



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

JOSÉ ALEJANDRO MORENO ALFONZO

**PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO PARA HOLOFOTES DE UM SIMULADOR
SOLAR CONTÍNUO PARA CARATERIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS
FOTOVOLTAICOS**

Salvador
2015

JOSÉ ALEJANDRO MORENO ALFONZO

**PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO PARA HOLOFOTES DE UM SIMULADOR
SOLAR CONTÍNUO PARA CARATERIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS
FOTOVOLTAICOS**

Projeto de 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
2015**

M843 Moreno Alfonzo, José Alejandro

Proposta de automação para holofotes de um simulador solar contínuo para caracterização de dispositivos fotovoltaicos / José Alejandro Moreno Alfonzo. - Salvador, 2015.

80f.: il.

Orientador: Prof.º Drº Iuri Muniz Pepe.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2015.

1. Energia solar – Mecatrônica. 2. Dispositivo fotovoltaico. 3. Microprocessadores. 4. Motores de passo. 5. Piranômetro. I. Pepe, Iuri Muniz. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDD: 629.8

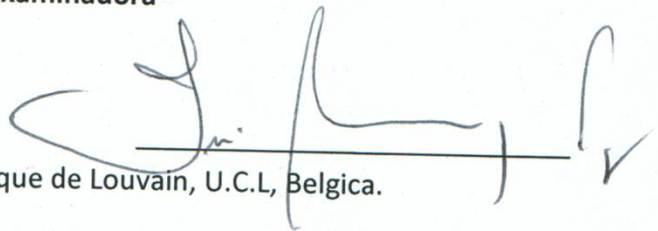
JOSÉ ALEJANDRO MORENO ALFONZO

**PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO PARA HOLOFOTES DE UM SIMULADOR
SOLAR CONTÍNUO PARA CARATERIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS
FOTOVOLTAICOS**

Projeto de 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, Belgica.
Universidade Federal da Bahia.



Prof. Dr. Denis Gilbert Francis David
Doutor em Espectroscopia Atômica, Universidade de Caen, França.
Universidade Federal da Bahia.



Prof. Dr. Augusto Cesar Pinto Loureiro da Costa
Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
Universidade Federal da Bahia.



Dedicado a Sidney Olivero

AGRADECIMENTOS

Yo no hubiera sido capaz de desarrollar este proyecto sin la ayuda de este grupo de personas reunidas trabajando en el Laboratorio de Propiedades Ópticas de la Universidade Federal da Bahía.

Por sobre todo a mi orientador el Profesor Doctor Iuri Muniz Pepe por depositar su confianza en mí, por motivarme a que no hay límites en mi aprendizaje convirtiéndose en un ejemplo a seguir, estaré eternamente agradecido.

A Marilú Castro por sus consejos y su apoyo, por querer lo mejor para mi futuro.

A Geydison Demetino y Vitor Leão por enseñarme electrónica y diseño de circuitos con Eagle.

A Ivanoe João y Carlos Eduardo por enriquecer más aún mis conocimientos mecánicos sobre el uso de herramientas de trabajo.

A Lucas Ramalho y Ângelo Santos por enseñarme sobre software de control, supervisión y comunicación, entre ellos PuTTY y Visual Studio.

A Lucas Gomez y Talhes Meira por su dedicación en el área administrativa, logrando para mí adquirir todo lo necesario para este trabajo.

A Luiz Simões por enseñarme a programar microcontroladores, a realizar comunicaciones seriales, a utilizar la máquina de circuitos impresos LPKF y por siempre estar allí para aclarar mis dudas, más que un compañero un co-orientador.

A Dion Ribeiro, Albal Rucas, Vitor Pinheiro que forman parte de este grupo multidisciplinario de investigación.

A Valmara Ponte por su amistad, que es el único cemento que siempre mantiene unido al mundo.

A Flavia Giugni por enseñarme que más que una discapacidad es un don que se puede aprovechar, gracias a ella me motive a estar aquí.

Agradezco al Programa de Alianzas para la Educación y Capacitación de la OEA, y el Grupo Coimbra de Universidades Brasileiras OEA-GCUB 2013 que me selecciono para realizar estudios de postgrados en Brasil.

Agradezco a la CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por la consignación de la beca durante todo el período de realización de esta maestría.

A mi familia que se encuentra en Venezuela depositando su confianza en mí, gracias mamá, continuare luchando...

*“Lo mejor de hallar las respuestas por ti mismo
es que te consigues enorgullecer y llenar por cada acto y decisión”
Oerba Día Vanille*

RESUMO

Este trabalho descreve a proposta de automação de holofotes modelo DTS SCENA 650/1000 S, a serem usados como iluminador solar contínuo com emissão no visível. O iluminador irá equipar o Laboratório de Certificação de Componentes para Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica, localizado no Parque Tecnológico da Bahia, possibilitando verificar a conformidade das normas CEI da Commission Electrotechnique Internationale. Estes dispositivos são fundamentais para os testes de certificação propostos no escopo do projeto de um laboratório de certificação em conformidade com normas brasileiras e internacionais. Foram conduzidos testes que justificam cada uma das soluções adotadas na automação do dispositivo, em especial a distribuição espacial do campo de radiação, comportamento térmico da lâmpada e o impacto do sistema de arrefecimento nas medidas de irradiância. Foram instrumentados cinco holofotes espaçados entre si de 127 milímetros (5 polegadas), de forma a concentrar horizontalmente a iluminação. Além disso, foi instalado um piranômetro de fabricação Kipp-Zonen, modelo CMP-21, em um suporte com dois graus de liberdade para avaliar as características de homogeneidade do campo de radiação exigida pela norma – assim foram testadas uniformidade e estabilidade. A solução tecnológica adotada não só automatizou o mecanismo de ajuste do foco do holofote, o sistema de arrefecimento melhorou seu desempenho emissivo diminuindo erro na estabilidade de 6,02% para 0,46%. Ao final, o protótipo mostra ter classificação A e B em não uniformidade, dependendo da configuração utilizada, classificação A em estabilidade e classificação C em distribuição espectral, em uma escala de três níveis: A, B ou C definidas pela norma CEI 60904-9, resultando em um equipamento robusto e estável.

Palavras Chave: Energia solar – Mecatrônica, Dispositivo fotovoltaico, Microprocessadores, Motores de passo, Piranômetro.

ABSTRACT

This work reports on the automation proposed for the DTS SCENA 650/1000 spotlights used in the development of a continuous solar illuminator, emitting in visible spectrum, projected for the Solar Energy Photovoltaic Systems Components Certification Laboratory, in the Technology Park of Bahia; in order to verify conformity with the standard CEI 904-9 of Commission Electrotechnique Internationale. These devices are essential for certification tests proposed in the projected laboratory, supported by Brazilian and International Standards. Tests were executed to justify each and every solution used, with special note to: the radiation spatial distribution and the spotlight thermal behavior, measured at different position inside and outside the lamp housing in order to find the best position for sensors and actuators; and the impact of the cooling system in the irradiation measures. It was verified that the cooling system does not affect the irradiance. The prototype is made up of 5 spotlights, 5 inches apart from each other. Light emitted is projected on a vertical plane, uniformity and stability were measured and seems meet the standards requirements, the performances were classified between A, B or C. These measurements were performed with a Kipp-Zonen piranometer, model CMP-21, installed on a mobile structure, allowing performing measurements at different points on a plane. The proposed automation improves the spotlight optical and thermal properties. The results show that the prototype is classified as A and B regarding non-uniformity, A in spectral distribution, and C in temporal stability, resulting in a stable and robust solar simulator.

Keywords: Solar energy - Mechatronics, Photovoltaic device, Microprocessors, Stepping motors, piranometer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1: Simulador solar do CENER Sarrigwre, España. | 21 |
| Figura 2: Radiação visível corresponde à faixa entre 380 e 780nm do espectro eletromagnético. | 24 |
| Figura 3: Distribuição espectral da luz emitida pelo Sol. | 24 |
| Figura 4: Constante solar (1373 W/m^2) imediatamente fora da atmosfera e radiação solar (1000 W/m^2) na superfície do planeta. | 25 |
| Figura 5: Exemplo de um piranômetro instalado para a medição da radiação solar em um campo solar. | 26 |
| Figura 6: Estrutura interna de um holofote comum com lente Fresnel. | 27 |
| Figura 7: Barramento RS-485 típico utilizando topologia do tipo Daisy Chain onde os componentes estão conectados no mesmo par trançado. | 28 |
| Figura 8: Diversos tipos de topologia de comunicação. No tipo “Daisy Chain”, em azul, é fácil controlar as reflexões causadoras de erros de comunicação. | 29 |
| Figura 9: Tempo de aquisição de dados de irradiância para o teste de estabilidade temporal durante o acendimento da lâmpada de um simulador solar. | 31 |
| Figura 10: Diagrama geral do sistema do simulador solar desenvolvido, com 5 holofotes conectados entre si por meio de um par trançado, utilizando barramento RS-485 para comunicação serial com o PC. | 33 |
| Figura 11: Holofote SCENA 650/1000 S. | 34 |
| Figura 12: Espectro do holofote com uma lâmpada halógena OSRAM de 1000W. | 34 |
| Figura 13: Diagrama de como o motor de passo se encontra conectado ao parafuso sem fim com um acoplamento flexível e utilizando um suporte de alumínio para fixar o motor ao corpo do holofote. | 35 |
| Figura 14: Acoplamento flexível $\varnothing 6\text{mm} \times \varnothing 6,35\text{mm} \times 25\text{mm}$ utilizado para transmitir o torque do motor ao parafuso sem fim do holofote. | 36 |
| Figura 15: Vista explodida do conjunto motor de passo, suporte de alumínio, acoplamento flexível e holofote SCENA 650/1000S. | 36 |
| Figura 16: Sensor de efeito Hall Honeywell serie 103SR. | 37 |
| Figura 17: Termômetro digital marca Minipa, modelo MT-455, com dois termopares para determinar o comportamento térmico interno dos holofotes. | 38 |
| Figura 18: Holofote utilizado com indicações dos pontos de posicionamento dos termopares (T1 e T2) e as posições da lâmpada testadas (P1, P2 e P3). | 38 |
| Figura 19: Sistema de detecção do sensor de efeito Hall com a barra que porta um ímã na ponta. | 39 |
| Figura 20: (a) Ventoinha Vita 80mmx80mm 17,6W. (b) Ventoinha NETWORK 92mmx92mm 16W. | 39 |

| | |
|--|----|
| Figura 21: Diagrama de conexões do circuito embarcado para controle do motor de passo, leitura do sensor de efeito Hall, acendimento da lâmpada, comunicação RS-485 e leitura dos jumpers de configuração de identidade do dispositivo. | 40 |
| Figura 22: Estrutura do Microcontrolador PIC16F628A. | 42 |
| Figura 23: Circuito Eletrônico Embarcado desenvolvido com um PIC16F628A com comunicação serial RS-485. | 42 |
| Figura 24: Diagrama do circuito para comunicação com NS75176BP. | 43 |
| Figura 25: Conversor Digital USB-i485. | 45 |
| Figura 26: Diagrama do sistema elétrico para um Holofote. | 47 |
| Figura 27: Quadro elétrico do simulador solar projetado para 5 holofotes. | 47 |
| Figura 28: Piranômetro instalado em um suporte construído com perfis de alumínio estruturado que permite sua movimentação em dois graus de liberdade, X e Y. | 48 |
| Figura 29: Piranômetro Kipp-Zonen modelo CMP-21. | 49 |
| Figura 30: Voltímetro digital RIGOL DM3062. | 49 |
| Figura 31: Teste de não uniformidade para 4 holofotes espaçados duas polegadas em configuração quadrada. | 50 |
| Figura 32: Teste de não uniformidade para 5 holofotes espaçados 5 polegadas em configuração triangular. | 50 |
| Figura 33: Gráficos da Temperatura do Termopar 1 em função do tempo. P1 (Preto); P2 (Azul); P3 (Vermelho). | 51 |
| Figura 34: Gráficos da Temperatura do Termopar 2 em função do tempo. P1 (Preto); P2 (Azul); P3 (Vermelho). | 51 |
| Figura 35: Gráfico de temperatura na fase anterior do holofote em função do tempo: sem ventoinha (preto), ventoinha 1 puxando ar (marrom), ventoinha 1 soprando ar (vermelho), ventoinha 2 puxando ar (laranja), ventoinha 2 soprando ar (amarelo). | 52 |
| Figura 36: Gráfico do teste de estabilidade temporal que mostra a irradiância em função do tempo durante 90 min de aquisição de dados. | 53 |
| Figura 37: Espectro do Holofote sobreposto ao espectro do sol. | 53 |
| Figura 38: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 0 passos de deslocamento. | 54 |
| Figura 39: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 208 passos de deslocamento. | 55 |
| Figura 40: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 416 passos de deslocamento. | 55 |
| Figura 41: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 625 passos de deslocamento. | 55 |
| Figura 42: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 833 passos de deslocamento. | 56 |
| Figura 43: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 1041 passos de deslocamento. | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 44: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 1250 passos de deslocamento. | 56 |
| Figura 45: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 1458 passos de deslocamento. | 57 |
| Figura 46: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 1666 passos de deslocamento. | 57 |
| Figura 47: Gráfico do erro de não uniformidade em função do Deslocamento para 4 holofotes espaçados de duas polegadas a um metro do piranômetro. | 58 |
| Figura 48: Gráfico da Irradiância em função do Deslocamento para 4 holofotes espaçados de duas polegadas a um metro do piranômetro..... | 58 |
| Figura 49: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1250 passos de deslocamento. | 59 |
| Figura 50: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1333 passos de deslocamento. | 59 |
| Figura 51: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1416 passos de deslocamento. | 60 |
| Figura 52: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1500 passos de deslocamento. | 60 |
| Figura 53: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1583 passos de deslocamento. | 60 |
| Figura 54: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1666 passos de deslocamento. | 61 |
| Figura 55: Gráfico do erro de não uniformidade em função do Deslocamento para 4 holofotes espaçados de cinco polegadas a um metro e trinta centímetros do piranômetro. | 61 |
| Figura 56: Mapeamento com 1416 passos com 86,42% do tipo A em uma area 238mm x 238mm e uma irradiância de 901 W/m ² | 62 |
| Figura 57: Mapeamento com 1500 passos com 83,95% do tipo A em uma area de 238mm x 238mm, e uma irradiância de 901 W/m ² | 62 |
| Figura 58: Gráfico da Irradiância em função do Deslocamento para 4 holofotes espaçados de cinco polegadas a um metro e trinta centímetros do piranômetro. | 62 |
| Figura 59: Mapa da Irradiância em função da área para 5 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1250 passos de deslocamento. | 63 |
| Figura 60: Mapa da Irradiância em função da área para 5 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1458 passos de deslocamento. | 63 |
| Figura 61: Mapa da Irradiância em função da área para 5 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1666 passos de deslocamento. | 64 |
| Figura 62: Gráfico do erro de não uniformidade em função do Deslocamento para 5 holofotes espaçados de cinco polegadas a um metro e trinta centímetros do piranômetro. | 64 |
| Figura 63: Gráfico da Irradiância em função do Deslocamento para 5 holofotes espaçados de cinco polegadas a um metro e trinta centímetros do piranômetro. | 65 |

LISTA DE TABELAS E QUADROS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Referência mundial de distribuição de irradiância espectral da luz solar..... | 30 |
| Tabela 2: Definição das classificações dos simuladores solares. | 31 |
| Tabela 3: Características mecânicas, elétrica e físicas do motor de passo NEMA – SM 1.8-B1-SE. | 35 |
| Tabela 4: Descrição dos <i>strings</i> de comando das tarefas realizadas pelo circuito embarcado. | 45 |
| Tabela 5: Valores de percentagem de irradiância total do holofote de acordo as faixas de comprimento de onda de referência, obtendo assim, sua classificação referente à distribuição espectral. | 54 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEI - *Commission Electrotechnique Internationale*

IEC - *International Electrotechnical Commission*

DTS - *The Lighting Company*

PC - Computador Pessoal

RS - *Recommended Standard*

CENER - Centro Nacional de Energías Renovables

HID - *High Intensity Discharge*

UA - Unidade Astronômica

EIA - *Electronic Industries Alliance*

STC - *Standard Test Conditions*

ID - *Identification Number*

PIC - *Peripheral Interface Controller*

COM - *Communication*

P1 - Posição 1

P2 - Posição 2

P3 - Posição 3

T1 - Termopar 1

T2 - Termopar 2

CRC - Verificação de Redundância Cíclica

SUMARIO

| | | |
|---------|---|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | OBJETIVO GERAL | 19 |
| 1.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 19 |
| 1.3 | JUSTIFICATIVA | 20 |
| 2. | REVISÃO DA LITERATURA | 21 |
| 2.1 | SIMULADOR SOLAR..... | 21 |
| 2.1.1 | Tipos de Simuladores Solares..... | 21 |
| 2.1.1.1 | Simulador solar contínuo..... | 21 |
| 2.1.1.2 | Simulador solar intermitente | 22 |
| 2.1.1.3 | Simulador solar pulsado | 22 |
| 2.1.2 | Tipos de lâmpadas | 22 |
| 2.2 | O SOL..... | 23 |
| 2.2.1 | Radiação solar | 23 |
| 2.2.2 | Espectro eletromagnético | 24 |
| 2.2.3 | O espectro solar | 24 |
| 2.2.4 | Constante solar | 25 |
| 2.2.5 | Piranômetro | 26 |
| 2.3 | HOLOFOTE | 26 |
| 2.4 | SISTEMAS ELETRÔNICOS EMBARCADOS | 27 |
| 2.4.1 | Padrão RS-485 | 28 |
| 2.4.2 | Topologia..... | 29 |
| 2.5 | NORMAS E PADRÕES CEI/IEC..... | 29 |
| 2.5.1 | NORMA CEI 60904-9: 2007 <i>Solar Simulator performance requirements.</i> | 30 |
| 2.5.1.1 | Distribuição espectral | 30 |
| 2.5.1.2 | Estabilidade temporal | 31 |
| 2.5.1.3 | Não uniformidade | 31 |
| 2.5.2 | NORMA CEI 60904-2: 2007 <i>Requirements for reference solar devices</i> | 32 |
| 2.5.3 | NORMA CEI 61730-2: 2004 Photovoltaic (PV) module safety qualification - Requirements for testing..... | 32 |
| 3. | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 33 |
| 3.1 | SENSORES E ATUADORES..... | 33 |
| 3.1.1 | Holofote SCENA 650/1000S..... | 33 |
| 3.1.2 | Motor de passo NEMA – SM 1.8-B1-SE..... | 35 |
| 3.1.3 | Acoplamento flexível | 36 |
| 3.1.4 | Sensor de Efeito Hall série 103SR Honeywell | 37 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1.5 | Barra porta ímã | 38 |
| 3.1.6 | Ventilador 220 v..... | 39 |
| 3.2 | PROJETO DA ELECTRÔNICA EMBARCADA | 40 |
| 3.2.1 | Unidade embarcada de controle..... | 40 |
| 3.2.2 | Comunicação do circuito embarcado..... | 43 |
| 3.2.3 | <i>Firmware</i> | 44 |
| 3.3 | COMUNICAÇÃO | 44 |
| 3.3.1 | Conversor Digital USB-i485..... | 44 |
| 3.3.2 | Protocolo de comunicação | 45 |
| 3.3.3 | Software | 46 |
| 3.4 | SISTEMA ELÉTRICO | 46 |
| 3.5 | CALIBRAÇÃO DO SISTEMA | 47 |
| 3.5.1 | Piranômetro Kipp-Zonen | 48 |
| 3.5.2 | Multímetro digital RIGOL DM3062 | 49 |
| 3.5.3 | Teste de não uniformidade | 49 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 51 |
| 4.1 | TEMPERATURA | 51 |
| 4.1.1 | Comportamento térmico do holofote | 51 |
| 4.1.2 | Instalação do sistema de arrefecimento..... | 52 |
| 4.2 | ESTABILIDADE TEMPORAL | 52 |
| 4.3 | DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL | 53 |
| 4.4 | NÃO UNIFORMIDADE..... | 54 |
| 4.4.1 | Teste para 4 Holofotes espaçados de 2 pol a 1 metro do piranômetro | 54 |
| 4.4.2 | Teste para 4 Holofotes espaçados de 5 pol a 1,30 metros do piranômetro.... | 59 |
| 4.4.3 | Teste para 5 Holofotes espaçados de 5 pol a 1,30 metros do piranômetro.... | 63 |
| 5. | CONCLUSÕES..... | 66 |
| | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 68 |
| | REFERÊNCIAS..... | 69 |
| | Apêndice A – Planos de fabricação | 71 |
| | Apêndice B – Esquema eletrônico desenvolvido..... | 72 |
| | Apêndice C – Código do <i>firmware</i> | 73 |
| | Anexo 1 – Artigo publicado no 10º Congresso Internacional de Bioenergia | 76 |

1. INTRODUÇÃO

Os painéis fotovoltaicos são os elementos mais importantes dos sistemas de geração de energia elétrica a partir da luz do Sol, sendo então essencial sua caracterização e certificação. Para tais fins, é fundamental ter à disposição uma bancada de iluminação solar artificial capaz de simular a irradiação e o espectro solar. O Laboratório de Certificação de Componentes para Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica fará uso extensivo deste tipo de equipamento, que precisa ser cuidadosamente projetado para atender as normas da *Commission Electrotechnique Internationale* (CEI). O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um iluminador constante na faixa de luz visível, com o uso de um holofote de iluminação de cena para obter as condições exigidas pelas normas da CEI para a realização deste tipo de testes.

Os holofotes DTS, série SCENA 650/1000 S, são equipamentos italianos de boa qualidade ótica e mecânica, mas com ajuste de foco manual, ou seja, não possuem nenhuma automação. A proposta deste trabalho é desenvolver e validar cinco protótipos automatizados que comporão o iluminador solar na região do visível, a ser empregado no Laboratório de Certificação de Componentes para Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica.

A primeira etapa deste trabalho foi resolver a questão do ajuste automatizado do foco empregando um motor de passo para movimentar de forma precisa e controlada a lâmpada interna do projetor em seu trilho de suporte. Esse movimento, originalmente realizado de forma manual coloca a lâmpada em posições tais que seu cone de iluminação é mais ou menos concentrado por uma lente Fresnel montada na frente do holofote, a fim de se obter as diferentes intensidades de irradiância na superfície incidente. Com dois holofotes separados entre si de duas polegadas, cada um dotado de uma lâmpada halógena OSRAM de 1000 W, foi possível medir valores de irradiância em uma faixa desde abaixo de uma constante solar (1000 W/m^2) até quase três vezes o valor. (RIBEIRO, D.B.S. 2014, p. 60).

Em seguida, foi avaliado o perfil de resposta térmica do holofote para escolher a melhor posição da instrumentação a ser montada dentro dele, além de testar a necessidade da instalação de um sistema de arrefecimento para manter uma temperatura de operação adequada.

Um sensor de efeito Hall foi escolhido como sensor de fim de curso, para detectar a posição inicial da lâmpada, assim, como o controle e posicionamento é feito por um software para computador pessoal (PC). O sistema de comunicação dos dados de posição de cada motor de passo é feito, entre o PC e um microcontrolador embarcado em cada holofote, usando um barramento RS-485, que permite a conexão entre o computador pessoal com até 32 dispositivos (SOARES JUNIOR, L. C. S. 2008, p. 24). Assim, o usuário estabelece às condições dos testes a serem realizados, o software gera e comunica o código de posição de cada motor de passo e o microcontrolador executa o comando deste motor.

Utilizando um piranômetro, fixo a uma estrutura que permite realizar medições num plano vertical com dois graus de liberdade (X e Y) foram realizados os testes requeridos pela norma CEI 60904-9 de uniformidade e estabilidade temporal. A norma classifica os simuladores solares em três categorias A, B e C, segundo seu erro.

