



19 Congresso de Iniciação Científica

**PROTOCOLO DE ENSAIOS E DE TESTES COMPARATIVOS DE DESEMPENHO DE CELULAS FOTOVOLTAICAS REFERENTES A ISOLAÇÃO INCIDENTE**

**Autor(es)**

---

MARCUS VINICIUS CASTELLUCCI FERMINO

**Orientador(es)**

---

PAULO JORGE MORAES FIGUEIREDO

**Apoio Financeiro**

---

PIBIC/CNPQ

**1. Introdução**

---

O presente trabalho propõe a elaboração de um protocolo de ensaios e testes para verificação do desempenho de placas solares, a partir das características fornecidas pelos fabricantes. Em decorrência da deterioração temporal e de defeitos de fabricação, estes equipamentos podem apresentar rendimento diferente do previsto pelo fabricante. Tendo em vista a crescente preocupação a respeito da produção energética sustentável e a presença crescente de equipamentos fotovoltaicos no cotidiano, o presente trabalho busca contribuir propondo uma bancada para análise do comportamento das células, a partir de condições padronizadas de exposição, o que possibilita tanto a análise comparativa entre equipamentos quanto a verificação das características preditas nos modelos fornecidos pelos fabricantes ao longo da vida útil das mesmas. A bancada proposta visa ainda contribuir para a exposição desta modalidade produtiva na Universidade através de experiências de laboratório que poderão ser realizadas de forma diversificada. Revisão Bibliográfica: As células solares são também chamadas de células fotovoltaicas, pois podem produzir eletricidade a partir de outras fontes de luz que não o sol graças ao efeito fotoelétrico descoberto em 1839 por Edmund Becquerel. Os tipos mais comuns de células solares encontradas são as células de: • Cristais de silício • Filmes Silício é a matéria prima de mais de 95% das células solares produzidas no mundo. Sua utilização não sobrecarrega o meio ambiente no quesito extração, pois o silício é o segundo elemento mais abundante no planeta terra. A maioria das células fotovoltaicas é feita de cristais de silício tratados ou dopados de modo a permitir que elétrons sejam liberados quando a luz atinge a célula. Neste sentido as células podem ser construídas a partir de silício policristalino ou monocristalino. SILÍCIO ELETRÔNICO O processo de purificação do silício e posterior obtenção do silício policristalino ou monocristalino ocorrem como descrito: O material bruto, que é disposto em pedras de quartzo, é moído e derretido em um forno de arco elétrico a mais de 2000C, onde o quartzo é reduzido em Si e CO<sub>2</sub>, através do coque, seguindo a reação: SiO<sub>2</sub> (s) + C(s) → Si (l) + CO<sub>2</sub> (g) O silício líquido que se acumula na parte inferior do forno é extraído e resfriado controladamente para evitar o acúmulo de impurezas. Após essa primeira etapa obtém-se o silício comercial ou metalúrgico, com um grau de pureza da ordem de 99%. O próximo passo na purificação do silício consiste na injeção de silício metalúrgico e ácido clorídrico (HCl) controladamente, usando-se um reator de leito fluidizado para a criação do gás triclorosilano (SiHCl<sub>3</sub>), através da seguinte reação. Si (s) + 3HCl (g) → SiHCl<sub>3</sub> (l) + H<sub>2</sub> (g) Após esse processo, o triclorosilano é reduzido com gás hidrogênio para a obtenção do silício eletrônico. O processo de redução é feito em um reator CVD (deposição de vapor químico), onde o silício gasoso se deposita em um tarugo hiperpuro de silício policristalino em forma de U invertido, com cerca de 250 kg, sendo que esse processo dura em média uma semana. A reação ocorre da seguinte forma: SiHCl<sub>3</sub> (g) + H<sub>2</sub> (g) → Si (s) + 3HCl (g) O silício sólido é então quebrado e enviado para as indústrias que fazem células fotovoltaicas, que promovem a seleção do material em função de processos produtivos

