

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA – EEL USP

AUGUSTO CESAR MATAVELLI

Energia solar: geração de energia elétrica
utilizando células fotovoltaicas

LORENA - SP
2013

AUGUSTO CESAR MATAVELLI

Energia solar: geração de energia elétrica utilizando
células fotovoltaicas

Monografia apresentada à Escola de Engenharia de
Lorena da Universidade de São Paulo como requisito
para obtenção do título de Engenheiro Químico.

Área de concentração: Engenharia Ambiental
Orientador: Prof. Alexandre Eliseu Stourdze Visconti

LORENA - SP
2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Catálogo na Publicação

Biblioteca Universitária

Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo

Matavelli, Augusto Cesar

Energia solar: geração de energia elétrica utilizando células fotovoltaicas / Augusto Cesar Matavelli; orientador: Alexandre Eliseu Stourdze Visconti. - Lorena: 2013.

34f.

Monografia apresentada como requisito parcial para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia Química. Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo.

1. Energia solar 2. Células Fotovoltaicas. I. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais, meus irmãos e minha família inteira que sempre me apoiaram em todas as minhas decisões e nos momentos de dificuldade.

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar a Deus por tudo.

A minha família e amigos por toda a amizade e amor.

Ao professor e orientador Alexandre Eliseu Stourdze Visconti por sempre me aconselhar e ajudar na seleção de artigos e livros para realizar esse trabalho.

As bibliotecas da Escola de Engenharia de Lorena por me ajudarem a encontrar artigos, trabalhos científicos e livros sobre o assunto desse trabalho.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

“Não fique triste quando ninguém notar o que fez de bom

Afinal...

*O sol faz um enorme espetáculo ao nascer, e mesmo assim, a maioria de nós
continua dormindo.”*

Charles Chaplin

RESUMO

Matavelli, A.C. Energia solar: geração de energia elétrica utilizando células fotovoltaicas. 2013. 34f. Monografia apresentada como requisito parcial para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia Química, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2013.

O Sol, o astro rei, é a fonte de energia mais abundante e intensa ao alcance da Terra. Essa estrela é a principal responsável por praticamente todos os fenômenos e toda a vida encontrada no planeta Terra. A necessidade de se gerar energia acompanhou a evolução da raça humana e teve um pico quando, na Revolução Industrial, começou-se a queimar combustíveis fósseis para gerar energia. Essa Revolução trouxe consigo benefícios que a sociedade não poderia imaginar. A matriz energética cresceu de forma exponencial e as tecnologias acompanharam, evoluindo rapidamente para atender as necessidades das pessoas. Porém, com todo esse avanço, muitos fenômenos naturais foram agravados e problemas ambientais surgiram, gerando muitas complicações para os seres humanos. A energia elétrica, nos dias atuais, se tornou fundamental para a execução de basicamente todas as tarefas realizadas. Por isso, atualmente, investe-se muito em formas de geração de energia renováveis, ou seja, que agredem menos o meio ambiente, conseguindo, assim, satisfazer as necessidades da sociedade. Uma forma de energia renovável utilizada para geração de energia elétrica é a transformação da energia luminosa do Sol. As células fotovoltaicas são responsáveis por essa transformação e estão recebendo cada vez mais investimentos, pois é um meio de geração de energia completamente limpo, onde se utiliza uma fonte de energia inesgotável, se considerada a escala de tempo terrestre. Analisando o funcionamento, consegue-se observar que, se tornada mais acessível, essa tecnologia, as células fotovoltaicas, poderão gerar grande parte da matriz energética da Terra de uma maneira totalmente sustentável.

Palavras-chave: Energia solar, célula fotovoltaica, geração de energia elétrica.

ABSTRACT

Matavelli, A.C. Solar energy: electric power generation using photovoltaic cells. 2013. 34p. Monograph presented as partial requirement for conclusion of chemical engineering degree, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2013.

The Sun, the star King, is the most abundant source of energy and intense within reach of Earth. That star is the main responsible for practically all the phenomena and all life found on planet Earth. The need to generate power has followed the evolution of the human race and had a peak when, in the Industrial Revolution, began to burn fossil fuels to generate power. This revolution brought with it benefits that society could not imagine. The energy matrix grew exponentially and accompanied technologies, evolving rapidly to meet the needs of the people. However, with all this progress, many natural phenomena were aggravated and environmental problems have emerged, leading to many complications for humans. The electrical energy, in the present day, became fundamental to the execution of basically all tasks carried out. So, currently, invests in renewable forms of energy generation, harming less the environment, achieving thus meet the needs of society. A form of renewable energy used for electric power generation is the transformation of light energy from the Sun. Photovoltaic cells are responsible for this transformation and are getting increasingly investments because it is a way to completely clean energy generation, which uses a source of inexhaustible energy, if considered the terrestrial time scale. Analyzing the operation, it is possible to observe that, if made more accessible, this technology, photovoltaic cells, can generate a large part of the Earth's energy matrix of a fully sustainable manner.

Keywords: Solar energy, photovoltaic cell, electric power generation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Capacidade instalada, por fonte de geração.....	16
Tabela 2 - Eficiência típica dos módulos comerciais.....	27

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição espectral da radiação solar	15
Figura 2 – Painéis Fotovoltaicos	17
Figura 3 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de 23,5°	22
Figura 4 - Instalação de painéis fotovoltaicos no telhado de um estabelecimento	24
Figura 5 - Emissão de gases do efeito estufa em 2000 projetadas para 2025	25
Figura 6 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica	25
Figura 7 – Capacidade anual instalada de sistemas fotovoltaicos	28
Figura 8 - Evolução do preço médio dos módulos fotovoltaicos	29
Figura 9 - Consumo de energia elétrica	29

Sumário

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Energia Solar	14
2.1.1 A Radiação Solar.....	14
2.1.2 Uso da Energia Solar.....	15
2.2 Energia Elétrica.....	16
2.3 Células Fotovoltaicas.....	17
2.3.1 Silício Monocristalino	18
2.3.2 Silício Policristalino	19
2.3.3 Silício Amorfo	19
3. METODOLOGIA	19
3.1 Método de pesquisa.....	20
3.2 Procedimentos da pesquisa.....	20
4. RESULTADO E DISCUSSÃO	22
4.1 Incidência da luz solar na superfície terrestre.....	22
4.2 Histórico da utilização da energia solar	23
4.3 Células Fotovoltaicas.....	24
5. CONCLUSÃO	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31
CRONOGRAMA.....	34

1. INTRODUÇÃO

O Sol é a fonte de energia e responsável pela origem da maioria das fontes de energia renováveis e, mesmo as que não utilizam diretamente a radiação solar, tem sua origem neste. As usinas hidrelétricas, por exemplo, se baseiam na energia potencial da água, que precipita em forma de chuva devido à evaporação causada pela luz solar. Já as pás das torres eólicas geram energia através do vento que as gira. O vento só adquire energia cinética, pois a distribuição da luz solar na atmosfera gera diferenças de temperatura e pressão. Os combustíveis como etanol, metanol e biodiesel e até mesmo a madeira, considerados fontes renováveis, são provenientes de plantas que utilizaram a luz solar para realizar fotossíntese e se desenvolver (LAMARCA JUNIOR, 2012). Os combustíveis fósseis são resultados da decomposição de plantas e animais que durante a vida utilizaram o Sol para satisfazer as suas necessidades biológicas.

