

CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO SANTO ANDRÉ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENAÇÃO DE PESQUISA

**PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO
CIENTÍFICA – PIBIC CNPq**

RELATÓRIO FINAL
(2014 – 2015)

TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA:
Eficiência na conversão de radiação solar em energia elétrica

TÍTULO DO PLANO DE TRABALHO INDIVIDUAL E DIFERENCIADO:
Estudo de Células Solares a Base de Silício

NOME DO BOLSISTA: David Berto Farias
Data de ingresso como bolsista do CNPq: 01/07/2014
Curso: Engenharia Eletrônica
Período: 4º período
É bolsista de renovação? Sim

NOME DO ORIENTADOR: Mário Gonçalves Garcia Junior

RESUMO

A procura por fontes de energia alternativa está sendo intensificadas a fim de suprir a crescente demanda mundial por energia. Levando em consideração do fator ambiental, fontes renováveis são as mais adequadas, tendo em vista a manutenção do planeta como um todo. A maioria das pesquisas estão concentradas em energia eólica, energia geotérmica e energia solar.

Tendo em vista que o sol é uma grande fonte de energia em forma de radiação, o sistema de conversão de energia solar provém de uma fonte praticamente inesgotável, que pode uma gama de vantagens levando em consideração as fontes não renováveis, como por exemplo as hidrelétricas, que necessitam que uma fonte de água com energia potencial, que é escassa na maioria das regiões, e, por mais que a radiação solar atinja a Terra com maior intensidade em algumas regiões, ainda sim está presente por todo o globo. Há também vantagens em relação a outros sistemas de energia renovável, apresentando possibilidade de dispensa vários tipos de manutenção, como por exemplo desgaste de peças por esforço mecânico, ruídos sonoros, controles de qualidade de energia mais elaborados, cuidado com vazamentos, etc, as quais são preocupações constantes dos sistemas eólicos e geotérmicos.

Com este estudo, é possível analisar a viabilidade de sistemas fotovoltaicos com as células solares hoje fornecidas pelo mercado para utilização como fontes de energia, podendo, assim, diminuir custos de utilização de eletricidade, as quais são atualmente responsáveis pelo abastecimento de casas e indústrias.

Palavras chave: energias renováveis, fotovoltaico, células solares.

INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais, com o a poluição e o chamado efeito estufa, a busca por fontes renováveis e com o mínimo de agressão ao meio ambiente têm sido foco de diversas pesquisas. O Sol é fonte inesgotável de energia “limpa”, ou seja, desprovida de emissão de poluentes, devido à radiação emitida que contém diversas faixas de frequência, podendo ser convertida em energia. Parte dessa radiação solar, que atinge a Terra, pode ser utilizada de diversas maneiras, inclusive transformação em energias alternativas como térmica, luminosa, elétrica, etc. Com a tecnologia atual, converter energia solar em energia elétrica é uma atividade relativamente cara e de pouca eficiência em comparação as outras formas de conversão de energia utilizadas. Os dispositivos utilizados para converter energia solar em energia elétrica são as chamadas Células Fotovoltaicas (células solares), e o principal elemento utilizado é o Silício, segundo elemento mais abundante da natureza (atrás somente do Oxigênio), que é encontrado em diversos materiais e compostos, dentre eles o quartzo, que no Brasil é extremamente abundante. Porém, para utilização como células fotovoltaicas, é necessário um grau de pureza extremamente elevado fazendo com que o processo de fabricação tenha custo elevado.

Neste trabalho, será mostrado o conceito fundamental de células fotovoltaicas como se dá o funcionamento, desde sua estrutura molecular até sistemas de utilização de painéis solares para aplicação de fornecimento de energia renovável; a parametrização elétrica de células de material inorgânico; montagem de um simulador solar para teste de conjuntos de células para continuação deste trabalho.

OBJETIVO

GERAL:

Ampliar a gama de conhecimentos sobre o comportamento de células solares na produção de energia elétrica renovável.

ESPECIFICOS:

- 1) Coletar dados ambientais para preparação de testes mais próximos à realidade;
- 2) Coletar dados dos parâmetros das células solares através de ensaios de performance;
- 3) Entender o conceito de conversão da radiação solar em eletricidade;
- 4) Estudar a viabilidade de utilização de células solares como fonte de energia renovável;
- 5) Pesquisar de novas tecnologia que possam viabilizar a utilização de células solares como fonte de energia alternativa.
- 6) Elaboração de manual de operação do Simulador Solar.

METODOLOGIA

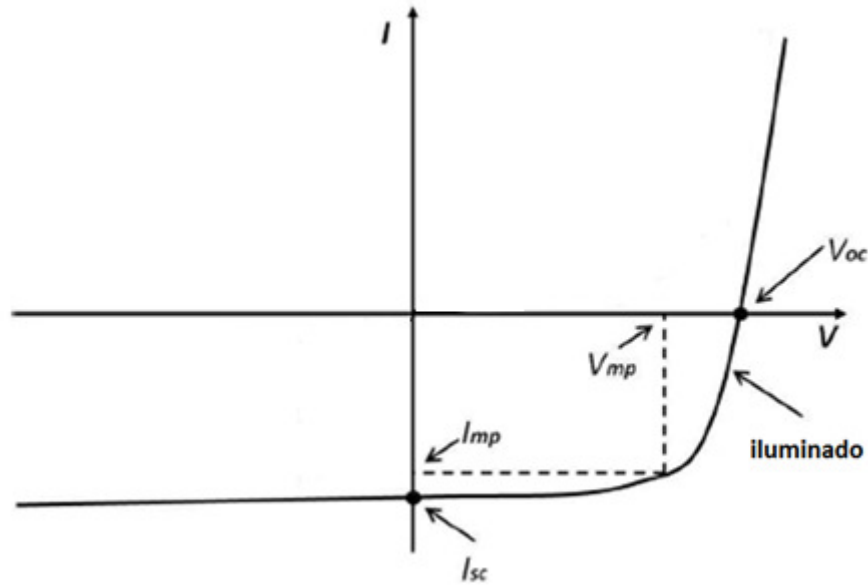
No processo de teste de parâmetros de saída, o objetivo principal é calcular a eficiência de conversão de energia do fóton para energia elétrica. Todos os parâmetros necessários para este teste serão plotados em um gráfico IxV, onde serão interpretados a fim de se obter a resposta da célula solar em operação.

