

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2011

RICARDO SEIJI ABE

ESTUDOS E APLICAÇÕES DA CÉLULA FOTOVOLTAICA DSC

Guaratinguetá

2011

RICARDO SEIJI ABE

ESTUDOS E APLICAÇÕES DA CÉLULA FOTOVOLTAICA DSC

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Durval Luiz da Silva Ricciuli

Guaratinguetá

2011

A138e	Abe, Ricardo Seiji Estudos e aplicações da célula fotovoltaica DSC / Ricardo Seiji Abe – Guaratinguetá : [s.n], 2011. 56 f : il. Bibliografia: f. 54-56 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof. Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli 1. Células fotoelétricas I. Título CDU 621.383.5
-------	---

ESTUDOS E APLICAÇÕES DA CÉLULA FOTOVOLTAICA DSC
RICARDO SEIJI ABE

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. Samuel Euzébio de Lucena
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. DURVAL LUIZ SILVA RICCHILLI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. DANIEL IULIEN B. DA S. SAMPAIO
UNESP-FEG


GUARACY NAKAMURA RODRIGUES DA CONCEIÇÃO
UNESP-FEG

Dezembro de 2011

DADOS CURRICULARES

RICARDO SEIJI ABE

NASCIMENTO	18.02.1986 – SÃO PAULO / SP
FILIAÇÃO	Shunji Gildo Abe Eliza Missao Kiyota
2005/2011	Curso de Graduação Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia campus Guaratinguetá

A toda minha família, em especial meus pais por todo apoio no caminho. Em especial minha segunda família república 6 de paus por todo aprendizado.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte de vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Durval Luiz da Silva Ricciuli* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Aos meus pais *Shunji* e *Eliza*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

À *República 6 Paus* que sempre me acolheu com alegria em sua casa.

Às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

"A atenção é a mais importante de todas as faculdades para o desenvolvimento da inteligência humana."

Charles Darwin

ABE, R.S. ESTUDOS E APLICAÇÕES DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DSC:Trabalho de graduação para obtenção do diploma, 2011. Trabalho de graduação-Faculdade de engenharia do campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá 2011.

RESUMO

A energia solar é de longe a maior fonte de energia disponível na Terra e tem atraído, há milênios, a atenção e interesse para a utilização racional. A energia solar que atinge a Terra em uma hora é maior que todo consumo de energia da Terra em um ano.

Dentre as formas de transformação desta energia limpa e renovável em energia elétrica, por meio de células fotovoltaicas, obtém-se as baseadas em materiais semicondutores de Silício ou Germânio que devido a sua tecnologia envolvida e processos de produção ainda apresentam um alto custo de produção.

Uma alternativa para esta célula fotovoltaica é baseada em um corante sintético e um semicondutor nanocristalino TiO_2 , dióxido de titânio, chamada de DSC (Dye-Sensitized Cells), que apresentam um custo de até 80% comparada as células de Silício.

Apesar de uma eficiência inferior em relação as células de silício as DSC's continuam sendo uma promissora técnica de células fotovoltaicas.

Palavras Chaves: Energia Solar; Célula Fotovoltaica; Dióxido de Titânio; DSC; Célula de Grätzel;

ABE, R. **STUDIES AND APPLICATIONS OF THE DSC CELLS**: Graduate work to obtain certificate, 2011. Graduation work- Faculdade de engenharia do campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá 2011.

Abstract

The solar energy is far the largest source of energy available in earth and has attracted for milleniuns, the attention and interest for a rational use. The solar energy which strikes the Earth in one hour is bigger than the whole consume of energy in Earth in one year.

Among the forms of transformation of this clean, renewable energy, the electrical conversion, photovoltaic cells, have the materials based on silicon or germanium semiconductors due to its technology and production processes involved still have a high production cost.

An alternative to this solar cell is based on a synthetic dye and a semiconductor nanocrystalline TiO₂, titanium dioxide, called DSC (Dye-Sensitized Cells), which have a cost of up to 80% lower than silicon cells.

Despite a lower efficiency compared to silicon cells DSC's still a promising technique to photovoltaic cells.

Keywords: Solar Energy, Titanium Dioxide, DSC,

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- Incidência de raios Solares no Planeta.....	21
FIGURA 2- Placa fotovoltaica.....	24
FIGURA 3- Usina Solar na Espanha.....	25
FIGURA 4- Aplicação da Tinta Fotovoltaica.....	26
FIGURA 5- Junção p-n Diodo.....	28
FIGURA 6- Transistor 2N3055.....	31
FIGURA 7- Ligação Elétrica 2N3055.....	31
FIGURA 8- Curva I x V.....	32
FIGURA 9- Curva I x V e P x d.....	34
FIGURA 10- Célula DSC.....	35
FIGURA 11- Célula DSC, funcionamento.....	36
FIGURA 12- Preparação do eletrodo Negativo.....	38
FIGURA 13- Preparação do eletrodo Positivo.....	38
FIGURA 14- Colocação de corante no eletrodo Negativo.....	39
FIGURA 15- Célula com eletrodo negativo e positivo.....	39
FIGURA 16-Montagem da célula fotovoltaica.....	39
FIGURA 17-:Curva AxV.....	41
FIGURA 18-Curva PxR.....	41
FIGURA 19-Mudança na performance da célula DSC após o teste de ciclo de calor.....	42
FIGURA 20-Teste de eficiência de 1000 horas no teste de imersão de luz.....	43
FIGURA 21- Residência padrão de 80m ²	45
FIGURA 22-Placa solar 210GX-LPU Kyocera.....	47
FIGURA 23-Painel solar de DSC Acrosol.....	49
FIGURA 24-Gráfico comparativo das diferentes tecnologias de célula voltaica e sua eficiência.....	51

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- Corrente x Tensão.....	40
TABELA 2 : Tabela de eficiência do teste de ciclo de calor.....	42
TABELA 3 : Tabela de eficiência do teste de imersão de luz em uma célula DSC.....	44
TABELA 4: Tabela de potência necessária para iluminação.....	45
TABELA 5: Tabela de potência necessária para tomadas de uso geral.....	45
TABELA 6: Resumo das potências necessárias incluindo tomadas de uso específico.....	46

Lista de Abreviaturas e Siglas

TiO ₂	-Dióxido de titânio
Si	-Silício
CdTe	-Telúridio de cádmio
CIGS	-Diselênio galio índio de cobre
DSC	-Dye sensitizes solar cells
UV	-Luz ultravioleta
SnO ₂	-Dióxido de enxofre
ZnO	- Óxido de Zinco
Nb ₂ O ₅	- Pentóxido de Nióbio
LiI	- Iodeto de Lítio

Lista de Símbolos

I	Corrente
V	Tensão
P	Potência
λ	Comprimento de onda
h	Constante de Planck
c	Velocidade da luz
d	Distância
R	Resistência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
3	ENERGIA SOLAR	21
3.1	Energia do Sol.....	21
3.1.1	Energia solar química.....	22
3.1.2	Energia solar térmica.....	22
3.1.3	Energia solar elétrica.....	22
3.2	Células fotovoltaicas.....	23
3.2.1	Histórico.....	23
3.2.2	Aplicações.....	24
3.3	Células fotovoltaicas de material semicondutor.....	27
3.3.1	Junção P-N de diodo.....	27
3.3.2	Preparação das células.....	30
3.3.3	Experimento prático com as células.....	33
3.4	Célula fotovoltaica DSC de Grätzel.....	34
3.4.1	Vantagens da tecnologia DSC.....	34
3.4.2	Princípio de funcionamento de uma célula DSC de Grätzel	35
3.4.3	Preparação da célula fotovoltaica.....	37
3.4.4	Preparação do eletrodo negativo.....	37
3.4.5	Preparação do eletrodo positivo.....	38
3.4.6	Colocação do corante no eletrodo negativo.....	38
3.4.7	Montagem da célula fotovoltaica.....	39
3.5	Estudos sobre a célula fotovoltaica DSC de Grätzel.....	40
3.5.1	Determinação da curva I/V.....	40
3.5.2	Determinação da potências.....	41
3.5.3	Outros estudos sobre a célula solar DSC.....	42
4	ESTUDO DE CASO	45
4.1	Utilização de um painel solar comum de Silício.....	47
4.2	Utilização de um painel solar DSC.....	48
4.3	Conclusões sobre o Estudo de Caso.....	49

5	CENÁRIO ECONÔMICO COMPARATIVO.....	50
6	CONCLUSÕES.....	52
7	REFERÊNCIAS	54

1.Introdução

O mundo atualmente tem uma grande necessidade de novas tecnologias para energias renováveis. O grande desafio é como atender ao aumento de consumo global de energia sem sacrificar o nosso meio ambiente. Existem atualmente muitas formas de geração de energia, muitas renováveis e outras não. A energia não renovável é a forma de energia mais utilizada hoje em dia, e podemos citar como exemplos, as fontes de combustíveis fósseis(carvão, petróleo, gás natural) e fontes de combustível nuclear. Com o aumento da poluição global, surgiram as necessidades de formas de energias limpas e renováveis, que sejam auto-sustentáveis, dessa forma, começaram a ser utilizadas outras formas de energias renováveis, como biomassa, geotérmica, hidráulica, marés, eólica e solar.

A energia do sol pode ser considerada a forma mais abundante de energia, em que se captarmos toda a energia solar não utilizada, pode-se suprir a necessidade mundial de energia em apenas 12 minutos de geração. Obviamente existem lugares no planeta mais propícios e menos propícios a geração de energia solar, sendo que no equador a geração de energia solar seria bem maior. Existem basicamente três tipos de energia solar:

- Energia solar Química
- Energia solar Térmica
- Energia solar Elétrica

Esses tópicos serão melhores abordados a seguir.

Neste trabalho, é estudado basicamente o princípio de funcionamento de dois tipo de células solares, as células criadas a partir de transistores de Silício e Germânio, que são as dominantes do mercado, e as células solares criadas a partir de TiO_2 (Óxido de Titânio).

As células fotovoltaicas criadas a partir de transistores de silício tem um rendimento médio de 16%, e algumas chegam a até 28%. Esse tipo de célula é o tipo dominantes do mercado atual. As células fotovoltaicas criadas a partir de Óxido de Titânio tem rendimento médio de 5%, porém tem um custo até 80% menos que as células de transistores.

Na sessão objetivos, é tratado a introdução da tecnologia DSC. A próxima sessão do trabalho fala sobre energia solar. Nesse tópico, é feita a abordagem da quantidade de energia gerada pela luz solar incidente e as diferenças da incidência solar em diferentes regiões do

planeta. Existem três formas de geração de energia térmica, a energia solar química, térmica e elétrica. No tópico que é abordado as aplicações, é feito um comparativo entre a tecnologia fotovoltaica com o seu rendimento, e foi feita a comparação entre vantagens e desvantagens da tecnologia. No próximo tópico, é abordado o tema sobre as células solares criadas a partir de material semicondutor. É explicado o seu funcionamento, preço, construção de uma célula caseira e o experimento prático mostrando o seu rendimento. Em seguida é tratado a célula de Grätzel. Será explicado as vantagens da tecnologia e o seu princípio de funcionamento e em seguida é montado uma célula solar DSC caseira e comprova-se suas características.