específicos. **SILÍCIO POLICRISTALINO** O silício obtido no processo supracitado é fundido e são acrescentados materiais dopantes. Após a fundição, o silício é despejado em moldes para posteriormente a solidificação, ser fatiado em placas. Este silício obtido através de fundição e solidificação sem ordenação dos átomos é chamado de silício policristalino, pois como o próprio nome revela, este é composto por múltiplos cristais. Como resultado deste processo, menos sofisticado que a produção de silício monocristalino, as estruturas cristalinas se formam em tamanhos e formas diversas durante o processo de solidificação. Os grãos cristalinos ficam posicionados em posições diversas, o que faz com que tenham fronteiras irregulares entre os mesmos, interferindo na mobilidade dos elétrons. Devido a estas características os painéis de silício policristalino possuem uma menor eficiência energética quando comparados aos painéis monocristalinos. O custo de produção do silício policristalino é menor e este é também mais resistente, permitindo que as fatias sejam mais delgadas, com até um terço da espessura de uma fatia de silício monocristalino. O tipo de célula fotovoltaica mais encontrada no mercado é a célula policristalina, representando atualmente mais de 90% do mercado de células fotovoltaicas. **SILÍCIO MONOCRISTALINO** O silício monocristalino é produzido por um método de fabricação já conhecido e utilizado pela indústria eletrônica, chamado de Processo Czochralski. A fusão de silício policristalino de alta pureza (silício eletrônico) com material dopante, ocorre em um cadinho de quartzo e logo após um pequeno pedaço de silício monocristalino, chamado de semente, é introduzido no silício fundido e retirado rotacionando-se horizontalmente e de maneira lenta. O lingote de silício que se forma no processo é cortado em fatias de espessura aproximada de 200 a 400 nanômetros. As fatias delgadas são tratadas, cobertas e montadas de maneira interconectada nos módulos fotovoltaicos. **FUNCIONAMENTO DAS CÉLULAS SOLARES** Uma célula fotovoltaica é composta de uma camada finíssima de silício dopado com Fósforo, chamada de silício tipo N. Esta camada se sobrepõe a uma camada mais espessa de silício tipo P, que é dopado por Boro. A célula possui contatos metálicos para o aproveitamento da tensão gerada. Para evitar que a luz reflita, existe uma camada anti-reflexiva que recobre a camada superior das células. Entre as duas camadas se forma uma junção na qual um campo elétrico é formado, fazendo com que as cargas se separem quando o silício é atingido por fótons suficientemente energéticos. Independentemente do tamanho, uma célula comum de silício produz uma diferença de potencial entre as camadas, decorrente da diferença de cargas situadas tipicamente entre 0,5V e 0,6V, quando o circuito se encontra aberto e enquanto a célula estiver exposta à luz solar. Entretanto a corrente e conseqüentemente a potência de uma célula fotovoltaica é inteiramente dependente de sua área superficial, da eficiência e da intensidade da luz que atinge sua superfície.

## 2. Objetivos

---

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma bancada de testes e procedimentos com a finalidade de comparar o desempenho das células fotovoltaicas. Os métodos desenvolvidos poderão ser utilizados para construção de aulas experimentais através das quais os alunos realizarão múltiplos testes em células fotovoltaicas.

