

## **INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SOLAR FOTOVOLTAICA**

**Leandro Alves de Farias**

Alunos do Curso Técnico de Eletrotécnica do Campus Natal – Zona Norte do IFRN.

**Valter Nogueira Pereira Júnior**

Alunos do Curso Técnico de Eletrotécnica do Campus Natal – Zona Norte do IFRN

**Bruno Palhano da Costa**

Alunos do Curso Técnico de Eletrotécnica do Campus Natal – Zona Norte do IFRN.

**Idelcácio Paulino de Macedo**

Alunos do Curso Técnico de Eletrotécnica do Campus Natal – Zona Norte do IFRN

**Aécio Vinícius Amorim Farias**

Técnico de Laboratório do IFRN. E-mail: aecio@cefetrn.br

**Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos**

Professor do UFRN. E-mail: antonio.luiz@pq.cnpq.br.

---

### **RESUMO**

Os painéis solares fotovoltaicos são dispositivos desenvolvidos para a geração de energia elétrica. Este trabalho aborda conceitos envolvidos na fabricação e funcionamento desses dispositivos tais como: histórico da energia solar fotovoltaica, tipos de painéis solares e aplicação de painéis solares em sistemas isolados. Foi feito um estudo de eficiência de geração elétrica de um painel solar existente no Campus Natal – Zona Norte do IFRN. Nesse estudo, foram levadas em consideração a incidência solar e a hora do dia. Por fim, são apresentadas conclusões sobre o estudo desenvolvido.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia solar, painel fotovoltaico, sistemas isolados.

### **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ELECTRICAL GENERATION**

### **ABSTRACT**

Photovoltaic solar panels are devices designed to generate electricity. This paper discusses the concepts involved in the manufacture and operation of these devices such as: history of solar photovoltaics, types of solar panels and implementation of solar panels in isolated systems. It was shown the efficiency of generating electricity from a solar panel that existing in Campus Natal – Zona Norte, in which we take into account the solar incidence and time of day. Finally, conclusions are presented on the study developed.

**KEYWORDS:** solar energy, photovoltaic panel, isolated systems.

## **INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SOLAR FOTOVOLTAICA**

### **INTRODUÇÃO**

A Energia Solar Fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). O efeito fotovoltaico, 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. A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão.

Inicialmente o desenvolvimento da tecnologia apoiou-se na busca, por empresas do setor de telecomunicações, de fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. O segundo agente impulsionador foi a “corrida espacial”. A célula solar era, e continua sendo, o meio mais adequado (menor custo e peso) para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de permanência no espaço. Outro uso espacial que impulsionou o desenvolvimento das células solares foi a necessidade de energia para satélites.

A crise energética de 1973 renovou e ampliou o interesse em aplicações terrestres. Porém, para tornar economicamente viável essa forma de conversão de energia, seria necessário, naquele momento, reduzir em até 100 vezes o custo de produção das células solares em relação ao daquelas células usadas em explorações espaciais. Modificou-se, também, o perfil das empresas envolvidas no setor. Nos Estados Unidos, as empresas de petróleo resolveram diversificar seus investimentos, englobando a produção de energia a partir da radiação solar.

Em 1993 a produção de células fotovoltaicas atingiu a marca de 60 MWp, sendo o Silício quase absoluto no “ranking” dos materiais utilizados. O Silício, segundo elemento mais abundante no globo terrestre, tem sido explorado sob diversas formas: monocristalino, policristalino e amorfo.

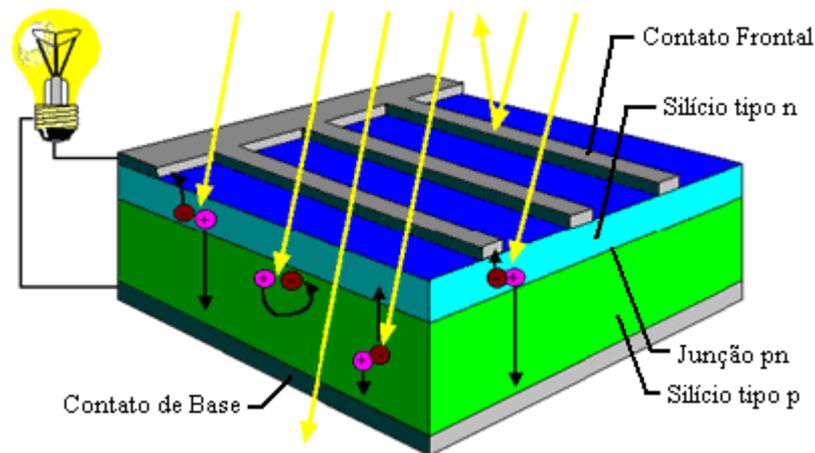
No entanto, a busca de materiais alternativos é intensa e concentra-se na área de filmes finos, onde o silício amorfo se enquadra. Células de filmes finos, além de utilizarem menor quantidade de material do que as que apresentam estruturas cristalinas requerem uma menor quantidade de energia no seu processo de fabricação. Ou seja, possuem uma maior eficiência energética.

### **EFEITO FOTOVOLTAICO**

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais denominados semicondutores, que se caracterizam pela presença de bandas de energia nas quais é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e em outras bandas nas quais não há a presença de elétrons (banda de condução). O semicondutor mais usado é o silício.

A estrutura básica de uma célula de silício fotovoltaica é mostrada na Figura 1. Ela é composta de pastilhas de silício tipo P e tipo N. A principal parte do dispositivo é a superfície em que estes dois tipos de materiais se unem conhecida como a junção PN. A parte superior da montagem é transparente para que a luz possa incidir diretamente sobre a junção. O eletrodo positivo é feito nervuras de metal interligadas por fios. O eletrodo

negativo é uma base de metal chamada de substrato, que é colocada em contato com o silício tipo N.



**Figura 1 – Célula de silício fotovoltaica.**

Quando a energia radiante atinge a junção PN, uma diferença de potencial se desenvolve entre os materiais tipo P e N. Quando uma carga é conectada à célula, a intensidade da corrente através dela aumenta em proporção à intensidade da luz que incide na junção PN da célula até um ponto crítico. Quando a intensidade da luz aumenta, passando deste ponto crítico, os níveis de corrente atingem um máximo chamado de corrente de saturação. A relação entre a potência de saída disponível com a potência de luz que atinge uma célula fotovoltaica é chamada de eficiência ou eficiência de conversão da célula.

## TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua maioria, usando o silício (Si) e podendo ser constituídas de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo.

### A – CÉLULAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

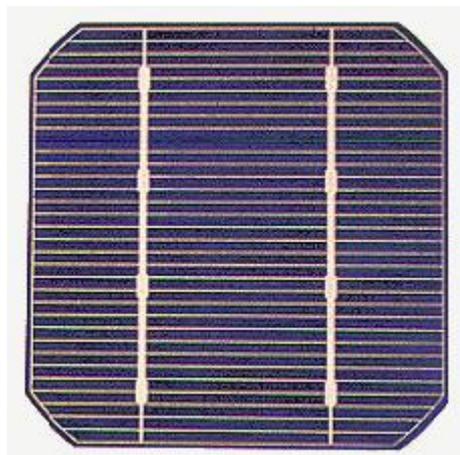
A célula de silício monocristalino é historicamente a mais usada e comercializada como conversor fotovoltaico e a tecnologia para sua fabricação é um processo básico muito bem constituído. A fabricação da célula de silício começa com a extração do cristal de dióxido de silício. Este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. Este processo atinge um grau de pureza em 98 e 99% o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético e financeiro. Este silício para funcionar como células fotovoltaicas necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza maior devendo chegar à faixa de 99,9999%.

Para se utilizar o silício na indústria eletrônica além do alto grau de pureza, o material deve ter a estrutura monocristalina e baixa densidade de defeitos na rede. O processo mais utilizado para se chegar as qualificações desejadas é o processo Czochralski. O silício é fundido juntamente com uma pequena quantidade de dopante. Com um fragmento do cristal devidamente orientado e sob rígido controle de temperatura, vai-se extraindo do

material fundido um grande cilindro de silício monocristalino levemente dopado. Este cilindro obtido é cortado em fatias finas de aproximadamente 300 $\mu$ m.

Após o corte e limpeza de impurezas das fatias, devem-se introduzir impurezas do tipo N de forma a obter a junção. Este processo é feito através da difusão controlada na qual as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno com temperatura variando entre 800 a 1000°C.

Dentre as células fotovoltaicas que utilizam o silício como material base, as monocristalinas são, em geral, as que apresentam as maiores eficiências. As fotocélulas comerciais obtidas com o processo descrito atingem uma eficiência de até 15% podendo chegar a 18% em células feitas em laboratórios. A Figura 2 ilustra uma célula de silício monocristalino.

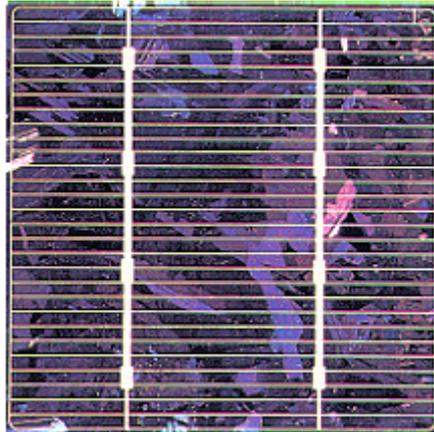


**Figura 2 – Célula fotovoltaica de silício monocristalino.**

## **B – CÉLULAS DE SILÍCIO POLICRISTALINO**

As células de silício policristalino são mais baratas que as de silício monocristalino por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso. A eficiência, no entanto, cai um pouco em comparação as células de silício monocristalino.

O processo de pureza do silício utilizado na produção das células de silício policristalino é similar ao processo do monocristalino, o que permite obtenção de níveis de eficiência compatíveis. Basicamente, as técnicas de fabricação de células policristalinas são as mesmas, porém com menores rigores de controle. Podem ser preparadas pelo corte de um lingote, de fitas ou depositando um filme num substrato, tanto por transporte de vapor como por imersão. Nestes dois últimos casos só o silício policristalino pode ser obtido. Cada técnica produz cristais com características específicas, incluindo tamanho, morfologia e concentração de impurezas. Ao longo dos anos, o processo de fabricação tem alcançado eficiência máxima de 12,5% em escalas industriais. A Figura 3 ilustra uma célula de silício policristalino.



**Figura 3 – Célula fotovoltaica de silício policristalino.**

### **C – CÉLULAS DE SILÍCIO AMORFO**

Uma célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem na estrutura dos átomos. A utilização de silício amorfo para uso em fotocélulas tem mostrado grandes vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabricação. Por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível e podendo ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo vem se mostrando uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. Mesmo apresentando um custo reduzido na produção, o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens: a primeira é a baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício; em segundo, as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil. Por outro lado, o silício amorfo apresenta vantagens que compensam as deficiências acima citados, são elas:

- Processo de fabricação relativamente simples e barato;
- Possibilidade de fabricação de células com grandes áreas;
- Baixo consumo de energia na produção.

### **SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO ISOLADO**

Sistemas isolados, em geral, utiliza-se alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias, quando se deseja utilizar aparelhos elétricos ou armazena-se na forma de energia gravitacional quando se bombeia água para tanques em sistemas de abastecimento. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, o que é o caso da irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida ou estocadas em reservatórios.

Em sistemas que necessitam de armazenamento de energia em baterias, usa-se um dispositivo para controlar a carga e a descarga na bateria. O “controlador de carga” tem como principal função não deixar que haja danos na bateria por sobrecarga ou descarga profunda. O controlador de carga é usado em sistemas pequenos onde os aparelhos utilizados são de baixa tensão e corrente contínua (CC).

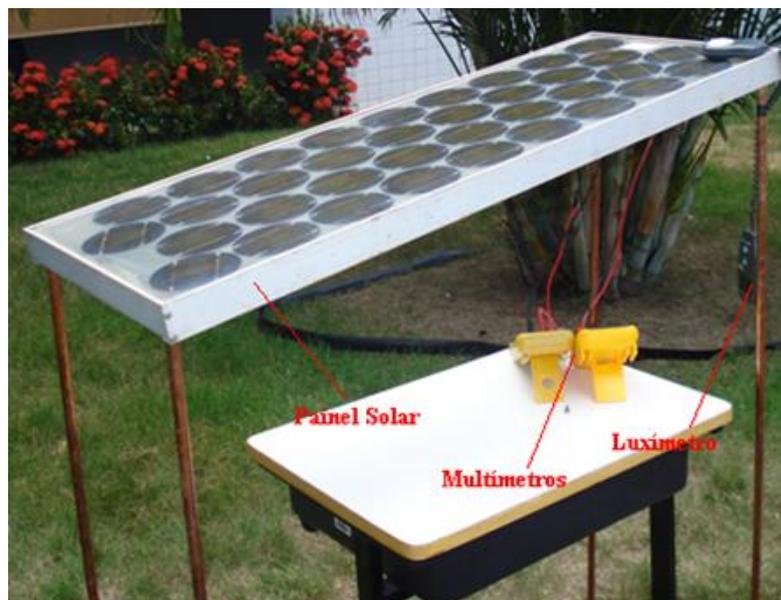
Para alimentação de equipamentos de corrente alternada (CA) é necessário um inversor. Este dispositivo geralmente incorpora um seguidor de ponto de máxima potência necessário para otimização da potência final produzida. Este sistema é usado quando se deseja mais conforto na utilização de eletrodomésticos convencionais. A Figura 4 ilustra esse tipo de sistema.



**Figura 4 – Sistema solar fotovoltaico.**

## RESULTADOS

Foi montado um sistema com um painel solar fotovoltaico formado por 36 células monocristalinas, dois multímetros, um ventilador e um luxímetro, conforme ilustrado na foto da Figura 5.



**Figura 5 – Sistema solar fotovoltaico montado.**

Os multímetros foram utilizados para medir a tensão e a corrente gerados pelo painel solar e, com isso, permitir a obtenção da potência elétrica gerada. O luxímetro serviu para medir a intensidade de luz em Lux. O ventilador serviu como carga. A Figura 6 ilustra os bornes de conexão e a carga conectada ao painel, bem como a conexão dos multímetros.



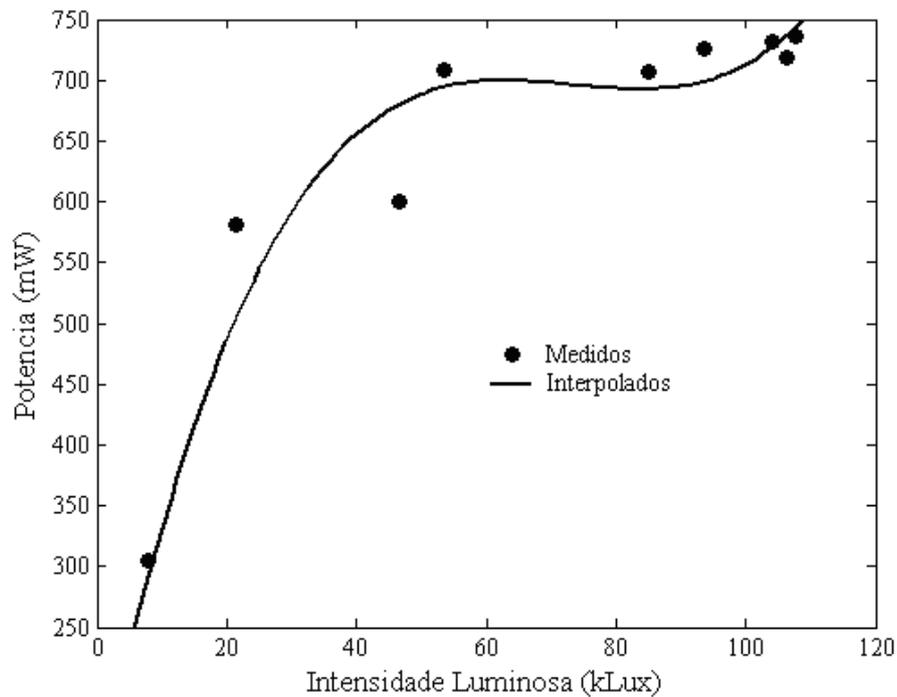
**Figura 6 – Sistema solar fotovoltaico montado.**

Com base no sistema montado nós fizemos o monitoramento da tensão e da corrente elétrica fornecida pela placa, assim como, da intensidade luminosa, em função da hora do dia. Os dados obtidos dessas medições estão listados na Tabela 1.