A não uniformidade e a estabilidade temporal seriam classificados como do tipo C se o desvio estivesse entre 10% e 5%, do tipo B se o intervalo de confiança fosse de 5% a 2% e, finalmente do tipo A se é menor ou igual a 2%. (Norma Internacional CEI 60904-9, 2007, p. 4).

Os capítulos seguintes cobrem a análise do problema, o embasamento teórico, descrição dos materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do protótipo, avaliação dos resultados, conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema de automação, utilizando técnicas de controle embarcado, composto de hardware e software, para 5 holofotes modelo SCENA 650/1000S de um simulador solar contínuo, capaz de reproduzir diferentes intensidades de radiação solar para caracterização de dispositivos fotovoltaicos e verificar a conformidade desta montagem com as normas da *Commission Electrotechnique Internationale* (CEI).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Motorizar o parafuso sem fim que movimenta a lâmpada interna do projetor em seu trilho de suporte, possibilitando o ajuste automatizado de foco de holofotes comerciais.
- Avaliar o perfil térmico do holofote para definir o posicionamento dos sensores, do atuador e dos circuitos eletrônicos na carcaça deste dispositivo.
- Instalar um sistema de arrefecimento para manter a temperatura dos holofotes no valor adequado para a operação dos componentes do eletrônicos de comando e controle.
- Instalar um sensor de efeito Hall, como sensor de fim de curso, para detectar a posição de início de curso da lâmpada em seu trilho.
- Desenvolver um circuito embarcado, dotado de microcontrolador, para leitura do sinal do sensor de fim de curso, o controle do motor de passo e a comunicação com um PC.
- Desenvolver uma estrutura em alumínio, com rodas para movimentação lateral (X) sobre um trilho fixo ao solo e barras paralelas de posicionamento (Y) de um piranômetro de testes, permitindo realizar medições de irradiância no plano vertical com dois graus de liberdade (X e Y).
- Realizar os testes de uniformidade e estabilidade da célula de iluminador solar proposta, com até 5 holofotes, para validação desta montagem, verificando sua conformidade da norma 60904-9 da *Commission Electrotechnique Internationale*.

1.3 JUSTIFICATIVA

Quando uma empresa de produção e/ou venda de dispositivos fotovoltaicos propõem uma solução de geração de energia elétrica, esta solução deve atender as especificações da equipe de engenharia do cliente ou comprador. Sendo assim, no período que segue o recebimento das placas solares fotoelétricas se faz imperativo testar a encomenda recebida. Para não ter que depender da luz solar natural para determinar as características de geração dos módulos foto geradores, são indispensáveis os simuladores solares contínuos, com emissão no visível, capazes de simular os diferentes tipos de condições aos quais são expostos os dispositivos fotovoltaicos no ambiente real.

A necessidade de ter uma bancada de iluminação solar artificial constante e de irradiância ajustável, fácil de utilizar, é fundamental para realizar testes de caracterização e certificação de painéis fotovoltaicos, que são os elementos principais dos sistemas de energia solar fotovoltaica. O holofote SCENA 650/1000 S pode fornecer valores de irradiância em uma faixa desde abaixo de uma constante solar (1000 W/m^2), até quase três vezes o valor desta (RIBEIRO, D.B.S. 2014, p. 60). Como iluminador visível, este holofote é uma boa solução para se obter as condições de uniformidade, estabilidade e distribuição espectral previstas pelas normas da CEI para a realização deste tipo de testes. O Laboratório de Certificação de Componentes para Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica fará uso extensivo deste equipamento que precisa ser cuidadosamente caracterizado.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 SIMULADOR SOLAR

Os simuladores solares contínuos são equipamentos utilizados para gerar, a partir de lâmpadas e da corrente elétrica, a irradiação e o espectro visível emitido pelo sol para caracterizar dispositivos fotovoltaicos em um ambiente controlado e independente das condições de clima. Os simuladores normalmente são constituídos por três componentes principais: (1) fonte de luz e fonte de alimentação; (2) os filtros que modificam o espectro de emissão da lâmpada, de forma a atender aos requisitos de classificação; e (3) o sistema de controle necessário para operar o simulador. (Norma Internacional CEI 60904-9, 2010, p. 3) Na Figura 1 é apresentado um simulador solar contínuo desenvolvido pelo *Centro Nacional de Energías Renovables (CENER)* em Sarrigwre, España.



Figura 1: Simulador solar do CENER Sarrigwre, España.

2.1.1 Tipos de Simuladores Solares

Os simuladores solares podem ser divididos em três grandes categorias: contínuo, intermitente, e pulsado. (ETERNAL SUN B.V., 2014)

2.1.1.1 Simulador solar contínuo

Este tipo é uma fonte de luz em que a iluminação é contínua no tempo. Esta categoria é mais frequentemente usada para teste de baixa intensidade, desde menos de uma constante solar até algumas constantes.

Simuladores solares de luz contínuas podem usar diferentes tipos de lâmpadas, seja como lâmpada única ou lâmpadas combinadas (por exemplo, uma lâmpada de arco, ou, uma ou mais lâmpadas de halogênio) para alargar o espectro no infravermelho.

2.1.1.2 Simulador solar intermitente

O segundo tipo de simulador solar é do tipo intermitente que é qualitativamente semelhante a um flash fotográfico. As durações típicas das intermitências de vários milissegundos produzem muito altas intensidades, de até vários milhares de constantes solares. Este tipo de equipamento é frequentemente usado para evitar o desnecessário acúmulo de calor nos dispositivos fotovoltaicos quando eles estão sendo testados. No entanto, operar uma lâmpada de forma intermitente trás certas dificuldades técnicas. Devido a sua pequena inércia térmica, ou seja, rápido aquecimento e resfriamento, não se pode assumir que nem a intensidade da luz emitida, nem o espectro desta emissão sejam constantes, a resposta do simulador solar passa a ser transitórias.

O requerimento das normas, quanto a estabilidade temporal, não se aplica diretamente a esta categoria de simuladores solares, sendo substituída por uma especificação de repetibilidade análoga.

2.1.1.3 Simulador solar pulsado

O terceiro tipo de simulador solar é o simulador pulsado, que utiliza um obturador que bloqueia e libera rapidamente o feixe emitido por uma fonte de luz contínua. Esta categoria é uma mistura entre o simulador contínuo e o simulador intermitente, tendo a desvantagem de utilizar altas potências para fornecer as baixas intensidades dos simuladores contínuos, e a vantagem de ter uma luz de saída estável, tanto em intensidade, quanto em espectro, aliando isso a baixa transmissão de calor entre a fonte e o painel a ser testado, que é uma característica dos simuladores intermitentes.

2.1.2 Tipos de lâmpadas

Vários tipos de lâmpadas são usados como fonte de luz nos simuladores solares.

A lâmpada de xenônio é o tipo mais comum de lâmpada, tanto para simuladores solares contínuos, quanto para os intermitentes. Estas lâmpadas de alta intensidade oferecem uma distribuição espectral não filtrada que corresponde, razoavelmente bem, ao espectro solar.

As lâmpadas de haluro metálico são lâmpadas de descarga de alta pressão do grupo chamado HID (*High Intensity Discharge*). Elas são geralmente de alta potência e boa reprodução de cores, além de gerar luz ultravioleta.

As lâmpadas halógenas são lâmpadas incandescentes com filamento de tungstênio contido em um gás inerte e uma pequena quantidade de um halogênio, como iodo ou bromo. Elas emitem um espectro que corresponde muito bem à radiação de um corpo negro, tipicamente com temperatura de cor um pouco mais baixa do que a do Sol.

LEDs, ou, diodos emissores de luz têm sido recentemente utilizados em laboratórios de pesquisa para a construção de simuladores solares, e parecem ser uma promessa futura para a produção eficiente de luz solar artificial, se espectralmente adaptados.

2.2 O SOL

O Sol é a estrela mais próxima da Terra e 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 detalhe (RIBEIRO, D.B.S. 2014).

2.2.1 Radiação solar

A radiação solar é a principal fonte de energia da Terra, anualmente a quantidade de energia fornecida pelo sol é de $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh, o equivalente a dez mil vezes o consumo mundial de energia durante o mesmo período. (ANEEL, 2005).

Cerca de 30% da radiação solar que chega à Terra é refletida de volta ao espaço, 23% é absorvida pela atmosfera e só 47% é absorvida pelo planeta. (Matsuura & Picazzio, 2006).

2.2.2 Espectro eletromagnético

O espectro eletromagnético é o intervalo de todas as possíveis frequências da radiação eletromagnética que se estende desde as de baixas frequências, como ondas de rádio, até a radiação gama. A radiação visível corresponde à faixa entre 380 e 780nm como ilustra a Figura 2.

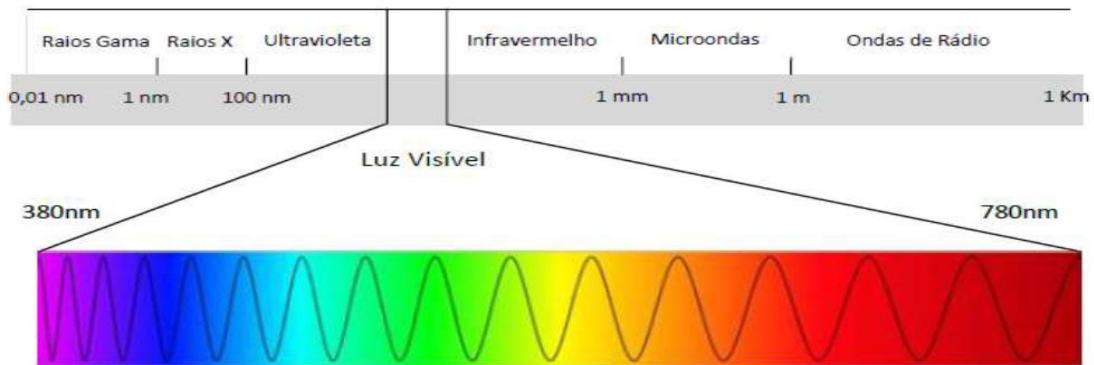


Figura 2: Radiação visível corresponde à faixa entre 380 e 780nm do espectro eletromagnético.

2.2.3 O espectro solar

A distribuição espectral da luz emitida pelo Sol é mostrada na Figura 3. Esta é uma distribuição total, composta pela radiação direta e a componente difusa da luz solar, o que corresponde a uma irradiância integrada ao nível do mar de 1000W/m^2 , ou seja, radiação incidente numa superfície plana virada para o sol inclinado de 37° em relação à horizontal. (Norma Internacional CEI 60904-3, 208, p. 30).

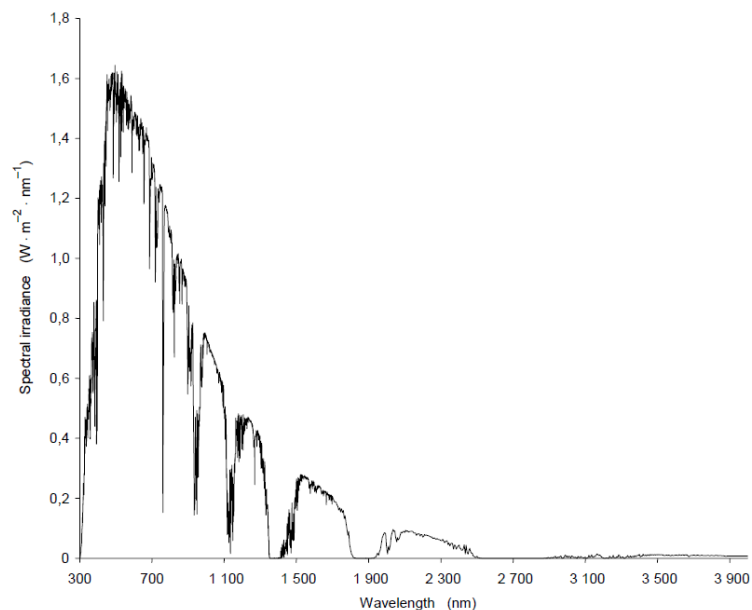


Figura 3: Distribuição espectral da luz emitida pelo Sol.

Fonte: (Norma Internacional CEI 60904-3, 208, p. 30)

2.2.4 Constante solar

A irradiância é a magnitude usada para descrever a energia incidente por unidade de superfície. Numa área de 1m^2 imediatamente fora da atmosfera terrestre como se observa na Figura 4, o valor da irradiância solar é de $1367\text{W}/\text{m}^2$, essa grandeza é chamada de constante solar. (Fröhlich, 1981)

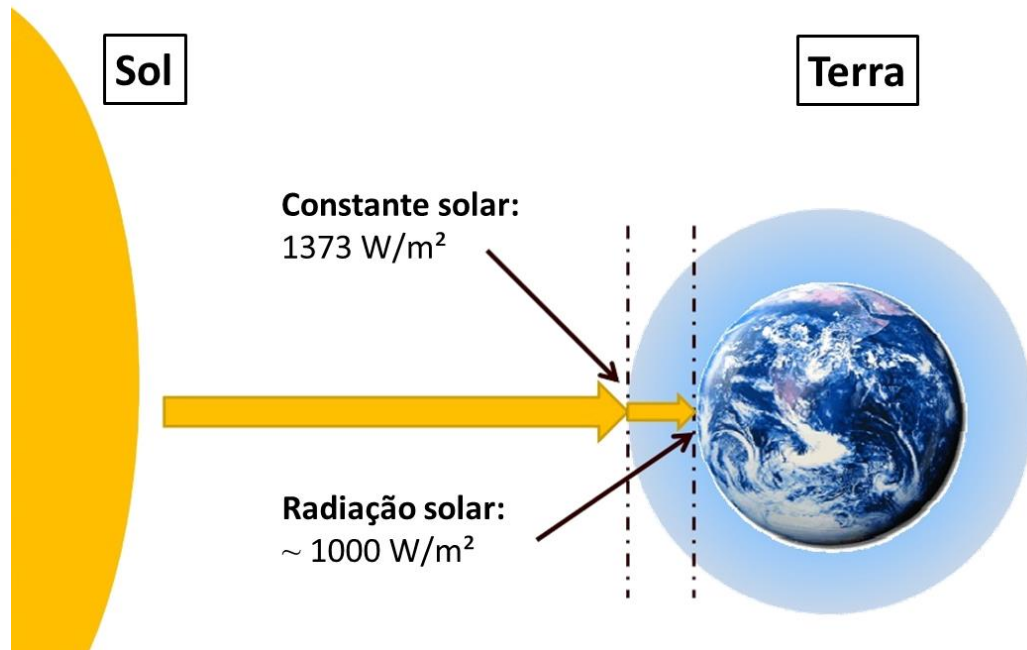


Figura 4: Constante solar ($1373\text{ W}/\text{m}^2$) imediatamente fora da atmosfera e radiação solar ($1000\text{ W}/\text{m}^2$) na superfície do planeta.

A atmosfera terrestre exerce forte influência na quantidade de radiação solar que chega à superfície do planeta, assim como na forma do espectro desta radiação. As interações da radiação com a atmosfera, como absorção, difusão ou reflexão, diminuem o valor global ou em bandas, mais ou menos estreitas, em relação ao espectro medido diretamente.

Radiação solar direta é a porção de energia que chega à superfície do planeta sem sofrer nenhuma interação. Pode-se assumir com confiança que o valor da irradiância na superfície do planeta é de $1000\text{ W}/\text{m}^2$, para um dia claro com boa insolação. (Teodoro da Silva, 2010)

2.2.5 Piranômetro

Os piranômetros são equipamentos que realizam a medição da radiação solar incidente na superfície terrestre (Souza, 2008). São equipamentos constituídos, em sua maioria, de termopilhas que possuem duas superfícies, uma exposta ao Sol e outra escura. A radiação que incide na superfície iluminada determina uma diferença de temperatura entre as superfícies sensíveis, produzindo uma diferença de tensão. Na Figura 5 é mostrado um piranômetro instalado em um campo solar.



Figura 5: Exemplo de um piranômetro instalado para a medição da radiação solar em um campo solar.

2.3 HOLOFOTE

O Holofote é um dispositivo de iluminação constituído de uma lâmpada incandescente, de descarga em gás ou um LED, e uma lente refletora ou defletora, capaz de colimar e direcionar a luz formando um feixe. A luz concentrada e mais intensa pode ser usada para guiar navios ou aeronaves à portos e aeroportos durante nevoeiros noturnos, ou ser usada na iluminação da cena, ou de detalhes da cena, de teatros e demais eventos artísticos para iluminar as apresentações.

Alguns destes dispositivos têm um tipo de lente refratora chamada de lente Fresnel, nomeada assim por seu inventor Augustin-Jean Fresnel, que foi projetada para grandes aberturas e curta distância focal, sem o peso e volume do material que seria necessário para uma lente convencional de borda fina. Comparadas a estas, as Fresnel são bem mais finas, permitindo a passagem mais eficiente da luz. A Figura 6 ilustra a estrutura interna de um holofote com lente Fresnel.

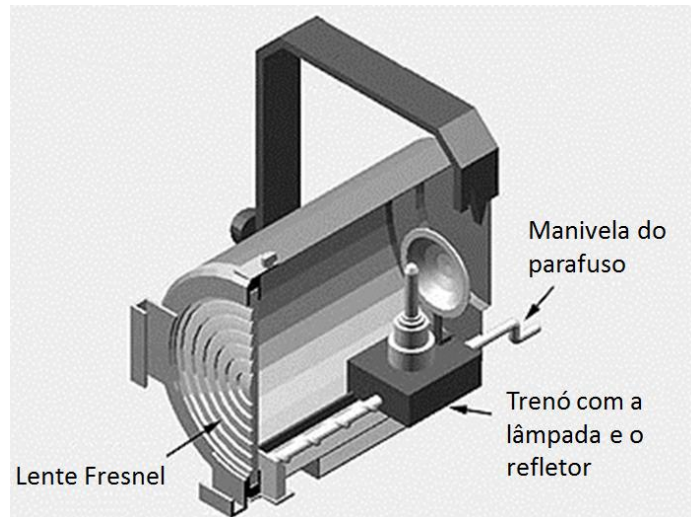


Figura 6: Estrutura interna de um holofote comum com lente Fresnel.

2.4 SISTEMAS ELETRÔNICOS EMBARCADOS

Os sistemas eletrônicos embarcados (*Embedded Electronics Systems*) são sistemas, geralmente, microprocessado nos quais o computador é completamente encapsulado ou dedicado ao dispositivo ou sistema que ele controla. Diferentemente de um computador de propósito geral, um sistema embarcado realiza um conjunto de tarefas predefinidas, geralmente com requisitos específicos, dessa forma pode-se aperfeiçoar o projeto reduzindo o tamanho, recursos computacionais e custo do produto.

Em geral os sistemas embarcados possuem uma capacidade de processamento reduzida em comparação com computadores *desktop* ou *laptop*. Normalmente são utilizados microcontroladores que possuem as interfaces de periféricos integradas no mesmo chip, hoje no mercado é possível encontrar uma certa variedade de arquiteturas disponíveis: ARM, MIPS, Coldfire/68k, PowerPC, x86, PIC, 8051, Atmel AVR, Renesas H8, SH, V850, FR-V, M32R, Z80 e Z8.

Os periféricos mais comuns para microcontroladores são:

- Entrada de dados e comandos feita por teclas;
- Interface para acendimento de LEDs;
- Interface para displays de LCD;
- Interface serial (Tx, Rx e GND);
- Universal Serial Bus - (USB);
- TCP/IP;

Os sistemas eletrônicos embarcados compõem sistemas maiores, com os quais interagem, geralmente, por meio de interfaces seriais, com dados, comandos e instruções enviados bit a bit. Para uniformizar estas conexões foram criados padrões seguidos por desenvolvedores e pela indústria. Responsável pelo desenvolvimento e criação dos principais padrões de comunicação serial, a EIA (*Electronic Industries Alliance*) desenvolveu os três grandes protocolos de comunicação serial recomendados: RS-232, RS-485 e RS-422. O prefixo RS vem de *Recommended Standard* (Bruno Saraiva da Silva, 2013).

2.4.1 Padrão RS-485

Um transceptor RS-485 traduz um sinal lógico TTL em dois sinais, denominados de A e B. O sinal A possui a mesma lógica do sinal TTL, enquanto que o sinal B é complementar. A informação do sinal de entrada está codificada na forma de um sinal A-B, ou seja, da diferença entre os sinais A e B. Se esta diferença for superior a 200mV, então se tem nível lógico 1, caso a diferença seja inferior a -200mV, então se considera nível lógico 0.

A norma TIA/EIA-485 descreve que esta interface de comunicação, operando em linhas diferenciais, é capaz de se comunicar com até 32 dispositivos numa mesma rede, como representado na Figura 7. O meio físico mais usado para interligar os componentes da rede é um par trançado. Através deste único par de fios, cada dispositivo transmite e recebe dados, comandos ou instruções. Cada nó aciona o seu transmissor apenas no instante que necessita transmitir, mantendo-o desligado o resto do tempo, de modo a permitir que outros dispositivos transmitam diminuindo a probabilidade de colisão de pacotes de informação em uma rede com alto tráfego. (SOARES JUNIOR, L. C. S. 2008, p. 24)

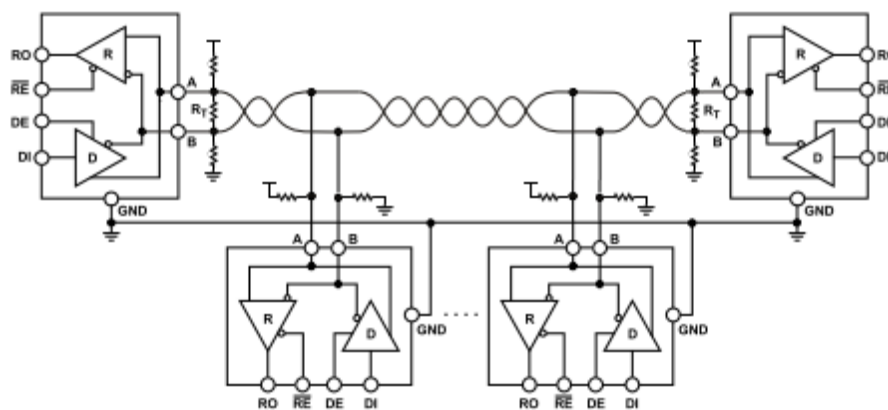


Figura 7: Barramento RS-485 típico utilizando topologia do tipo Daisy Chain onde os componentes estão conectados no mesmo par trançado.

Este barramento de comunicação e seu respectivo protocolo são amplamente difundidos em ambientes industriais para transmissão de pequenos volumes de dados. As especificações do barramento padrão permitam uma taxa de transmissão de até 10 Mbit/s em distâncias de até 1200 m.

2.4.2 Topologia

Enquanto a velocidade for relativamente baixa e as distancias relativamente curtas, a influência da topologia da rede em seu desempenho não é significativa. Contudo, quando os efeitos de linhas de transmissão começam a aparecer, há apenas uma topologia simples que permite minimizar estes efeitos, na Figura 8 são mostrados alguns tipos de topologia. Apenas no tipo “*Daisy Chain*”, onde todos os dispositivos são conectados diretamente aos condutores da linha de comunicação principal, e fácil controlar as reflexões causadoras de erros de comunicação.