## 3. Desenvolvimento

---

No sentido de atingir o objetivo proposto, foi desenvolvida uma bancada de testes de placas fotovoltaicas, além do desenvolvimento de um software específico e de circuitos eletrônicos para automatização dos testes. A bancada de testes consiste em uma estrutura metálica retangular feita de cantoneiras e tubos quadrados, que suporta a placa na sua porção inferior e um suporte de madeira com lâmpadas halógenas de 100w na porção superior. Na figura 1 é possível visualizar melhor a bancada. As lâmpadas halógenas de 100w foram escolhidas devido a sua característica de restabelecer seu filamento quando a mesma é desenergizada. O software de controle e interface foi criado utilizando-se o programa LabVIEW, software este que usa blocos lógicos de programação para facilitar seu uso. A figura 2 ilustra a área de trabalho de gerenciamento da bancada, o qual é responsável pelas combinações de acionamentos das lâmpadas. Para a interface entre a bancada e o computador, foi usada uma placa de aquisição de dados USB-1208-LS, com duas entradas analógicas. A entrada analógica 2 da placa tem seu valor exibido no mostrador digital chamado Corrente. Para que o programa pudesse medir esta tensão na placa, foi utilizada a entrada 1 da placa de aquisição e o resultado desta medição é exibido no mostrador digital chamado "Tensão". O programa também calcula a potência resultante, que a placa gerou através da corrente e da tensão momentâneas, usando-se do cálculo  $P=U.i$ , onde P é potência U e tensão e i é corrente. Para se estabelecer a relação luz x tensões, foram realizadas 1024 combinações diferentes, em função da quantidade de lâmpadas disponíveis na bancada. Quando todas as lâmpadas são acesas, tem-se disponível 1000W e quando todas estiverem apagadas teremos 0W. O método de aquisição de dados pode ser feita tanto automaticamente, quanto manualmente. Quando os acionamentos são feitos manualmente, a obtenção dos dados através do programa deve ser feita pausadamente, visto que é necessário interromper a obtenção de dados sempre que for modificar a comutação das chaves. Para isso são necessárias pelo menos duas pessoas, uma para comutar as chaves e outra para pausar e reiniciar a obtenção de dados no programa. Adotando um tempo de pausa de 10s para a estabilização da corrente e tensão geradas pela placa, o tempo gasto para cada bateria de testes é de cerca de 5h. O modo automático facilita a obtenção dos dados, uma vez que não é necessária a comutação manual das chaves, sendo esta automática realizada através de relês ligados as saídas da placa controladora. O funcionamento do programa automático se dá através de uma soma binária, onde a cada etapa concluída soma-se um bit, que vai de 000000000 a 111111111. Além das comutações, temos que respeitar um determinado tempo de estabilização, visto que a geração de energia elétrica na placa não é instantânea. Com isso, existe no programa um campo que permite escolher o tempo que cada

combinação permanece acesa.

#### 4. Resultado e Discussão

---

Os resultados obtidos foram apresentados em gráficos onde o valor no eixo das ordenadas se refere ao estado da lâmpada, ou seja, 0 para desligado e 1 para ligado. Já o eixo das abscissas informa quais lâmpadas estão acionadas e este deve ser considerado como o local onde se localiza a placa fotovoltaica. Devem-se desprezar os valores negativos e numéricos, uma vez que o intuito dos gráficos é mostrar qualitativamente a localização da lâmpada e seu estado de acionamento em relação à placa. O gráfico 1 da figura 3 ilustra uma geração de potência de 0,003W. Através deste gráfico é possível notar que quanto mais distribuída é a iluminação, melhor é a geração. Nesse caso observa-se que a lâmpada acesa é a cinco, situada na direção central da placa. No gráfico 2 da figura 3 pode-se notar que somente as lâmpadas um e dez estão acionadas. Na respectiva configuração a geração de potência é de 0,015W, ou seja, muito maior que a configuração anterior. O que difere é que não há concentração de luz em um ponto, e isso faz com que a geração seja melhorada. No gráfico 3 da figura 3 pode-se notar que as lâmpadas um, cinco e dez estão acesas. Nesta configuração é possível perceber um aumento significativo da potência gerada, uma vez que neste momento estamos gerando 0,323W, potência esta que é 21,5 vezes maior que a configuração anterior, onde somente as lâmpadas um e dez estavam acionadas. No gráfico 4 da figura 3 é possível notar que todas as lâmpadas estão acionadas exceto a lâmpada cinco. Nesta configuração a potência gerada é de 1,125W, que é 3,5 vezes maior que na configuração anterior, e pode-se notar que a distribuição de luz afeta diretamente a geração de energia da placa.

