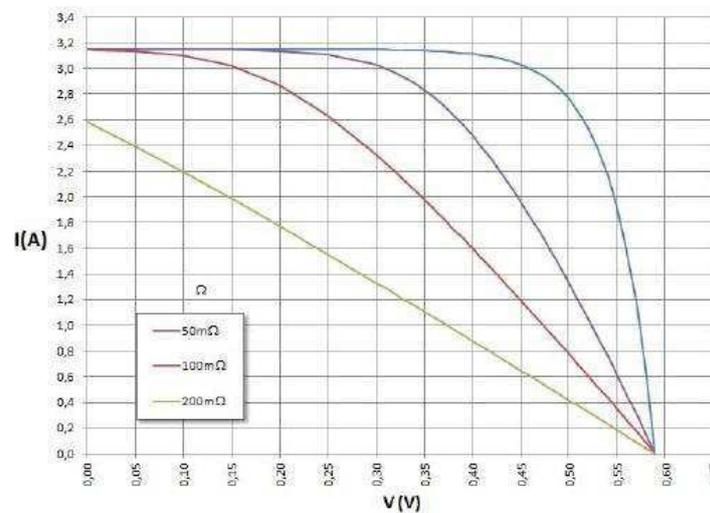
$$I = I_s - I_D - I_p,$$

$$I = I_s - I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) - \frac{V - R_s I}{R_p}. \quad (9)$$

A resistência série R_s representa as resistências dos contatos metálicos superior e inferior, da junção metal-semicondutor e o próprio material semiconductor.

A partir das Figura 3.8 e Figura 3.9 é possível verificar o efeito significativo da resistência série R_s e resistência em paralelo R_p sobre a curva I-V.

Figura 3.8 - Efeito da resistência série (R_s) na curva I-V de uma célula fotovoltaica, sendo todas as curvas para a mesma temperatura e irradiância (STC), considerando em aberto a resistência paralelo ($R_p = \infty$)

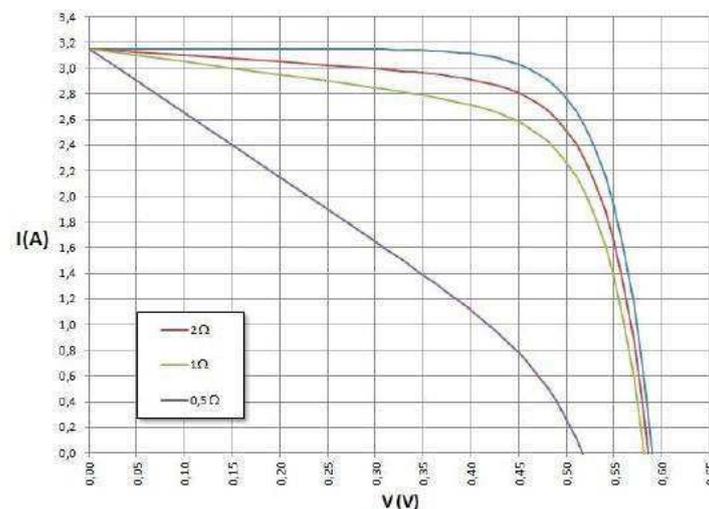


Fonte: (PINHO e GALDINO, 2014).

Logo, pode-se verificar que o fator de forma diminui à medida que a resistência série R_s aumenta.

Efeito inverso acontece com a resistência em paralelo R_p . É possível verificar pela Figura 3.9 que o fator de forma aumenta com o aumento de R_p .

Figura 3.9 - Efeito da resistência paralelo (R_p) na curva I-V de uma célula fotovoltaica, sendo todas as curvas para a mesma temperatura e irradiância (STC), considerando nula a resistência série ($R_s = 0$)



Fonte: (PINHO e GALDINO, 2014).

