

Instituto de Física Gleb Wataghin

FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES

Relatório Final de Atividades
F809-Instrumentação para Ensino

Bernardo Radefeld Meirelles
Orientador: Prof. Dr. Francisco das Chagas Marques

Campinas 2002

Resumo do Projeto

Fabricar e caracterizar células solares, com a finalidade de apresentar seu funcionamento para alunos do ensino médio e da graduação. Em particular, serão apresentados ao ouvinte diversos tipos de aplicações de células solares, bem como quais são suas vantagens e desvantagens como fonte de energia alternativa [1].

Resumo das Atividades Realizadas

Foram fabricadas e caracterizadas 16 células solares de silício monocristalino, sendo que foram selecionadas 12 células que apresentaram a melhor eficiência, para estas melhores células montou-se um painel solar que foi capaz de fornecer tensão e corrente suficiente para fazer um pequeno motor funcionar. Com este sistema é possível demonstrar experimentalmente o princípio de funcionamento das células solares para alunos do ensino médio e da graduação. Também foi estudado o efeito fotovoltaico com o objetivo de explicá-lo durante a apresentação do painel solar, pois este é o fenômeno responsável pela transformação da energia solar em elétrica. As técnicas utilizadas para fabricar as células são parecidas com a da referência [2].

Conteúdo

1	Introdução	3
2	Teoria	4
2.1	Como as Células Solares Funcionam?	4
2.2	Energia Solar em Nossas Casas	7
2.3	Energia Solar na Agricultura	8
3	Fabricação e Caracterização	9
3.1	Processo de Fabricação.....	9
3.1.1	<i>Corte e limpeza</i>	10
3.1.2	<i>Difusão de fósforo</i>	10
3.1.3	<i>Contatos Metálicos</i>	11
3.1.4	<i>Camada Anti-Refletora</i>	11
3.2	Caracterização.....	12
4	Montagem do Painel Solar e Demonstração	13
5	Conclusões e Perspectivas	14
	Apêndice	15
	Agradecimentos	17
	Referências	17

Capítulo 1

Introdução

Células solares são dispositivos capazes de converter energia luminosa diretamente em eletricidade, sendo que para isso são utilizadas as propriedades eletrônicas de uma classe de materiais conhecidas como semicondutores. O princípio básico de seu funcionamento é o efeito fotovoltaico. Existem vários tipos de utilização deste tipo de tecnologia, por exemplo, existem calculadoras que funcionam com células solares, já foram construídas algumas casas funcionando com este tipo de tecnologia e satélites que utilizam a energia solar para manter seus sistemas elétricos funcionando, outras aplicações das células solares são a irrigação e a telefonia em lugares isolados.

Este trabalho tem o objetivo de mostrar para alunos do ensino médio e superior como estas células solares funcionam, que tipo de tecnologia está por trás de sua construção, e também discutir como esta tecnologia pode ser utilizada para fornecer energia elétrica para residências. Foram fabricadas células solares para montar um pequeno painel solar. Com ele foi possível fazer um pequeno motor funcionar. Utilizando este aparato simples pretende-se demonstrar o funcionamento real das células para os alunos.

Capítulo 2

Teoria

Neste capítulo serão apresentadas as características básicas do funcionamento de uma célula solar. Será explicado o funcionamento do efeito fotovoltaico que consiste basicamente na transformação de energia luminosa em energia elétrica. Este fenômeno foi observado pela primeira vez em 1839, por Henry Becquerel.

Também será discutida a possível implementação de células solares na produção de energia elétrica para residências.

2.1 – Como as Células Solares Funcionam?

O objetivo de uma célula solar é transformar energia luminosa em elétrica, estas células são feitas de um material semicondutor, em geral utiliza-se o silício. Basicamente uma célula solar é uma junção p-n que ao sofrer a incidência de luz irá produzir uma corrente elétrica.

O silício cristalino que pode ser utilizado como matéria prima da célula, possui certas propriedades físicas específicas. O átomo de silício possui exatamente quatro elétrons em sua última camada eletrônica, estes quatro elétrons estão todos sendo compartilhados por ligações covalentes, e portanto, não tem liberdade de se movimentar pelo cristal. Sendo assim, o silício cristalino não é um bom condutor de eletricidade. Para contornar este problema certas impurezas são acrescentadas ao cristal. Suponha que seja feita uma difusão de fósforo no silício, neste caso alguns sítios de Si são substituídos por átomos de fósforo

que pertencem ao grupo V da tabela periódica e, conseqüentemente possuem cinco átomos na última camada. Portanto, os átomos de fósforo terão quatro de seus elétrons compartilhados, restando um elétron que não faz parte de uma ligação covalente, mas ainda é atraído pela carga positiva do núcleo de fósforo.