O aproveitamento da energia solar, inesgotável se levado em conta a escala de tempo terrestre, vem dos primórdios da formação da Terra. Dos primeiros microrganismos até os organismos evoluídos dos dias atuais, todos necessitam da luz solar para sobreviver e evoluir.

Com a elevada demanda e consumo de energia pelo ser humano, os combustíveis fósseis se tornaram a principal fonte de energia, principalmente o petróleo. Este óleo possui um alto potencial energético e com a tecnologia dos dias atuais, consegue-se explorar praticamente todo esse potencial. A principal questão quanto à utilização dos combustíveis fósseis é o impacto ambiental. A queima destes tem gerado diversos problemas ambientais como, por exemplo, o agravamento do efeito estufa, o derretimento das geleiras, a poluição do ar e, conseqüentemente, prejuízo à vida dos organismos.

A necessidade de gerar energia com o mínimo de impacto ambiental, com um processo mais sustentável, tornou-se o maior objetivo. Uma das alternativas é a geração de energia elétrica a partir da radiação solar. Esse processo é realizado com a utilização de células fotovoltaicas, onde o principal componente é o silício, elemento abundante no planeta. O problema de se utilizar as células fotovoltaicas é o alto custo de fabricação, pois o processo ainda não é industrializado e a mão-

de-obra artesanal é cara, tornando o produto final inacessível para a grande maioria da sociedade.

A luz solar foi escolhida como foco do estudo, pois o Sol, como dito anteriormente, é a fonte primária de energia, sendo responsável por outras fontes energéticas, renováveis ou não renováveis. A sustentabilidade e a preocupação na redução de poluentes e impactos ambientais são assuntos que ganharam espaço em todos os setores, tanto na indústria quanto na sociedade, e a geração de eletricidade através da luz solar, mostrou-se uma alternativa sustentável e de grande potencial, principalmente em regiões como a do Vale do Paraíba.

O foco deste trabalho é estudar e entender como a energia solar é transformada em energia elétrica utilizando células fotovoltaicas. As demais maneiras de se utilizar a energia solar, apesar de não serem o foco deste trabalho, tornaram-se parte do conteúdo, pois utilizam a mesma fonte de energia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energia Solar

O Sol é uma fonte de energia tão intensa que pode ser considerado uma imensa fornalha de forma esférica. O núcleo solar pode alcançar temperaturas perto dos quarenta milhões de graus centígrados e sua superfície pode atingir 6000°C (Hinrichs, 2010). Esse astro possui 110 vezes o tamanho da Terra e está a uma distância de 150 milhões de quilômetros (MANUAL, 1978). O fornecimento anual de energia pela radiação solar, para a superfície terrestre, é de $1,5 \times 10^{18}$ KWh (CRESESB, 2006). Da energia total produzida no interior do Sol, apenas uma pequena fração chega à Terra. É essa pequena fração, que na superfície do Sol é transformada de energia nuclear para energia luminosa, que torna a vida terrestre possível. Pode-se imaginar que essa energia luminosa é composta por pacotes de pequenas partículas que contêm energia e denominados fótons.

2.1.1 A Radiação Solar

A radiação solar que atinge o topo da atmosfera é chamada de insolação e possui em torno de 9% de radiação ultravioleta, cerca de 40% de radiação na região do visível e em torno de 50% é de radiação infravermelha (Hinrichs, 2010). Parte da radiação ultravioleta é absorvida pelos gases de nitrogênio, oxigênio e ozônio que estão presentes na atmosfera. Na atmosfera inferior, parte da radiação infravermelha é absorvida pelo vapor d'água e pelo CO₂. Da radiação total que consegue passar da atmosfera, 19% são absorvidos pelas nuvens e por outros gases e 31% são refletidos de volta para o espaço. Os 50% restantes atingem a superfície e são quase completamente absorvidos (Hinrichs, 2010). Esse fenômeno de reflexão da radiação solar é denominado albedo. Parte da radiação refletida é absorvida por CO₂ e H₂O e irradiada de volta para a Terra gerando o chamado efeito estufa. Esse efeito é importante, pois ele mantém a

temperatura relativamente alta da Terra, sem a qual não seria possível existir vida e o seu agravamento é resultado da queima de combustíveis fósseis que liberam gases retentores. A radiação que atinge o topo da atmosfera, chamada de insolação, tem intensidade de 1360 W/m^2 e esse número é denominado constante solar, que varia minimamente com o tempo (Hinrichs, 2010). A figura 1 mostra a distribuição espectral da radiação solar, destacando a região da luz visível, da ultravioleta e do infravermelho.