De acordo com Pinho e Galdino (2014, p. 122), “Observa-se que a sensibilidade da célula, em particular do FF e da P_{MP} , é muito maior para variações na R_s do que para variações na R_p . Assim, a manutenção da R_s em um valor baixo é decisiva para o desempenho da célula, e obtida por meio de projeto e fabricação adequados. Isto é ainda

mais importante em células para concentração, as quais operam em densidades de corrente mais elevadas.” O que constitui ainda um desafio tecnológico, no estado atual do desenvolvimento tecnológico. O que demanda ainda um bom tempo para uma solução satisfatória.

4 EVOLUÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS CÉLULAS

FOTOVOLTAICAS

No capítulo anterior pode-se verificar através das curvas características apresentadas que a célula solar fotovoltaica é capaz de produzir potência elétrica, conseqüentemente energia elétrica quando conectado a uma carga. Porém, devido à grande quantidade de energia perdida na célula fotovoltaica essa potência elétrica é baixa e limitada.

A partir de todos os fatores discutidos nos capítulos anteriores com relação as perdas na célula fotovoltaica, pode-se então tomar conhecimento de informações pertinentes sobre a eficiência destas.

Neste capítulo, será discutido sobre a evolução da eficiência das células fotovoltaicas a partir do gráfico da NREL compreendido desde o ano de 1976 até o presente. Em paralelo, estes dados serão comparados com outros resultados obtidos por outros laboratórios. Ressaltando que todos os valores das eficiências a serem vistos a seguir foram obtidos em laboratório, sob condições controlada: radiação de referência, temperatura ideal constante e célula de dimensão reduzida.

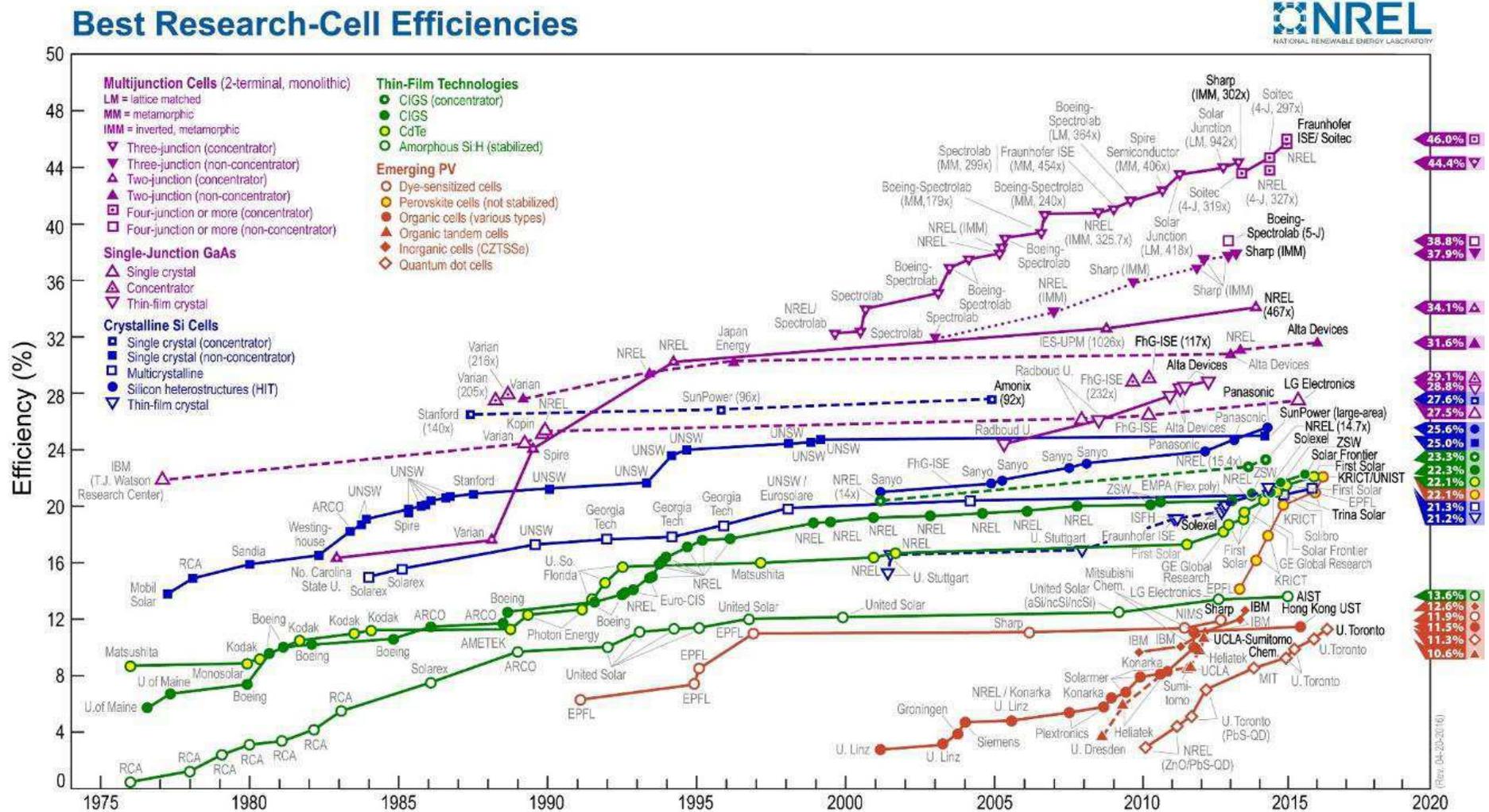
A Figura 4.1 mostra a evolução da eficiência das células fotovoltaicas em função do tempo (ano). É possível verificar cerca de vinte e quatro subcategorias diferentes, indicadas por símbolos e cores diferentes. Verifica-se quatro diferentes cores, porém cinco diferentes famílias de semicondutores. São elas as células de multijunção, células de junção única de arsenieto de gálio (GaAs), células de silício cristalino, células de filme fino e por fim, as células emergentes. Em cima de cada símbolo possui um nome, o qual se refere a empresa ou grupo que fabricou a célula fotovoltaica. Do lado de alguns nomes verifica-se valores entre parênteses. Esse valor refere-se à quantidade de radiação incidente em uma determinada área da célula fotovoltaica. Para se ter ideia, 1 sol (ou 1x) corresponde a 1.000 W/m². Portanto, essas células fotovoltaicas são testadas em laboratórios em “[...] condições de concentração da radiação solar, o que implica na utilização de dispositivos ópticos (lentes ou espelhos) para obtenção de níveis de irradiância superiores aos naturais, a eficiência das células fotovoltaicas pode aumentar, se a temperatura for controlada.” (PINHO e GALDINO, 2014). As medições de eficiência