Projeto da estrutura do diodo para medição da corrente de curto circuito, reduzindo a corrente de saturação e aumentando a capacidade de absorção da luminosidade, podendo assim aumentar a eficiência do dispositivo em gerar pares elétron lacuna (G).

Internacionalmente, o órgão que se prontifica de parametrizar as células solar se chama ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Este teste é baseado no método E948-09 do órgão metrológico ASTM, que consta em aplicar radiação luminosa com intensidade controlada nas amostras, a fim de traçar a curva IxV, possibilitando a extração dos parâmetros necessário para caracterizar a eficiência de uma célula solar.

Espera-se obter uma curva IxV com semelhante ao gráfico da figura abaixo



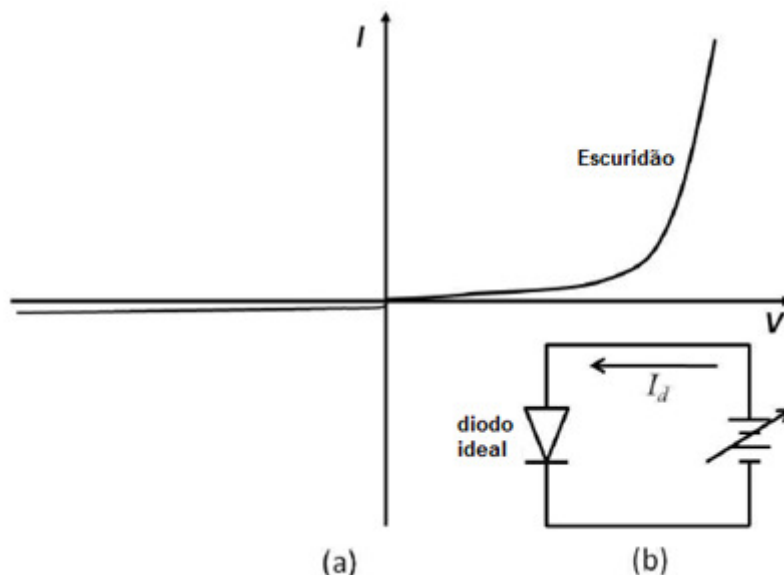
Curva IxV

A intensidade luminosa que foi aplicada nas amostras provém de um simulador de luz solar, que, através de uma lâmpada de xenônio, produz uma luz com espectro semelhante ao do Sol, cuja intensidade é regulada através de um potenciômetro no próprio equipamento. Com o simulador de luz solar, foi possível simular diversos níveis de espectro, a fim de observar qual faixa de frequência é a mais indicada.

Para o teste de rendimento por comprimento de onda e intensidade de radiação solar, foi utilizada a máquina de teste PV CELL TESTING SOLAR SIMULATORS modelo 16S-300-002.

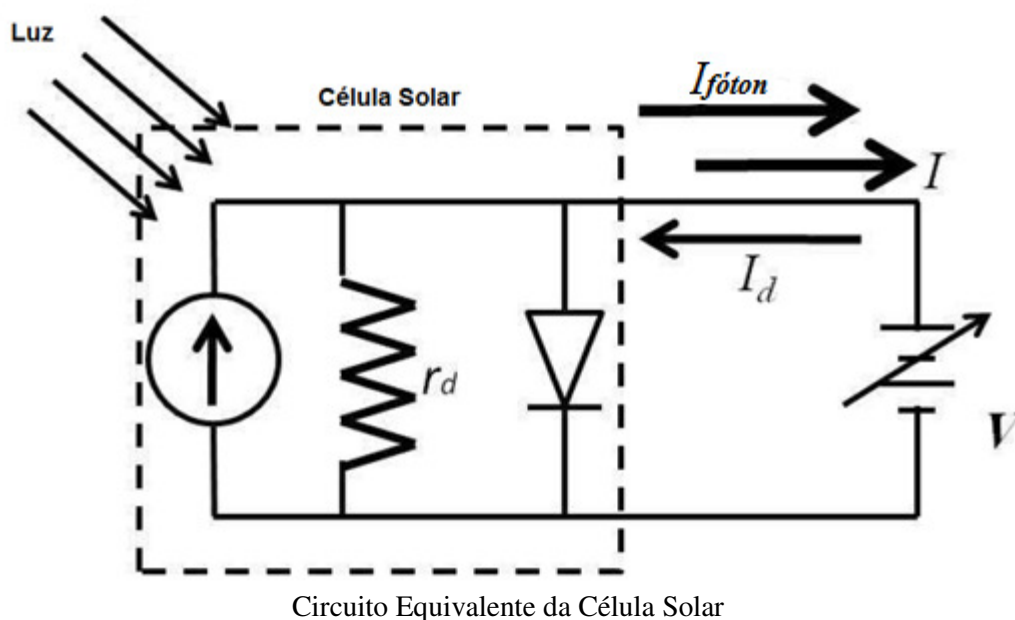
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para entender o a analisar a performance de uma célula solar, é necessário o entendimento do conceito de um diodo ideal.