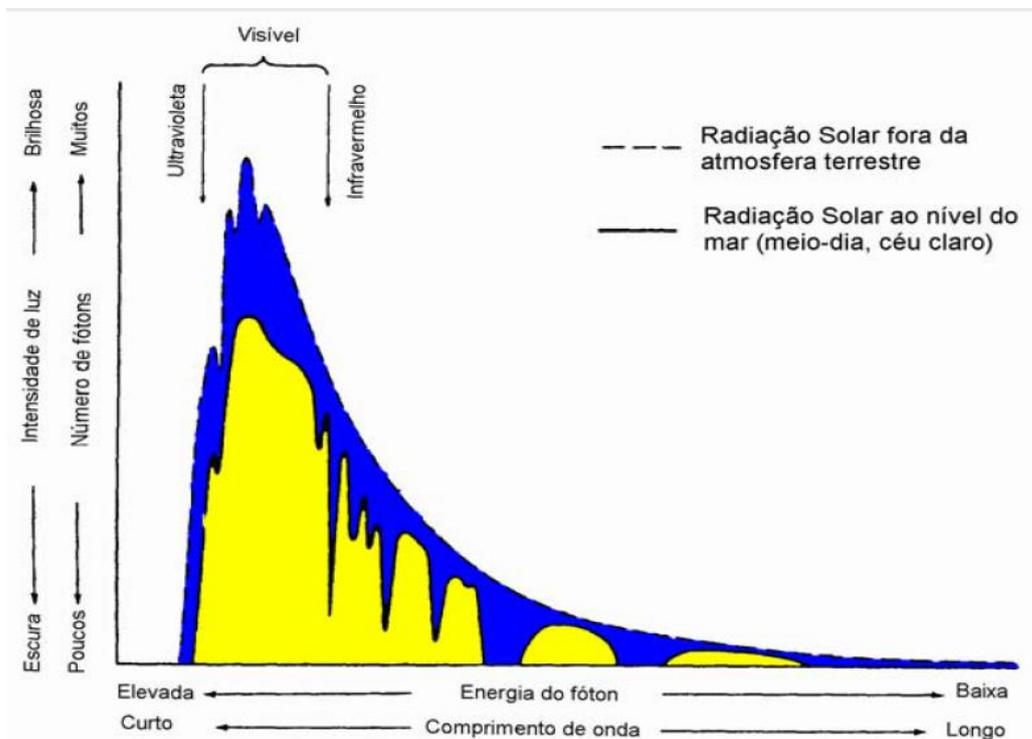


Figura 1 – Distribuição espectral da radiação solar
Fonte: CRESESB (2006)

2.1.2 Uso da Energia Solar

A energia solar pode fornecer basicamente três tipos de processos: térmicos, elétricos e químicos (COMETTA, 1978). O primeiro processo possui processos em diferentes temperaturas. Alguns exemplos são: aquecimento de ambientes e de água (utilizando coletores planos), evaporação, destilação, fornos solares e fornos solares parabólicos. Já o segundo, consiste em processos que há transformação direta em energia elétrica como é no caso de processos

fotovoltaicos e geradores termoelétricos. Por fim, os processos químicos consistem na utilização da energia solar para realizar processos químicos. Os exemplos desse tipo são a fotólise (quebra pela ação da luz solar) e a fotossíntese.

2.2 Energia Elétrica

A energia elétrica é baseada na produção de diferenças de potencial elétrico entre dois pontos. Com isso, os elétrons se movem entre esses pontos criando uma corrente elétrica. Ela pode ser utilizada em diversos equipamentos de uso doméstico e industrial. A energia elétrica é gerada através das águas, sol e vento e é considerada uma forma de energia limpa, pois apresenta baixos índices de produção de poluentes. O processo de geração de energia elétrica consiste na conversão de outra forma de energia em energia elétrica, principalmente a partir da energia cinética. A distribuição, a partir das usinas, ocorre através dos elétrons encontrados nos condutores das linhas de transmissão. No Brasil, a energia elétrica é gerada, principalmente, pelas usinas hidrelétricas. Na tabela 1, pode-se observar que as usinas hidrelétricas é responsável por mais de 60% da energia elétrica gerada no Brasil.

Tabela 1- Capacidade instalada, por fonte de geração
Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2013)

Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
Central Geradora Hidrelétrica (CGH)	429	260.579	261.785	0,21
Central Geradora Eólica (EOL)	103	2.136.168	2.137.372	1,7
Pequena Central Hidrelétrica (PCH)	462	4.634.488	4.595.348	3,66
Central Geradora Solar Fotovoltaica (UFV)	35	6.785	2.785	0
Usina Hidrelétrica (UHE)	194	86.713.255	80.797.124	64,3
Usina Termelétrica (UTE)	1.765	37.746.583	35.894.903	28,6
Usina Termonuclear (UTN)	2	1.990.000	1.990.000	1,58
Total	2.990	133.487.858	125.679.317	100

2.3 Células Fotovoltaicas

A energia elétrica é obtida da conversão direta da luz por meio do efeito fotovoltaico. Esse efeito, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz (CRESESB, 2006). O primeiro aparato fotovoltaico foi montado em 1876 e apenas em 1956, iniciou-se a produção industrial (CRESESB, 2006). A unidade fundamental do processo de conversão é a célula fotovoltaica. O conjunto de células compreende os painéis fotovoltaicos e podem ser observados na figura 2.



Figura 2 – Painéis Fotovoltaicos

Fonte: EPIA (European Photovoltaic Industry Association)

O efeito fotovoltaico ocorre em materiais ditos semicondutores, que são caracterizados pela presença de bandas de energia onde elétrons são permitidos, chamadas bandas de valência, e outras bandas que são vazias, chamadas bandas de condução. Essas células fotovoltaicas trabalham no princípio de que os fótons incidentes, colidindo com os átomos dos materiais semicondutores, fazem com que os elétrons sejam deslocados. Se estes elétrons puderem ser capturados antes de retornarem a seus orbitais atômicos, podem ser aproveitados, livres, como corrente elétrica (COMETTA, 1978).

Dos vários materiais semicondutores encontrados na Terra, o mais utilizado é o silício, pois seus átomos possuem quatro elétrons na camada de valência, que fazem ligação com os elétrons do átomo vizinho, formando assim uma rede cristalina. A essa rede cristalina, são adicionados elementos com cinco elétrons de ligação e elementos com três elétrons de ligação. Os primeiros possuem um elétron que está ligado fracamente ao seu átomo de origem,

facilitando, ao utilizar pouca energia térmica, que ele se desligue do átomo. Já os elementos com três elétrons na camada de valência necessitam de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício e, com pouca energia térmica, um elétron passa a ocupar essa posição. Esse movimento de elétrons gera uma diferença de potencial, onde o acúmulo de elétrons de um lado se torna negativo e do outro lado positivo devido à falta de elétrons e, também, gera um campo elétrico que mantém os elétrons afastados (CRESESB, 2006).

Um material semiconductor é um material que conduz a corrente elétrica, e cuja resistividade diminui ao elevar-se a temperatura, e pela presença de impurezas, ao contrário do que sucede nos condutores metálicos normais (COMETTA, 1978).

A célula fotovoltaica é a menor unidade de conversão de energia luminosa, proveniente do Sol, em energia elétrica e possui alguns tipos segundo a caracterização quanto ao material semiconductor. Praticamente todas as células fotovoltaicas são fabricadas utilizando o silício (CRESESB, 2006).

2.3.1 Silício Monocristalino

Representam a utilização de materiais muito puros e com uma estrutura de cristal perfeita, tornando a produção cara e complexa. Atingem um rendimento relativamente elevado, em torno de 15% e podendo chegar em 18% em células feitas em laboratórios (CRESESB, 2006). O processo de fabricação das células de silício monocristalino se inicia extraíndo o cristal de SiO_2 . Esse material passa por processos de desoxidação em fornos, é purificado e solidificado. Para que este silício funcione como uma célula fotovoltaica, propriamente dita, necessita-se de outros materiais semicondutores e de um grau de pureza mais elevado (CRESESB, 2006).

