

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS – EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TÁRSIS RODRIGUES PEREIRA

**Caixa para testes em painéis
fotovoltaicos**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado

São Carlos

2012

TÁRSIS RODRIGUES PEREIRA

**Caixa para testes em painéis
fotovoltaicos**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em Eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado

São Carlos

2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E
PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Atendimento ao Usuário do Serviço de Biblioteca
– EESC/USP

P436c Pereira, Társis Rodrigues
Caixa para testes em painéis fotovoltaicos /
Társis Rodrigues Pereira ; orientador Ricardo Quadros
Machado. São Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de
São Paulo, 2012.

1. Efeito fotovoltaico. 2. Lâmpadas. 3. Energia
solar. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Társis Rodrigues Pereira

Título: "Caixa para Testes em Painéis Fotovoltaicos"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 20 / 06 / 2012,

com NOTA 5,3 (Cinco, três), pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado (Orientador) - EESC/USP

M. Sc. Amílcar Flamarion Querubini Gonçalves - EESC/USP

Prof. Associado Homero Schiabel
Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica
EESC/USP

SUMÁRIO

SUMÁRIO	7
RESUMO	9
ABSTRACT	10
1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVO	12
3 PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO	12
3.1 EFEITO FOTOVOLTAICO	13
3.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DO GERADOR FOTOVOLTAICO	13
3.3 CURVA CARACTERÍSTICA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	14
3.4 EFEITO DE FATORES AMBIENTAIS SOBRE A CARACTERÍSTICA DO DISPOSITIVO	15
3.5 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO MÓDULO	16
4 ASPÉCTOS GERAIS SOBRE AS LÂMPADAS	16
4.1 A RADIAÇÃO SOLAR E A LUZ	16
4.2 LÂMPADAS INCANDESCENTES E FLUORESCENTES	17
5 PROJETO	20
5.1 OPÇÕES DE PROJETO	20
5.2 A CAIXA PARA TESTE	21
5.2.1 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS	21
5.2.2 PARÂMETROS DA CAIXA DE TESTE	22
5.2.3 DIAGRAMA ELÉTRICO	25
6 RESULTADOS	26
7 CONCLUSÃO	28
8 BIBLIOGRAFIA	29

INDÍCE DE FIGURAS

Figura 1.1 Número de patentes de seis fontes de energia até 2007. (Figura alterada. Fonte: <i>POLICIES TO ACCELERATE A LOW-CARBON TECHNOLOGY TRANSITION, capítulo 12, 2010</i>)	11
Figura 3.1 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica	14
Figura 3.2 - Curva de corrente x tensão para diversas intensidade de radiação solar (Imagen modificada - Fonte: CRESESB, 2006).....	14
Figura 3.3 - Uma célula fotovoltaica sob diversas condições de iluminação. (Imagen modificada - Fonte: PRIEB, 2002)	15
Figura 3.4 - Efeito da Temperatura (Imagen modificada - Fonte: CRESESB, 2006).....	15
Figura 4.1 – Distribuição da irradiância do Sol sobre a superfície da Terra (imagem modificada - fonte: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 2008a)	17
Figura 4.2 - Eficiência energética em lumens por Watt (fonte: OSRAM 2012).....	18
Figura 4.3 - Espectro das lâmpadas incandescentes de acordo com a temperatura de cor que elas emitem (imagem modificada - fonte: ASTM 2008c).....	18
Figura 4.4 - Espectro da lâmpada fluorescente, modelo Cool White (mais comum) (imagem modificada - fonte: ASTM 2008c).....	19
Figura 4.5 – Escala Kelvin de temperatura de luz. (fonte: ZIMER, 2011).....	19
Figura 5.1 Esqueleto do sistema	22
Figura 5.2 - Distribuição das lâmpadas sobre uma placa solar.....	23
Figura 5.3 - Caixa para teste em painéis fotovoltaicos	24
Figura 5.4 - Disposição das lâmpadas sobre o painel	24
Figura 5.5 Projeto finalizado, pronto para testes.	24
Figura 5.6 Diagrama elétrico	25
Figura 6.1 Gráfico da corrente de curto-circuito pelo número de lâmpadas acesas.....	26
Figura 6.2 Gráfico da tensão de circuito aberto pelo número de lâmpadas acesas	26

RESUMO

As energias renováveis estão crescendo de maneira rápida em todo o mundo. O uso da energia solar, em especial, também tem crescido bastante, inclusive no Brasil que, por ser um país tropical, tem um grande potencial para geração de energia elétrica através dos painéis fotovoltaicos. Este trabalho desenvolve um estudo sobre o efeito fotovoltaico e também sobre dois tipos de lâmpadas (incandescentes e fluorescentes) para assim implementar um sistema de teste que visa analisar o desempenho de módulos fotovoltaicos independente da energia solar. Em relação ao desempenho, espera-se descobrir o número de lâmpadas necessárias para que sejam simuladas situações próximas ao real (iluminada pelo sol) e assim conseguir a máxima potência produzida pelo painel.

Palavras-chave: Efeito fotovoltaico, lâmpadas e energia solar.

ABSTRACT

The Renewable energies are growing quickly all over the world. Solar energy, in particular, is also growing well, including in Brazil, which has a great potential for generating electricity through photovoltaic panels, because of it's a tropical location. This work develops a study on the photoelectric effect and also of two types of light bulbs (fluorescent and incandescent), so as to implement a test system to analyze the performance of photovoltaic modules independently of solar power. About the performance, it's expected to find the number of lamps needed to simulate situations near to real (sunlit) and getting to this, the maximum energy generated by the panel.

Keywords: photoelectric effect, light bulbs and solar power.

1 INTRODUÇÃO

Pesquisas recentes apontam um crescimento muito grande na geração de energia por meio de fontes alternativas, como por exemplo, energia solar, energia eólica, energia marítima, energia geotérmica e energia biomassa. As fontes alternativas são vistas como uma solução para lugares afastados das cidades. Segundo a *REN21*¹, nos cinco países com maior capacidade de produção de energia alternativa é difícil estimar o número de domicílios rurais atendidos por essas fontes, pois o setor, cada vez mais, tem sido impulsionado por projetos individuais ou por empresas privadas.

No caso da energia solar, os cinco países com maior capacidade de produção são a Alemanha, a Itália, a República Tcheca, o Japão e os EUA. Em todo o planeta Terra, a capacidade de produção de energia solar fotovoltaica cresceu de 2008 a 2010 de 16 para 40 GW (*Renewable Global Status Report, 2011*).

A energia solar vem sendo cada vez mais alvo de pesquisas. Podemos ver na Figura 1.1 o aumento no número de patentes de energia solar fotovoltaica.