Ocorre então que os elétrons do fósforo que não estão fazendo parte de uma ligação covalente conseguem romper facilmente a sua ligação com o núcleo, sendo necessário apenas uma baixa energia para fazer isso. Neste caso, estes elétrons passam a ser considerados livres e o silício dopado passa a possuir uma camada do tipo n.

Como foi dito anteriormente as células solares são basicamente uma junção p-n, portanto apenas uma das faces do silício é dopada com fósforo. A outra face deve ser dopada com um elemento do grupo III da tabela periódica, como por exemplo, o Al. Estes elementos possuem três elétrons na última camada, e, portanto ao substituírem um átomo de silício formarão um “buraco” que será definido como a ausência de uma carga negativa.

Imagine agora que a face dopada do silício que é tipo n está separada da face que é tipo p, se for feita uma experiência imaginária onde as duas partes são colocadas em contato seria esperado os elétrons “fluírem” de regiões de baixa concentração eletrônica para regiões de alta concentração, e de forma análoga, este comportamento seria esperado também para os buracos. Entretanto quando elétrons deixam o lado tipo n ocorre o surgimento de um acúmulo de carga positiva na fronteira do contato p-n, da mesma forma ocorre um acúmulo de carga negativa no lado tipo p. Este desequilíbrio de cargas que ocorre na fronteira da conexão tipo p - n será responsável pelo surgimento de um campo elétrico que irá se opor a tendência natural da difusão de elétrons e buracos, e assim uma situação de equilíbrio será atingida, conforme pode ser visto na figura 2.1 1 Dessa forma o

que é formado é um diodo de junção p – n, onde os elétrons são favorecidos a fluir na direção da face tipo n.

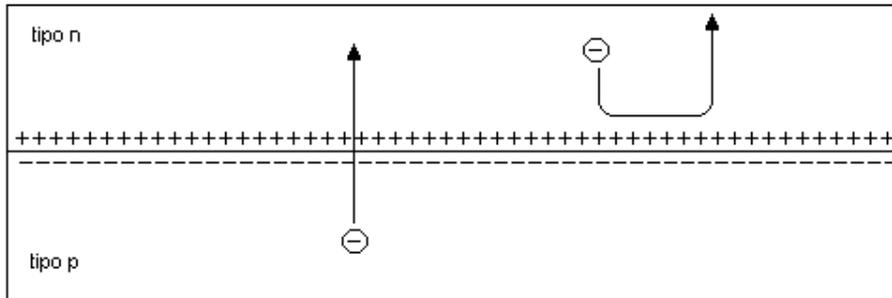


FIG 2.1.1: Esquema do equilíbrio alcançado na conexão tipo p – n.

No momento em que a luz formada por fótons incide na célula solar haverá a formação de pares elétrons – buraco. Para cada fóton que possui energia suficiente haverá a formação de um elétron e de um buraco. Nestas condições os elétrons produzidos irão fluir para o lado tipo n e os buracos irão para o lado tipo p, este fluxo de elétrons será responsável pelo surgimento de uma corrente, e como o campo elétrico da célula irá fornecer a diferença de potencial, será possível gerar potência, que é exatamente o produto destas duas grandezas físicas. Conectando fios que permitam conduzir a corrente elétrica é possível fazer determinados sistemas funcionarem, um esquema do funcionamento da célula pode ser visto na figura 2.1 2.

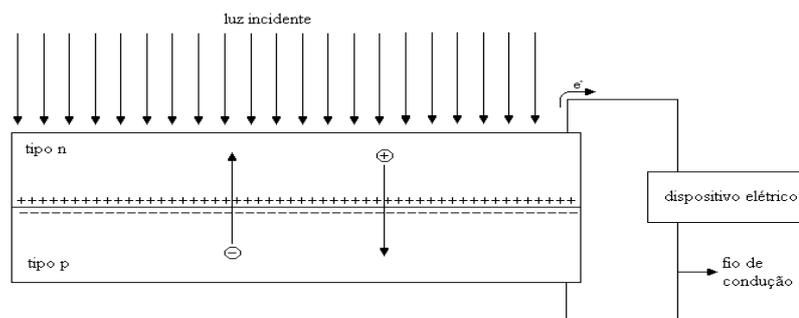


FIG 2.1.2: Esquema do funcionamento de uma célula solar.