2.3.2 Silício Policristalino

Apesar do processo de fabricação das células de silício policristalino ser semelhante ao das de silício monocristalino, as primeiras são mais baratas por exigirem menos controle durante o processo de fabricação. A diferença entre os dois tipos de silício está em algumas características específicas como tamanho, morfologia e concentração de impurezas (CRESESB, 2006).

2.3.3 Silício Amorfo

Uma célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem na estrutura dos átomos (CRESESB, 2006). A utilização desse tipo de silício para a fabricação das células fotovoltaicas possui algumas vantagens, tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabricação. Por poder ser fabricado com a deposição de vários tipos de substratos, esse tipo de silício possui um baixo custo se comparado aos outros dois tipos citados acima. As desvantagens do silício amorfo estão na baixa eficiência de conversão da energia luminosa, se comparado com as células mono e policristalinas, e ocorre ainda um processo de degradação da estrutura reduzindo a vida útil da célula (CRESESB, 2006).

3. METODOLOGIA

Para explicar a utilização do método de pesquisa abordado nesse trabalho, é preciso entender como este foi elaborado. A metodologia será explicada através do entendimento do método de pesquisa e dos procedimentos utilizados. A pesquisa é de natureza qualitativa e tem objetivo de entender e compreender a geração de energia elétrica a partir da energia solar.

3.1 Método de pesquisa

O método utilizado no trabalho será a pesquisa bibliográfica. Por ser um assunto que possui um histórico bastante longo, somente há pouco tempo se tornou alvo de estudos complexos e detalhados e, por isso, o acervo de livros e artigos científicos não é tão vasto quanto outros temas já muito trabalhados. O acervo que foi acessado para a elaboração deste trabalho consta de livros, artigos científicos e documentos sobre o tema, que foram recolhidos nas bibliotecas de ambos os campi da Escola de Engenharia de Lorena. Foram utilizados, também, artigos de revistas científicas e manuais. Dissertações de mestrado e teses de doutorado, retiradas de bibliotecas digitais, também foram utilizadas. O tema da pesquisa é a transformação de energia solar em energia elétrica através da utilização de células fotovoltaicas.

3.2 Procedimentos da pesquisa

Primeiramente, analisar-se-á a origem da radiação solar e como ela incide na atmosfera e na superfície terrestre. Em seguida, será mostrado como a energia solar foi e é utilizada até hoje, tanto para fornecimento de energia térmica quanto para energia elétrica. Os diferentes métodos serão apenas citados e, como foco do trabalho, as células fotovoltaicas, conversoras de energia solar em energia elétrica, terão um estudo aprofundado. Serão apresentados gráficos e figuras que ilustram a produção de energia elétrica através da utilização das células fotovoltaicas e da distribuição mundial dessa produção.

Ao final do trabalho, deverá constar que a utilização da energia solar para a obtenção dos mais variados tipos de energia é importante, pois o Sol é uma fonte de energia inesgotável, se levada em conta a escala de tempo terrestre. Outra conclusão que deverá ser obtida é que a utilização das células fotovoltaicas para geração de energia elétrica possui alto potencial, porém, nos dias atuais, essa

tecnologia ainda é inviável financeiramente em grande escala devido ao custo do processo de fabricação, da mão-de-obra e da matéria-prima utilizada.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Incidência da luz solar na superfície terrestre

O Sol, única estrela da Via Láctea e localizado no centro desta, emite luz devido a reações nucleares que ocorrem em seu núcleo e sua superfície. A luz solar e qualquer tipo de luz emitido por uma fonte é composta, pelo o que os cientistas chamam, por fótons. Fóton é uma partícula de luz e pode ser chamado de pacote de luz. Assim, a luz solar pode ter aspectos tanto de uma onda como de uma partícula dependendo das circunstâncias que se encontra.

A luz solar é essencial para a manutenção da vida na Terra. Porém, para que essa luz proveniente do Sol seja totalmente aproveitada pelos seres vivos, a maneira com que ela incide na superfície é de suma importância e pode ser entendida olhando-se a figura 3.

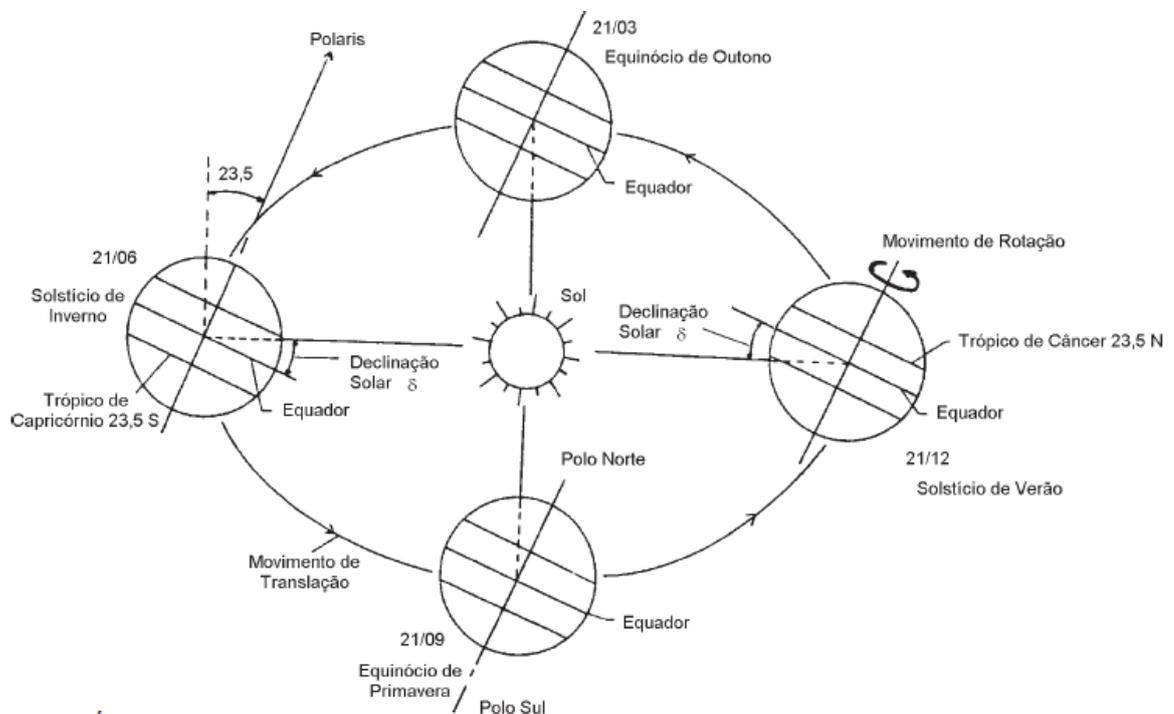


Figura 3 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de 23,5°.