2. Objetivos

Existem vários tipos de células solares e algumas delas são mencionadas aqui. Células solares de materiais semicondutores tais como Silício e Germânio são as mais utilizadas atualmente e dominam o mercado no presente. Dispositivos estáveis e as tecnologias da indústria da microeletrônica tem dado a célula solar baseada no semicondutor de silício (Si) a liderança sobre outros tipos de células solares. Para atender a redução de demanda de material e custos de purificação células solares de filmes delgados tem sido desenvolvidas. Células solares de filme delgado são baseadas em varias camadas de material semicondutor tais como silício amorfo, teluridio de cádmio (CdTe), diselênio gálio índio de cobre (CIGS). Mesmo através de células solares de filme delgado que necessita pouco material, o complexo processo de produção das diferentes combinações de materiais raros são muito caros e pode limitar no futuro a expansão da produção em larga escala.

Uma alternativa para tecnologia de célula solar é DSC (Dye-sensitized Solar Cells), objetivo deste trabalho. DSC consiste de moléculas de material corante (dye) , um semicondutor nanocristalino (TiO₂) e eletrólito (solução de Iodo), onde as moléculas do corante fixas no material semicondutor age como absorvedor de luz. Esta forma de ação contrasta com o descrito para o semicondutor de silício em que a luz é absorvida pelo material semicondutor em si.

3. Energia Solar

3.1 Energia do Sol

A energia solar é uma forma limpa de geração de energia que vem ganhando muito espaço na mídia e ciência devido a sua ampla possibilidade de uso e principalmente abundância, ela apresenta facilidade, duração e estabilidade, proporcionando grande potencial a ser explorado. Devido a abundancia de recursos hídricos, no Brasil, essa forma de energia não tem muito destaque nas implantações, apesar de termos uma posição geográfica, relevo, área e localização extremamente favoráveis para o seu desenvolvimento. O grande inconveniente dessa forma de energia é o preço de implantação, que a torna inacessível em certos momentos, mas atualmente busca-se formas de baratear o seu custo.

A energia solar incide sobre o planeta e chega a gerar perto de 3.850.000 exajoules por ano, quantidade que poderia abastecer o planeta todo em energia. A zona superior da atmosfera chega a receber cerca de $1,75 \times 10^{17}$ watts de radiação solar, sendo de 30% é refletida para o espaço, enquanto que o restante é absorvido pelas nuvens, atmosfera e água. Considerando-se que a demanda energética mundial é da ordem de $3,4 \times 10^6$ Wh/ano, possui-se meios de calcular o tempo necessário para que incida sobre a terra uma quantidade de energia solar equivalente a demanda energética mundial: $t = (3,4 \times 10^6 \times 60) / 1,75 \times 10^{17} = \sim 12$ minutos.

A energia solar pode ser aproveitada em diferentes níveis no mundo todo. Onde existe maior quantidade de incidência solar, a sua eficiência é maior, observa-se a Figura (1) sobre incidência solar no mundo:

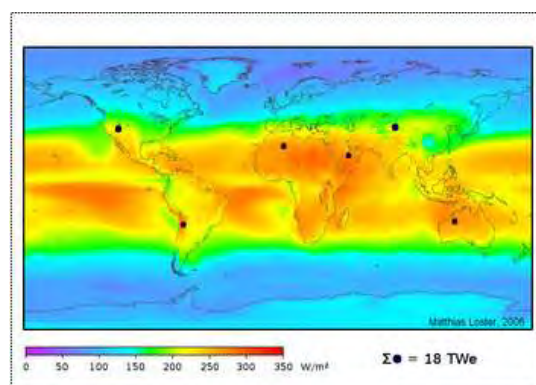


Figura 1: Incidência de raios solares no planeta

fonte (http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_solar)

Pode-se observar que existe maior incidência de raios solares nas regiões próximas à linha do equador, sendo assim, essa área apresenta maior rendimento a produção de energia solar. As áreas de deserto apresentam condições extremamente favoráveis a captação de energia solar. Os desertos que se encontram perto de regiões de países desenvolvidos com maior consumo possuem a sofisticação técnica para a captura de energia solar, e estão cada vez mais importantes no mundo, como o deserto de Mojave, onde existe uma usina com capacidade de 354 MW.

3.1.1 Energia Solar Química

Todos organismos biológicos absorvem a energia solar, sintetizando carboidratos a partir da água e do dióxido de carbono, tal energia é então dissipada através de uma cadeia alimentar. Na natureza existe um processo de transformação de energia solar em energia química denominado de fotossíntese de acordo com Azevedo, M.; Cunha, A.(2004).

3.1.2 Energia Solar Térmica

A energia solar produz calor ao incidir sobre um conjunto de moléculas. As moléculas da superfície dos materiais excitam-se ao receber energia radiante produzindo calor através de processos de absorção de fótons, aceleração de elétrons e difusão. A conversão térmica da energia solar fundamenta-se na absorção da energia por uma superfície negra. O coeficiente de absorção de vários tipos de absorventes negros varia entre 0,8 a 0,98, a energia restante é refletida.

3.1.3 Energia Solar Elétrica

A transformação de energia solar em energia elétrica pode ocorrer através de dois processos: a conversão Termoelétrica e a conversão Fotoelétrica.

-Pela conversão Termoelétrica, quando se aquece um eletrodo, muitos dos elétrons adquirem energia para mudar de órbita. Converte-se em um emissor de elétrons ou cátodo emissor. Outro eletrodo colocado próximo ao cátodo emissor, estando suficientemente frio, receberá os elétrons emitidos, convertendo-se em ânodo coletor. Se entre este cátodo e ânodo existir uma carga, surgirá uma corrente intereletródica. Estes dispositivos são denominados de termopares.

-Pela conversão Fotoelétrica, temos um fenômeno em que são englobados outros três fenômenos físicos, intimamente ligados e de ocorrência simultânea: a absorção da luz pelo material, a transferência de energia dos fótons para as cargas elétricas e a criação da corrente elétrica. A tecnologia de célula solar DSC (Dye-sensitized Solar Cells) enquadra-se nesta categoria, objeto deste trabalho.

3.2 Células Fotovoltaicas

3.2.1 Histórico

De acordo com Valera M. Antônio (2006), a geração de eletricidade pela energia solar se dá através de células fotovoltaicas. O seu estudo começou no século XIX, e foram descobertas em 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel que descreveu o Efeito Fotoelétrico em um eletrólito. Em 1876, Adams descobre o Efeito Fotovoltaico (FV) no semicondutor Selenio. Em 1900 M. Planck verifica e constata a natureza química da luz. Já em 1930, Shottky estabelece a Teoria do Efeito Fotovoltaico. Em 1954 Pearson, Chaplin e Fuller montam a primeira célula fotovoltaica prática (mono-silício). Em 1958 são construídas as primeiras células FV para alimentação do satélite Vanguard-1. Na década de 60 tem-se as aplicações espaciais da tecnologia FV. Na década de 70 Lindmeyer desenvolve as células FV incluindo os Poly-Si. No final da década de 70 as aplicações terrestres são bem mais incrementadas. Na década de 80 são instalados nos EUA e Europa as Centrais Fotovoltaicas Piloto de médio porte. Apesar disso, anteriormente, as células fotovoltaicas eram somente utilizadas em estações espaciais, especialmente em satélites autônomos, onde o alto preço não era um fator limitante, pois suas características de peso e tamanho tornaram as células fotovoltaicas a melhor forma de geração de energia no espaço. Devido a crise do petróleo em 1973, as células fotovoltaicas foram o alvo de pesquisas de melhoria, porém o seu alto custo ainda inviabilizava a sua produção em larga escala, então para isso, devia antes reduzir consideravelmente o seu custo. Já na década de 90, houve um significativo avanço na tecnologia, começando a viabilizar o processo. Devido a sua auto sustentabilidade e rendimento relativamente bom, muitas empresas começaram a investir nessa nova tecnologia. No parâmetro atual, a maioria da população ainda vive dependente de gerações de energia fóssil, como biomassa, carvão e petróleo. O Brasil dispõe-se de excelente capacidade de geração de energia fotovoltaica devido ao seu clima e espaço privilegiado, sendo a este tipo de energia inesgotável e limpa.

3.2.2 Aplicações

De acordo com a fonte http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_solar uma célula fotovoltaica é um dispositivo capaz de transformar a energia solar em energia elétrica. Elas também são comumente chamadas de células solares, e apresentam rendimento médio de 16%, existem algumas com rendimentos de até 28%, fabricadas com arseniato de gálio, mas devido ao alto custo, elas são somente utilizadas para objetos espaciais. As primeiras células fotovoltaicas são feitas a partir de silício cristalino. As células consistem de uma lâmina de silício na qual é formada uma junção p-n diodo de junção, capaz de gerar energia elétrica captada pela luz solar. Essa geração constitui a geração dominante no mercado de energia solar, representando 80% do mercado de células fotovoltaicas. Seguindo a tendência de modernização começaram a surgir as células solares baseadas em filmes finos de semi-condutores. Esses filmes finos possuem pior rendimento quando comparadas as células de silício cristalino, porém o seu custo é extremamente menor, sendo assim viável de certa forma. Outra vantagem observada seria o menor suporte necessário quando se colocam os painéis nos telhados e permite coloca-los e integra-los em materiais flexíveis como têxteis, plásticos, ou integração direta no edifício. A terceira geração é muito diferente das anteriores, consiste em utilizar semi-condutores que dependam da junção p-n para separar partículas carregadas por fotogestão. Esses dispositivos incluem células fotoeletroquímicas e nanocristais. O conjunto de células fotovoltaicas tem o nome de placa fotovoltaica que são comumente instaladas em residências, comércios e na área rural e apresentados na figura 2.



Figura 2: Placa Fotovoltaica

fonte (http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_solar)

Quando esses painéis são expostos sob a energia solar, os fótons excitam os elétrons do semicondutor, e esses elétrons se deslocam gerando energia elétrica. Ao contrário do que muitos pensam, a geração de energia elétrica pelas placas não se dá pela quantidade de calor, mas sim pela incidência de raios luminosos sob a placa, sendo que elas funcionam mesmo sob tempo nublado.

No âmbito industrial e na produção em larga escala de energia, existem as usinas solares como mostrado na Figura 3. Uma configuração básica de uma usina solar é um conjunto de espelhos móveis sob uma grande área, focando a concentração solar em uma torre, aquecendo água, produzindo vapor, que movimenta uma turbina que aciona um gerador de energia elétrica. Essa usina porém tem o inconveniente de não funcionar anoite, e ao nascer do sol e no poente, o seu rendimento cai drasticamente. A sua utilização é ainda secundária e complementar as outras formas de energia.



Figura 3: Usina solar na Espanha

fonte (http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_solar)

A energia solar possui grandes vantagens e desvantagens, pode-se citar como vantagens:

- Não poluente.
- Baixo custo de manutenção.
- Os painéis solares estão cada vez mais eficientes e mais baratos, tornando-os uma opção extremamente viável.
- Em países tropicais como o Brasil, a utilização de energia solar é viável em praticamente todo o seu território e em locais longe do centro de produção energética, sua utilização ajuda a diminuir a demanda nestes.

Como desvantagens, pode-se citar:

- O painel solar exige muita energia para ser criado;

- Preços extremamente elevados se comparados a outras formas de produção de energia;

- Fonte de energia extremamente dependente do clima. Por exemplo, a sua produção durante o período noturno é nula;

- As formas de armazenamento desse tipo de energia são pouco eficientes quando comparadas as outras formas de produção de energia.