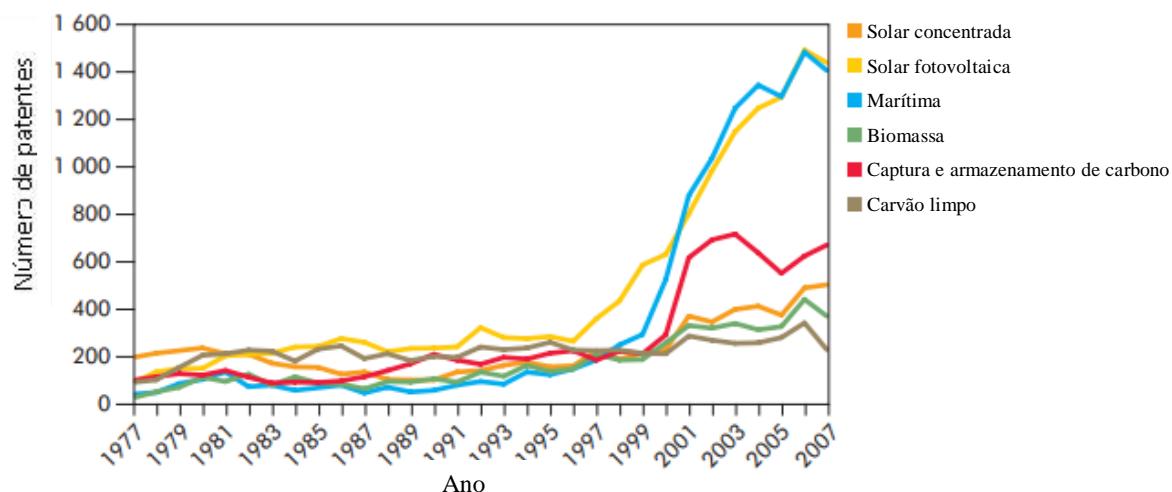


Figura 1.1 Número de patentes de seis fontes de energia até 2007. (Figura alterada. Fonte: POLICIES TO ACCELERATE A LOW-CARBON TECHNOLOGY TRANSITION, capítulo 12, 2010)

No Brasil, o uso de energia solar também vem crescendo. Prova disso foi que no dia 17 de abril de 2012, a ANEEL² criou uma nova resolução normativa para energia solar fotovoltaica, criando assim condições gerais para que aqueles que utilizam essa energia possam também ser geradores de energia (Agencia Nacional de Energia Elétrica, 2012). Nos últimos anos o Brasil tem investido na área de energia solar fotovoltaica, começando a produzir as células fotovoltaicas. Outra prova de que o Brasil vem crescendo nessa área é que a ELETROBRAS ELETROSUL abriu licitação internacional para instalar a primeira usina solar brasileira (ELETROBRAS).

¹ REN21: *Renewable Global Status Report, 2011*.

² ANEEL: Agencia Nacional de Energia Elétrica.

Os painéis fotovoltaicos vendidos no Brasil devem ser aprovados em testes com padrão exigido pelo INMETRO. O equipamento utilizado para executar estes testes é alemão, chamado Flashlight Simulator Sol 2x2. (MOCELIN; ZILLES; NOVGORODCEV, 2008).

Tendo em vista o crescimento na área de energia renovável, em especial, a energia solar, este trabalho visa produzir uma caixa para testes em painéis fotovoltaicos, utilizando lâmpadas fluorescentes ou incandescentes.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre os painéis fotovoltaicos e sobre dois tipos de lâmpadas, as incandescentes e as fluorescentes, buscando a possibilidade de utilizá-las na implementação de um sistema que testaria o painel fotovoltaico sem a influência de iluminação externa. Com esse sistema, é possível realizar testes independentes do Sol e das condições ambientais, facilitando testes em painéis fotovoltaicos, podendo assim realizar vários testes em um mesmo dia, num curto período de tempo.

Testes feitos com a luz solar sofrem influência da latitude em que esse painel fotovoltaico está localizado na Terra. Um teste feito na Linha do Equador terá resultados diferentes de um teste realizado, no mesmo dia, próximo ao Círculo Polar Ártico, devido à diferença da intensidade da radiação solar (SHAYANI; OLIVEIRA, 2011).

Existem hoje equipamentos produzidos na Alemanha, da empresa OptoSolar, que simulam a radiação emitida pelo Sol através de lâmpadas de Xênon. Devido ao calor emitido pela fonte luminosa, os testes devem ser feitos em apenas 20 milissegundos. Para isso utiliza-se uma fonte de alimentação própria para a lâmpada, acendendo-a utilizando uma rampa de tensão específica (MOCELIN; ZILLES; NOVGORODCEV, 2008).

Há normas que definem as condições padrão para testes em painéis. Como exemplos têm-se a americana ASTM E-1036, a europeia IEC 1215 e a brasileira NBR11876/EB2176. Todas definem como condições padrão de teste, para irradiância e temperatura, os valores de 1000 Watts por metro quadrado e 25 graus Celsius, respectivamente (PRIEB, 2002).

Sendo assim, esse Trabalho de Conclusão de Curso visa à construção de um sistema de testes utilizando exclusivamente lâmpadas fluorescentes ou incandescentes como fonte de radiação luminosa para os painéis. Esse novo sistema é bem mais simples do que o sistema existente.

3 PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO

Neste capítulo será descrita uma das maneiras de captação e conversão de energia: o efeito fotovoltaico. Com esse efeito consegue-se, através de dispositivos conhecidos como

células fotovoltaicas, a conversão de energia solar em energia elétrica. Um conjunto de células fotovoltaicas forma um painel solar fotovoltaico.

O Sol é a maior fonte de energia do planeta Terra: poderosa, durável, confiável e disponível em todo o mundo. A energia solar que a Terra recebe anualmente é igual a $1,5 \times 10^8$ kWh, o que corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial de energia no mesmo período. Pode-se utilizar essa energia de diversas maneiras por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia (GTES³, 2004).

Nos itens a seguir será descrito detalhadamente o funcionamento de um painel fotovoltaico.

3.1 EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico ocorre em materiais semicondutores, que se caracterizam por possuírem, a baixas temperaturas, banda de condução e banda de valência, espaços “vazios” de elétrons e espaços que permitem a presença de elétrons, respectivamente (Energia solar Princípios e Aplicações, 2006).

O material mais utilizado é o silício. O silício, quando dopado com o fósforo, torna-se um material com elétrons fracamente ligados a seus átomos de origem, sendo facilmente liberados com pouca energia. O fósforo é considerado um material *dopante n*. Por outro lado, quando o silício é dopado com o boro, por exemplo, haverá uma falta de elétrons denominada lacuna. Com pouca energia, elétrons de camadas próximas podem ocupar esses espaços. O boro é considerado um material *dopante p* (GTES, 2004).

Assim, juntando dois materiais de silício puro, sendo um dopado com fósforo e outro dopado com boro, temos o que é chamado de *junção pn*. Se essa junção é exposta a fótons com uma energia maior que o *gap*, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna. Acontecendo isso, há a geração de um campo elétrico diferente de zero que acelera as cargas, criando assim uma corrente através da *junção pn*. Esse deslocamento é chamado de Efeito Fotovoltaico (CRESESB⁴, 2006).

3.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DO GERADOR FOTOVOLTAICO

A Figura 3.1 mostra o circuito elétrico equivalente simplificado de uma célula fotovoltaica.

³ GTES: Grupo de Trabalho de Energia Solar.

⁴ CRESESB: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito.