são realizadas em relação a condições-padrão de ensaio (STC), como detalhado no capítulo anterior.

A partir da Figura 4.1 é possível fazer algumas análises com relação as cinco diferentes famílias de semicondutores:

- As maiores eficiências são observadas na família do semicondutor de junção única de arsenieto de gálio (GaAs) e células de multijunção, em especial as células de três e quatro junções ou mais, as quais obtiveram uma das maiores eficiências dentre todas as células testadas. A eficiência obtida foi respectivamente de 44,4% para concentrações de 302x e 46%. É possível verificar um pequeno crescimento da eficiência, cerca de 5%, para as células de junção única de GaAs em aproximadamente 40 anos e cerca de 4% para as células de duas junções dentre 25 anos;
- Quanto as células fotovoltaicas de silício cristalino pode-se verificar uma evolução crescente para as células monocristalina (mc-Si) e policristalina (pc-Si) até aproximadamente o ano de 1994. Daí em diante pouco se evolui na eficiência das duas células. É fácil verificar, que a célula mc-Si sempre foi mais eficiente comparada à célula pc-Si. Durante 20 anos, 1995 até o presente, a célula monocristalina possui uma eficiência de aproximadamente 25%. Atualmente, o rendimento da célula policristalina é de 21,3%. Sem muito sucesso em sua evolução, porém com uma maior eficiência, a célula monocristalina submetida a concentração permanece com um rendimento constante por volta de duas décadas, alcançando uma eficiência de 27,6% no ano de 2005;
- Verifica-se que as células fotovoltaicas que compreende a tecnologia de filme fino alcançaram uma eficiência baixíssima por volta do ano de 1976 e cresceram consideravelmente até o ano de 1994. A partir de então, a eficiência pouco cresceu até o presente. Dentre a tecnologia de filme fino, verifica-se que a célula CIGS possui a maior eficiência, alcançando um valor de 22,3% no ano de 2015. Pode-se observar uma evolução acentuada da eficiência do telureto de cádmio (CdTe) a partir do ano de 2011, alcançando um rendimento de 22,1% no final do ano de 2015. Dentre a tecnologia de filme fino, nota-se que a célula de silício amorfo