#### 5. Considerações Finais

---

O presente trabalho teve como objetivo a criação de um protocolo de ensaios que pode ser inserido na Universidade através de experiências de laboratório usando-se placas fotovoltaicas. Os métodos citados aqui poderão servir de embasamento para comparação de módulos solares, ou seja, avaliar o custo benefício de determinado fabricante e determinado tipo de placa. Também poderão ser avaliadas situações de degradação do uso da placa e suas influências na geração de energia. Conforme mostrado nos gráficos, tanto a intensidade de luz, quanto a distribuição são fatores relevantes para o bom funcionamento da placa, ou seja, as células fotovoltaicas são diretamente afetadas pela ausência de luz e pela má distribuição da mesma. Como desdobramentos para esta pesquisa, uma sugestão é a análise da variação da rede elétrica nos resultados, sendo que esta variação está diretamente ligada a oscilação de 60Hz da rede. Essas oscilações podem afetar os resultados devido ao trecho em que a tensão na lâmpada atinge 0V, pois nesse momento há uma redução de brilho que não é visível ao olho humano, mas é percebida pela placa coletora de dados. Para contornar esse problema, usou-se capacitores para que de certa forma o sinal ficasse estabilizado.

#### Referências Bibliográficas

---

AMALFI, Silvio L. Energia Solar. Monografia (especialista) Pós-Graduação em fontes alternativas de energia da Universidade Federal de Lavras MG, 2005. Disponível em: . Acesso em: 21 dez. 10  
DINIZ, D.M. Análise do Alinhamento Direcional no Desempenho de Células Fotovoltaicas: Um estudo de caso para a região de Santa Bárbara d'Oeste - Brasil, SP. 2011. Pesquisa de Iniciação Científica - Programas Institucionais de Iniciação Científica PIBIC/FAPIC, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, 2011. Disponível em: Acesso em: 25 jan. 11 Disponível em: Acesso em: 24 jul. 11  
FEDRIZZI, Maria Cristina. Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário: lições apreendidas e procedimentos para potencializar sua difusão. Tese (doutorado) - Programa interunidades de pós-graduação em energia da Universidade de São Paulo, 2003.  
MÉDICI, M. Avaliação Técnica e Econômica de Sistemas Integrados de Geração de Energia Elétrica e Água Quente a partir da Energia Solar: Um estudo do caso para a região de Santa Bárbara d'Oeste, SP. 2002. Pesquisa de Iniciação Científica - Programas Institucionais de Iniciação Científica PIBIC/FAPIC, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, 2002.  
PEREIRA, Luíz M. N. Produção e caracterização de silício policristalino e suas aplicações a TFTs. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal, 2008.  
PESQUISA FAPESP (2010) - Solução que vem do céu (Matéria de Alex Sander Alcântara). São Paulo: FAPESP, março de 2010.

#### Anexos

---

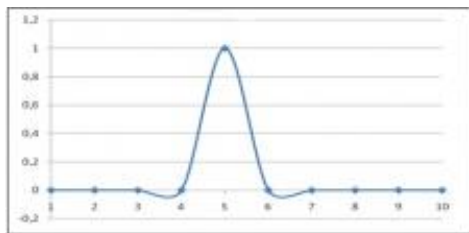


Gráfico 1

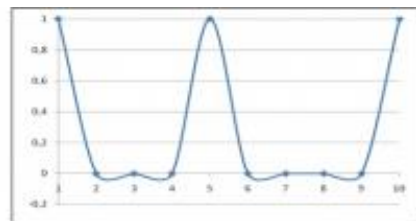


Gráfico 3

Gráfico 2

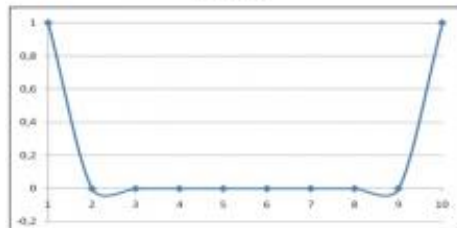


Gráfico 4