2.2 – Energia Solar em Nossas Casas:

Agora uma questão interessante e didática a ser discutida é uma aplicação prática. Um exemplo seria a seguinte questão: como fornecer energia elétrica para residências através da utilização de células solares? Vamos discutir então esta aplicação.

Primeiramente algumas questões devem ser definidas antes da construção dos painéis solares, por exemplo, existe uma inclinação ótima dos painéis solares na qual o aproveitamento de energia solar é máximo, que seria quando a incidência dos raios solares fosse perpendicular as células e é vital que não existam construções, árvores nem qualquer tipo de objeto capaz de fazer algum tipo de sombra nos painéis. Também para definir quantos painéis e de que tamanho eles são é necessário conhecer o regime climático da região de interesse. É necessário também escolher qual será o sistema de voltagem utilizada, em geral é utilizado 12 volts. Para isto são então fabricados eletrodomésticos (TV, geladeira, microondas, etc...) que funcionam com esta voltagem.

Existem, agora, uma série de problemas que devem ser resolvidos para que uma casa funcionando a energia solar possa realmente existir. Um dos mais básicos seria resolver o problema da falta de energia elétrica durante a noite. Isto pode ser resolvido utilizando uma bateria, sendo as únicas desvantagens um acréscimo substancial de gastos na implementação do sistema e o problema de estar realizando uma manutenção constante. Outra alternativa é enviar a energia produzida para uma estação convencional de energia que neste caso compraria a energia enviada, e durante a noite a casa usaria a energia vinda da usina elétrica.

Outro problema é que a corrente produzida pelas células é DC (corrente contínua), enquanto que a corrente que os aparelhos domésticos comuns usam é AC (corrente

alternada). É necessário, portanto, um conversor de corrente. A utilização deste conversor também permite controlar o sistema de voltagem utilizado.

Feito os ajustes indicados acima, que irão variar dependendo da posição geográfica e dos recursos disponíveis na região onde a casa será construída, é perfeitamente possível construir uma casa que funcione com um sistema de energia baseada em células solar.

Em geral um sistema deste tipo instalado com as tecnologias corretas dura aproximadamente 20 anos. Um dos grandes empecilhos para a implementação deste sistema é o preço, para se ter uma idéia, o sistema instalado na casa solar que se localiza em Raleigh, North Carolina e foi montada pelo North Carolina Solar Center custou aproximadamente 32 000 \$ e somente fornece metade da energia necessária.

2.3 – Energia Solar na Agricultura:

É possível utilizar células solares para aplicações na agricultura. Existe um exemplo deste tipo de aplicação no Brasil. O Sítio Duas Cachoeiras, em Amparo (SP) possui uma bomba de irrigação, que serve para levar água do açude local até a horta. A energia elétrica, para acionar a bomba, significaria um investimento absurdo, pois da rede principal até a horta seriam necessários mais de 500 metros de fiação e posteamento. A maneira encontrada para resolver este problema foi usar um painel solar cujas dimensões são de 110x30 centímetros e que custou R\$ 700,00, e comprar uma bomba de irrigação própria para ser movida por energia solar, que custou R\$ 200,00. Este sistema em funcionamento fornece a irrigação necessária para a horta do sítio. O painel solar está ligado a uma bateria automotiva comum, de 12 volts. Assim, é possível utilizar durante a noite essa energia armazenada, quando os painéis solares não estão funcionando.

Capítulo 3

Fabricação e Caracterização

Neste capítulo será explicado como as células solares foram fabricadas e quais técnicas foram necessárias para se obter uma eficiência razoável (em torno de 11 %). Também serão mostrados os resultados da caracterização destas células, que foi feito utilizando um simulador solar. Com esta caracterização foi possível determinar parâmetros fotovoltaicos básicos: tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito, fator de preenchimento e eficiência.

3.1 – Processo de Fabricação:

A seqüência utilizada para fazer as células é parecida com a da referência [2], e pode ser visualizada na figura 3.1. O esquema de fabricação contém basicamente os seguintes procedimentos: (i) corte e limpeza do silício (ii) difusão de fósforo (ii) metalização com alumínio (iv) deposição de contatos nas duas faces (v) deposição de camada anti-refletora. A seguir, será feita uma explicação mais detalhada das etapas realizadas para a fabricação das células.