Fonte: "Photovoltaic System Technology - An European Handbook".

Na figura 3, é possível visualizar que, mesmo o eixo da Terra não se alterando, os raios solares incidem com ângulos diferentes durante o ano. Esse estudo sobre a incidência da luz solar na superfície é muito importante, pois os módulos fotovoltaicos devem ser posicionados e ter angulação a fim de maximizar a absorção da luz solar, aumentando sua eficiência.

4.2 Histórico da utilização da energia solar

Desde os primórdios da vida no planeta Terra, a luz solar foi aproveitada pelos organismos para realização de tarefas essenciais para a sua sobrevivência. Não só os primeiros seres humanos, mas a maioria dos animais usufruía da luz solar para atender simples necessidades como, por exemplo, aquecimento em dias frios e secagem após chuvas e tempestades. Com a evolução da espécie, os humanos começaram a entender como a luz solar poderia ser mais bem aproveitada e qual os benefícios ela traria para a qualidade de vida das pessoas. Os Homens do passado perceberam o quão importante a luz solar era para a prática da agricultura e secagem de peles de animais, nesse caso, para evitar proliferação de microrganismos que podiam causar doenças fatais.

Recentemente, uma prática de aproveitamento da energia solar muito utilizada e eficaz é o aquecimento da água principalmente para banho. O sistema é simples, porém necessita de céu aberto para que funcione perfeitamente. Ainda mais recente, a célula fotovoltaica possibilitou um aproveitamento mais eficiente da luz solar e possui como principal objetivo gerar energia elétrica.

Um dos problemas dos grandes centros, nos dias atuais, é a falta de espaço. Como não há espaço físico para a instalação de células fotovoltaicas nos grandes centros, uma alternativa foi a instalação desses painéis na cobertura de edifícios e sobre o teto de estabelecimentos. Essa instalação é feita por profissionais e muitas vezes, mais recentemente, o sistema de geração de energia elétrica é ligada a rede de energia.



Figura 4 - Instalação de painéis fotovoltaicos no telhado de um estabelecimento

4.3 Células Fotovoltaicas

Os gases do efeito estufa tem se tornado uma preocupação de toda a população mundial. Devido à alta queima de combustíveis fósseis para geração de energia e realização de tarefas, houve um aumento da concentração desses gases o que agravou o chamado efeito estufa. Esse fenômeno é responsável pela manutenção da temperatura terrestre e assim tornando possível a vida na Terra como a conhecemos. Esses gases são responsáveis por reter o calor dissipado após a incidência da luz solar na superfície terrestre. O aumento da concentração desses gases despertou, na comunidade científica, a necessidade de se procurar formas de se gerar energia sem agredir o meio ambiente, principalmente no agravamento do efeito estufa devido ao estágio que esse fenômeno se encontra. No figura 5, pode-se observar o aumento da emissão de gases do efeito estufa no mundo e de alguns países em 2000 e a projeção para 2025.

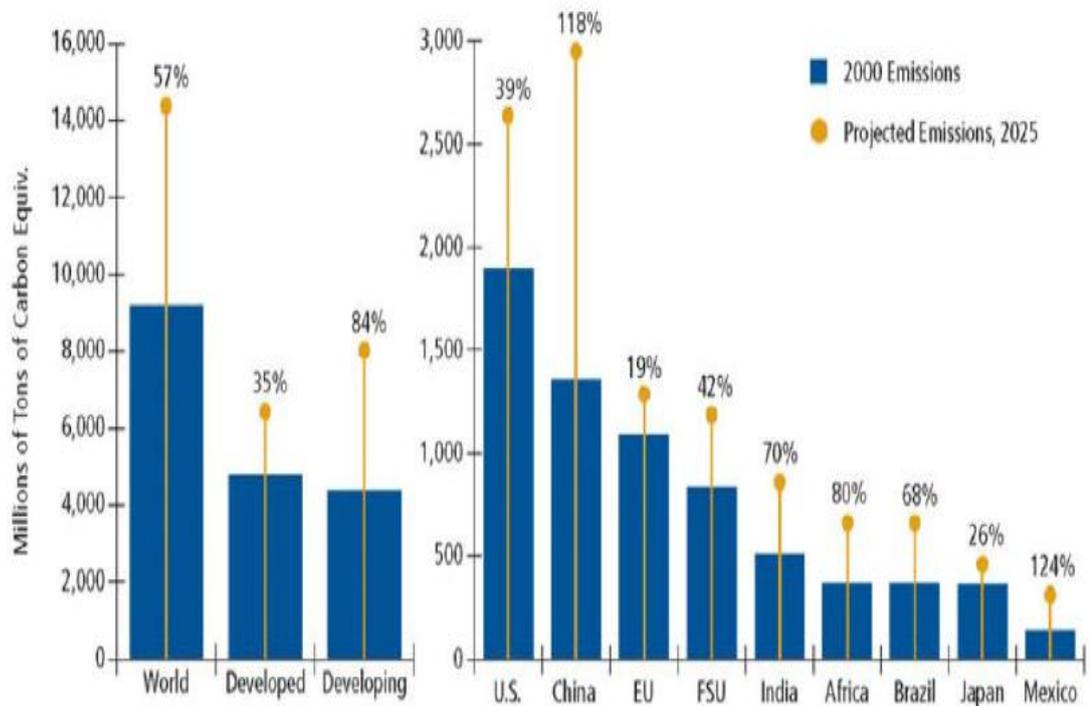


Figura 5 - Emissão de gases do efeito estufa em 2000 projetadas para 2025
 Fonte: Adaptado do Instituto de Recursos Mundiais (World Resources Institute).

Uma alternativa recente para geração de energia elétrica é a utilização de células fotovoltaicas. O corte transversal de uma célula fotovoltaica é ilustrado na figura 6 para melhor entendimento.