Observa-se que a produção de energia solar é um tanto o quanto inviável devido ao seu preço quando comparado as outras formas de energia, dessa forma a proposta desse trabalho é apresentar formas de baratear essa forma de energia propondo alguns métodos. O primeiro método a ser apresentado é a tinta fotovoltaica. Professores da universidade do Texas desenvolveram uma nova forma de aplicação da energia solar. Células solares em forma de tinta poderão ser aplicadas em diversas superfícies para dessa forma poderão transformar energia solar em elétrica, como indica a figura 4. Essa tecnologia poderá vir a substituir as placas fotovoltaicas que possuem preços extremamente altos, sendo também mais barata e não agride o ambiente. As placas solares usam na sua composição silício, sendo que essa tinta solar utiliza CIGS, seleneto de cobre, índio e gálio.

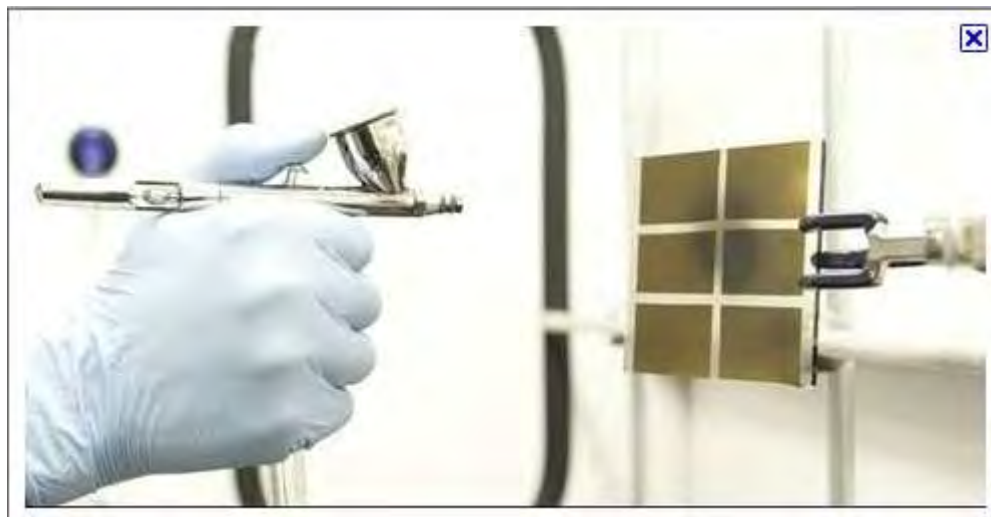


Figura 4: Aplicação de Tinta Fotovoltaica

fonte (<http://www.eletronica.com/tinta-podera-substituir-celulas-fotovoltaicas/>)

3.3 Células Fotovoltaicas de Material Semicondutor

De acordo com Silva, R.; Chiquito, (2004) , uma célula solar nada mais é do que um fotodiodo com uma área que possa ser exposta a luz solar, do ponto de vista de funcionamento. Ou seja, qualquer diodo cuja área possa ser exposta a luz solar pode ser transformado em uma célula solar. Apesar disso, isso não significa que ela possa ser utilizada em escala comercial, pois não produzirá energia suficiente para ser usado como fonte de energia. Existem alguns transistores comerciais (2N3055) que possuem uma pastilha de silício relativamente grande e pode ser usada como célula solar. Isso é possível, pois um transistor possui duas junções p-n, no caso o transistor em questão é n-p-n as quais funcionam como diodos. Se expostas a luz solar funcionam como células solares. Em função dessa básica teoria sobre células solares, será explicado basicamente o seu princípio de funcionamento.

3.3.1 Junção p-n do diodo

Como dito anteriormente, uma célula solar convencional é geralmente composta de uma junção semicondutora p-n. Os materiais semicondutores, dopados ou não são caracterizados por um *gap* de energia (E_g). Na Figura (5) (a) temos o perfil das bandas de energia em uma junção p-n. Nessa situação ao ser unido dois semicondutores de mesmo gap de energia (tipo p-excesso de cargas positivas, ou prótons e tipo n-excesso de cargas negativas, ou elétrons), mas com dopagens diferentes, surge um campo elétrico. Esse campo elétrico surge na região de interface como consequência do desequilíbrio de cargas de cada lado da junção. Ao alcançar o equilíbrio, as bandas de energia são curvadas como mostrado na Figura (5), dando origem a uma região conhecida como região de depleção, cuja principal característica é a falta de portadores de cargas livres, elétrons ou prótons.

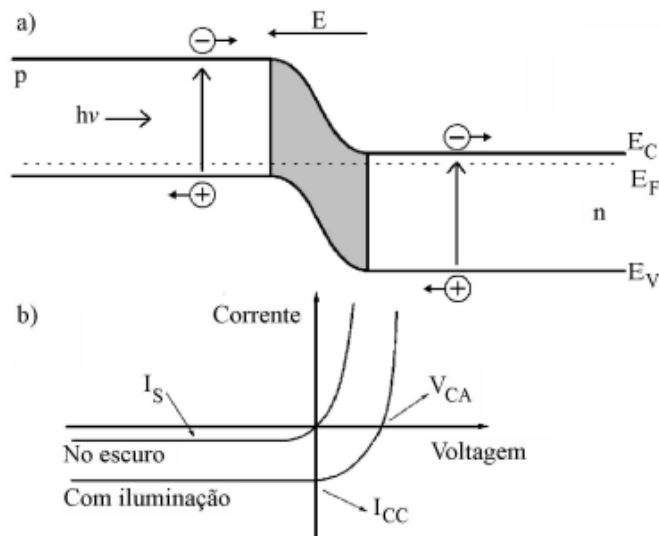


Figura 5 Junção p-n Diodo (Silva, R.; Chiquito, 2004)

Existe uma equação que relaciona as características de corrente-tensão de uma junção p-n, ou seja a equação (1).

$$I = I_S \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right], \quad (1)$$

No caso, I_S é a corrente de saturação, V é a polarização externa à junção. A equação acima nos mostra que de acordo com uma polarização V , obtém-se diferentes valores para a corrente líquida na junção p-n

Elétrons da banda de valência podem ser excitados para a banda de condução quando uma junção for iluminada por luz $h\nu$, deixando um próton na banda de valência. Este sistema é conhecido como par elétron-próton. Ao se retirar a iluminação, ocorre a recombinação do par elétron-próton, com os elétrons excitados retornando para a banda de valência. Para que este processo ocorra, temos que $h\nu > E_g$, ou seja, energias menores que a energia do *gap* não conseguem excitar os elétrons da banda de valência para a de condução. Resumindo, o processo de conversão de radiação solar em energia elétrica, é baseado fundamentalmente em criação de pares elétrons-prótons pela absorção dos fótons da radiação incidente.

Prótons e elétrons que foram foto excitados no material sob efeito de iluminação, podem se deslocar até a região de depleção mostrado na Figura (5) antes de se recombinarem.

Eles são acelerados pelo campo elétrico na interface de um lado para o outro lado da junção, surgindo uma corrente I_L que terá mesmo sentido da corrente de saturação I_S . Dessa forma, a corrente total é calculada pela equação (2).

$$I = I_S \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] - I_L. \quad (2)$$

A corrente I_L tem uma capacidade chamada de eficiência quântica que mede a habilidade do material usado em converter fótons de pares elétrons-próton e depende do comprimento de onda usado. O valor da eficiência quântica é esbarrado no conceito de que quanto maior for a incidência de luz, maior será a corrente gerada. Deve-se lembrar também que a radiação incidente também pode ocasionar outros efeitos no material, como espalhamento elásticos ou inelásticos com a rede cristalina. Agora, irá ser definido a expressão para calcular a potência útil entre a carga pela célula solar. A potência é escrita como a expressão (3).

$$P = IV = V I_S \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] - V I_L, \quad (3)$$

E a potência máxima P será obtida quando:

$$\left(\frac{dP}{dV} \right)_{V_m, I_m} = 0. \quad (4)$$

Assim, fazendo a derivada acima e resolvendo para $V=V_m$, tem-se a equação (5).

$$\frac{qV_m}{kT} = \ln \left[\frac{1 + \frac{I_L}{I_S}}{1 + \frac{qV_m}{kT}} \right]. \quad (5)$$

Substituindo uma equação na outra, encontramos facilmente a corrente máxima I_m , calculada pela equação (6).

$$I_m = I_S \frac{qV_m}{kT} \exp \left(\frac{qV_m}{kT} \right), \quad (6)$$

Pode-se observar que a equação 6 não possui uma solução analítica. Para isso, pode-se inicialmente reescrever a equação (2) supondo que $I=0$, ou seja, iremos determinar a voltagem em um circuito aberto fornecida pela célula solar, dessa forma a equação (2) tem-se a equação (7).

$$0 = I_S \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right)_{V_{CA}} - 1 \right] - I_L, \quad (7)$$

Substituindo na equação (3), obtem-se a equação (8):

$$V_m = V_{CA} - \frac{kT}{q} \ln \left[1 + \frac{qV_m}{kT} \right]. \quad (8)$$

Pode-se observar que a equação (8) continua sem solução analítica, porém, permite uma estimativa do valor da voltagem máxima que pode ser fornecida pela célula solar. Com esta artimanha, pode-se calcular numericamente o valor de V_m , calcular I_m e determinar a potência máxima fornecida pela célula.

3.3.2 Preparação das células solares

Existem muitos transistores que podem ser usados como células solares. Será usado neste trabalho o transistor 2N3055 apresentado por Silva, R.; Chiquito, 2004 para uma demonstração experimental. Esse transistor é de baixo custo, na faixa de R\$5,00 e geralmente é usado em sistemas de potência de som e TV, além de sistemas de regulação de corrente/tensão. Na Figura (6), pode-se observar o esquemático físico desse transistor:

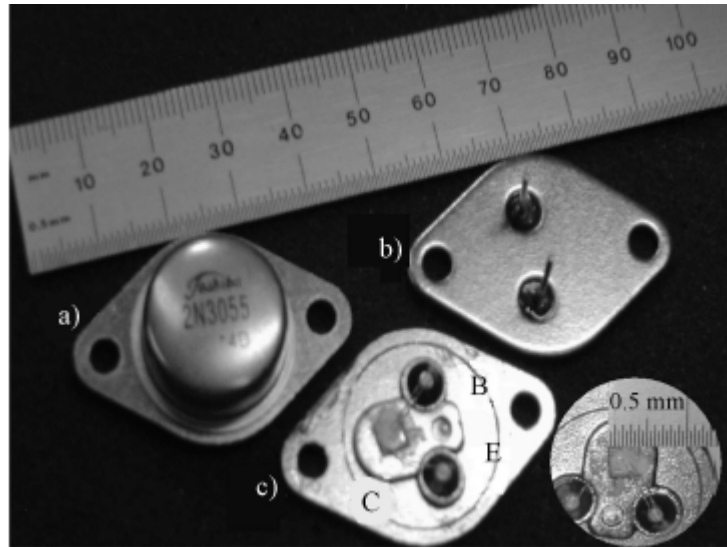


Figura 6: Transistor 2N3055 (Silva, R.; Chiquito, 2004)

No caso da figura (6) a) e b) representam a blindagem do transistor e a sua pinagem, enquanto que a figura c) representa o transistor por dentro. Nota-se que fica exposto a pastilha de silício e os contatos elétricos, e dependendo do transistor, ele pode vir coberto por uma camada de resina plástica esbranquiçada, que piora o rendimento do transistor em capturar luz solar. Existe formas de retirar esse resina, usando algum solvente orgânico.