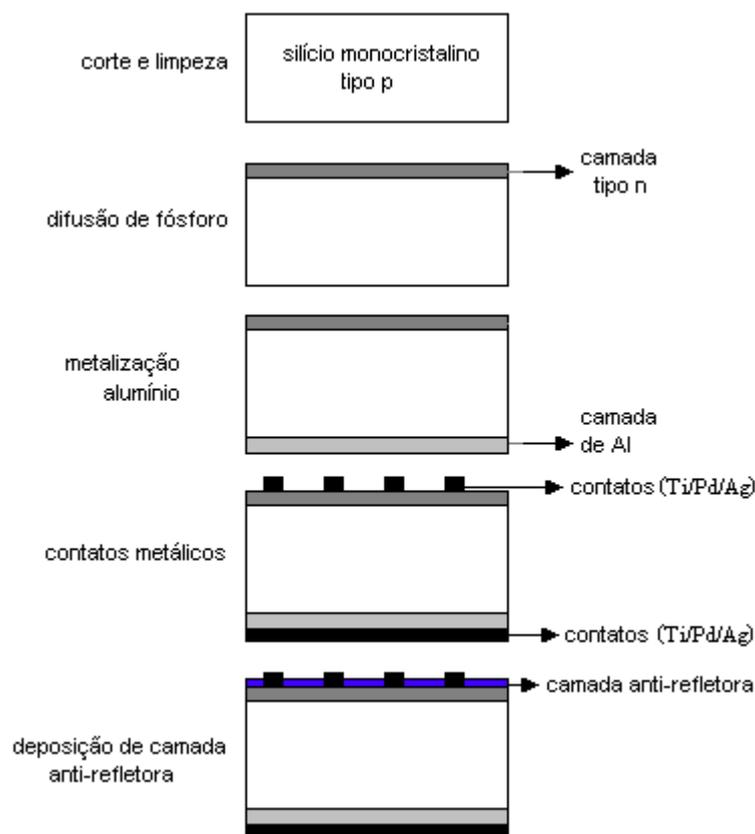


FIG. 3.1: Seqüência para fabricação de células solares.

3.1.1 – Corte e limpeza:

Para a fabricação das células foi usado silício monocristalino tipo p. O lâmina de silício foi cortada em quadrados de 2,5 cm x 2,5 cm área. Foi feito um ataque químico com o objetivo de reduzir a espessura das placas cortadas, cujo objetivo era identificar possíveis falhas estruturais, que podem ter ocorrido durante o corte do silício. Este ataque químico foi realizado utilizando 130 mg de hidróxido de sódio (NaOH) diluído em 300 ml de água. A temperatura em que foi realizado este processo era entre 80 °C e 90 °C, e durava aproximadamente 10 minutos. Também foi feita uma limpeza com o objetivo de remover as impurezas orgânicas e inorgânicas. Para esta limpeza foi usado NaOH, tricloroetileno,

acetona, álcool, uma solução contendo H_2O_2 , uma solução de HF, uma solução contendo HCl e H_2O_2 e muita água deionizada.

3.1.2 – Difusão de fósforo:

Neste caso foi adotado um procedimento padrão do laboratório de conversão fotovoltaica [2]. O processo foi realizado em temperaturas próximas de 900 °C, e nele $POCl_3$ era borbulhado com N_2 , sendo que um fluxo adicional de N_2 e O_2 foram usados para transportar o $N_2 + POCl_3$. Após este processo as duas faces da célula ficam dopadas do tipo n, entretanto, depois da difusão uma das faces é protegida com piche, permitindo assim a remoção da camada n em uma das faces através de um ataque químico.

3.1.3 – Contatos Metálicos e Difusão de Alumínio:

Foi feita uma metalização com Al na face oposta à face tipo n. Este procedimento garante um bom contato ôhmico na face posterior da célula, resultando em um acréscimo na eficiência da célula. Após a evaporação foi feito um recozimento, para obter a difusão de alumínio. Para deposição dos contatos foi feita uma deposição de um filme de Ti/Pd/Ag utilizando uma máscara na deposição em uma das faces e sem utilizar máscara na face oposta. Esta máscara é utilizada para permitir a passagem de luz solar pela superfície.