Figura 4.1 - Eficiência das células fotovoltaicas



Fonte: http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg

hidrogenado é a que possui um menor rendimento, alcançando 13,6% no ano de 2015;

- Pelo gráfico da NREL (Figura 4.1) pode-se verificar que as células emergentes possuem as menores eficiências dentre todas as células testadas, no entanto, está avançando linearmente a cada ano. O que mais chama atenção no gráfico é a célula de *Perovskite*, a qual obteve um crescimento em sua eficiência de aproximadamente de 9% em cerca de 3 anos, atingindo um valor de 22,1% neste ano. Nota-se que a eficiência da célula de corante (*dye-sensitized*) não evoluiu em um período de 16 anos, obtendo 11,9% de eficiência em 2013. Por fim, observa-se que a eficiências das células orgânicas não evoluíram em um período de 3 anos, alcançando uma eficiência de 11,5% em 2015.

Para uma melhor visualização a respeito das eficiências das células fotovoltaicas divulgadas pela NREL, a Tabela 4.1 apresenta um resumo das tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas, com seu valor de máxima eficiência testadas no laboratório da NREL.

Tabela 4.1 - Máxima eficiência da célula fotovoltaica (NREL)

Família semicondutor	Tecnologia	Empresa	Ano	Eficiência (%)
Multijunção	Quatro ou mais junções (concentrado)	Fraunhofer ISE/Soitec	2014	46,0
	Quatro ou mais junções (não concentrado)	Boeing – Spectrolab (5-J)	2013	38,8
	Três junções (conc.)	Sharp (IMM, 302x)	2013	44,4
	Três junções (não conc.)	Sharp (IMM ¹⁹)	2013	37,9
	Duas junções (conc.)	NREL (467x)	2013	34,1
	Duas junções (não conc.)	Alta Devices	2015	31,6
Junção Única de GaAs	Cristal simples	LG Electronics	2015	27,5
	Concentrado	FhG-ISE (117x)	2010	29,1
	Cristal de filme fino	Alta Devices	2012	28,8
Silício Cristalino	Monocristalino (conc.)	Amonix (92x)	2005	27,6
	Monocristalino	SunPower (large-area)	2014	25,0
	Policristalino	Trina Solar	2015	21,3
	Heteroestrutura de silício (HIT)	Panasonic	2014	25,6
	Filme fino	Solexel	2014	21,2
Filme Fino	CIGS (concentrado)	NREL (14,7x)	2014	23,3
	CIGS	Solar Frontier	2015	22,3
	CdTe	First Solar	2015	22,1
	Silício amorfo hidrogenado (estabilizado)	AIST	2015	13,6
Emergentes	Sensibilizada por corante Perovskit	Sharp	2012	11,9
	(não sensibilizada)	KRICT/UNIST	2015	22,1
	Orgânica (vários tipos)	Hong Kong UST	2015	11,5
	Orgânica em tandem	UCLA-Sumitomo Chem.	2012	10,6
	Inorgânica	IBM	2013	12,6
	Pontos quânticos	U. Toronto	2015	10,6

Fonte: autoria própria, a partir das eficiências das células fotovoltaicas divulgadas pela NREL.