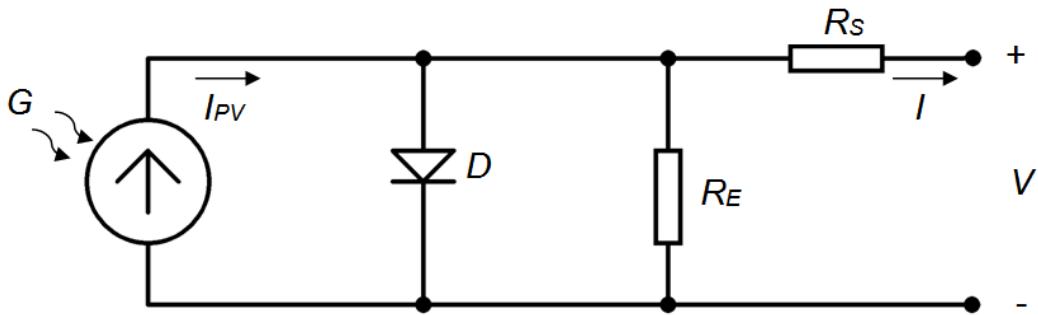


Figura 3.1 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica

A fonte de corrente depende linearmente da luz incidente sobre a placa, gerando a corrente I_{PV} , que representa a corrente fotogerada. A resistência R_E é relacionada às correntes de fuga e R_S é relacionada à resistência efetiva da célula. As duas resistências estão relacionadas também diretamente à tensão de circuito aberto e corrente de curto-círcuito, respectivamente.

3.3 CURVA CARACTERÍSTICA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Um painel fotovoltaico tem como curva característica a “representação dos valores da corrente de saída de um conversor fotovoltaico, em função da tensão, para condições preestabelecidas de temperatura e radiação”, segundo a ABNT, na norma NBR10899/TB328 (PRIEB, 2002). A Figura 3.2 mostra curvas características de um painel fotovoltaico, variando a irradiância sobre ele.

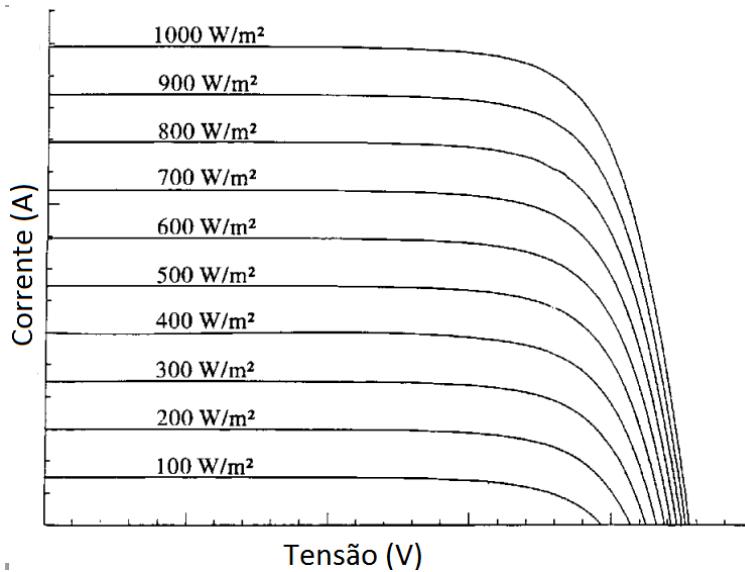


Figura 3.2 - Curva de corrente x tensão para diversas intensidade de radiação solar (Imagen modificada - Fonte: CRESESB, 2006)

A Figura 3.3 apresenta como o painel se comporta conforme um aumento na incidência de irradiação solar sobre ele.

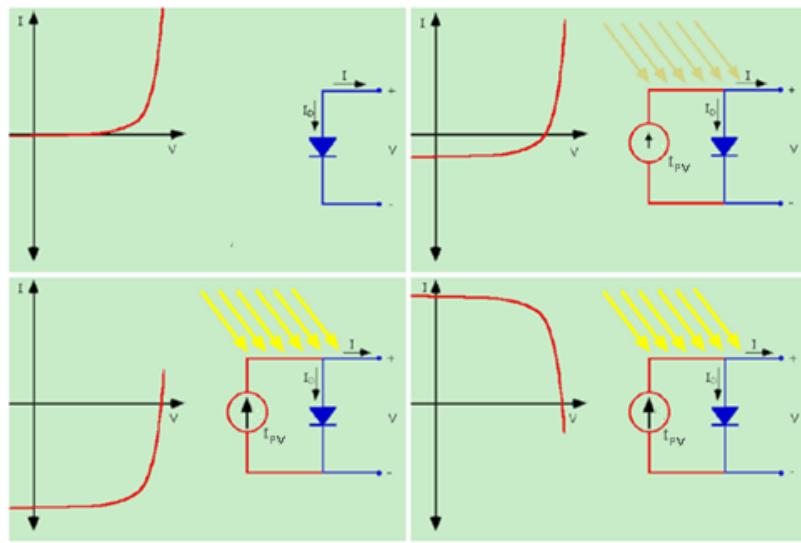


Figura 3.3 - Uma célula fotovoltaica sob diversas condições de iluminação. (Imagem modificada - Fonte: PRIEB, 2002)

3.4 EFEITO DE FATORES AMBIENTAIS SOBRE A CARACTERÍSTICA DO DISPOSITIVO

Há alguns fatores ambientais que podem influenciar a tensão e a corrente de saída do dispositivo, como a intensidade da irradiação solar e a temperatura.

O aumento da temperatura provoca, principalmente, uma redução da tensão de forma diretamente proporcional. A temperatura provoca também um pequeno incremento da corrente para valores baixos de tensão, que é tido como um efeito secundário. Pode-se ver isso na Figura 3.4.

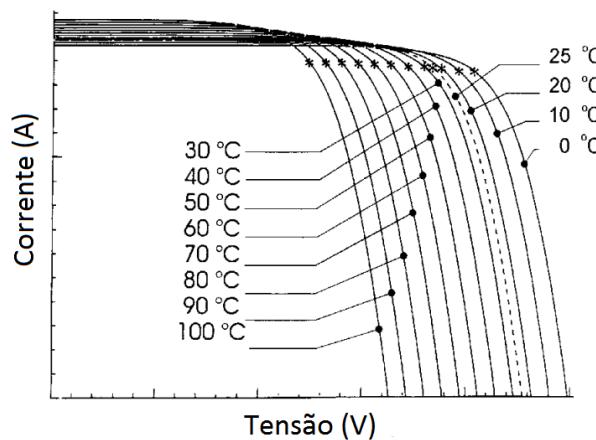


Figura 3.4 - Efeito da Temperatura (Imagem modificada - Fonte: CRESES, 2006)

3.5 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO MÓDULO

As especificações dos módulos fotovoltaicos fornecidas pelos fabricantes são dadas em termo da potência máxima, tensão de máxima potência, corrente de máxima potência, corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto. As especificações elétricas estão sob condições de teste de irradiação de 1 kW/m², espectro de 1,5 de Massa de ar e temperatura de célula de 25°. Este valor de irradiação é o recebido pela Terra em um dia claro ao meio dia. Segue a Tabela 1 com as características elétricas do módulo fotovoltaico KC130TM, da Kyocera Solar do Brasil.

Tabela 1 - Características do painel fotovoltaico utilizado. (fonte: Kyocera Solar)

Máxima Potência	130W
Tolerância	+10%/-5%
Máxima Tensão do Sistema	600 V
Tensão de Máxima Potência	17,6 V
Corrente de Máxima Potência	7,39 A
Tensão de Circuito Aberto	21,9 V
Corrente de Curto Circuito	8,02 A

4 ASPÉCTOS GERAIS SOBRE AS LÂMPADAS

4.1 A RADIAÇÃO SOLAR E A LUZ

A radiação solar é, em poucas palavras, o espectro de frequência total da radiação eletromagnética emitida do Sol. A constante solar padrão, adotada pelo *World Radiation Center* (WRC), em 1971, é de 1367 W/m², com um erro estimado em 1%. A radiação solar tem três espectros principais desta radiação: o infravermelho (45%), o espectro visível (luz visível) (48%) e o ultravioleta (2,4%). A radiação solar sobre a Terra varia de acordo com as estações do ano e também de acordo com a latitude do local de posicionamento do painel no planeta, podendo variar até 3% (*GUIMARÃES, 2003*).

A Figura 4.1 mostra a distribuição da irradiação do Sol sobre a superfície terrestre de forma direta, após ser filtrada pela atmosfera.

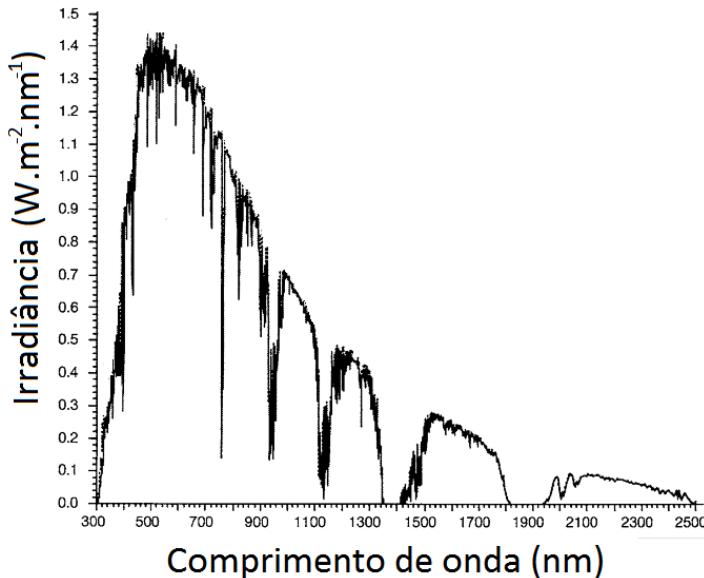


Figura 4.1 – Distribuição da irradiância do Sol sobre a superfície da Terra (imagem modificada - fonte: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 2008a)

Para testes em painéis fotovoltaicos, o padrão para irradiância é de 1000 Watts por metro quadrado e para temperatura é de 25 graus Celsius, como visto antes, no Capítulo 2, página 12 (PRIEB, 2002).

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo atingir o valor de irradiância descrito no parágrafo anterior, utilizando apenas lâmpadas incandescentes ou fluorescentes como fonte de irradiação. A irradiância de uma lâmpada, que é o mesmo que densidade de potência de uma lâmpada, é a potência total instalada em Watt para cada metro quadrado de área. Essa densidade é inversamente proporcional ao quadrado da distância em que o ponto iluminado está. Temos a fórmula abaixo para cálculo da densidade.

$$D = \frac{Pt}{4\pi R^2} \text{ em Watts/metro}^2 \quad (1)$$

Onde D é a densidade de potência, Pt é a potência total instalada e R é à distância entre o objeto e a fonte luminosa.

O próximo item deste capítulo descreve um pouco mais sobre as lâmpadas incandescentes e fluorescentes e suas diferenças.

4.2 LÂMPADAS INCANDESCENTES E FLUORESCENTES

As lâmpadas incandescentes e fluorescentes diferem entre si pelos diferentes fluxos luminosos, que são as quantidades de luz emitidas pelas fontes, medidos em lumens, pelos espectros de frequência da luz emitida e também pelas potências que consomem. Pode-se fazer uma comparação observando quantos lumens são gerados por Watt consumido. A essa grandeza dá-se o nome de Eficiência Energética. A Figura 4.2 exemplifica a eficiência de alguns tipos de lâmpadas.

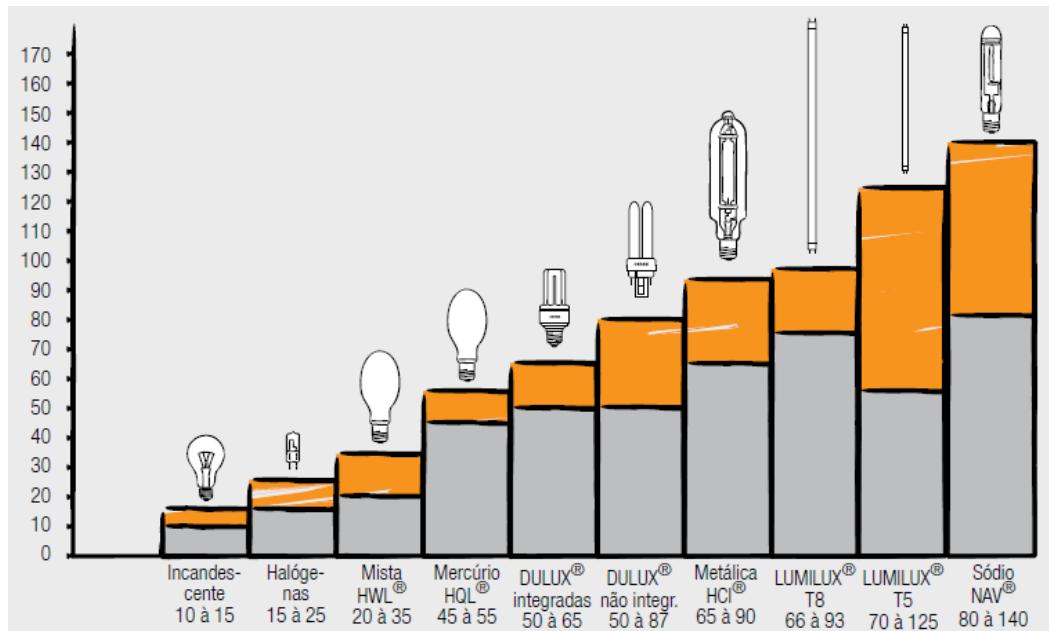


Figura 4.2 - Eficiência energética em lumens por Watt (fonte: OSRAM 2012).

A eficiência energética das lâmpadas fluorescentes é cerca de cinco vezes maior que a eficiência das lâmpadas incandescentes (GE Iluminação, 2012).

Quanto ao comprimento de onda da radiação emitida pelas lâmpadas, as incandescentes emitem radiação em todos os comprimentos visíveis (380nm – 780nm) (Phillips). Já as lâmpadas fluorescentes não produzem cores em um espectro contínuo, porém emitem radiação em todo o espectro visível. Isto está demonstrado nas Figuras 4.3 e 4.4 (ASTM, 2008a).

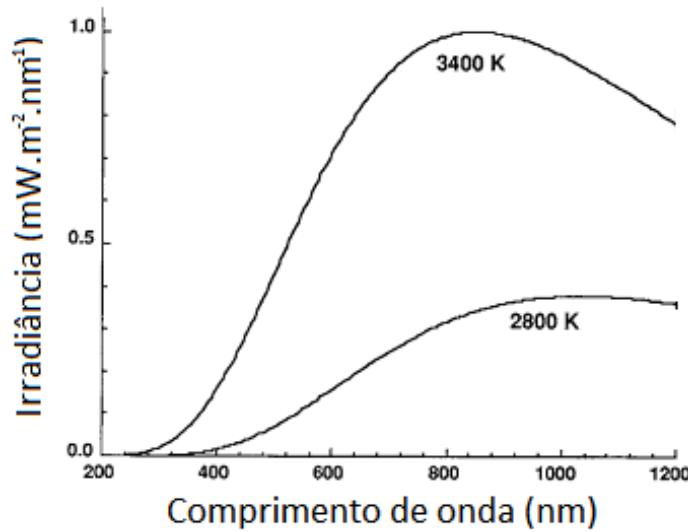


Figura 4.3 - Espectro das lâmpadas incandescentes de acordo com a temperatura de cor que elas emitem (imagem modificada - fonte: ASTM 2008c).

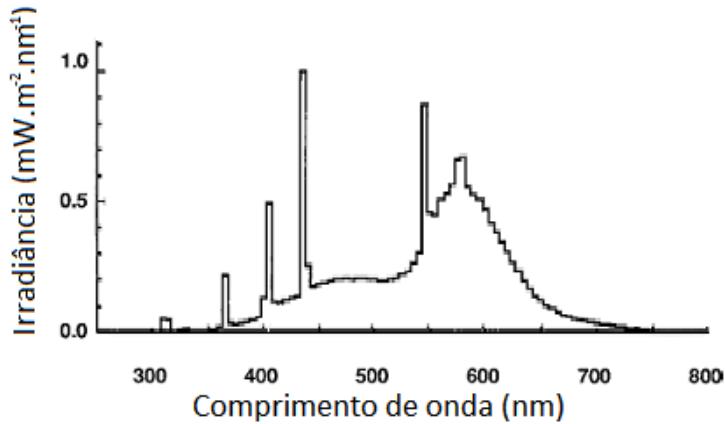


Figura 4.4 - Espectro da lâmpada fluorescente, modelo Cool White (mais comum) (imagem modificada - fonte: ASTM 2008c).

Outro ponto a ser observado é a temperatura de cor. As lâmpadas fluorescentes emitem uma luz mais próxima à temperatura de cor do Sol do que as lâmpadas incandescentes (ZIMERS, 2011).

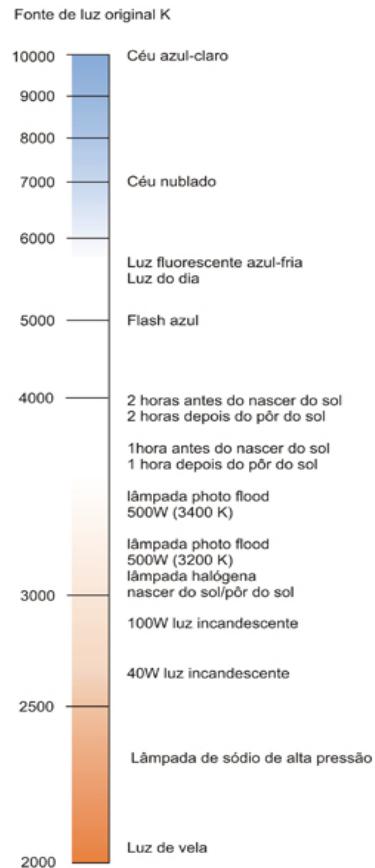


Figura 4.5 – Escala Kelvin de temperatura de luz. (fonte: ZIMER, 2011)

Pode-se ver na Figura 4.5 que as lâmpadas incandescentes comuns possuem uma temperatura de cor que varia em torno de 2700 K. Já as lâmpadas fluorescentes podem chegar a uma temperatura de cor de aproximadamente 6000 K.

5 PROJETO

5.1 OPÇÕES DE PROJETO

Tendo todas as características das lâmpadas e dos módulos, é preciso calcular o número de lâmpadas incandescentes ou fluorescentes que seriam necessárias para atingir o valor padrão de irradiação solar (1000 W/m^2). Para isso tem-se a equação 4.1 e os gráficos dos espectros do sol e das lâmpadas (Figuras 4.1, 4.3 e 4.4). Calculando a potência das lâmpadas fluorescentes necessárias para atingir o valor padrão de irradiação solar através da equação 1 tem-se que:

$$1000 = \frac{Pt}{4 \cdot \pi \cdot 0,35^2} = 1535,38 \text{ W}$$

Logo, utilizando lâmpadas tubulares de 32 Watts de potência, consegue-se o número de lâmpadas necessárias dividindo 1535,38 por 32. O resultado é de aproximadamente 50 lâmpadas.

Já ao observar o gráfico do espectro da frequência da lâmpada fluorescente (Figura 4.4, página 19), tem-se que a densidade de potência fornecida pela lâmpada está abaixo de 0,1% da densidade de potência fornecida pelo Sol. Neste caso seria necessário utilizar mais de 1000 lâmpadas fluorescentes.

No caso da utilização de lâmpadas incandescentes de 150 Watts, que possuem uma intensidade de iluminação próxima a das lâmpadas fluorescentes de 32 Watts, a quantidade necessária para atingir a densidade de potência fornecida pelo Sol, observando o gráfico do espectro da frequência da lâmpada incandescente (Figura 4.3, página 18), seria um pouco menor que a quantidade de lâmpadas fluorescentes, uma vez que a densidade de potência da lâmpada incandescente é maior que a da lâmpada fluorescente, porém ainda assim seria um número maior que 1000 lâmpadas.

Utilizando lâmpadas incandescentes, poderia ser colocado um dimmer no projeto, o qual poderia regular a potência fornecida ao painel fotovoltaico, podendo assim desenvolver vários testes, descrevendo toda a curva de irradiância por tensão de circuito aberto e irradiância por corrente de curto-círcuito. Com esse tipo de lâmpada, uma quantidade grande de energia térmica é liberada, fazendo com que a temperatura num ambiente fechado fique muito alta, diminuindo o rendimento do módulo, como visto no capítulo 3. Além disso, a potência elétrica gasta para atingir a densidade de potência luminosa necessária seria bem alta do que a potência gasta com lâmpadas fluorescentes devido ao baixo rendimento dessas lâmpadas.

Existem algumas vantagens no uso de lâmpadas fluorescentes, como o fato de elas não esquentarem como as lâmpadas incandescentes, uma vez que elas liberam pouca energia térmica (lâmpadas frias) e que sua eficiência é bem mais alta. Além dessas vantagens, a luz emitida por essas lâmpadas tem temperatura de cor mais próxima à emitida pelo Sol. Uma dificuldade seria que com essas lâmpadas não é possível utilizar o dimmer, porém pode-se amenizar esse problema ligando essas lâmpadas em circuitos isolados, conseguindo acendê-las uma a uma ou duas a duas, de modo a produzir potência luminosa intermediária para desenvolver mais testes.

Em ambos os casos, o número de lâmpadas necessárias para que se tenha o valor padrão de irradiação solar seria inviável pelo espaço físico que as lâmpadas ocupariam, não sendo possível organizá-las sobre o painel fotovoltaico.

A fim de saber como o painel fotovoltaico responde quando iluminado com lâmpadas fluorescentes, foi montada uma caixa para testes em painéis utilizando lâmpadas tubulares Philips MASTER TL-D Super 84, que emitem uma grande quantidade de luz branca, similar à luz natural do dia. Podemos ver algumas características dessa lâmpada na Tabela 2.

Tabela 2 - Características da lâmpada escolhida (fonte: Phillips)

Potência	32 W
Fluxo Luminoso	2600 lumens
Temperatura de cor	4000 K
IRC	80-89
Diâmetro	26 mm
Comprimento	1200 mm
Base	G13

5.2 A CAIXA PARA TESTE

5.2.1 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

- Cantoneiras
- MDF
- Rodas
- Parafusos, porcas e arruelas.
- 20 lâmpadas tubulares Philips MASTER TL-D Super 84
- 40 soquetes com rabichos
- 40 abraçadeiras para lâmpadas formato T8
- 10 reatores 2x32W
- Fios
- 10 interruptores externos
- Terminais e conectores

- Multímetro digital (Amprobe 34XR-A True-rms)

Foram aplicados sobre os painéis fotovoltaicos diferentes níveis de irradiação através do número de lâmpadas acesas. Mediava-se a corrente de curto-círcuito e a tensão de circuito aberto em cada nível de irradiação com o multímetro digital citado acima nas saídas do painel (positiva e negativa). Através dos resultados obtidos, estimou-se o número de lâmpadas que seriam necessárias para atingir o valor padrão que a norma brasileira exige (1000 W/m^2). Nos testes feitos não foi levada em conta a temperatura do sistema.

5.2.2 PARÂMETROS DA CAIXA DE TESTE

O simulador consiste em uma caixa fechada para que não haja influência de nenhuma luz externa, sendo o módulo alimentado apenas pelas lâmpadas do sistema. A caixa tem dois andares, sendo possível assim testar dois painéis ao mesmo tempo. Suas dimensões são de 1,00 metro de altura, 1,44 metro de comprimento e 0,68 metro de largura, para que assim acomode a placa dentro. As lâmpadas ficam localizadas a 0,35 metro da placa, por isso a importância de a lâmpada não liberar muito calor. O esqueleto do projeto está demonstrado na Figura 5.1. Esse esqueleto é feito por cantoneiras de aço de 1" por 1/8".



Figura 5.1 Esqueleto do sistema

As laterais e o teto são revestidos com MDF de seis milímetros de espessura. O material com que é feito a caixa influencia na eficiência do recinto, que pode ser calculada através do índice do recinto (K) e dos índices de refletância das paredes e tetos. O MDF utilizado no projeto é revestido de um dos lados, sendo este lado virado para dentro, deixando o ambiente com as paredes brancas, para melhor eficiência do recinto.

Para um maior rendimento do projeto, foi colocado um filme reflexivo colado no teto do sistema para reflexão da luz, imitando assim uma luminária. A luminária melhora o fluxo luminoso, focando os raios luminosos para o local desejado. O rendimento de uma luminária é calculado como a razão entre o fluxo luminoso fornecido pela luminária (direto e indiretamente) e o fluxo total emitido pelas lâmpadas contidas na mesma. Essa eficiência pode chegar próximo aos 90% (OSRAM, 2012). Não foram utilizadas luminárias no projeto devido ao espaço físico que seria perdido para utilizá-las.

Sendo assim, toda a superfície da placa estará coberta por 10 lâmpadas frias de 32 W. Quanto menor a distância entre as lâmpadas e a placa, melhor o aproveitamento da potência luminosa fornecida pela lâmpada, como descrito no capítulo 4 (página 17).

As lâmpadas foram distribuídas conforme a Figura 5.2 para manter uma maior uniformidade da iluminação sobre toda a placa solar, sendo também numeradas para maior facilidade na hora dos testes.

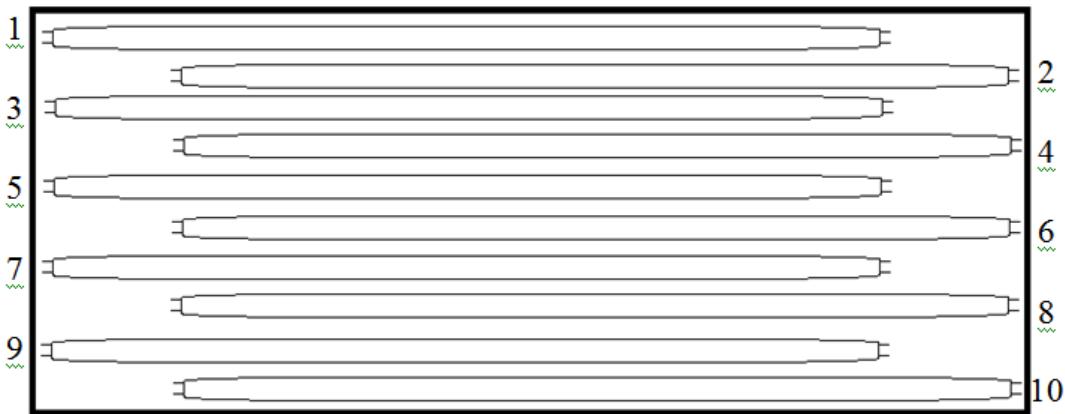


Figura 5.2 - Distribuição das lâmpadas sobre uma placa solar

Para acender as lâmpadas foram utilizados cinco reatores e cinco interruptores, sendo que cada um desses foram ligados a duas lâmpadas. Essa distribuição está demonstrada no diagrama elétrico (Figura 5.6, página 25). A distribuição foi feita para que testes com um menor número de lâmpadas fossem feitos sem que houvesse desequilíbrio na distribuição luminosa sobre o painel.

Essa distribuição foi feita sobre os dois painéis de maneira igual. Por isso a utilização de 20 lâmpadas, 10 reatores e 10 interruptores.

Todos os reatores foram ligados na tensão de 220 V, para que a corrente total do sistema fosse menor, uma vez que foram todos ligados em paralelo à rede por uma única tomada. A corrente total do circuito pode ser calculada facilmente através da potência elétrica dividida pela tensão aplicada (JOHNSON; HILBURN; JOHNSON, 2000). Assim temos que:

$$I = \frac{640 \text{ W}}{220 \text{ V}} \cong 2,91 \text{ A}$$

Abaixo temos três fotos do projeto já pronto para uma melhor visualização de como ele foi feito:



Figura 5.3 - Caixa para teste em painéis fotovoltaicos



Figura 5.4 - Disposição das lâmpadas sobre o painel



Figura 5.5 Projeto finalizado, pronto para testes.

5.2.3 DIAGRAMA ELÉTRICO

Abaixo temos o diagrama elétrico utilizado na caixa de testes:

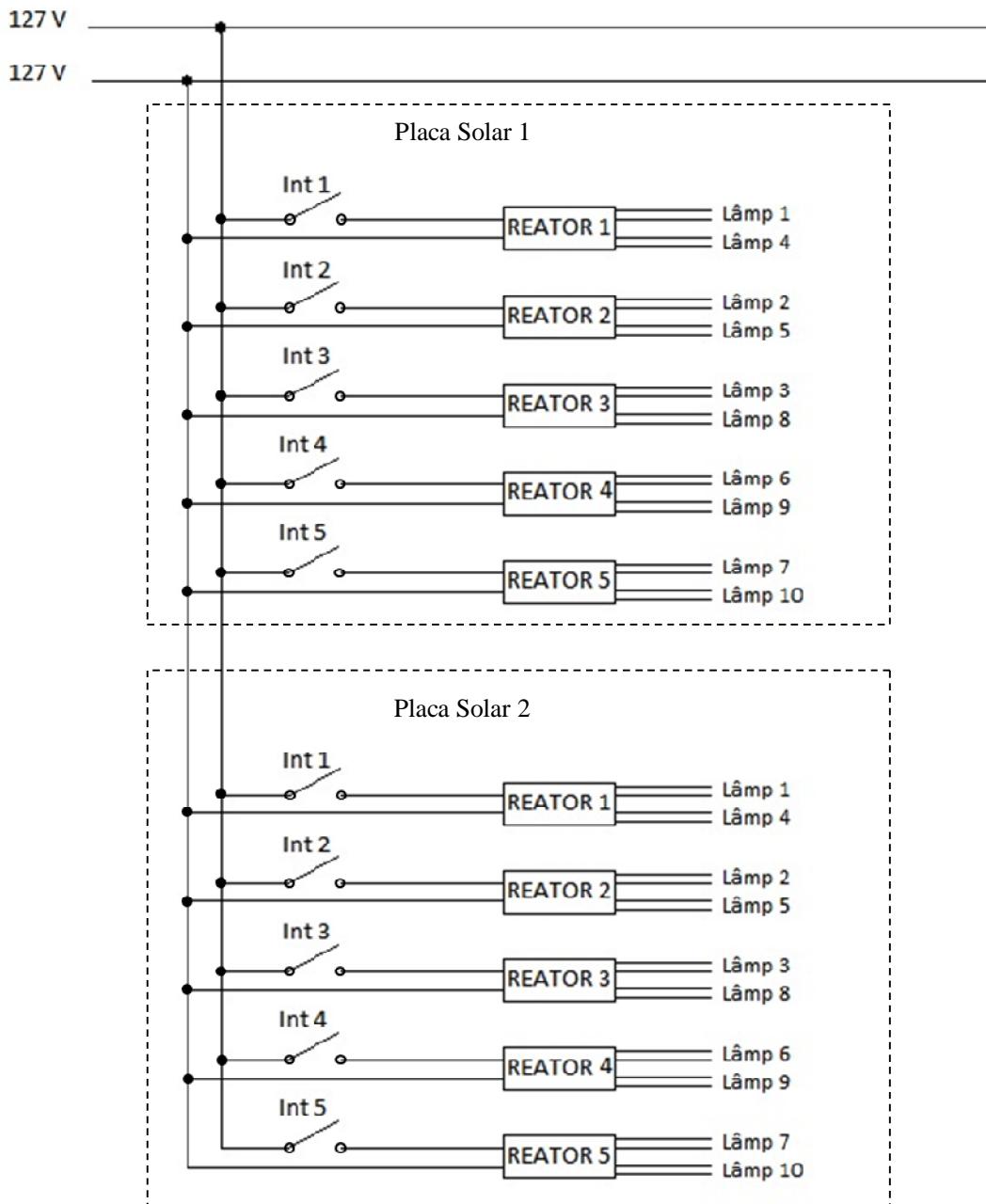


Figura 5.6 Diagrama elétrico

6 RESULTADOS

Algumas medidas de tensão de circuito aberto e corrente de curto-círcuito estão demonstradas na tabela abaixo:

Tabela 3 - Testes realizados

	Painel solar testado	Nº de lâmpadas acesas	Quais lâmpadas	Tensão de circuito aberto (V)	Corrente de curto-círcuito (A)
Teste 0	1	0	Nenhuma	0	0
Teste 1	1	10	Todas	18,3	0,31
Teste 11	1	1	5	13,4	0,03
Teste 2	1	2	3 e 8	15	0,06
Teste 3	1	2	1 e 4	14,8	0,07
Teste 4	1	2	7 e 10	14,8	0,07
Teste 5	1	4	2, 5, 6 e 9	16,5	0,12
Teste 6	1	4	1, 4, 7 e 10	16,6	0,12
Teste 7	1	6	1, 3, 4, 7, 8 e 10	17,6	0,19
Teste 8	1	6	1, 4, 6, 7, 9 e 10	17,5	0,19
Teste 9	1	8	1, 2, 4, 5, 6, 7, 9 e 10	18	0,25
Teste 10	2	10	Todas	18,6	0,32

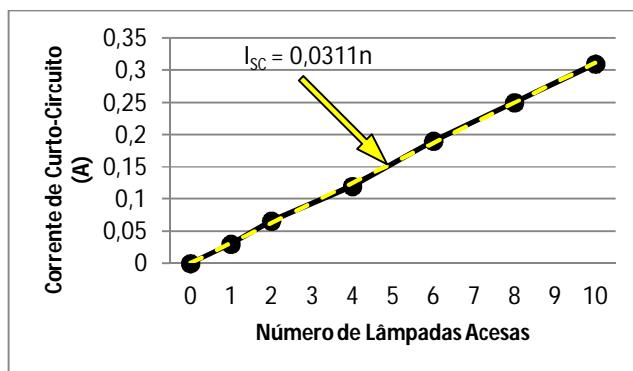


Figura 6.1 Gráfico da corrente de curto-círcuito pelo número de lâmpadas acesas

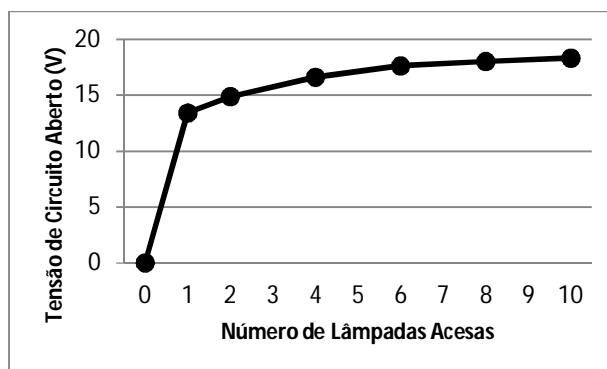


Figura 6.2 Gráfico da tensão de circuito aberto pelo número de lâmpadas acesas

Os gráficos das Figuras 6.1 e 6.2 mostram exatamente o efeito da radiação sobre a placa quando aplicada sobre ela uma pequena quantidade de radiação. Dessa maneira, a tensão de circuito aberto fica próximo a 70% da tensão de circuito aberto quando aplicada o valor de irradiação exigida pela norma brasileira NBR11876/EB2176 para testes que simulam o Sol, enquanto a corrente de curto-círcuito cresce de maneira linear. Pela linha de tendência fornecida pelo gráfico da Figura 6.1, tem-se que para atingir a corrente de curto-círcuito (I_{SC}) igual a 8,02, fornecida pelo fabricante nas condições padrão, o número de lâmpadas que seriam necessárias é:

$$I_{SC} = 8,02 = 0,0311n$$

$$n = 258,7 = 259 \text{ lâmpadas}$$

No teste 1 e no teste 10 observa-se que a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-círcuito ficaram bem abaixo dos valores fornecidos pelo fabricante sob as condições padrão dada pela norma brasileira NBR11876/EB2176. A corrente de curto-círcuito alcançou 3,8% do valor fornecido pelo fabricante, enquanto que a tensão de circuito aberto alcançou aproximadamente 84%.

Essa diferença entre a tensão e a corrente é explicada pela Figura 3.2 (página 14), uma vez que, com pouca incidência de luz, a tensão de circuito aberto fica bem próxima da máxima, enquanto a corrente de curto-círcuito cresce linearmente.

Pode-se ver este crescimento linear, observando o gráfico da Figura 6.1, onde a corrente de curto-círcuito é cerca de 0,0311 ampère maior a cada lâmpada acesa.

Outra característica que se pode observar nos testes apresentados é que, quanto mais uniforme os raios de luz chegarem ao painel, melhor é o rendimento do mesmo. Podemos observar isso comparando o teste 2 com os testes 3 e 4. Nos três testes foram acesas duas lâmpadas, porém no teste 2 elas estão mais bem posicionadas sobre o painel solar, de modo a aplicar uma iluminação mais uniforme, por isso uma tensão de circuito aberto maior nesse teste. Uma pequena diferença pode ser notada também entre os testes 5 e 6 e os testes 7 e 8.

7 CONCLUSÃO

Vemos por meio deste projeto, que a radiação solar é muito superior a radiação emitida pelas lâmpadas fluorescentes e incandescentes. Observando a corrente de curto-circuito, chegou-se à conclusão de que a radiação aplicada sobre o painel foi cerca de 3,8% da radiação exigida para fazer testes simulando a radiação solar.

Através de uma linha de tendência traçada pelo Excel, calculou-se que o número de lâmpadas necessárias para atingir o valor de radiação exigido na norma brasileira para que as lâmpadas emitissem radiação suficiente para simularem o Sol seria de 259 lâmpadas, o que faz com que esse teste fique inviável.

O número de lâmpadas calculado após a medição da radiação é bem diferente dos números calculados teoricamente, através da fórmula de densidade de potência, equação 1 (página 17) e do gráfico de espectros de frequência do sol e da lâmpada fluorescente (página 17 e 19). Isto se deve, no primeiro caso, à fórmula da densidade de potência não levar em conta o espectro de frequência, que nas lâmpadas fluorescentes fica apenas nos comprimentos de ondas visíveis, não tendo radiação na frequência ultravioleta e infravermelho. Já o cálculo através do gráfico não leva em conta a distância que o objeto luminoso está da placa e também o recipiente onde os objetos estão, que nesse caso, foi projetado de modo a melhorar o rendimento das lâmpadas.

É possível fazer alguns testes nos painéis solares e observar algumas características dos mesmos. Das características que puderam ser observadas neste projeto, pode-se ver a diferença do comportamento da corrente e da tensão emitida pelo painel sobre pouca radiação, sendo que a corrente medida (corrente de curto-circuito) varia de forma linear, enquanto na tensão medida (tensão de circuito aberto) obteve-se algo próximo a 70% do valor que seria obtido caso atingisse a radiação emitida pelo Sol sobre a Terra.

É possível em trabalhos posteriores melhorar esse rendimento da radiação aplicada sobre as placas solares, utilizando lâmpadas com uma maior potência ou outros tipos de lâmpadas. Para isto, outras características precisariam ser estudadas, como a influência da temperatura sobre o rendimento dos painéis e a implementação de um sistema de refrigeração, uma vez que, quanto maior a temperatura, pior o rendimento dos painéis.

8 BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. (2008a). **E1733 – 95 (reapproved 2008)**: Standard guide for use of lighting in laboratory testing. Philadelphia.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. (2008b). **E2481 – 08**: Standard test method for hot spot protection testing of photovoltaic modules. Philadelphia.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. (2008c). **G173 – 03 (reapproved 2008)**: Standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface. Philadelphia.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. (2009). **E948 – 09**: Standard test method for electrical performance of photovoltaic cells using reference cells under simulated sunlight. Philadelphia.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. (20010). **E927 – 10**: Standard specification for solar simulation for photovoltaic testing. Philadelphia.

CAMUS, C.; EUSÉBIO, E. (2006). **Gestão de energia – energia solar**. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Departamento de engenharia Electrotécnica e Automação. Disponível em:<<http://pwp.net.ipl.pt/deea.isel/ccamus/Doc/energias5.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2012.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. [199-?]. **Energia solar: princípios e aplicações**. Rio de Janeiro, 2006.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. [199-?]. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2004.

GUIMARÃES, A.P.C. (2003). **Estimativa de parâmetros da camada atmosférica para cálculo da irradiação solar incidente na superfície terrestre**. 162p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

JOHNSON, D.E.; HILBURN, J.L.; JOHNSON, J.R. (2000). **Fundamentos de análise de circuitos elétricos**. 4.ed. Rio de Janeiro: LTC.

MOCELIN, A.R.; ZILLES, R.; NOVGORODCEV, A. (2008). **Programa brasileiro de etiquetagem: a utilização do simulador solar do IEE/USP na qualificação de módulos fotovoltaicos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2./CONFERÊNCIA REGIONAL LATINO-AMERICANA DA ISES, 3., 2008, Florianópolis. Anais... Florianópolis: [s.n.].

OSRAM (2012). **Curso de iluminação:** conceitos e projetos. Apostila. Disponível em:<http://www.usp.br/fau/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0262/Af_A/postila_Conceitos_e_Projetos.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2012.

PRIEB, C.W.M. (2002). **Desenvolvimento de um sistema de ensaio de módulos fotovoltaicos.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em:<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2091/000363966.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 23 out. 2011.

SHAYANI, R.A.; OLIVEIRA, M.A.G. (2011). A New index for absolute comparison of standalone photovoltaic systems installed at different locations. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v.3, n.4, p.495-500, Oct.

ZIMER, S. **Fotografia publicitária: como ocorre a geração e controle de luz e a sua utilização na iluminação de objetos reflexivos.** Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade FEEVALE, Nova Hamburgo, 2011. Disponível em:<<http://ged.feevale.br/bibvirtual/Monografia/MonografiaSimoneZimer.pdf>>. Acesso em: 3 jan. 2012.