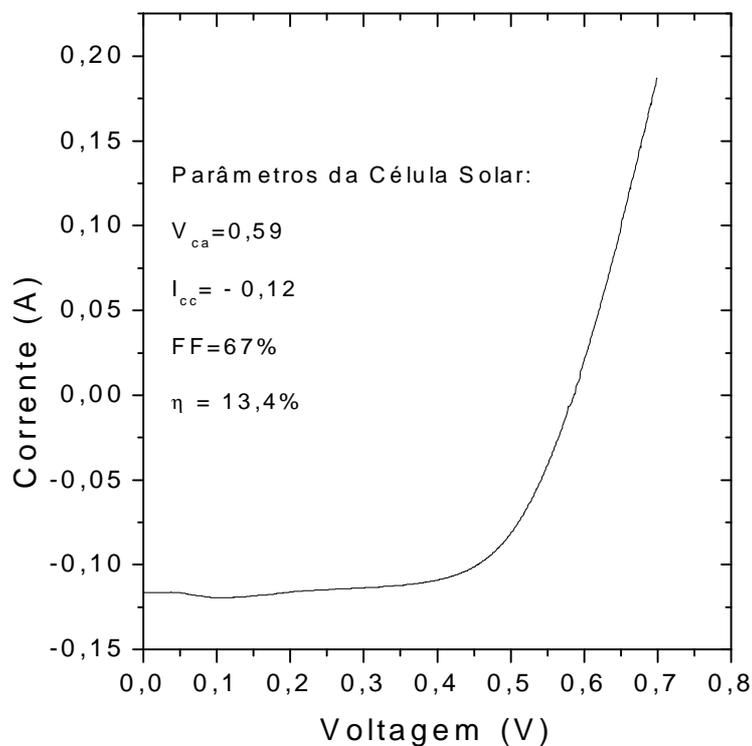
3.1.4– Camada Anti-Refletora:

Existe uma perda considerável devido a reflexão na superfície da célula, para diminuir este tipo de perda costuma-se depositar uma camada especial de um filme transparente com índice de refração e espessura apropriados para reduzir a reflexão de luz na região do

visível. A espessura é da ordem de 6000 Å. No caso deste trabalho foi feita uma deposição de MgF_2 e de ZnS com este objetivo.

3.2 – Caracterização:

Com a utilização do simulador solar foi possível obter a curva corrente-voltagem para cada uma das células fabricadas. A figura 3.2.1 mostra a curva I – V da célula que obteve a melhor eficiência. Os parâmetros fotovoltaicos para este caso foram: tensão de circuito aberto (V_{ca}) = 0,59 V, corrente de curto circuito (I_{cc}) = -0,12 A, fator de preenchimento = 67% e eficiência = 13,4%. A explicação destes parâmetros fotovoltaicos encontra-se no apêndice.



Capítulo 4

Montagem do Painel Solar e Demonstração

Foram fabricadas ao todo 16 células solares, destas foram selecionadas as 12 melhores para montar o painel solar. Conectou-se dois conjuntos de 6 células em série e estes dois conjuntos foram conectados em paralelo, este esquema está ilustrado na figura 4.1. Com este dispositivo foi possível gerar potência suficiente para alimentar-se um pequeno motor (encontrado em brinquedos). Durante a apresentação do trabalho será possível demonstrar o princípio de funcionamento de uma célula solar, e seu uso, utilizando uma lâmpada comum para alimentar o painel fazendo o motor funcionar. Também serão apresentados aos ouvintes os princípios físicos que estão envolvidos na transformação de energia luminosa em energia solar, bem como a aplicação de células solares num caso especial, que será o uso desta tecnologia para gerar energia elétrica para residências.