**Tabela 01 – Dados medidos.**

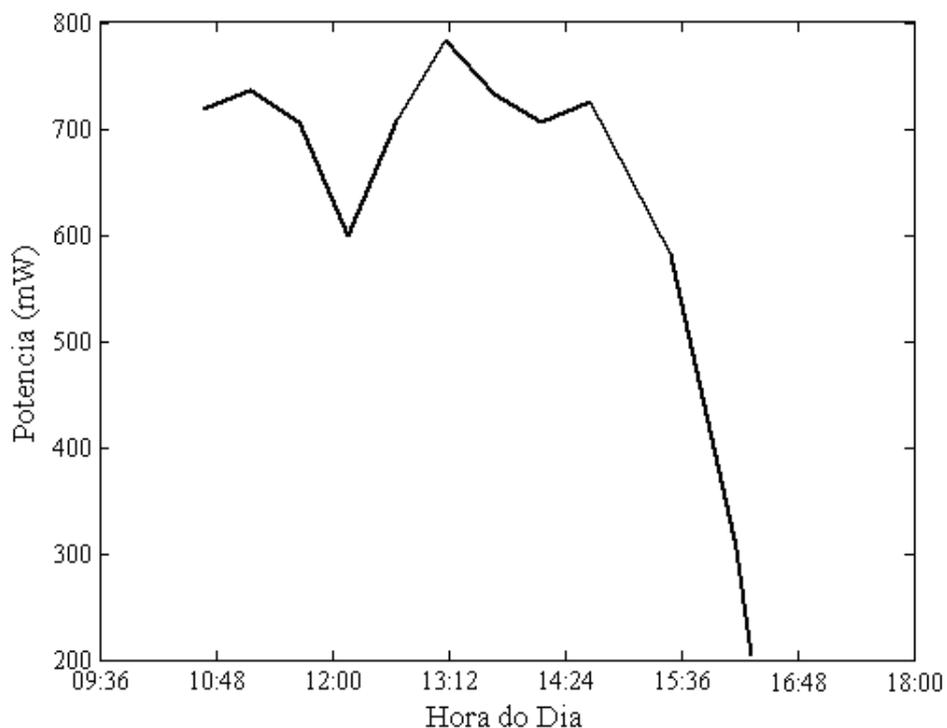
<b>Intensidade Luminosa (kLux)</b>	<b>Tensão Elétrica (V)</b>	<b>Corrente Elétrica (mA)</b>	<b>Hora do dia</b>
106,3	9,01	79,8	10:40
107,8	9,11	80,8	11:10
106,7	8,94	79,0	11:40
46,5	8,26	72,6	12:10
53,5	9,10	77,8	12:40
106,5	9,37	83,6	13:10
104,0	9,07	80,7	13:40
85,0	8,88	79,6	14:10
93,5	9,20	81,3	14:40
21,4	8,02	72,5	15:30
7,9	5,86	52,0	16:10
5,8	4,74	42,7	16:20

A partir dos dados medidos nós traçamos o gráfico da Figura 7. Esse gráfico ilustra a curva da potência elétrica gerada em função da intensidade luminosa. Os pontos são os valores medidos e a curva foi obtida a partir da interpolação polinomial desses pontos. Podemos observar que a curva tende a saturar a partir de 60 kLux. Essa tendência à saturação é encontrada na literatura.



**Figura 7 – Potência gerada em função da intensidade luminosa.**

O gráfico da Figura 8 foi traçado para que nós demonstrássemos a variação da intensidade da potência elétrica gerada de acordo com a hora do dia. A potência elétrica tende a atingir seu pico por volta das 13:00h. Entretanto, entre 11:40 e 13:00h o tempo ficou nublado, como podemos observar na queda da potência gerada nesse intervalo de tempo. Isso demonstra a importância do banco de baterias no sistema solar fotovoltaico. Podemos observar também a queda acentuada da geração com a aproximação do crepúsculo vespertino.



**Figura 8 – Potência gerada em função da hora do dia.**

## CONCLUSÕES

Neste trabalho nós estudamos os conceitos sobre painéis solares fotovoltaicos. Os alunos aprenderam os conceitos relacionados com a geração de energia elétrica fotovoltaica. Para isso, foi montada uma estrutura com um painel solar e com equipamentos de medição. A idéia foi levar os alunos a investigarem a influência da variação da incidência solar na potência elétrica gerada pelo painel. Foram considerados fatores como a incidência de luz e a hora do dia. Isso permitiu aos alunos analisarem a variação da energia solar ao longo do dia e compreenderem a importância de alguns elementos do sistema solar fotovoltaico (como o banco de baterias, por exemplo). O trabalho mostrou diversos aspectos em torno de painéis solares fotovoltaicos, como por exemplo, conceitos de semicondutores, estudados pelos alunos na disciplina de eletrônica analógica.

## REFERÊNCIAS

1. Gibilisco, S., **Alternative Energy Desmistified**, McGraw Hill, 2007.
2. Grupo de Trabalho de Energia Solar Fotovoltaica (CRESESB/CEPEL) - **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/publicacoes/Manual\\_Livro.htm](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/publicacoes/Manual_Livro.htm). Acessado em Março de 2009.
3. Fraidenraich, N. e Lyra, F., **Energia Solar - Fundamentos e Tecnologias de Conversão Heliotérmoeleétrica e Fotovoltaica**, John Wiley & Sons, Inc., Publication, et al., 2008.
4. Siemens Solar Industries, Training Department, **Photovoltaic Technology and System Design - Training Manual**, 1990, Edition 4.0.
5. ANELL, **Atlas de energia elétrica do Brasil**, Disponível em: [www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/livro\\_atlas.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/livro_atlas.pdf). Acessado em Junho de 2009.