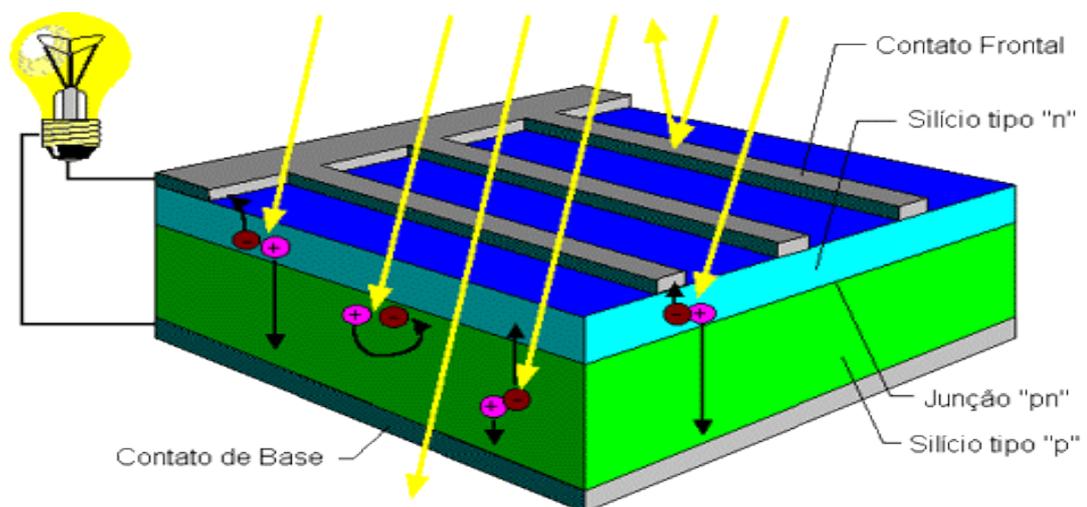


Figura 6 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica
 Fonte: CRESESB (2006).

O princípio de funcionamento das células fotovoltaicas é simples e baseia-se nas propriedades dos materiais semicondutores. Na parte superior, encontra-se uma estrutura metálica e logo abaixo há duas camadas. A camada superior é chamada de silício tipo “n” e a camada inferior é chamada de silício tipo “p”. A junção dessas duas camadas é chamada de junção “pn”.

O semicondutor mais utilizado é o silício, isso porque seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons que se ligam aos átomos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao adicionar átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, por exemplo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia térmica, este elétron se livre, indo para a banda de condução. O fósforo é um doador de elétrons e denomina-se *dopante n*. Por outro lado, introduzem-se átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso do boro. Esses átomos tem uma deficiência de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. Esta falta de elétron é denominada *buraco* ou *lacuna* e com pouca energia térmica um elétron de um sítio vizinho pode passar para esses buracos. Diz-se, portanto, que o boro é um *dopante p*.

Se, partindo de um silício puro, forem introduzidos átomos de boro em uma metade e de fósforo na outra, será formada a junção *pn*. O que ocorre nesta junção é que elétrons livres do lado n passam ao lado p onde encontram os buracos que os capturam. Isto faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado p, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado n, que o torna eletricamente positivo. Estas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p. Este processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado n.

Se uma junção pn for exposta a fótons com energia maior que o *gap*, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna. Acontecendo isso na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim, uma corrente através da junção. Este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial ao qual é chamado de *Efeito Fotovoltaico*. Se as duas extremidades de silício forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de elétrons, ou seja, uma corrente elétrica.

A eficiência das células fotovoltaicas é diretamente proporcional ao custo de produção e de material destas. As células que são compostas por silício monocristalino possuem cristais mais puros e possuem uma estrutura cristalina perfeita, porém o custo de fabricação é mais elevado. Já nas células compostas por silício amorfo, os cristais não são ordenados e a degradação do material é mais rápida. A eficiência das células fotovoltaicas segundo o tipo de silício utilizado está ilustrada na tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Eficiência típica dos módulos comerciais
Fonte: EPIA (2011).

Tecnologia	Eficiência	Área/kW_p
Silício cristalino		
Monocristalino	13 a 19%	~7m ²
Policristalino	11 a 15%	~8m ²
Filmes finos		
Silício amorfo (a-Si)	4 a 8%	~15m ²

Um indício de que o uso de células fotovoltaicas para geração de energia elétrica é eficiente e uma ótima alternativa é de que em residências e estabelecimentos que possuem tal sistema, a energia elétrica gerada excedente é injetada na rede elétrica e os responsáveis por ele são bonificados com descontos ou créditos.

Essa injeção do excedente de energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos já ocorre em vários países como, por exemplo, na Alemanha, que possui capacidade anual instalada em 2011 de aproximadamente 7.500 megawatts. A Itália é outro grande produtor de energia elétrica a partir da energia solar com aproximadamente 8.500 megawatts anuais. A análise do gráfico abaixo permite identificarmos que os países mais ricos, por terem mais dinheiro, investem mais nessa tecnologia. Outro motivo, principalmente nos europeus e no Japão, é não terem outra fonte para geração de energia elétrica. Em países como Brasil, EUA e China, uma importante fonte de geração de elétrica são as usinas

hidrelétricas. A figura 7 mostra a capacidade instalada dos principais países produtores de energia elétrica utilizando células fotovoltaicas.

Capacidade Anual Instalada de Sistemas Fotovoltaicos

Em megawatts por ano

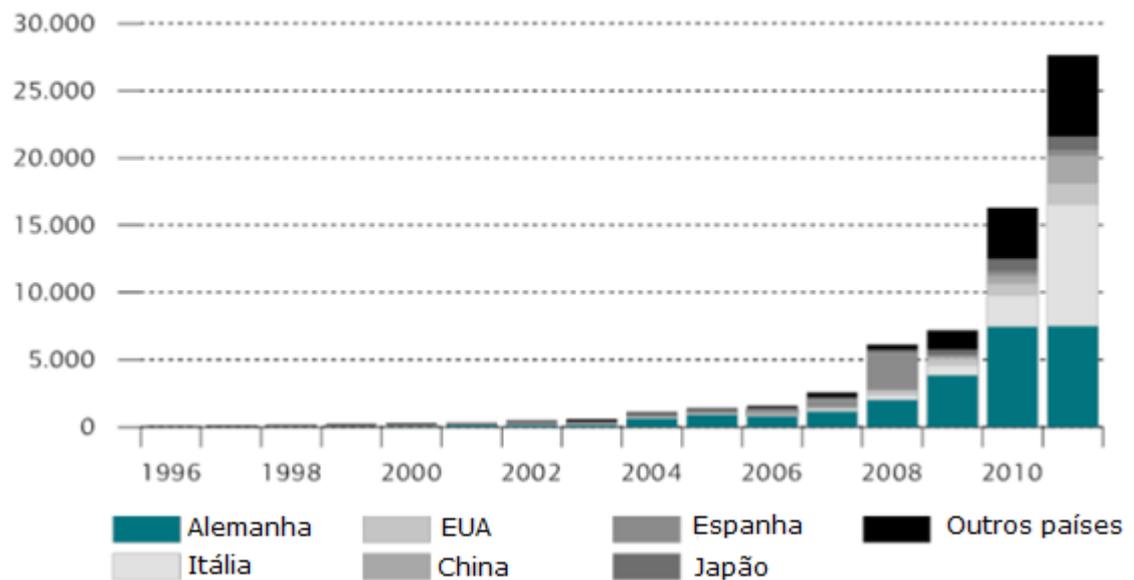


Figura 7 – Capacidade anual instalada de sistemas fotovoltaicos

Fonte: Adaptado de DIW Berlin, 2012.

As primeiras células fotovoltaicas possuíam pouca eficiência e tinham preço muito elevado. Isso se dava, pois a procura por essa tecnologia era baixa e o custo de produção era alto. Com o maior conhecimento e com a tecnologia atual, as células fotovoltaicas se tornaram mais acessíveis a vários dos setores da sociedade. Como acontece com praticamente todos os produtos do mercado mundial, quanto maior a oferta, menor o preço. O gráfico disponibilizado na figura 8 mostra a evolução dos custos dos módulos desde 2001. Nele se observa claramente a tendência linear de queda ao longo do tempo, conforme é esperado em função da queda dos custos internacionais. O preço que chega em torno de R\$32,00/Wp em 2000, chega em 2012, de R\$2,00/Wp até R\$10,00/Wp.

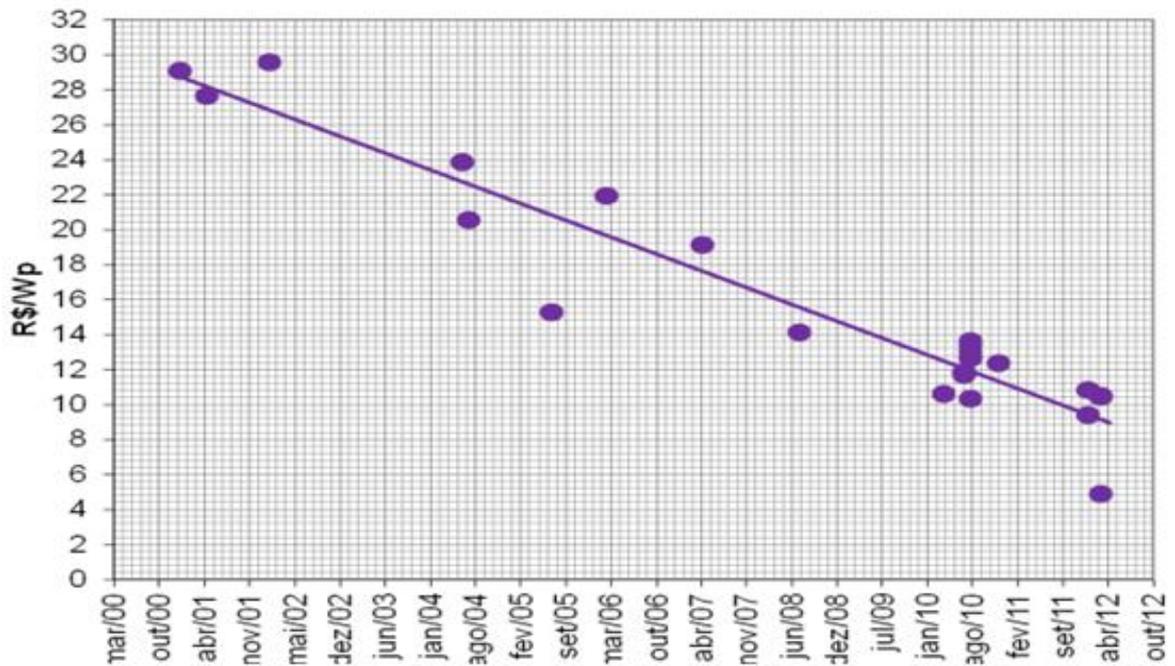


Figura 8 - Evolução do preço médio dos módulos fotovoltaicos
Fonte: CEPEL (2012).

Tanto estudos e preocupações em se encontrar formas de se gerar energia elétrica se deve ao alto consumo desta. No Brasil, o consumo de energia elétrica em 2012 foi 3,5% maior do que em 2011. Na figura 9, pode-se observar o aumento da energia elétrica no mundo.

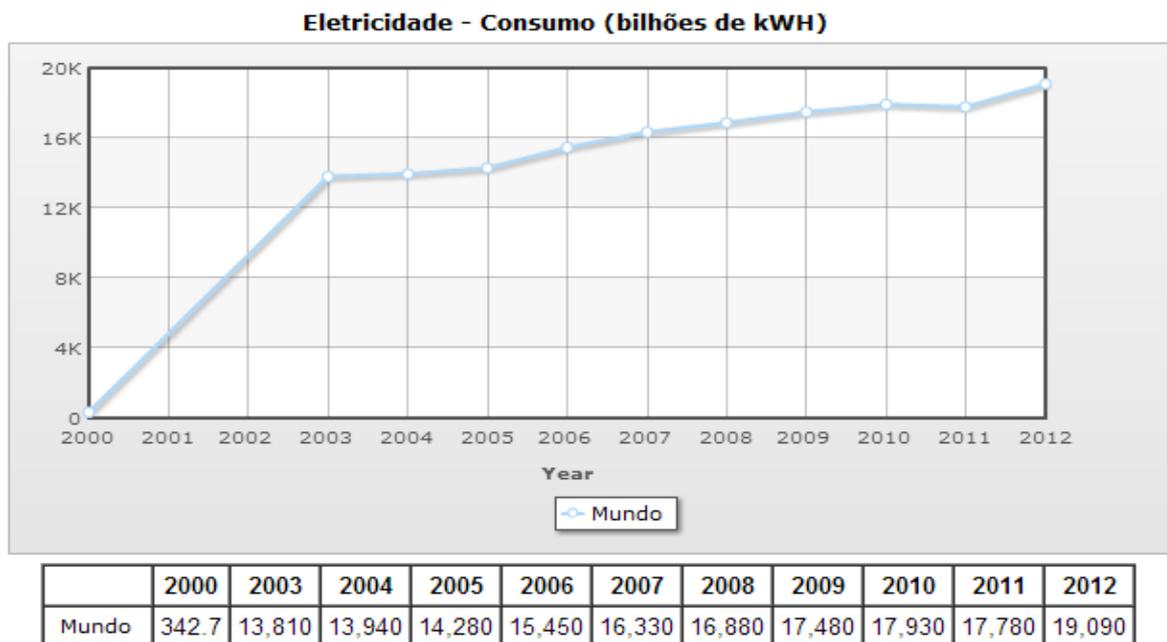


Figura 9 - Consumo de energia elétrica
Fonte: Index Mundi

5. CONCLUSÃO

A inserção de fontes renováveis de energia a partir de fonte de energia renováveis na matriz energética mundial tem sido cada vez mais necessária devido ao aumento do consumo de energia elétrica e dos problemas ambientais causados principalmente pela queima de combustíveis fósseis.

A conversão de energia solar em energia elétrica utilizando células fotovoltaicas se tornou uma alternativa muito viável, pois utiliza uma fonte de energia inesgotável se considerada a escala de tempo terrestre. Além de utilizar apenas a luz solar para gerar energia elétrica, os módulos fotovoltaicos não precisam ser localizados em áreas específicas, não geram ruídos durante o processo de conversão e podem ser acoplados em edificações.

Apesar de vários países líderes na geração de energia elétrica, a partir da luz solar como, por exemplo, Alemanha, Itália, Japão e EUA, investirem para maior eficiência e aproveitamento da luz solar, os preços médios são relativamente altos devido a taxa de conversão de aproximadamente 18%. Porém, em alguns anos, com tecnologias mais avançadas, a eficiência das células fotovoltaicas será muito superior às encontradas nos dias atuais, devido a estudos e possíveis elementos que podem ser adicionados na célula fotovoltaica. Esse aumento da eficiência e aperfeiçoamento da tecnologia pode ser observada em diversas outras tecnologias e assim acarretará em uma maior utilização das células fotovoltaicas para geração de energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, M.; CUNHA, A. **Fazer uma célula fotovoltaica**. Disponível em: <<http://www.cienciaviva.pt/docs/celulafotovoltaica.pdf>>. Acesso em 02 Out. 2013.

BAZANI, Silvana. Energia solar é viável em MT. Disponível em: <http://epe.gov.br/imprensa/Clipping/20120709_b.pdf>. Acesso em 27 Set. 2013.

CEPEL; CRESESB; **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Edição Especial PRC-PRODEEM. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/105527660/Manual-de-Engenharia-FV-2004>>. Acesso em: 12 Abr. 2013.

COMETTA, Emilio. **Energia Solar**: utilização e empregos práticos. Tradução: Norberto de Paula Lima. São Paulo: Hemus Livraria Editora Limitada, 1978.

CRESESB. **Energia Solar**: princípios e aplicações. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/tutorial/tutorial_solar.htm>. Acesso em 01 Abr. 2013.

DISTRITO FEDERAL. Ministério da Indústria e do Comércio. **Secretaria de Tecnologia Industrial**: manual de energia solar. Brasília, 1978.

FACIN, Paulo Cesar; JACOBS, Andresa Liriane. **Alfabetização Científica e Tecnológica e o Aproveitamento da Energia Solar**: meio ambiente, sociedade e sustentabilidade. **Revista Conexão UEPG**, Ponta Grossa, v. 6, nº 1, 2010. Disponível em: <<http://www.revistas2.uepg.br/index.php/conexao/article/viewFile/3746/2630>>. Acesso em 05 Abr. 2013.

FELIX, Gabriel. Ribeirão Preto recebe maior projeto de energia solar residencial do Brasil. Disponível em: <<http://ciclovivo.com.br/noticia/ribeirao-preto-recebe-maior-projeto-de-energia-solar-residencial-do-brasil>>. Acesso em 30 Set. 2013.

FERREIRA, M. J. G.; **Inserção da energia solar fotovoltaica no Brasil**. 1993. 168 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Disponível em:
<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-05122011-141720/pt-br.php>>. Acesso em: 29 Abr. 2013.

FERREIRA, Rafael Ramon; SILVA FILHO, Paulo C. da. **Energia Solar FV: geração de energia limpa**, In: V CONEEPI, 2010, Maceió. Disponível em:
<<http://connepi.ifal.edu.br/ocs/anais/conteudo/anais/files/conferences/1/schedConf s/1/papers/1828/public/1828-5945-1-PB.pdf>>. Acesso em: 05 Abr. 2013.

HINRICHS, Roger A.; KLEINBACH, Merlin; DOS REIS, Lineu Belico. **Energia e Meio Ambiente**. Tradução técnica: Lineu Belico dos Reis, Flávio Maron Vichi, Leonardo Freire Mello. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

LAMARCA JUNIOR, M. R.; **Políticas públicas globais de incentivo ao uso da energia solar para geração de eletricidade**. 2012. 180 f. Tese (Doutorado em Ciências Sociais) – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, PUC-SP, São Paulo, 2012. Disponível em:
<http://www.sapientia.pucsp.br//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=15072>. Acesso em: 12 Abr. 2013.

NASCIMENTO, C. A.; **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. 2004. 21f. Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Pós Graduação *Lato-Sensu* em Fontes alternativas de energia, para a obtenção do título de especialização. Disponível em:
<http://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf>. Acesso em: 25 Set. 2013

OLIVEIRA, Marcos de. Fonte Estelar: casa que funciona com eletricidade dos raios solares vai a competição internacional. **Revista Pesquisa FAPESP**, São Paulo, nº 167, p. 66-71, jan. 2010.

ORDOÑEZ, Ramona. Energia Solar, ainda distante no Brasil. Disponível em: <http://epe.gov.br/imprensa/Clipping/20120704_d.pdf>. Acesso em: 27 Set. 2013.

POZZEBON, F. B. **Aperfeiçoamento de um programa de simulação computacional para análise de sistemas térmicos de aquecimento de água por energia solar**. 2009. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Fevereiro, 2009. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/16305>>. Acesso em: 14 Abr. 2013.

RIBEIRO, R. L.; **Desenvolvimento de substrato de Si de baixo custo para célula fotovoltaica, por aspensão térmica a plasma**. 2008. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT), UFOP – CETEC – UEMG, Belo Horizonte, 2008.

Disponível em:

<http://www.redemat.ufop.br/index.php?option=com_content&view=article&id=822:desenvolvimento-de-substrato-de-si-de-baixo-custo-para-celula-fotovoltaica&catid=42:2008&Itemid=64>. Acesso em: 25 Abr. 2013.

TORRES, R. C.; **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. 2012. 164 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2012. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18147/tde-18032013-091511/pt-br.php>>. Acesso em: 03 Abr. 2013.

VALLÊRA, António. Energia Solar Fotovoltaica. **Gazeta de Física**, Lisboa, v. 29, jan. 2006. Disponível em:

<<http://www.gazetadefisica.spf.pt/magazine/article/476/pdf>>. Acesso em: 15 Abr. 2013.

CRONOGRAMA