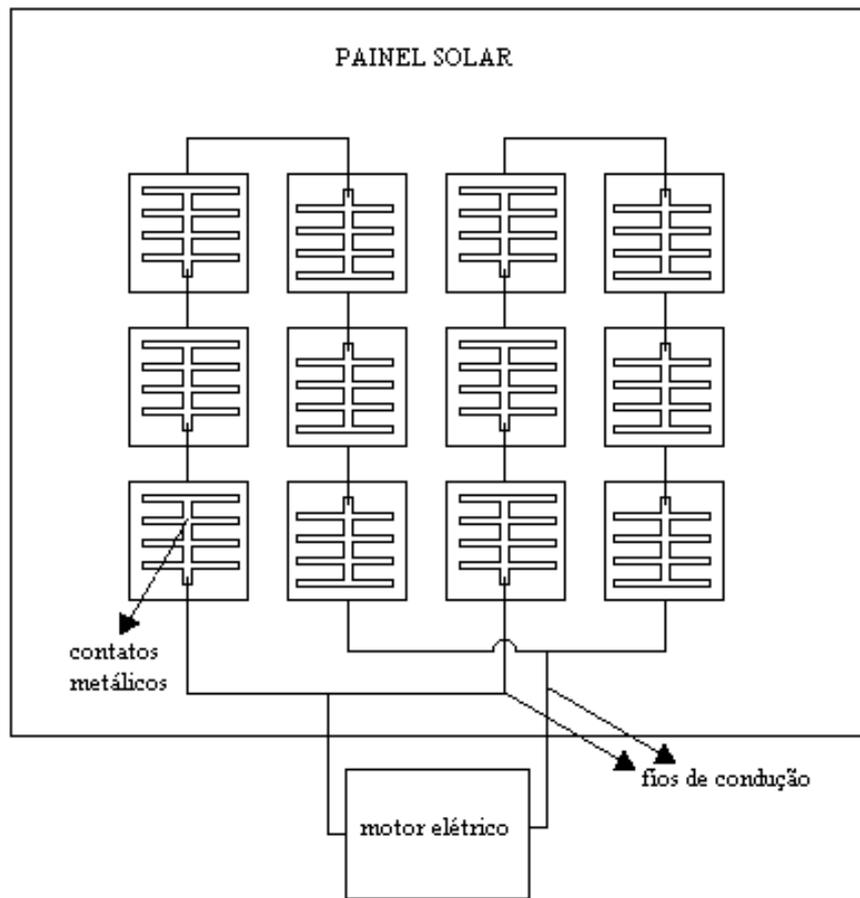


FIG 4.1: Esquema da montagem do painel solar.

Conclusões e Perspectivas

Neste trabalho foi possível discutir de maneira qualitativa o princípio de funcionamento de uma célula solar, também foi possível discutir um caso de aplicação prática (energia solar em residências). Foram apresentados o procedimento de fabricação e caracterização de células solares. Com as melhores células fabricadas foi montado um pequeno painel solar que conseguiu fornecer potência suficiente para fazer um pequeno motor funcionar.

Apêndice:

Parâmetros Fotovoltaicos

Usualmente quatro parâmetros fotovoltaicos básicos são usados para caracterizar células solares.

Um deles é a corrente de curto circuito I_{cc} , que corresponde ao valor de corrente para uma voltagem nula conforme pode ser observado na figura A. Outro parâmetro básico é a tensão de circuito aberto (V_{ca}), que é o valor de voltagem correspondente a um valor nulo de corrente. A potência de saída para qualquer ponto da curva no quarto quadrante é numericamente igual a área do retângulo visto na figura A. Em particular, o ponto (V_{mp} , I_{mp}) corresponderá a um retângulo com área máxima. Sendo assim o fator de preenchimento será dado por:

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{ca} I_{cc}}$$

A equação que fornece o valor da eficiência é dada por:

$$\eta = \frac{V_{mp} I_{mp}}{P_{in}}$$

onde P_{in} é a potência total incidente na célula.

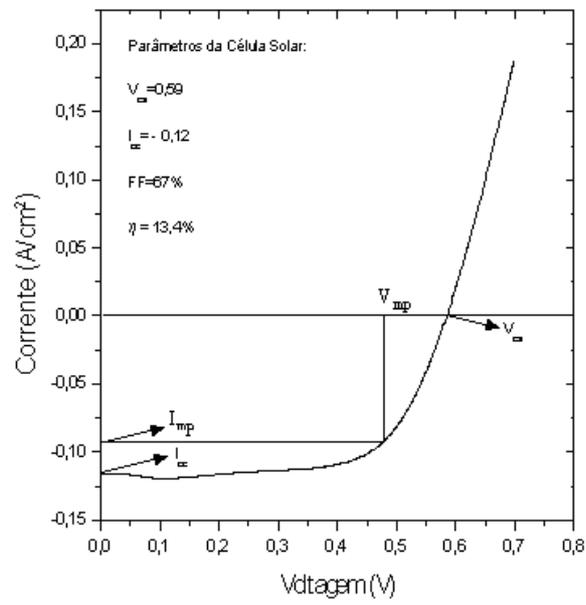


FIG. A: Gráfico da corrente pela voltagem.

Agradecimentos

Ao laboratório de conversão fotovoltaica do IFGW por ter fornecido suporte técnico para a realização deste trabalho.

Referências

- [1]. Martin A. Green, *Silicon Solar Cell*
- [2]. F.C. Marques, J. Urdanivia, and I. Chambouleyron, A Simple Technology to Improve Crystalline Silicon Solar Cell Efficiency, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 52, 285 (1998).
- [3]. Scott Aldous, *How Solar Cells Work*, site da Internet How Stuff Works.