Dessa forma, começa-se a efetuar as ligações elétricas no transistor. Sabe-se que uma célula solar é composta da junção p-n, no caso precisa-se utilizar dois dos três terminais presentes no transistor. Dessa forma obtém-se a célula solar pronta, abaixo foi representado a ligação elétrica. A Figura (7) representa o seu esquemático:

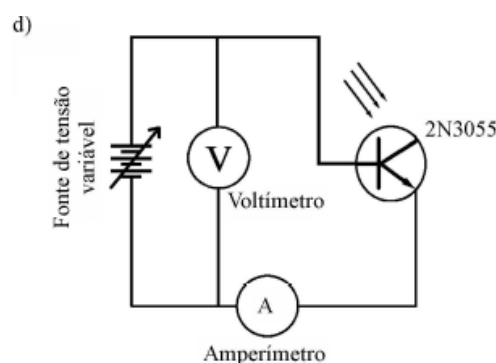


Figura 7: Ligação Elétrica 2N3055 (Silva, R.; Chiquito, 2004)

Na figura (8), apresenta-se gráficos de corrente elétrica gerada devido a incidência de luz solar:

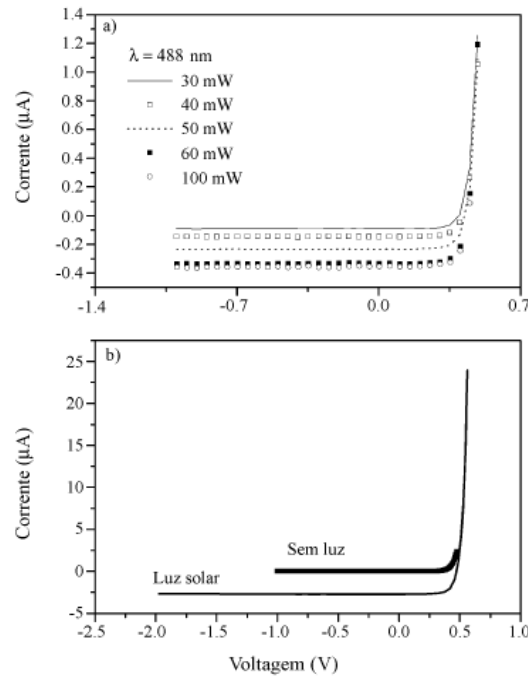


Figura 8: Curva I/V (Silva, R.; Chiquito, 2004)

No caso do gráfico (8) a), utiliza-se laser de íons de Argônio com comprimento de onda igual a 488nm com potência variável entre 30 mW e 100 mW. No caso, pode-se observar que com o aumento da potência, foi aumentado expressivamente a corrente, porém esse aumento da corrente nos mostra uma tendência de saturação, ou seja, a corrente fica limitada a um valor máximo em função da potência aplicada na célula. O caso fica explícito nas curvas de 60 e 100 mW, em que o aumento da corrente é muito menor quando comparada as outras curvas. A corrente gerada pela incidência de raios luminosos pode ser aproximada através da expressão (9):

$$I_L = \frac{\eta q P_L \lambda}{hc}, \quad (9)$$

Onde η é a eficiência quântica, q a carga eletrônica, P_L é a luz incidente λ o comprimento de onda, h a constante de Planck e c velocidade da luz. Pode-se observar a partir dessa fórmula que todos os parâmetros são fixos, com exceção da luz incidente, que no caso se aumentarmos, aumentaremos a corrente I_L . Apesar disso, observa-se experimentalmente que isso não ocorre, se aumentar a luz incidente, não necessariamente aumenta a corrente gerada, mas por que isso ocorre? Isso ocorre pois nem todos os fótons são aproveitados para a criação dos pares elétrons-prótons, no caso a corrente satura. De acordo com autores desse

estudo, a célula foi dessa vez exposta a luz solar utilizando as equações já discutidas, obteve-se um $V_m=0,404$ V e a corrente máxima encontrada foi $I_m=0,031$ A, dessa forma podemos calcular que a potência média obtida foi de 12 mW.

3.3.3 Experimentos práticos com as células

Pode-se fazer experimentos práticos com a célula solar criada. Utilizando diferentes tipos de fontes de luz, verifica-se o que a célula pode nos disponibilizar. De acordo com a figura 7, observa-se o quanto de corrente é gerado para diferentes tipos de fontes de luz. Na sessão anterior, constata-se que com a luz solar, a célula consegue atingir uma corrente de 31 mA, que no caso, consegue movimentar um pequeno motor. De qualquer forma é uma quantidade muito pequena gerada, mas nada impede de associarmos mais transistores em série e paralelo para adquirirmos mais tensão e corrente. Ligando 6 células numa configuração onde três conjuntos de duas células estão em paralelo, obteve-se um $P_m=82$ mW para iluminação solar, o que já é um valor considerável. Para demonstração de bateria solar e para pequenos objetos, temos uma bateria considerável, levando em conta a baixa potência.

Outro fato interessante é que observamos que quanto maior a distância da luz incidente à célula, menor é a corrente. No caso ela obedece a equação (10):

$$I \propto \frac{1}{d^2}, \quad (10)$$

Onde I é a corrente e d a distância. A Figura (9) (b) ilustra esse efeito. É utilizado nessa parte do experimento uma lâmpada incandescente de 60W fornecendo luz a diferentes distâncias. Pode-se ver pelo gráfico que quanto maior a distância, menor a corrente produzida.

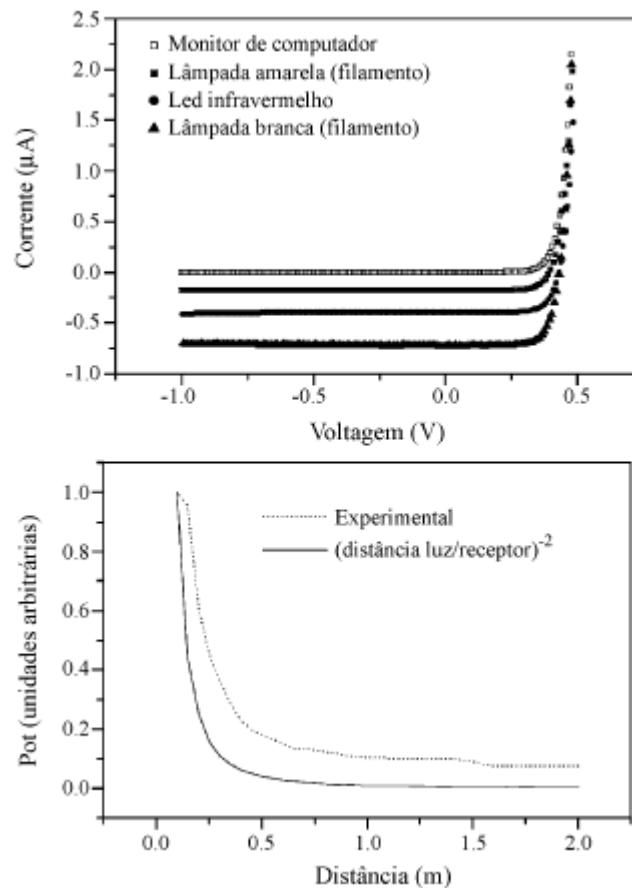


Figura 9: Curva I/V e P/d (Silva, R.; Chiquito, 2004)

3.4 Células Fotovoltaicas DSC de Grätzel

Esse tipo de célula solar foi desenvolvida pelo professor Michael Grätzel do Instituto Federal de Tecnologia da Suíça, e consiste em uma célula solar fotovoltaica baseada em um corante sintético que transforma boa parte da energia solar em energia elétrica. Nas sessões seguintes é feita a descrição de funcionamento desse tipo de célula solar.

3.4.1 Vantagens da tecnologia DSC

A maior vantagem desse componente é o preço, 80% menor que as células apresentadas no mercado atualmente. A base da célula fotovoltaica DSC é o Óxido de Titânio (TiO_2). Este componente é um pigmento usado nas tintas brancas de parede. Além disso, o método de preparo das células apresenta custo muito reduzido e não requer toda a sofisticação da célula de silício, tornando esse tipo de célula o futuro da geração de energia solar. Esse tipo

de pigmento por ser transparente pode ser aplicado a diferentes estruturas e superfícies, sendo que futuramente ela poderá ser usada em vidros e paredes, tornando elas geradores de energia. A maior desvantagem da fotocélula DSC é o baixo rendimento, que gira em torno de 7%, enquanto que as células de silício gira em torno de 18%.

3.4.2 Princípio de funcionamento da célula Fotovoltaicas de Grätzel

As células de Grätzel são compostas basicamente por um componente chamada de “dye” de acordo com Azevedo, M.; Cunha, A, sem data. que seria um corante, um semicondutor cristalino conhecido como Dióxido de Titânio(TiO_2), um eletrólito, que no caso seria uma solução de iodo, dois eletrodos de vidro com duas camadas transparentes(SnO_2) e um catalisador(platina ou grafite).A Figura (10) mostra o esquemático da célula:

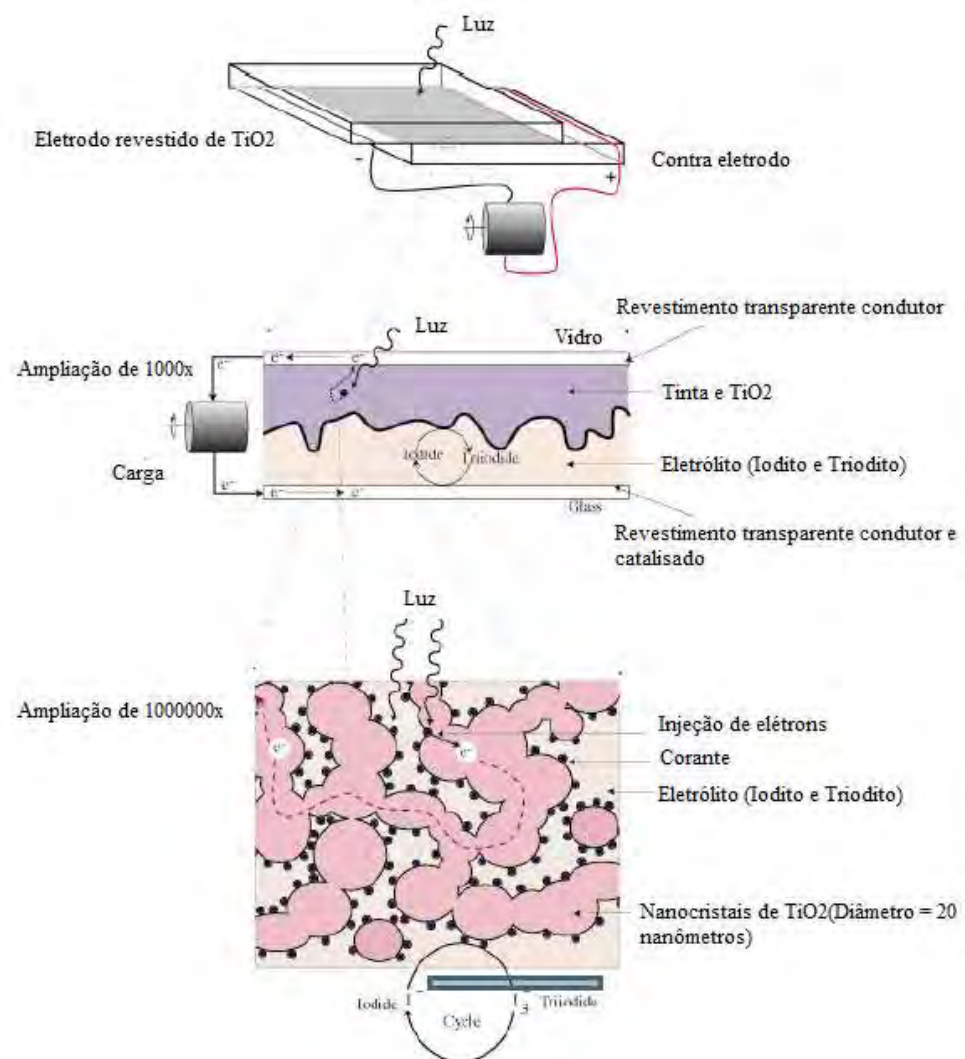
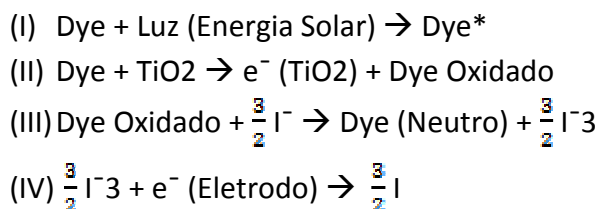