Na Tabela 4.2 verifica-se as maiores eficiências das células fotovoltaicas para diferentes tecnologias com mais detalhes em sua medição. É possível notar que as eficiências foram obtidas em diferentes laboratórios²⁰, o que fica claro que poucos laboratórios estatais ou de grupos privados não ultrapassam dez, quando se trata do desenvolvimento de células de última geração e altas eficiências de laboratório. O que difere da tabela anterior (Tabela 4.1), em que os dados das eficiências foram obtidos por meio de testes realizados no laboratório da NREL.

¹⁹ Multijunção metamórfico invertido

²⁰ Está descrito na tabela na coluna referente a *test centre (date)*.

Tabela 4.2 - Descrições dos dados obtidos para obtenção da máxima eficiência das células fotovoltaicas²¹

Classification	Efficiency (%)	Area (cm ²)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	Fill factor (%)	Test centre (date)	Description
Silicon							
Si (crystalline)	25.6 ± 0.5	143.7 (da)	0.740	41.8 ^a	82.7	AIST (2/14)	Panasonic HIT, rear junction [15]
Si (multicrystalline)	21.25 ± 0.4	242.74 (t)	0.6678	39.80 ^b	80.0	FhG-ISE (11/15)	Trina Solar [5]
Si (thin transfer submodule)	21.2 ± 0.4	239.7 (ap)	0.687 ^c	38.50 ^{c,d}	80.3	NREL (4/14)	Solexel (35 µm thick) [16]
Si (thin film minimodule)	10.5 ± 0.3	94.0 (ap)	0.492 ^c	29.7 ^c	72.1	FhG-ISE (8/07) ^e	CSG Solar (<2 µm on glass; 20 cells) [17]
III-V cells							
GaAs (thin film)	28.8 ± 0.9	0.9927 (ap)	1.122	29.68 ^f	86.5	NREL (5/12)	Alta Devices [18]
GaAs (multicrystalline)	18.4 ± 0.5	4.011 (t)	0.994	23.2	79.7	NREL (11/95) ^d	RTI, Ge substrate [19]
InP (crystalline)	22.1 ± 0.7	4.02 (t)	0.878	29.5	85.4	NREL (4/90) ^d	Spire, epitaxial [20]
Thin film chalcogenide							
CIGS (cell)	21.0 ± 0.6	0.9927 (ap)	0.757	35.70 ^g	77.6	FhG-ISE (4/14)	Solibro, on glass [21]
CIGS (minimodule)	18.7 ± 0.6	15.892 (da)	0.701 ^c	35.29 ^{c,h}	75.6	FhG-ISE (9/13)	Solibro, 4 serial cells [22]
CdTe (cell)	21.0 ± 0.4	1.0623 (ap)	0.8759	30.25 ^d	79.4	Newport (8/14)	First Solar, on glass [23]
Amorphous/microcrystalline Si							
Si (amorphous)	10.2 ± 0.3 ^j	1.001 (da)	0.896	16.36 ^d	69.8	AIST (7/14)	AIST [24]
Si (microcrystalline)	11.8 ± 0.3 ^j	1.044 (da)	0.548	29.39 ^g	73.1	AIST (10/14)	AIST [25]
Dye sensitised							
Dye	11.9 ± 0.4 ^k	1.005 (da)	0.744	22.47 ⁱ	71.2	AIST (9/12)	Sharp [26]
Dye (minimodule)	10.7 ± 0.4 ^k	26.55 (da)	0.754 ^c	20.19 ^{c,g}	69.9	AIST (2/15)	Sharp, 7 serial cells [26]
Dye (submodule)	8.8 ± 0.3 ^k	398.8 (da)	0.697 ^c	18.42 ^{c,h}	68.7	AIST (9/12)	Sharp, 26 serial cells [27]
Organic							
Organic thin-film	11.0 ± 0.3 ^m	0.993 (da)	0.793	19.40 ^d	71.4	AIST (9/14)	Toshiba [28]
Organic (minimodule)	9.7 ± 0.3 ^m	26.14 (da)	0.806	16.47 ^{c,g}	73.2	AIST (2/15)	Toshiba (8 series cells) [28]
Perovskite							
Perovskite thin-film	15.6 ± 0.6 ⁿ	1.020 (da)	1.074	19.29 ^b	75.1	AIST (6/15)	NIMS [6]
Multijunction							
Five junction cell (bonded) (2.17/1.68/1.40/1.06/0.73 eV)	38.8 ± 1.2	1.021 (ap)	4.767	9.564	85.2	NREL (7/13)	Spectrolab [29]
InGaP/GaAs/InGaAs	37.9 ± 1.2	1.047 (ap)	3.065	14.27 ^a	86.7	AIST (2/13)	Sharp [30]
GaInP/Si (mech. stack)	29.8 ± 1.5 ^l	1.006 (da)	1.46/0.68	14.1/22.7 ^b	87.9/76.2	NREL (10/15)	NREL, 4-terminal
a-Si/no-Si/no-Si (thin-film)	13.6 ± 0.4 ^l	1.043 (da)	1.901	9.92 ^g	72.1	AIST (1/15)	AIST [31]
a-Si/no-Si (thin-film cell)	12.7 ± 0.4 ^l	1.000 (da)	1.342	13.45 ^d	70.2	AIST (10/14)	AIST [24,25]

