



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA - INSTITUTO DE MATEMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MECATRÔNICA

DION BARBOSA DOS SANTOS RIBEIRO

DESENVOLVIMENTO E TESTE DE CONCEITO DE
PROTÓTIPO DE ILUMINADOR SOLAR CONTÍNUO PARA O
VISÍVEL E ULTRAVIOLETA

Salvador

2014

DION BARBOSA DOS SANTOS RIBEIRO

**DESENVOLVIMENTO E TESTE DE CONCEITO DE
PROTÓTIPO DE ILUMINADOR SOLAR CONTÍNUO PARA O
VISÍVEL E ULTRAVIOLETA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe

Salvador

2014

DION BARBOSA DOS SANTOS RIBEIRO

**DESENVOLVIMENTO E TESTE DE CONCEITO DE
PROTÓTIPO DE ILUMINADOR SOLAR CONTÍNUO PARA O
VISÍVEL E ULTRAVIOLETA**

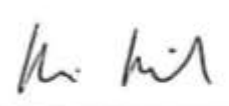
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em mecatrônica.

Banca Examinadora


Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe – Orientador


Doutor em Física Nuclear, Université Catholique de Louvain, U.C.L., Bélgica
Universidade Federal da Bahia.

Prof. Dr. Denis Gilbert Francis David


Doutor em Espectroscopia Atômica, Université de Caen, U.C., França
Universidade Federal da Bahia.

Prof. Dr. Osvaldo Lívio Soliano Pereira


Doutor em Política Energética pelo Imperial College of Science, Technology and
Medicine, I.C.S.T.M., Inglaterra.
Centro Universitário Jorge Amado.

Dedicado a família, amigos e mestres

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A minha família, pelo apoio, e a Carina, que acredita mais em mim do que eu mesmo.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe. “Quem honra seu mestre, honra a si mesmo” – Provérbio chinês. Serei sempre leal a quem tanto me ensinou.

A equipe do Laboratório de Propriedades Óticas (LaPO) do Instituto de Física da UFBA, do Laboratório de Parafinas (LABPAR) e do Laboratório de Certificação de Componentes para Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica.

Aos professores do programa de pós-graduação em mecatrônica (PPGM) da UFBA.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

E a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

A todos minha gratidão e meus agradecimentos. Muito obrigado.

“O que fazemos em vida ecoa na eternidade”

General Maximus Decimus Meridius – Gladiador (2000).

RESUMO

Este trabalho descreve algumas contribuições para a implementação da instrumentação do Laboratório de Certificação de Componentes para Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica e o projeto, desenvolvimento e testes de conceito de um iluminador solar constante para espectro visível e um iluminador solar constante para o espectro ultravioleta. Estes dispositivos são fundamentais para os testes de certificação propostos no escopo do projeto do laboratório e preconizados pelas normas brasileiras. Os testes foram conduzidos para selecionar as melhores alternativas para a construção dos iluminadores e para executá-los foram desenvolvidas estruturas mecânicas de suporte e eletrônica de sensoriamento e condicionamento de sinal. O iluminador ultravioleta foi projetado como uma matriz com seções compostas de lâmpadas UV empilhadas e o iluminador visível como uma série de lâmpadas de iluminação de alta potência em um arranjo geométrico definido. Usou-se um radiômetro para avaliar a irradiância das fontes de luz visível e um fotodiodo de óxido de zinco para as fontes UV. Um espectrômetro dispersivo, dotado de grade de difração e CCD (*coupled charge device*), foi empregado para medir os espectros de emissão de radiação das fontes testadas, de modo a verificar a conformidade das fontes de luz e das montagens com as normas da Commission Electrotechnique Internationale (CEI).

Palavras chave: Iluminador solar contínuo, iluminador ultravioleta.

ABSTRACT

This work reports some contributions towards the implementation of the instrumentation of the Photovoltaic Solar Energy Systems Component Certification Laboratory and the project, development and concept tests of a constant, visible spectrum solar illuminator and a constant ultraviolet illuminator. These devices are vital to the certification tests proposed in the laboratory's project and foreseen in the Brazilian standards. The tests were conducted aiming to choose the best alternatives to the construction of the illuminators and to execute them the mechanical structure, along with electronic for sensing and signal conditioning, were developed. The UV illuminator was designed as an array made by sections with two UV lamps stacked, and the continuous illuminator was projected as several high power illumination lamps in a geometrical defined setup. A radiometer was used to evaluate the irradiance of the visible light sources and a zinc oxide photodiode was used in the UV ones. Also, a dispersive spectrometer, endowed with diffraction grating and CCD (coupled charge device) was employed to measure the emission spectra of every light source used, thus comparing with the standards of the Internacional Electro-technical Comission (IEC).

Keywords: Continuous solar illuminator. Ultraviolet illuminator.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Representação do Espectro Eletromagnético	20
Figura 2. O espectro solar.....	22
Figura 3. Irradiância solar na superfície do Sol e a 1 UA – Constante Solar	23
Figura 4. Piranômetro CMP-21 da empresa Kipp & Zonen	24
Figura 5. Semicondutor dopado absorvendo um fóton.....	27
Figura 6. Eficiências de conversão de células solares ao redor do mundo entre 1976 e 2013 para diferentes tecnologias fotovoltaicas	28
Figura 7. Células solares monocristalina (esquerda) e policristalina (direita)	30
Figura 8. Módulo solar de silício amorfo	31
Figura 9. Curva de potência de uma célula fotovoltaica	33
Figura 10. Projeto do iluminador UV completo (em cima, a esquerda), uma célula do iluminador (acima, a direita) e um conjunto de seções de duas lâmpadas UV (abaixo).	39
Figura 11. Seção do iluminador UV.	40
Figura 12. Espectrômetro USB2000.	41
Figura 13. Projeto da bancada de testes das lâmpadas UV.....	41
Figura 14. Fotodiodo TW30SX montado em suporte móvel unidimensional.....	42
Figura 15. Projeto do iluminador constante visível.	43
Figura 16. Perfil de alumínio estruturado ENGELEGHO de 40x80 mm.	44
Figura 17. Radiômetro instalado normal à lâmpada na primeira configuração de teste.	45
Figura 18. Setup do primeiro teste do iluminador contínuo visível.	46
Figura 19. Projeto da nova configuração de sensoriamento com o radiômetro.	47
Figura 20. Configuração de testes com radiômetro em suporte móvel voltado para baixo.	48
Figura 21. Lâmpada halógena OSRAM de 1000 W (esquerda) e holofote DTS (direita).	49
Figura 22. Montagem experimental com dois holofotes DTS.....	50
Figura 23. Prumo anexado ao radiômetro para alinhamento vertical.	51
Figura 24. Espectro da lâmpada UVA.....	52
Figura 25. Espectro da lâmpada UVC.	53
Figura 26. Espectro da superposição, sendo UVA (preto), UVC (verde) e UVA+UVC (vermelho).....	53
Figura 27. Uniformidade da iluminação da lâmpada UVA.	54
Figura 28. Uniformidade da iluminação da lâmpada UVC.....	55
Figura 29. Uniformidade da iluminação do conjunto, em vermelho, composto pelas lâmpadas UVA (preto) + UVC (verde).	55
Figura 30. Espectro de emissão da lâmpada de vapor metálico.	57

Figura 31. Gráfico da irradiância medida com a lâmpada HQI de 1000W, para o radiômetro posicionado a 45 cm (preto), 40 cm (vermelho), 35 cm (verde), 30 cm (azul) e 25 cm (anil) de altura relativa a lâmpada	58
Figura 32. Gráfico da irradiância medida no primeiro uso do holofote DTS. A linha vermelha marca o limite de uma Constante Solar.	59
Figura 33. Irradiância em função da abertura do foco do radiômetro DTS.	60
Figura 34. Irradiância medida para os focos: maximamente aberto (preto), médio (vermelho) e maximamente fechado (verde).	61
Figura 35. Irradiância medida para os holofotes DTS afastados de: 0 (preto), 1 (vermelho), 2 (verde), 3 (azul), 4 (anil) e 5 (magenta) polegadas.	62
Figura 36. Espectros das lâmpadas halógenas em seus holofotes.	63
Figura 37. Espectro da lâmpada halógena, sem filtro (preto) e com filtro azul 3/4 (azul).	64
Figura 38. Espectro da lâmpada halógena sem filtro (preto), com filtros: amarelo 1/4 (azul), amarelo 3/4 (verde) e amarelo 1 (vermelho).	65
Figura 39. Espectro solar A.M. 1.5.....	66
Figura 40. Detalhe do espectro A.M. 1.5 na faixa espectral de 300 nm a 900 nm.....	66

LISTAS DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1: Percentual de faixa de comprimento de onda e energia eletromagnética.....	20
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A.M. – Air Mass (massa de ar)

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CCD – *Coupled Charge Device* (Dispositivo de carga acoplada)

CEI/IEC – Commission Electrotechnique Internationale/International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)

COELBA – Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia

CZ – Czochralski

EVA – *Ethylene Vinyl Acetate* (Acetato de Vinil Etileno)

FEP – Fundação Escola Politécnica

HQI - Halogen Quartz Iodide (Iodeto de Quartzo Halógeno)

IFBA – Instituto Federal da Bahia

LABSOLAR – Laboratório de Certificação de Componentes para Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica

LABPAR – Laboratório de Parafinas

LaPO – Laboratório de Propriedades Óticas

LED – *Light Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz)

UA – Unidade Astronômica

UFBA – Universidade Federal da Bahia

UFRB – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

UV – Ultravioleta

Wp – Watt-pico

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	OBJETIVO GERAL.....	16
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.3.	JUSTIFICATIVA.....	16
2.	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1.	O SOL	18
2.1.1.	Características do Sol	18
2.2.	A RADIAÇÃO	19
2.2.1.	Radiação solar	19
2.2.2.	O espectro eletromagnético	20
2.2.3.	O corpo negro	21
2.2.4.	A constante solar.....	22
2.2.5.	Radiômetros	23
2.3.	COLETORES DE RADIAÇÃO SOLAR	24
2.3.1.	Coletor térmico	24
2.3.2.	Célula solar	25
2.3.2.1.	Histórico das células solares	25
2.3.2.2.	Semicondutores dopados.....	25
2.3.2.3.	Célula de silício	26
2.3.2.4.	A conversão fotovoltaica	26
2.3.2.5.	Células solares comuns	27
2.4.	INSTRUMENTAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	31
2.4.1.	Módulo fotovoltaico	32

2.4.2.	Baterias	34
2.4.3.	Moduladores de carga.....	35
2.4.4.	Inversor de corrente	35
2.4.5.	A energia fotovoltaica na matriz energética brasileira	36
2.5.	NORMAS E PADRÕES CEI/IEC	37
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1.	O ILUMINADOR SOLAR CONTÍNUO UV	38
3.2.	O ILUMINADOR SOLAR CONTÍNUO VISÍVEL	42
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1.	ILUMINADOR SOLAR CONSTANTE ULTRAVIOLETA	52
4.2.	O ILUMINADOR SOLAR CONSTANTE VÍSEL	56
5.	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	68
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1. INTRODUÇÃO

A luz do Sol é a principal fonte de energia do planeta Terra mas ainda é pouco explorada a sua captação direta pelo homem. Na captação direta, utiliza-se hoje a energia solar para a geração de calor e eletricidade, usando para tanto painéis ou concentradores térmicos e fotovoltaicos. Há painéis solares comerciais que apresentam rendimento energético acima de 20%, mas considerando que esta tecnologia já possui mais de 30 anos, este é um valor baixo. O Brasil possui um formidável potencial para o emprego da energia solar, com elevados valores de irradiância na maior parte de seu território, no entanto, não possui fabricantes nacionais de módulos fotovoltaicos, o que encarece ainda mais o processo de difusão desta tecnologia. Recentemente, dois laboratórios de pesquisa brasileiros, nos estados de São Paulo e Rio Grande do Sul, obtiveram credenciamento para certificar os componentes empregados em sistemas de energia solar fotovoltaica.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), órgão do Governo Federal que licencia, coordena e fiscaliza a produção e consumo de energia elétrica no Brasil, elaborou um grande projeto de diversificação da matriz energética brasileira, hoje apoiada predominantemente nas hidrelétricas e termelétricas. O convite aos diversos órgãos e centros de pesquisa foi publicado na Chamada 013/2011 e o projeto nacional resultante foi intitulado “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira”.

O projeto estratégico elaborado pelo Governo contempla diversas frentes de pesquisa e desenvolvimento, que foram distribuídas por universidades e centros de pesquisa por toda a nação, ligados aos seus agentes de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

A normatização dos componentes e processos necessários para o uso de energia elétrica advinda de módulos fotovoltaicos é crucial para o estabelecimento de um setor energético produtivo e dinâmico, regulado pela ANEEL e integrado à matriz elétrica brasileira. O Laboratório de Certificação de Componentes para Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica foi concebido para desempenhar esse importante papel de certificar

os componentes que estão aptos para as instalações fotovoltaicas brasileiras integradas a rede elétrica convencional.

O Laboratório é conveniado à Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia, a COELBA, e a Fundação Escola Politécnica, FEP. Sua sede está em construção no Parque Tecnológico da Bahia, em Salvador, e a equipe é composta de doutores, mestres e mestrandos da Universidade Federal da Bahia (UFBA), Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) e Instituto Federal da Bahia (IFBA). As atividades descritas neste trabalho foram realizadas na UFBA, mais precisamente no Laboratório de Propriedades Óticas (LaPO) e no edifício 02 do Núcleo Regional da Bahia (NRBA Petrobrás).

Uma vez instalado em sua sede, o Laboratório testará e certificará os diversos componentes que compõem uma instalação fotovoltaica: painéis, inversores de corrente, acumuladores, dentre outros. Para tal fim, são executados testes mecânicos, térmicos, elétricos e óticos para conhecer a performance do equipamento testado e verificar sua compatibilidade com as normas da Commission Electrotechnique Internationale (CEI ou IEC, em inglês), órgão internacional que estabeleceu normas e condutas para avaliação e certificação em sistemas fotovoltaicos.

Uma das características mais importantes de um painel fotovoltaico é sua performance quando submetido a iluminação constante e por isso há uma série de testes específicos para avaliar essa condição. Os principais instrumentos usados nessa etapa são os iluminadores solares constantes, nos faixas visível (VIS) e ultravioleta (UV) do espectro eletromagnético. Estes simulam, de forma controlada, condições encontradas na natureza e os módulos fotovoltaicos precisam suportá-las e manter a produção de eletricidade.

Este trabalho contempla a pesquisa e desenvolvimento dos protótipos de iluminadores constantes e seus testes de validação. Estes equipamentos irão dotar o Laboratório de Certificação de Componentes para Sistemas de Energia Fotovoltaica de sistemas capazes de avaliar a performance e durabilidade dos dispositivos fotovoltaicos quando expostos as condições naturais, bem como atestar sua geração de eletricidade e aferir a compatibilidade destas características com as normas técnicas.

1.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver e validar os protótipos de teste de conceito do iluminador solar constante no espectro visível e do iluminador solar constante no espectro ultravioleta para emprego em testes de painéis fotovoltaicos.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar, adquirir e montar estruturas de suporte para lâmpadas de luz visível, reatores, projetores e sensores de irradiância;
- Adquirir lâmpadas, reatores, projetores e holofotes para iluminação visível de alta intensidade;
- Projetar e montar estruturas de suporte para lâmpadas ultravioletas e reatores.
- Projetar, adquirir e montar estrutura de suporte para sensores UV;
- Projetar, desenvolver e montar circuito eletrônico de condicionamento de sinal para sensor de UV;
- Montar lâmpadas e sensores visível e UV em seus respectivos suportes;
- Adquirir espectros de emissão de radiação de cada fonte luminosa com espectrômetro;
- Testes de validação dos protótipos;
- Testes de performance dos protótipos;
- Análise de dados;
- Discussão e resultados.

1.3. JUSTIFICATIVA

A performance sob iluminação constante, visível e UV, é fundamental para a caracterização e certificação dos painéis fotovoltaicos, elementos principais dos sistemas de energia solar fotovoltaica. O iluminador visível e o iluminador UV são indispensáveis para se obter as condições previstas pelas normas da CEI. O Laboratório

de Certificação de Componentes para Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica fará uso extensivo desses equipamentos, que precisam ser cuidadosamente projetados.

A proposta deste trabalho é desenvolver e validar os conceitos e protótipos conceituais que serão empregados nos iluminadores visível e UV empregados pelo Laboratório quando totalmente operacional.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. O SOL

O Sol é a estrela mais próxima da Terra e que fornece energia para o planeta, estando a quase 150 milhões de quilômetros (1 Unidade Astronômica – UA). Por causa da enorme distância para outras estrelas, o Sol é a única estrela cujas características são conhecidas com bastante detalhamento.

2.1.1. Características do Sol

Massa

A massa solar pode ser conhecida a partir da Terceira Lei de Kepler, desprezando a atuação de outros corpos no Sistema Solar.

$$\frac{d^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2} \left(1 + \frac{m}{M} \right) \quad (1)$$

Onde o semi-eixo maior da órbita d é relacionado é relacionado com o período T em torno do Sol, sendo a massa de um planeta m , a massa do Sol M e a constante gravitacional universal $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$ discriminadas. A massa aproximada do Sol é $M = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$.

Raio

O diâmetro angular do disco do Sol na luz branca (ou natural) é de 32' de arco, quando medido da Terra, a 1 UA de distância. Assim é possível determinar que o raio médio do Sol é $R = 696.260 \text{ km}$.

Sabendo suas dimensões e massa, é possível determinar sua densidade média, $\rho = 1,408 \text{ g/cm}^3$, 40% maior que o valor da densidade da água, $1,0 \text{ g/cm}^3$. Também é possível saber o valor da aceleração da gravidade em sua superfície, $g_s = 274 \text{ m/s}^2$, aproximadamente 40 vezes a aceleração da gravidade da Terra, $g_T = 9,8 \text{ m/s}^2$.

2.2. A RADIAÇÃO

2.2.1. Radiação solar

A radiação solar é a fonte primária de energia da Terra. Todos os sistemas naturais do planeta dependem dela para se desenvolverem, mesmo que não a utilizem de forma direta. É fornecida à Terra anualmente uma quantidade de energia de $1,5 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$, o equivalente a dez mil vezes o consumo mundial de energia durante o mesmo período (ANEEL, 2005).

De toda a radiação que chega a Terra, 30% é refletida de volta ao espaço sem mudança no comprimento de onda e 47% é absorvida pelo planeta para aumentar sua temperatura. Os 23% restantes são absorvidos pelos elementos climáticos, como as nuvens e oceanos, fornecendo energia para os sistemas naturais (Matsuura & Picazzio, 2006).

O desenvolvimento físico que explica a radiação emitida pelo Sol que chega a Terra é baseado no conceito de energia radiante como um fluxo de fótons de energia dada pela equação:

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

Onde $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ é a constante de Planck, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ é a velocidade da luz no vácuo e λ é o comprimento de onda do fóton.

2.2.2. O espectro eletromagnético

O espectro eletromagnético está dividido em bandas ou faixas espectrais. A radiação visível ao olho humano possui comprimento de onda entre 380nm e 780nm. As radiações abaixo de 380nm são o ultravioleta, raios-x e raios gama, e acima de 780nm são infravermelho, micro-ondas e ondas de rádio, como mostra a Figura 1.

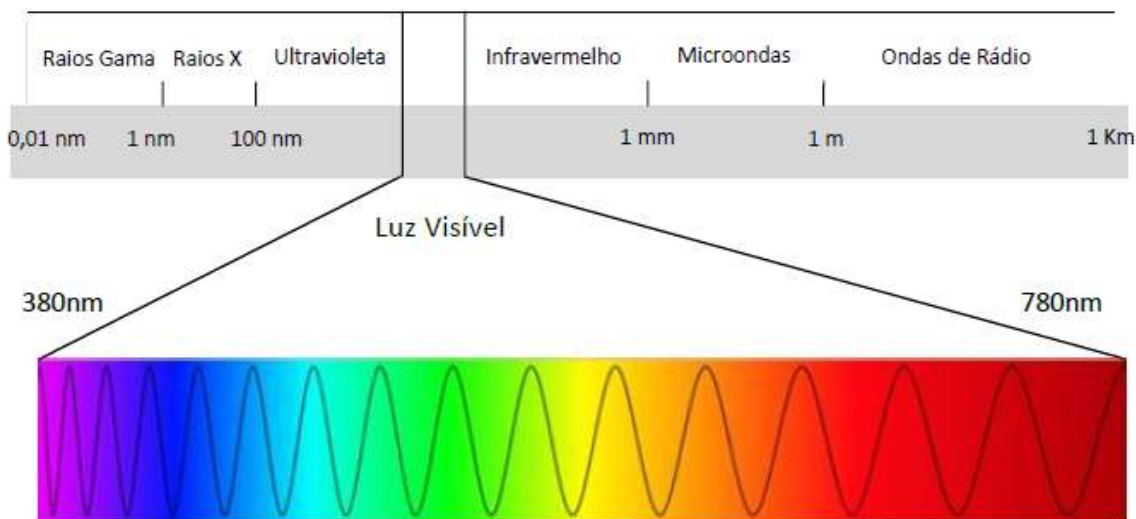


Figura 1. Representação do Espectro Eletromagnético.

O Sol emite quase toda sua radiação na faixa do espectro eletromagnético entre 350nm e 4000nm aproximadamente. A Tabela 1 mostra o percentual de cada faixa espectral componente da irradiância solar (Duffie & Beckman, 1980).

Tabela 1. Percentual de faixa de comprimento de onda e energia eletromagnética.

λ (nm)	0 – 380	380 - 780	780 - ∞
Percentual (%)	6,4	48,0	45,6
Energia (W/m^2)	87	656	623

Pode-se observar que a maior parte da radiação emitida pelo Sol está na faixa do visível e que a soma das energias é igual a Constante Solar, que logo será abordada.

2.2.3. O corpo negro

O conceito de corpo negro foi definido por Gustav R. Kirchhoff (1824 – 1887) como um objeto que absorve toda luz que incide sobre ele, e irradiando energia a mesma taxa que absorve se mantém a mesma temperatura e em equilíbrio termodinâmico.

Max Planck (1858 – 1947) demonstrou que a radiação do corpo negro é emitida na forma de fótons, a quantização do campo eletromagnético. A distribuição dos comprimentos de onda é calculada pela lei que leva seu nome:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{hc/\lambda kT} - 1 \right)} \quad (3)$$

B é a radiação espectral de corpo negro (ou radiação térmica), que não depende de direção nem é polarizada. $k = 1,38 \cdot 10^{-23} J/K$ é a constante de L. Boltzmann (1844 – 1906) e foi o próprio junto com J. Stefan (1835 – 1893) que descobriram empiricamente que o fluxo de energia, ou radiância I , de um corpo negro está relacionado à quarta potência da temperatura T do mesmo pela constante de Stefan – Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$):

$$I = \sigma T^4 \quad (4)$$

Assim, conhecendo a temperatura do corpo negro, é possível calcular toda a radiação emitida em todas as direções e comprimentos de onda.

O Sol é considerado um corpo negro e sua temperatura efetiva, que é a temperatura observada em sua superfície, é de 5.777 K, por isso possui uma cor branca e emite radiação na faixa visível do espectro eletromagnético, em acordo com a lei de Planck. É possível calcular o pico de emissão luminosa, que está em $\lambda_{max} = 551 \text{ nm}$, na faixa do visível, cor amarela. O espectro total de emissão do Sol pode ser visto na Figura 2.

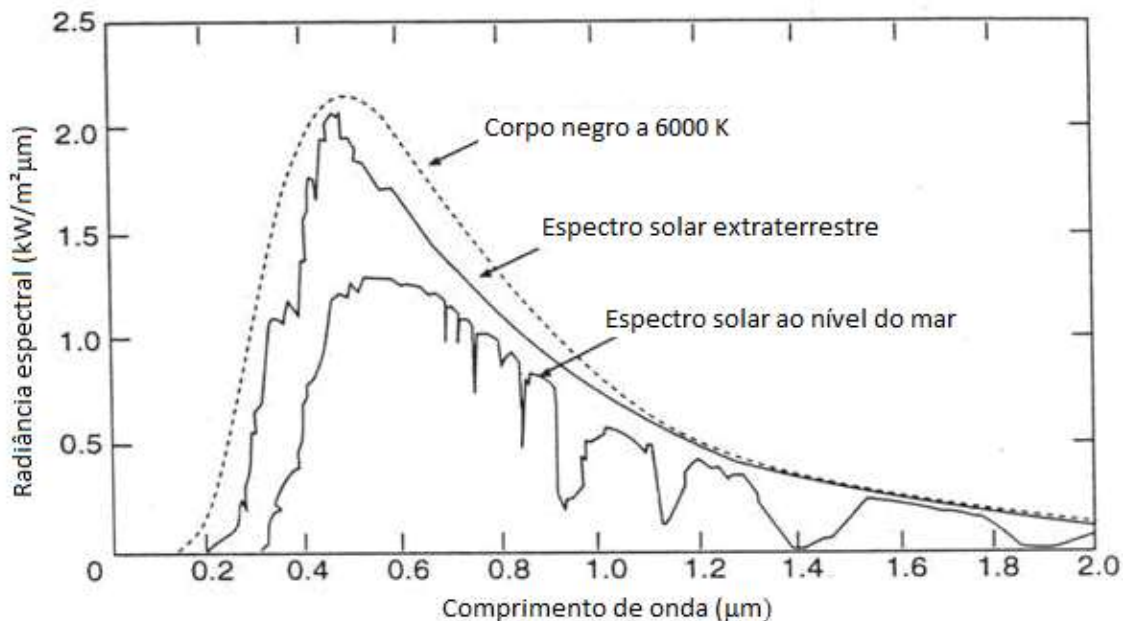


Figura 2. O espectro solar.

Fonte: (<http://fc.uni.edu.pe>)

2.2.4. A constante solar

A irradiância, ou intensidade da radiação, na superfície do Sol é cerca de $6,33 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$. Esse valor é menor quando medido da Terra devido ao espaço entre o Sol e o planeta, uma vez que a radiação espalhada decai com o quadrado da distância. Numa área de 1 m^2 , imediatamente fora da atmosfera terrestre, o valor da irradiância solar é de $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$, como pode ser visto na Figura 3 e essa grandeza é chamada de constante solar (Fröhlich *et al*, 1981).

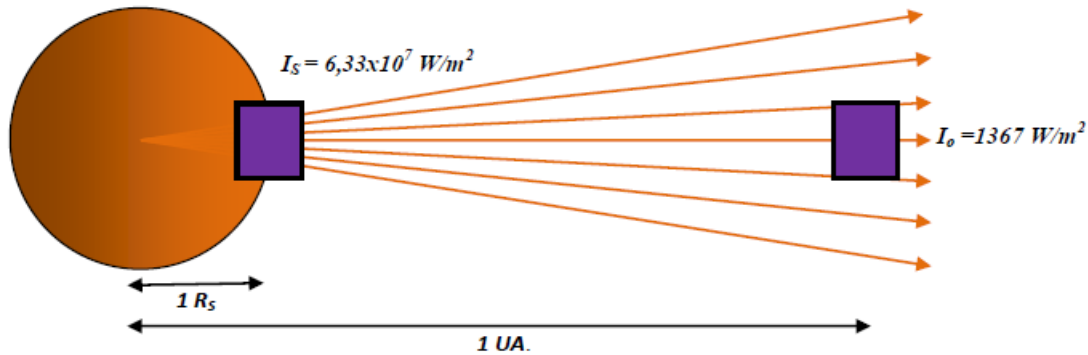


Figura 3. Irradiância solar na superfície do Sol e a 1 UA – Constante Solar.

A atmosfera terrestre exerce forte influência na quantidade de radiação solar que chega à superfície do planeta. Várias interações da radiação com a atmosfera diminuem o valor medido diretamente, como a absorção, difusão ou reflexão. Cada interação depende do ângulo de incidência, do comprimento de onda dos fótons e de que composto atmosférico está reagindo.

Radiação solar direta é a porção de energia que chega à superfície do planeta sem realizar nenhuma interação, estimada em 25% do total. 30% da radiação nem chega à superfície, sendo refletida de volta ao espaço ou para outro ponto da atmosfera. Há também difusões e espalhamentos da radiação, absorção de certas faixas espectrais por compostos moleculares e outros fenômenos que tornam a constante solar na superfície da Terra menor do que logo imediatamente fora da atmosfera. Pode-se estimar com confiança que a constante solar na superfície do planeta seja 1000 W/m^2 , para um dia claro com boa insolação.

2.2.5. Radiômetros

Os radiômetros são equipamentos que realizam a medição da radiação solar incidente na superfície terrestre (Souza, 2008). Neste trabalho foram usados piranômetros. Estes são equipamentos constituídos, em sua maioria, de termopilhas que possuem duas superfícies receptoras, uma branca e outra negra, e a radiação é determinada pela diferença de temperatura entre estas superfícies. Este aparelho mede a radiação global, recebendo energia de todo o hemisfério celeste, incluindo a radiação

difusa (Palz, 1981). A Figura 4 mostra um dos piranômetros usados neste trabalho, do fabricante Kipp & Zonen, modelo CMP-21.



Figura 4. Piranômetro CMP-21 da empresa Kipp & Zonen.

2.3. COLETORES DE RADIAÇÃO SOLAR

Coletores solares são dispositivos capazes de captar a energia solar e convertê-la em outra forma de energia, geralmente térmica ou elétrica, sendo estes últimos chamados de células solares.

2.3.1. Coletor térmico

Os coletores térmicos transferem a energia captada do Sol na forma de calor para um fluido (Aldabó, 2002). Assim, são o principal equipamento de uma planta de aquecimento solar, sejam coletores planos ou concentradores. Os coletores planos transferem a energia térmica para um fluido que passa em seu interior e este conduz o calor. Os concentradores são baseados em superfícies refletoras curvas que concentram os raios solares num único ponto, o foco, onde está uma tubulação com o fluido que é aquecido.

2.3.2. Célula solar

A célula solar é o componente básico da conversão de energia fotovoltaica e onde ocorre o efeito fotovoltaico. É um dispositivo semicondutor do estado sólido, usualmente dopado, que converte luz em eletricidade. As células pertencem à família dos fotodiodos, diodos emissores de luz (LED's), transistores e circuitos integrados.

Histórico das células solares

Alexandre E. Becquerel, em 1839, descobriu o efeito fotoelétrico: quando se incide luz sobre alguns materiais, estes passam a gerar corrente elétrica. Smith, em 1873, descobriu que o Selênio produz fotocorrente e as pesquisas com este material e com óxidos de cobre levaram a produção de células fotovoltaicas em 1914 com até 2% de rendimento. Em 1941 foi desenvolvida a primeira célula fotovoltaica com junção p-n crescida, e em 1954, Chapin, Fuller e Pearson produziram as primeiras células solares pelo processo de difusão térmica de dopantes.

Semicondutores dopados

Semicondutores são materiais que alteram sua condutividade elétrica quando captam energia externa, passando de isolantes para condutores. Os semicondutores liberam elétrons quando recebem energia externa e o material passa a conduzir corrente elétrica, diferentemente dos condutores naturais que possuem átomos com elétrons livres para condução elétrica, e dos isolantes naturais que não possuem elétrons livres nem permitem que elétrons ligados se tornem livres.

De forma geral todos os elementos da família 4A da Tabela Periódica podem ser usados para desenvolver dispositivos eletrônicos semicondutores, mas o silício ainda é o mais usado por causa de suas propriedades físicas, como a capacidade de formar óxidos, que são muito úteis, e a facilidade em dopá-lo para incrementar suas capacidades eletrônicas.

Os dispositivos eletrônicos são compostos por semicondutores dopados em camadas tipo-n e tipo-p que após unidas criam zonas negativas e positivas no material,

respectivamente. As camadas são separadas por uma zona de depleção onde não há cargas livres, mas sim um potencial de barreira, também conhecido como tensão de barreira, devido ao fato das cargas positivas e negativas terem difundido e se combinado com os íons do material, se fixando nesta região que margeia a junção, resultando em uma zona de carga neutra.

Célula de silício

Numa célula de silício cristalino a maior parte do material é composto de silício com pequena dopagem por boro, conferindo um caráter tipo-p. Uma fina camada na parte frontal é dopada fracamente com fósforo, obtendo caráter tipo-n. O resultado é a formação da junção p-n na área de contato entre as camadas. A carga dessa zona é neutra e surge um campo elétrico orientado da parte tipo-n para a parte tipo-p. A camada tipo-n deve ser fina o suficiente para permitir a passagem de luz.

O efeito fotovoltaico que ocorre na célula solar ocorre no estado sólido, ou seja, sem perda de materiais ou emissão de partículas carregadas. Há diferentes tecnologias de painéis fotovoltaicos com diferentes taxas de conversão ou eficiência, que é definida como a razão entre a energia solar radiante e a energia elétrica convertida.

A conversão fotovoltaica

Os fótons da luz possuem energia bem definida e chegam a zona de depleção ao atravessar a camada tipo-n. Se essa energia $\epsilon = h\nu$ for igual ou superior a energia de gap do material (energia da banda proibida que separa a camada de valência da camada de condução) ocorre uma interação e um par elétron – buraco é criado, como ilustra a Figura 5. Os elétrons livres se deslocam para o lado negativo e os buracos para o lado positivo, sob efeito do campo elétrico da junção, e empurrando cargas semelhantes em direção aos contatos ôhmicos criando uma corrente elétrica.

Quanto mais fótons possuírem energia para criar cargas na célula fotovoltaica, maior a energia elétrica gerada. No caso do silício, o comprimento de onda do fóton para que a energia seja igual a barreira de gap do silício é 1100nm. Fótons com comprimento

de onda maior apenas aquecem a célula, pois são absorvidos como fônons, aumentando a energia cinética da rede.

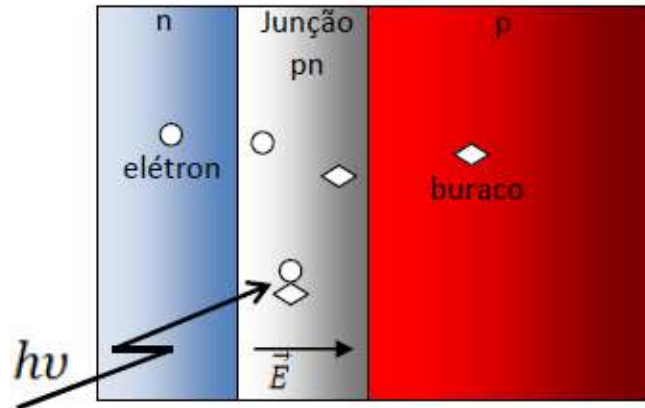


Figura 5. Semicondutor dopado absorvendo um fóton.

Células solares comuns

Os semicondutores são os materiais mais usados para fabricação de células solares. Alguns exemplos são: silício (*Si*), arseneto de gálio (*GaAs*), disseleneto de cobre e índio (*CuInSe₂*) e o telureto de cádmio (*CdTe*). O desenvolvimento de filmes finos, em especial o CIGS e o silício amorfo vem crescendo ultimamente, mesmo com o rendimento inferior aos anteriores pela facilidade de produção em massa e deposição em grandes superfícies.

O *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), laboratório norte-americano especializado em pesquisa de energias renováveis, publica um comparativo onde apresenta a evolução temporal da eficiência das várias tecnologias usadas em células fotovoltaicas. Este trabalho é atualizado regularmente, acompanhando os desenvolvimentos mais recentes da indústria, que são avaliados por laboratórios e agências certificadas. A última atualização publicada consta de 2013 e está representada na Figura 6.

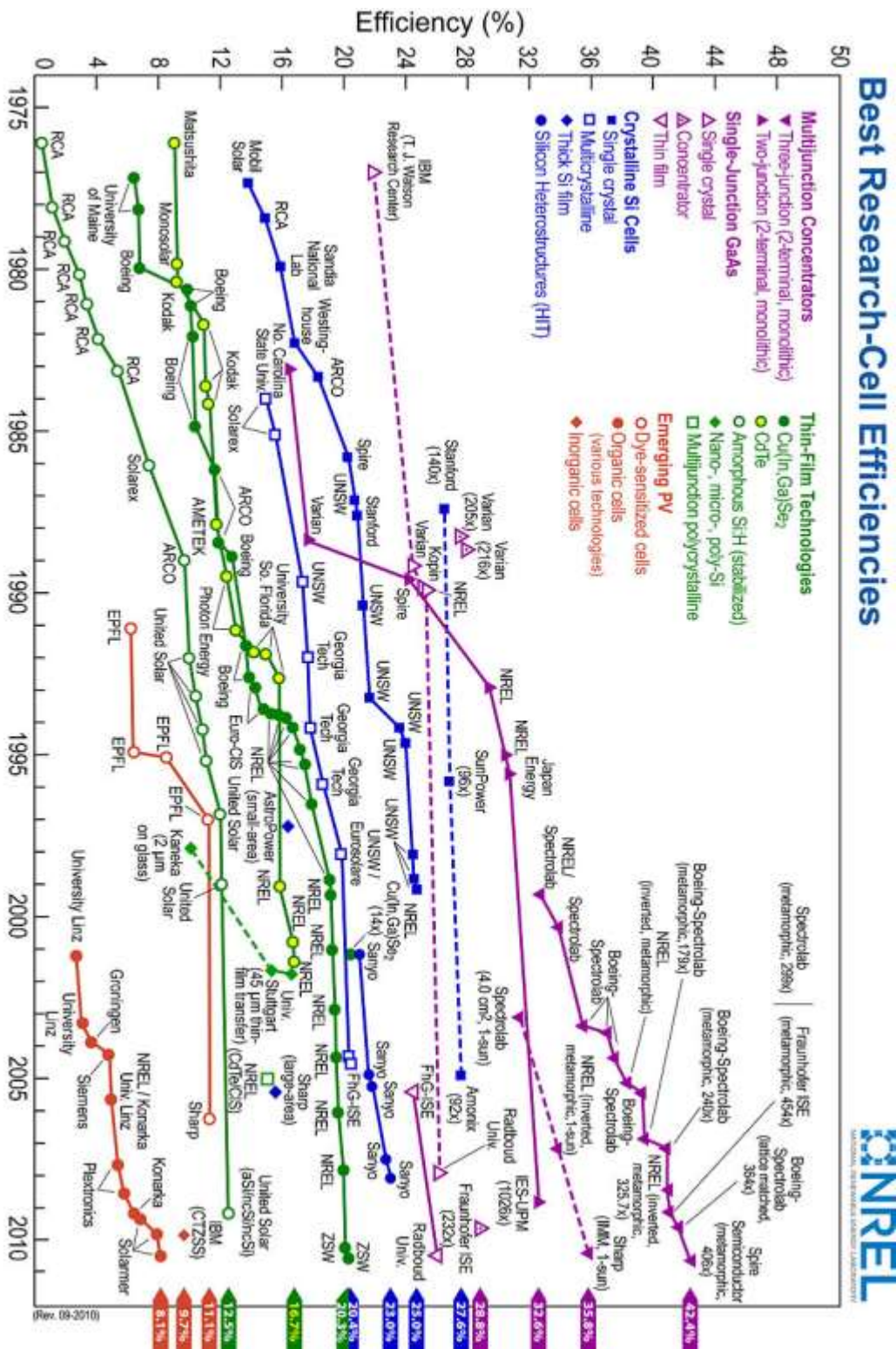


Figura 6. Eficiências de conversão de células solares ao redor do mundo entre 1976 e 2013 para diferentes tecnologias fotovoltaicas.

Fonte: National Renewable Energy Laboratory – www.nrel.gov.

As células de multijunção apresentam os maiores rendimentos, chegando a até 44% devido às diferentes composições de cada junção, que absorvem energia em diferentes faixas espectrais. Contudo, devido ao elevado preço de fabricação, não são competitivas comercialmente, sendo desenvolvidas para emprego em satélites e outras aplicações militares.

A célula de arseneto de gálio (*GaAs*) possui algumas características muito interessantes, como uma faixa de absorção que se estende sobre grande parte do espectro solar e grande capacidade de conversão energética, além de que seu material de base pode formar ligas metálicas facilmente. Isso permite eficiências acima de 25%. Entretanto, assim como as células de multijunção, seu custo benefício é baixo e seu uso mais restrito.

As células solares de silício cristalino são as de maior rendimento dentre as comerciais, excursionando entre 16 – 27%, sendo o silício monocristalino um pouco melhor. O monocristal é crescido a partir do silício de grau eletrônico (99,99 – 99,9999% de pureza) fundido a altas temperaturas e pressões em reatores controlados, onde a velocidade de crescimento do cristal é bastante lenta. Quando uma semente do cristal é colocada sobre a camada de silício derretido e erguida lentamente, o silício antes derretido se solidifica seguindo o padrão do cristal. Esse é o processo Czochralski ou CZ (Ferrazza, 2003).

A célula de silício policristalino é um pouco menos eficiente, em torno de 20%, do que a sua correspondente monocristalina em função da sua estrutura menos regular e com mais imperfeições (Ferrazza, 2003) (Falcão, 2005). O processo de fabricação é similar, mas sem crescimento em torno de uma célula cristalina, e sim uma solidificação unidirecional do silício fundido, permitindo a formação de defeitos na rede. Células solares de silício mono e policristalino podem ser vistas na Figura 7.

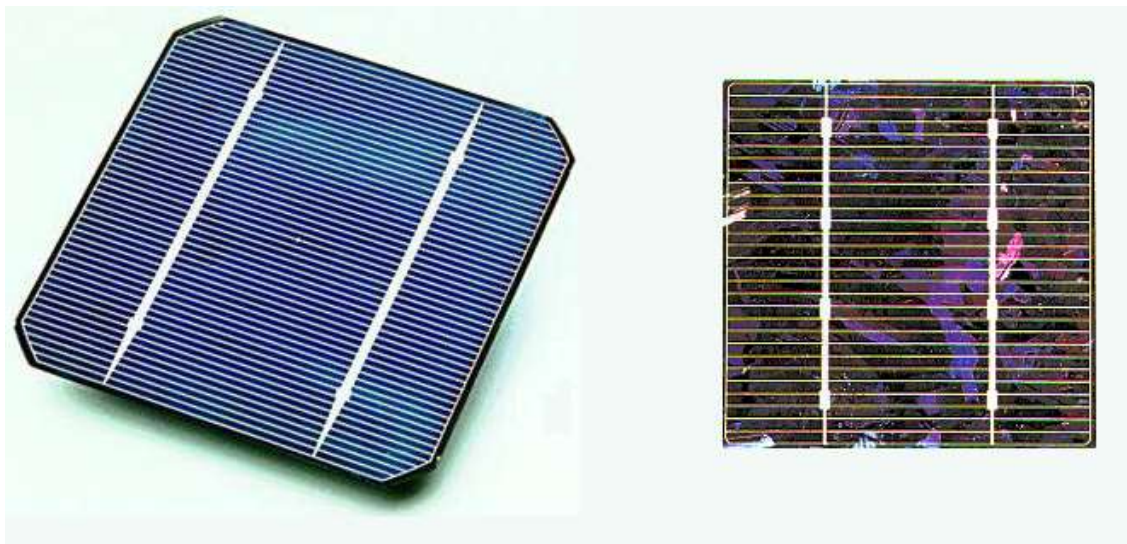


Figura 7. Células solares monocristalina (esquerda) e policristalina (direita).

Fonte: Adaptado de (Teodoro da Silva, 2010).

As células de silício amorfo ($a - Si$) são as mais baratas e possuem menor eficiência quando comparadas com o silício cristalino, em torno de 13%. São formadas por películas muito finas, podendo ser depositadas em substratos variados, como vidro ou plástico, e seu processo de fabricação não requer altas temperaturas e pressões nem é demorado como a produção de silício cristalino. Assim, abre-se a perspectiva de emprego dessa tecnologia em larga escala, em especial pelos profissionais de construção civil e arquitetura. Um módulo fotovoltaico que emprega esta tecnologia pode ser visto na Figura 8.

Entretanto, as vantagens que advém da facilidade de produção e implementação do silício amorfo são contrabalanceadas pelo efeito Staebler–Wronski. Os dois pesquisadores descobriram que o silício amorfo hidrogenado ($a - Si:H$), a forma mais usada dessa tecnologia, sofre defeitos induzidos pela própria luminosidade incidente nos painéis. Com o passar do tempo, a eficiência de conversão elétrica diminui sensivelmente e assim, a durabilidade dos módulos é bastante reduzida quando comparada aos de silício cristalino. É possível reverter o processo através do aquecimento das células solares, no entanto, para módulos comerciais esse procedimento se torna inviável. O efeito Staebler–Wronski é um dos maiores empecilhos para a popularização dos painéis fotovoltaicos de silício amorfo.



Figura 8. Módulo solar de silício amorfo.

As células solares de telureto de cádmio ($CdTe$) têm eficiência (8-10%) e baixo custo, se comparadas com as concorrentes de silício cristalino e são fabricadas por tecnologia de filmes finos, como o silício amorfo. O telureto de cádmio já é empregado nas calculadoras eletrônicas sem bateria e pequenos dispositivos domésticos há algum tempo, mas é relativamente nova a sua aplicação em geração de energia solar elétrica. Os elementos envolvidos nessa tecnologia são metais pesados e tóxicos, principalmente o cádmio. Por esta razão, é necessário cautela para se investir na produção em massa desse tipo de célula. (Falcão, 2005) (Bonnet, 2003).

Outro filme fino, o disseleneto de cobre e índio ($CuInSe_2$) ou CIS vem ganhando espaço nas pesquisas e mercado devido à relativa facilidade de fabricação da célula, de sua eficiência considerada alta e da possibilidade de integração arquitetônica. As ligas CIGS, de $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$, também se mostram promissoras ao apresentar boa estabilidade e eficiência acima de 13% em ambiente terrestre e espacial, e já são esperados resultados em torno de 25% (Raul & Schock, 2003).

2.4. INSTRUMENTAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para a instalação de um sistema fotovoltaico é necessário um aparato elétrico eletrônico além dos módulos fotovoltaicos. São equipamentos como moduladores de

carga, baterias, inversores e outros que dependem se o sistema opera conectado à rede elétrica convencional (*on Grid*) ou isolado (*standalone*).

Os sistemas isolados são aqueles onde toda a produção fotovoltaica é armazenada ou consumida na própria localidade, sem a participação das concessionárias de energia elétrica. Além das pessoas que desejam instalar módulos fotovoltaicos por conta própria em suas propriedades, os sistemas *standalone* são empregados para a geração de energia elétrica em localidades remotas que não são cobertas pela rede elétrica convencional. Para a instalação isolada são necessários módulos fotovoltaicos, baterias ou acumuladores, moduladores de carga e inversores de corrente contínua para corrente alternada.

Os sistemas *on grid* inserem os módulos fotovoltaicos na rede elétrica convencional, tornando cada instalação uma pequena usina geradora de eletricidade que fornece energia elétrica ao sistema integrado nacional. O excedente ao consumo local é vendido a concessionária local de energia elétrica a uma tarifa pré-determinada; bem como se a produção fotovoltaica não atender a demanda local, o déficit é fornecido pela rede convencional. Para esses sistemas são instalados módulos fotovoltaicos, inversores de corrente DC – AC e medidores de energia bidirecionais.

De maneira geral, a maioria dos sistemas fotovoltaicos é composta por:

2.4.1. **Módulo fotovoltaico**

Elemento mais importante do sistema, é o responsável pela conversão elétrica. As células solares fotovoltaicas são agrupadas em série para formar os módulos e estes são agrupados em matrizes (*arrays*) para aumentar a produção fotovoltaica. Em cada painel as células são protegidas com vidro temperado na superfície por onde incidem os raios solares e com um plástico EVA (*ethylene vinyl acetate*) na parte traseira (Du Pont, 2010). O painel é envolvido numa estrutura para garantir sua robustez e fixação, geralmente de alumínio anodizado para proteger contra oxidações.

Os painéis podem ser conectados em série ou em paralelo, sendo que a primeira opção aumenta a tensão do conjunto e a segunda aumenta a corrente elétrica gerada.

O formato matricial é comum nas instalações, com vários módulos ligados em série e estes conjuntos interligados em paralelo, como linhas e colunas numa matriz.

Para gerar potência útil é necessário coexistir tensão entre os terminais e corrente atravessando carga. No entanto, as variações atmosféricas interferem nos valores de tensão e corrente, que são correlacionadas entre si. Uma mudança na insolação produz uma variação na corrente elétrica e uma alteração de temperatura gera uma variação na tensão entre os terminais. Avaliando essas condições, e a curva de potência de uma célula fotovoltaica na Figura 9, conclui-se que há apenas um ponto onde a potência gerada é máxima.

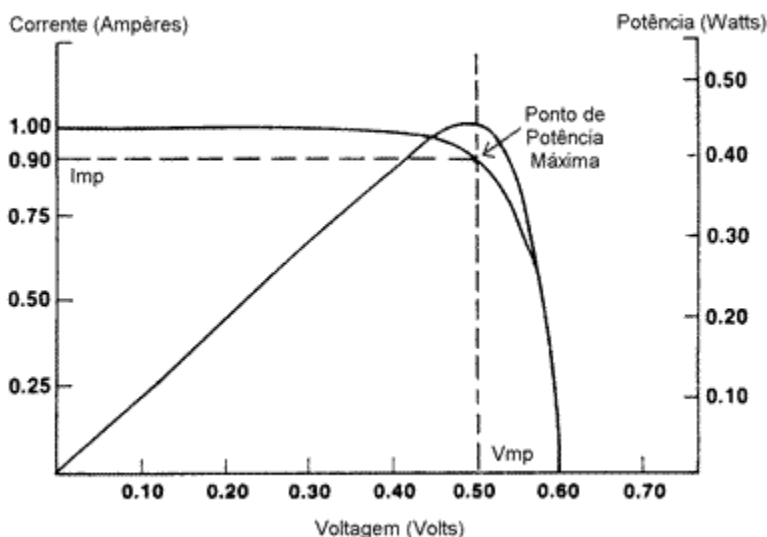


Figura 9. Curva de potência de uma célula fotovoltaica.

Fonte: (Creserb – www.creserb.cepel.br)

No ponto onde a potência é máxima, referida como P_{max} , estão os valores de tensão e corrente máxima desejada, V_{mp} e I_{mp} respectivamente. O painel está em curto circuito quando a corrente é a máxima permitida, I_{sc} , e em circuito aberto quando a tensão é máxima, V_{oc} . Em ambos os casos a potência gerada é nula.

Além da eficiência, esses são os principais parâmetros usados pelos fabricantes de módulos fotovoltaicos para caracterizar seus produtos. A eficiência é calculada como a razão entre a potência máxima do painel (P_{max}) (medida sob irradiância de 1000 W/m^2

e a temperatura de 25° Celsius) e o produto entre a irradiância local (I) e a área do painel sob iluminação (A), ou seja:

$$\eta = \frac{P_{max}}{I \cdot A} \quad (5)$$

Os módulos fotovoltaicos têm eficiência relativamente baixa em comparação ao custo financeiro e energético de sua fabricação. Por conta disso, o investimento realizado na compra de um módulo demora alguns anos para si pagar, a depender das tarifas e possíveis incentivos locais. Felizmente, a vida útil de um painel fotovoltaico é longa, cerca de 25 anos, com perdas de eficiência em torno dos 10% ao final desse período. Após esse prazo, o painel pode ser reciclado e o processo consiste da remoção e troca da estrutura que o contem: vidros, metal, EVA, renovando o uso do módulo por mais 20-25 anos. Em princípio, esse processo pode ser feito por até três vezes, totalizando 75 anos de produção fotovoltaica, segundo alguns fabricantes. A energia consumida para fabricar o módulo é substancial, mas comparada com a eletricidade produzida ao longo de sua vida útil e ao fato dessa energia não mais poluir o meio ambiente, o saldo energético é bastante positivo. Assim, o investimento vale a pena quando considerado o longo prazo.

2.4.2. Baterias

A bateria no escopo da energia fotovoltaica tem três funções:

- Armazenar a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos;
- Fornecer a energia que os sistemas conectados precisem, como uma casa ou fábrica por exemplo.
- Estabilizar as tensões no sistema elétrico. A bateria pode absorver picos de tensão, protegendo os circuitos de eventuais danos causados por altas tensões.

As baterias passam por ciclos de carga e descarga irregulares, uma vez que dependem das condições de geração fotovoltaica para serem carregadas e do consumo para serem descarregadas, executando ciclos diários e ciclos sazonais. Um ciclo diário

pode variar de superficial, com profundidade de ciclagem em torno de 15%, até profundo, com um afundamento de 80%, e essa contínua variação interfere na vida útil da bateria.

A bateria de chumbo-ácido é a mais utilizada atualmente, por ser bem conhecida e possuir uma boa relação custo benefício e disponibilidade. Essa bateria é eletroquímica, ou seja, converte a energia elétrica em energia química na carga e reverte o processo na descarga. Infelizmente, as tecnologias mais indicadas ainda são muito caras para implementação em larga escala e, portanto, tem se investido em adaptações de baterias de chumbo-ácido para os requerimentos da energia solar.

É preciso observar o efeito de temperatura nas baterias. Em temperaturas baixas, a capacidade de carga diminui, em função do aumento da resistividade do eletrólito, e em altas temperaturas ocorre corrosão irreversível, danificando e envelhecendo este dispositivo. Como no Brasil as temperaturas estão geralmente entre 25° e 32° e a alta insolação permite produção de energia fotovoltaica na maior parte do dia, as baterias tendem a estar em sobrecarga, o que aumenta a temperatura interna e acelera a oxidação (Copetti & Macagnan, 2007).

2.4.3. **Moduladores de carga**

São dispositivos de controle e segurança do sistema fotovoltaico. Os moduladores de carga controlam a carga e regulam a descarga das baterias, supervisionando-as ao longo do tempo; impedem que os painéis fotovoltaicos de fonte de corrente a carga resistiva durante a noite e protegem contra inversão de polaridade e falhas no sistema como um todo. Em caso de falha, o modulador desarma e emite alerta ao operador.

2.4.4. **Inversor de corrente**

Como a corrente gerada pelos painéis fotovoltaicos é corrente contínua (CC) e as instalações elétricas modernas consomem corrente alternada (CA), o sistema solar precisa de um dispositivo que faça a conversão CC – CA. O inversor de corrente se encarrega disso, podendo gerar tensões industriais ou residenciais de 127 V e 220 V. Há perdas nessa conversão, e por isso são desenvolvidas pesquisas e inovações visando

melhorias na conversão com máxima conservação da energia elétrica para o usuário final.

2.4.5. **A energia fotovoltaica na matriz energética brasileira**

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica atualmente em operação são uma parcela mínima das já poucas instalações de energia solar. Além dos valores pouco convidativos, a falta de normas e procedimentos padronizados e de certificação nacional dos componentes, que só começou a ser feita em algumas instituições isoladamente, afastou o investimento nesse setor.

O atual modelo energético brasileiro está dominado pelas hidrelétricas e termoelétricas, que causam grandes impactos ambientais e são dependentes de condições meteorológicas e econômicas favoráveis. Numa sociedade globalizada e dinâmica como a brasileira, depender de um elemento natural sujeito a escassez, as chuvas, e de outro intimamente ligado a *commodity* mais importante do mundo, o petróleo, representa uma vulnerabilidade na capacidade de geração elétrica e compromete o desenvolvimento econômico do país.

O projeto da ANEEL em que o Laboratório de Certificação está inserido visa difundir o emprego de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica convencional, tornando a energia solar fotovoltaica parte da matriz primária de produção de energia elétrica. Apesar de não se almejar tornar a matriz majoritariamente fotovoltaica, essa diversificação é vital para salvaguardar os setores produtivos e a população de eventuais dificuldades naturais ou econômicas que possam afligir a geração de energia elétrica.

Além do Laboratório de Certificação, que deve centralizar os esforços para certificar componentes de sistemas fotovoltaicos, o projeto estratégico da ANEEL contempla também: a construção de uma usina solar de 1MWp integrada à rede nacional e uma estação solarimétrica para monitoramento, em Pernambuco; desenvolvimento de tecnologia nacional para conversores eletrônicos de potência; estudos de viabilidade e incentivo à energia solar fotovoltaica e a formação de recursos humanos para laborar com as atuais e pesquisar novas tecnologias no setor.

2.5. NORMAS E PADRÕES CEI/IEC

A CEI/IEC (Commission Electrotechnique Internationale em francês ou International Electrotechnical Commission em inglês) estabeleceu padrões internacionais para a avaliação, caracterização e certificação de módulos fotovoltaicos, iluminadores solares, inversores de corrente, dentre outros equipamentos que fazem parte dos sistemas de geração de eletricidade por efeito fotoelétrico. Procedimentos de segurança dos equipamentos e pessoas também são contemplados por essas normas, bem como testes de durabilidade e suscetibilidade a acidentes dos dispositivos e instalações. As normas IEC 61215:2005, IEC 61646:2008, IEC 61730-2:2004 e IEC 60904-9:1995 são algumas das mais importantes e que o Laboratório de Certificação de Componentes para Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica visa atender primariamente.

A norma IEC 61215:2005 estabelece os padrões a serem seguidos para caracterizar e certificar painéis fotovoltaicos de silício cristalino de uso terrestre. Seus procedimentos cobrem uma variada gama de testes, desde inspeções visuais até a determinação de sua performance em variadas condições meteorológicas, passando por análises de dissipação de calor e de materiais suscetíveis a degradação por exposição à radiação ultravioleta.

A norma IEC 61646:2008 estabelece os padrões a serem aplicados na caracterização e aprovação de painéis fotovoltaicos de filmes finos de uso terrestre. Mesmo com outra tecnologia em foco, esta norma segue os mesmos rigores da IEC 61215:2005 e utiliza uma metodologia similar.

O conjunto dos procedimentos e parâmetros necessários para a certificação de segurança dos módulos fotovoltaicos é coberto na norma IEC 61730-2:2004. Ela descreve os elementos ligados aos módulos fotovoltaicos que podem oferecer riscos as pessoas e como executar os testes necessários para certificar o equipamento quanto a segurança.

A norma IEC 60904-9:1995 estabelece os requerimentos necessários para o desenvolvimento dos iluminadores solares que são usados na certificação de células e módulos fotovoltaicos. Também classifica os simuladores em classes de acordo com sua performance e determina a documentação necessária para estes equipamentos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma pesquisa bibliográfica foi conduzida com o intuito de levantar dados sobre as pesquisas recentes na área, o estado de arte atual e seus resultados. A partir desse ponto, como o projeto do Laboratório de Certificação (LABSOLAR) contempla a elaboração de dois protótipos de teste de conceito dos iluminadores solares contínuos no visível e no ultravioleta.

3.1. O ILUMINADOR SOLAR CONTÍNUO UV

As normas IEC 61215 e IEC 61646 preconizam testes com os painéis fotovoltaicos sob iluminação UV contínua para condicionamento prévio aos testes de ciclo térmico e de humidade e congelamento, bem como para avaliação da degradação de componentes suscetíveis a desgaste sob a luz ultravioleta. Para tanto, o iluminador UV deve fornecer 15 KWh/m^2 no espectro entre 280 e 385 nm, sendo que pelo menos 5 KWh/m^2 devem estar na faixa espectral de 280 a 320 nm. A radiação deve ser uniforme e iluminar a superfície ($2 \times 2 \text{ m}^2$) dos módulos fotovoltaicos por completo.

Infelizmente, uma única fonte de luz ultravioleta contemplando as faixas espectrais do UVC, UVB e UVA simultaneamente, é pouco viável técnica e financeiramente. Exemplo disso é a lâmpada de deutério, que fornece iluminação em todos os comprimentos – do ultravioleta ao infravermelho – mas além de custosa, somente opera em alta tensão e requer que sejam projetados filtros de elevada eficiência para impedir a transmissão dos comprimentos de onda acima de 380 nm. Sendo a alternativa mais interessante, decidiu-se pela construção de um iluminador UV modular ($0.4 \times 0.4 \text{ m}^2$), construído a partir de n réplicas de uma célula de iluminação feita com um conjunto de pelo menos duas lâmpadas, cada uma delas responsável por uma determinada faixa no espectro ultravioleta.

O projeto do iluminador contínuo UV foi desenvolvido para ser composto de uma superfície de apoio onde as lâmpadas são dispostas numa estrutura celular, com cada célula composta de seções com duas lâmpadas empilhadas, uma emitindo UVA e a

seguinte UVC. A uniformidade da irradiância espectral é garantida através da disposição das células com espaçamento determinado experimentalmente. O projeto do iluminador UV pode ser visto na Figura 10.

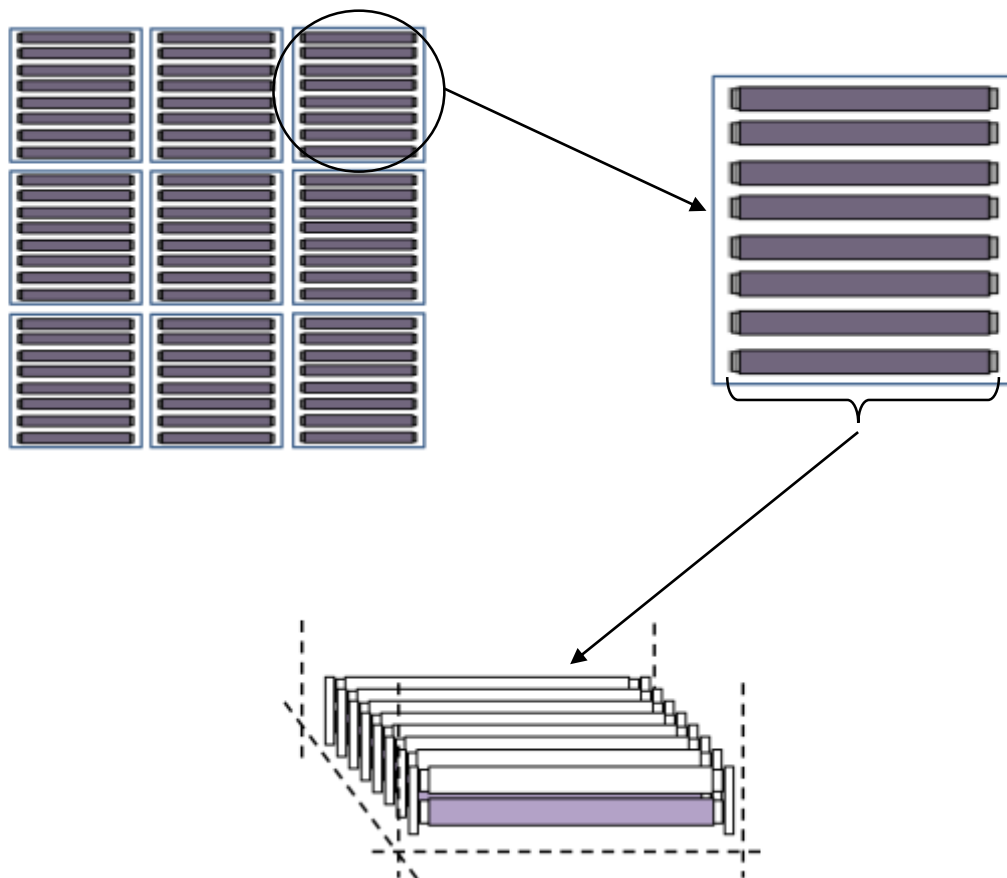


Figura 10. Projeto do iluminador UV completo (em cima, a esquerda), uma célula do iluminador (acima, a direita) e um conjunto de seções de duas lâmpadas UV (abaixo).

Uma seção foi montada de acordo com o projeto, com duas lâmpadas ultravioletas sobrepostas, sendo a lâmpada UVA disposta anteriormente em relação à lâmpada UVC, uma vez que a transmitância desta última é absoluta em relação ao espectro da lâmpada UVA. A montagem realizada pode ser vista na Figura 11.

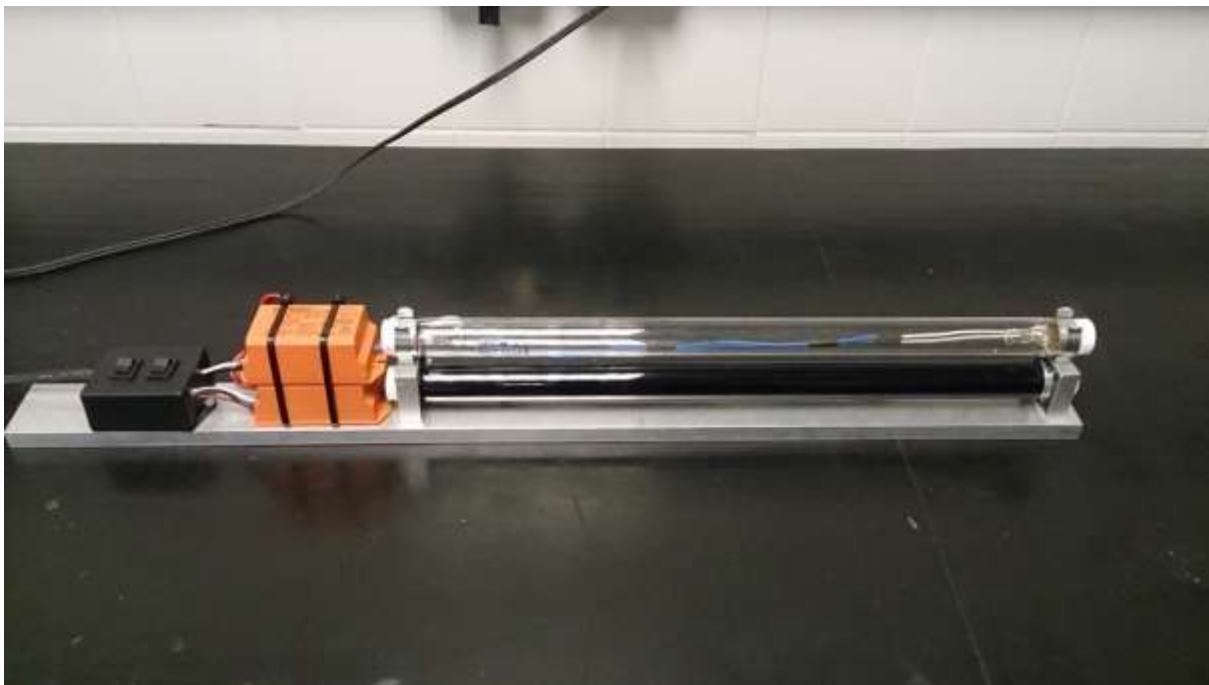


Figura 11. Seção do iluminador UV.

Para determinar o espectro de emissão do conjunto e atestar a viabilidade técnica da montagem, os espectros de emissão de cada lâmpada foram medidos separadamente, para em seguida, ser medido o espectro de emissão do conjunto, já na configuração de célula de emissão UV. Para executar essa medida foi utilizado um espectrômetro dispersivo baseado em CCD (Charge-Coupled Device) da Ocean Optics, modelo USB2000, que afere intensidades de radiação na faixa de 190 nm a 800 nm, com resolução de 0,3 nm. Esse modelo, que pode ser visto na Figura 12, é ideal para o uso neste projeto, pois contempla a faixa ultravioleta e visível do espectro eletromagnético.



Figura 12. Espectrômetro USB2000.

Para testar a uniformidade do campo de radiação das lâmpadas, e assim validar o conceito, foi projetada uma bancada de testes que acomodaria um sensor disposto acima da montagem. Este projeto pode ser visto na Figura 13.

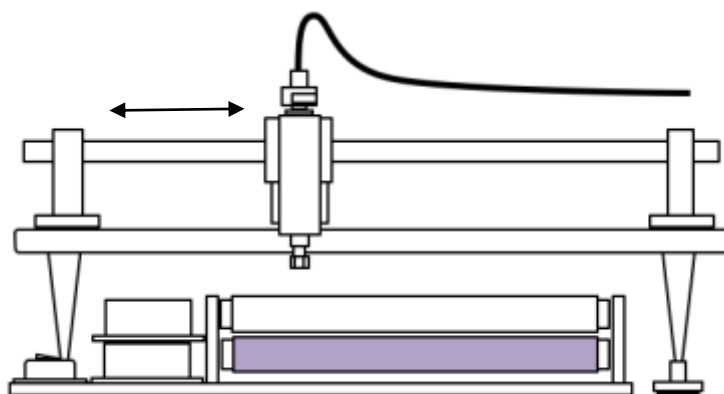


Figura 13. Projeto da bancada de testes das lâmpadas UV.

O sensor escolhido para o teste de uniformidade do campo de iluminação foi um fotodiodo de óxido de zinco, modelo TW30SX, da empresa SG-LUX. De acordo com o projeto, este fotodiodo foi montado sobre uma plataforma móvel em um eixo, de forma a acompanhar as lâmpadas longitudinalmente. O sistema pode ser visto na Figura 14, já montado sobre as lâmpadas.

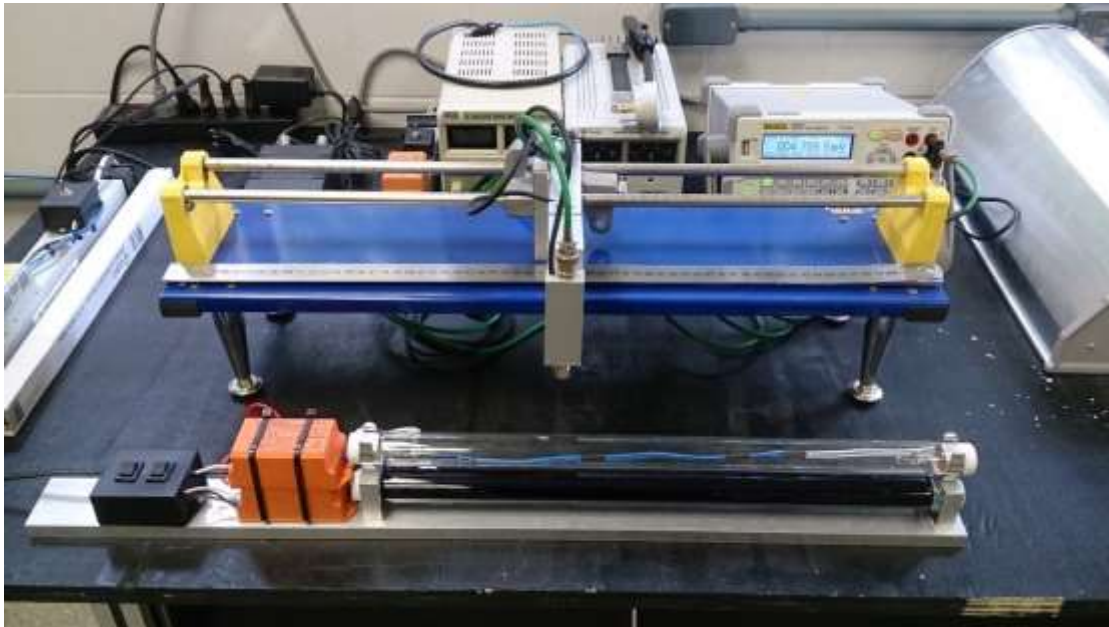


Figura 14. Fotodiodo TW30SX montado em suporte móvel unidimensional.

3.2. O ILUMINADOR SOLAR CONTÍNUO VISÍVEL

As normas IEC, especialmente as normas IEC 60904-1 a 10, preconizam testes com as células e módulos solares sob iluminação natural ou simulada. Para não depender de condições meteorológicas específicas, decidiu-se utilizar um simulador solar. Este deve fornecer a irradiância padrão de 1000 W/m^2 , com distribuição espectral similar à do Sol e uniformidade espacial e temporal da iluminação.

O iluminador solar contínuo visível foi projetado para ser uma estrutura resistente, móvel e relativamente leve, com material encontrado comercialmente – para que fosse possível adaptá-la caso necessário e transportá-la para variados locais de teste. Nessa

armação seriam montadas tantas lâmpadas quanto necessárias para fornecer a iluminação desejada, de forma a cobrir a área de teste requerida.

O desenho do projeto do iluminador pode ser visto na Figura 15. As fontes luminosas são acopladas na região frontal, de forma a concentrar sua iluminação na área alvo. Nesta representação foram usadas quatro fontes de luz; no entanto, o projeto permite a disposição de mais lâmpadas se necessário.

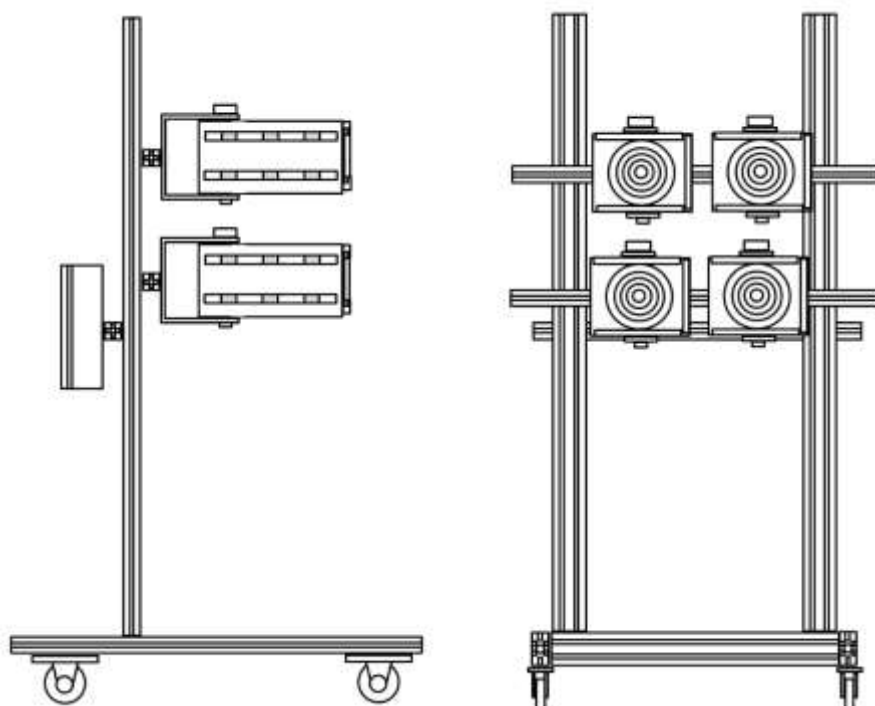


Figura 15. Projeto do iluminador constante visível.

Decidiu-se por usar perfis estruturados de alumínio, de fabricação ENGELEGHO, em modelo especial de 40 x 80 mm. Esse modelo confere elevada resistência mecânica e leveza à montagem, permite variadas formas de armação e pode ser encontrado com facilidade no mercado. Na Figura 16 é possível ver um exemplo do perfil de alumínio usado para a construção do suporte mecânico do iluminador.



Figura 16. Perfil de alumínio estruturado ENGELEGHO de 40x80 mm.

Na base do suporte foram montadas rodas para locomoção e em sua parte posterior uma caixa de comandos elétricos para acionamento das lâmpadas e proteção contra sobrecargas na rede elétrica.

Um piranômetro, equipamento da família dos radiômetros que mede irradiância, foi selecionado para atestar a viabilidade técnica das fontes luminosas escolhidas. O dispositivo escolhido foi o piranômetro da empresa holandesa Kipp & Zonen, modelo CMP-3, de sensibilidade $S = 12,43 \cdot 10^{-6} V/Wm^{-2}$. Este sensor é uma termo pilha que fornece uma tensão como resposta a irradiância incidente sobre ele, usado em geral para a medição da irradiância do Sol, mas também pode ser usado para o teste de lâmpadas de alta radiância. O que se busca são lâmpadas capazes de irradiar no mínimo $1000 W/m^2$, ou seja, a irradiância fornecida pelo Sol num dia claro e adotada como padrão de testes, e assim sendo, está comprovada a viabilidade técnica da lâmpada testada. A Figura 17 mostra o piranômetro utilizado em sua configuração inicial de testes.



Figura 17. Radiômetro instalado normal à lâmpada na primeira configuração de teste.

A primeira lâmpada escolhida para testes foi a lâmpada de vapor metálico, conhecida também como lâmpada HQI (Halogen Quartz Iodide), de 1000 W de potência. Essa lâmpada foi escolhida por causa de seu espectro de emissão, com componentes azul e violeta intensos. Procedeu-se à compra da lâmpada, modelo HPI-T da empresa Philips e com temperatura de cor de 4300 K; reator, modelo MAE1000/62 VP4000 da fabricante Intral; e projetor, modelo W1000 da fabricante Reflumi. O reator e projetor foram acoplados a estrutura do iluminador e devidamente conectados a caixa de comandos elétricos. Com o protótipo pronto para o teste inicial, o iluminador foi

conduzido ao local do teste de validação da lâmpada, o edifício 02 do Núcleo Regional da Bahia da Petrobrás, no campus de Ondina da Universidade Federal da Bahia.

Uma primeira configuração de testes foi elaborada para atestar a viabilidade experimental do protótipo de iluminador solar constante. Para tanto, o piranômetro foi disposto num suporte de alumínio, voltado para a lâmpada de vapor metálico, como pode ser visto na Figura 18.



Figura 18. Setup do primeiro teste do iluminador contínuo visível.

Foram realizadas medidas durante a noite para evitar interferência da luz natural do Sol. Em cada tomada de dados, o radiômetro foi sistematicamente deslocado em duas dimensões e sua resposta foi registrada.

Da análise dos dados obtidos, foi tomada a decisão de alterar a configuração do aparato de teste. A geometria da estrutura de suporte ao radiômetro do protótipo foi alterada, dispondo-o na orientação vertical, em relação a fonte de luz, e montado sobre uma superfície móvel, podendo se deslocar em um grau de liberdade, a distância fixa de 1 metro das fontes luminosas, como determinam as normas IEC. Esta mudança, realizada para diminuir quaisquer possíveis interferências provocadas pela luz solar e pelo espalhamentos nas paredes, viabilizou as medidas diurnas, antes impossíveis ou muito prejudicadas pela luz do Sol. A Figura 19 mostra o projeto e a Figura 20 a construção da nova configuração de teste já construída, dando destaque para o posicionamento do radiômetro.

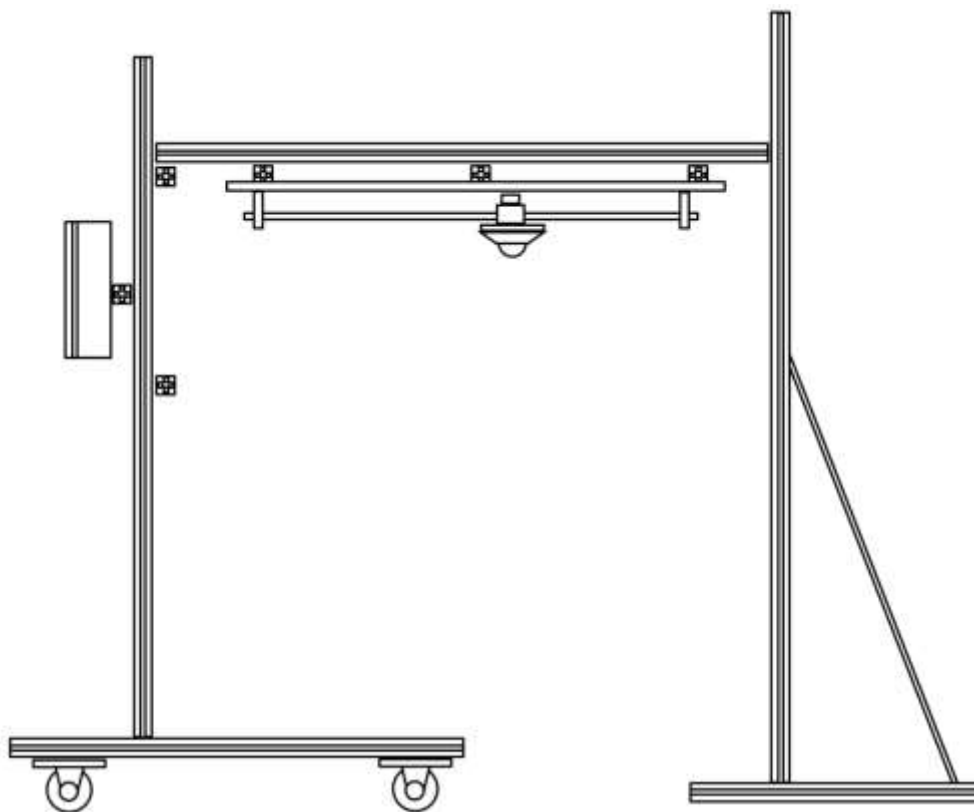


Figura 19. Projeto da nova configuração de sensoriamento com o radiômetro.



Figura 20. Configuração de testes com radiômetro em suporte móvel voltado para baixo.

Após os testes com a lâmpada HQI, decidiu-se testar a lâmpada halógena de 1000 W, da empresa OSRAM, comumente usada em holofotes destinados a iluminação de cena de teatro. A lâmpada e seu holofote, um DTS, modelo SCENA 650/1000 S, podem ser vistos na Figura 21.



Figura 21. Lâmpada halógena OSRAM de 1000 W (esquerda) e holofote DTS (direita).

O holofote DTS também permite um ajuste de foco, e foram tomadas medidas da dependência da irradiância em função da variação do foco, posicionando o radiômetro na posição normal, em relação ao centro da lente do holofote, sendo o mecanismo de ajuste de foco variado em passos de meia volta, desde a posição de foco mais aberto até a posição de foco mais afilado.

Em seguida foi realizado um teste de irradiância para três níveis de abertura focal do holofote. Para tanto, o foco do holofote foi ajustado para as posições de máxima abertura, foco medianamente fechado e foco fechado ao máximo e executou-se uma medida por toda a extensão do eixo paralelo ao plano que suporta o radiômetro.

Um segundo conjunto de holofote e lâmpada, idêntico ao primeiro, foi adquirido. O arranjo experimental resultante pode ser visto na Figura 22:



Figura 22. Montagem experimental com dois holofotes DTS.

Foram executadas várias medidas para diferentes espaçamentos entre os holofotes, visando observar a variação da medida do campo de radiação pelo radiômetro. Os dois holofotes foram ajustados para o mesmo foco, de forma que o piranômetro, normal a cada um deles, mediu 1500 W/m^2 , equivalente a 1,5 constante solar.

Em todas as montagens o alinhamento entre o radiômetro e as fontes luminosas foi mantido com a ajuda de um prumo, acessório usado extensivamente em construção civil para garantir o alinhamento vertical. Na Figura 23 é possível ver o prumo montado em conjunto com o radiômetro.



Figura 23. Prumo anexado ao radiômetro para alinhamento vertical.

Os espectros de emissão das lâmpadas HQI e halógenas foram medidos com o uso do espectrômetro USB2000, assim como foi feito para as lâmpadas ultravioletas. Após as medidas iniciais com os holofotes, decidiu-se usar filtros de iluminação, também costumeiramente empregados em iluminação teatral, para deslocar o espectro de emissão das lâmpadas halógenas. Foram adquiridos um filtro azul 3/4 e três filtros amarelos, 1, 3/4, e 1/4, segundo a nomenclatura usada comercialmente. Cada filtro foi acoplado a um holofote e o espectro de emissão resultante foi adquirido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes foram executados para atestar a viabilidade técnica das soluções adotadas e, quando não houve sucesso, documentar as razões que levaram a mudança nos materiais e métodos empregados.

4.1. ILUMINADOR SOLAR CONSTANTE ULTRAVIOLETA

Os espectros de emissão em função do comprimento de onda foram obtidos com o auxílio do espectrômetro USB2000, da empresa Ocean Optics. Para que a montagem da seção do iluminador UV seja validada, é preciso que a emissão da lâmpada UVA, localizada na parte posterior da montagem, não seja absorvida pela lâmpada UVC na parte superior. O espectro resultante da montagem deve ser a superposição dos dois separados. As Figuras 24 – 26 mostram os espectros adquiridos.

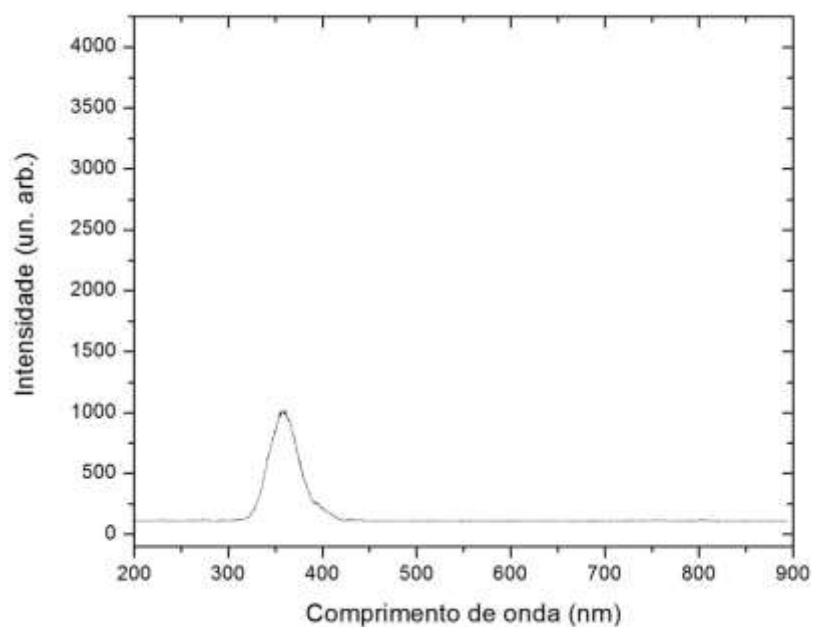


Figura 24. Espectro da lâmpada UVA.

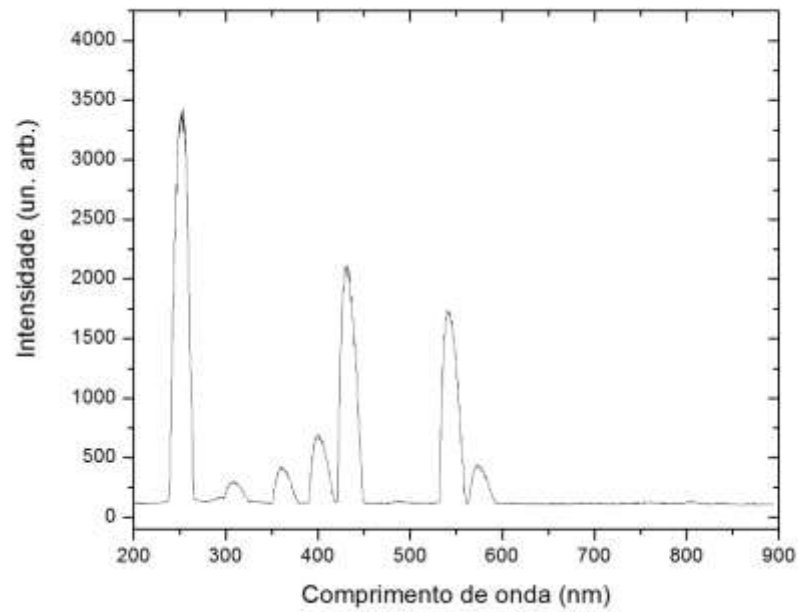


Figura 25. Espectro da lâmpada UVC.

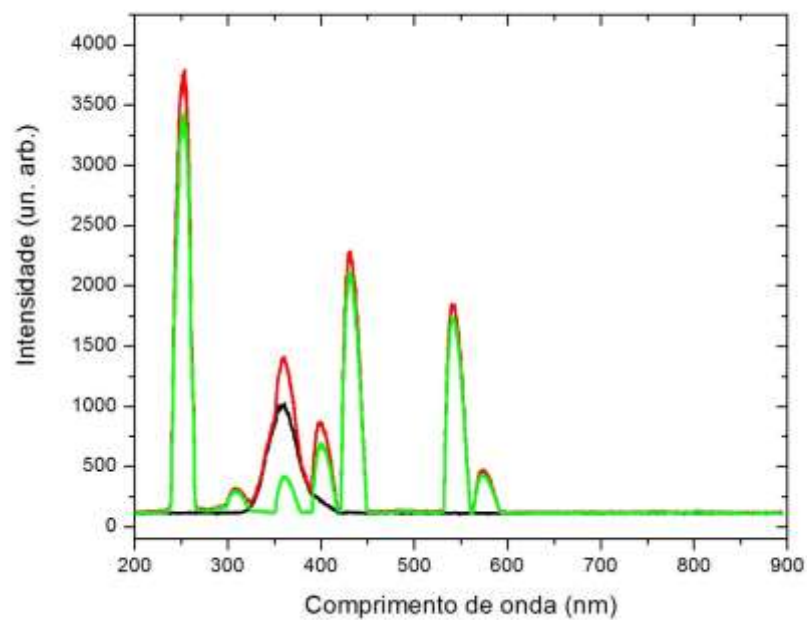


Figura 26. Espectro da superposição, sendo UVA (preto), UVC (verde) e UVA+UVC (vermelho).

A análise das medidas comprova que não ocorre absorção de emissão em nenhum momento, sendo o espectro do conjunto a superposição fidedigna dos espectros individuais. O conceito da seção do iluminador UV utilizando lâmpadas empilhadas está então validado, bastando ainda apenas uma mais extensa busca e teste de outras lâmpadas disponíveis no mercado, em particular lâmpadas UVA e UVB.

As lâmpadas foram então submetidas ao teste de uniformidade de iluminação, com o emprego do fotodiodo TW30SX. Percorrendo a extensão da lâmpada no suporte móvel unidimensional, foi possível registrar a distribuição da irradiância emitida pelas lâmpadas separadamente e pelo conjunto. As Figuras 27 – 29 mostram as curvas de distribuição da iluminação para a configuração.

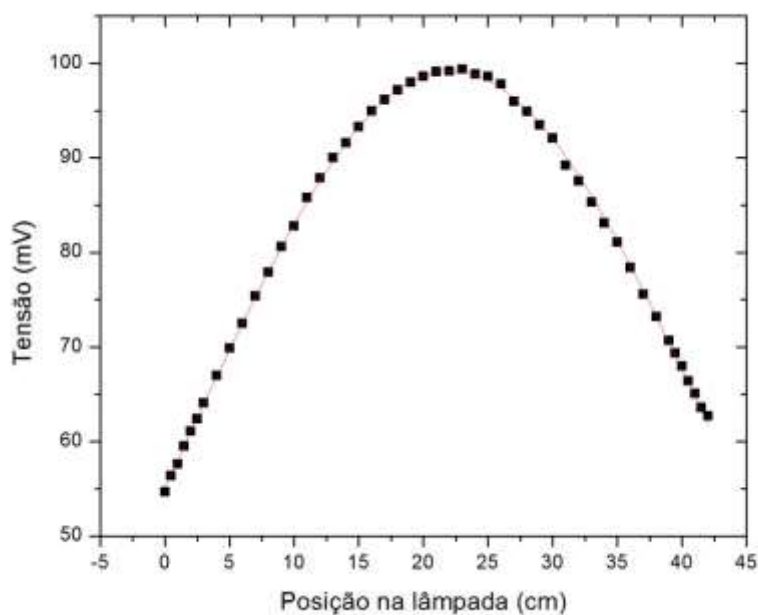


Figura 27. Uniformidade da iluminação da lâmpada UVA.

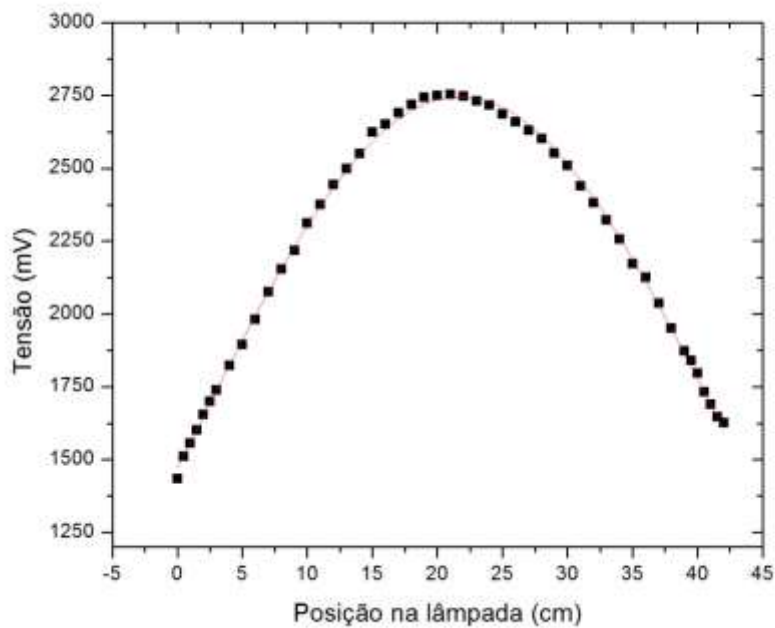


Figura 28. Uniformidade da iluminação da lâmpada UVC.

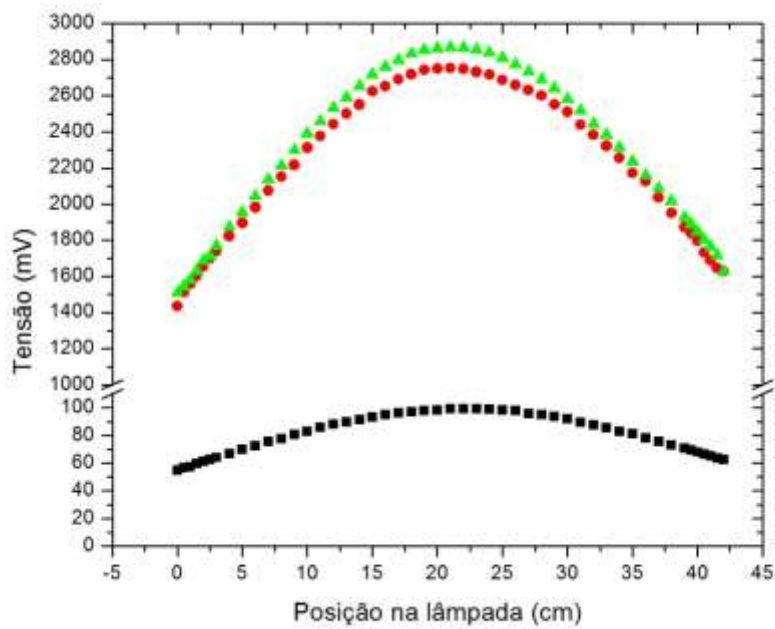


Figura 29. Uniformidade da iluminação do conjunto, em vermelho, composto pelas lâmpadas UVA (preto) + UVC (verde).

As curvas obtidas foram aproximadas por funções de Gauss e para as lâmpadas UVA e UVC, respectivamente:

$$y = 4,56(\pm 3,70) + \frac{4703,05(\pm 299,87)}{39,66(\pm 1,00)\sqrt{\pi/2}} e^{-2\frac{(x-22,14(\pm 0,02))^2}{1572,52}} \quad (6)$$

$$y = -349,61(\pm 209,02) + \frac{163610,62(\pm 17836,88)}{42,16(\pm 1,79)\sqrt{\pi/2}} e^{-2\frac{(x-21,73(\pm 0,03))^2}{1777,47}} \quad (7)$$

A função gaussiana descreve distribuições, sendo conhecida também por função de distribuição normal. A partir dos resultados pode-se concluir que as lâmpadas UV possuem uma iluminação suave, concentrada na região em torno da metade do seu comprimento. Observa-se então, que a associação de seções ou células de iluminação, como a construída e validada gerará um patamar de iluminação de forma conhecida e sem grandes discontinuidades.

A interpretação dos dados obtidos a partir dos espectros e da uniformidade do campo de iluminação permite concluir que essa configuração das lâmpadas UV é válida, viável e pode ser usada na montagem final do iluminador constante ultravioleta, que terá emprego extensivo no Laboratório de Certificação de Componentes de Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica (LABSOLAR).

4.2. O ILUMINADOR SOLAR CONSTANTE VÍSEL

O espectro de emissão da lâmpada HQI foi medido e pode ser visto na Figura 30. Como esperado, há componentes espectrais nos comprimentos de onda do azul e violeta, além dos grandes picos nas faixas correspondentes ao verde e ao amarelo. Seu pico de emissão está em 536 nm, na cor verde e correspondendo a um corpo negro a 5400 K. Há também uma emissão na faixa do ultravioleta A, apesar de minoritária.

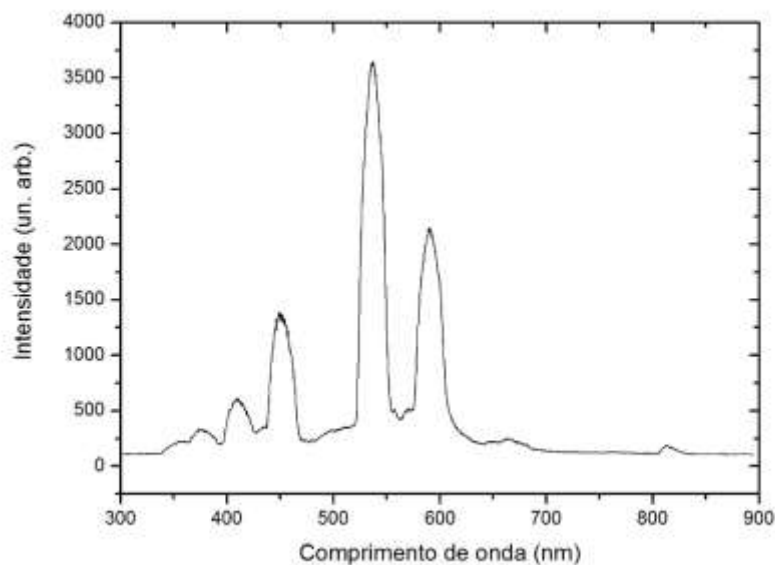


Figura 30. Espectro de emissão da lâmpada de vapor metálico.

Os primeiros testes, utilizando a primeira configuração de posicionamento de lâmpada e radiômetro – lâmpada HQI de 1000 W e radiômetro CMP-3, foram mal sucedidos devido a interferência da luz natural do Sol. O teste noturno obteve sucesso quanto a este fator, entretanto os valores medidos de irradiância foram muito aquém dos requisitados pelas normas IEC e surgiram deformações da uniformidade da iluminação da lâmpada em função dos parâmetros espaciais. O gráfico da Figura 31 ilustra os valores medidos.

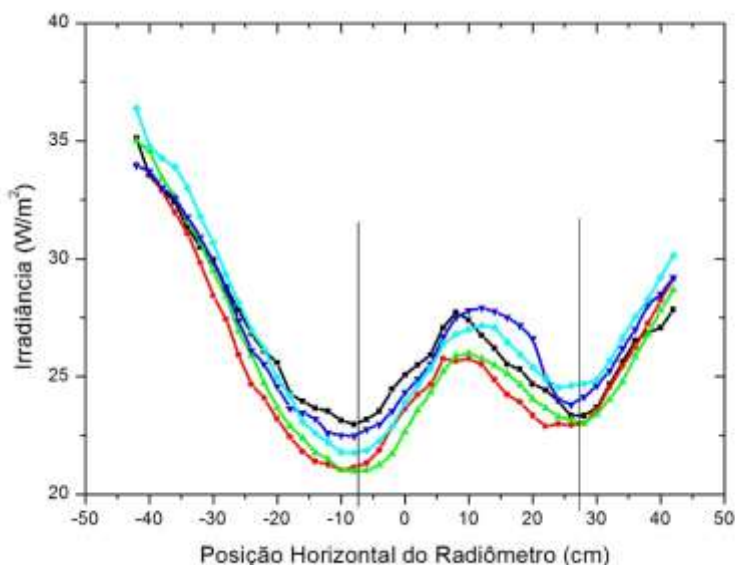


Figura 31. Gráfico da irradiância medida com a lâmpada HQI de 1000W, para o radiômetro posicionado a 45 cm (preto), 40 cm (vermelho), 35 cm (verde), 30 cm (azul) e 25 cm (anil) de altura relativa a lâmpada.

A seção do gráfico entre barras representa o trecho da medida cujo comportamento está dentro do esperado. Os valores de irradiância estão abaixo de 30 W/m^2 , muito abaixo do valor da Constante Solar (1000 W/m^2). Os valores mais elevados, nas regiões fora das barras, são justificados devido a aproximação do sensor a uma parede branca a direita e uma tela reflexiva a esquerda. Estes materiais espalharam a luz do refletor e a redirecionaram para o radiômetro, que registrou valores distorcidos por esse fenômeno óptico. Ainda assim estes estão muito aquém do valor da Constante Solar.

Dado o resultado deste teste, e a necessidade de se executar medidas diurnas, o arranjo experimental do protótipo foi modificado. Também descartou-se o emprego de lâmpadas HQI e passou-se a testar a lâmpada halógena. Os ajustes se mostraram acertados, pois logo em seguida foi obtida a irradiância referida nas normas, como pode ser visto na Figura 32:

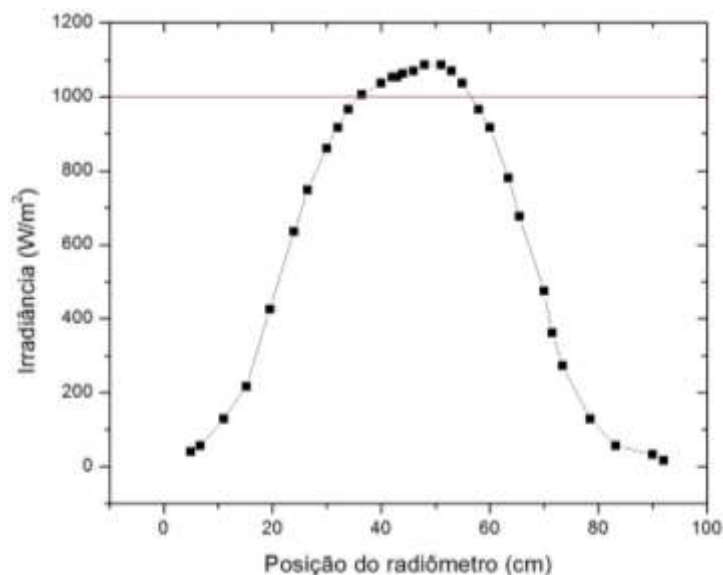


Figura 32. Gráfico da irradiância medida no primeiro uso do holofote DTS. A linha vermelha marca o limite de uma Constante Solar.

Como o holofote possui foco regulável, decidiu-se tomar medidas da queda de irradiância em função do foco e da uniformidade do campo de radiação emitido pelas lâmpadas para variados focos.

O gráfico da queda de irradiância observada em função da abertura do foco do holofote pode ser visto na Figura 33. Para efetuar essa medida, o radiômetro foi posicionado na posição normal ao centro da lente do holofote DTS e o ajuste de foco deste foi aberto em passos de meia volta.

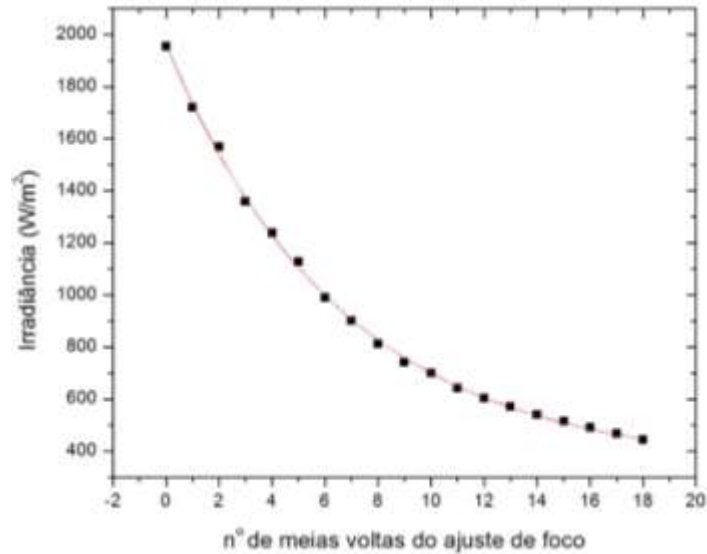


Figura 33. Irradiância em função da abertura do foco do radiômetro DTS.

A equação que rege a queda da irradiância medida devido a abertura do foco é:

$$I = 337.06(\pm 11.82) + 1624.10(\pm 11.53)e^{-x/6.66(\pm 0.14)} \quad (8)$$

A irradiância que pode ser medida com essa lâmpada associada ao seu holofote pode excursionar entre valores consideravelmente abaixo da Constante Solar, até quase três vezes o valor da constante. O gráfico da irradiância medida para um holofote, para variados focos pode ser visto na Figura 34. Nestas medidas, o foco do holofote foi ajustado em três posições: máxima abertura, no ponto médio e fechado ao máximo, e para cada uma foi realizada uma medida por toda a extensão do eixo de posicionamento do radiômetro.

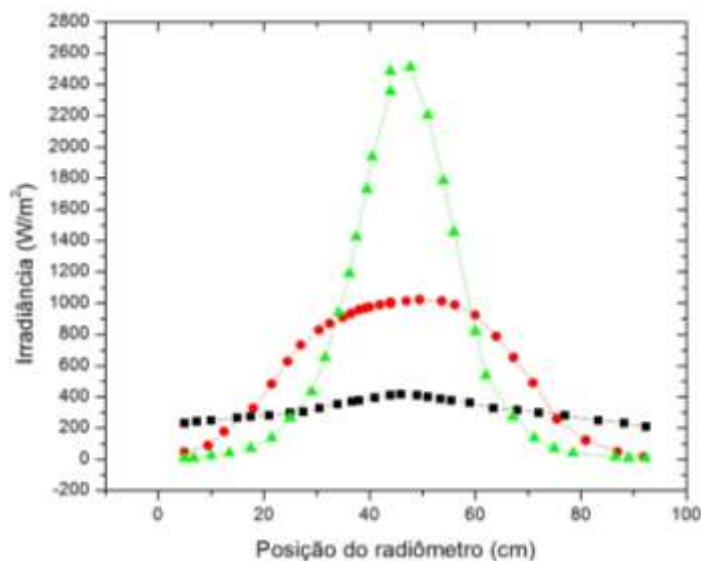


Figura 34. Irradiância medida para os focos: maximamente aberto (preto), médio (vermelho) e maximamente fechado (verde).

Com a chegada do segundo holofote DTS e lâmpada, testou-se a uniformidade do campo de radiação para diferentes posições entre os holofotes. Pôde-se observar a formação de um patamar em torno do valor de 1500 W/m^2 , que foi o valor calibrado para o holofote normal ao radiômetro, principalmente para os espaçamentos entre 2 a 4 polegadas. Esse resultado pode ser visto na Figura 35.

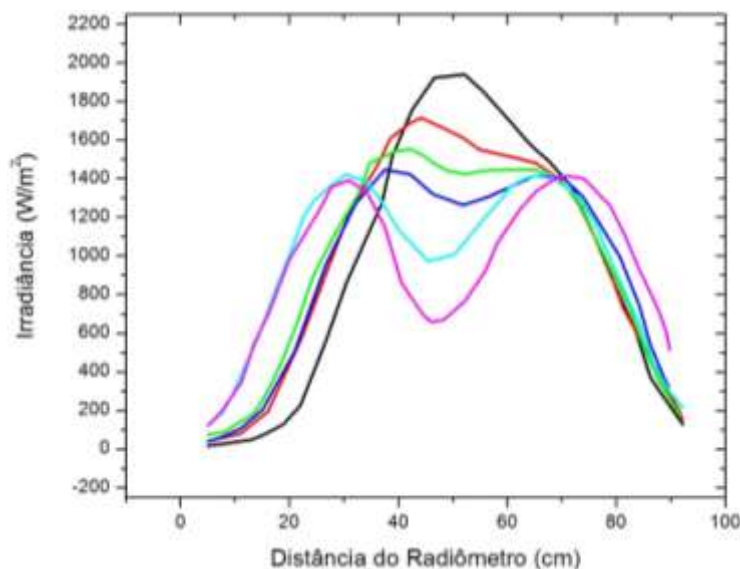


Figura 35. Irradiância medida para os holofotes DTS afastados de: 0 (preto), 1 (vermelho), 2 (verde), 3 (azul), 4 (anil) e 5 (magenta) polegadas.

O protótipo do iluminador solar constante visível já contempla a acomodação dos holofotes com os espaçamentos observados nos testes, e caso necessário, pode ser facilmente adaptado para a distribuição de mais fontes luminosas.

Os espectros de emissão das lâmpadas halógenas foram colhidos com o espectrômetro USB2000 e encontram-se na Figura 36. São satisfatoriamente similares entre si, com pico de emissão em torno de 550 nm, entre as cores verde e amarelo. É decisivo que estes espectros sejam parecidos, pois o conjunto das fontes de luz do iluminador constante precisa ser homogêneo quanto a sua emissão ou haverá contaminação nos testes de calibração dos módulos fotovoltaicos.

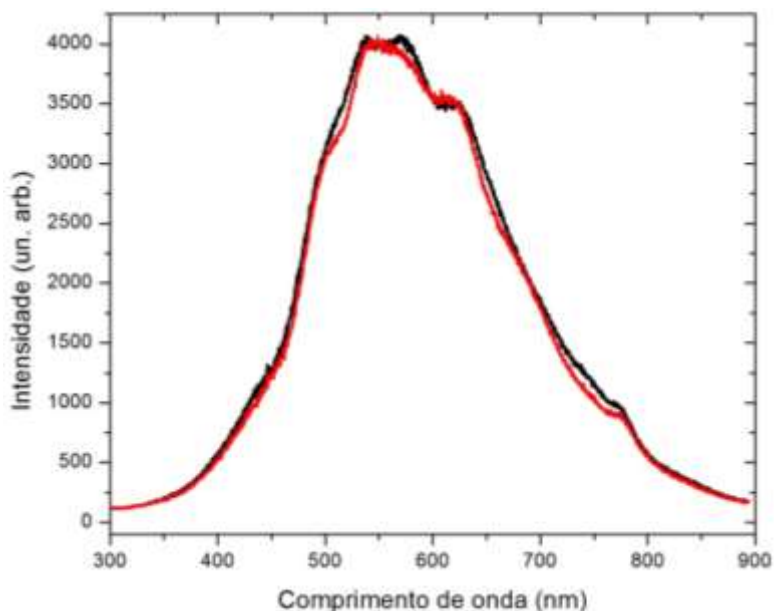


Figura 36. Espectros das lâmpadas halógenas em seus holofotes.

Os filtros de iluminação teatral foram acoplados um a um na frente do holofote DTS para que a luz emitida tivesse componentes espectrais reforçadas ou atenuadas, de acordo a resposta espectral (cor) do filtro. Os espectros emitidos foram medidos e comparados ao espectro natural da lâmpada, que possui pico de emissão em 558 nm, correspondente a um corpo negro a 5190 K.

O filtro azul 3/4 foi acoplado e o espectro de emissão resultante, comparado ao natural, pode ser visto na Figura 37. Houve de fato o deslocamento da curva de emissão para o azul, com novo pico de emissão em 543 nm – equivalente ao corpo negro de temperatura 5330 K, e os comprimentos de onda acima do amarelo foram atenuados significativamente.

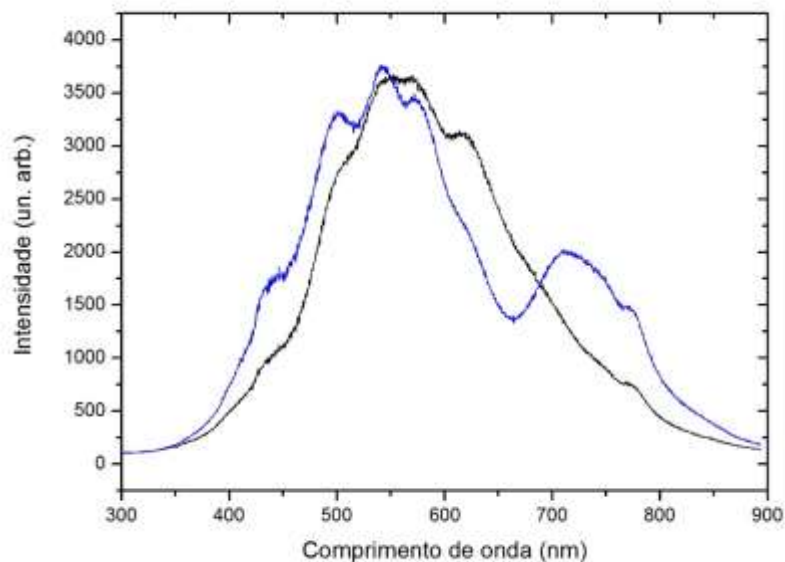


Figura 37. Espectro da lâmpada halógena, sem filtro (preto) e com filtro azul 3/4 (azul).

Os filtros amarelos foram posicionados no holofote, um a um, e os respectivos espectros foram medidos e reunidos na Figura 38. Para cada filtro, houve um diferente deslocamento do pico de emissão luminoso, em *redshift*, sendo 578 nm para o amarelo 1/4, 584 nm para o amarelo 3/4 e 605 nm para o amarelo 1; correspondentes a corpos negros a 5007 K, 4955 K e 4784 K, respectivamente.

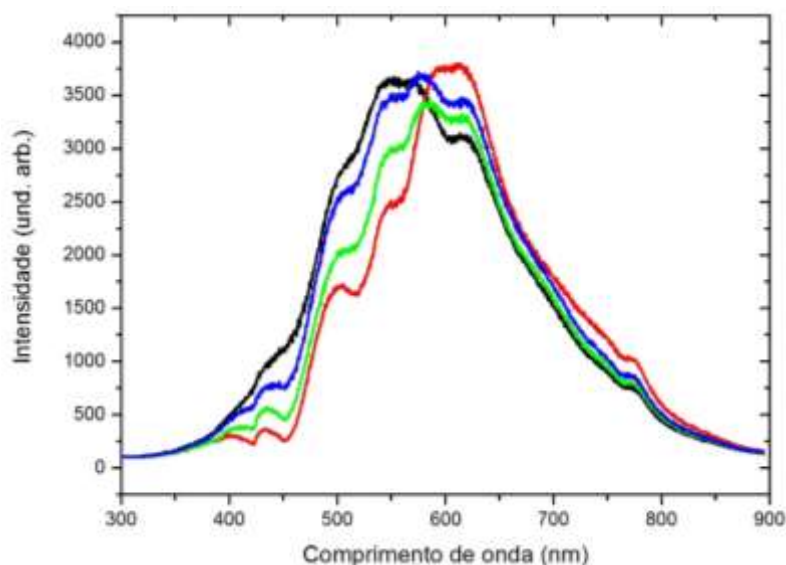


Figura 38. Espectro da lâmpada halógena sem filtro (preto), com filtros: amarelo 1/4 (azul), amarelo 3/4 (verde) e amarelo 1 (vermelho).

O espectro A.M. 1.5 – referência padrão para o espectro solar medido na superfície do planeta – pode ser visto nas Figuras 39 e 40. Comparado com os espectros das lâmpadas halógenas, sem filtro e com os filtros azul e amarelos, no intervalo de 300 nm a 900 nm, observa-se que o espectro das lâmpadas sem filtro apresenta similaridade ao padrão e que os filtros não reforçaram satisfatoriamente esse caráter, pelo contrário, atenuaram componentes que estão presentes no espectro A.M 1.5. Novos filtros e configurações luminosas serão testadas em busca da melhor conformidade possível com o espectro solar padrão.

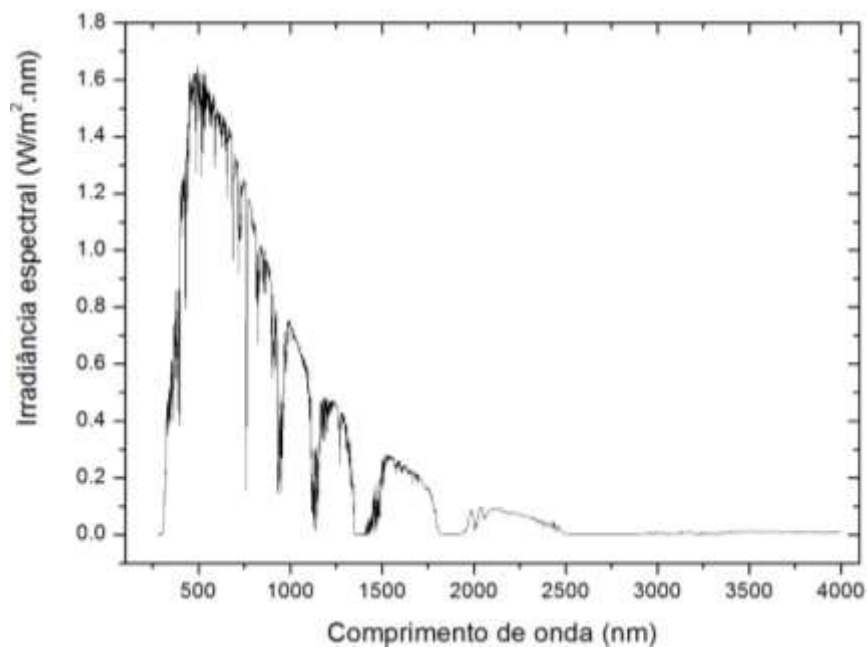


Figura 39. Espectro solar A.M. 1.5.

Fonte: National Renewable Energy Laboratory – www.nrel.gov

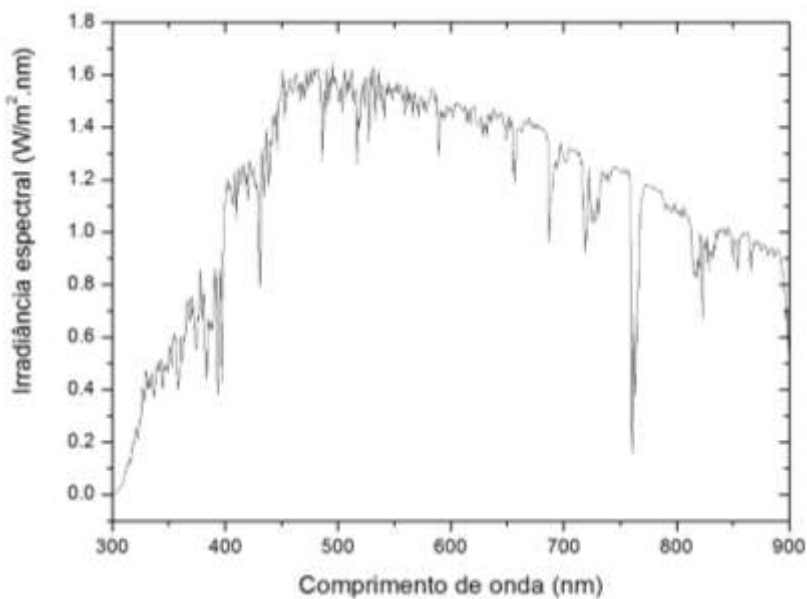


Figura 40. Detalhe do espectro A.M. 1.5 na faixa espectral de 300 nm a 900 nm.

As normas da CEI/IEC estabelecem que para certificar um módulo fotovoltaico é necessário submetê-lo a diversos testes de performance energética e qualidade

mecânica e estrutural. Os testes com iluminação constante no espectro visível e no espectro ultravioleta são alguns dos mais importantes dentre as avaliações de rendimento fotovoltaico. Assim, os iluminadores solares constantes, no visível e no ultravioleta, são indispensáveis para a caracterização de painéis fotovoltaicos. O projeto de um iluminador próprio progride de maneira satisfatória e aguarda a chegada de mais holofotes e lâmpadas halógenas para a caracterização espacial do campo de radiação que será fornecido pelo equipamento, que será usado no LABSOLAR.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Foi projetado, construído e montado um suporte leve e robusto para acomodar as lâmpadas, reatores e projetores para o protótipo do iluminador solar constante visível em perfil estruturado de alumínio.

Foi projetado e construído um suporte para acomodar as lâmpadas, reatores e projetores para o protótipo do iluminador solar constante ultravioleta.

Foram compradas lâmpadas de emissão no visível e no ultravioleta, bem como reatores, projetores compatíveis com cada protótipo.

A lâmpada de vapor metálico HQI teve performance abaixo das necessidades exigidas pelas normas IEC e foi substituída por lâmpadas halógenas e holofotes.

O protótipo do iluminador constante visível apresentou rendimento bastante superior após a mudança da lâmpada e da estrutura de acomodação do radiômetro, que passou de uma disposição horizontal de medições, para uma topologia de medição vertical.

Os suportes móveis unidimensionais para acomodação do sensor UV e do radiômetro foram construídos em duas versões, uma permitindo o posicionamento sobre uma distância de 600 mm e o outro com posicionamento em uma distância de até 900 mm. Estes suportes foram em seguida testados e aprovados.

Foi constatado um patamar constante na irradiância, medida pelo radiômetro, quando os dois holofotes DTS foram justapostos a uma distância entre 2 a 4 polegadas.

A distribuição da iluminação das lâmpadas UV, como uma gaussiana, foi atestada experimentalmente.

Os espectros de emissão das lâmpadas UV se sobrepõem na montagem com lâmpadas UVA e UVC empilhadas, o que credencia o conceito para a montagem do iluminador constante ultravioleta completo.

Os espectros de emissão das lâmpadas halógenas são similares, demonstrando homogeneidade na radiação emitida pelas mesmas, similar à de um corpo negro de temperatura 5190 K.

Os filtros de iluminação aplicados nos holofotes deslocaram os picos de emissão de radiação de acordo com o esperado, com o filtro azul elevando e os filtros amarelos abaixando as temperaturas de corpo negro correspondente.

O projeto do iluminador solar constante visível receberá em breve mais lâmpadas halógenas e holofotes e será realizado um mapeamento planar da uniformidade de radiação emitida. Essas medidas serão fundamentais para a montagem final do iluminador, estabelecendo um patamar espacial constante de irradiância.

A chegada de mais lâmpadas ultravioleta A e B permitirá a montagem do iluminador ultravioleta como a associação de seções como a testada neste trabalho em um chassi único e esta montagem final será avaliada.

Com a construção do Laboratório de Certificação de Componentes para Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica (LABSOLAR), os equipamentos serão transportados para sua destinação final, onde será possível controlar melhor fatores como iluminação externa, temperatura, dentre outros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHY, A. R. A. (2011). **Sistema mecatrônico para avaliação comparativa de eficiência térmica de coletores solares térmicos planos**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica – Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA, Brasil.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL) (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 33p. Brasília: ANEEL, 2005.

ALDABÓ, R. (2002). **Energia solar**. São Paulo: Artliber Editora, 155p. 2002.

BASSO, D. (1980). **Desenvolvimento, construção e calibração de radiômetros para medida da radiação solar**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil.

BONNET, D. (2003). **Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications**. (T. Markvart, & L. Castafier, Eds.) Arnstadt, Germany: Elsevier Ltd.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL) / CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB) (1999). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 204p.

COPETTI, J.; MACAGNAN, M. H. (2007). **Baterias em sistemas solares fotovoltaicos**. I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2007.

DUFFIE, J.A.; BECKMAN. W.A. (1980) **Solar engineering of thermal processes**. A Wiley-Interscience Publication (John Wiley & Sons, Inc.).

DU PONT. (2010). Acesso em 21 de Fevereiro de 2010, disponível em **Du Pont Photovoltaic solutions**: Disponível em:

<http://www2.dupont.com/Photovoltaics/en_US/products_services/encapsulant/elvax_e v_a_resins.html> Acesso em: julho de 2012.

FALCÃO, V. D. (2005). **Fabricação de células solares de CdS/CdTe**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro – RJ, Brasil.

FERRAZZA, F. (2003). **Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications**. (T. Markvart, & L. Castafier, Eds.) Nettuno, Italy: Elsevier Ltd.

FERRIANI, V. M.; DONATO, C. D.; SANTOS, B. D.; GUIMARÃES, E. J.; JUNIOR, C. L.; D'AMORE, R. (2006). **Estudo do subsistema de suprimento de energia do satélite universitário ITASAT**. Anais do 12 encontro de iniciação científica e pós-graduação do ITA. São José do Campos – SP, Brasil.

FILHO, K. D.; SARAIVA, M. D. (2004). **Astronomia e astrofísica** (2ª ed.). São Paulo, SP: Editora Livraria da Física.

FRÖHLICH, C.; BRUSA, R. (1981). **Solar radiation and its variation in time**. Solar Physics, 74, p. 209.

IEC 61215. 2005, Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval. Genebra, Suíça.

IEC 61646. 2008, Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval. Genebra, Suíça.

IEC 61730-2. 2004, Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 2: Requirements for testing. Genebra, Suíça.

KALOGIROU, S. (2009). **Solar energy engineering: process and systems**. Elsevier Inc. Estados Unidos.

KIPP & ZONEN (2006). Instruction manual – CMP/CMA series. United States. 46 p.

MATSUURA, O. T.; PICAZZIO, E. (2006). In: E. d. Paulo (Ed.), **Astronomia: uma visão geral do universo** (2ª edição ed., p. 81-102). São Paulo, SP.

MOUSAZADEH, H. et al. (2009). **A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, n. 8, p. 1800-1818.

PALZ, W. (1981). **A radiação: matéria prima da energia solar**. São Paulo: Hemus Editora, 1981. Cap 2. 59 – 63 p.

RAMOS, C. M. (2006). **Procedimentos para caracterização e qualificação de módulos fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil.

RAU, U.; SCHOCK, H. W. (2003). **Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications**. (T. Markvart, & L. Castafier, Eds.) Universitat Stuttgart, Germany: Elsevier.

SANTANA, V. M. S. (2012). **Medidas de concentração de gases na atmosfera de Salvador utilizando um espectro – radiômetro**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física – Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA, Brasil.

SILVA, A.V. R. (2006). **Nossa estrela: o sol. Temas atuais de física** (Coleção). Editora Livraria da Física, São Paulo.

SOUZA, J. V. D. (2008). **Contribuições em solarimetria para a composição de uma rede baiana de radiômetros**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA, Brasil.

TEODORO DA SILVA, I. (2010). **Desenvolvimento de um sistema mecatrônico para posicionamento de um painel fotovoltaico e comparação com painel fixo.**

Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica – Universidade Federal da Bahia.

Salvador – BA, Brasil.



**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO DIGITAL
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFBA**

1 Identificação do tipo de documento

Tese [] Dissertação Monografia [] Trabalho de Conclusão de Curso []

2 Identificação do autor e do documento

Nome completo: Dion Barbora dos Santos Ribeiro

CPF: 033.757.795-18

Telefone: (75) 9137-5672 e-mail: ribeirodion@gmail.com

Programa/Curso de Pós-Graduação/Graduação/Especialização: Programa de Pós-Graduação em Mecânica

Título do documento: Desenvolvimento e teste de conceito de protótipo de iluminadores

de LED contínuo para o visível e ultravioleta Data da defesa: 19/03/14

3 Autorização para publicação na Biblioteca Digital da UFBA

Autorizo com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998 e na Lei nº 10.973, de 2 de dezembro de 2004, a Universidade Federal da Bahia (UFBA) disponibilizar gratuitamente sem ressarcimento dos direitos autorais, o documento supracitado, de minha autoria, na Biblioteca Digital da UFBA para fins de leitura e/ou impressão pela Internet a título de divulgação da produção científica gerada pela Universidade.

Texto completo Texto parcial []

Em caso de autorização parcial, especifique a (s) parte(s) do texto que deverão ser disponibilizadas:

Salvador 02/05/14 Dion Barbora dos Santos Ribeiro
Local Data Assinatura do (a) autor (a) ou seu representante legal

4 Restrições de acesso ao documento

Documento confidencial? Não
[] Sim Justifique: _____

Informe a data a partir da qual poderá ser disponibilizado na Biblioteca Digital da UFBA:

__/__/__ Sem previsão

Assinatura do Orientador: _____ (Opcional)

O documento está sujeito ao registro de patente? Não
Sim []

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim []
Não

Preencher em três vias. A primeira via deste formulário deve ser encaminhada ao Sistema de Bibliotecas da UFBA/Biblioteca Central; a segunda deve ser enviada para a Biblioteca de sua Unidade, juntamente com o arquivo contendo o documento; a terceira via deve permanecer no Programa de Pós-Graduação para o registro do certificado de conclusão do Curso.

Universidade Federal da Bahia
Sistema de Biblioteca da UFBA
Grupo Técnico da Biblioteca Digital da UFBA



CADASTRO DE INFORMAÇÕES PARA PUBLICAÇÃO DIGITAL
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFBA

1. Identificação do tipo de material	
Tese () Dissertação <input checked="" type="checkbox"/> Monografia () Trabalho de Conclusão de Curso ()	
2. Colegiado do Curso de Pós-Graduação:	
Título: Desenvolvimento e teste de conceito de protótipo de iluminador solar contínuo para o visível e ultravioleta	
Autor(a): Dion Barbosa dos Santos Ribeiro	
CPF: 033.757.795-18	E-mail: ribeimedion@gmail.com
Orientador(a):	
Nome: Iuri Muniz Peixe	
CPF: 328.133.845-34	E-mail: mpeixe@ufba.br
Co-Orientadores	
Nome:	
CPF:	E-mail
Membros da Banca	
Nome: Iuri Muniz Peixe	
CPF: 328.133.845-34	E-mail: mpeixe@ufba.br
Nome: Denis Gilbert Francis David	
CPF: 609.080.045-36	E-mail: denis.david@uol.com.br
Nome: Osvaldo Lívio Sotomaior Pereira	
CPF: 132.089.085-89	E-mail: osvaldow@chem.com.br
Nome:	
CPF:	E-mail
Data de Homologação Pós Graduação:	
Financiadores:	
Data:	
Assinatura:	



**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
DAS TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFBA**

Eu, Dion Bezerra dos Santos Ribeiro
 Nacionalidade: Brasileiro, estado civil: Solteiro, profissão: Físico
 residente e domiciliado na (endereço): Rua Morretes,
nº 25, bairro Conceição, cidade:
Feira de Santana, estado: Bahia, portador do documento de identidade
nº 11315600-60, CPF nº 033.757.795-18, na qualidade de
 titular dos direitos morais e patrimoniais de autor da OBRA (título) Desenvolvimento e
teste de conceito de protótipo de iluminador sobre contínuo para o visí-
vel e ultravioleta dissertação de (nível) Mestrado Stricto Sensu ou tese
 de (nível) _____, apresentada na Universidade Federal da Bahia – UFBA
 em (data) 19/03/2014, com base no disposto da *Lei Federal nº 9.610, de 19 de*
fevereiro de 1998:

DECLARO, dessa forma, que **cedo, em caráter gratuito e por tempo indeterminado**, minha tese ou dissertação acima identificada, cuja cópia, segue em anexo, para que seja reproduzida ou divulgada, total ou parcialmente no site: <http://www.bdt.ufba.br/>

DECLARO, que sou o **único e exclusivo responsável**, pelo conteúdo da mencionada tese ou dissertação acima referida.

a- **AUTORIZO** a Universidade Federal da Bahia/ Sistema de Bibliotecas a disponibilizar, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, o texto integral da publicação acima citada, de minha autoria, no site: <http://www.bdt.ufba.br/> e em forma de arquivo PDF, para fins de leitura e/ou impressão pela Internet, a título de divulgação da produção científica gerada pela Universidade, a partir de 02/05/2014.

b- **AUTORIZO**, ainda, a Universidade Federal da Bahia/ Sistema de Bibliotecas a **remover** a tese ou dissertação referida acima do site: <http://www.bdt.ufba.br/> a **qualquer tempo e independentemente de motivo e/ou notificação prévia** à minha pessoa.

Salvador, 02/05/2014 Dion Bezerra dos Santos Ribeiro
 Local Data Ass. do (a) Autor (a)/Representante legal.

Preenc

her em três vias. A primeira via deste formulário deve ser encaminhada ao Sistema de Bibliotecas da UFBA/Biblioteca Central; a segunda deve ser enviada para a Biblioteca de sua Unidade, juntamente com o arquivo contendo o documento; a terceira via deve permanecer no Programa de Pós-Graduação para o registro do certificado de conclusão do Curso.

Salvador, 02/05/2014

DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que o texto final apresentado para a conclusão do meu curso de Mestrado em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia é de minha autoria. Declaro também que quaisquer informações utilizadas neste texto, mas que sejam provenientes de outros trabalhos tem fonte claramente expressa e, quando for o caso, foram devidamente autorizadas pelo(s) respectivo(s) autor(es).



Nome: Dion Barbosa dos Santos Ribeiro
CPF: 033.757.795-18