Figura10: Célula DSC (Azevedo, M.; Cunha, A, sem data)

A seguir, apresenta-se as reações químicas que ocorrem para fazer a célula funcionar:



A reação a seguir é descrita da seguinte forma: Primeiramente existe a tinta (dye) que com a presença da luz solar fica oxidado. Na equação (II) foi adicionado a tinta ao dióxido de titânio e se obtém uma solução de tinta com o componente. Já na equação (III) o corante do recebe do eletrólito um elétron, e as moléculas do eletrólito (solução de Iodo) são reduzidas no eletrodo positivo. Finalmente na reação (IV) para haver um fluxo de corrente elétrica, é necessário ligar os dois eletrodos a uma resistência de carga.

A seguir, apresenta-se a Figura (11) que mostra o princípio de funcionamento de uma célula DSC (dye sensitized nanocrystalline solar cell) de acordo com Grätzel, M. 2003:

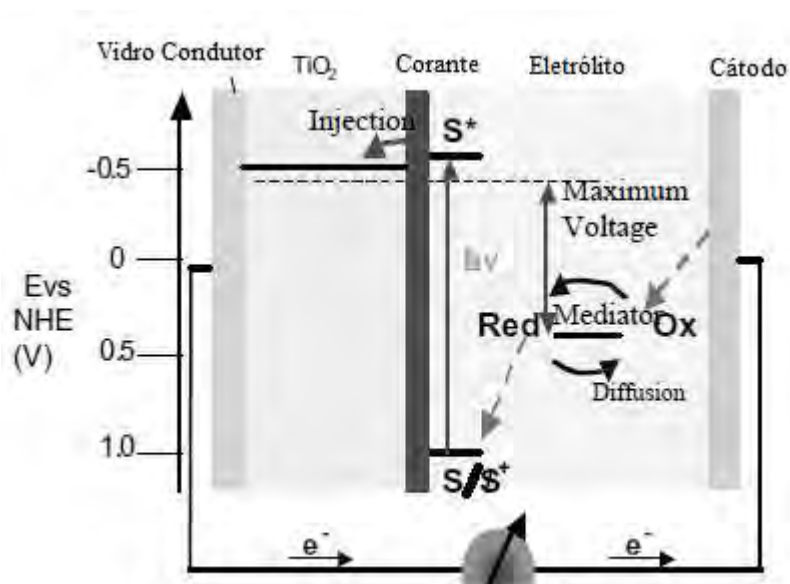


Figura 11: Célula DSC funcionamento (Grätzel, M., 2003)

Para permitir que a condução elétrica aconteça, existe uma mesoporosa camada óxida composta de partículas nanométricas. O material escolhido obviamente foi o TiO_2 que é o foco de estudo, porém, outros componentes como ZnO e Nb_2O_5 também foram estudados. Acoplado na camada do filme nanocristalino, existe uma monocamada de tinta de carga de transferência. A foto excitação do último resulta em uma injeção de elétrons em uma banda de condução do óxido. A doação de elétrons pelo eletrólito, que no caso é geralmente um solvente orgânico contendo um sistema redox, como uma dupla de iodido ou triiodido, restaura o estado original da tinta. A regeneração do sensibilizador por iodidos intercepta a recaptura da banda elétron de condução pela tinta oxidada. O iodido é regenerado em turnos pela redução do triiodido no circuito contra eletrodo, sendo completado via migração de elétrons pela carga externa. A voltagem gerada sob iluminação corresponde a diferença entre o “level Fermi” do elétron no sólido, e do potencial de oxi redução do eletrólito. O dispositivo gera energia elétrica da luz, sem sofrer uma transformação química permanente.

3.4.3 Preparação da Célula Fotovoltaica

A preparação desse tipo de célula solar consiste em 4 passos de acordo com Azevedo, M.; Cunha, A.sem data.

1. Preparação do eletrodo negativo
2. Preparação do eletrodo positivo
3. Colocação da solução colorida no eletrodo negativo
4. Montagem da célula fotovoltaica

3.4.4 Preparação do eletrodo negativo

Foi utilizado placas de vidro homogêneas com um lado coberto com uma camada de SnO_2 . Do outro lado da placa, aplica-se uma camada de TiO_2 . Para isso, foi grudado a placa em uma superfície lisa com fita adesiva, e com uma pipeta foi aplicado a camada de TiO_2 , após espalhados a camada de forma a ficar bem fina em cima da placa. O próximo passo é utilizar um secador para secar a água existente na pasta de TiO_2 , e em seguida, retira-se a placa da superfície e leva-se ao forno a uma temperatura entre 450 e 550 graus celsius por cerca de dez minutos.

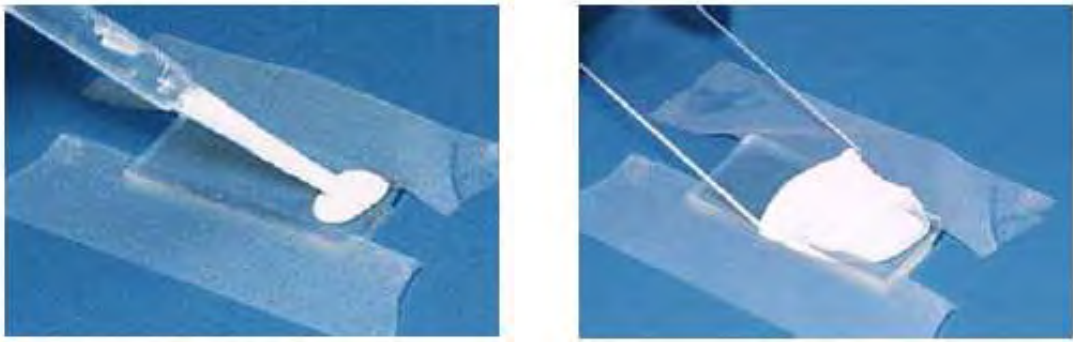


Figura 12: Preparação eletrodo negativo (Azevedo, M.; Cunha, A., sem data)

3.4.5 Preparação do eletrodo positivo

Nessa etapa agora, pega-se outra lamina de vidro e mede-se a resistência para ver o lado que possui a camada de SnO_2 , depois de descoberto qual lado, pega-se o outro lado e pinta-se com um camada de grafite. A superfície deverá ficar preta de acordo com a Figura (13).

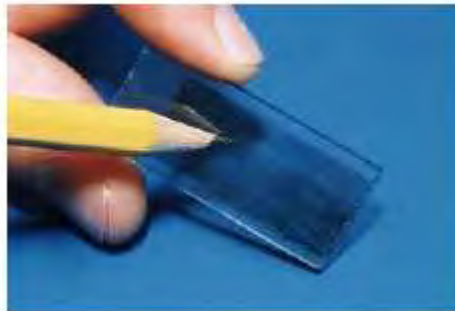


Figura 13: Preparação eletrodo positivo (Azevedo, M.; Cunha, A., sem data.)

3.4.6 Colocação do Corante no eletrodo negativo

Nessa etapa deve-se mergulhar o eletrodo negativo em uma solução pré preparada por cinco minutos, de acordo com a Figura (14), depois retira-la e secar com um secador. Após feito isso, a placa ficará com uma coloração vermelho claro.

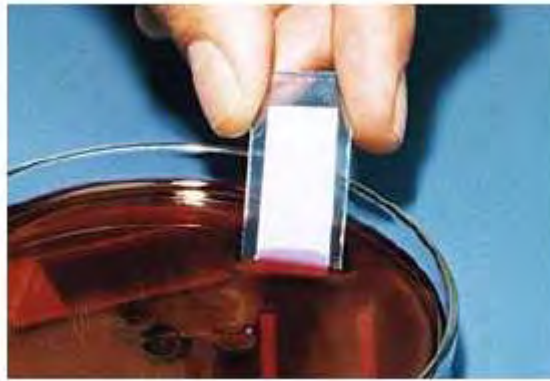


Figura 14: Colocação do corante no eletrodo negativo (Azevedo, M.; Cunha, A., sem data)

3.4.7 Montagem da célula fotovoltaica

Agora, deve-se colocar uma placa em contato com a outra, no caso, a parte com TiO_2 do eletrodo negativo com a placa com grafite do eletrodo positivo, de acordo com a Figura (15):

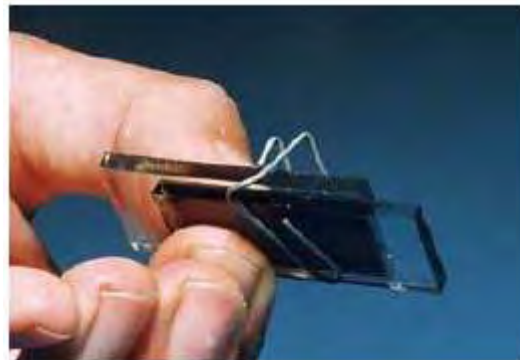


Figura 15-Célula com eletrodo negativo e positivo (Azevedo, M.; Cunha, A., sem data)

Em seguida para ativar a célula, deve-se derrubar uma gota de eletrólito e medir a sua voltagem. Nessa configuração, pode-se observar que a célula gera uma tensão de 0,3 volts, de acordo com a Figura (16).



Figura 16: Montagem da Célula Fotovoltaica (Azevedo, M.; Cunha, A., sem data)

3.5 Estudos sobre as Células Fotovoltaicas DSC de Grätzel

3.5.1 Determinação da curva I-V da célula fotovoltaica

Foi determinado a curva de corrente por tensão determinada através de diferentes resistências de carga usados na célula, no caso, temos a tabela e o gráfico:

R(Ω)	I(μ A)	U(V)
5	374	0.0017
10.4	373	0.0037
20	372	0.007
31.2	370	0.011
54	367	0.019
170	356	0.061
207	352	0.073
266	353	0.095
300	355	0.106
380	346	0.132
413	343	0.142
505	333	0.168
556	324	0.182
652	307	0.201
1000	248	0.248
2000	149	0.3
3000	106	0.32
4000	82	0.33
5000	67	0.336
6000	56	0.34

Tabela 1: Corrente x Tensão (Azevedo, M.; Cunha, A., sem data)

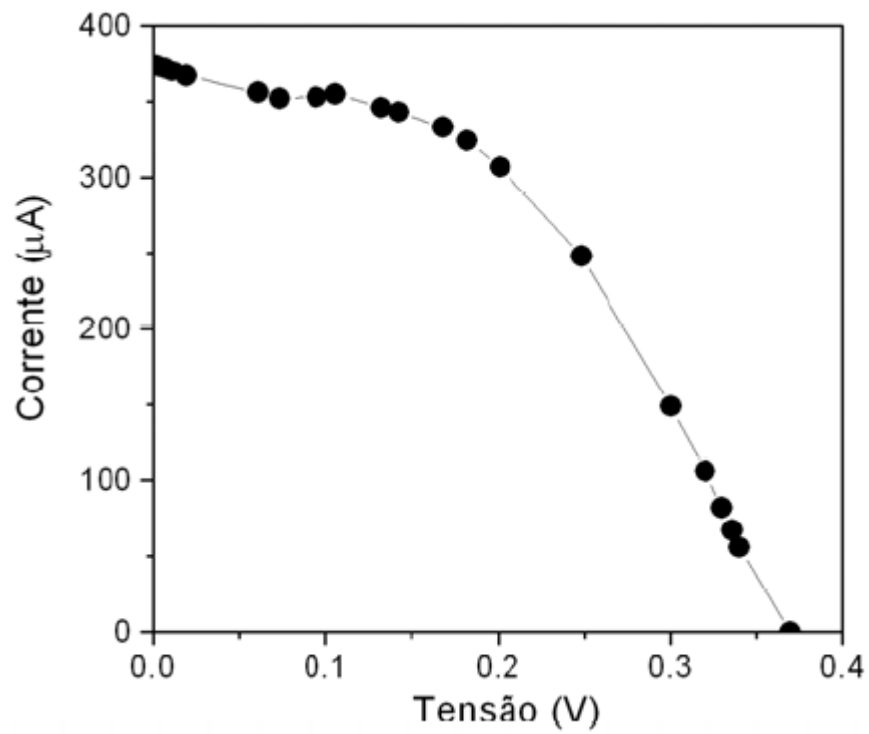


Figura 17: Curva AxV (Azevedo, M.; Cunha, A., sem data)

3.5.2 Determinação da potência da célula fotovoltaica

Para obter-se a potência que a carga gera, simplesmente foi utilizado a relação do produto de tensão pela corrente para ser determinado a potência.

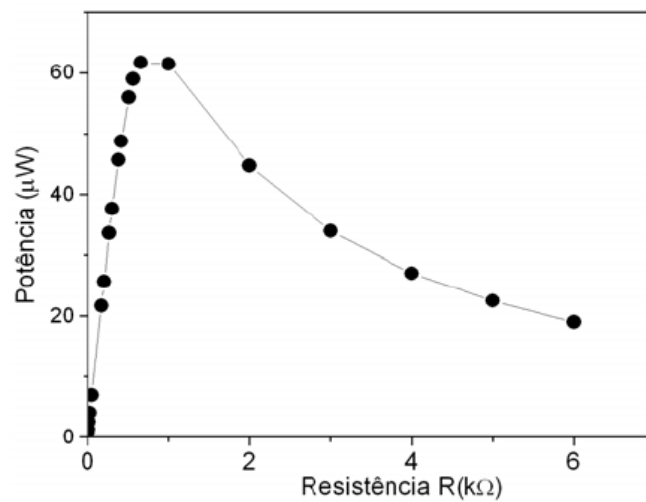


Figura 18: Curva P x R (Azevedo, M.; Cunha, A., sem data)

Pode-se observar, que a célula atinge uma potência máxima para um determinado valor de resistência, no caso, $P_{max}=60\mu W$ para uma resistência de 700 ohms.

3.5.3 Outros estudos sobre a célula solar DSC

Apresenta-se agora dois experimentos práticos sugeridos por Koishi, Y.; Yamaguchi, T.; Arakawa, H. (2006) que serão discutidos a seguir.

Dois tipos de DSC 5mm x 40mm célula única e uma célula 10cm x 10 cm sub módulo foram preparadas. O sub módulo composto por estruturas colecionadas de malha de prata. O fotoeletrodo de DSC foi preparado pela pintura de pó de prata, vidro e pastas de TiO_2 em uma placa de vidro (10Ω / quadrado), seguido por uma calcinação a 450-550 graus celsius. O fotoeletrodo foi imerso na tinta N719. Solução de eletrólito composto por uma mistura de I_2 (0.05 M), LiI (0.1 M), $DMPIImI$ (0.6 M), TBP (0.5 M). As características de fotocorrente x voltagem (I-V) do DSC foram medidas usando um medidor de fonte sob a radiação supridas por um simulador solar.

Um longo teste de estabilidade foi conduzido usando o teste JIS-C8938 o qual é um teste ambiental e de resistência. O teste de ciclo de calor ($40^\circ C$ a $90^\circ C$, 200 ciclos) foi conduzido numa pequena câmara de teste. Outro teste chamado de teste de imersão de luz foi conduzido sob um simulador solar a $60^\circ C$ por 1000h. Filtros UV foram aplicados para checar a influência da radiação UV na célula DSC.

A Tabela 2 e a Figura 19 mostra os resultados sobre o experimento de ciclo de calor em uma célula DSC. Constata-se somente um decréscimo de 20% na eficiência inicial, mesmo após 200 ciclos de calor. Este resultado mostra futuro para obter boa estabilidade térmica da célula DSC, usando eletrólito líquido.

Ciclos	J_{sc} [mA cm ⁻²]	V_{oc} [V]	ff [-]	Eficiência [%]	Eficiência Relativa [%]
0	18.5	0.63	0.59	6.82	100.0
200	13.4	0.61	0.68	5.51	80.8

Tabela 2 : Tabela de eficiência do teste de ciclo de calor (Koishi, Y.; Yamaguchi, T.; Arakawa, H, 2006.)

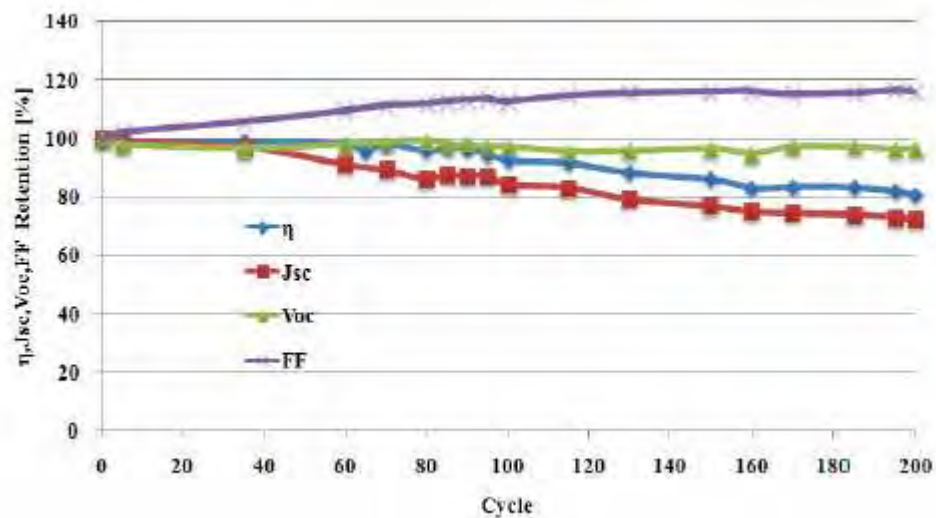


Figura 19 : Mudança na performance da célula DSC após o teste de ciclo de calor(Koishi, Y.; Yamaguchi, T.; Arakawa,H., 2006)

A Figura 20 mostra o teste de imersão de luz em uma célula unitária DSC de 5mm x 40mm. Sob a radiação total do sol, constata-se uma diminuição no seu rendimento após 200 horas, no caso, foi observado que a cor amarela do eletrólito foi manchado pela radiação. No próximo passo, acopla-se um filtro UV na superfícies da DSC. Observa-se que não houve nenhuma perda na eficiência da célula, mesmo após um teste de mil horas de imersão de luz. O porque da diminuição da eficiência devido a radiação ultravioleta está sendo estudado.

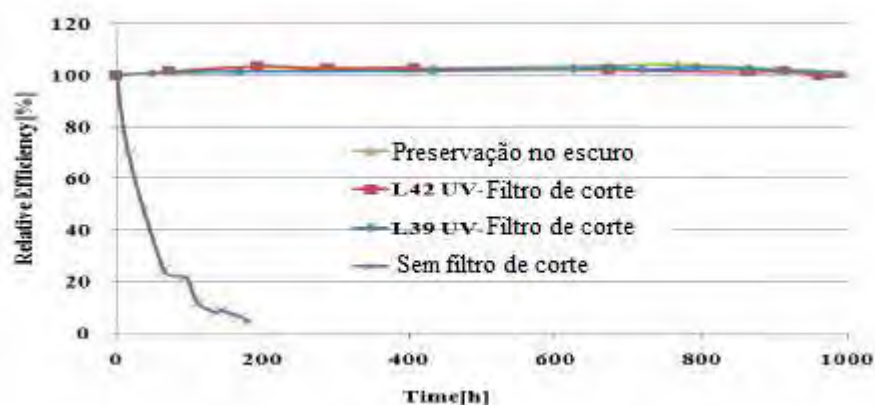


Figura 20 : Teste de eficiência de 1000 horas no teste de imersão de luz (Koishi, Y.; Yamaguchi, T.; Arakawa,H., 2006)

O teste de imersão de luz também foi conduzido usando uma célula de 100mm x 100mm usando um filtro UV de filme fino de película sob um vidro FTO. A tabela (3) mostra

o seu resultado. Este sub módulo exibe uma excelente estabilidade até mil horas de teste contínuo sob 60°C

Tempo [h]	J_{sc} [$\mu A\ cm^{-2}$]	V_{oc} [V]	ff [-]	Eficiência [%]	Eficiência Relativa [%]
0	14.5	0.64	0.60	5.53	100
1000	13.2	0.69	0.67	6.07	110

Tabela 3 : Tabela de eficiência do teste de imersão de luz em uma célula DSC (Koishi, Y.; Yamaguchi, T.; Arakawa, H., 2006)

4. ESTUDO DE CASO

Nesta etapa do trabalho, apresenta-se uma simulação de alguns painéis solares em um modelo de residência. Usa-se a planta da residência mostrada da Figura (21) e inicialmente calcula-se a potência total necessária para atender a demanda da residência.

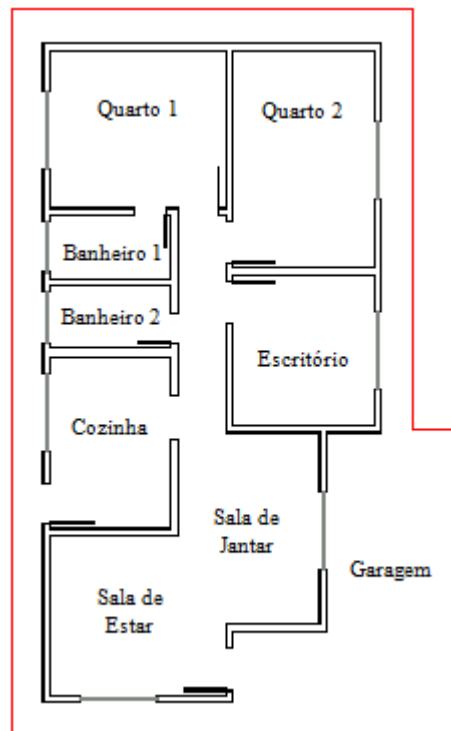


Figura 21: Residência padrão de 80m²

Agora, determina-se a potência necessária em cada cômodo. Inicia-se o cálculo criando uma tabela de potências para iluminação e para tomadas de uso geral representados nas Tabelas (4) e (5).

Local	Área (m ²)	Perímetro (m)	Potência (VA)	No. de pontos
Dormitório 1	10,05	12,70	160	1
Banheiro 1	2,76	7,00	100	1
Dormitório 2	11,20	13,70	160	1
Banheiro 2	2,76	7,00	100	1
Escritório	7,69	11,10	100	1
Corredor	3,63	10,19	100	1
Sala de jantar	9,94	12,72	100	1
Sala de estar	8,72	12,73	100	1
Entrada	< 6,00	4	100	1
Cozinha	7,59	11,20	100	1
Área de serviço	< 6,00	4	100	1
Garagem	14,92	16,80	220	2

Tabela 4: Tabela de potência necessária para iluminação

Local	Área (m ²)	Perímetro (m)	Potência (VA)	No. de pontos
Dormitório 1	10,05	12,70	300	3
Banheiro 1	2,76	7,00	600	1
Dormitório 2	11,20	13,70	300	3
Banheiro 2	2,76	7,00	600	1
Escritório	7,69	11,10	300	3
Corredor	3,63	10,19	100	1
Sala de jantar	9,94	12,72	300	3
Sala de estar	8,72	12,73	300	3
Entrada	< 6,00	4	100	1
Cozinha	7,59	11,20	1800	3
			100	1
Área de serviço	< 6,00	4	600	1
Garagem	14,92	16,80	300	3

Tabela 5: Tabela de potência necessária para tomadas de uso geral

Apresenta-se em seguida uma tabela mostrando toda a potência necessária na residência, incluindo as tomadas de uso específico. Para o projeto em questão, não é levado em consideração os chuveiros elétricos, pois consomem muita potência, tornando o projeto inviável. É feita somente a consideração de uma máquina de lavar roupas.

Local	Área (m ²)	Perímetro (m)	Iluminação		TUG ^(a)		TUE ^(b)	
			S (VA)	Qdd	S (VA)	Qdd	S (VA)	Qdd
Dormitório 1	10,05	12,70	160	1	300	3		
Banheiro 1	2,76	7,00	100	1	600	1	4400	1 ^(c)
Dormitório 2	11,20	13,70	160	1	300	3		
Banheiro 2	2,76	7,00	100	1	600	1	4400	1 ^(c)
Escritório	7,69	11,10	100	1	300	3		
Corredor	3,63	10,19	100	1	100	1		
Sala de jantar	9,94	12,72	100	1	300	3		
Sala de estar	8,72	12,73	100	1	300	3		
Entrada	< 6,00	4	100	1	100	1		
Cozinha	7,59	11,20	100	1	1900	4		
Área de serviço	< 6,00	4	100	1	600	1	770	1 ^(d)
Garagem	14,92	16,80	220	2	300	3		
Potência Total (VA)			1440		5700		9570	

(a) TUG: tomada de uso geral;

(b) TUE: tomada de uso específico;

(c) Chuveiro elétrico: 4400W (FP = 1);

(d) Máquina de lavar roupas: 770 VA (FP = 0,8).

Tabela 6: Resumo das potências necessárias incluindo tomadas de uso específico

Na próxima etapa, calcula-se a demanda total de energia em Kw necessária na residência através da expressão (11):

$$D = \{[(S_{ilum} \times FP_{ilum}) + (S_{TUG} \times FP_{TUG})] \times d\} + \sum (S_{TUE} \times FP_{TUE} \times d) \quad (11)$$

Atribuindo valores, temos:

$$D = \{[(1440 \times 1) + (5700 \times 0,8)] \times 0,45\} + (770 \times 0,8)$$

$$D = 3316 \text{ W} = 3,31 \text{ kW}$$

Com esse valor de demanda é feito o dimensionamento das diferentes placas solares necessárias para suprir essa demanda.

4.1 Utilização de um painel solar comum de silício

É feita a pesquisa de algumas placas solares do mercado, para ver quantas placas são necessárias para atingir essa demanda de energia e qual o capital gasto. Para isso, usa-se o modelo 210GX-LPU de placa solar da Kyocera representado na Figura (22).

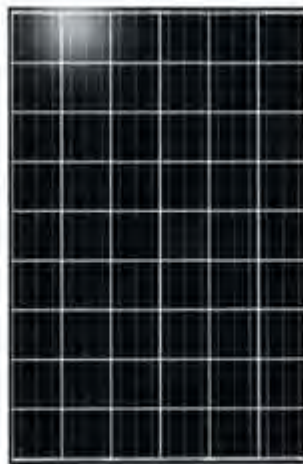


Figura 22: Placa Solar 210GX-LPU Kyocera
 fonte(<http://www.brazilhobby.com.br/descricao.asp?CodProd=KD210GXLPU>)

Esta placa tem como características:

- Potência Máxima: 210 W
- Máxima tensão do sistema: 600 V
- Tensão de máxima potência: 26,6 Volts
- Corrente de máxima potência: 7,90 A

- Tensão de circuito aberto: 33,2 Volts
- Corrente de curto circuito: 8,58 A
- Eficiência: em torno de 16%
- Altura: 1500 mm
- Largura: 990 mm
- Espessura: 36 mm
- Peso: 18,5 Kg
- Preço: R\$ 2400,00

De acordo com as especificações calcula-se quantas placas são necessárias para atender a demanda da residência, que no caso deverá ser:

$$\text{Número de placas} = 3316 / 210 = 16 \text{ placas}$$

$$16 \times 2400 = \text{R\$ } 38.400,00$$

Observa-se o alto custo de aquisição das placas, mesmo para aplicações pequenas.

4.2 Utilização de um Painel Solar DSC

Decidiu-se utilizar o painel solar de DSC da empresa Acrosol representado na Figura (23) que apresenta as seguintes especificações técnicas:

- Potência Máxima: 80 W
- Tensão Máxima: 33,6 V
- Corrente Máxima: 1,376 A
- Tensão de Circuito Aberto: 48 V
- Eficiência da Célula: 5,9 %
- Tamanho da Célula: 295 x 300 x 4,5 mm
- Preço: R\$ 480,00



Figura 23: Paine Solar de DSC Acrosol

fonte(Catálogo [http://www.acrosol.com/en/images/User%20manual\(ADM-4035\).pdf](http://www.acrosol.com/en/images/User%20manual(ADM-4035).pdf))

De acordo com as especificações técnicas, calcula-se o número de placas necessárias para suprir a demanda requerida:

$$\text{Número de placas} = 3316 / 80 = 42 \text{ placas}$$

$$42 \times 480 = \text{R\$ } 20.160,00$$

4.3 Conclusões sobre o Estudo de Caso

Duas situações diferentes foram testadas. Cada caso possui a sua peculiaridade, vantagens e desvantagens. Ao usar placas fotovoltaicas de silício necessita-se somente de 16 placas, porém o custo de implementação gira em torno de R\$ 38.400,00. Ao usar placas de DSC, necessita-se de 42 placas, mas é muito mais econômico, girando em torno de R\$ 20.160,00. O primeiro caso utiliza menor número de placas solares, necessitando de uma menor área de implementação, enquanto que no segundo caso, necessita-se de uma grande área de implementação devido ao grande número de placas necessárias. Não pode-se definir qual o melhor caso entre os dois, isso depende da área disponível do local a ser instalado. Se existe área disponível para implementação de placas fotovoltaicas DSC, essa opção é mais viável devido ao preço menor.

5. CENÁRIO ECONÔMICO COMPARATIVO

Conforme a US Energy Information Administration (EIA-2009), a energia solar deverá gerar ao redor de 1% da necessidade global de energia até 2020 devido ao seu alto custo de US\$ 0,20/KWh contra:

-Carvão (sem credito de carbono): US\$ 0,06/KWh

-Hidroelétrica: US\$ 0,06/KWh

-Nuclear (sem multa de resíduo radioativo): US\$ 0,06/KWh

-Gas (sem credito de carbono): US\$ 0,08/KWh

-Eólica: US\$ 0,15/KWh

Foi constatado também que somente 1% da energia gerada deverá ser solar. Mesmo com esta capacidade de 1%, isto requer um crescimento anual de 4% em termos de geração de energia solar de 2010 a 2020, ou seja uma potência instalada de 4,5 GW por ano. A maioria desta capacidade tem sido implementada na Europa.

Os custos dos créditos de carbono ou resíduos tóxicos deverão aumentar a competitividade da energia solar. O governo alemão tem subsidiado uma tarifa de US\$ 0,10 a 0,20/KWh a fim de estimular o aumento de energia com baixo nível de carbono. Estas tarifas serão aplicadas a partir de Abril/2010 e são 17% abaixo da anterior.

O US government sustainable energy body (NREL) estima que os custos de algumas das energias solares abaxem para menos de US\$ 0,10/KWh e a aplicação em larga escala das DCS's deverá ficar em US\$ 0,10/KWh. Este é um custo muito competitivo em relação a carvão, gás e nuclear em regiões remotas com alto custo da transmissão de energia elétrica.

A Figura (21) relata a eficiências das diferentes tecnologias de células fotovoltaicas e a sua evolução com o avanço dos anos.

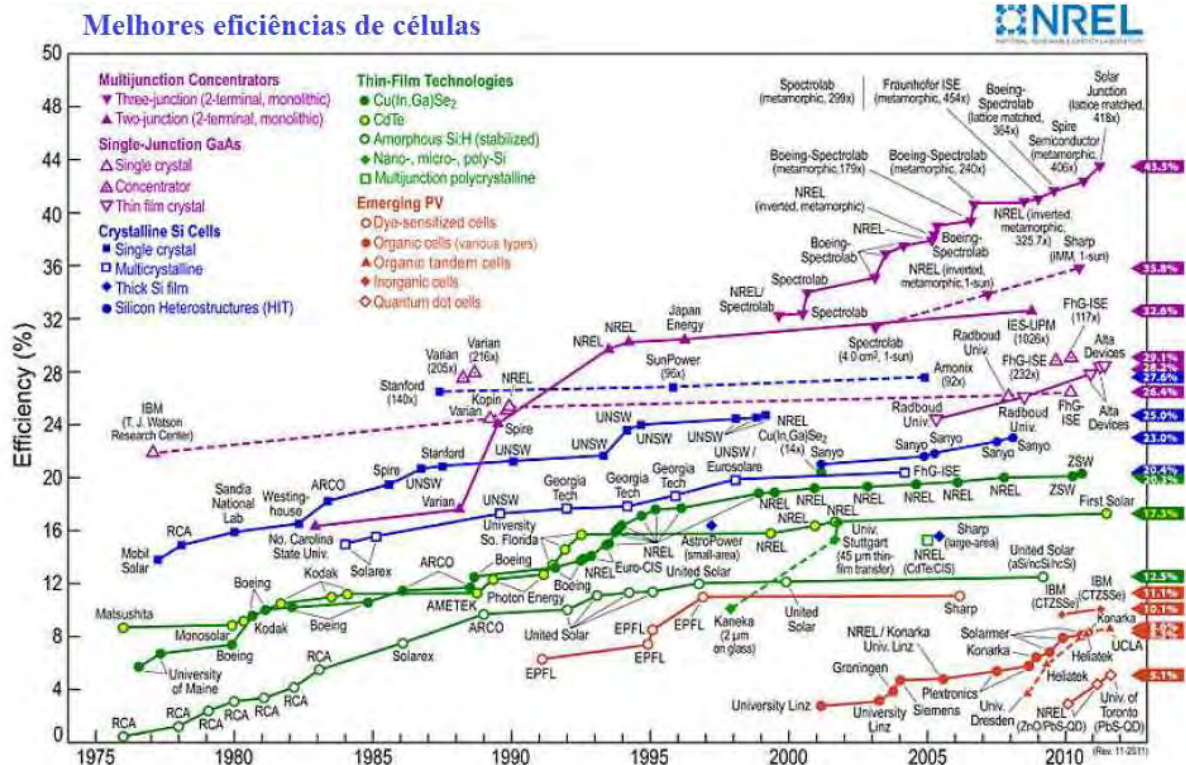


Figura 24 : Gráfico comparativo das diferentes tecnologias de célula voltaica e sua eficiência
 fonte(upload.wikimedia.org_wikipedia_commons_thumb_d_d0_PVeff%)

Observa-se que a célula com maior eficiência atualmente no mercado são as células de concentradores de multijunção (transistores), no caso as células DSC e orgânicas possuem o menor rendimento. Porém esse não é o fator decisivo para saber qual a melhor célula no parâmetro atual, pois apesar de as células de transistores apresentarem maior rendimento, o seu preço chega a ser US\$ 0,20/KWh, enquanto que as células DSC chegam a custar US\$ 0,04/KWh

6.CONCLUSÕES

É constatado com esse trabalho que o parâmetro atual da demanda de energia, busca cada vez mais por energias renováveis. Apesar da energia não renovável ser a mais utilizada hoje em dia, existem buscas pelo uso de energias renováveis. Uma forma de se obter energia renovável foca no estudo das células fotovoltaicas DSC. São comentado as vantagens e desvantagens da célula de transistores de silício. As células de transistores de silício tem rendimento médio de 16% e algumas podem chegar a 28%, enquanto que as células DSC tem rendimento médio de 5%, com o custo 80% menor. Como aplicação prática das células fotovoltaicas tem-se os painéis solares que no caso são um conjunto de células. Ao contrário do que muitos pensam, a geração de energia não se dá pela exposição ao calor, mas sim pela exposição a luz solar, sendo que elas funcionam mesmo sob o tempo nublado. Podemos citar muitas vantagens sobre o uso da energia solar, como sendo não poluente e baixo custo de manutenção e como desvantagens tem-se que o seu preço é ainda consideravelmente alto quando comparados a outras formas de energia e extremamente dependente do clima.

Propõe-se também um modelo caseiro de uma célula solar criada a partir de transistores para uma demonstração experimental. Nesse caso, verifica-se que com o aumento da potência, aumenta-se expressivamente a corrente, porém com esse aumento da corrente, mostra uma tendência a saturação. O caso fica explícito nas curvas mostradas anteriormente. Através das fórmulas apresentadas obtive-se um $V_m=0,404$ V e a corrente máxima $I_m=0,031$ A, dessa forma consegue-se calcular a potências média, de 12 mW. Este são valores consideráveis para uma célula solar. Com essa corrente obtida, pode-se movimentar um pequeno motor. Apesar disso, o valor gerado por uma única célula é pequeno ainda, mas nada impede a associação de várias células para gerarmos maior tensão e corrente.

A tecnologia DSC como dito anteriormente baseia-se em Óxido de titânio, componente usado no preparo das tintas brancas de parede. Foi desenvolvida pelo professor Michael Grätzel do instituto Federal de Tecnologia da Suíça. Depois da montagem de uma célula DSC caseira, foi feito uma tabela comparativa de valores gerados de tensão e corrente para diferentes cargas de resistência aplicadas, sendo que pode-se observar que quanto maior a resistência aplicada, menor é a corrente gerada e maior a tensão gerada. Com esses valores, consegue-se determinar também a potência gerada pela célula. Foram feitos outros estudos sobre esse tipo de célula, sendo o Teste de Ciclo de Calor e o teste de imersão de luz. O teste de ciclo de calor consistiu em variar a temperatura da célula por 200 ciclos e observar o seu

comportamento. Observa-se que após duzentos ciclos, o seu rendimento caiu somente em torno de 20%, que no caso sugere uma grande estabilidade da célula. No teste de imersão de luz, usa-se a radiação total do sol sob a célula e verifica-se a que momento a eficiência começava a diminuir, no caso após duzentas horas observa-se uma perda na eficiência. Porém, esse efeito conseguiu ser driblado pelo acoplamento de um filtro UV sob a superfície do DSC. Mesmo após mil horas após o acoplamento do filtro sob o mesmo teste, não foi constatado nenhuma perda na eficiência.

No estudo de caso, compara-se a eficiência e preço de dois tipos diferentes de placas solares, as placas de silício e as placas DSC. Constata-se o alto valor de implementação para placas de silício em uma residência padrão, mas ocupando uma área menor, enquanto que no caso das placas de DSC, o preço é reduzido drasticamente, porém ocupa-se uma área para instalação das placas praticamente o dobro das placas de silício.

Após ser comparado os preços das várias formas de geração de energia, constata-se que o carvão, hidroelétrica e nuclear ainda são as formas mais econômicas de geração, porém futuramente, estima-se que o custo das tecnologias solares diminuam para pelo menos US\$ 0,10 /kWh, o que tornara a tecnologia muito competitiva no mercado.

7.REFERÊNCIAS

[http://www.acrosol.com/en/images/User%20manual\(ADM-4035\).pdf](http://www.acrosol.com/en/images/User%20manual(ADM-4035).pdf)

AUSTOCK Securities DYESOL LTD de 12/04/2010

Azevedo, M.; Cunha, A. *Célula Fotovoltaica*. Departamento de Física de Aveiro, Physics on Stage. Sem data.

<http://www.brasilhobby.com.br/descricao.asp?CodProd=KD210GXLPU>

Desilvestro, J.; Grätzel, M.; Kavan, L.; Moser, J.; Augustynski, J. *J. Am. Chem. Soc.* **1985**, 107, 2988-2990.

Doherty, R.; Riley, D.J. *Preparation, Characterisation and Photoelectrochemistry of CdSe Nanocrystals: A potencial Grätzel Cellsensitizer*. 208th ECS Meeting, Abstract #877.

Drachman, P. *Third-Gen.Thin-Film Solar Technologies: Forecasting the future of Dye-Sensitized and Organic PV*.GTM Research, **2008**.

Fujishima, A.; Honda, K. *Nature* ,**1972**, 238, 37-38.

Gerischer, H.; Willig, F. *Top. Curr. Chem*, **1976**, 61,31.

Grätzel, M.; McEvoy, A.J. *Principles and Applications of Dye Sensitized Nanocrystalline Solar Cells (DSC)*. Int'l PVSEC -14.

Grätzel, M. *Dye-sensitized solar cells*. *Journal of Photochemistry* **2003**, 145-153.

3rd International Conference on the industrialisation of Dye Solar Cells DSC-IC 09
<http://www.dsc-ic.com/index.php> **2009**

Koishi, Y.; Yamaguchi, T.; Arakawa,H. *Study on Long-Term Stability of Dye-Sensitized Cell using N719 Dye*. **2006**,

Memming, R. *Semiconductor Electrochemistry*, Wiley- VCH Verlag GmbH, Weinheim **2001**.

Menezes, S.; Li, Y.; Menezes, S.J.; Kodigala, S. R.; Shaikh, S.S. *Electrodeposited ordered Defect Chalcopyrite CIS absorbers for Flexible Solar Cells*. 208th ECS Meeting, Abstract #880.

Miyasaka, T.; Ikegami, M. *Dye-Sensitized Photoelectric conversion element*. EP 2 276 103 A1, **2011**.

Miyasaka, T.; Murakami, T. *Photochargeable layered capacitor comprising photovoltaic electrode unit and layered capacitor unit*. EP 1 727 167 A2, **2006**.

Miyasaka, T.; Kijitori, Y. *Fabrication of large area full-plastic dye-sensitized photovoltaic cells using the low-temperature binder-free TiO₂ coating paste*. 208th ECS Meeting, Abstract #874.

Nair, P.K.; Nair, M.T.S.; Avellaneda, D.; Messina, S.; Delgado, G.; Campos, J.; Sanchez, A. *Chemically deposited solar cells – an initiative toward a simpler technology*. 208th ECS Meeting, Abstract #882.

Ngamsinlapasathian, S.; Kitiyanan, A.; Fujieda, T.; Susuki, Y.; Yoshikawa, S. *Effects of substrates on dye-sensitized solar cell performance using nanocrystalline titania*. 208th ECS Meeting, Abstract #873.

O'Regan, B.; Grätzel, M. *A low-cost, high efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ film*. *Nature* **1991**, 353, 737-740.

Peccell Technologies, Inc. Products Information. Catalog.

Qiao, Q.; Beck, J.; McLeskey Jr, J.. *Optimization of photovoltaic devices from layered PTEBS and nonocrystalline TiO₂*. 208th ECS Meeting, Abstract #872.

Rütler, R. *Edifícios Solares Fotovoltaicos* - UFSC **2004**, 08-10.

<http://pt.scribd.com/doc/36646755/Energia-Solar-Fotovoltaica-Relatorio-TCC>

http://www.solenerg.com.br/figuras/monografia_pedrobrasil.pdf

Silva, R.; Chiquito, A. J.; Souza, M. G.; Macedo, R. P. *Celulas Solares “caseiras”*. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 26, n. 4, p. 379-384. **2004**.

Teshima, K.; Murakami, T.; Miyasaka, T. *High Voltage photocapacitor with a three-electrode configuration based on a dye-sensitized mesoporous TiO₂ photoelectrode*. 208th ECS Meeting, Abstract #870.

Tsubomura, H.; Matsumura, M.; Nomura, Y.; Amamiya, T. *Nature* **1976**, 261, 402-403.

http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_solar

http://pt.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9lula_fotoel%C3%A9trica

http://pt.wikipedia.org/wiki/Usina_solar

Valera M. Antônio 2006 *Meio século de história fotovoltaica*. **2006**