Fonte: (GREEN et al., 2015).

Ao fazer uma análise comparativa da Tabela 4.1 com a Tabela 4.2 observa-se que para um mesmo tipo de tecnologia de célula fotovoltaica suas eficiências são praticamente iguais. Pode-se perceber que as maiores eficiências que se encontram na Tabela 4.1 não corresponde a mesma empresa que fabricou a célula fotovoltaica de tal tecnologia obtida na Tabela 4.2.

Ao fazer um estudo comparativo detalhado entre ambas as tabelas, é possível perceber as seguintes questões:

²¹ Testes realizados em STC.

- A eficiência da célula fotovoltaica de silício cristalino fabricada pela empresa Trina Solar foi de 21,3% obtida pelo laboratório da NREL e de 21,25% pelo laboratório da FhG-ISE;
- A célula de telureto de cádmio (CdTe) fabricada pela First Solar, possui uma eficiência de 21% obtida pelo laboratório de Newport e de 22,1% pelo laboratório da NREL.

Logo, essa pequena diferença de eficiência pode ser justificada devido a uma série de imprecisão que foi dispensável no momento dos testes para cada laboratório.

Vale ressaltar que a exceção da célula de silício cristalino (Si crystalline) e InP cristalino (InP crystalline) nenhuma outra com rendimento superior a 22%, que foram medidas, tinham uma superfície maior que 1cm².

Na Tabela 4.3 é possível verificar as maiores eficiências de alguns módulos fotovoltaicos medidas em laboratório no ano de 2015.

Tabela 4.3 - Descrições dos dados obtidos para obtenção da máxima eficiência dos módulos fotovoltaicos

Classification	Effic. (%)	Area (cm ²)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	FF (%)	Test centre (date)	Description
Si (crystalline)	22.9 ± 0.6	778 (da)	5.60	3.97	80.3	Sandia (9/96) ^a	UNSW/Gochermann [32]
Si (large crystalline)	22.8 ± 0.6	15 738.9 (ap)	69.36	6.459 ^b	80.0	NREL (6/15)	SunPower (96 serial cells) [8]
Si (multicrystalline)	19.2 ± 0.4	15 126.5 (ap)	77.93	4.726 ^b	78.93	FhG-ISE (6/15)	Trina Solar (120 serial cells) [9]
GaAs (thin-film)	24.1 ± 1.0	858.5 (ap)	10.89	2.255 ^c	84.2	NREL (11/12)	Alta Devices [33]
CdTe (thin-film)	18.6 ± 0.6	7038.8 (ap)	110.6	1.533 ^b	74.2	NREL (4/15)	First Solar, monolithic [10]
CIGS (Cd free)	17.5 ± 0.5	808 (da)	47.6	0.408 ^d	72.8	AIST (6/14)	Solar Frontier (70 cells) [34]
CIGS (thin-film)	15.7 ± 0.5	9703 (ap)	28.24	7.254 ^e	72.5	NREL (11/10)	Miasole [35]
a-Si/nc-Si (tandem)	12.3 ± 0.3 ^f	14322 (t)	280.1	0.902 ^g	69.9	ESTI (9/14)	TEL Solar, Trubbach Labs [36]
Organic	8.7 ± 0.3 ^h	802 (da)	17.47	0.569 ^d	70.4	AIST (5/14)	Toshiba [28]