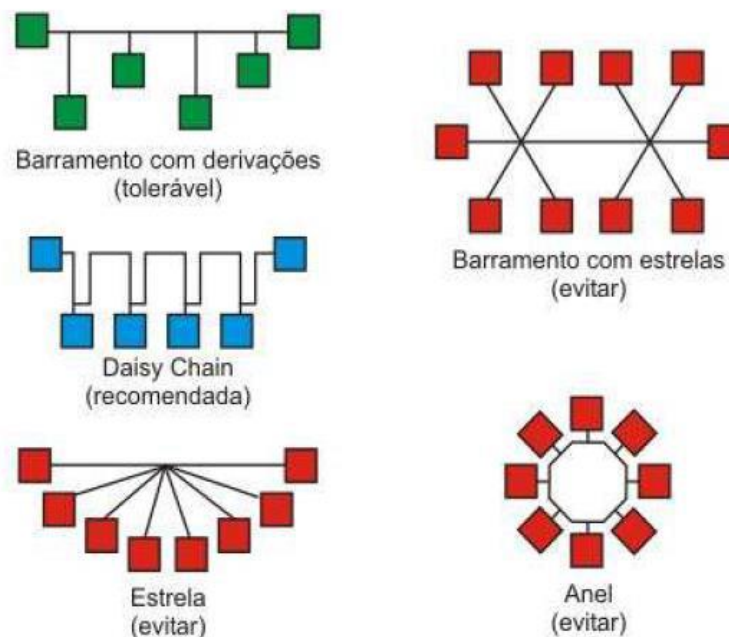


Figura 8: Diversos tipos de topologia de comunicação. No tipo “*Daisy Chain*”, em azul, é fácil controlar as reflexões causadoras de erros de comunicação.

2.5 NORMAS E PADRÕES CEI/IEC

A CEI/IEC (*Commission Electrotechnique Internationale* (francês) ou *International Electrotechnical Commission* (inglês)) estabeleceu padrões internacionais para a avaliação, caracterização e certificação de módulos fotovoltaicos, iluminadores solares, inversores de

corrente, entre outros equipamentos que fazem parte dos sistemas de geração de eletricidade por efeito fotoelétrico. As normas CEI 60904-2, CEI 60904-9 e CEI 61730-2 são algumas das mais importantes e que o Laboratório de Certificação de Componentes para Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica tem que atender com o simulador solar ora desenvolvido.

As normas CEI para dispositivos fotovoltaicos requerem o uso de classes específicas de simuladores solares convenientes para testes específicos. Os simuladores solares podem ser usados tanto para medições de dispositivos fotovoltaicos como para testes de resistência à irradiação.

2.5.1 NORMA CEI 60904-9: 2007 *Solar Simulator performance requirements.*

O objetivo desta norma é definir as classificações dos simuladores solares para uso em medições internas de dispositivos fotovoltaicos terrestres, eles são classificados como A, B ou C, com base em critérios de distribuição espectral, não uniformidade no plano de ensaio e instabilidade temporal. Esta norma estabelece as metodologias necessárias para a determinação da classificação obtida por um simulador solar em cada uma das categorias.

2.5.1.1 Distribuição espectral

A distribuição da irradiância espectral do simulador deve coincidir com a distribuição de irradiância espectral de referência especificada na Tabela 1.

Tabela 1: Referência mundial de distribuição de irradiância espectral da luz solar.

| | Faixa de comprimento de onda (nm) | Porcentagem de irradiância total na faixa de comprimento de onda de 400 – 1100 nm |
|---|--|--|
| 1 | 400 – 500 | 18,4 % |
| 2 | 500 – 600 | 19,9 % |
| 3 | 600 – 700 | 18,4 % |
| 4 | 700 – 800 | 14,9 % |
| 5 | 800 – 900 | 12,5 % |
| 6 | 900 – 1100 | 15,9 % |

Fonte: (NORMA IEC 60904-9 : 2007)

2.5.1.2 Estabilidade temporal

Durante o tempo de aquisição de dados observado na Figura 9, a irradiância deve ser estável na medida especificada na Tabela 2 para cada categoria do simulador. A equação utilizada para o calculo do desvio é dada na expressão (1).

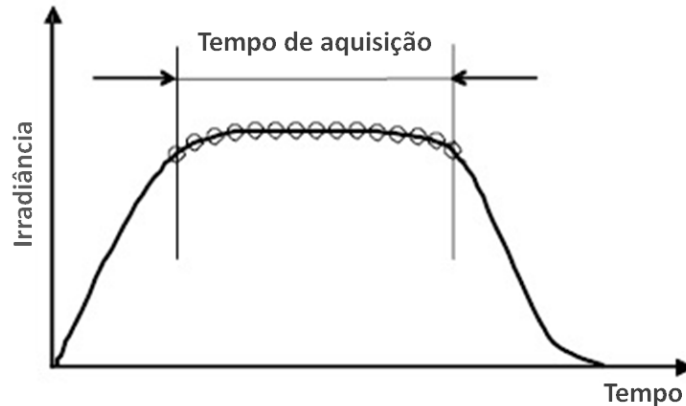


Figura 9: Tempo de aquisição de dados de irradiância para o teste de estabilidade temporal durante o acendimento da lâmpada de um simulador solar.

Fonte: (Norma Internacional CEI 60904-9, p. 8)

$$\text{Estabilidade Temporal}(\%) = \pm \left[\frac{\text{irradiância máxima} - \text{irradiância mínima}}{\text{irradiância máxima} + \text{irradiância mínima}} \right] * 100 \quad (1)$$

2.5.1.3 Não uniformidade

A irradiância no plano de ensaio e na extensão total da área de teste deve ser uniforme na medida especificada pela Tabela 2 para a respectiva classe do simulador. A equação utilizada para o calculo do desvio da não uniformidade é dada pela expressão (2).

$$\text{Não uniformidade} = \pm \left[\frac{\text{irradiância máxima} - \text{irradiância mínima}}{\text{irradiância máxima} + \text{irradiância mínima}} \right] * 100 \quad (2)$$

Se o simulador destina-se ao uso em condição de medição STC, ele deve ser capaz de produzir uma irradiância eficaz de 1000W/m² no plano de ensaio. Níveis de irradiância maiores ou menores também podem ser requeridos e úteis na caracterização de dispositivos fotovoltaicas.

Tabela 2: Definição das classificações dos simuladores solares.

| Classificação | Distribuição Espectral | Estabilidade Temporal | Não Uniformidade |
|---------------|------------------------|-----------------------|------------------|
| A | 0,75 – 1,25 | ≤ ±2 % | ≤ ±2 % |
| B | 0,6 – 1,4 | ≤ ±5 % | ≤ ±5 % |
| C | 0,4 – 2,0 | ≤ ±10 % | ≤ ±10 % |

Fonte: (NORMA IEC 60904-9: 2007)

2.5.2 NORMA CEI 60904-2: 2007 *Requirements for reference solar devices*

Esta norma abrange os dispositivos de referência solares usados para determinar o desempenho elétrico de células solares, módulos e matrizes sobre a luz solar natural e simulada.

Se for usado um simulador solar para os testes, ele deve ser de classe AAA em conformidade com a norma CEI 60904-9. Como requisito adicional, a não uniformidade da irradiação deveria ser inferior a $\pm 1\%$ no interior da superfície do dispositivo a ser calibrado. Se o requisito de não uniformidade não pode ser cumprido para calibrar módulos de referência feitos a partir de uma ligação em série de células, deve ser apresentada pelo condutor do ensaio uma análise detalhada da incerteza, tendo em conta a incompatibilidade na corrente de curto-circuito das células individuais. A irradiância total utilizada para os testes não deve exceder a 800W/m^2 .

2.5.3 NORMA CEI 61730-2: 2004 *Photovoltaic (PV) module safety qualification - Requirements for testing.*

O objetivo da norma CEI 61730-2 é preconizar a sequência de testes destinados à verificação da segurança dos módulos fotovoltaicos, cuja construção tenha sido avaliada e aprovada segundo a norma CEI 61730-1. Os critérios de sequência de ensaio são projetados para detectar as falhas potenciais de componentes internos e externos que podem resultar em incêndio, e/ou, choque elétrico.

Se for usado um simulador solar para os testes, a irradiância durante o ensaio não deve ser inferior a 700W/m^2 com um dispositivo calibrado com a precisão de $\pm 5\%$ de acordo com a norma CEI 60904-2 e CEI 60904-6.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema proposto é composto por componentes mecânicos, eletrônicos e de software, podendo ser dividido em quatro partes: o sistema mecânico que instrumenta o holofote; os circuitos embarcados montados ao redor do microcontrolador, para leitura do sinal do sensor, controle do motor de passo e comunicação com o PC; um software de comunicação entre o PC e os holofotes, que serve também de interface homem-máquina entre o usuário e os holofotes; e a estrutura de calibração que contém o piranômetro com capacidade de movimentação em dois eixos.

A Figura 10 mostra um diagrama de organização do sistema, as setas indicam o sentido de troca de informação entre as diferentes partes. Por exemplo, a comunicação entre o PC, que contém o software de controle, com os microcontroladores embarcados nos holofotes é feita através de um conversor USB para RS-485.

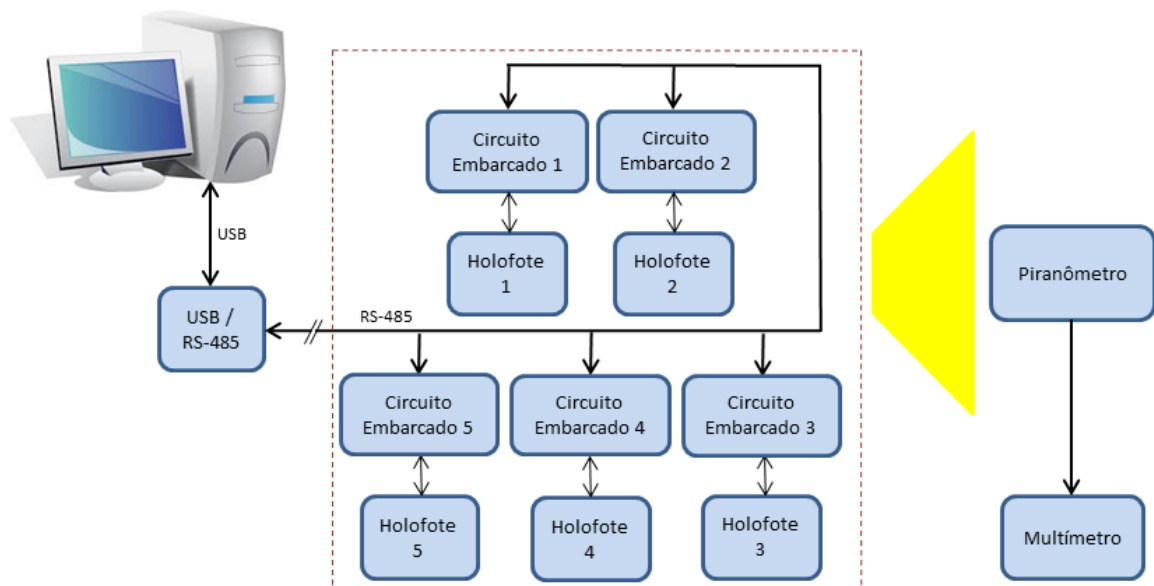


Figura 10: Diagrama geral do sistema do simulador solar desenvolvido, com 5 holofotes conectados entre si por meio de um par trançado, utilizando barramento RS-485 para comunicação serial com o PC.

3.1 SENSORES E ATUADORES

3.1.1 Holofote SCENA 650/1000S

O holofote SCENA 650/1000 S tem uma lente de Fresnel de \varnothing 150mm com um ajuste focal de 10° até 64° do ângulo de iluminação, acionado através de um parafuso sem fim. Este parafuso e um conjunto de trilhos guias permitem deslocar linearmente a lâmpada cerca de

100mm, o que corresponde, aproximadamente, a um giro de 10 voltas em torno do eixo do parafuso. O suporte da lâmpada tem um movimento extremamente suave e preciso guiados por uma pista tripla. A lâmpada usada nos SCENA 600/1000 S tem como tensão nominal 230V e frequência de trabalho 50/60Hz. (DTS – Lighting 2014). A Figura 11 mostra 4 holofotes SCENA 650/1000 S montados em uma estrutura de alumínio.



Figura 11: Holofote SCENA 650/1000 S.

O espectro de emissão do holofote com uma lâmpada halógena OSRAM de 1000W tem pico de emissão em torno de 550nm no intervalo de 400 e 900nm. Pode observar na Figura 12 o espectro de emissão colhido com um espectrômetro USB200 de fabricação Ocean Optics. A lâmpada apresenta similaridade ao padrão de distribuição da irradiância espectral exigida pela Norma Internacional CEI 904-9. (RIBEIRO, D.B.S. 2014, p. 65)

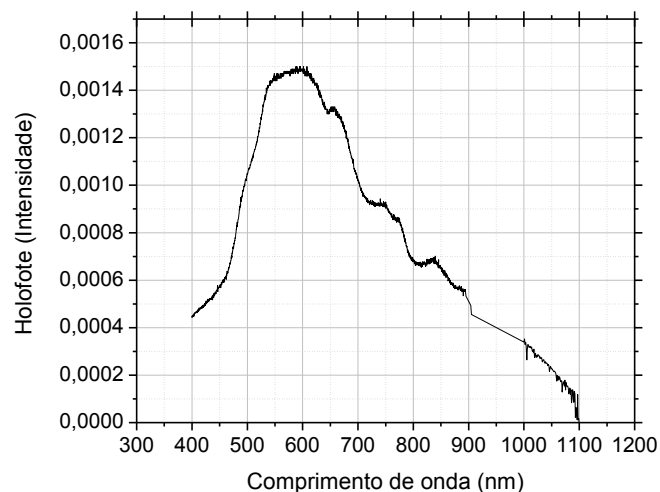


Figura 12: Espectro do holofote com uma lâmpada halógena OSRAM de 1000W.
Fonte: (RIBEIRO, D.B.S. 2014, p. 65).

Foram calculados os valores percentuais da irradiância total de acordo com as faixas de comprimento de onda elencadas na Tabela 1, (ver capítulo de Revisão da Literatura, p.29). Desta forma é possível obter a categoria do simulador de acordo com sua distribuição espectral.

3.1.2 Motor de passo NEMA – SM 1.8-B1-SE

O atuador eletromecânico acoplado ao parafuso sem fim do holofote, para posicionar a lâmpada, é um motor de passo unipolar NEMA–SM 1.8-B1-SE. As características deste atuador são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Características mecânicas, elétrica e físicas do motor de passo NEMA – SM 1.8-B1-SE.

| | | | |
|---------------------------|------------|------------------------|----------------|
| Tensão DC | 5 V | Peso do Motor | 420 g |
| Corrente Fase | 1 A | Ângulo de Passo | 1,8° |
| Resistência Fase | 5 Ω | Numero de Fase | 2 |
| Torque de retenção | 5 kgf.cm | Passo / Volta | 200 |
| Torque de retenção | 300 gf.cm | Temp. Ambiente | -10 °C a 50 °C |

Fonte: (Action Tehnology, 2008)

Na Figura 13 pode-se observar um diagrama de como o motor de passo se encontra acoplado ao parafuso sem fim, na face anterior do holofote. Foi feito um suporte a partir de perfil de alumínio para fixar o motor ao corpo do holofote. O tipo de energização para a movimentação desse atuador é do tipo passo normal com única fase excitada por vez.

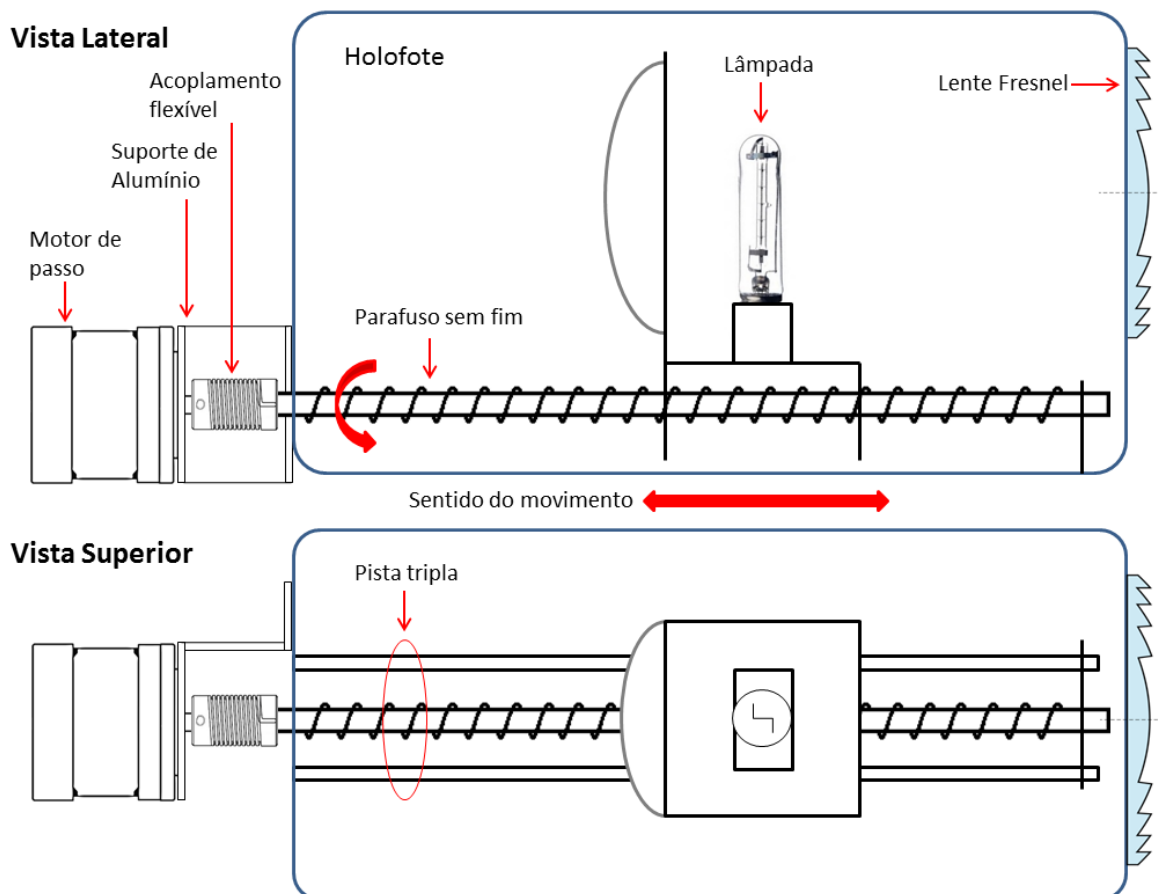


Figura 13: Diagrama de como o motor de passo se encontra conectado ao parafuso sem fim com um acoplamento flexível e utilizando um suporte de alumínio para fixar o motor ao corpo do holofote.

3.1.3 Acoplamento flexível

Um acoplamento flexível de $\varnothing 6\text{mm} \times \varnothing 6,35\text{mm} \times 25\text{mm}$, como pode ser observado na Figura 14, foi utilizado para transmitir o torque do motor ao parafuso sem fim. O desenho mecânico original do holofote não possui rolamentos nos extremos do eixo para absorver as cargas axiais e radiais, isso provoca forças de fricção consideráveis nos apoios, além do mais, o alinhamento do eixo pode, por vezes, não estar perfeitamente alinhado em alguns holofotes. O acoplamento flexível foi empregado para garantir a transmissão da energia e a absorção das cargas axiais e as cargas radiais, além da correção do alinhamento do parafuso sem fim ao motor.



Figura 14: Acoplamento flexível $\varnothing 6\text{mm} \times \varnothing 6,35\text{mm} \times 25\text{mm}$ utilizado para transmitir o torque do motor ao parafuso sem fim do holofote.

Na Figura 15 pode-se observar uma vista explodida do conjunto motor de passo, suporte de alumínio, acoplamento flexível e holofote.

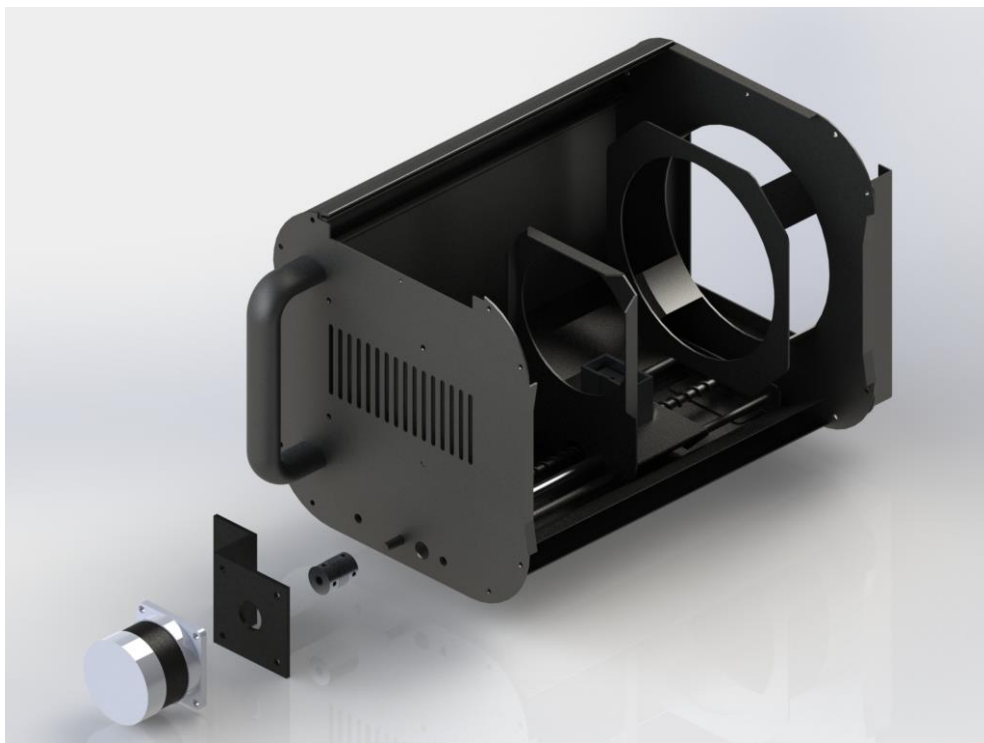


Figura 15: Vista explodida do conjunto motor de passo, suporte de alumínio, acoplamento flexível e holofote SCENA 650/1000S.

3.1.4 Sensor de Efeito Hall série 103SR Honeywell

O sensor de efeito Hall é um transdutor que, quando se encontra sobre a ação de um campo magnético, responde com uma variação em sua tensão de saída. O sensor de posição de efeito Hall do fabricante Honeywell da serie 103SR é encapsulado em um corpo de alumínio. A versão digital fornece saída estável para uma faixa de temperatura entre -40 a 100°C, com 20mA de capacidade de corrente, pode ser polarizado por tensão DC entre 4,5V e 24V e possui saída do tipo coletor aberto. Na Figura 16 pode-se observar uma imagem do sensor Hall adotado neste projeto.



Figura 16: Sensor de efeito Hall Honeywell serie 103SR.

O padrão de saída do tipo coletor aberto (típica de dispositivos digitais) ou saída *push-pull* (típica de dispositivo linear) dos sensores de posição de efeito Hall da série 103SR, permite sua fácil conexão com circuito eletrônico comum, tais como microprocessadores, lógica integrada, transistores discretos, e SCRs com especificações de voltagens compatíveis.

Estes equipamentos, tal qual é natural para dispositivos eletrônicos, possuem limitações de temperatura de operação. Ultrapassar estes limites pode implicar na redução da vida útil do sensor e falhas prematuras. O primeiro teste realizado no holofote escolhido para o simulador serviu para verificar a melhor posição para a instalação do sensor Hall de posição. Para tanto, foram posicionados dois termopares, um na fase posterior e outro na fase frontal do holofote, para determinar o comportamento térmico interno, em três diferentes posições da lâmpada, durante 90 minutos, após o ligamento da lâmpada. O instrumento utilizado para medir temperatura foi um termômetro digital MT-455, marca Minipa, portátil de dois canais, com LCD de 3^{1/2}, resolução de 0.1°C, precisão básica de 0.1% + 1°C, congelamento de leitura, função máximo / mínimo e médio, ajuste manual de *offset*, função T1, T2. Na Figura 17 pode-se observar uma imagem do equipamento.