(a) Curva IxV do Diodo Ideal; (b) Ilustração de Circuito com Diodo Ideal

Se um diodo ideal é projetado como célula solar, quando iluminado pela luz do sol, haverá uma conversão de energia do fóton para eletricidade.



No gráfico abaixo, estão mostrados os quatro principais parâmetros de saída que devem ser considerados em uma célula solar. O primeiro parâmetro é a I_{sc} que é a corrente se curto

circuito de saída, que é medida quando os terminais de saída estão unidos sem carga e, conseqüentemente a tensão é 0V.

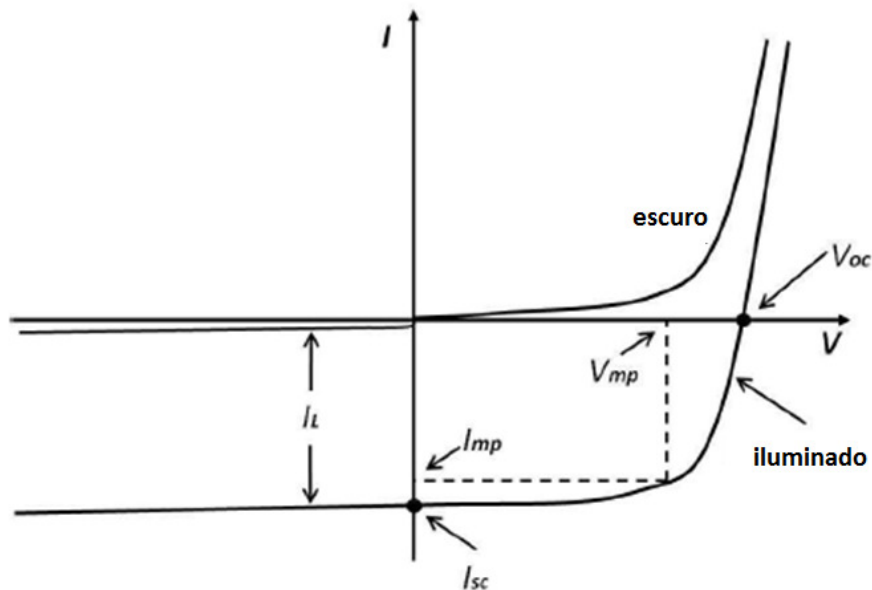


Gráfico IxV Ilustrado com os Parâmetros Identificados

O valor da corrente de saída é $I = I_{sc} = I_{fóton}$ determina a corrente máxima que pode passar pela célula solar com certo nível de iluminação. O segundo parâmetro é a V_{oc} , que simboliza a tensão de circuito aberto da célula solar, que é medido quando os terminais estão separados sem nenhuma carga e a Corrente é igual a 0A. esse valor determina o máximo de tensão que a célula pode fornecer quando submetida a um certo nível de luminosidade:

$$V_{oc} = \frac{k_b T}{q} \ln \left(\frac{I_{fóton}}{I_0} + 1 \right)$$

De modo geral, a tensão de circuito aberto é determinada pela corrente do fóton, a corrente de saturação e a temperatura, onde a corrente de saturação depende da estrutura e do material de fabricação da célula, enquanto a corrente do fóton depende, além da estrutura e tipo de material, da intensidade luminosa.

O máximo de potência de saída é representada pela área formada pelos parâmetros V_{MP} e I_{MP} , como o máximo de área possível do quarto quadrante.

$$P_{MP} = V_{MP} \cdot I_{MP}$$

O terceiro parâmetro é o fator de campo FF que representa a relação entre o produto V_{OC} e I_{SC} e P_{MP} .

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{V_{MP} \cdot I_{MP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$$

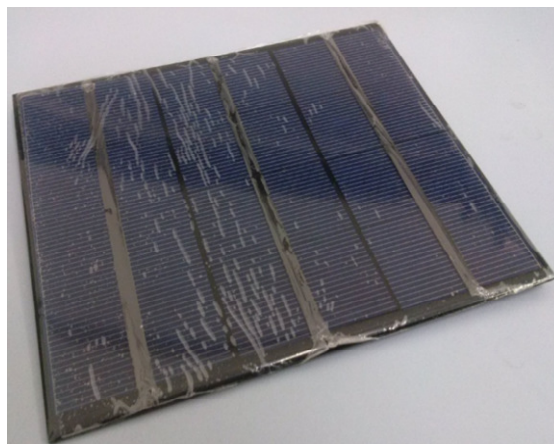
No caso da célula solar de eficiência suficiente, de modo geral, o fator de campo está entre 0,7 e 0,85.

A eficiência da conversão de energia, η é o quarto parâmetro:

$$\eta = \frac{V_{MP} \cdot I_{MP}}{P_{in}} = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{P_{in}}$$

Onde P_{in} é a potência total de entrada da célula. A eficiência de conversão de energia das células comerciais estão em torno de 12 a 14%.

A amostra utilizada é constituída de Silício Policristalino com potência nominal de 3,5W e tensão nominal de 6V