Fonte: (GREEN et al., 2015).

De acordo com os dados verificados nas Tabela 4.2 e Tabela 4.3 é possível fazer uma comparação das maiores eficiências das células fotovoltaicas e dos módulos FV testados em laboratório, como pode-se verificar na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Comparação das maiores eficiências de algumas tecnologias das células fotovoltaicas e dos módulos fotovoltaicos

	Tecnologia	Eficiência (%)
Silício Cristalino	Monocrsitalino (célula)	25,6
	Monocrsitalino (módulo)	22,9
	Policrsitalino (célula)	21,25
	Policrsitalino (módulo)	19,2
Filme Fino	CI(G)S (célula)	21,0
	CI(G)S (módulo)	17,5
	CdTe/CdS (célula)	21,0
	CdTe (módulo)	18,6

Fonte: autoria própria, a partir dos dados obtidos das Tabela 4.2 e Tabela 4.3.

Além de todas as limitações das eficiências das células fotovoltaicas vista no capítulo anterior, verifica-se a partir da Tabela 4.4, que os módulos fotovoltaicos de cada tecnologia possuem eficiências inferiores às células fotovoltaicas da mesma tecnologia.

O módulo é construído por uma série de células, as quais são soldadas em tiras e encapsuladas, a fim de protegê-las das intempéries e proporcionar resistência mecânica ao módulo fotovoltaico. Essa junção de células FV provoca perdas por *mismatch* pois, as células não têm os mesmos parâmetros que as outras células fotovoltaicas e não são perfeitamente iguais. Por serem ligadas em série no módulo, a célula FV com menor produção limitará a produção de todas elas. O que torna notório, a partir da Tabela 4.4, a diminuição da eficiência da célula fotovoltaica para o módulo fotovoltaico da mesma tecnologia de cerca de 2% a 3%.

5 CONCLUSÃO

Neste Trabalho de Conclusão de Curso foi possível analisar a célula fotovoltaica a partir do seu funcionamento físico e de como são constituídas, para que tornasse mais compreensível o estudo a respeito da eficiência da célula fotovoltaica. Por mais que a análise da eficiência tenha sido feita através de dados, o estudo sobre eficiência é muito complexo, pois envolve termodinâmica, física quântica e aspectos construtivos.

Através do estudo feito sobre o princípio básico da célula fotovoltaica, efeito fotovoltaico, pode-se concluir que a energia interna de cada par gerado por um fóton sempre será igual a E_g . Caso se a energia do fóton for inferior a esta energia, não contribuirá para geração de energia elétrica. E se for superior a esta energia, o semiconductor será aquecido contribuindo para uma diminuição da eficiência. Pode-se verificar que, devido a sua construção, a célula de multijunção consiga aproveitar a energia excedente do fóton.

Pode-se concluir que a partir do ano de 1995 a eficiência das células fotovoltaicas já existentes pouco evoluiu, o aumento da eficiência se deu sobretudo nas células de novas tecnologias. Fazendo uma análise evolutiva da eficiência das células fotovoltaicas verifica-se que a eficiência das células de silício monocristalino e policristalino não evoluiu nos últimos 20 anos, se estabilizando em 25% e 21,3%, respectivamente. Dando a entender que já alcançaram seus valores de máxima eficiência. Em contrapartida, as eficiências das novas tecnologias, células de multijunção e emergentes, crescem linearmente a cada ano. Porém, devido ao nível de dificuldade tecnológica, não seja possível produzir em larga escala. Pode-se concluir que, as células fotovoltaicas de multijunção e de junção única de GaAs que foram submetidas a concentração possui rendimento superiores comparadas as células testadas em condições-padrão de ensaio.