Figura 17: Termômetro digital marca Minipa, modelo MT-455, com dois termopares para determinar o comportamento térmico interno dos holofotes.

Na Figura 18 observa-se a posição que foi escolhida para os termopares (T1 e T2) e as três posições da lâmpada durante este ensaio (P1, P2 e P3).

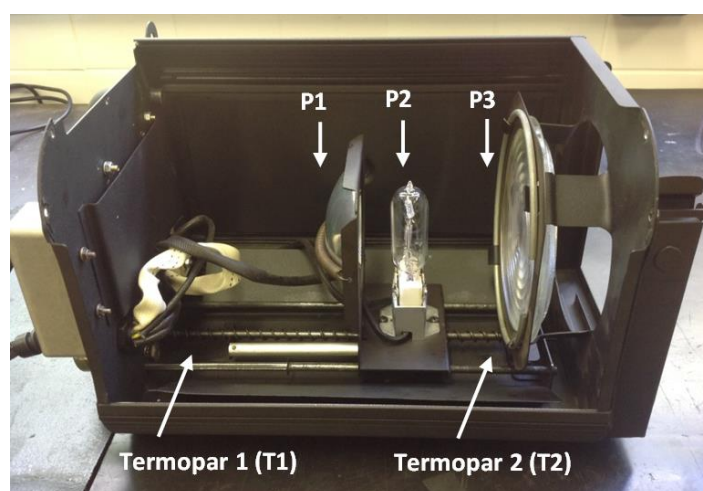


Figura 18: Holofote utilizado com indicações dos pontos de posicionamento dos termopares (T1 e T2) e as posições da lâmpada testadas (P1, P2 e P3).

Na Figura 19 observa-se a posição escolhida para instalação do sensor na fase anterior do Holofote. Ele envia um sinal digital ao microcontrolador que compõem o circuito embarcado de automação dos holofotes, uma vez que a lâmpada chega ao fim de seu curso no guia de deslocamento.

3.1.5 Barra porta ímã

Esta peça foi desenhada e fabricada em alumínio de \varnothing 9,7mm x 96mm de comprimento, para portar um ímã de neodímio de \varnothing 5mm x 10mm na extremidade. Como pode-se observar na Figura 18, ela se encontra fixa atrás da chapa móvel que contém a lâmpada do holofote, assim é detectada pelo sensor de efeito Hall no momento em que ela chega ao fim do curso. No Apêndice A pode observar um plano detalhado da peça que foi fabricada utilizando técnicas de tornearia.

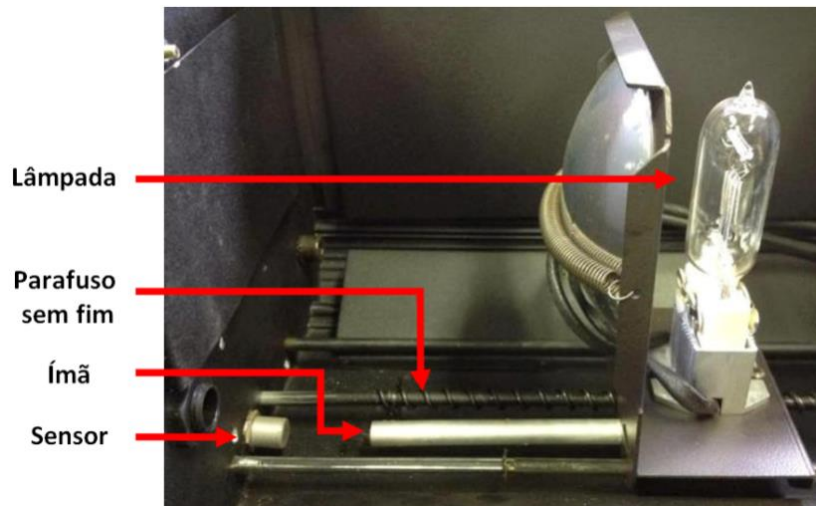


Figura 19: Sistema de detecção do sensor de efeito Hall com a barra que porta um ímã na ponta.

3.1.6 Ventilador 220 v

A seleção da ventoinha mais adequada foi feita testando dois modelos, com capacidade de operar em 220V, de modo a serem ativadas quando a lâmpada estiver acesa. A primeira ventoinha marca Vita, com 80mm x 80mm x 38mm e 17,6W, observada na Figura 20(a), foi a primeira a ser testada no holofote. A segunda ventoinha testada foi da marca NETWORK, com 92mm x 92mm x 30mm e 16W, que pode ser vista na Figura 20(b).

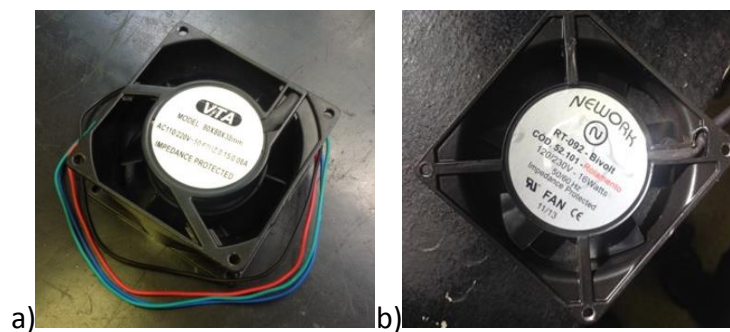


Figura 20: (a) Ventoinha Vita 80mmx80mm 17,6W. (b) Ventoinha NETWORK 92mmx92mm 16W.

O segundo testes foi realizado com intuito de avaliar qual das ventoinhas oferecia melhor rendimento e qual a melhor configuração de operação da ventoinha, para melhorar a estabilidade térmica do holofote. Foram instaladas na face posterior do holofote de duas formas, com as ventoinhas puxando o ar quente de dentro do holofote, e com as ventoinhas soprando ar frio para dentro do holofote. A temperatura foi medida na fase posterior do holofote onde foi instalado o sensor de efeito Hall.

O terceiro teste foi realizado para verificar o impacto da ventoinha na estabilidade temporal da emissão da lâmpada. Com um piranômetro foram tomadas medidas sem a

ventoinha, como referência, e com a ventoinha atuando no holofote. Em ambos o tempo de aquisição foi de 90 minutos.

3.2 PROJETO DA ELECTRÔNICA EMBARCADA

O conjunto eletrônico embarcado é responsável pelo gerenciamento das operações executadas pelo holofote. Em cada unidade, ou seja, cada placa microcontrolada de cada holofote, um conjunto de *jumpers* possibilita a configuração da identidade daquela unidade, determinando o seu ID de escravo. A unidade passa, então, a poder receber, por comunicação via padrão RS-485, as ordens enviadas pelo operador, a partir de um PC, para realizar as seguintes ações: (1) liga e desliga a lâmpada; (2) envia os sinais digitais, sequencialmente, para movimentar o motor de passo no momento da calibração, e no momento de mover a lâmpada para a posição desejada; (3) recebe o sinal digital do sensor de efeito Hall para parar o motor uma vez que ele chega o final do curso. A Figura 21 mostra o diagrama de conexões da unidade embarcada de controle.

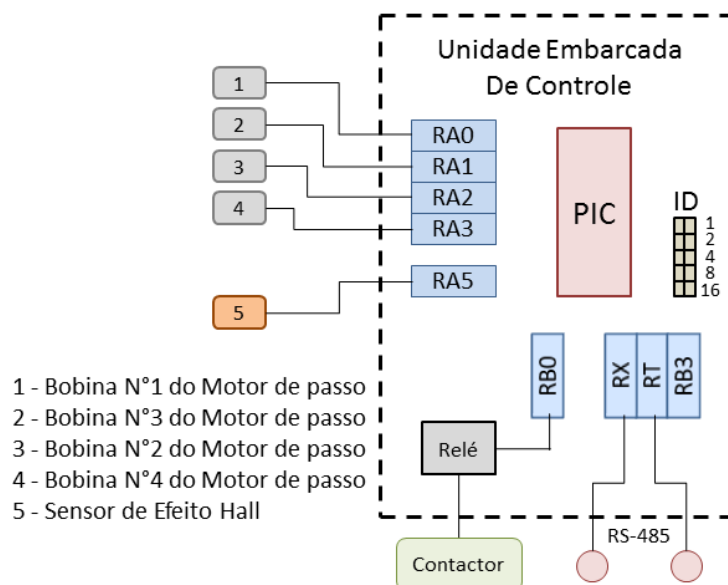


Figura 21: Diagrama de conexões do circuito embarcado para controle do motor de passo, leitura do sensor de efeito Hall, acendimento da lâmpada, comunicação RS-485 e leitura dos jumpers de configuração de identidade do dispositivo.

3.2.1 Unidade embarcada de controle

Inicialmente foi feito um levantamento das necessidades mínimas do sistema, eram imprescindíveis 5 entradas digitais para a configuração do identidade ou ID do dispositivo, uma entrada para o monitoramento do sinal do sensor de efeito Hall, 4 saídas digitais para o

controle do motor de passo unipolar, uma saída digital para o acendimento da lâmpada e periféricos de comunicação serial (TX, RX mais um pino para RS-485).

A comunicação entre as unidades embarcadas e a unidade central de controle ou PC, é feita por cabo blindado e trançado. Para a transmissão destes dados, o padrão de comunicação adotada foi o RS-485, um barramento livre amplamente difundido em ambiente industrial.

Resumindo, foram estabelecidos os seguintes requisitos básicos do sistema embarcado:

- 6 entradas digitais;
- 6 saídas digitais;
- 2 pinos de recepção e envio de dados via barramento RS-485;
- Pinos de conexão ao terra;
- Pinos de alimentação;

Uma vez estabelecidos os requisitos básicos do projeto, foi estabelecida a necessidade de um microcontrolador com no mínimo 14 pinos, entre entradas, saídas e comunicação. O microcontrolador 16F628A da família PIC, da Microchip, foi avaliado como a melhor solução para a tarefa de controle da unidade embarcada. Além do baixo custo e disponibilidade no mercado, seu encapsulamento DIP de 18 pinos coloca a disposição do usuário 16 bits bi-direcionais de entrada e/ou saída (I/O), divididos em PORTA e PORTB. Ele tem um oscilador interno de 4MHz que diminui o numero de componentes no circuito. (Microchip Technology Inc. - 2006).

O PIC16F628A é um microcontrolador de 8 bits com arquitetura RISC (com um numero reduzido de instruções) de alto desempenho. Além de possuir capacidade de memória suficiente para armazenar o programa de controle, possui o número suficiente de portas de E/S. Algumas características deste controlador são:

- Memória de programa 1k bytes;
- Memória SRAM de 224 bytes;
- Memória de dados EEPROM de 128 bytes;
- Oscilador interno de 4 MHz;

- 16 pinos de E/S entre as portas A e B;
- Comunicação serial;
- 35 instruções;
- Tensão de trabalho de 2,0V até 5,5V;

Na Figura 22 pode-se observar o diagrama de pinos do PIC16F628A no encapsulado PDIP.

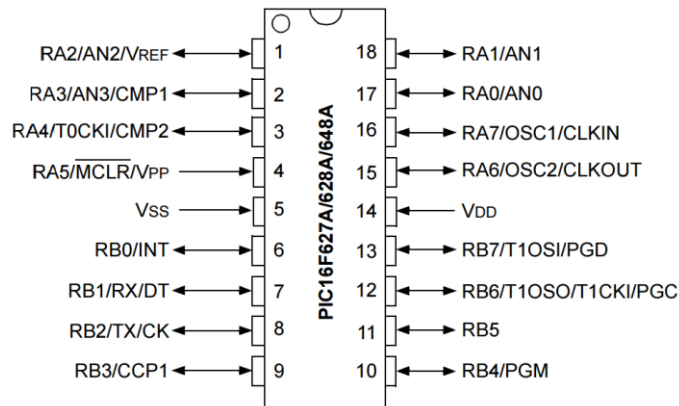


Figura 22: Estrutura do Microcontrolador PIC16F628A.
Fonte: Data Sheet PIC16F628A Microchip Technology Inc. 2006

Uma vez definido o microcontrolador, foi desenvolvido um circuito para explorar a sua arquitetura. O esquema completo do circuito pode ser visto no Apêndice B. O sistema embarcado, mostrado na Figura 23, foi desenvolvido para trabalhar como um nó-escravo do barramento RS-485. Possui 5 comutadores (jumpers) de seleção de endereço que permitem a utilização de até 32 unidades embarcadas similares conectadas no mesmo barramento, alterando-se somente o endereço do nó. (SOARES JUNIOR, L. C. S. 2008, p. 21).

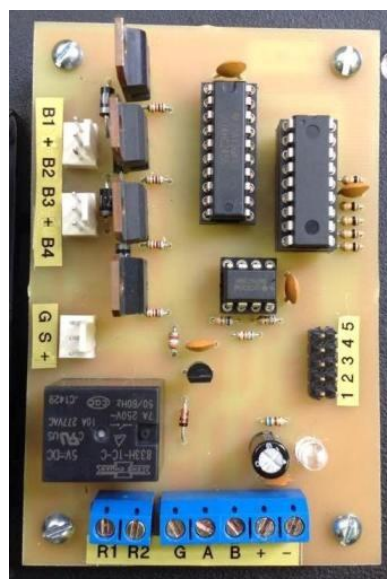


Figura 23: Circuito Eletrônico Embarcado desenvolvido com um PIC16F628A com comunicação serial RS-485.

Ao receber o comando do nó-mestre para acionar o motor, o microcontrolador envia sinais, sequencialmente, das suas portas RA0, RA1, RA2 e RA3 para a base de quatro transistores TIP122, estes permitem a passagem de corrente nas bobinas do motor de passo, assim, o sistema efetua a calibração da posição da lâmpada, movendo-a para o início do curso. No momento que o sensor de efeito Hall percebe o campo magnético do ímã de neodímio que acompanha a lâmpada, ele envia um sinal de 5V para porta RA5 do microcontrolador, forçando a parada do motor de passo, isso indica que a lâmpada se encontra na posição inicial. Logo o usuário estabelece as condições do teste a ser realizado e o microcontrolador aciona o motor levando a lâmpada para a posição do ajuste focal desejado.

Para o acendimento da lâmpada é utilizado a porta RB0 para enviar um sinal à base de um transistor BC547, que comanda a passagem de corrente da bobina de um relé de baixa tensão. O acionamento deste relé energiza a bobina de um contator eletromecânico de fabricação Siemens, modelo 3TS32, acendendo a lâmpada e a ventoinha.

3.2.2 Comunicação do circuito embarcado

Para a comunicação do circuito microcontrolado foi escolhido o circuito integrado SN75176BP que é um transceptor para comunicação no padrão RS-485, facilmente encontrado no mercado e de baixo custo. A Figura 24 mostra o diagrama de conexão serial no circuito embarcado.

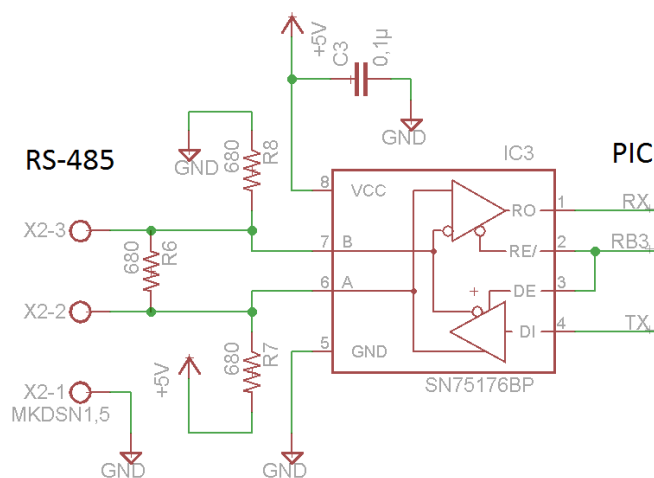


Figura 24: Diagrama do circuito para comunicação com NS75176BP.

A taxa de transmissão utilizada foi de 9600 bits por segundo, um bit de parada igual a 1, sem bit de paridade, e 8 bits de dados.

3.2.3 Firmware

O firmware para gerenciar o funcionamento deste sistema foi desenvolvido em linguagem C da *CCS Compiler*, que converte o código de linguagem C para *assembly*. O código *assembly* é a linguagem de máquina utilizada pelo microcontrolador para a execução das suas funções.

O início do funcionamento do *firmware* se dá com a configuração e o cálculo do endereço do nó escravo através dos *jumpers* externos. Depois o processador espera o pacote de dados recebidos pela porta serial para o acionamento do motor ou acendimento da lâmpada. Este dispositivo também é responsável pela interpretação da leitura do sensor para desligar o motor quando ele chega ao final de curso. O código completo pode ser visto no Apêndice C.

3.3 COMUNICAÇÃO

O sistema de comunicação com fio trançado garante uma maior imunidade da linha de transmissão, os dados trafegam na linha de transmissão de forma serial utilizando padrão RS-485 o que reduz o custo do projeto e garante a comunicação com até 32 dispositivos por um só par de fios. Esta foi a motivação para a escolha deste barramento de comunicação.

3.3.1 Conversor Digital USB-i485

O conversor USB-i485 da Figura 25 é a solução rápida e segura para a interface entre o PC e barramentos de comunicação industrial RS-485. Ao ligar o USB-i485 à porta USB de um PC, ele é automaticamente detectado e instalado como uma porta COM nativa, compatível com qualquer aplicativo existente de comunicação serial.

A isolamento entre as portas USB e RS485 deste dispositivo é de 1500 Vcc, protegendo o computador de picos, surtos e erros de ligação no barramento de comunicação. (NOVUS Conversor USB/i485 - 2010)



Figura 25: Conversor Digital USB-i485.

A topologia da rede utilizada foi do tipo “*Daisy Chain*” onde todos os dispositivos são conectados diretamente aos condutores da linha de comunicação principal, assim é fácil controlar as reflexões causadoras de erros de comunicação.

3.3.2 Protocolo de comunicação

No protocolo de comunicação desenvolvido para o projeto foram implementados comandos que são enviados do PC aos nós escravos: acendimento da lâmpada, calibração da posição da lâmpada e posicionamento da lâmpada de acordo à irradiância desejada. As respostas dos nós escravo são: quando se encontra no fim do curso e quando se encontra na posição desejada do teste a ser executado.

A primeira *string* (ID) corresponde ao chamado ao equipamento mediante o envio do endereço estabelecido pelos *jumpers*. A Tabela 4 mostra em detalhes a descrição de cada *string* da comunicação.

Tabela 4: Descrição dos *strings* de comando das tarefas realizadas pelo circuito embarcado.

| Comando | String | Descrição |
|--------------------|---------------|--|
| Identificação (ID) | “xx” | Identificação do equipamento, número de 1 a 32. |
| Ligar | “l” | Comando para acender a lâmpada |
| Desligar | “d” | Comando para desligar a lâmpada |
| Calibração | “m” | Calibração da posição da lâmpada |
| Posicionamento | “o” | Comando para indicar o posicionamento da lâmpada |
| Passos | “xxxx” | Número de passos requeridos para posicionar a lâmpada na irradiância desejada. |

Parâmetros como o endereço do equipamento (ID) é uma palavra de 8 bits podendo assumir valores entre 0 e 255, mas, como o barramento RS-485 só permite até 32

dispositivos, somente 5 *jumpers* foram usados. O parâmetro número de passos é uma palavra de 16 bits podendo assumir valores entre 0 e 65.535 (PEREIRA, 2005). Entretanto, como o motor usado tem resolução de 1,8° por passo, ou 200 passos por volta e o deslocamento máximo da lâmpada equivale a 10 voltas do parafuso sem fim, o motor percorre a extensão do trilho de deslocamento da lâmpada com somente 2000 passos desde o início do seu curso.

3.3.3 Software

O software utilizado no computador pessoal para verificar o funcionamento da comunicação com os dispositivos, assim como para verificar a estabilidade do barramento RS-485, foi um aplicativo simples, compatível com a plataforma Windows, nativo na maior parte dos PCs do mercado, o PuTTY.

PuTTY é um software de emulação de terminal grátis e de código livre. Suporta SSH, destinado dar suporte ao acesso remoto a servidores via shell seguro e a construção de "túneis" cifrados entre servidores. Também suporta conexão direta (raw), telnet, rlogin e por porta serial.

3.4 SISTEMA ELÉTRICO

Uma alimentação estável em tensão e corrente é parte primordial para o bom acionamento e funcionamento do simulador. Uma etapa de disjunção é imprescindível para o acionamento seguro de cada um dos holofotes e dos outros componentes do sistema elétrico de comando. A linha de saída do disjuntor alimenta o contator de comando da alimentação da lâmpada, que depende, para seu acionamento, do atracamento do relé de baixa tensão do circuito embarcado. A ventoinha encontra-se em paralelo com a lâmpada sendo ligada quando ela esta acesa. Para alimentar o sistema eletrônico é usada uma fonte chaveada que opera em 220Vac, fornecendo 5V e 3A, suficiente para o acionamento, inclusive, do motor de passo. Na Figura 26 pode ser visto o diagrama elétrico para um dos holofotes e a Figura 27 mostra o quadro elétrico do simulador projetado para os 5 holofotes.

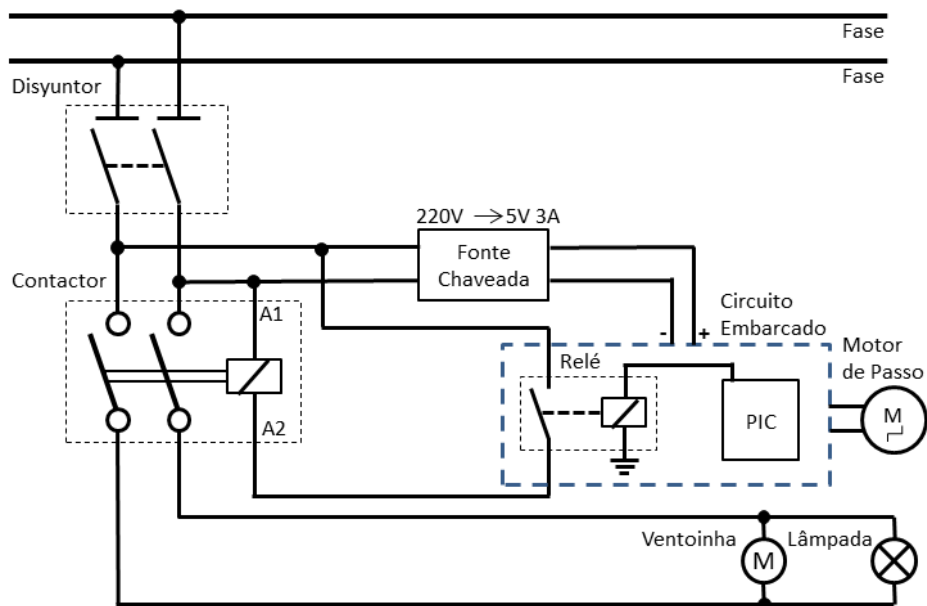


Figura 26: Diagrama do sistema elétrico para um Holofote.

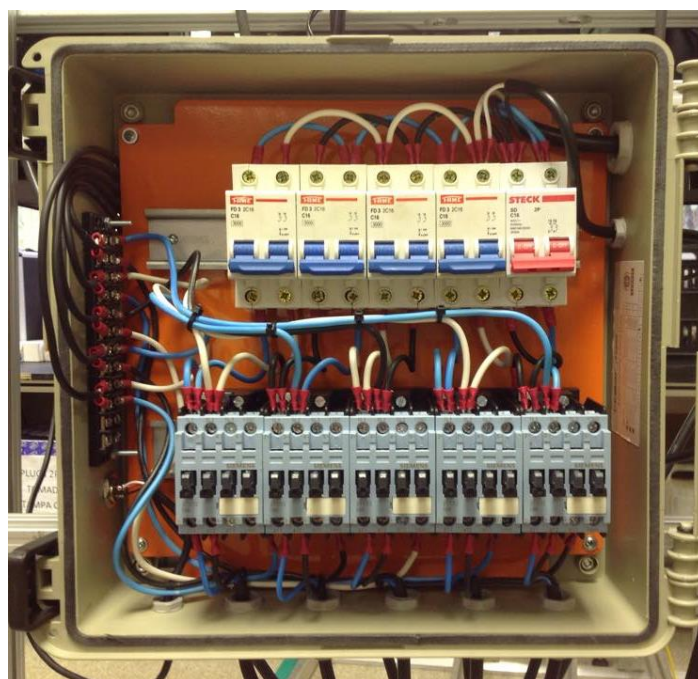


Figura 27: Quadro elétrico do simulador solar projetado para 5 holofotes.

3.5 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

Para verificar a conformidade da norma CEI 904-9 da *Commission Electrotechnique Internationale* foi desenvolvido um sistema de calibração para obter medidas de irradiância em um plano vertical. A Figura 28 mostra um piranômetro instalado em um suporte construído com perfis de alumínio estruturado que permite sua movimentação em dois graus de liberdade, X e Y. Assim foram avaliadas a não uniformidade ea estabilidade temporal.

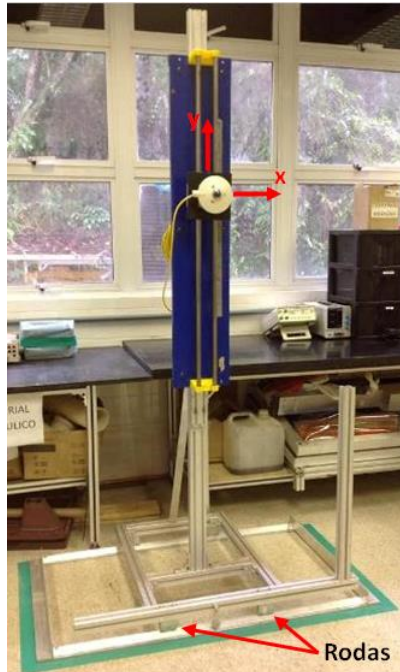


Figura 28: Piranômetro instalado em um suporte construído com perfis de alumínio estruturado que permite sua movimentação em dois graus de liberdade, X e Y.

A estabilidade temporal foi estudada durante os testes com as ventoinhas. O tempo de aquisição de dados foi de 90 minutos no ponto onde a irradiação era máxima, porém, pode ser realizada em qualquer ponto no plano. (Norma Internacional IEC 904-9, 1995, p. 6).

A não uniformidade foi avaliada com diferentes configurações e espaçamento dos holofotes, de modo a encontrara configuração com melhor desempenho.

3.5.1 Piranômetro Kipp-Zonen

O piranômetro empregado nos testes e calibrações é de fabricação Kipp-Zonen, modelo CMP-21 da Figura 29, tem uma termopilha que gera um diferencial de tensão de centenas de μV , proporcional ao valor da radiação que incide nele. Utilizando um voltímetro de bancada se obtém o valor de tensão que, dividido pela sensibilidade deste sensor (fornecida pelo fabricante), fornece o valor da irradiância. O valor da sensibilidade para o piranômetro usado é mostrada na expressão (3).

$$S = 12,43 \frac{\mu V}{W/m^2} \quad (3)$$

Para o cálculo da irradiância se utiliza a expressão (4).

$$E_{Solar} = \frac{U_{emf}}{S} \quad (4)$$

Onde:

$E_{Solar} [W/m^2]$ = Irradiância

$U_{emf} [\mu V]$ = Tensão de saída



Figura 29: Piranômetro Kipp-Zonen modelo CMP-21.

3.5.2 Multímetro digital RIGOL DM3062

O multímetro utilizado medição da irradiância é um multímetro digital de fabricação RIGOL DM3062, com resolução de $6\frac{1}{2}$ dígitos, Figura 30, capaz de armazenar até 1000 dados contínuos, dotado de uma porta USB para transferir os dados para uma memória externa.



Figura 30: Voltímetro digital RIGOL DM3062.

Colocando o piranômetro em uma posição fixa no eixo Y, foi realizada uma varredura em torno do eixo X para criar uma curva de tensão em função da posição X, com os dados armazenados pelo voltímetro. Foi feito o mesmo procedimento em várias posições equidistantes do eixo Y para criar mapas bidimensionais de irradiância em função de coordenadas X e Y.

3.5.3 Teste de não uniformidade

O primeiro teste de não uniformidade foi com 4 holofotes em configuração quadrada, espaçados de duas polegadas entre eles. A separação entre a lente Fresnel dos holofotes e o piranômetro foi de um metro, a Figura 31 mostra a montagem do teste.



Figura 31: Teste de não uniformidade para 4 holofotes espaçados duas polegadas em configuração quadrada.

O segundo teste de não uniformidade foi com a mesma configuração quadrada, aumentando o espaçamento de duas polegadas para cinco polegadas entre eles. A separação entre a lente Fresnel dos holofotes e o piranômetro foi aumentada para 1,30 metros.

O ultimo teste de uniformidade foi feito com 5 holofotes, espaçados de 5 polegadas entre eles, utilizando uma configuração triangular. A separação entre a lente Fresnel e o piranômetro foi mantida em 1,30 metros, a Figura 32 mostra a montagem.



Figura 32: Teste de não uniformidade para 5 holofotes espaçados 5 polegadas em configuração triangular.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira etapa foram executados testes térmicos e dinâmicos para a viabilidade técnica das soluções adotadas. Documentaram-se as razões que levaram a utilização dos materiais, atuadores e instrumentos empregados.

4.1 TEMPERATURA

4.1.1 Comportamento térmico do holofote

Os resultados do primeiro teste de temperatura para conhecer o comportamento térmico do holofote colocando a lâmpada em três posições (P1, P2 e P3), medindo a temperatura na fase posterior (T1) e na fase frontal (T2), podem ser vistos na Figura 33 e Figura 34. A temperatura da sala era de 23,7 °C.

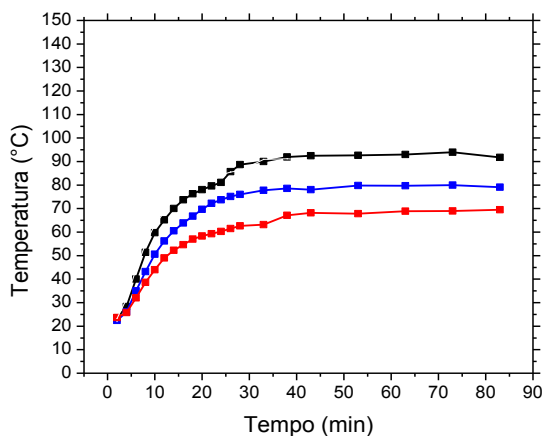


Figura 33: Gráficos da Temperatura do Termopar 1 em função do tempo. P1 (Preto); P2 (Azul); P3 (Vermelho).

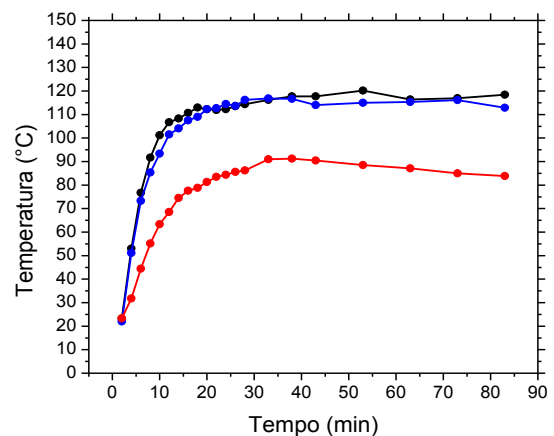


Figura 34: Gráficos da Temperatura do Termopar 2 em função do tempo. P1 (Preto); P2 (Azul); P3 (Vermelho).

Os dados obtidos mostram que a lâmpada esquenta mais o interior do holofote quando está próxima da fase posterior (P1), atingindo uma temperatura de 120 °C na fase frontal do holofote. Além disso, observou-se que na fase posterior do holofote, onde estão os cabos de alimentação, a temperatura foi menor para as três posições da lâmpada, tendo variado entre 90 e 60 °C. Nesse caso foi escolhida a fase posterior para colocar o sensor de efeito Hall.

4.1.2 Instalação do sistema de arrefecimento

Observou-se no primeiro teste que a temperatura de partes do corpo do holofote está próxima ao limite recomendado pelo fabricante do sensor de efeito Hall. Por isso a instalação de um sistema de arrefecimento foi necessária.

Os resultados dos testes realizados com as duas ventoinhas podem ser observados na Figura 35. Lembrando que a ventoinha 1 foi da marca VITA de 17,6W com uma área de 80mm x 80mm, e a ventoinha 2 foi da marca NETWORK de 16W com uma área de 92mm x 92mm.

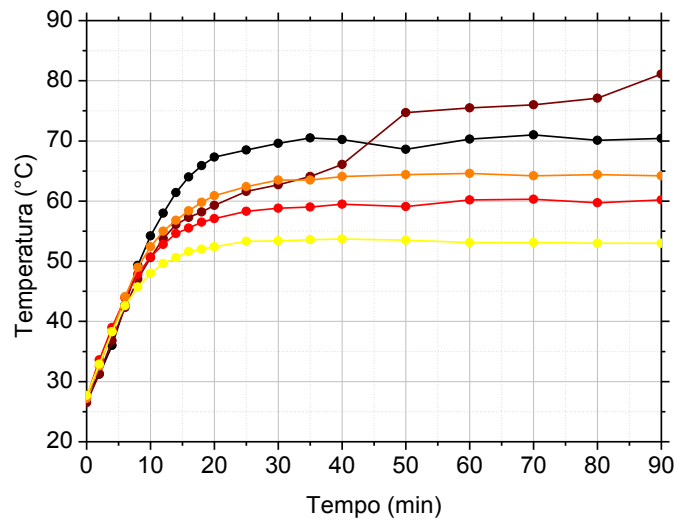


Figura 35: Gráfico de temperatura na fase anterior do holofote em função do tempo: sem ventoinha (preto), ventoinha 1 puxando ar (marrom), ventoinha 1 soprando ar (vermelho), ventoinha 2 puxando ar (laranja), ventoinha 2 soprando ar (amarelo).

Os resultados mostraram que as ventoinhas obtiveram um desempenho melhor soprando ar para dentro do holofote. Dado o resultado deste teste, foi escolhida a ventoinha da marca NETWORK por ter o melhor desempenho, reduzindo a temperatura da face posterior do holofote em cerca de 52,5 °C.

4.2 ESTABILIDADE TEMPORAL

Foi realizado o teste de estabilidade temporal, uns dos requisitos da norma, para classificar o simulador solar. O resultado pode ser observados na Figura 36.

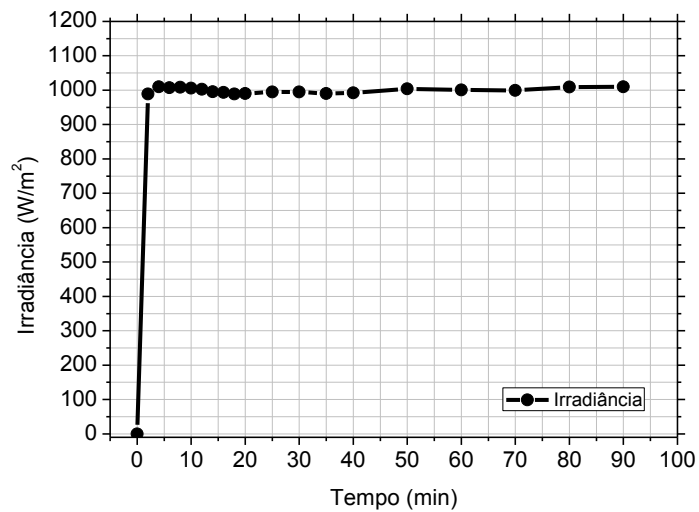


Figura 36: Gráfico do teste de estabilidade temporal que mostra a irradiância em função do tempo durante 90 min de aquisição de dados.

Dado o resultado deste teste, a opção de colocar um sistema de arrefecimento melhorou as condições de trabalho do holofote aumentando a emissão de luz e melhorando a estabilidade da mesma. Calculando o erro com a equação (1), a estabilidade temporal diminuiu de 6,02% para 0,46%.

4.3 DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL

Na Tabela 5 podem ser observados os valores de percentagem de irradiância totais calculados a partir da Figura 37, de acordo as faixas de comprimento de onda de referência da Tabela 1 (ver capítulo Revisão da Literatura, p.29). Dessa forma foi possível identificar a classificação obtida de acordo a cada uma das faixas.

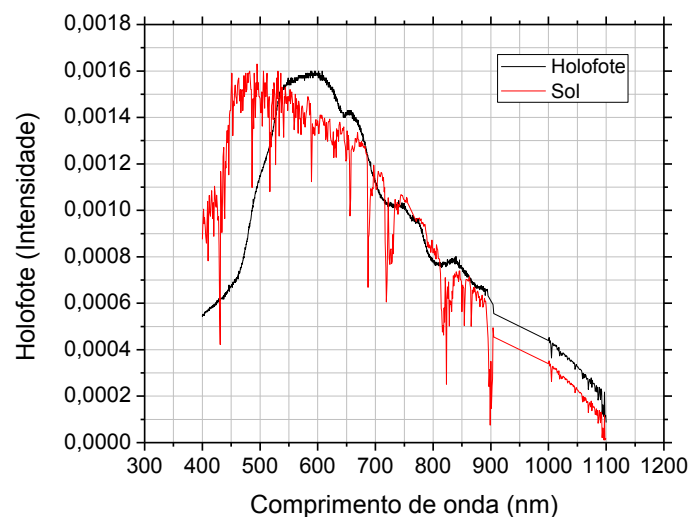


Figura 37: Espectro do Holofote sobreposto ao espectro do sol.

Tabela 5: Valores de percentagem de irradiância total do holofote de acordo as faixas de comprimento de onda de referência, obtendo assim, sua classificação referente à distribuição espectral.

| | Faixa de comprimento de onda (nm) | Percentagem de irradiância total | % Holofote / % Referência | Classificação |
|---|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------|
| 1 | 400 – 500 | 11,65 % | 1,57 | C |
| 2 | 500 – 600 | 25,13 % | 0,79 | A |
| 3 | 600 – 700 | 24,00 % | 0,76 | A |
| 4 | 700 – 800 | 16,09 % | 0,92 | A |
| 5 | 800 – 900 | 11,02 % | 1,13 | A |
| 6 | 900 – 1100 | 10,95 % | 0,45 | C |

4.4 NÃO UNIFORMIDADE

4.4.1 Teste para 4 Holofotes espaçados de 2 polegadas a 1 metro do piranômetro

O primeiro estudo de uniformidade com 4 holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a uma distância de um metro do piranômetro, foi feito cobrindo tudo o percurso da lâmpada, desde o início na fase posterior até próximo da lente de Fresnel. Foi dividido o percurso em 9 posições espaçadas de acordo ao mesmo número de passos do motor: 0, 208, 416, 625, 833, 1041, 1250, 1458 e 1666 passos. Os resultados podem ser vistos nas figuras 38 a 46.

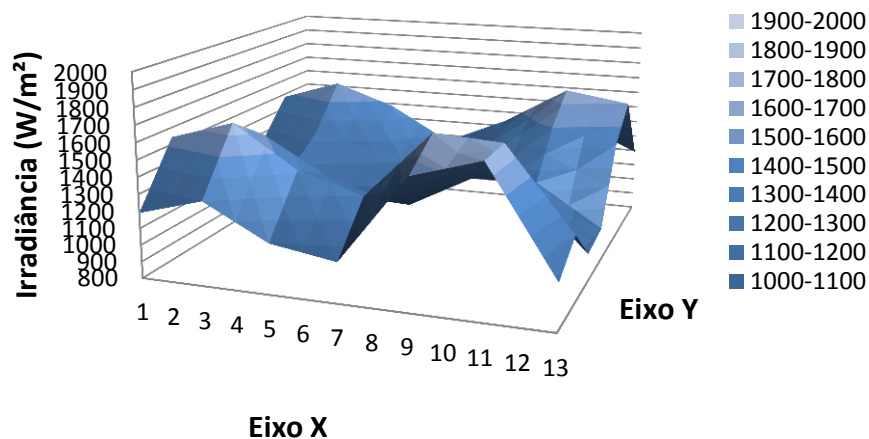


Figura 38: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 0 passos de deslocamento.

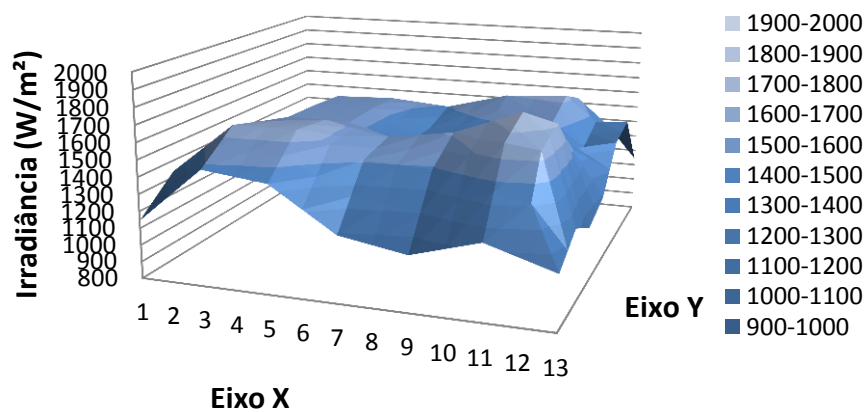


Figura 39: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 208 passos de deslocamento.

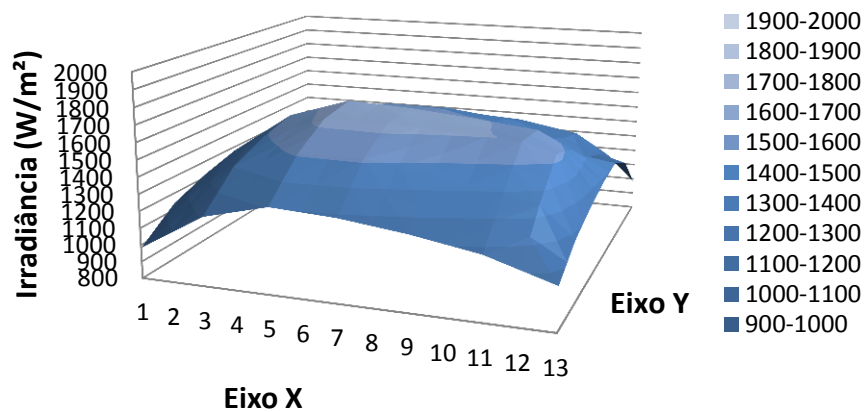


Figura 40: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 416 passos de deslocamento.

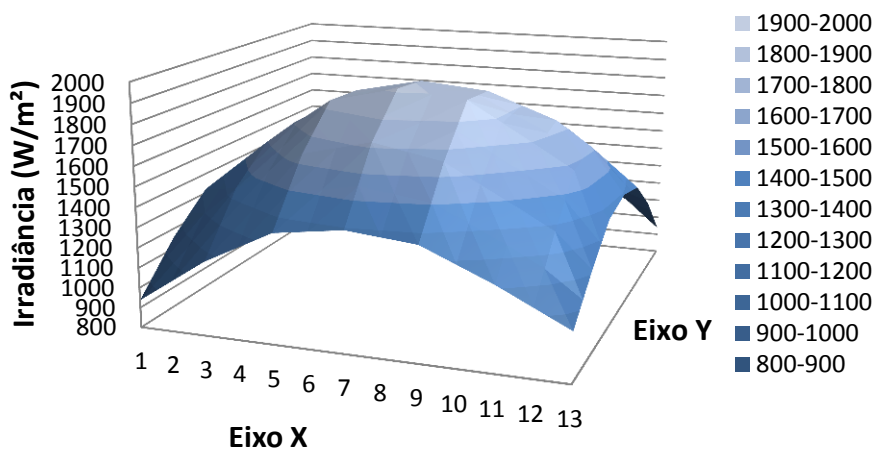


Figura 41: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 625 passos de deslocamento.

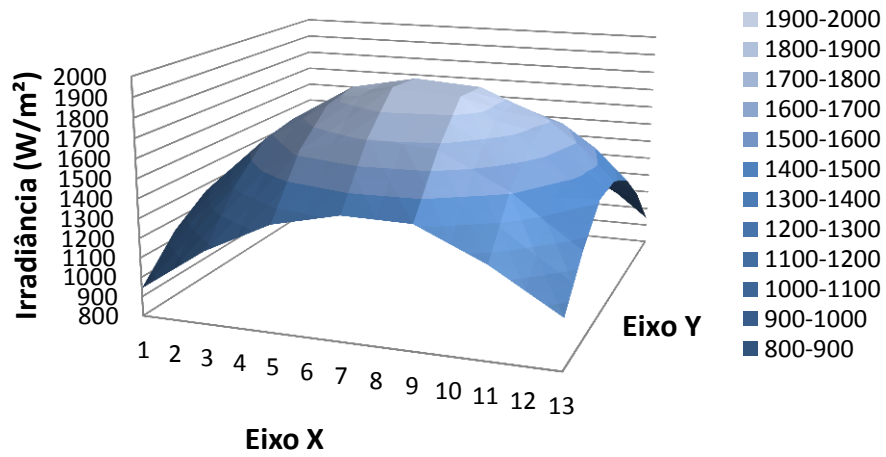


Figura 42: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 833 passos de deslocamento.

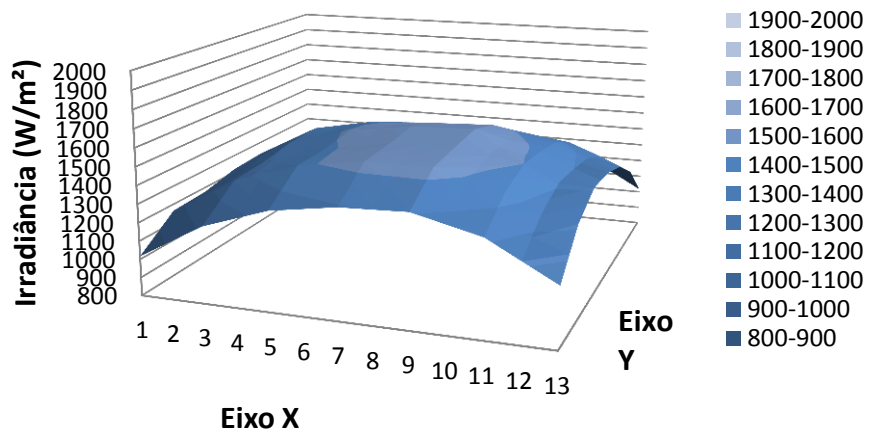


Figura 43: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 1041 passos de deslocamento.

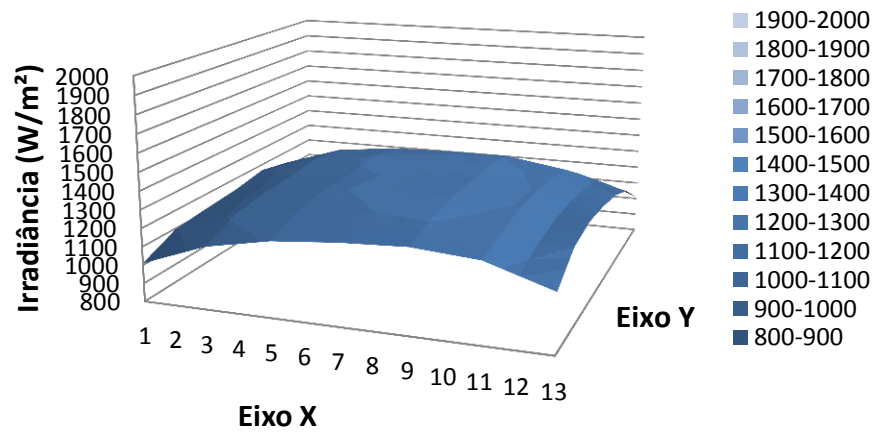


Figura 44: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 1250 passos de deslocamento.

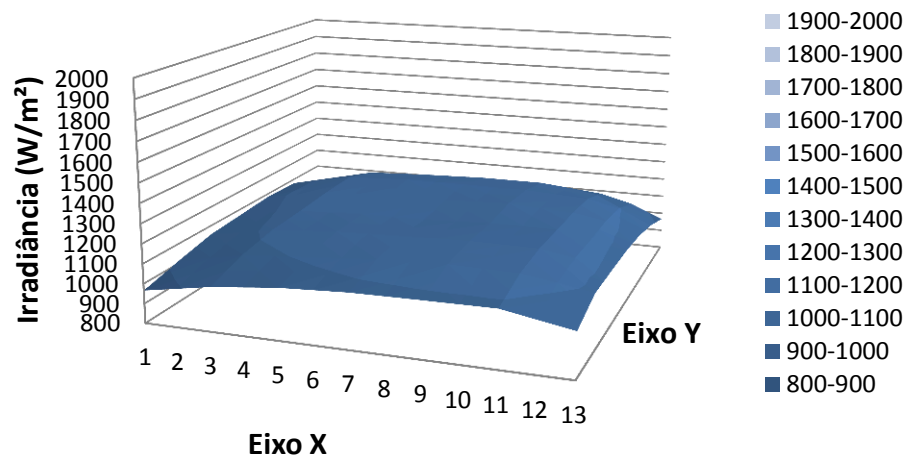


Figura 45: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 1458 passos de deslocamento.

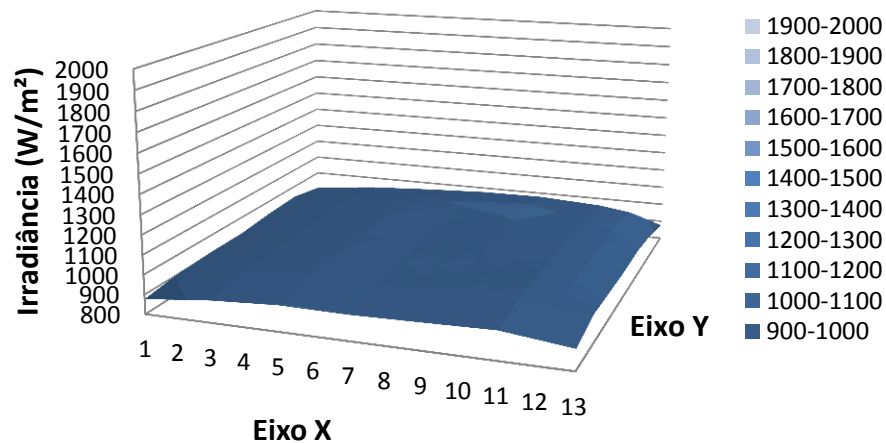


Figura 46: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de duas polegadas entre eles, a 1666 passos de deslocamento.

Observou-se que o simulador consegue obter uma classificação a partir dos 1041 passos de percurso da lâmpada, sendo do tipo C com um erro de 7,62%. A partir dos 1250 passos consegue obter uma classificação do tipo B com um erro menor ou igual a 5%. Para detalhar melhor o comportamento do simulador com esta configuração, foram feitos um gráfico do erro em função do número de passos e um gráfico da irradiância em função do número de passos. Os resultados se encontram nas Figuras 47 e 48.

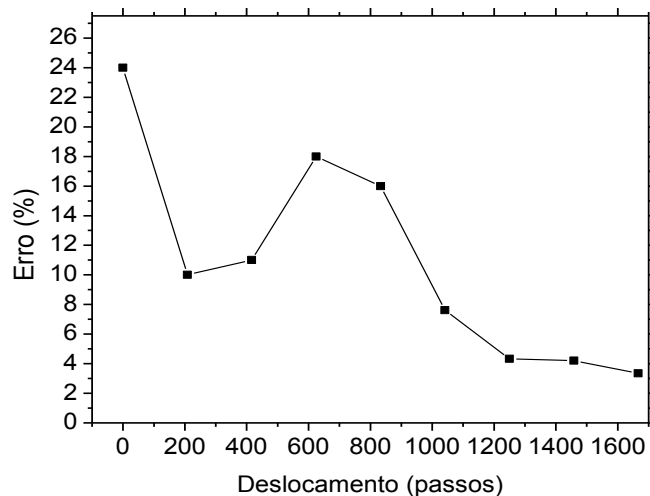


Figura 47: Gráfico do erro de não uniformidade em função do Deslocamento para 4 holofotes espaçados de duas polegadas a um metro do piranômetro.

Observou-se no gráfico da Figura 47 que o simulador com esta configuração classifica-se como tipo C, quando a lâmpada for deslocada em aproximadamente 1000 passos. Entorno de 1200 passos o holofote passa a ser classificado como do tipo B até o final do percurso, atingindo 3,34% em 1666 passos.

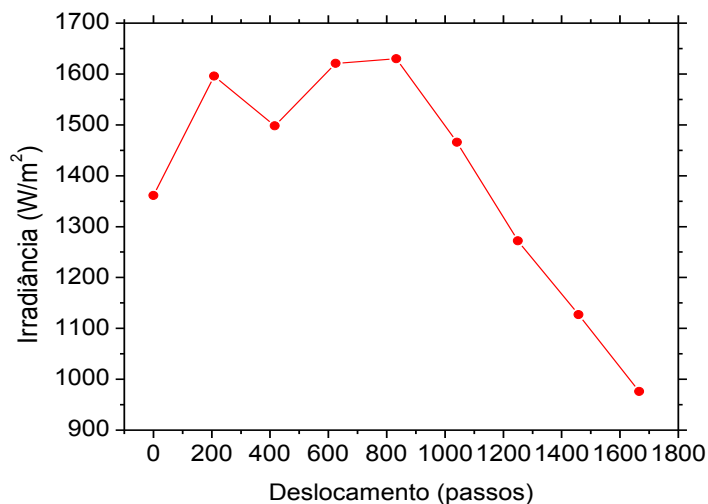


Figura 48: Gráfico da Irradiância em função do Deslocamento para 4 holofotes espaçados de duas polegadas a um metro do piranômetro.

A irradiância incidente diminui de forma linear a partir dos 833 passos de deslocamento da lâmpada até o final do percurso, com valores médios entre 976 e 1630 W/m².

4.4.2 Teste para 4 Holofotes espaçados de 5 polegadas a 1,30 metros do piranômetro

O segundo estudo de uniformidade com 4 holofotes espaçados de 5 polegadas entre eles a uma distância de 1,3m do piranômetro, foi feito cobrindo apenas os últimos 300 passos do percurso da lâmpada, já que foi nessa faixa que os holofotes apresentaram melhor desempenho no quesito de não uniformidade durante o primeiro estudo. Foi dividido o percurso em 6 posições espaçadas de acordo ao mesmo número de passos do motor: 1250, 1333, 1416, 1500, 1583 e 1666 passos. Os resultados podem ser observados na figuras 49 a 54.

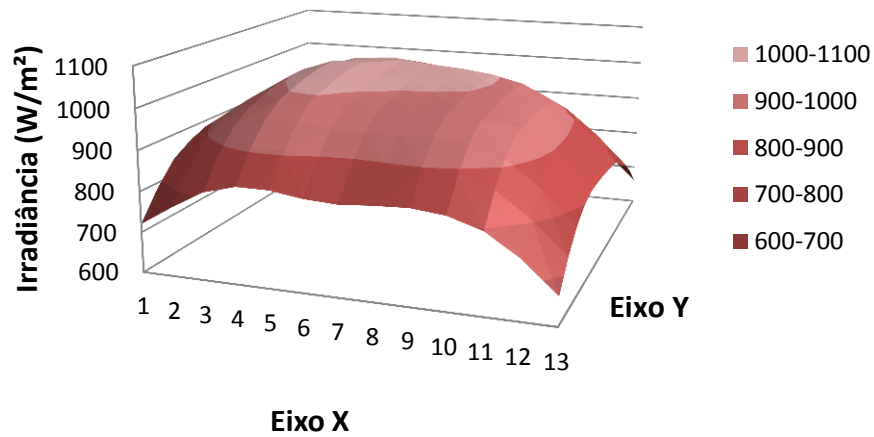


Figura 49: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1250 passos de deslocamento.

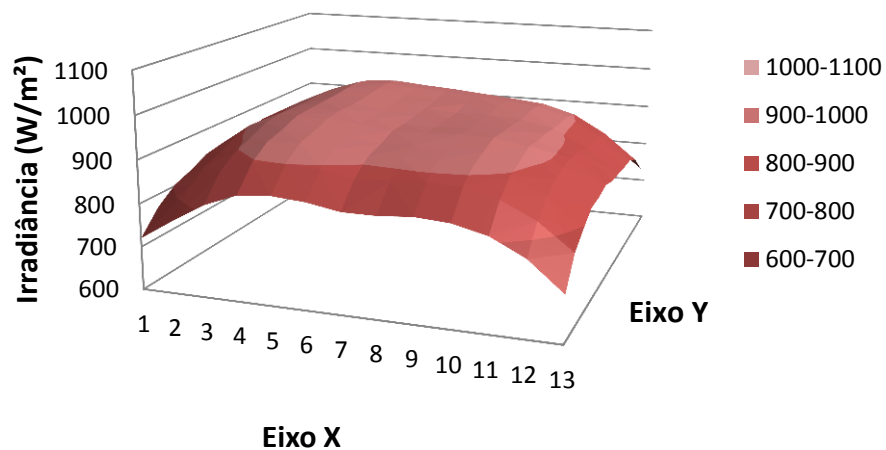


Figura 50: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1333 passos de deslocamento.

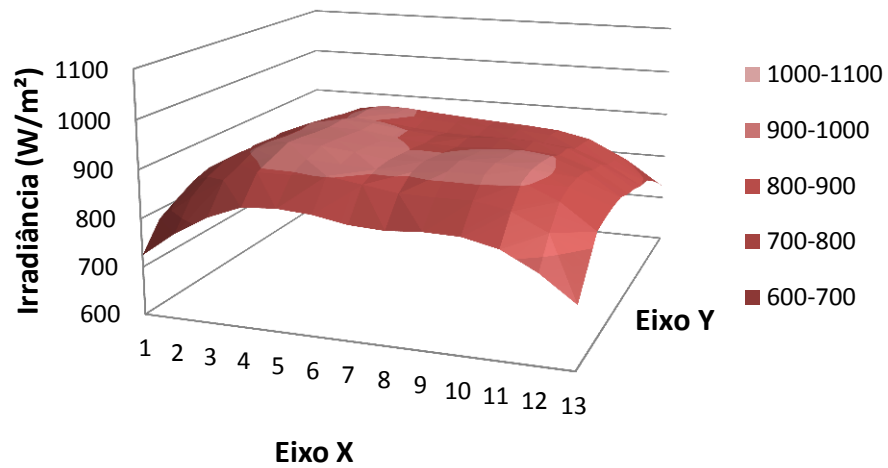


Figura 51: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1416 passos de deslocamento.

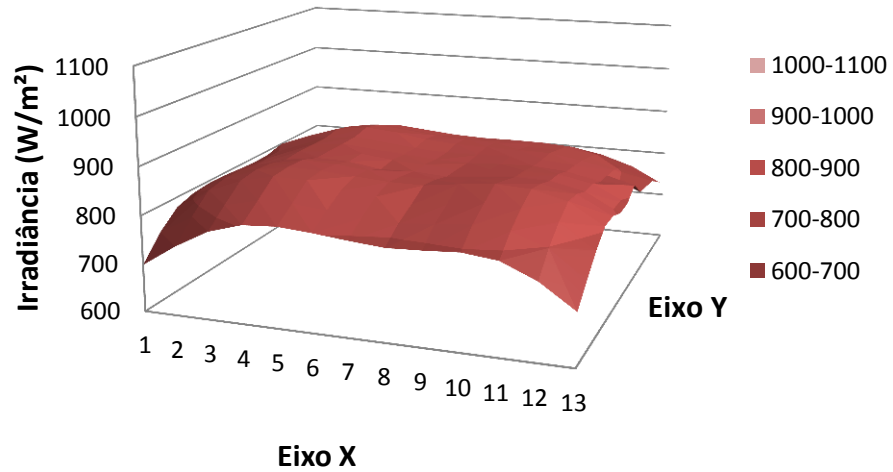


Figura 52: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1500 passos de deslocamento.

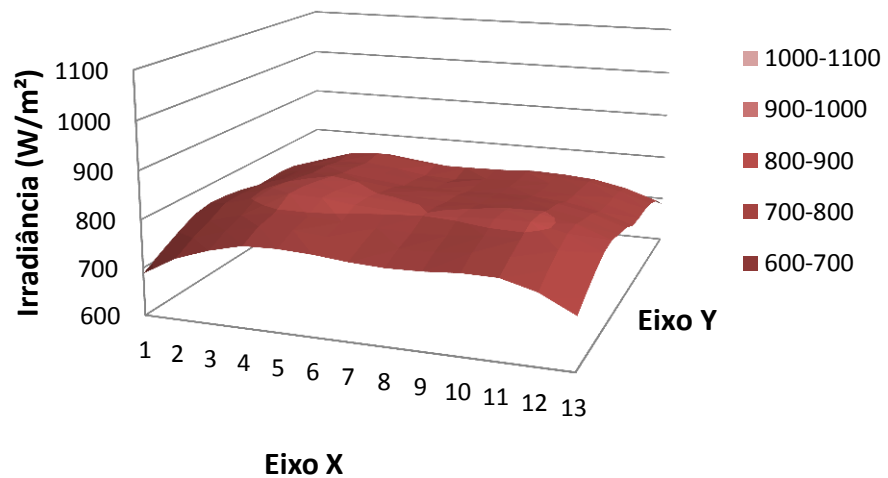


Figura 53: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1583 passos de deslocamento.

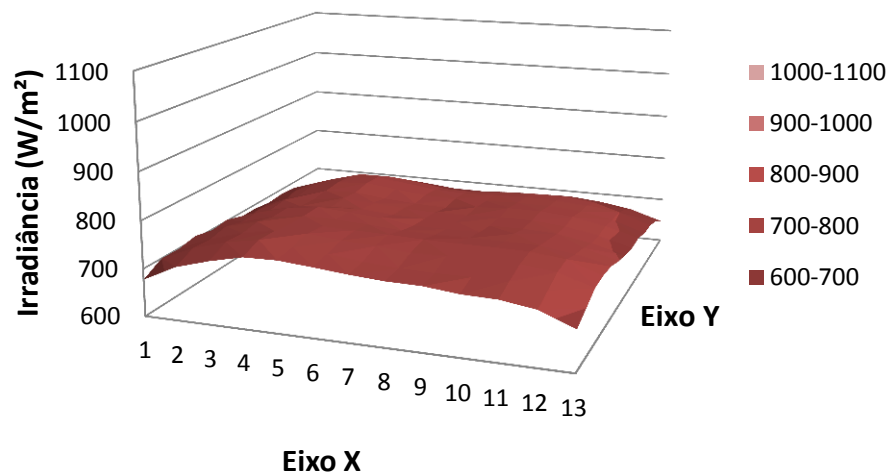


Figura 54: Mapa da Irradiância em função da área para 4 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1666 passos de deslocamento.

Foram feitos, de forma análoga, um gráfico do Erro e um da Irradiância, ambos em função do número de passos, para detalhar melhor o comportamento do simulador com esta nova configuração. Os resultados se encontram nas Figuras 55 e 56.

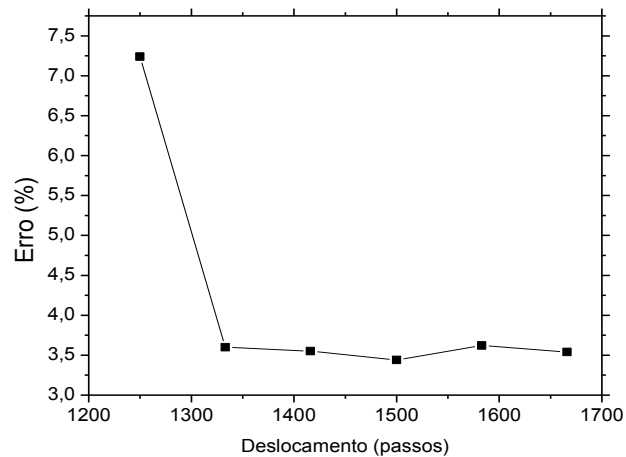


Figura 55: Gráfico do erro de não uniformidade em função do Deslocamento para 4 holofotes espaçados de cinco polegadas a um metro e trinta centímetros do piranômetro.

A partir de 1333 passos de deslocamento, o simulador mantém um valor médio de erro de não uniformidade de 3,5%, sendo classificado como do tipo B. No entanto, ao verificar quanto da irradiância incidente é do tipo A, em relação à média obtida, verificou-se que entorno de 85% da área se enquadra como do tipo A nos mapeamentos com 1416 passos e 1500 pasos. Esses resultados foram representados nas figuras 56 e 57.

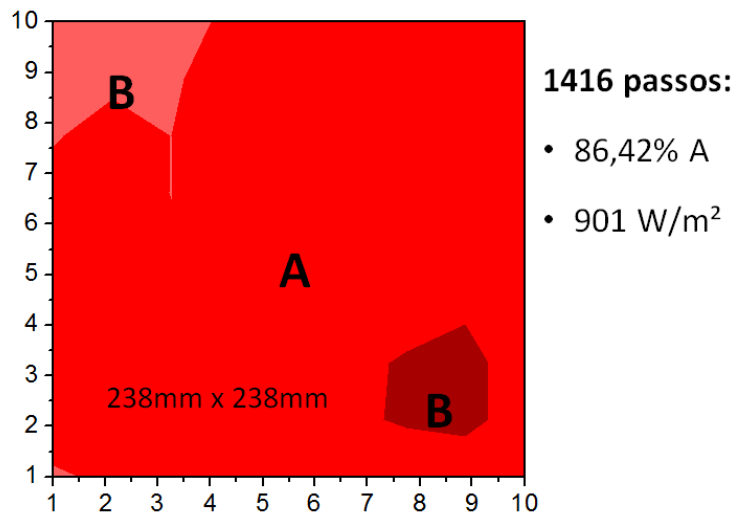


Figura 56: Mapeamento com 1416 passos com 86,42% do tipo A em uma area 238mm x 238mm e uma irradiância de 901 W/m².

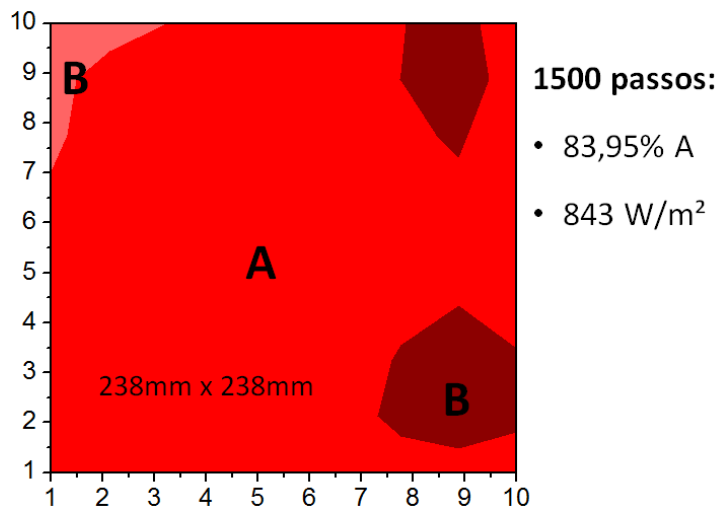


Figura 57: Mapeamento com 1500 passos com 83,95% do tipo A em uma area de 238mm x 238mm, e uma irradiância de 901 W/m².

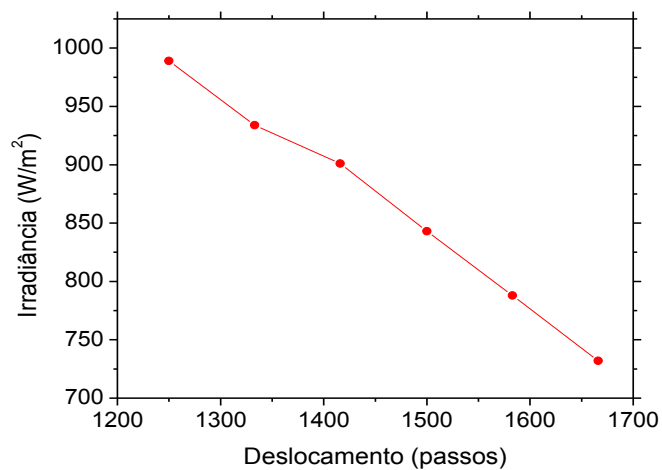


Figura 58: Gráfico da Irradiância em função do Deslocamento para 4 holofotes espaçados de cinco polegadas a um metro e trinta centímetros do piranômetro.

A irradiância incidente diminui de forma linear como se observa la figura 58, com esta configuração à medida que as lâmpadas avançam, fornecendo valores médios entre 732 e 989W/m². Dessa forma é possível estimar os números de passos necessários para se obter os valores de irradiância exigidos pelas normas CEI.

4.4.3 Teste para 5 Holofotes espaçados de 5 polegadas a 1,30 metros do piranômetro

O terceiro estudo de uniformidade com 5 holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, em configuração triangular, a uma distância de um metro e trinta centímetros do piranômetro, foi feito para apenas três posições da lâmpada cobrindo os últimos 300 passos do percurso. As posições foram 1250, 1458 e 1666 passos. Os resultados podem ser observados nas figuras 59, 60 e 61.

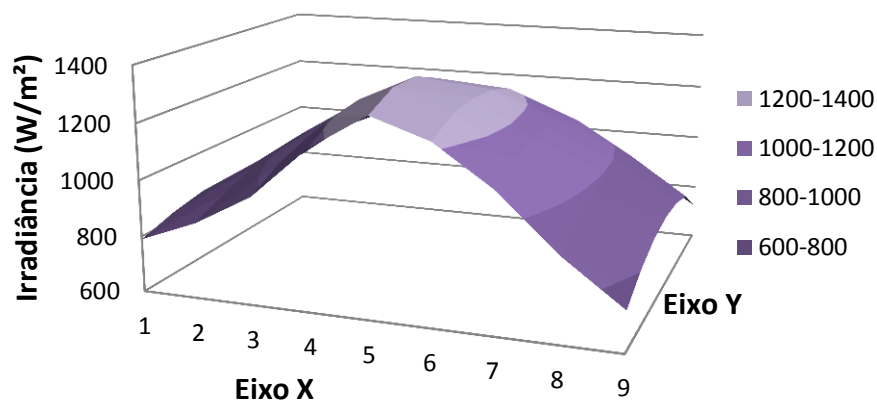


Figura 59: Mapa da Irradiância em função da área para 5 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1250 passos de deslocamento.

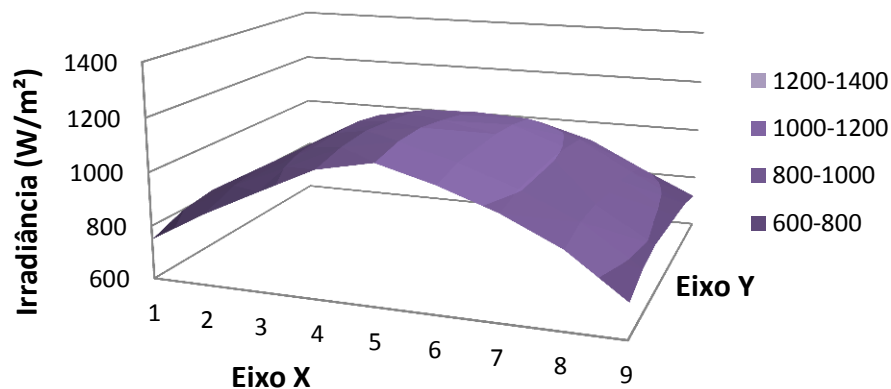


Figura 60: Mapa da Irradiância em função da área para 5 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1458 passos de deslocamento.

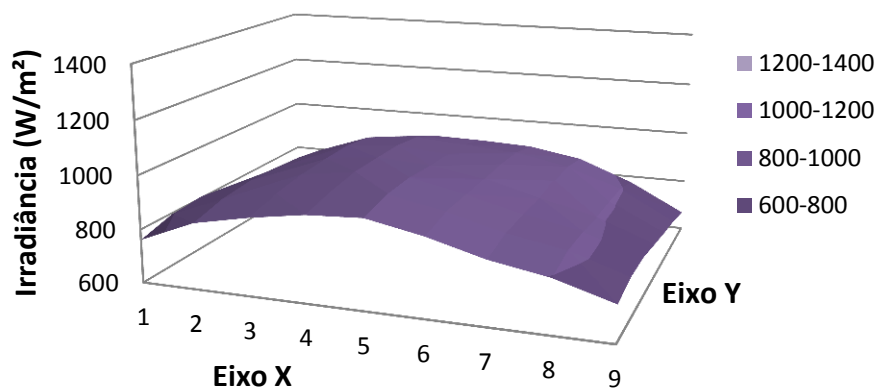


Figura 61: Mapa da Irradiância em função da área para 5 Holofotes espaçados de cinco polegadas entre eles, a 1666 passos de deslocamento.

Foram feitos os gráficos do erro e da Irradiância, ambos em função do número de passos. Os resultados se encontram nas Figuras 62 e 63.

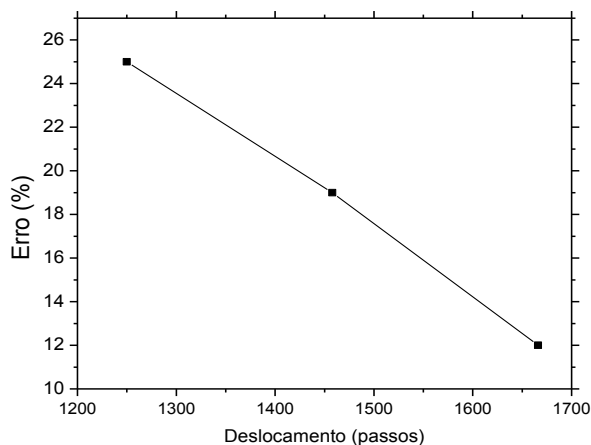


Figura 62: Gráfico do erro de não uniformidade em função do Deslocamento para 5 holofotes espaçados de cinco polegadas a um metro e trinta centímetros do piranômetro.

Com esta configuração o simulador não recebe uma classificação devido aos valores elevados do erro de não uniformidade, entre 25% e 12%. Observou-se que há uma maior irradiância na frente do holofote 4, segundo Figura 10, isso ocorre devido ao posicionamento geométrico dos holofotes porque este é o ponto onde se encontra o único holofote equidistante dos outros quatro, tendo portanto uma maior influência das outras lâmpadas.

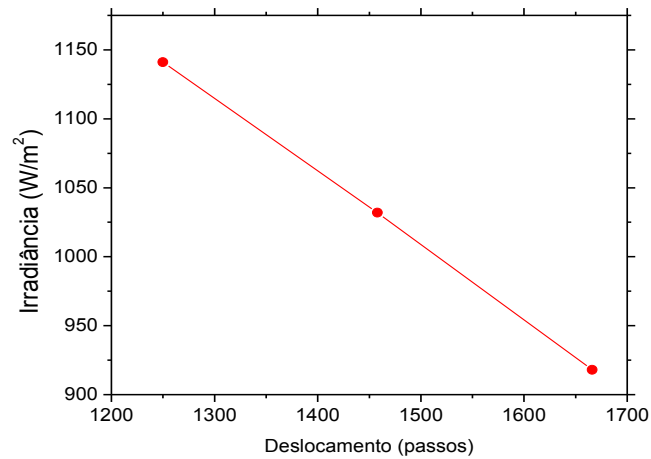


Figura 63: Gráfico da Irradiância em função do Deslocamento para 5 holofotes espaçados de cinco polegadas a um metro e trinta centímetros do piranômetro.

A irradiância incidente diminui de forma linear à medida que as lâmpadas avançam, obtendo valores médios entre 918 e 1141W/m².

Uma possibilidade para melhorar o desempenho com 5 holofotes é utilizar uma configuração pentagonal, de maneira que a influência de quatro holofotes seja a mesma para cada um deles. Testando diferentes configurações pode-se definir o número de holofotes necessários para cobrir uma área determinada pelo escopo do projeto do Laboratório de Certificação.

5. CONCLUSÕES

Os testes térmicos serviram para estabelecer a melhor posição para o sensor de efeito Hall, obedecendo às condições de trabalho estabelecidas pelo fabricante necessárias para seu bom funcionamento. Dito isso, o sistema de detecção do ímã de neodímio que acompanha a lâmpada com o sensor de efeito Hall, se mostrou estável em todos os testes realizados.

O motor de passo também se mostrou estável do ponto de vista dinâmico. Cada um dos testes foi realizado posicionando a lâmpada de forma precisa sem problemas de perda de passos ou torque insuficiente.

A opção de colocar um sistema de arrefecimento melhorou as condições de trabalho do holofote, diminuindo a temperatura em cerca de 17,5°C. Além disso, a irradiância incidente foi mais estável atingindo valores na estabilidade temporal com um erro de 0,46% qualificando o simulador como do tipo A neste ponto.

O sistema microcontrolado embarcado funcionou dentro do esperado, executando os comandos de acionamento do motor, do releda comando da lâmpada e realizando a leitura do sensor de fim de curso, além de estabelecer comunicação estável com o PC.

O barramento RS-485 funcionou satisfatoriamente fazendo a comunicação entre os 5 holofotes e o PC por meio de um único cabo de comunicação utilizando a configuração Daisy Chain.

O quadro elétrico se mostrou estável em todos os testes. O acendimento das lâmpadas pelo circuito embarcado que aciona as bobinas dos contatores teve bom funcionamento em todos os ensaios.

O espectro de emissão das lâmpadas halógenas dentro do holofote SCENA 650/1000 S conseguiu obter classificação do tipo C na faixa: 400 – 500nm, do tipo A nas faixas: 500 – 600nm, 600 – 700nm, 700 – 800nm e 800 – 900nm; e classificação do tipo C na faixa: 900 – 1100nm.

O simulador é capaz de fornecer diferentes níveis de irradiância, entretanto não é adequado utilizar todo o percurso da lâmpada, pois o erro de não uniformidade cresce

muito para certas posições, em especial durante os primeiros 3/4 do avanço da lâmpada. Só ao final, a partir de um deslocamento da lâmpada entorno de 1250 passos do motor, foi possível obter valores de erro que enquadram o simulador em alguma classificação referente a não uniformidade.

A melhor classificação da configuração quadrada, com 4 holofotes espaçados de duas polegadas, a um metro do piranômetro, é do tipo CAB. (Distribuição espectral, Estabilidade Temporal e Não Uniformidade respectivamente), na faixa de 976 a 1630W/m².

A melhor classificação da configuração quadrada com 4 holofotes, espaçados de cinco polegadas, a um metro e trinta centímetros do piranômetro, é do tipo N*AB, na faixa de 843 a 901W/m². Lembrando que nesta configuração a não uniformidade foi entorno de 85% do tipo A, isso mudaria a classificação para CAA.

A classificação da configuração utilizada neste trabalho com 5 holofotes espaçados de cinco polegadas, a um metro e trinta centímetros do piranômetro, é do tipo CAN*, na faixa de 918 a 1141W/m².

N*: não possui classificação (erro > 10%).

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A proposta de automação se mostrou estável, capaz de controlar todos os aspectos de cada um dos holofotes de forma remota por meio um computador pessoal. Contudo, algumas melhorias poderiam ser feitas no *firmware* desenvolvido para aumentar a robustez da comunicação, como por exemplo, a utilização de algum protocolo de comunicação já predefinido, como o protocolo Modbus, juntamente com detecção de erro, verificando o valor CRC (Verificação de Redundância Cíclica), para detectar alterações acidentais dos dados.

Um sensor de temperatura poderia ser utilizado para monitoramento da temperatura de cada um dos holofotes durante os testes. Esse parâmetro poderia ser importante para garantir a longevidade da instrumentação utilizada.

O desenvolvimento de um *software* de controle poderia ser utilizado para o monitoramento do sistema com mais detalhes.

Uma sugestão para o sistema de calibração com o piranômetro seria automatizá-lo e desenvolver um sistema de aquisição de dados para realizar os testes de não uniformidade de maneira mais precisa e confiável.

Testar outras configurações dos holofotes, mudando o arranjo geométrico, o espaçamento entre eles e o foco, seria necessário para verificar qual a configuração com melhor desempenho e como muda a intensidade ao nível do painel fotovoltaico. Dessa forma poderia definir o número total de holofotes necessários para atingir o escopo do projeto do Laboratório de Certificação de Componentes para Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

ACTION TECHNOLOGY **SM1.8-B1-SE – 1.8° NEMA 23** Datasheet do motor de passo. Disponível em: <http://www.actiontechnology.com.br/upload/fichas/SM1.8B1SE.pdf> Acessado em Janeiro 2015

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

BRITES, F.G.; SANTOS V.P.A (2008) **Motor de Passo**. Escola de Engenharia, Curso de Engenharia de Telecomunicações – Universidade Federal Fluminense. 3 p.

BRUNO SARAIVA DA SILVA (2013). **Padrões de Comunicação Serial Clássicos: RS-232, RS-422 e RS-485**. Universidade Federal do Rio de Janeiro – Escola Politécnica. RJ. Brasil.

DTS – Lighting. **Conventional Projector SCENA 1000 S PC / FR** Technical specifications. Disponível em: http://www.dts-lighting.com/SCENA_1000_S_PC_FR# Acessado em Setembro 2014.

ETERNAL SUN B.V. (2014). **Solar Simulation standard and AAA-rating**. Molengra aff singel, JD Delft. The Netherlands.

FABIO PEREIRA, (2005). **PIC programação em C Microcontroladores**. Livro baseado nos compiladores CCS Editorial ÉRICA São Paulo – SP, Brasil.

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

HONEYWELL (2014). **Instalation instruction for the 103SR Series Hall-Effect Position Sensor**.

HONEYWELL (2014). **Product Range Guide – Speed Sensor**. United State 10 p.

JÚNIOR J.L.P. (2007). **Efeito Hall extraordinário no supercondutor magnético $\text{RuSr}_2\text{GdCu}_2\text{O}_8$** . Instituto de Física – Universidade Federal do Rio Grando do Sul. Porto Alegre, Brasil.

KIPP & ZONEN (2006). **Instruction manual – CMP/CMA series**. United State.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.

NMB Corporation. **A Minebea Group Company – Catalogue Precision Step Motors**. 29 p.

NOVUS (2010). **Guia Rápido – Conversor USB/RS485 ou RS422**. Brasil. Disponível em: http://www.aliarengenharia.com.br/uploads/pdf/produtos/aquisicao_e_registro/CONVERSOR%20ISOLADO%20USB%20i485.pdf

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

RIBEIRO, D.B.S. (2014). **Desenvolvimento e teste de conceito de protótipo de iluminador solar contínuo para o visível e ultravioleta**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica – Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA, Brasil.

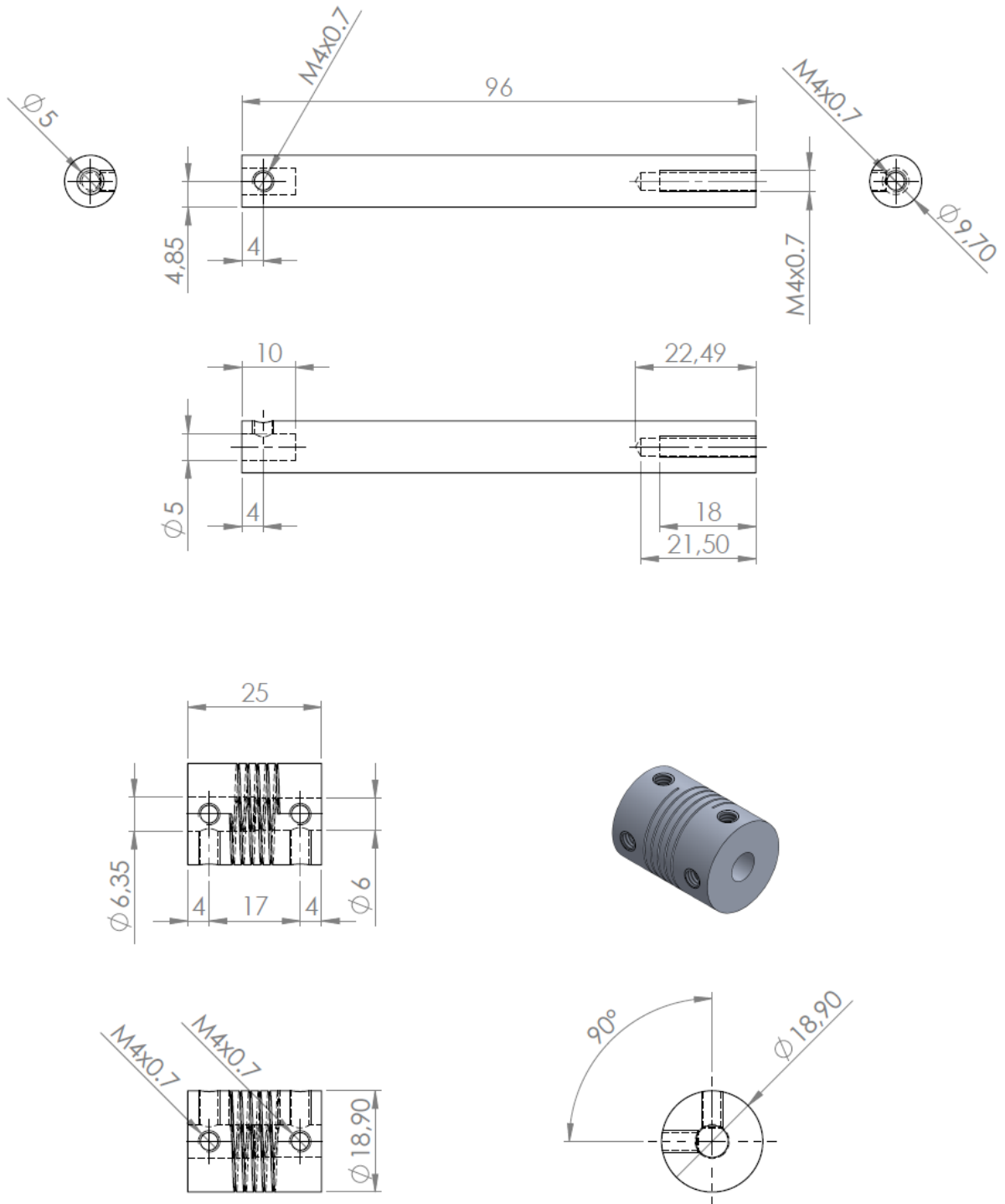
RICARDO ANDRADE (2003). **Motor de passo**. Núcleo de Pesquisa em Redes de Computadores. Universidade Salvador, Unifacs – BA, Brasil.

SOARES JUNIOR, L. C. S. (2008). **Desenvolvimento de um sistema para navegação e telemetria de um ROV atuando em águas rasas**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica – Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA, Brasil.

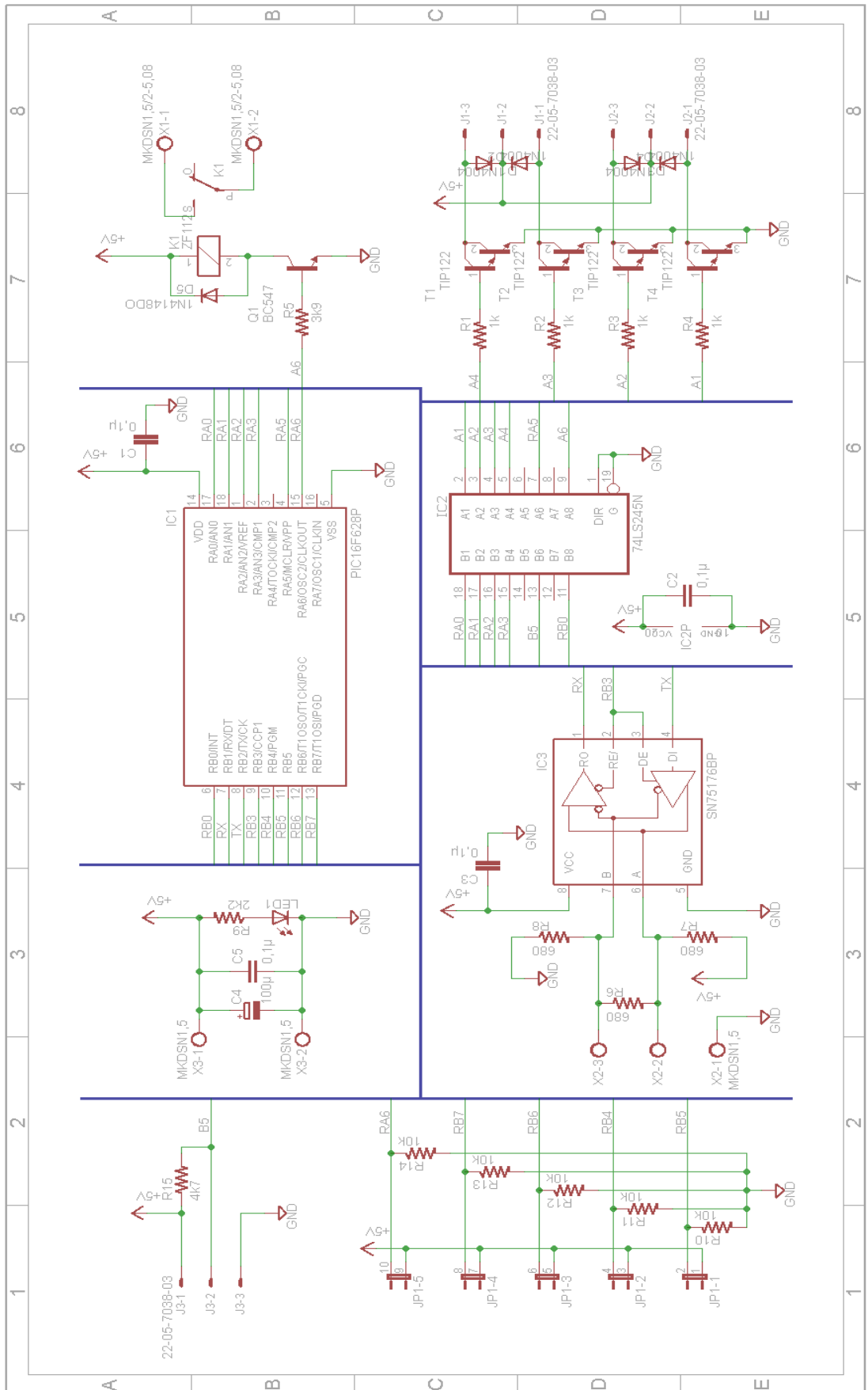
SOUZA, J.V.D. (2008). **Contribuições em solarimetria para a composição de uma rede baiana de radiômetros**. Trabalho de conclusão de Curso, Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA, Brasil.

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.

Apêndice A – Planos de fabricação



Apêndice B – Esquema eletrônico desenvolvido



Apêndice C – Código do *firmware*

```
#FUSES NOWDT                //No Watch Dog Timer
#FUSES INTRC_IO             //Internal RC Osc, no CLKOUT
#FUSES NOPUT               //No Power Up Timer
#FUSES NOPROTECT           //Code not protected from reading
#FUSES NOBROWNOUT          //No brownout reset
#FUSES NOMCLR              //Master Clear pin used for I/O
#FUSES NOLVP               //No low voltage prgming, B3(PIC16) or B5(PIC18)
used for I/O
#FUSES NOCPD               //No EE protection

#use delay(clock=4000000)
#use rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_B2,rcv=PIN_B1,bits=8)

#include<stdlib.h>

int8 ID = 0; // variable de ID de cada microcontrolador

void main()
{
// strings del dispositivo que recibe del programa

char c; // caracter principal de acción
char e[3]; // string para indicar el numero de pasos a mover
char h[2]; // string del ID del dispositivo

// variables de trabajo del programa

    int8 name = 0; // variable enviada por el PC para comunicarse con un esclavo
    especifico
    int16 pasos = 0; // variable que se convierte en numero entero para los pasos del
    motor
    int8 tiempo = 50; // retrasos generales
    int8 velocidad = 50; // velocidad entre cada paso del motor
    int16 i = 0; // variable que acumula los numeros de pasos avanzados

delay_ms(1000);

    output_low(PIN_A0); // Bobina 1 apagada
    output_low(pin_A1); // Bobina 2 apagada
    output_low(pin_A2); // Bobina 3 apagada
    output_low(pin_A3); // Bobina 4 apagada
    output_low(pin_B0); // Lampara apagada

    output_float(pin_A6); // Pin 1 de ID en lectura
    output_float(pin_B7); // Pin 2 de ID en lectura
    output_float(pin_B6); // Pin 3 de ID en lectura
    output_float(pin_B4); // Pin 4 de ID en lectura
    output_float(pin_B5); // Pin 5 de ID en lectura

// Calculo de ID del dispositivo

ID =
1+1*input_state(PIN_A6)+2*input_state(PIN_B7)+4*input_state(PIN_B6)+8*input_state(PIN_
B4)+16*input_state(PIN_B5);

inicio:

    output_low(PIN_B3); // Mantiene el PIC en lectura
```

```

while(TRUE)
{
if(kbhit()) // si tiene informacion en la puerta serial, entrar
{
gets(h);// lee la string "id" que se encuentra en la puerta serial
name = atoi(h);

if (name == ID) // compara a string "name" con el valor almacenado de ID
{
while (TRUE)
{
if(kbhit()) // si tiene informacion en la puerta serial, entrar
{
c = getc();
if (c == 'l')
{
output_high(pin_B0); // Ligar holofote

goto inicio;
}
elseif (c == 'd')
{
output_low(pin_B0);

goto inicio;
}
elseif (c == 'm')
{
output_float(pin_A5); // Coloca el pin A5 como entrada digital, sensor de efecto hall
de fin de curso
while (TRUE)
{
if (!input(PIN_A5)) break;
delay_ms(velocidad);
output_low(pin_A2);
output_high(pin_A0);

if (!input(PIN_A5)) break;
delay_ms(velocidad);
output_low(pin_A0);
output_high(pin_A3);

if (!input(PIN_A5)) break;
delay_ms(velocidad);
output_low(pin_A3);
output_high(pin_A1);

if (!input(PIN_A5)) break;
delay_ms(velocidad);
output_low(pin_A1);
output_high(pin_A2);
}
output_low(pin_A0); // Bobina 1 apagada
output_low(pin_A3); // Bobina 2 apagada
output_low(pin_A1); // Bobina 3 apagada
output_low(pin_A2); // Bobina 4 apagada
output_high(pin_B3); // Coloca el PIC en escrita
delay_ms(tiempo);
printf(" 99 \r \n"); // Envia string

delay_ms(tiempo);
goto inicio;
}
elseif (c == 'o')
{
output_high(pin_B3); // Coloca el PIC en escrita

delay_ms(tiempo);
while (TRUE)

```


Anexo 1 – Artigo publicado no 10º Congresso Internacional de Bioenergia

PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO PARA HOLOFOTES DE UM SIMULADOR SOLAR PARA CARACTERIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

Jose Alejandro Moreno Alfonzo*, Valmara Silveira Ponte**, Dion Barbosa dos Santos Ribeiro***, Iuri Muniz Pepe****

*Engenheiro Mecânico, mestrando, Universidade Federal da Bahia, joc.alejandro.m@gmail.com, **Física, mestranda, Universidade Federal da Bahia, valmara.ponte@gmail.com, ***Físico, doutorando, Universidade Federal da Bahia, ribeiodion@gmail.com, ****Físico, pós-doutor, Universidade Federal da Bahia, lapo.if@gmail.com

Laboratório de Propriedades Óticas, Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia, Campus Universitário de Ondina, Salvador – BA, Brasil CEP: 40210-340.

Resumo

Este trabalho descreve a proposta de automação de holofotes modelo DTS SCENA 650/1000 S, a serem usados como iluminador solar contínuo, com emissão no visível. O iluminador irá equipar o Laboratório de Certificação de Componentes para Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica, localizado no Parque Tecnológico da Bahia, possibilitando verificar a conformidade das normas CEI da Commission Electrotechnique Internationale. Estes dispositivos são fundamentais para os testes de certificação propostos no escopo do projeto de um laboratório de certificação em conformidade com normas brasileiras e internacionais. Foram conduzidos testes que justificam cada uma das soluções adotadas na automação do dispositivo, em especial a distribuição espacial do campo de radiação, comportamento térmico da lâmpada e o impacto do sistema de arrefecimento nas medidas de irradiância. Foram instrumentados 4 holofotes espaçados entre si de 50,8 milímetros (duas polegadas), de forma a concentrar horizontalmente a iluminação. Além disso, foi instalado um piranômetro de fabricação Kipp-Zonen, modelo CMP-21, em um suporte com dois graus de liberdade para avaliar as características de homogeneidade do campo de radiação exigida pela norma, assim foram testadas uniformidade e estabilidade. A solução tecnológica adotada não só automatizou o mecanismo de ajuste do foco do holofote, o sistema de arrefecimento melhorou seu desempenho emissivo diminuindo erro na estabilidade de 6,02% para 0,48%. Ao final, o protótipo mostra ter classificação B em uniformidade e classificação A em estabilidade, em uma escala de três níveis: A, B ou C definidas pela norma CEI 904-9, resultando em um equipamento robusto e estável.

Palavras Chave: Simulador Solar, Holofote, Dispositivos Fotovoltaicos, Piranômetro.

Abstract

AUTOMATION PROPOSAL FOR SPOTLIGHTS OF A SOLAR SIMULATOR USED FOR INDOOR TESTING OF PHOTOVOLTAIC DEVICES

This work reports on the automation proposed for the DTS SCENA 650/1000 spotlights used in the development of a continuous solar illuminator, emitting in visible spectrum, projected for the Solar Energy Photovoltaic Systems Components Certification Laboratory, in the Technology Park of Bahia; in order to verify conformity with the standard CEI 904-9 of Commission Electrotechnique Internationale. These devices are essential for certification tests proposed in the projected laboratory, supported by Brazilian and International Standards. Tests were executed to justify each and every solution used, with special note to: the radiation spatial distribution and the spotlight thermal behavior, measured at different position inside and outside the lamp housing in order to find the best position for sensors and actuators; and the impact of the cooling system in the irradiation measures. It was verified that the cooling system does not affect the irradiance. The prototype is made up of 4 spotlights, two inches apart from each other. Light emitted is projected on a vertical plane, uniformity and stability were measured and seems meet the standards requirements, the performances were classified between A, B or C. These measurements were performed with a Kipp-Zonen pyranometer, model CMP-21, installed on a mobile structure, allowing performing measurements at different points on a plane. The proposed automation improves the spotlight optical and thermal properties. The results show that the prototype is classified as B regarding uniformity, and A in stability, resulting in a stable and robust solar simulator.

Keywords: Solar Simulator, Spotlight, photovoltaic devices, pyranometer.

INTRODUÇÃO

Os painéis fotovoltaicos são os elementos mais importantes dos sistemas de geração de energia elétrica a partir da luz do Sol, sendo também vital sua caracterização e certificação. Para tais fins, é fundamental ter à disposição uma bancada de iluminação solar artificial; com iluminadores, de espectro contínuo, discreto, com intensidade constante e variável. O Laboratório de Certificação de Componentes para Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica fará uso extensivo deste tipo de equipamento, que precisa ser cuidadosamente projetado para atender as normas da Commission Electrotechnique Internationale (CEI). No que tange o desenvolvimento do iluminador constante, emitindo luz visível, foco deste trabalho, o uso de um holofote de iluminação de cena é uma boa solução para se obter as condições exigidas pelas normas da CEI para a realização deste tipo de testes.

Os holofotes DTS, série SCENA 650/1000 S, são equipamentos italianos de excelente qualidade ótica e mecânica, mas com ajuste manual, ou seja, não possuem nenhuma automação. A proposta deste trabalho é desenvolver e validar quatro protótipos automatizados que comporão o iluminador solar contínuo, no visível, a ser empregado no Laboratório.

O primeiro passo rumo a essa proposta foi acoplar um motor de passo capaz de movimentar a lâmpada interna do projetor em seu trilho de suporte. Esse movimento, originalmente realizado de forma manual, coloca a lâmpada em posições tais que seu foco está mais ou menos concentrado, a fim de conseguir as diferentes intensidades de irradiância na superfície incidente. À título de exemplo, com dois holofotes separados entre si de duas polegadas, cada um com uma lâmpada halógena, OSRAM de 1000 W, é possível medir valores de irradiância numa faixa desde abaixo de uma constante solar (1000 W/m^2) até quase três vezes o valor desta. (RIBEIRO, D.B.S. 2014, p. 60).

Em seguida, foi avaliado o perfil térmico do holofote para escolher a melhor posição da instrumentação a ser montada dentro do corpo deste, e mesmo determinar a necessidade da instalação de um sistema de arrefecimento para manter uma temperatura de operação adequada. Um sensor de efeito Hall foi empregado como sensor de fim de curso, para detectar a posição inicial da lâmpada. Na Figura 1 encontram-se os 4 holofotes instalados em um suporte móvel montado com perfis estruturados de alumínio.



Figura 1. Holofote SCENA 650/1000 S.

Figure 1. Spotlight SCENA 650/1000 S.

O controle e posicionamento das lâmpadas são feitos com um software para computador pessoal (PC), que se conecta a um microcontrolador através de interfaces RS-232. Assim, o usuário estabelece às condições dos testes a serem realizados.

Utilizando um piranômetro, fixo numa estrutura que permite realizar medições num plano vertical com dois graus de liberdade (X e Y) foram realizados os testes requeridos pela norma CEI 904-9 de uniformidade e estabilidade. Os testes indicam que a classificação do simulador solar, baseado no cálculo do erro obtido entre os valores máximos e mínimos da intensidade – seria C, se o erro estivesse entre 10% e 5%, B se o intervalo de confiança fosse de 5% a 2% e, finalmente A se o erro na intensidade é menor ou igual a 2%. (Norma Internacional IEC 904-9, 1995, p. 6).

MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema proposto é composto por componentes mecânicos, eletrônico e software, podendo ser dividido em quatro partes: o sistema mecânico que contém o holofote automatizado; o circuito com um microcontrolador para leitura e controle dos sensores e atuadores; um computador que executa o software de controle; e a estrutura de calibração que contém o piranômetro com capacidade de movimentação em dois eixos.

Sensores e Atuadores

O holofote DTS SCENA 650/1000 S tem uma lente de Ø 150 mm com um ajuste focal do ângulo de iluminação, feito por um parafuso sem fim, de 13° a 53°. O suporte da lâmpada tem movimento extremamente suave e preciso em uma pista tripla. Este holofote é alimentado na rede elétrica convencional 230V 50/60 Hz. (DTS – Lighting 2014).

O atuador eletromecânico que está acoplado ao parafuso sem fim do holofote, utilizado para posicionar a lâmpada, é um motor de passo unipolar Stepper 23BB-H002-14 Minebea. A tensão de trabalho é de 12 V e 340 mA por fase, com resolução de 7,5° por passo.

O sensor de posição é um sensor Hall, fabricado pela Honeywell, série 103SR, que quando submetido a um campo magnético externo, responde com uma variação em sua tensão de saída. A versão digital fornece saída estável ao longo da faixa de temperatura de -40 °C a 100 °C [-40 °F a 212 °F], e pode aceitar tensão contínua (DC) de alimentação de 4,5 V a 24 V.

O sistema de arrefecimento é composto por uma ventoinha NETWORK de 92 mm x 92 mm x 30 mm com potência de 16 Watts. A Figura 2 mostra os posicionamentos do motor, sistema de arrefecimento (ventoinha) e do sensor de efeito Hall. Só foi necessário modificar a tampa posterior do holofote para fixar sensores e atuadores.

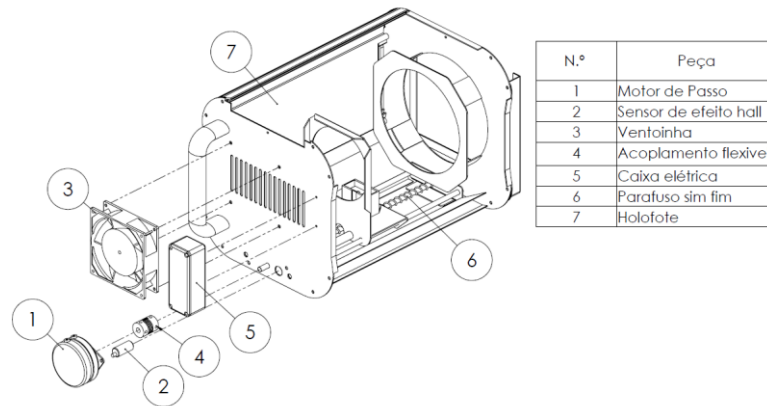


Figura 2. Posição do motor, sensor de efeito Hall e sistema de arrefecimento.

Figure 2. Motor positioning, the Hall effect sensor and cooling system.

Circuito Microcontrolado

O painel de conexão tem capacidade para o controle de 4 holofotes e está conectado, por interfaces RS-232, ao computador que executa o software de controle desenvolvido em linguagem de programação BASIC. Ele contém um microcontrolador PIC18F4550 modificado para ter 16 saídas digitais na porta B e 8 entradas digitais na porta D, suficientes para realizar o controle dos 4 holofotes. Cada protótipo precisa de 4 saídas digitais para o motor de passo e uma entrada digital para o sensor de fim de curso.

Sistema de calibração

A Figura 3 mostra o piranômetro usado neste trabalho, do fabricante Kipp & Zonen, modelo CMP-21, instalado numa estrutura de alumínio estruturado que permite realizar medições em um plano vertical. Este instrumento utiliza uma termo-pilha que gera um diferencial de tensão (μV) proporcional ao valor da radiação incidente sobre ele. O valor de tensão lido é relacionado com a sensibilidade do instrumento para se obter o valor da radiação solar.

Para o piranômetro utilizado neste experimento a sensibilidade é:

$$S = 12,43 \frac{\mu\text{V}}{\text{W}/\text{m}^2}$$

Para o cálculo da irradiância obtida se utiliza a seguinte expressão:

$$E_{\text{Solar}} = \frac{U_{\text{emf}}}{S}$$

Onde:

$E_{\text{Solar}} [\text{W}/\text{m}^2]$ = Irradiância

$U_{\text{emf}} [\mu\text{V}]$ = Tensão de saída

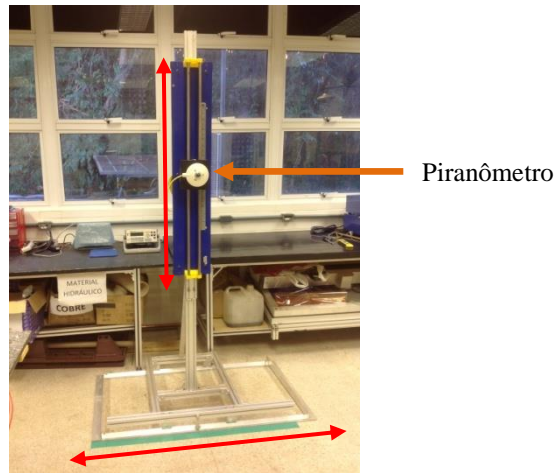


Figura 3. Sistema de calibração com Piranômetro.
Figure 3. Calibration system with the pyranometer.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro teste realizado foi a medição do aumento de temperatura utilizando um termômetro digital Minipa, modelo MT-455, em dois pontos do holofote (T1 atrás e T2 à frente) durante 85 minutos, desde o momento em que o holofote foi ligado. Foram feitos três testes com a lâmpada em três posições: no início, na posição média e no final do curso, junto à lente, respectivamente os pontos P1, P2 e P3.

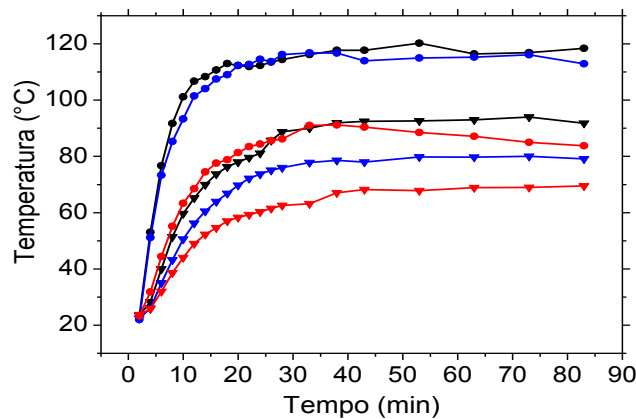


Gráfico 1. Linha preta T2 e T1 em P1. Linha azul T2 e T1 em P2. Linha vermelha T2 e T1 em P3.
Graphic 1. Black Line T1 and T2 in P1. Blue line: T1 and T2 in P2. Red line: T1 and T2 in P3.

O Gráfico 1 apresenta os dados de temperatura obtidos. A lâmpada aquece mais o interior do holofote quando está em sua posição inicial (P1 Preto). Além disso, observou-se que na fase anterior do holofote, onde estão os cabos de tensão, a temperatura é menor (T2) – entre 90° C e 60° C – a depender da posição da lâmpada. Dessa forma, decidiu-se colocar o sensor nessa área.

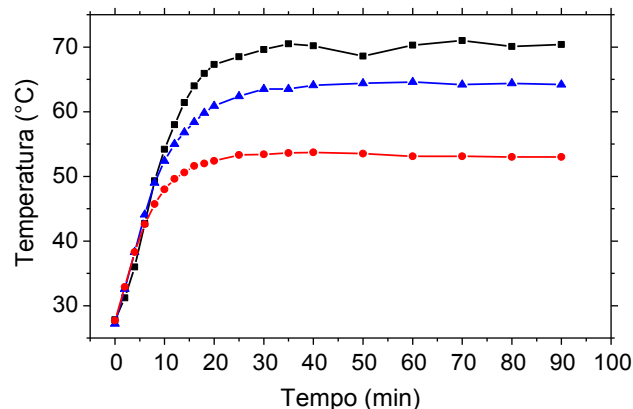


Gráfico 2. Sem ventoinha (preto), ventoinha puxando ar quente (azul) e ventoinha soprando ar frio (vermelho).
Graphic 2. Without fan (Black), fan extracting the hot air (blue) and fan blowing cold air (red).

A análise das primeiras medidas comprova que a temperatura dentro do holofote não está dentro das especificações do fabricante do sensor de efeito Hall. Decidiu-se colocar uma ventoinha na parte posterior do holofote para diminuir a temperatura. Foram realizados três testes, sem ventoinha (referência), com a ventoinha puxando o ar quente de dentro do holofote, e com a ventoinha soprando ar frio para dentro do holofote. Os resultados são mostrados no Gráfico 2.

Instalando uma ventoinha soprando ar frio não só se obteve uma temperatura de trabalho mais baixa (53 °C), como também o erro da estabilidade (intensidade em função do tempo) do simulador diminuiu de 6,02% até 0,48%. Foi feita uma coleta de dados de irradiância e os resultados podem ser vistos no Gráfico 3. Esta estabilidade da fonte de luz é exigida pela norma CEI 904-9, os valores mensurados garantem que o protótipo desenvolvido é classe A (Norma Internacional IEC 904-9, 1995, p. 6).

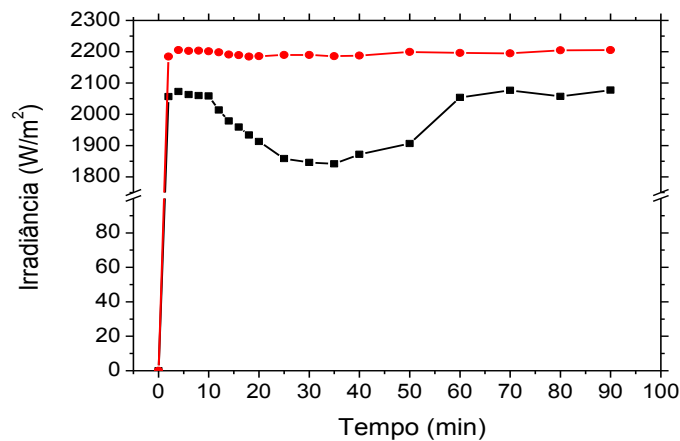


Gráfico 3. Gráfico da irradiância em função do tempo: sem arrefecimento (preto), com a ventoinha soprando ar frio (vermelho).

Graphic 3. Irradiance Vs Time, without cooler (Black) and with blowing cold air (red).

Após a seleção dos sensores e da instrumentação, foi realizado o teste de uniformidade do simulador solar, calibrando-o numa posição onde a irradiância média obtida é de 1000 W/m², condição básica estabelecida pelas normas para realizar testes e certificação de dispositivos fotovoltaicos. Utilizando o software de controle para comunicar-se com o microcontrolador, foi possível obter uma contagem precisa do número de passos feitos pelos motores para colocar as lâmpadas na mesma posição.

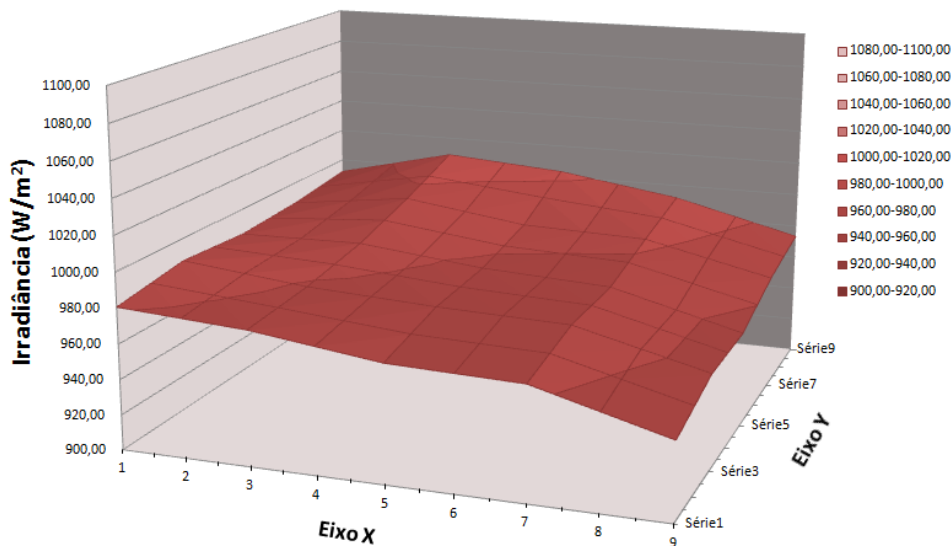


Gráfico 4. Gráfico da irradiância em função da área (26,5mm x 26,5mm).

Graphic 4. Irradiance as a function of the area, covering a square of 26,5mm x 26,5mm

Foi utilizado o piranômetro para mapear as irradiâncias, em duas direções, cobrindo uma área de 26,5cm x 26,5cm. No gráfico 4 os resultados observados são exibidos e mostram que o erro da uniformidade do simulador é de 3,03%, o que coloca o simulador na classificação B.

CONCLUSÃO

Cada solução tecnológica adotada foi testada e validada para garantir o bom funcionamento do equipamento. A utilização de motores de passo acionados por um microcontrolador permitiu o ajuste focal dos holofotes de forma precisa e controlada. Permitindo assim, que o usuário estabeleça a posição das lâmpadas apenas introduzindo no software de controle para computador pessoal (PC), o valor de irradiância que ele precisa. A irradiância dos testes para dispositivos fotovoltaicos é estabelecida pela norma IEC 904-9, as quais são fornecidas pelo protótipo.

Para o controle da posição das lâmpadas, o sensor de efeito Hall foi uma boa solução pelo fato de que o encapsulamento permite sua utilização em ambientes de alta temperatura, entretanto, ainda assim, foi preciso colocar um sistema de arrefecimento para melhorar o desempenho do equipamento. Os estudos térmicos mostraram que, com a lâmpada ligada, há uma área de temperatura mais baixa na face anterior do holofote SCENA 650/1000S, portanto, decidiu-se instalar nesta área o sensor e o motor de passo. O sistema de arrefecimento instalado permitiu uma estabilidade térmica global, melhorando a estabilidade na emissão de luz. De fato o uso de uma ventoinha permitiu uma melhor classificação do holofote usado, de tipo B passou a ser do tipo A quanto a estabilidade com um erro de 0,48%.

O controle de cada motor e a leitura de cada sensor utilizando um microcontrolador em conjunto com um sistema supervisão, permitiu alinhar todas as lâmpadas obtendo uma irradiância global de 1000 W/m² e uniformidade de iluminação em uma área de 26,5 mm x 26,5 mm com um erro de 3,03%. Dessa forma foi possível o que classifica o simulador solar proposto como sendo de tipo B quanto a uniformidade. A proposta de automação adotada resultou em um equipamento robusto e estável.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe por me incluir na equipe do Laboratório de Propriedades Óticas (LAPO) do Instituto de Física da UFBA.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos de Mestrado.

REFERÊNCIAS

RIBEIRO, D.B.S. (2014). Desenvolvimento e teste de conceito de protótipo de iluminador solar contínuo para o visível e ultravioleta. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica – Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA, Brasil.

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

QUINGLONG MENG et al. (2011). Irradiance characteristics and optimization design of a large-scale solar simulator. School of Energy and Power Engineerin, Xi'an Jiaotong University – PR China.

DTS – Lighting Conventional Projector SCENA 1000 S PC / FR Technical specifications. Disponível em: <http://www.dts-lighting.com/SCENA_1000_S_PC_FR#> Acessado em setembro 2014.

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

INTERNATIONAL STANDARD IEC 904-9 (1995), Photovoltaicdevice – Part 9: Solar Simulator performance requirements.

TEODORO DA SILVA, I. (2010). Desenvolvimento de um sistema mecatrônico para posicionamento de um painel fotovoltaico e comparação con painel fixo. Dissertaçã de Mestrado, Escola Politécnica – Universidade Federal da Bahia. Salvador – BA, Brasil.

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.

SOARES JUNIOR, L. C. S. (2008). Desenvolvimento de um sistema para navegação e telemetria de um ROV atuando em águas rasas. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica – Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA, Brasil.