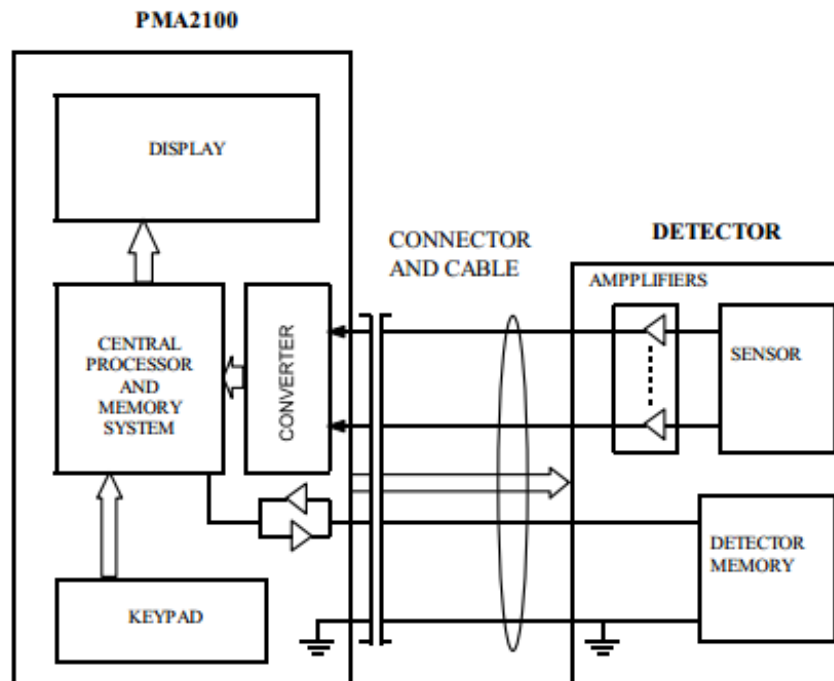
Amostra de célula solar de Silício Policristalino

Para o teste de performance, primeiramente foi necessário realizar a calibração da intensidade luminosa do simulador através dos seguintes materiais:



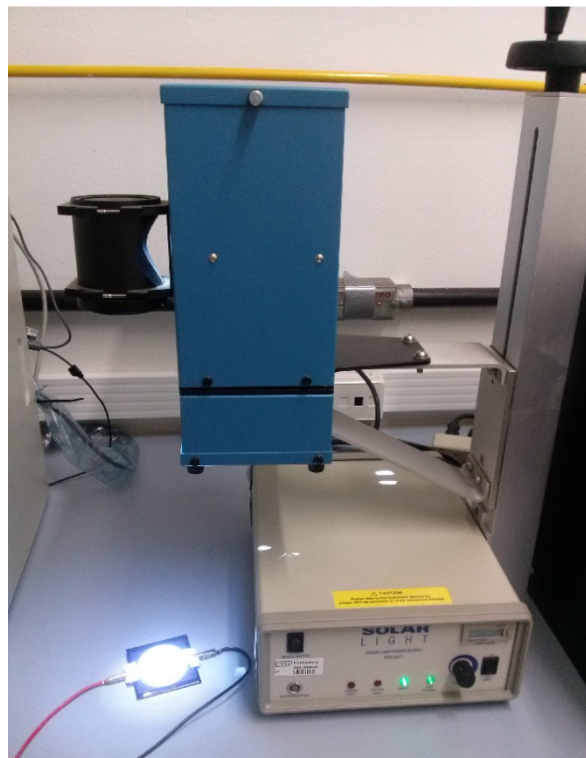
Sensor de Intensidade Luminosa PMA2144 e Radiômetro

O radiômetro é um aparelho que mede a potência de luz por área (W/cm^2), podendo também medir o quanto de potência luminosa foi irradiada num período de tempo.



Sistema de Medição de intensidade Luminosa

Utilizando do sensor PMA2144, foi possível calibrar a potência da luminosa do simulador de solar em W/m^2 a fim de ajustá-lo com uma intensidade luminoso fixa e estável. Para simular a luz solar foi utilizado o seguinte equipamento:



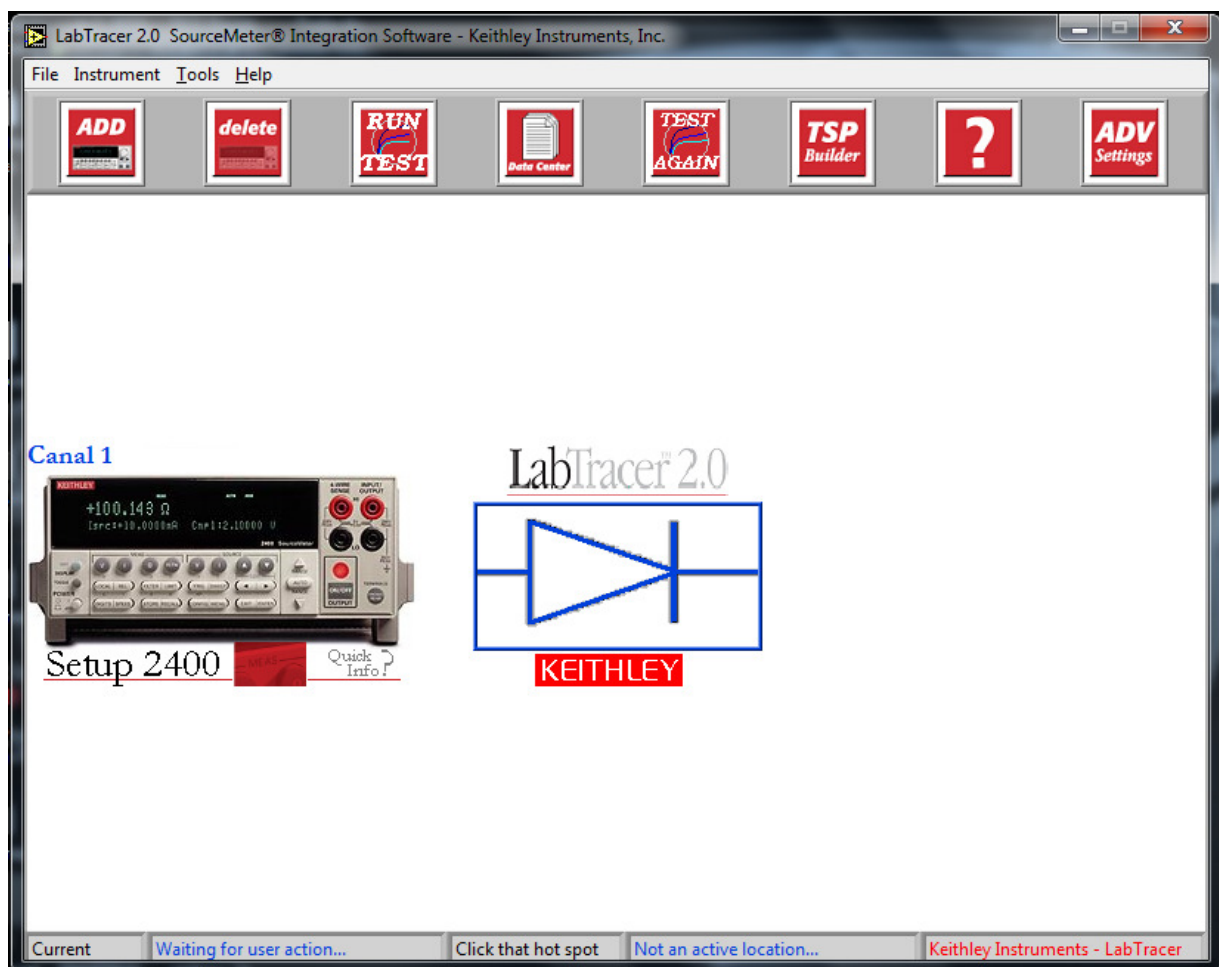
Simulador de Luz Solar

Para coleta dos dados foi utilizado o *SourceMeter* modelo 2400, onde foi conectada às amostras através de pontadas de prova de multímetros CATII.



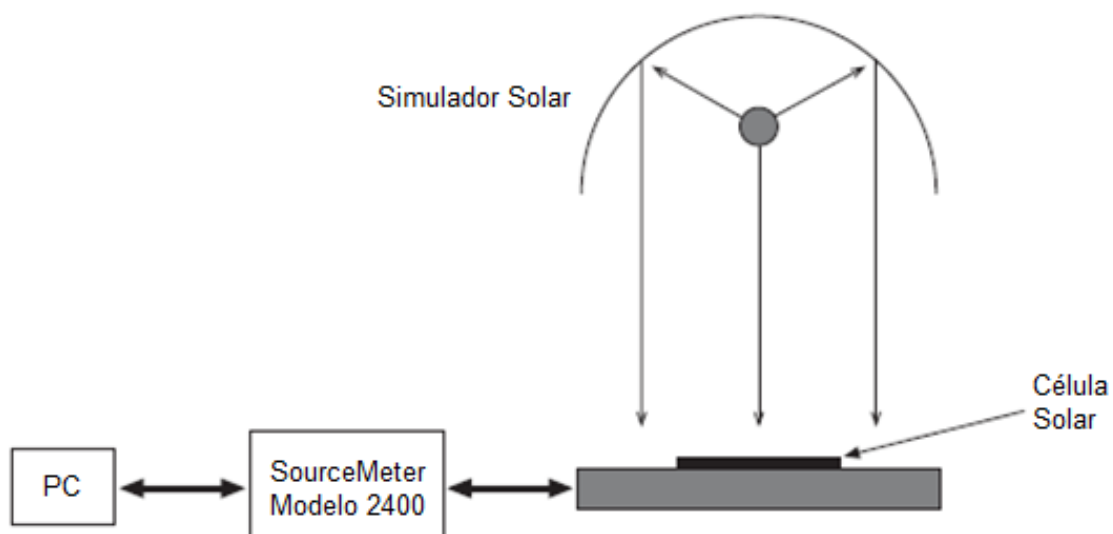
SourceMeter 2400

Os parâmetros foram processados e transferido através de uma conexão USB para interpretação do software LabTracer 2.0.



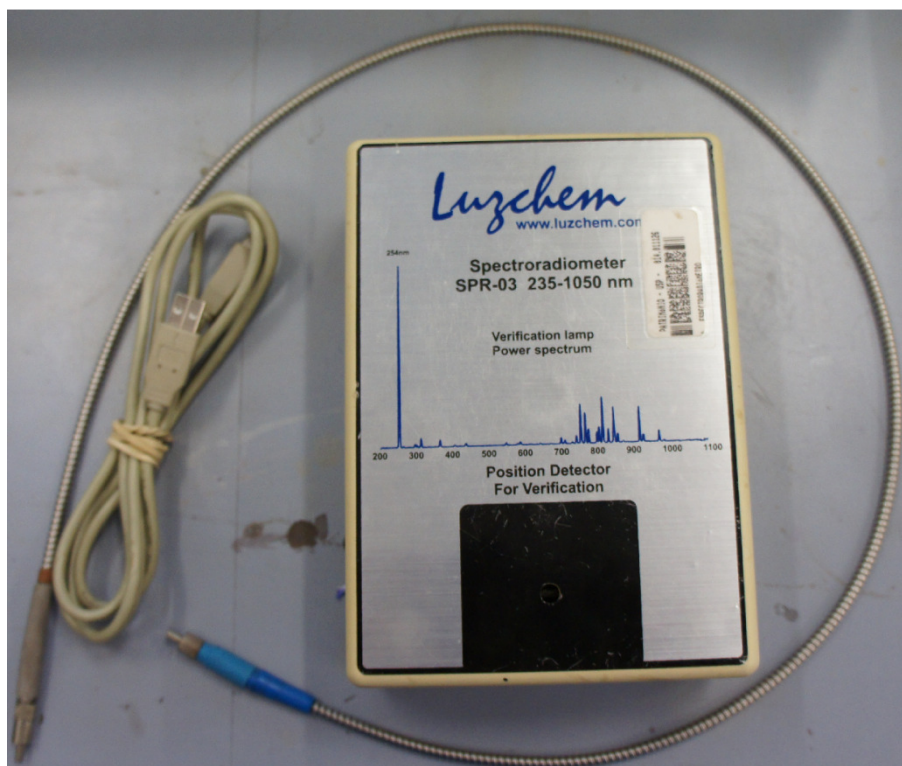
Software Lab Tracer 2.0

É importante ressaltar a importância do diodo no comportamento célula solar. Com o diodo, toda a energia da radiação solar é transferida para tensão positiva. Basicamente, o sistema de teste de rendimento está esquematizado conforme figura a seguir:



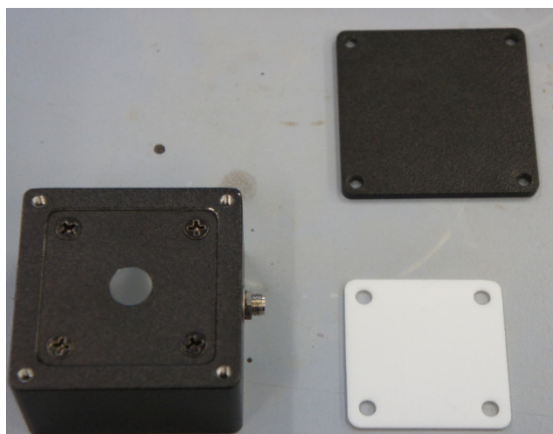
Sistema completo de coleta de parâmetros

Para configurar a o espectro do simulador, é necessário medir a luz proveniente do sol a fim de obter resultados mais próximos da prática. Com um espectralradiômetro, é possível coletar um espectro exato tanto da luz do sol como da luz do simulador solar.



Espectralradiômetro

Com estes dados, será possível calibrar a o simulador de luz solar, a fim de se obter um espectro com valores mais próximos possíveis das condições reais de operação.

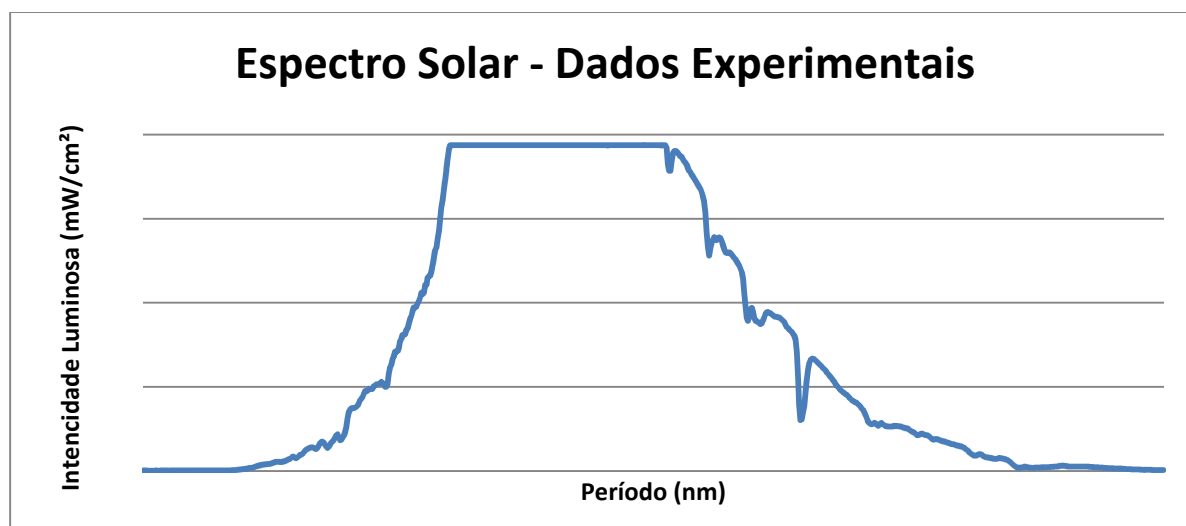


Esfera e Atenuador do Sistema do Espectroradiômetro

No cubo indicado na figura acima, há uma esfera em que, pela pequena abertura, capta o máximo de luz. Através de um cabo de fibra ótica, transfere os dados coletados para o espectroradiômetro que processa os dados e os envia para o computador através de um cabo USB.

Experimentalmente, foi observado que o mínimo de intensidade observada no simulador solar foi de $31\text{mW}/\text{cm}^2$ e o máximo foi de $204\text{mW}/\text{cm}^2$. A luminosidade ambiente está em torno de $6\text{mW}/\text{cm}^2$, que seria desprezível em relação aos valores utilizados nos testes.

Para efeito de comparação com o mais próximo do espectro solar, com um espectroradiômetro, que nada mais é que um medidor de espectro luminoso, a luz do sol por volta das 15:00 em alguns dias de 02/2015 com média de $512\text{W}/\text{m}^2$. O simulador de luz solar foi ajustado para obter estes mesmo parâmetros:

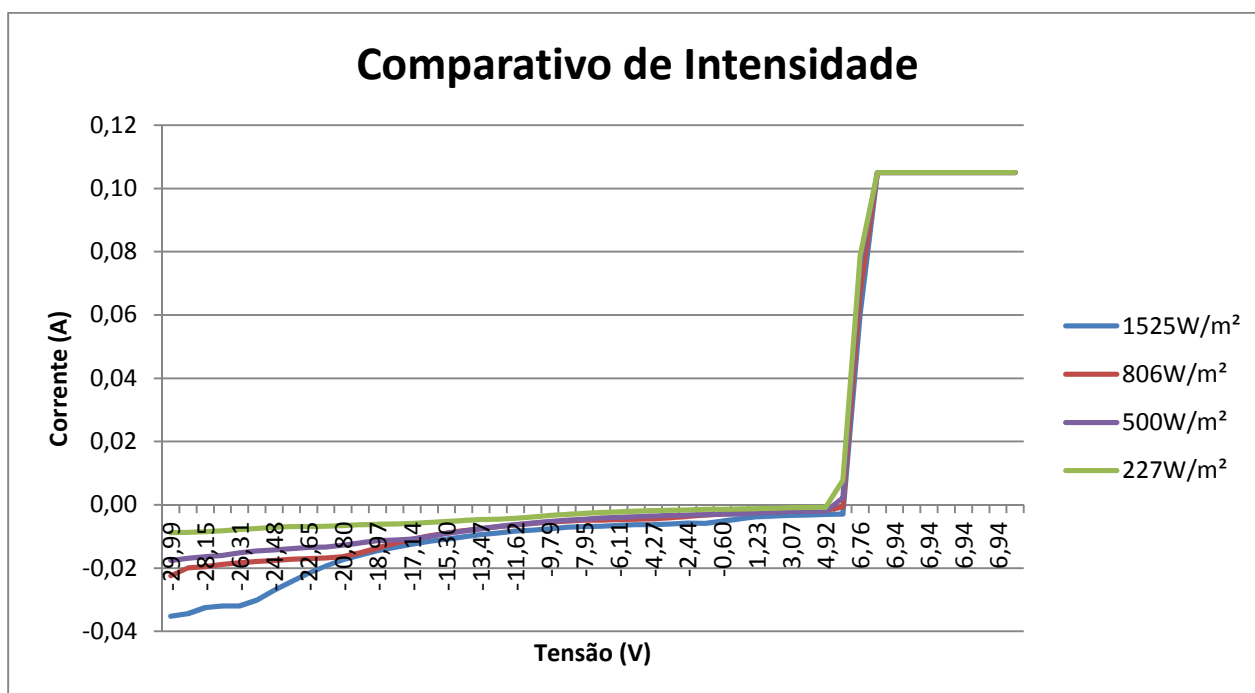


É possível observar que onde há o pico de intensidade luminosa há um valor constante por um certo período. Esse dado se dá pela limitação na leitura no instrumento, pois a intensidade luminosa nessa faixa de comprimento ultrapassa a escala máxima do instrumento.

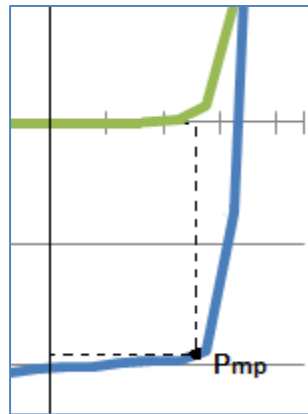
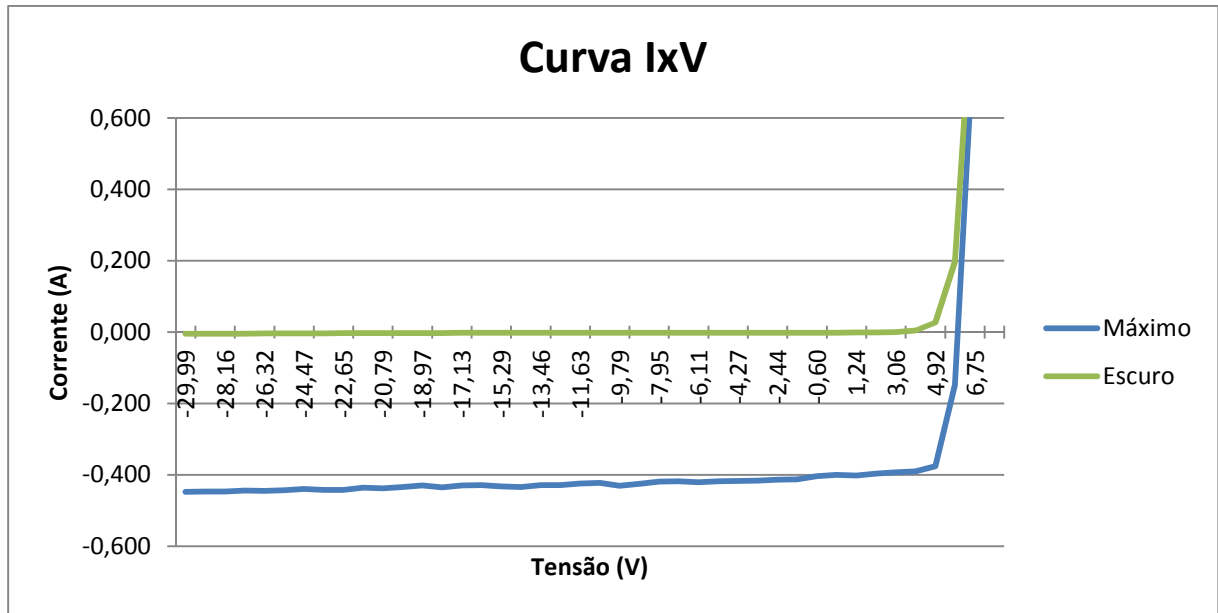


Após ajustes no simulador solar, o espectro que mais se aproxima do real é o do gráfico acima.

Ao estar com diversos níveis de intensidade, obteve-se o seguinte gráfico:



Na obtenção da curva $I \times V$ abaixo, foi utilizado intensidade luminosa de $2100 \text{W}/\text{m}^2$:



O ponto P indicado acima foi definido como ponte de potência média P(4,71;-0,345).

Calculando sua eficiência temos:

$$V_{mp}=4,71V; I_{mp}=0,345A$$

$$V_{oc}=6,0V; I_{sc}=0,400A$$

$$P_{mp}=1,6W$$

Com a área luminosa de 0,0032m²:

$$P_{IN} = 2100 * 0,0032 = 6,72W$$

$$FF = \frac{1,6}{2,4} = 0,67; \eta = \frac{1,6}{6,72} = 24\%$$

Como o ambiente tinha temperatura controlada e intensidade além do normalmente utilizado, a potência de saída da célula solar foi além do nominal, assim como sua eficiência.

Após os testes na célula, foi elaborado um manual prático para utilização do sistema, possibilitando que outros usuários possam trabalhar com mais segurança e garantia dos resultados obtidos.

CONCLUSÃO

Hoje em dia, com os avanços na tecnologia e no conhecimento de física do estado sólido, é possível fabricar células solares e utiliza-las como forma de alimentação de energia renovável. Com a eficiência que se obtém nas células inorgânicas comerciais, o sonho de utilizar a luz do Sol para geração de eletricidade se tornou uma realidade. Por mais que, a grosso modo, 20% de eficiência pareça pouco, levando em consideração as perdas sofridas no caminho pela radiação solar de sua fonte até a atmosfera terrestre, já é um avanço significativo desde que se foi construída a primeira célula solar.

Por consequência da baixa eficiência enfrentada nesse tipo de tecnologia, em muitos casos ela não é utilizada por ter que se utilizar de uma quantidade significativa de células para se obter a potência desejada, o que eleva o custo dos projetos, necessita de uma grande área e a quantidade de períodos de manutenção. Extrair energia limpa num mundo globalizado atual que, em sua maioria, é dependente de alimentação por geração de energia não renovável, existe o desafio de descobrir e desenvolver outras formas de energia provenientes de fontes renováveis. Há intenção de continuar este estudo, a fim de aumentar a gama de possibilidades de fontes de energia renovável, que, no caso da tecnologia de obtenção de energia através da utilização da célula solar está pouco desenvolvida em relação as fontes de energia não renováveis.

A utilização da nanotecnologia é caminho trilhado pela maioria dos pesquisadores em tecnologia fotovoltaica, que abrange a utilização de novos tipos de matérias, diminuindo significativamente as perdas enfrentadas atualmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MEI, Paulo Roberto. **Purificação De Silício Metalúrgico Nacional Para Produção De Células Solares**. São Paulo: 2012
- GTES, Grupo de Trabalho de Energia Solar. **Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Edição Especial, 2004.
- BEMKI, George. **Semicondutores**. Washington DC: Editora Eva V.Chesneau, 1970.
- LUQUE, Antonio e HEGEDUS, Steven. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering** – Segunda Edição.
- KITTEL, Charles. **Introdução à Física do Estado Sólido** – Quinta Edição
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Quartzo**, Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7405>.
- KOSYACHENKO, Leonid A. - **Solar Cells - Silicon Wafer-Based Technologies**
- CLEMENS, Bruce. **Solar Cells, Fuel Cells and Batteries: Materials for the Energy Solution** - Autumn 2012 Course Information.
- **Manual Electrónica**. Disponível em: <<http://www.electronica-pt.com/mapas-radiacao-solar>>

PLANO DE TRABALHO SUBMETIDO

INDIVIDUAL E DIFERENCIADO DO BOLSISTA E /OU COLABORADOR TÍTULO DO PLANO DE TRABALHO: ESTUDO DE CÉLULAS SOLARES A BASE DE SILÍCIO

NOME: DAVID BERTO FARIAS

I - DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS DO TRABALHO DO ESTUDANTE:

GERAL: Ampliar a gama de conhecimentos sobre o comportamento de células solares na produção de energia elétrica renovável.

ESPECIFICOS:

- 1) Coletar dados ambientais para preparação de testes mais próximos à realidade;
- 2) Coletar dados dos parâmetros das células solares através de ensaios de performance;
- 3) Entender o conceito de conversão da radiação solar em eletricidade;
- 4) Estudar a viabilidade de utilização de células solares como fonte de energia renovável;
- 5) Pesquisar de novas tecnologia que possam viabilizar a utilização de células solares como fonte de energia alternativa.
- 6) Elaboração de manual de operação do Simulador Solar.

ETAPAS:

1 – **Estudos de teorias e referências:** Pesquisas e leitura de teorias e comportamento da radiação solar e da física de semicondutores.

2 – **Operação de equipamentos de medição:** entendimento de operação de equipamentos na medição de parâmetros elétricos e ambientais, e interpretação dos dados coletados.

3 – **Pesquisa de mercado:** pesquisa de matérias fornecidos pelo mercado para avaliação de viabilidade e performance de sistemas.

4 – **Análise de pesquisas atuais e fontes de energia elétrica:** Estudos de pesquisas atualmente em andamento sobre diversas fontes de alternativas de energia renováveis e não renováveis.

CRONOGRAMA DE ATIVIDADES SUBMETIDO

INDIVIDUAL E DIFERENCIADO DO BOLSISTA E /OU COLABORADOR

TÍTULO DO PLANO DE TRABALHO: ESTUDO DE CÉLULAS SOLARES A BASE DE SILÍCIO

NOME: DAVID BERTO FARIAS

ATIVIDADES	Meses												
	2014						2015						
	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	AGO
1 - Revisão Bibliográfica e Edição	■	■	■	■	■	■							
2 - Estudo Dimensional	■	■											
3 - Aquisição De Amostra		■	■	■									
4 - Operação dos Equipamentos de Teste			■	■	■	■		■					
5 - Teste de Rendimento Elétrico com Radiação Controlada						■	■	■	■				
6 - Coleta dos dados pertinentes								■	■	■	■		
7 - Produção de manual de Operação										■	■		
8 - Edição Final												■	■