Conclui-se que as eficiências obtidas não sejam fidedignas, devido a uma série de imprecisão que foram descartados. Logo, para um mesmo tipo de célula cada laboratório pode obter valores diferentes de eficiência.

Pode-se concluir quando uma alta eficiência é divulgada, tem-se a impressão que se refere a eficiência da célula de silício. O que pode-se verificar que atualmente não ultrapassou os 25%.

Através das máximas eficiências obtidas em laboratório das células e módulos fotovoltaicos conclui-se que a eficiência do modulo FV é cerca de 2% a 3% inferior à das células. Isto porque, o modulo é composto por uma série de células as quais são soldadas e encapsuladas. Ressaltando que, todas as células não são idênticas umas às outras, consequentemente não possui os mesmos parâmetros.

As análises feitas com relação as eficiências das células fotovoltaicas foram a partir de dados fornecidos de testes feitos em laboratórios. Isto porque, na literatura consultada para elaboração deste trabalho, não continha informações a respeito da eficiência real da célula. Dessa forma, pode-se apontar que não fornecer a eficiência real é algo apenas restrito das empresas ou porque seu valor é extremamente baixo. Assim como, em nenhum momento é divulgada a potência real em uma usina solar, encontrando dados apenas da potência instalada.

REFERÊNCIAS

- ALTENER. (2004). *Energia Fotovoltaica - Manual sobre Tecnologias, Projecto e Instalação*.
- BERLENGA, J. F. (2012). *Estudo de viabilidade de uma instalação*. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica, ramo Energia, Refrigeração e Climatização), Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Departamento de Engenharia Mecânica, Lisboa.
- CARNEIRO, J. (2010). *Semicondutores – Modelo Matemático da Célula Fotovoltaica*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Minho, Departamento de Física, Braga.
- CASTRO, R. M. (2002). *Energias Renováveis e Produção Descentralizada - Introdução à Energia Fotovoltaica*. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, DEEC/Secção de Energia, Lisboa.
- GALDINO, J. T., & PINHO, M. A. (2014). *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos* (Revisada e Atualizada ed.). CEPEL – CRESESB. Rio de Janeiro.
- GREEN, M. A., EMERY, K., HISHIKAWA, Y., WARTA, W., & DUNLOP, E. D. (2015). *Solar cell efficiency tables*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications.
- KARAGIORGIS, G. (2014). *Photovoltaic's Technology Overview*. IRENA, Mechanical Engineering Department Frederick University, Cyprus.
- LUQUE, A., & HEGEDUS, S. (2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (2 ed.). Wiley
- NASCIMENTO, M. A. (2013). *Avaliação de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico*. Tese (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica), Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação, Lisboa.
- NREL. (2016). *Best Research - Cell Efficiencies*. Acesso em 16 de 02 de 2016, disponível em NREL: http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
- NREL. (2016). *The Silicon Solar Cell Turns 50*. Acesso em 07 de 03 de 2016, disponível em NREL: http://www.nrel.gov/education/pdfs/educational_resources/high_school/solar_cell_history.pdf
- ORTEGA, L. L. (2013). *Conversão fotovoltaica: comparação de modelos de desempenho*. Tese (mestrado em metrologia), Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação, Rio de Janeiro.
- PINA, J. A. (2013). *Optimização de Células Fotovoltaicas*. Tese (Mestrado em Engenharia Microelectrónica e Nanotecnologias), Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.
- SolarServer. (2016). *PV60 Exhibit Explores Solar PV History*. Acesso em 07 de 03 de 2016, disponível em SolarServer: <http://www.solarserver.com/index.php?id=18296>

VIANA, S. F. (2010). *Modelação de Micro-Sistemas Híbridos Fotovoltaicos/Eólicos para Produção Descentralizada*. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia), Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa.