

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do(a) Autor(a): Calebe Abrenhosa Matias

Matrícula: 20152011140168

Título do Trabalho: Desenvolvimento de bancada laboratorial para testes de eficiência energética em painéis fotovoltaicos.

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: 01/07/2018

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

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

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia,
Local

13/07/2018.
Data

Calebe Abrenhosa Matias



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

Calebe Abrenhosa Matias

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA LABORATORIAL PARA TESTES
DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Goiânia, 2018

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Calebe Abrenhosa Matias

DESENVOLVIMENTO DE BANCADA LABORATORIAL PARA TESTES
DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPGTPS-IFG) - Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Eficiência de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Aylton José Alves

Coorientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto

Goiânia, 2018

M4271d Matias, Calebe Abrenhosa.

Desenvolvimento de bancada laboratorial para testes de eficiência energética em painéis fotovoltaicos / Calebe Abrenhosa Matias. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2018.

107 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Aylton José Alves.

Coorientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Inclui apêndices.

1. Painéis fotovoltaicos – Eficiência energética. 2. Bancada laboratorial – Simulador solar. I. Alves, Aylton José (orientador). II. Calixto, Wesley Pacheco (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 621.472

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Calebe Abrenhosa Matias

DESENVOLVIMENTO DE BANCADA LABORATORIAL PARA TESTES
DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Programa de Pós-Graduação stricto sensu em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPGTPS - IFG) – Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Eficiência de Energias Renováveis.

Prof. Dr. Aylton José Alves, Orientador (IFG)

Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto, Coorientador (IFG)

Prof. Dr. José Luis Domingos, Membro interno (IFG)

Prof. Dr. José Wilson Lima Nerys, Membro Externo (UFG)

Prof. Dr. Daywes Pinheiro Neto, Suplente (IFG)

Aprovado em: ___/___/___

Título: Desenvolvimento de bancada laboratorial para testes de eficiência energética em painéis fotovoltaicos

Autor: Calebe Abrenhosa Matias

Orientador: Prof. Dr. Aylton José Alves

Coorientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto

RESUMO

Este trabalho apresenta desenvolvimento de bancada laboratorial, que reproduz as condições do sol, para testes de eficiência energética de painéis fotovoltaicos, em ambiente controlado de temperatura e irradiância. É elaborado protótipo e aparato final com geometria otimizada para irradiância luminosa uniforme incidente sobre plano alvo. O aparato permite obter dados de tensão, corrente, temperatura do painel e temperatura de entrada e saída de água, armazenados em *Dattaloger* formado por software de supervisão desenvolvido especialmente para a bancada. São realizados experimentos aplicando água na superfície frontal do painel fotovoltaico para melhoramento da conversão de eficiência energética. Os resultados obtidos da bancada laboratorial indicam conformidade elétrica com dados do painel fotovoltaico simulado, proporcionando avanço em experimentos laboratoriais de dispositivos solares.

Title: Development of a laboratorial bench for energy efficiency tests on photovoltaic panels

Author: Calebe Abrenhosa Matias

Adviser: Prof. Dr. Aylton José Alves

Co-Adviser: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto

ABSTRACT

This work presents the development of laboratory bench, which reproduces the conditions of the sun, for tests of energy efficiency of photovoltaic panels, in controlled environment of temperature and irradiance. It is elaborated prototype and final apparatus with optimized geometry for uniform irradiance incident on target plane. The apparatus allows obtaining data of voltage, current, panel temperature and water inlet and outlet temperature, stored in Datalogger formed by supervisory software specially developed for the bench. Experiments are carried out by applying water to the front surface of the photovoltaic panel to improve energy efficiency conversion. The results obtained from the laboratory bench indicate electrical compliance with data from the simulated photovoltaic panel, providing advance in laboratory experiments of solar devices.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	21
CAPÍTULO 2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	27
2.1 Características do Sol	27
2.2 Dispositivos Fotovoltaicos	29
2.3 Técnicas de melhoramento da eficiência energética de painéis fotovoltaicos	40
2.4 Considerações	42
CAPÍTULO 3 SIMULADOR SOLAR	43
3.1 Classificação de simuladores solar	43
3.1.1 Não-Uniformidade da Irradiância	44
3.1.2 Estabilidade Temporal da Irradiância	44
3.1.3 Distribuição Espectral	45
3.2 Fontes luminosas	47
3.3 Considerações	49
CAPÍTULO 4 METODOLOGIA	51
4.1 Protótipo do simulador solar	51
4.2 Bancada otimizada	57
4.2.1 Modelamento do sistema	59
4.3 Experimentos propostos	65
4.4 Considerações	67
CAPÍTULO 5 RESULTADOS	69
5.1 Protótipo de bancada laboratorial não otimizada	69

5.1.1	Testes de eficiência energética usando bancada não otimizada	75
5.2	Bancada laboratorial otimizada	79
5.2.1	Característica elétrica do painel fotovoltaico usando bancada otimizada	86
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO		89
6.1	Contribuições do Trabalho	90
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	91
APÊNDICE A Circuito conversor Boost		93
APÊNDICE B Códigos usados para simulação.		95
B.1	Função de otimização das resistências série e paralela.	95
B.2	Código de otimização.	95
B.3	Código de simulação do painel fotovoltaico.	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		101

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Estações do ano no hemisfério sul, de acordo com a órbita da Terra em torno do Sol.	27
2.2 Variação da Irradiância eficaz ($I_{0,ef}$) ao longo do ano.	28
2.3 Representação dos ângulos zenital, elevação solar e azimutal.	28
2.4 Distribuição espectral da irradiância para AM0, AM1,5 e corpo negro com temperatura de 5800 k.	30
2.5 Bandas de valência e condução de isolantes, semicondutores e condutores.	31
2.6 Efeito fotocondutivo: geração de pares elétron-lacuna pela incidência de fótons em material semiconductor.	31
2.7 Junção <i>pn</i> de materiais semicondutores, efeito fotovoltaico na incidência de fótons e geração de corrente elétrica dissipada na carga R_L conectada aos terminais do semiconductor.	32
2.8 Princípio de funcionamento de painel fotovoltaico.	33
2.9 Sensibilidade espectral para diferentes tecnologias de células solares.	34
2.10 Circuito elétrico equivalente do painel fotovoltaico usando um diodo.	34
2.11 Curva característica $I \times V$ de painel fotovoltaico em condições de teste padrão.	36
2.12 Curva $P \times V$ de dispositivo fotovoltaico.	38
2.13 Influência da irradiância na corrente de curto circuito.	39
2.14 Influência da temperatura na corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto.	39
2.15 Variação da V_{oc} , I_{sc} e potência com o aumento da temperatura.	40
2.16 Balanço energético da água sobre painel fotovoltaico.	41
3.1 Intensidade do espectro solar para massa de ar AM1,5.	45
3.2 Espectro de lâmpadas de diferentes tecnologias.	48
4.1 Esquemático de construção e distribuição das lâmpadas do protótipo.	52
4.2 Protótipo do perfil metálico perfurado.	53
4.3 Esquema de montagem da estrutura do protótipo.	53
4.4 Distribuição de carga no sistema.	54
4.5 Circuito de controle de potência das cargas.	54
4.6 Forma de onda para $\beta = 60^\circ$	55
4.7 Circuito de controle do ângulo de disparo β	55
4.8 Circuito conversor tipo Boost.	56

4.9	Esquemático do protótipo.	57
4.10	Fluxograma do algoritmo genético.	58
4.11	Característica de reflexão da parábola.	59
4.12	Característica de construção do refletor.	60
4.13	Característica de construção do refletor.	60
4.14	Esquemático da estrutura da bancada laboratorial otimizada.	62
4.15	Malha de controla fechada PI usada para controle de temperatura interna da luminária.	63
4.16	Circuito de controle da temperatura interna da bancada laboratorial.	63
4.17	Circuito de controle do fluxo de água do sistema de arrefecimento do dispositivo fotovoltaico.	64
4.18	Circuito de aquisição de tensão e corrente de máxima potência do dispositivo fotovoltaico.	65
4.19	Conversor serial RS-232/RS-485.	65
4.20	Fonte de alimentação e tensão simétrica.	66
5.1	Protótipo de Bancada laboratorial desenvolvida.	69
5.2	Controlador de carga desenvolvido para controlar três conjuntos de carga somando 14kW.	70
5.3	Protótipo de bancada laboratorial desenvolvida.	71
5.4	Simulação da irradiância sobre painel fotovoltaico.	71
5.5	Irradiância medida sobre painel fotovoltaico.	72
5.6	Intensidade da irradiância durante 60 minutos.	73
5.7	Distribuição do espectro da lâmpada halógena usada no protótipo.	74
5.8	Influência do escoamento de água na superfície do módulo fotovoltaico em referência ao painel sem resfriamento.	76
5.9	Imagem térmica do painel fotovoltaico quando submetido a vazão de 2 litros por minuto.	76
5.10	Influência da temperatura de operação do módulo na tensão de máxima potência para diferentes vazões de água.	77
5.11	Influência da temperatura de operação do módulo na corrente de máxima potência para diferentes vazões de água.	78
5.12	Influência da temperatura de operação do módulo no ponto de máxima potência para diferentes vazões de água.	78
5.13	Evolução da função de avaliação para cada geração do algoritmo genético.	80
5.14	Simulação da irradiância, em W/m^2 , do simulador solar otimizado sobre painel fotovoltaico.	81
5.15	Perspectiva geral da bancada otimizada desenvolvida.	82

5.16	Conjunto de placas eletrônicas desenvolvidas.	82
5.17	Vista interna da bancada otimizada desenvolvida.	83
5.18	Valores medidos da irradiância, em W/m^2 , do simulador solar otimizado sobre painel fotovoltaico.	83
5.19	Distribuição espectral da lâmpada usada na bancada laboratorial otimizada. . .	84
5.20	Intensidade da irradiância durante 60 minutos medidos no simulador solar otimizado.	85
5.21	Geometria do protótipo sobre o otimizado.	86
5.22	Evolução da temperatura de operação do painel fotovoltaico quando submetido a teste no simulador solar otimizado.	87
5.23	Dados da característica elétrica do painel fotovoltaico sobre teste no simulador solar otimizado.	88
5.24	Potência elétrica simulada e medida.	88
A.1	Circuito completo do conversor Boost.	93

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Classificação de simulador solar de acordo com normas IEC.	44
3.2 Referência para comparação do espectro de acordo com norma IEC 904-3 para AM1,5.	46
4.1 Especificações do Módulo	57
5.1 Classificação do protótipo com a conformidade do espectro.	74
5.2 Classificação geral do protótipo de simulado solar desenvolvido.	74
5.3 Temperaturas indicadas pelo termovisor para vazão de 2 litros por minuto. . .	77
5.4 Potência produzida e ganho de eficiência para cada taxa de vazão de água. . .	79
5.5 Conjunto de respostas da otimização do sistema.	81
5.6 Classificação da banca laboratorial otimizada em relação a conformidade com o espectro padrão.	85
5.7 Classificação geral do simulador solar otimizado.	85

LISTA DE SÍMBOLOS

α	– Elevação do Sol.
β	– Ângulo de disparo do <i>dimmer</i> .
η	– Eficiência de conversão de energia do painel fotovoltaico.
η_m	– Eficiência da conversão de energia de painel fotovoltaico modificado.
γ_s	– Ângulo Azimutal.
λ	– Comprimento de onda.
λ	– Variação do comprimento de onda.
θ_z	– Ângulo zenital.
A	– Área do painel fotovoltaico.
AM0	– Massa de Ar no topo da atmosfera terrestre.
AM1	– Massa de Ar para ângulo zenital igual a 0° .
AM1,5	– Massa de Ar para superfície inclinada de 37° .
a_1	– Fator de idealidade do diodo.
CC-CC	– Conversão de tensão contínua em outra amplitude de tensão contínua.
E_f	– Energia associada a frequência de um fóton.
E_g	– Energia entre banda de valência e banda de condução.
eV	– Medida de energia associada a um elétron.
f	– Frequência da luz.
FF	– Fator de forma do painel fotovoltaico.
G	– Irradiância sobre o módulo fotovoltaico.
G_{max}	– Irradiância máxima na superfície do plano alvo.
G_{min}	– Irradiância mínima na superfície do plano alvo.
G_{stc}	– Irradiância em condições de teste padrão, $1000W/m^2$.
G_d	– Radiação solar direta.
G_e	– Radiação solar difusa.
G_r	– Reflexão da radiação incidente no painel fotovoltaico.
h	– Constante de Plank.
I_d	– Corrente direta no diodo.
I_D	– Corrente fotogerada na carga reativa.
I_{FG}	– Corrente fotogerada.
I_{MP}	– Corrente no ponto de máxima potência.
$I_{ph,stc}$	– Corrente Gerada pelo efeito fotovoltaico nas condições de teste padrão.
I_{ph}	– Corrente Gerada pelo efeito fotovoltaico.
I_r	– Corrente que passa pela resistência em paralelo.
$I_{S,stc}$	– Corrente de curto circuito nas condições de teste padrão.
I_{sc}	– Corrente de curto circuito.
I_0	– Corrente de saturação reversa do diodo.
k	– Constante de Boltzmann.
K_i	– Coeficiente de temperatura da corrente.

n_s	–	Número de células em série.
P_{MP}	–	Potência no ponto de máxima potência.
q	–	Carga do elétron.
Q_{ca}	–	Perda de energia por convecção da água com o ar.
Q_{cv}	–	Perda de energia por convecção da água com o vidro.
Q_e	–	Perda de energia por evaporação.
R_{sh}	–	Resistor em paralelo.
R_L	–	circuito eletroeletrônico intermediário.
R_s	–	Resistor em série.
S_{uom}	–	Não-uniformidade medida do simulador solar otimizado.
S_{uos}	–	Não-uniformidade simulada do simulador solar otimizado.
S_a	–	Distribuição do espectro no intervalo de medição.
S_e	–	Estabilidade temporal da radiação luminosa.
S_p	–	Equivalência com o espectro padrão.
S_u	–	Não-uniformidade de irradiância.
T	–	Temperatura de operação do módulo.
T_{stc}	–	Temperatura de operação do módulo em condições de teste padrão, $25^\circ C$.
t_e	–	Efeito de termalização do material.
T_a	–	Temperatura da água.
T_c	–	Temperatura do painel fotovoltaico com células de silício.
T_g	–	Temperatura do vidro.
V	–	Tensão fornecida pelo painel fotovoltaico.
V_{MP}	–	Tensão no ponto de máxima potência.
V_{OC}	–	Tensão de circuito aberto nas condições de teste padrão.
V_{OC}	–	Tensão de circuito aberto.
V_{CA}	–	Tensão de corrente alternada.
V_{in}	–	Fluxo de vazão de entrada de água.
V_{out}	–	Fluxo de vazão de saída de água.
$I_{0,ef}$	–	Irradiância extraterrestre eficaz.
I_k	–	Irradiância extraterrestre perpendicular aos raios do sol.
K_v	–	Coeficiente de temperatura de tensão.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- WRC – *World Radiation Center* (Centro de Radiação Mundial)
CIS – Material fotovoltaico a base de Cobre, Índio e Selênio.
STC – Standart Test Condition (Condições de Teste Padrão).
IEC – *International Electrotechnical Commission* (Comissão Internacional Eletrotécnica).
PV/T – Sistema fotovoltaico/termal.
MPPT – Maximum power point tracker (Rastreador do ponto de máxima potência).
SP – Setpoint.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Simuladores Solar são equipamentos que permitem reprodução das condições de iluminação e temperatura do sol para testes em dispositivos sensíveis a irradiância¹ solar, como painéis fotovoltaicos, que convertem diretamente energia luminosa em eletricidade. As características elétricas de módulos fotovoltaicos são influenciados essencialmente pela irradiância e temperatura de operação, o que torna necessário o desenvolvimento de bancada com controle destas variáveis para testes de eficiência energética.

Os dispositivos fotovoltaicos são fonte de energia não linear, de alta durabilidade, *design* simples e requer baixa manutenção. É significativo conhecer as características elétricas destes dispositivos, como: tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito, potência máxima e curva característica (corrente \times tensão). Os testes devem ser realizados em condições padrão com irradiância de $1000W/m^2$, massa de ar (AM1,5) do espectro² solar e temperatura de operação de $25^\circ C$. Os dados elétricos são obtidos quando o painel fotovoltaico está sob condições padrões naturais exposto ao sol em ambiente aberto ou com auxílio de bancadas laboratoriais, em ambientes controlados de irradiância e temperatura ambiente. É impossível controlar a irradiância solar e temperatura ambiente em painéis expostos ao sol, por isso é necessário que os testes de caracterização elétrica sejam realizados em condições controladas em laboratório (VEDAT et al., 2017).

Desde 1957 com o lançamento do primeiro satélite artificial lançado na atmosfera terrestre, é necessário dispositivo para testes de eficiência em painéis fotovoltaicos. Juan et al. (1960) nos Estados Unidos, descreve o primeiro registro de patente de simulador solar para testes em veículos espaciais e dispositivos similares. Projetado para iluminar grande área, composto por módulos unitários de lâmpadas de arco carbônico que se aproxima da intensidade luminosa do sol, levando em conta: i) o espectro da luz; ii) a intensidade luminosa; e iii) a uniformidade da intensidade sobre área suficientemente larga.

A corrida para desenvolver sistema de iluminação para simuladores solar acompanhou o exponencial crescimento da tecnologia de dispositivos fotovoltaicos. Hall (1961) desenvolve sistema de iluminação com controle de intensidade luminosa, mantendo o espectro da luz uniforme e condizente com o sol na atmosfera terrestre. O aparato possui módulos unitários

¹Potência da radiação eletromagnética recebida do sol, medida na superfície ou atmosfera terrestre, por unidade de área (BOXWELL, 2012).

²Distribuição da radiação solar em função do comprimento de onda (QIANG, 2003).

de lâmpadas que usam conjunto de refletores parabólicos para concentrar e iluminar o plano alvo.

Nos Estados Unidos, [Miles et al. \(1963\)](#) constrói simulador solar em câmara fechada que controla as condições da radiação luminosa e temperatura. O dispositivo pode variar a intensidade da irradiância permanecendo estável por longos períodos de tempo. É aparato modular e fácil de ser expandido para iluminar áreas maiores. Possui colimador para deixar os raios que atingem o plano mais paralelos, sendo caracterizado por sua grande uniformidade de intensidade e distribuição do espectro sobre o dispositivo em teste.

Novas tecnologias de fontes de energia luminosas surgiram e beneficiaram a proximidade com o espectro solar, como desenvolvido por ([CHODAK, 1978](#)). [Zerlaut et al. \(1978\)](#) desenvolve sistema de iluminação com ajuste de inclinação para teste em dispositivos solares com variação de inclinação. No Japão, [Atsushi et al. \(1996\)](#) projeta simulador solar usando vários tipos de lâmpada para adequação do espectro. Com o desenvolvimento de novas técnicas de aferição das características elétricas do painéis fotovoltaicos, [Kruer \(1997\)](#) cria simulador solar de grande área com pulsos luminosos e alta uniformidade na distribuição da intensidade.

Com o avanço das lâmpadas LED, [Nogueira e Xavier \(2009\)](#) desenvolvem simulador solar com LEDs de diferente faixa espectral e controle de intensidade luminosa de forma precisa. No Brasil, [Vaz e Veissid \(2009\)](#) desenvolvem simulador solar, intitulado SOLSIM, multispectral para experimentos com espectros solares AM0, AM1, AM1.5 e AM2.

Diferentes modelos de refletores, estruturas e lentes auxiliaram o desenvolvimento dos simuladores solar. Após os dispositivos fotovoltaicos serem largamente usados em satélites espaciais, o aumento da eficiência energética e a diminuição dos custos viabilizaram seu uso em casas, comércios e indústrias. Como a atmosfera terrestre filtra parte de espectro do sol, os novos simuladores solar surgiram com filtros de espectro para adequação ao medido na superfície terrestre ([VEDAT et al., 2017](#)). As pesquisas mais recentes procuram melhorar ainda mais os simuladores solar desenvolvidos, levando a conformidade espectral extremamente próximo ao do sol ([ARTURAS et al., 2016](#)). Devido aos altos custos de produção, pesquisadores desenvolvem estes aparatos com o menor custo possível ([RAHMAT et al., 2016](#)).

Módulos fotovoltaicos são largamente usados como fonte de energia limpa e renovável. Entretanto a eficiência de conversão energética de módulo de junção-única à base de

silício é limitada teoricamente em torno de 33%, mas os avanços tecnológicos têm levado ao desenvolvimento de módulos de junção-múltipla perto do limite teórico. O aumento na eficiência energética vai ao encontro a crescente demanda de energia global, viabilizando a tecnologia (POLMAN et al., 2016).

A corrente gerada por células solares é influenciada diretamente pela intensidade luminosa e a tensão é proporcional a temperatura de operação. Quanto maior a intensidade luminosa, maior a corrente gerada, e quanto maior a temperatura, menor a tensão. Devido a baixa eficiência de conversão energética dos módulos fotovoltaicos, a maior parte da radiação solar é convertido em calor, o que aumenta a temperatura de operação. Temperaturas elevadas causam influência negativa nas características elétricas dos módulos fotovoltaicos, principalmente em módulos a base de silício, causando diminuição na potência em aproximadamente 0,3% a 0,5% por cada grau a mais na temperatura de operação (KIM et al., 2011).

A obtenção da máxima potência produzida por dispositivos fotovoltaicos são influenciados diretamente por três fatores: i) radiação solar; ii) temperatura de operação do módulo; e iii) carga conectada ao painel (VILLALVA et al., 2009). A fim de sempre operar no ponto de máxima potência, conversores CC-CC são usados para casar a impedância do módulo com a carga, controlando a carga vista pelo módulo fotovoltaico. A radiação solar sobre os painéis fotovoltaicos não podem ser controladas, pois dependem exclusivamente do sol. Entretanto a temperatura de operação é passível de manipulação, através de sistemas de resfriamento ou combinação de tecnologias, formando um conjunto híbrido (KRAUTER et al., 1999).

Em adição a influência das características intrínsecas de construção das células solares na conversão de energia elétrica, pesquisadores começaram a controlar a temperatura de operação destes dispositivos a fim de aumentar a eficiência de conversão energética (CHOW, 2010).

Além de manipular a temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos, queria-se também armazenar o calor em excesso. Os coletores fotovoltaicos-termais são dispositivos desenvolvidos para absorver e armazenar o calor dos painéis fotovoltaicos, gerando energia em forma de eletricidade e calor. A vantagem deste aparato é a redução na temperatura de operação do módulo fotovoltaico, ocasionado em maior geração de potência (ZONDAG, 2005).

Sistemas híbridos, fotovoltaico-termal, são usados para contornar o problema das altas temperaturas de operação, pois há ganho substancial na eficiência energética se comparado aos sistemas individuais (SOLANKI et al., 2009). Este modelo usa fluido refrigerante, normalmente ar ou água, para reduzir a temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos, transferindo o calor para o fluido, que pode ser usado como fonte de calor (JI et al., 2007).

Trond e Ole (1995) na Noruega, detalha modelos matemáticos e físicos para prever o ganho quantitativo de eficiência com a transferência de calor do painel fotovoltaico para o fluido refrigerante. É proposta aplicação doméstica para pré-aquecimento de sistema de água, combinando a produção de energia elétrica e térmica. De acordo com o modelo desenvolvido pode-se obter ganhos de conversão de energia elétrica e termal entre 60% e 80%.

Krauter et al. (1999) investiga o ganho de eficiência energética em painéis fotovoltaicos com sistema de resfriamento forçado usando ar e água, alcançando melhora de eficiência elétrica em 8% e 9%, respectivamente. Entretanto não foi levado em conta o balanço do gasto de energia consumida pelo sistema de resfriamento. Os testes foram realizados usando-se simulador solar desenvolvido com lâmpadas halógenas modelo Powerstar HQI-T2000W/D/I da Osram, que tem alta conformidade com espectro solar AM 1.5. Nota-se que o ganho de eficiência em sistemas com resfriamento a água são ligeiramente maior que o ar.

Em Taiwan, Huang et al. (2001) adapta painel fotovoltaico policristalino de silício e coletor solar comerciais para aquecimento de água e geração elétrica em conjunto híbrido para avaliar a performance energética do sistema. Dispositivos isolados produzem menos energia que conjunto híbrido. A técnica de acoplamento entre os dispositivos influencia bastante o rendimento.

Solanki et al. (2009) realiza experimento para comparar o ganho de eficiência energética de sistema híbrido fotovoltaico-termal usando ar e obtém ganho elétrico de aproximadamente 8,4%. Usa-se simulador solar com 16 lâmpadas halógenas.

Kim et al. (2011) desenvolve modelo matemático para prever a temperatura do módulo fotovoltaico quando resfriado com água na superfície frontal. Usa-se tubo perfurado, posicionado na superfície do módulo fotovoltaico, com furos espaçados igualmente para espalhar água por toda face superior e obter temperatura uniforme no módulo. Através

de experimento prático obtém-se diferença de apenas 4°C entre o valor da temperatura calculado e o valor medido, além de obter ganho no rendimento de conversão de energia elétrica de 11,6%, quando comparado com o painel fotovoltaico sem modificação. Aplicação de água lava e mantém limpa a superfície do módulo, ajudando na redução do custo de manutenção. O aumento de temperatura de água de saída pode ser usado como fonte de calor.

[Eveloy et al. \(2012\)](#) no Oriente Médio, cria aparato para acoplamento em painéis fotovoltaicos comerciais a fim de resfriá-los com água na superfície traseira. O dispositivo construído funciona como câmara de confinamento de água, que permite escoamento por toda superfície traseira do módulo. Os resultados mostram ganho de 22% na performance elétrica, que podem ser ainda maior com uso de rastreador solar, entretanto não viável financeiramente. Apesar de mostrar-se mais eficiente que o desenvolvido por ([KIM et al., 2011](#)), a estrutura é relativamente mais pesada e não tem o benefício de limpar a superfície frontal além de ter custos mais elevados.

[Irwan et al. \(2015\)](#) usa lâmpadas halógenas para simular condições solares e realizar teste de resfriamento do painel fotovoltaico aplicando água na superfície frontal. Varia-se a altura das lâmpadas em relação ao painel fotovoltaico a fim de variar a intensidade da irradiância. São realizados testes para vários valores de radiação solar e medido o ganho de eficiência energética para cada situação. Maiores intensidades proporcionam maior ganho de performance elétrica. Para $1016\text{W}/\text{m}^2$ obtém-se 14,14% de ganho.

[Hashim et al. \(2015\)](#) aplica água na superfície frontal do módulo fotovoltaico a $0,2\text{L}/\text{s}$ com auxílio de bomba d'água e trocador de calor, resultando em incremento de 9,8% na eficiência elétrica do módulo. A temperatura do painel cai de $76,8^{\circ}\text{C}$ para $70,1^{\circ}\text{C}$ com o trocador de calor.

Nos centros de pesquisa de pequeno porte, o alto custo de simuladores solar comerciais inviabiliza ensaios laboratoriais de performance energética em módulos fotovoltaicos. O acesso mais barato a esse tipo de tecnologia favorece a pesquisa e desenvolvimento nessa área de estudo. Pode-se agregar ainda mais valor ao projeto de bancada para testes de eficiência energética em painéis fotovoltaicos através da implementação de técnicas de resfriamento com água para melhorar a performance elétrica do painel fotovoltaico em teste, resultando em ganho no rendimento energético. Combinar simulador solar de baixo custo com sistema de refrigeração do painel fotovoltaico em único aparato enseja o desenvolvimento de aparelho completo para testes de eficiência energética em painéis fotovoltaicos.

O objetivo desse trabalho é desenvolver simulador solar com distribuição de intensidade uniforme e alta conformidade com espectro solar para testes de eficiência energética em painéis fotovoltaicos. Para isso é desenvolvido: i) protótipo de simulador solar com controle de intensidade luminosa; ii) otimização e desenvolvimento de simulador solar com alta uniformidade de irradiância sobre plano alvo em conformidade com espectro solar e estabilidade temporal; e iii) experimento aplicando várias vazões de água na superfície do módulo fotovoltaico a fim de mensurar o ganho quantitativo na performance elétrica.

O trabalho é apresentado da seguinte forma: o Capítulo 2 descreve as características do sol e elétricas de painéis fotovoltaicos, o Capítulo 3 apresenta os simuladores solar e seus atributos, o Capítulo 4 detalha a metodologia usada na realização deste trabalho, o Capítulo 5 expõe os resultados e análises realizadas e o Capítulo 6 é dedicado as conclusões.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Este capítulo destina-se a apresentação: i) das características da fonte energética solar; ii) dos fundamentos ligados aos dispositivos com base no efeito fotovoltaico; iii) da influência de agentes externos na eficiência energética de células fotovoltaica e; iv) das técnicas de melhoramento da eficiência energética em sistema fotovoltaicos.

2.1 Características do Sol

O aproveitamento da energia solar, na forma térmica e elétrica, é discussão crescente em pesquisas pela maioria dos países. Sabe-se que o recurso energético solar é inesgotável, haja vista a vida útil do sol, cerca de 5 bilhões de anos. É relevante, então, estudar o sol e como extrair energia dessa fonte (KIRK, 2014).

A radiação eletromagnética emitida do sol atinge a atmosfera terrestre com faixa de comprimento de onda no intervalo ultravioleta até o infravermelho, estando a maior parte dessa energia presente na faixa da luz visível (ARTURAS et al., 2016).

A terra descreve trajetória elíptica em torno do sol na qual resulta em mudança no valor de irradiância que atinge a atmosfera extraterrestre, conforme Figura 2.1. A variação de irradiância é proveniente da alteração da excentricidade entre o sol e terra. De acordo com WRC (*World Radiation Center*), constante solar I_k é definida com sendo o valor da irradiância que atinge a terra sobre superfície perpendicular aos raios solares na distância média entre o Sol e a Terra, sendo valor aproximadamente $1361W/m^2$ (JAGER et al., 2014).

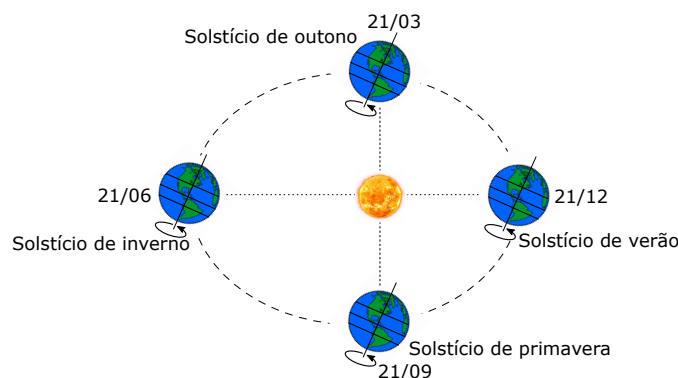


Figura 2.1 - Estações do ano no hemisfério sul, de acordo com a órbita da Terra em torno do Sol.

A Figura 2.2, adaptada de (PINTO; GALDINHO, 2014), ilustra a irradiância extraterrestre eficaz $I_{O,ef}$ ao longo do ano para o hemisfério sul, de acordo com a trajetória descrita pela Terra em torno do Sol. Observa-se que $I_{O,ef}$ tem valor mínimo de aproximadamente $1322W/m^2$ e máximo de $1412W/m^2$ (PINTO; GALDINHO, 2014).

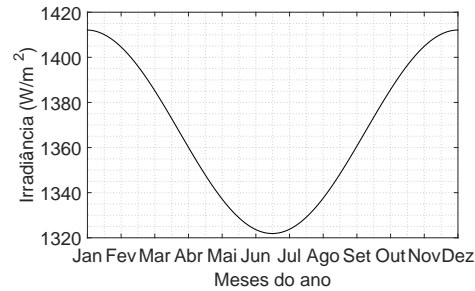


Figura 2.2 - Variação da Irradiância eficaz ($I_{O,ef}$) ao longo do ano.

Segundo Rodrigues (2008), a variação da geometria descrita pelo movimento de translação entre Terra e Sol são representadas na Figura 2.3, adaptada de (PINTO; GALDINHO, 2014), através da relação entre ângulos e eixos, como descrito:

- **Ângulo Zenital (θ_z):** ângulo formado entre o eixo vertical ao horizonte do observador (Zênite) e raios emitidos do Sol.
- **Elevação do Sol (α):** ângulo entre a projeção no horizonte do observador formado pelos raios solares.
- **Ângulo Azimutal (γ_s):** Ângulo formado entre o eixo norte-sul e a projeção dos raios solares no plano horizonte do observador.

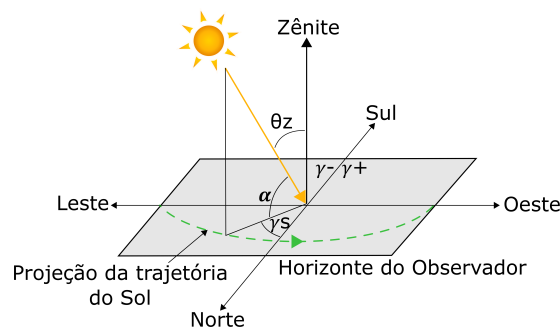


Figura 2.3 - Representação dos ângulos zenital, elevação solar e azimutal.

A radiação solar sofre modificações na intensidade, ângulo e distribuição do espectro após atravessar a camada atmosférica da terra. Parte da radiação solar é refletida para o espaço e espalhada pela atmosfera, alterando principalmente a intensidade da irradiância e o ângulo de incidência na superfície terrestre. Outra parte é absorvida por gases com bandas de absorção específicas, como o Ozônio (O_3) que retém o espectro na faixa ultravioleta, vapor d'água (H_2O) e o dióxido de carbono (CO_2) que absorvem na faixa do espectro infravermelho (PINTO; GALDINHO, 2014).

A espessura da camada atmosférica, também denominada como Massa de Ar (AM), o ângulo zenital, a irradiância eficaz e as condições meteorológicas influenciam bastante as características de intensidade e distribuição do espectro. A Massa de Ar pode ser interpretada, também, como espessura da camada atmosférica que a radiação solar direta atravessa até incidir sobre superfície terrestre. Pode-se calcular a Massa de Ar levando em conta o ângulo zenital entre 0° e 70° , como (2.1) (ABREU, 2006).

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad (2.1)$$

É padronizado AM1 como Massa de Ar para ângulo zenital igual a 0° , ou seja, o Sol encontra-se no zênite. Denomina-se AM2 quando o ângulo é 60° e AM0 é Massa de Ar no topo da atmosfera terrestre, quando não há influência da atmosfera. Corpo negro com temperatura de superfície igual a $5800k$ tem distribuição espectral aproximadamente igual ao espectro AM0 que chega no topo da atmosfera terrestre. AM1,5 é espectro de referência para superfície inclinada de 37° , correspondente a soma da radiação direta e difusa igual a $1000W/m^2$ (EBERHARDT, 2005). A Figura 2.4 representa a distribuição espectral para corpo negro $5800^\circ k$, AM0 e AM1,5.

2.2 Dispositivos Fotovoltaicos

O efeito fotovoltaico, primeiramente observado pelo cientista francês Alexandre-Edmond Becquerel em 1839, foi descoberto ao verificar diferença de potencial elétrico em eletrodos imersos em solução ácida quando o conjunto era iluminado (KIRK, 2014).

Em 1950 foi desenvolvido nos Laboratórios Bell o primeiro dispositivo fotovoltaico comercial capaz de gerar energia elétrica quando material sólido semicondutor era exposto ao sol, com potência de $5mW$ para área de $2cm^2$ e 6% de eficiência na conversão de energia luminosa em elétrica. Atualmente painéis fotovoltaicos comerciais a base de silício têm

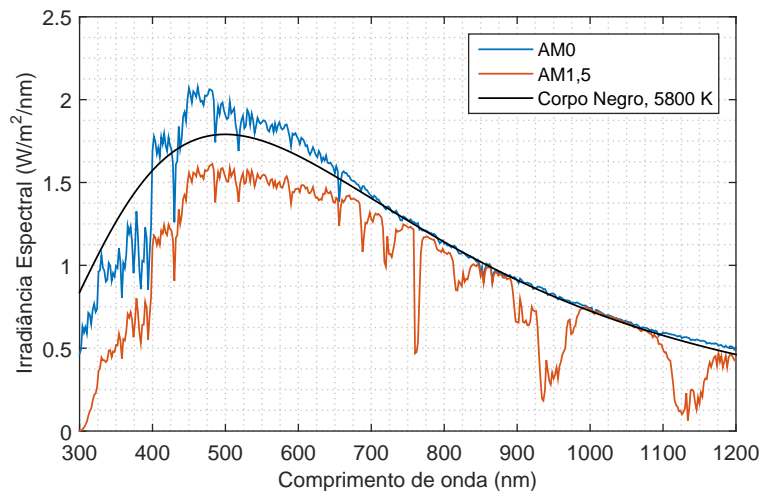


Figura 2.4 - Distribuição espectral da irradiância para AM0, AM1,5 e corpo negro com temperatura de 5800 k.

avançado rumo ao limite de eficiência teórico próximo a 30%, atingindo mais de 20% de eficiência, com potência até 300W e área de aproximadamente $2m^2$ (PINTO; GALDINHO, 2014).

Painéis fotovoltaicos a base de silício monocristalino e policristalino dominam 90% do mercado atual devido a facilidade de fabricação e custos mais baixos. O princípio de funcionamento destes dispositivos é baseado nas premissas dos semicondutores, que são materiais caracterizados por comportar-se ora como isolante e ora como condutor. O termo condutor refere-se a elementos que suporta grande quantidade de fluxo de elétrons quando aplicado a diferença de potencial. Isolantes são elementos que oferecem grande resistência ao fluxo de elétrons quando aplicado diferença de potencial (NOZIK et al., 2014).

Em estruturas atômicas isoladas há níveis de energia discretos entre camadas eletrônicas ou órbitas. Elementos atômicos apresentam níveis de energia específico para cada órbita eletrônica. Quanto mais próximo o elétron estiver do núcleo menor será o estado de energia e quanto mais longe do núcleo maior será o estado de energia, sendo que o elétron fora da estrutura atômica tem maior nível de energia que os demais. Entre as órbitas dos elétrons estão os intervalos de energia, denominados *Gap*, onde nenhum elétron pode aparecer. Para que um elétron saia da sua camada interna para camada externa é necessário que haja fornecimento de energia ao elétron e liberação de energia para que ele volte a órbita interna (JAGER et al., 2014).

A energia associada a cada elétron é mensurada em *elétron-volts* (eV). Para que elétrons

na banda de valência salte para banda de condução é necessário fornecimento de energia. A Figura 2.5, adaptada de (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004), representa estrutura de separação das bandas de energia para materiais isolantes, semicondutores e condutores. Tipicamente o *gap* de energia para materiais isolantes são 5eV, dificultando bastante que os elétrons entre na banda de condução (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004).

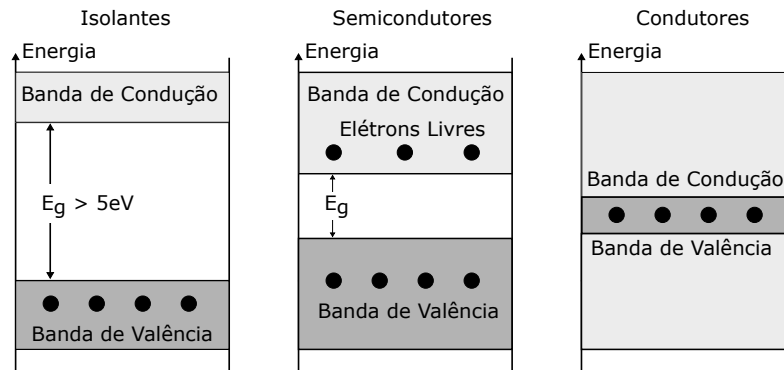


Figura 2.5 - Bandas de valência e condução de isolantes, semicondutores e condutores.

Para temperatura de 0K o semiconductor sempre trabalha como isolante. Entretanto, com temperaturas maiores há despreendimento de elétrons da banda de valência para a banda de condução, ou seja, sempre há elétrons livres para semicondutores em temperatura ambiente. A energia térmica, portanto, favorece criação de pares elétron-lacuna. Nos dispositivos fotocondutivos a geração de portadores dá-se pela incidência de fótons (E_f) com energia superior a E_g do *gap*, gerando pares elétron-lacuna, como representa a Figura 2.6 (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004).

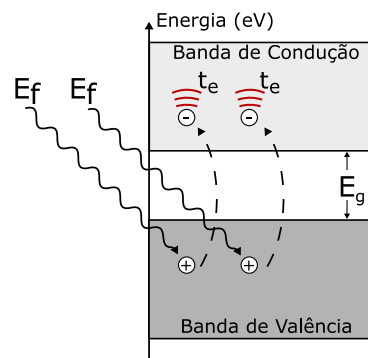


Figura 2.6 - Efeito fotocondutivo: geração de pares elétron-lacuna pela incidência de fótons em material semiconductor.

A energia de um fóton E_f é associada a sua frequência, como representa (2.2).

$$E_f = h \cdot f \quad (2.2)$$

Onde h é constante de Plank e f é frequência da luz. Se a energia E_f dos fótons for superior a E_g gera dissipação térmica t_e , denominada termalização, no material (JAGER et al., 2014).

Os pares de elétron-lacunas gerados pela incidência de luz aumentam a condutividade elétrica do material, sendo denominado efeito fotocondutivo. Os átomos de silício são tetravalente, ou seja, possuem 4 elétrons na camada de valência fazendo ligação covalente com átomos vizinhos de silício, resultando em 8 elétrons na camada de valência e formando rede cristalina. Para tirar proveito da tensão e corrente deste material é necessário separar os pares elétron-lacunas. Para realizar tal tarefa adiciona-se impurezas cuidadosamente dosadas ao material de silício com intuito de adicionar elétron à camada de valência, inserindo átomo pentavalente, ou criar lacuna, inserindo átomo trivalente, formando material tipo n e p , respectivamente. O contato destes materiais formam a junção pn , onde pode-se observar a região de ausência de portadores, chamada zona de depleção, como observado na Figura 2.7 (PINTO; GALDINHO, 2014).

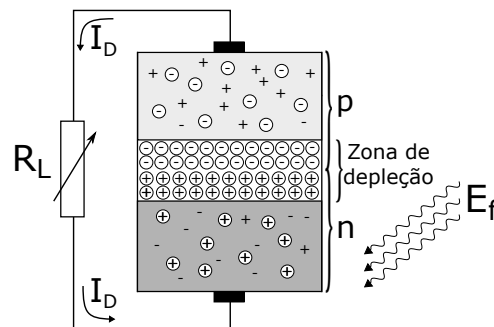


Figura 2.7 - Junção pn de materiais semicondutores, efeito fotovoltaico na incidência de fótons e geração de corrente elétrica dissipada na carga R_L conectada aos terminais do semiconductor.

A Figura 2.7 representa materiais semicondutores com junção pn expostos a luz, recebendo energia de fótons $E_f \geq E_g$, criando de pares elétron-lacuna. Geralmente alguns pares irão recombinar e voltar ao estado de energia inicial, liberando energia em forma de fótons. Para que haja proveito da energia em forma elétrica é necessário que os elétrons per-

maneçam separados das lacunas. Isto é possível graças a junção pn que permite elétrons fluir sempre no sentido de um eletrodo para outro, ou seja, sempre da junção n para junção p , sendo aproveitado por circuito eletroeletrônico intermediário (R_L) e posteriormente recombinando-se com as lacunas do junção p (MARKVART; CASTANER, 2012).

A Figura 2.8, adaptada de (PINTO; GALDINHO, 2014), representa a estrutura de dispositivos fotovoltaicos, onde: i) ilustra os eletrodos negativos que irão receber os elétrons fotogerados; ii) é camada antirreflexiva para maximizar o aproveitamento de energia recebida da luz evitando dispersão; iii) é camada do tipo n ; iv) é zona de depleção resultante da junção pn ; v) é camada do tipo p ; vi) contato dos eletrodos positivos; vii) são elétrons e viii) são lacunas. A carga R_L aproveita o fluxo de elétrons que fluem pelo circuito elétrico (PINTO; GALDINHO, 2014).

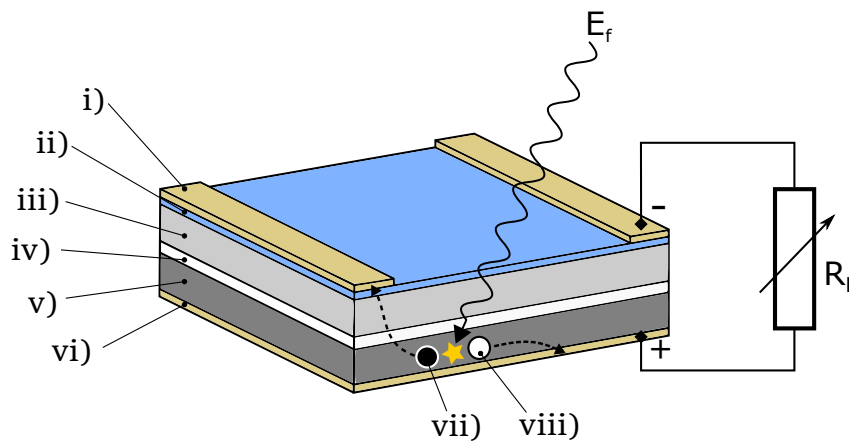


Figura 2.8 - Princípio de funcionamento de painel fotovoltaico.

A eficiência de conversão da luz solar em eletricidade depende do material usado na fabricação das camadas de semicondutores. Células fotovoltaicas são mais ou menos sensíveis a determinadas faixas de comprimento de onda conforme tecnologia do material. Sensibilidade espectral de células fotovoltaicas define intervalo de comprimento de onda na qual o dispositivo trabalha com maior eficiência. A Figura 2.9 representa a faixa de sensibilidade para células de silício monocristalino, silício amorfo e cobre-índio-selênio (CIS). Enquanto células de silício monocristalinas aproveitam energia com mais eficácia de comprimento de onda próximo a 950 nm, células de película fina, por exemplo CIS, aproveitam com mais eficiência a faixa de luz visível. Células de silício amorfo são mais sensíveis a faixa do ultravioleta, resultando em menor irradiância disponível para efeito fotovoltaico. A maior parcela da energia solar encontra-se na faixa de luz visível, 400 nm a 800 nm, tornando

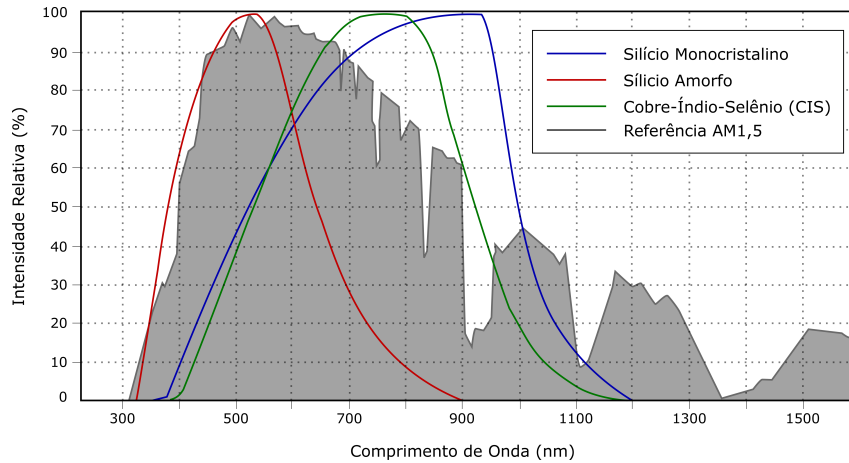


Figura 2.9 - Sensibilidade espectral para diferentes tecnologias de células solares.

células CIS e silício monocristalino mais eficientes na conversão de energia elétrica, pois são sensíveis a maior faixa do comprimento de onda (VICENTE et al., 2015).

Há vários tipos de modelos matemáticos e elétricos que descrevem o comportamento de painel fotovoltaico (KJÆR, 2005). Destaca-se o modelo elétrico que usa fonte de corrente, diodo, resistor em série e outro em paralelo, como ilustra a Figura 2.10 (VILLALVA et al., 2009).

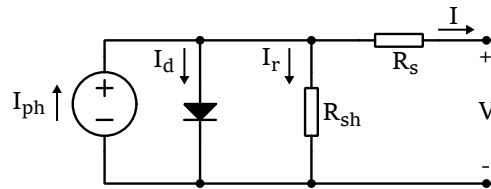


Figura 2.10 - Circuito elétrico equivalente do painel fotovoltaico usando um diodo.

Aplicando-se lei de Kirchhoff no circuito, obtêm-se a equação da corrente da carga (2.3).

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad (2.3)$$

Na qual I_{ph} é a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico, I_d é a corrente no diodo e I_r é a corrente no resistor R_{sh} . A corrente I_{ph} é dependente da intensidade de radiação solar e temperatura de operação, como representa (2.4).

$$I_{ph} = [I_{ph,sc} + Ki(T - T_{sc})] \frac{G}{G_{sc}} \quad (2.4)$$

Na qual $I_{ph,sc}$ é a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico sob as condições padrões, Ki é coeficiente de temperatura de corrente, T_{sc} é temperatura de operação nas condições padrão $25^\circ C$, G_{sc} é a irradiância nas condições padrão $1000W/m^2$. A fim de realizar testes em painéis fotovoltaicos, define-se as condições padrões de teste (STC), correspondente a irradiância de $1000W/m^2$, temperatura de operação de $25^\circ C$ e massa de ar AM1,5 do espectro. A STC é necessária a fim de garantir que toda repetição para se obter parâmetros do painel fotovoltaico sejam sempre iguais (KENNY et al., 2013).

A corrente I_d do diodo tem características não lineares e depende de alguns fatores, como corrente de saturação do diodo I_0 , a constante de Boltzmann k , a carga do elétron q , fator de idealidade a_1 do diodo, que é número adimensional e pode ser obtido experimentalmente, e o número de células em série n_s , como em (2.5).

$$I_d = I_0 \left[e \left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n_s \cdot k \cdot T \cdot a_1} \right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

O cálculo da corrente de saturação considera o coeficiente de temperatura de tensão K_v , o coeficiente de temperatura de corrente K_i , a corrente de curto circuito I_{sc} sobre condições de teste padrão $I_{S,sc}$ e a tensão de circuito aberto nas condições de teste padrão $V_{OC,sc}$, como (2.6).

$$I_0 = \frac{I_{S,sc} + ki(T - T_{sc})}{e \left(\frac{q(V_{OC,sc} + K_v(T - T_{sc}))}{n_s \cdot k \cdot T} \right) - 1} \quad (2.6)$$

A corrente que passa pelo resistor em paralelo é descrita em (2.7).

$$I_r = \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

Há outros dois parâmetros importantes a serem calculados: os valores das resistências R_{sh} e R_s . Esses valores levam a equivalência entre o ponto de máxima potência calculado e

experimental $V_{mp} \times I_{mp}$. Um algoritmo com várias iterações aumenta o valor de R_s para estimar os valores de $I_{ph,sc}$, I_{ph} e R_{sh} de acordo com (2.4), (2.8) e (2.9), onde V_{MP} , I_{MP} e P_{MP} são tensão, corrente e potência no ponto de máxima potência.

$$I_{ph,sc} = \frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} I_{sc,sc} \quad (2.8)$$

$$R_{sh} = \frac{V_{MP}(V_{MP} + I_{MP} \cdot R_s)}{V_{MP} \cdot I_{ph} - I_d - P_{MP}} \quad (2.9)$$

Com todos parâmetros calculados do modelo é possível estimar os valores de tensão e corrente que o painel fotovoltaico fornece. A curva $I \times V$ é característica do sistema e depende dos parâmetros calculados anteriormente, da irradiância incidente no painel fotovoltaico e temperatura de operação (EBERHARDT, 2005).

A Figura 2.11 representa curva característica, corrente elétrica em função da tensão de painel fotovoltaico modelo SV140D12 de 140Wp da Tecnometal, obtida pelo modelo do circuito a um diodo, quando submetido a condições de teste padrão. É ilustrado pontos em destaque da corrente de curto circuito I_{SC} , tensão de circuito aberto V_{OC} , ponto de máxima potência P_{MP} , tensão de máxima potência V_{MP} e corrente de máxima potência I_{MP} .

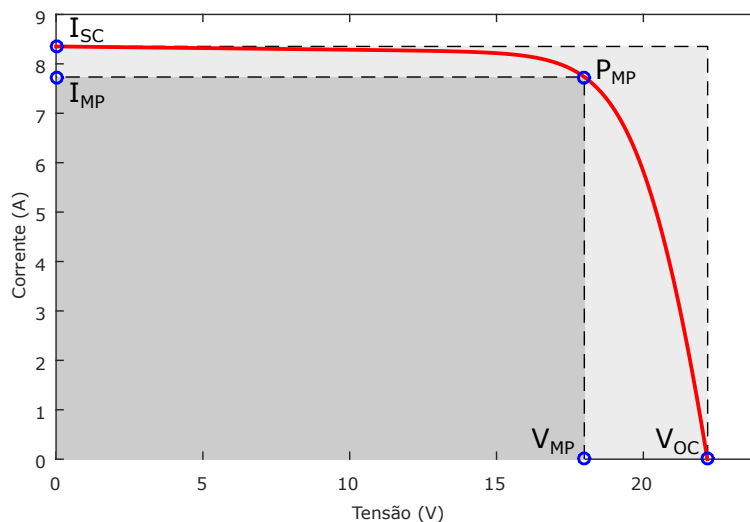


Figura 2.11 - Curva característica $I \times V$ de painel fotovoltaico em condições de teste padrão.

A corrente de curto circuito I_{SC} é a máxima corrente obtida quando os terminais do painel fotovoltaico são curto-circuitados, obtendo-se diferença de potência igual a zero entre o polos positivo e negativo. I_{SC} depende de fatores como: intensidade da irradiância solar e distribuição espectral da luz incidente sobre o dispositivo fotovoltaico.

Tensão de circuito aberto V_{OC} é máxima tensão produzida por painel fotovoltaico quando não há carga conectada aos terminais do dispositivo. O ponto de máxima potência P_{MP} , ilustrado na Figura 2.11, representa a máxima potência produzida pelo módulo fotovoltaico.

O Fator de Forma, FF , é ilustrado na Figura 2.11 como razão das áreas formadas pela tensão de máxima potência e corrente de máxima potência pela tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito, expressa em (2.10) (KJÆR, 2005).

$$FF = \frac{V_{MP} \cdot I_{MP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (2.10)$$

A resistência série e paralelo, R_s e R_{sh} influenciam a deformação do fator de forma em relação ao retângulo formado pela tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito (PINTO; GALDINHO, 2014).

A razão entre potência solar incidente sobre dispositivo fotovoltaico e potência elétrica produzida define eficiência energética dos painéis fotovoltaicos, sendo o processo de conversão de energia solar diretamente em energia elétrica, definido por (2.11) (HASHIM et al., 2015).

$$\eta = \frac{P_{MP}}{A \cdot G} \cdot 100\% \quad (2.11)$$

Na qual P_{MP} (W) é potência produzida no ponto de máxima potência pelo dispositivo fotovoltaico de área A (m²), quando incide intensidade de irradiância G (W/m²).

A curva da potência em função da tensão $P \times V$, representada na Figura 2.12, pode ser obtida a partir da curva $I \times V$, onde o ponto de máxima potência é calculado quando a derivada da curva é zero (NOZIK et al., 2014).

Alguns fatores externos afetam as características elétricas dos dispositivos fotovoltaicos: radiação solar, sombreamento no módulo, temperatura de operação do painel e carga

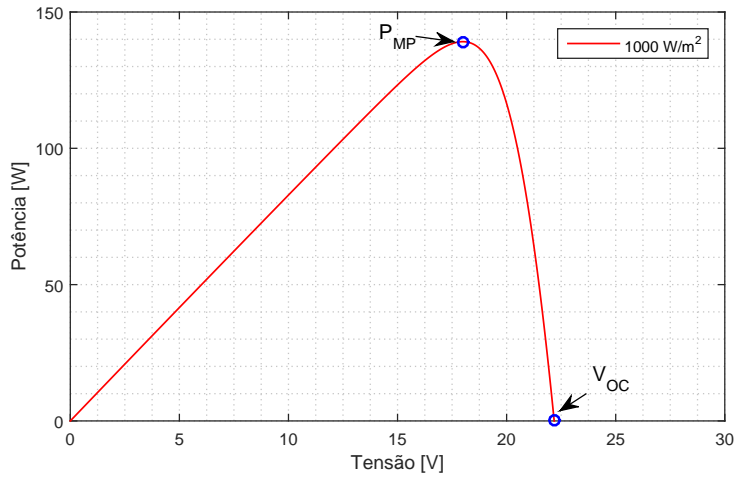


Figura 2.12 - Curva $P \times V$ de dispositivo fotovoltaico.

conectada (VILLALVA et al., 2009). A fim de operar sempre no ponto de máxima potência, conversores CC-CC são usados para controlar a impedância da carga vista pela panel.

A corrente de curto circuito I_{SC} é linearmente proporcional a intensidade de radiação solar e a temperatura de operação. O desprendimento de fótons é diretamente proporcional a luminosidade incidente sobre módulo fotovoltaico, assim como a temperatura, porém de forma menos intensa. Devido a baixa eficiência de conversão da radiação solar em energia elétrica, a maior parte da radiação absorvida é convertida em calor e o restante em eletricidade, porém quanto maior a temperatura de operação, maior será a corrente de curto circuito. A Figura 2.13 ilustra a influência da irradiância na corrente de curto circuito da curva característica $I \times V$ do painel (KIM et al., 2011).

A tensão de circuito aberto é descrita por (2.12).

$$V_{OC} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{FG}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.12)$$

Na qual V_{OC} depende da temperatura, corrente elétrica fotogerada I_{FG} e corrente de saturação I_0 . A Figura 2.14 ilustra a influência da temperatura de operação do painel na tensão de circuito aberto para irradiância constante (SOLANKI et al., 2009).

Observa-se que o aumento da temperatura de operação do módulo reduz a potência gerada, pois mesmo com o pequeno aumento da corrente de curto circuito com o aumento da

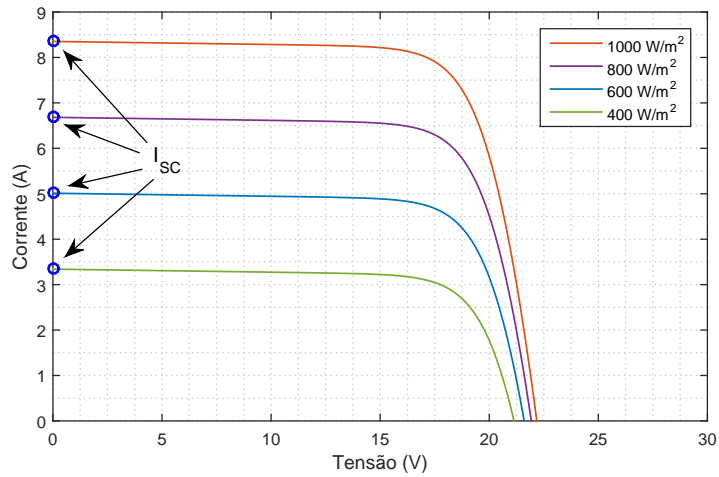


Figura 2.13 - Influência da irradiância na corrente de curto circuito.

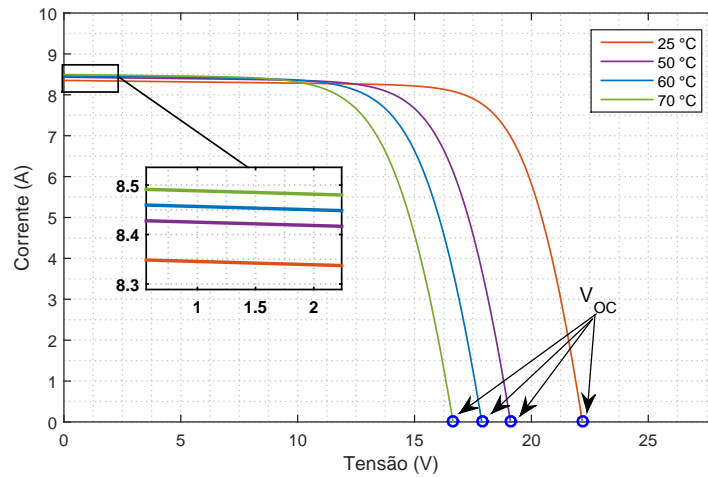


Figura 2.14 - Influência da temperatura na corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto.

temperatura há grande queda na tensão de circuito aberto, o que diminui drasticamente a potência, como pode ser visto na Figura 2.15 (JOSHI et al., 2009).

Calor excessivo causa influência negativa na conversão de energia em dispositivos fotovoltaicos, pois para o decréscimo de aproximadamente 0,4 a 0,5% na eficiência de conversão para aumento de cada grau Celsius (KIM et al., 2011).

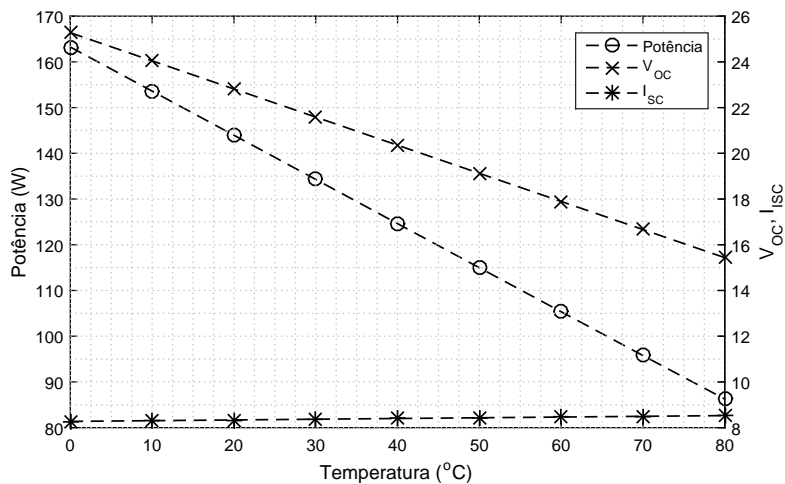


Figura 2.15 - Variação da V_{oc} , I_{sc} e potência com o aumento da temperatura.

2.3 Técnicas de melhoramento da eficiência energética de painéis fotovoltaicos

Em países com alto índice de radiação solar, a temperatura de operação dos módulos pode atingir $70^{\circ}C$, o que prejudica a produção energética fotovoltaica. A fim de contornar o problema das altas temperaturas, vários métodos de resfriamento dos painéis são propostos (CHOW, 2010). Sistemas de resfriamento usando ar mostra-se mais eficiente pra temperatura ambiente abaixo de $20^{\circ}C$ (TIWARI; SODHA, 2006). Para temperatura mais intensas, métodos de resfriamento usando água mostram-se mais adequados (ZONDAG, 2005). Sistemas de arrefecimento de dispositivos fotovoltaicos produzem grande melhoria na conversão energética, o que encoraja a produção de energia através desta fonte.

Sistemas fotovoltaico/termal (FV/T) usam material refrigerante, normalmente ar ou água, a fim de transferir o calor dos painéis para o fluido. Vários estudos contemplam aplicação de água na superfície superior do módulo com propósito de resfriá-lo. Além disso o método funciona como sistema auto-limpante da superfície, removendo partículas de poeira que acometem a conversão energética, facilitando a limpeza sem auxílio de funcionários (TIWARI et al., 2006).

O custo da água usada pode ser virtualmente nulo, haja vista que indústrias, principalmente no ramo alimentício, devem tratar adequadamente a água de resíduo antes do descarte, de acordo com as regulamentações locais. Em outros casos é possível armazenar água da chuva, quando disponível, e reutilizá-las no sistema de resfriamento (EVELOY et

al., 2012).

Sistema de arrefecimento de painel fotovoltaico usando água consiste na distribuição do fluido, com vazão de entrada V_{in} , sobre a superfície frontal do dispositivo a fim de retirar a máxima quantidade de calor do módulo, como ilustra a Figura 2.16. A principal fonte de energia durante as horas de luz são a radiação solar direta e difusa, G_d e G_e , respectivamente. Parte da radiação é convertida em energia elétrica e o restante em calor. O balanço de energia composto pelo sistema de resfriamento é descrito na Figura 2.16, formado pela camada de silício que represente o módulo fotovoltaico, camada de vidro que protege o módulo e camada de água sobre o vidro que retira o calor do módulo (KIM et al., 2011).

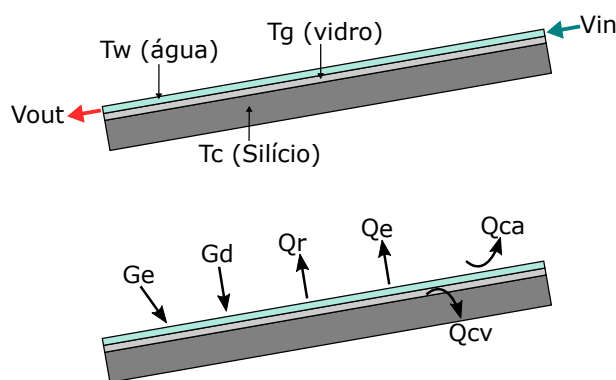


Figura 2.16 - Balanço energético da água sobre painel fotovoltaico.

Vazão de água V_{in} é espalhada na superfície do módulo com auxílio de perfil perfurado espaçado uniformemente. O balanço de energia do sistema é determinado pela entrada G_d e G_e menos a saída por reflexão Q_r , evaporação Q_e , convecção da água com o ar Q_{ca} e convecção da água com o vidro Q_{cv} . O balanço de energia influencia na temperatura da água, do vidro e do módulo fotovoltaico. Após absorção de energia calorífica do módulo há a vazão de saída V_{out} . A água absorve parte da energia diretamente da radiação solar e parte da energia da superfície do vidro através de convecção. O vidro absorve energia do painel fotovoltaico por condução.

Testes de arrefecimento de painel fotovoltaico usando água indicam ganho de eficiência energética de aproximadamente 10%, como (IRWAN et al., 2015). O percentual no ganho de eficiência é calculado com base em (2.11), descrito em (2.13), onde η_m representa a eficiência do módulo com sistema de arrefecimento (modificado) e η é eficiência do módulo de referência, sem modificações (SHARMA et al., 2015).

$$\alpha = \frac{\eta_m - \eta}{\eta} \quad (2.13)$$

2.4 Considerações

Dispositivos fotovoltaicos são influenciados principalmente pela radiação solar e temperatura. É possível descrever algoritmo computacional usando a aproximação elétrica equivalente do painel fotovoltaico para análise de simulação. Técnicas de resfriamento, usando camada de água sobre a superfície do painel fotovoltaico, podem ser usadas a fim de proporcionar ganho na potência elétrica. O balanço energético deve ser observado com intuito de avaliar o rendimento do conjunto.

CAPÍTULO 3

SIMULADOR SOLAR

Neste Capítulo é apresentado sistemas de classificação de simulador solar e suas características construtivas.

3.1 Classificação de simuladores solar

A *International Electrotechnical Commission* (IEC), ou Comissão Internacional Eletrotécnica, é organização internacional sem fins lucrativos, com representantes em mais de 60 países, não governamental, cujo intuito é padronizar a caracterização de todos dispositivos elétricos, eletrônicos e tecnologias afins (ALMEIDA, 2012).

A norma IEC 904-9 estabelece os padrões para equipamentos de simulação solar, ou seja, define as regras de classificação e funcionamento para sistemas de iluminação capazes de reproduzir condições de intensidade e radiação espectral aproximadas ao sol. Estes equipamentos são usados amplamente em testes de dispositivos sensíveis a radiação solar, como: células fotovoltaicas e aquecedores solar (EBERHARDT, 2005).

Simuladores solar foram inicialmente usados, em laboratórios, para testes experimentais em *rovers*, satélites e carros espaciais que eram alimentados por energia solar fotovoltaica, que converte radiação solar diretamente em energia elétrica. A conformidade da radiação espectral das lâmpadas eram semelhantes ao do sol fora da atmosfera da terra. Após avanço da tecnologia e uso em larga escala no ambiente terrestre, vários testes passaram e ser realizados com simuladores solar que usavam conformidade espectral de radiação das lâmpadas próximo ao medido no nível do mar (VEDAT et al., 2017).

Existem dois tipos de simuladores solar: iluminação contínua no tempo e flash de luz. Cada tipo possui aplicações diferentes, assim como características construtivas. Simuladores solar com iluminação constante são usados principalmente em testes no qual o tempo influencia na resposta do sistema. Simuladores solar com flash de luz ou pulsada são usados em experimentos que não dependem do tempo, como a obtenção da curva característica da célula fotovoltaica (MOCELIN et al., 2008).

Para todos tipos de simuladores solar deve-se levar em conta: i) a superfície da célula fotovoltaica em teste deve ser totalmente iluminada, ii) a irradiância deve ser mais uniforme possível e iii) estabilidade temporal. Segundo as normas da IEC, simulador solar

pode ser classificado de acordo com sua performance como A, B e C, para cada categoria de conformidade da distribuição espectral, não-uniformidade da intensidade e estabilidade temporal. Simulador solar é classificado conforme o pior índice obtido na comparação das categorias como representa a Tabela 3.1 (NOVICKOVAS et al., 2015).

Tabela 3.1 - Classificação de simulador solar de acordo com normas IEC.

Característica	Classe A	Classe B	Classe C
Equivalência com o espectro padrão (S_p)	0,75-1,25	0,6-1,4	0,4-2,0
Não-uniformidade (S_u)	$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 10\%$
Estabilidade temporal (S_e)	$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 10\%$

3.1.1 Não-Uniformidade da Irradiância

O plano alvo, módulo fotovoltaico, deve ser iluminado uniformemente em todos pontos da superfície, sendo que a intensidade de irradiância sobre a área medida demanda maior proximidade possível entre o ponto de maior irradiância e o de menor. O índice de não-uniformidade (S_u) é calculado de acordo com (3.1).

$$S_u = \frac{G_{max} - G_{min}}{G_{max} + G_{min}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

onde, G_{max} e G_{min} representam a intensidade máxima e mínima da irradiância medida.

A intensidade da irradiância é medida em potência por unidade de área (W/m^2). Para maior precisão na medição do índice S_u deve-se dividir a superfície alvo em porções de área tão pequenas que seja suave a transição dos pontos interpolados. A classificação deste parâmetro dá-se de acordo com a Tabela 3.1 (MENG et al., 2011).

3.1.2 Estabilidade Temporal da Irradiância

Para simuladores solar com iluminação contínua no tempo faz-se necessário o cálculo do índice de estabilidade temporal da irradiância (S_e), que é a variação percentual da irradiância em intervalo de tempo predefinido. É levado em conta a aquisição dos dados com intervalo de 1 minuto durante 60 minutos para que se calcule o índice S_e , definido em (3.2).

$$S_e = \frac{G_{max} - G_{min}}{G_{max} + G_{min}} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

onde, G_{max} representa a intensidade máxima da irradiância medida no tempo e G_{min} representa a intensidade mínima. A classificação deste parâmetro dá-se de acordo com a Tabela 3.1 (VEDAT et al., 2017).

3.1.3 Distribuição Espectral

O sol radia intensidade de energia específica para cada faixa do comprimento de onda. A intensidade do espectro medida no topo da atmosfera terrestre é definida como AM0, pois ela não sofre influência da camada de ar da atmosfera que envolve a terra. Entretanto, determinadas faixas do espectro são absorvidas ou refletidas após passarem pela atmosfera terrestre. Esta influência depende da espessura da massa de ar em cada ponto da atmosfera. Dá-se a necessidade, então, da criação de padrão para caracterização do espectro solar na superfície da terra (BETANCUR et al., 2016).

A distribuição da intensidade do espectro solar AM1,5 é adotada como referência global que atinge a superfície terrestre. A distribuição do espectro AM0 e AM1,5 é representada na Figura 3.1 (KENNY; DAVIDSON, 1994).

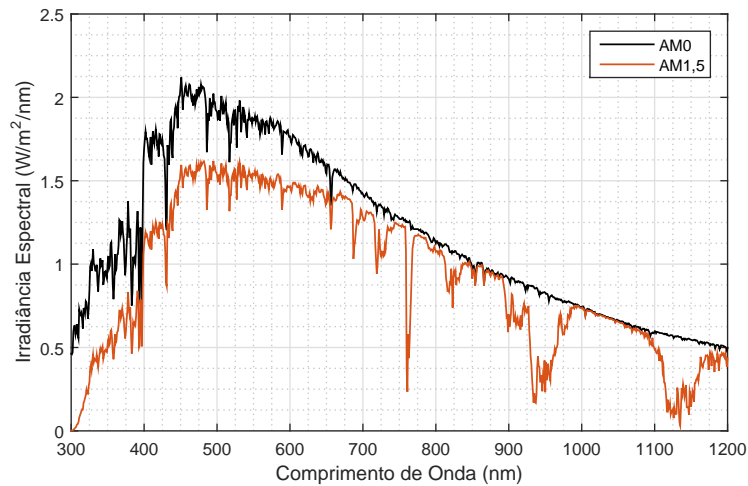


Figura 3.1 - Intensidade do espectro solar para massa de ar AM1,5.

A fonte de iluminação deve possuir conformidade com o espectro de referência AM1,5

como reapresenta a Tabela 3.2. O nível de conformidade da fonte luminosa com o espectro de referência é parâmetro importante para medir a qualidade do simulador solar, sendo um dos três parâmetros de classificação. Para medição do fator de conformidade da distribuição espectral (S_p) é levado em conta o intervalo de comprimento de onda de 400nm a 1100nm divididos em 6 regiões, sendo que cada uma apresenta porcentagem particular (S_a) referente a razão entre a integral da irradiância do intervalo e a irradiância total, calculada em (3.3). O fator S_p é definido como a razão da porcentagem de irradiância de cada intervalo pela porcentagem requerida para a mesma faixa, Tabela 3.2, calculada em (3.4) (ABHAY et al., 2014) .

$$S_a = \frac{\int_{\Delta\lambda} G d\lambda}{\int_{400} G d\lambda} \quad (3.3)$$

$$S_p = \frac{S_a}{\text{Porcentagem de referência}} \quad (3.4)$$

A variável G , em (3.3), representa a intensidade da irradiância, λ representa o comprimento de onda e $\Delta\lambda$ representa o intervalo de comprimento de onda para cada faixa de referência.

Tabela 3.2 - Referência para comparação do espectro de acordo com norma IEC 904-3 para AM1,5.

Intervalo de comprimento de onda (nm)	Porcentagem de referência da irradiância total (%)
400 a 500	18,5
500 a 600	20,1
600 a 700	18,3
700 a 800	14,8
800 a 900	12,2
900 a 1100	16,1

O fator S_p é calculado para cada faixa de comprimento de onda especificado na Tabela 3.2 e classificado de acordo com a Tabela 3.1. O simulador solar é classificado com a faixa de comprimento de onda que apresenta menor rendimento (NOVICKOVAS et al., 2015).

3.2 Fontes luminosas

Lâmpadas são usadas como fonte luminosa a fim de simular as características de intensidade e distribuição espectral do sol. Tecnologias distintas produzem características singulares, principalmente da distribuição espectral. Simuladores solar podem dispor de conjunto de lâmpadas com tecnologias diferentes com intenção de alcançar maior conformidade com o espectro solar, calculado em (3.4) (VEDAT et al., 2017).

Deve-se levar em conta alguns fatores para escolha da lâmpada que melhor atende as necessidades do projeto de simulador solar, como: intensidade, conformidade espectral, dados fotométricos, estabilidade temporal do fluxo luminoso, necessidade de equipamento auxiliar e, principalmente, o custo da lâmpada e componentes adjuntos (SOWMY et al., 2016).

É comumente usado lâmpadas de Xenon de arco curto e arco longo em simuladores solar que exigem maior conformidade com espectro, porém são na maioria mais caros que outras tecnologias (WANG, 2014). Fontes luminosas de haleto metálico e halógenas com filamento de tungstênio são alternativas ao custo elevado das lâmpadas Xenon, entretanto perdem na conformidade do espectro (SALAM et al., 2016). LED, *Light Emitting Diodes*, ou diodos emissores de luz, são mais preferidas atualmente se comparadas a fontes tradicionais devido ao baixo custo, tamanho reduzido e baixo consumo de energia, porém é limitado pela curta faixa de emissão do espectro, sendo necessário uso de conjunto de vários tipos de LED (XU et al., 2015).

Lâmpadas de arco de Xenon possuem ciclo de vida curto, exigem alta manutenção e consomem muita energia, entretanto apresentam elevada conformidade com a intensidade e espectro solar. São bastante usadas em simuladores solar de fluxo contínuo no tempo. Petrasch et al. (2007) otimiza geometria de luminária usando Método de Monte Carlo para lâmpada de arco curto de Xenon, a fim de obter incidência de aproximadamente $6800W/m^2$ em área de 60 mm de diâmetro. Em determinadas ocasiões são usadas lâmpadas de flash de Xenon, cujo propósito é radiar pulso de luz com determinada intensidade, variando-se a tensão aplicada nos terminais de alimentação, intencionando medir curva característica de painel fotovoltaico sobre área iluminada. Tanto para lâmpadas de arco ou flash é possível alcançar conformidade de intensidade e espectro Classe A (THOMAS et al., 2011; GUO et al., 2013).

Lâmpadas halógenas consiste de filamento de tungstênio selado e envolto de gás inerte e

halogênio, como iodeto e bromo, que produzem maior intensidade de espectro na faixa do infra-vermelho. Tem ciclo de vida longo e fácil manutenção. É inteiramente dimerizável, ou seja é passível de controle de intensidade luminosa sem perder as características de distribuição espectral (YASS; CURTIS, 1974).

Fontes de luz a base de haleto metálico são alternativas a lâmpadas com tecnologia de arco de Xenon devido ao custo financeiro elevado, alto consumo de energia, e ciclo de vida pequeno. Como são lâmpadas de alta descarga, a radiação aproxima-se de fonte pontual, com alto índice de intensidade luminosa, e ciclo de vida longo. Necessitam de intervalo após ligação, geralmente 2 minutos, para que a distribuição espectral seja estabilizada, além de perder suas características quando dimerizada (MENG et al., 2011).

Conformidade com a distribuição espectral é parâmetro de classificação de simuladores solar. Diferentes tipos de fonte luminosa radiam espectro característicos vinculado a tecnologia e tipo de material usado na fabricação das lampadas. A Figura 3.2 ilustra a distribuição espectral de lâmpadas halógenas e de haleto metálico (QINGLONG et al., 2015).

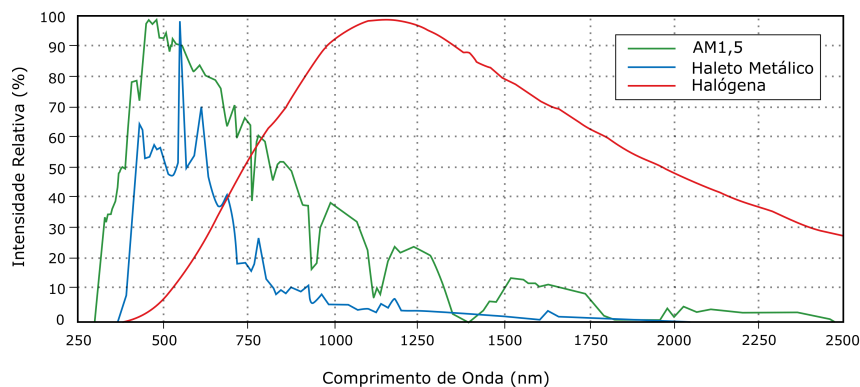


Figura 3.2 - Espectro de lâmpadas de diferentes tecnologias.

A Figura 2.9 exemplifica a sensibilidade de células solares de determinadas faixas do espectro. Percebe-se, a partir da Figura 3.2, que lâmpadas halógenas produzem distribuição espectral com maior intensidade na faixa do infra-vermelho, o que gera calor em excesso nas células fotovoltaicas devido ao princípio de termalização, na qual a energia do fóton é superior a E_g do material, gerando dissipação térmica. Entretanto, lâmpadas de haleto metálico são mais adequadas quando deseja-se distribuição espectral próximo ao de referência AM1,5 (BEN et al., 2015).

3.3 Considerações

Algumas técnicas podem ser usadas para melhorar o índice de não-uniformidade, como: desenvolvimento de geometria da luminária do simulador solar e uso de colimadores para obter feixes de raios luminosos paralelos, visando uniformizar a distribuição da irradiância sobre o plano alvo. Filtros para determinados comprimentos de onda podem ser usados com intuito de manter conformidade com espectro solar. Esses métodos, porém, aumentam demasiadamente a complexidade de projeto do simulador solar.

Limitar-se ao uso de poucas técnicas pode resultar em maior fluidez de projeto. A seleção da fonte luminosa é parte mais importante no desenvolvimento de simulador solar, pois influencia diretamente na intensidade de radiação, nas propriedades do espectro e estabilidade temporal. Associado a escolha da lâmpada é necessário algum método de otimização para o índice de não-uniformidade, pois garante melhor convergência aos parâmetros de classificação padrão da norma IEC 904-9.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Neste capítulo são mostrados os procedimentos para construção do protótipo da bancada laboratorial, desenvolvimento da bancada otimizada e descrição dos experimentos e técnica de resfriamento usando água para melhoramento da conversão de energia elétrica de painéis fotovoltaicos. A metodologia é dividida em: i) construção do protótipo da bancada laboratorial, ii) otimização e construção do simulador solar e iii) descrição dos experimentos realizados usando o protótipo e bancada otimizada com técnica de resfriamento dos painéis fotovoltaicos.

4.1 Protótipo do simulador solar

Deseja-se desenvolver aparato capaz de iluminar a área superior de painel fotovoltaico comercial. O dispositivo deverá permitir técnica de aplicação de água a temperatura ambiente na superfície superior do painel fotovoltaico a fim de resfriá-lo.

Para construção do protótipo da bancada laboratorial é considerado o menor gasto financeiro possível, a fim de analisar dados para a construção de bancada laboratorial mais robusta.

O protótipo consiste em luminária capaz de reproduzir as condições de temperatura e intensidade de irradiância solar sobre o painel fotovoltaico. O aparato possui caixa d'água para alimentar o sistema de refrigeração e perfil de alumínio perfurado que permite o espalhamento de água na superfície frontal do módulo fotovoltaico.

A fim de mensurar grandezas físicas e controlar a carga dos dispositivos elétricos do aparato são desenvolvidos circuitos eletrônicos. O projeto eletrônico é dividido em aplicações: i) controle de potência das lâmpadas e ii) controle de carga e iii) aquisição dos dados do painel fotovoltaico.

O projeto estrutural baseia-se em desenvolver geometria da luminária capaz de iluminar área superior ao de painel fotovoltaico comercial com $0,94 m^2$, sendo responsável pela sustentação do refletor e das lâmpadas.

A caixa de suporte do refletor tem dimensões de $1,5 \times 0,8$ metros e contém 6 lâmpadas de $2000W$ e 2 lâmpadas de $1000W$ do tipo halógena. A disposição das lâmpadas é representada na Figura 4.1, cujas lâmpadas representadas na horizontal são de $2000W$ e as representadas

na vertical são de $1000W$. Os comprimentos ilustrados são $d = 1,5 m$, $h = 0,8 m$, $h1 = h4 = 0,15 m$, $h2 = h3 = 0,25 m$, $d1 = d6 = 0,15 m$, $d2 = d5 = 0,2 m$ e $d3 = d4 = 0,4 m$. A altura da luminária será $0,30 m$.

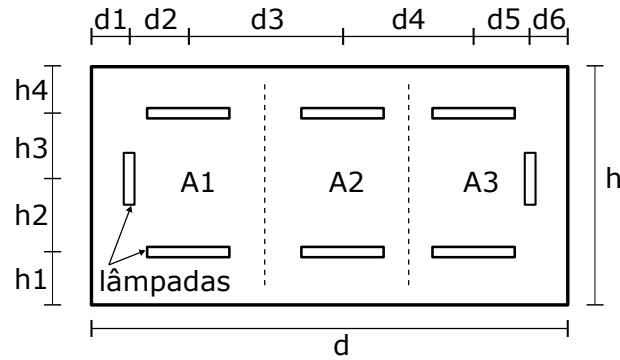


Figura 4.1 - Esquemático de construção e distribuição das lâmpadas do protótipo.

A estrutura é fabricada em alumínio, a parte refletora em zinco e parte externa revestida de madeira. Quatro *coolers* são posicionados nas laterais da luminária para refrigerar seu interior.

A sustentação da estrutura é realizada através de duas roldanas fixas na laje que permite controle de inclinação da luminária, na qual é disposta em 16° em relação ao solo. O painel fotovoltaico é colocado abaixo da luminária e apoiado em suporte com estrutura feita em ferro com inclinação de 16° em relação a mesa de apoio.

A luminária é disposta a $0,80 m$ da superfície do painel. A caixa d'água, que alimenta o sistema de refrigeração, dista $1,5 m$ da luminária.

Para espalhamento de água na superfície do painel é desenvolvido perfil metálico retangular perfurado, como ilustra Figura 4.2. O perfil tem $0,66 m$ de comprimento e $0,015 m$ de altura. Furos de $2 mm$ de diâmetro são feitos e dispostos $2 cm$ um do outro. A entrada de água é realizada nas laterais do perfil, indicada por ix).

A representação estrutural do protótipo é ilustrada na Figura 4.3, onde i) é a luminária que irradia os raios luminosos, vi), incidente sobre o painel fotovoltaico, representado por viii), inclinados em ângulo $\theta = 16^\circ$ em relação a mesa de apoio, vii). Caixa d'água, ii), disposta $1,5 m$ acima da luminária, que permite controle de vazão através da válvula manual iii) medida pelo sensor de fluxo, iv). Entrada de água a temperatura ambiente,

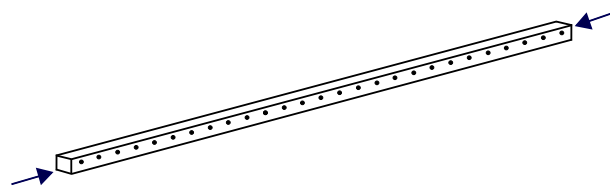


Figura 4.2 - Protótipo do perfil metálico perfurado.

representada por ix), perfil metálico perfurado, v), que permite melhor distribuição de água na superfície do painel e saída de água, após resfriamento, ilustrada por x).

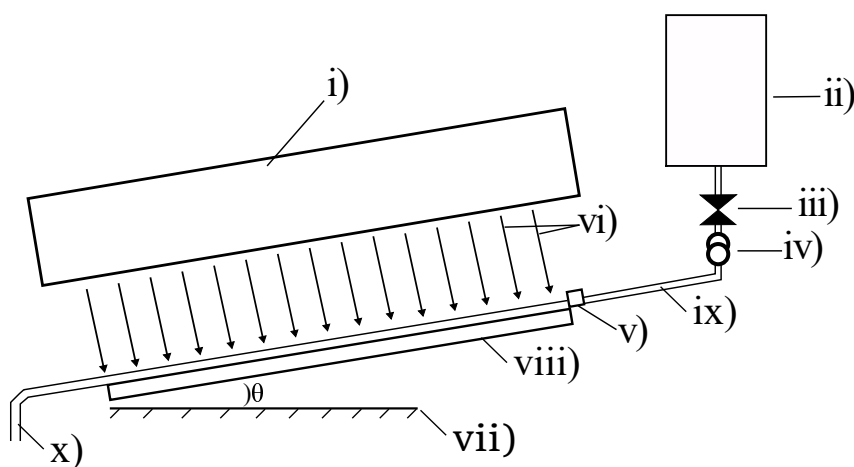


Figura 4.3 - Esquema de montagem da estrutura do protótipo.

Como ilustrado na Figura 4.1, as lâmpadas são distribuídas em três conjuntos para facilitar a distribuição de carga: A1, A2 e A3, na qual totaliza 5 kW, 4 kW e 5 kW respectivamente por região. Lâmpadas halógenas são puramente resistivas, sendo a intensidade luminosa facilmente controlada pela tensão nos terminais de cada lâmpada. É proposto dispositivo eletrônico de controle de potência, *dimmer*, para variação da intensidade luminosa das lâmpadas.

A ligação da carga será feita entre fase e neutro sendo intermediada por *dimmer* capaz de controlar a tensão que chega a carga. A Figura 4.4 ilustra o circuito elétrico. O conjunto de lâmpadas das regiões $A1 = F1$, $A2 = F2$ e $A3 = F3$ são distribuídos por fase da rede trifásica, balanceando as cargas, onde $F1, F2$ e $F3$ representam cada fase da rede.

São usados Triac's de potência BTA41-600B para variação da tensão das cargas, através do controle do ângulo de disparo destas chaves eletrônicas. Cada Triac usado tem capacidade

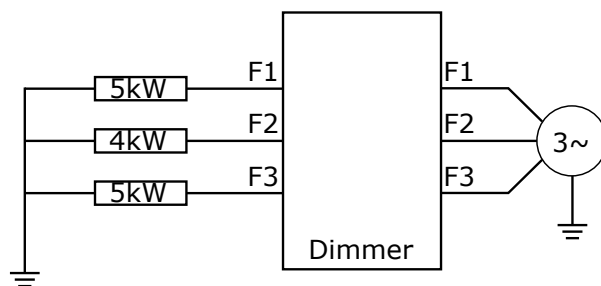


Figura 4.4 - Distribuição de carga no sistema.

para controlar no máximo 2000 W , de acordo com a folha de dados do fabricante. Então, é prudente usar as chaves eletrônicas em paralelo a fim de aumentar a potência controlada. Cada fase ilustrada na Figura 4.5 possui conjunto de três Triac's em paralelo, sendo a carga total suportada de 6000 W , suficiente para controlar cada carga.

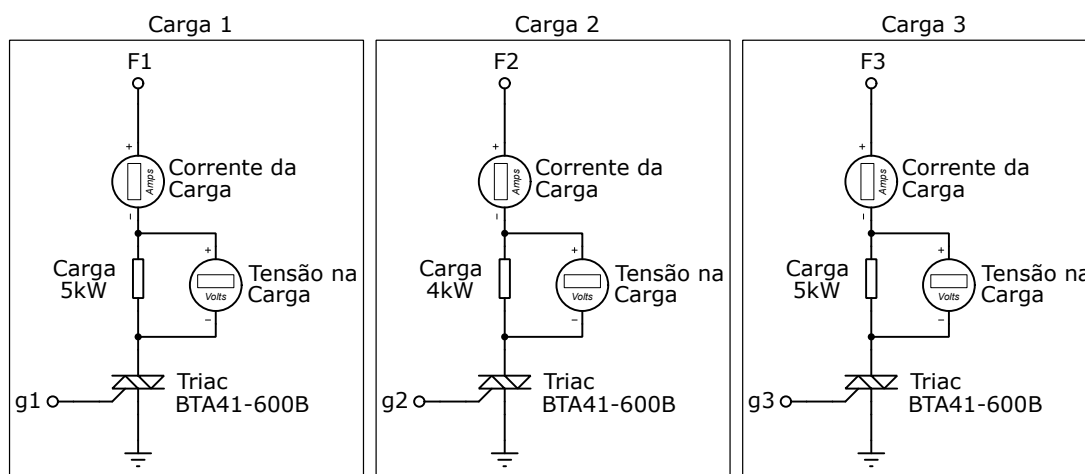


Figura 4.5 - Circuito de controle de potência das cargas.

O controle de tensão é feito através do controle do ângulo de disparo dos *gates* $g1, g2$ e $g3$. A forma de onda medida nos terminais das lâmpadas seguem o modelo da Figura 4.6, cujo parâmetro β é o angulo de disparo que pode variar entre 0° e 180° , controlando a tensão no semi-ciclo positivo e negativo. V_e representa a tensão de entrada de cada fase, V_g representa o pulso de disparo na entrada do *gate* do triac e V_c representa a tensão na carga. Nota-se que o controle é feito pelo ceifamento da onda de tensão e a carga enxerga o valor RMS da forma de onda.

O circuito de disparo consiste em detector de passagem por zero, que indica quando a

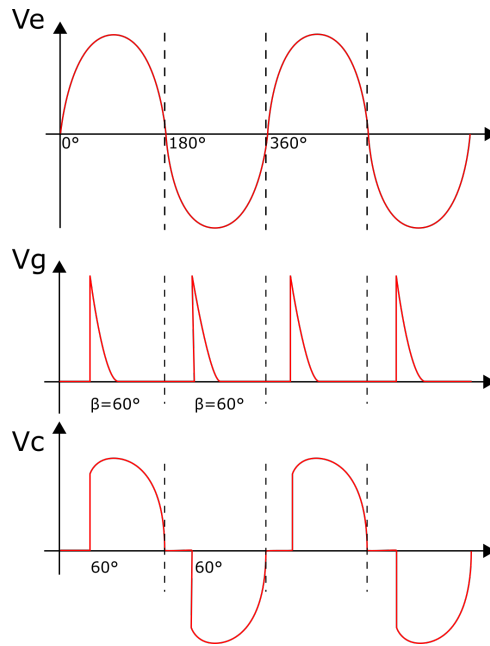


Figura 4.6 - Forma de onda para $\beta = 60^\circ$.

tensão da rede se iguala a zero volts em 0° , 180° e 360° . O ângulo de disparo é válido para cada semi-ciclo, após a passagem por zero o valor de β se reinicia, por isso varia apenas entre 0° e 180° . O sincronismo é feito em cada fase da rede e é ilustrado na Figura 4.7

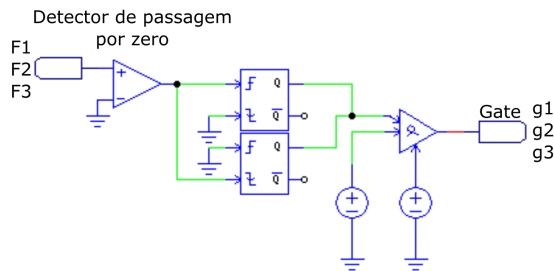


Figura 4.7 - Circuito de controle do ângulo de disparo β .

Para que painéis fotovoltaicos operem sempre fornecendo a máxima potência, usa-se conversores de energia com algoritmos de extração da máxima potência. É desenvolvido conversor CC-CC do tipo Boost, elevador de tensão, para casamento de impedância com a carga e conseqüentemente, extração da máxima potência do painel fotovoltaico.

O circuito do conversor Boost é ilustrado na Figura 4.8. Microcontrolador rodando al-

goritmo MPPT tipo *Perturb&Observe*, escolhido pela simplicidade de implementação e robustez de operação, é desenvolvido para controle do chaveamento do Mosfet Q4. É montado, também, sensores de temperatura do tipo LM35 para medição na superfície do painel e sensores de temperatura de entrada e saída de água, tipo DS18B20. O dispositivo é dotado de comunicação serial RS-232 para fornecimento de dados para análise em computador.

O circuito completo do dispositivo eletrônico é ilustrado no Apêndice A.

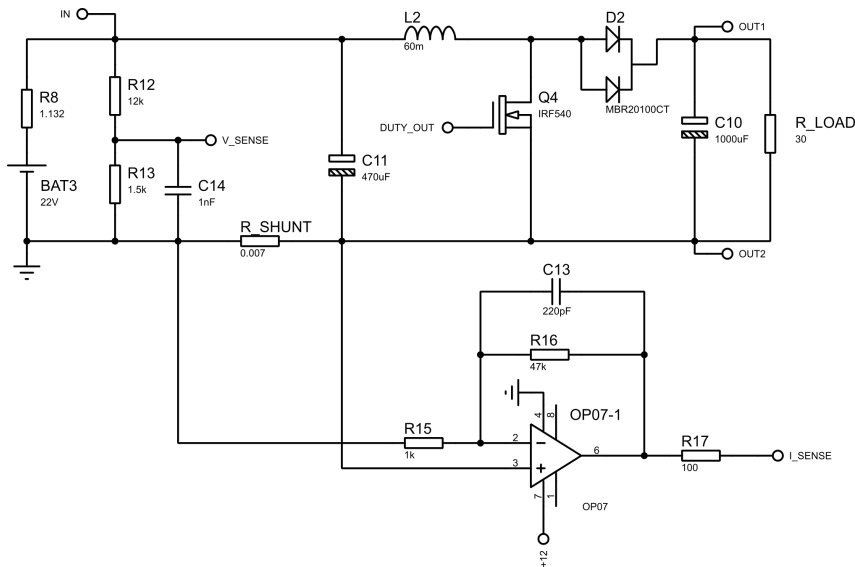


Figura 4.8 - Circuito conversor tipo Boost.

A Figura 4.9 representa o diagrama de funcionamento do aparato, constituído pelo conjunto de todos dispositivos integrados. O equipamento identificado por i) tem função de rastreador do ponto de máxima potência, aquisição dos dados de temperatura do módulo fotovoltaico, medição do fluxo de água que entra no sistema e controle de chaveamento de válvula solenoide, que permite ou bloqueia a vazão de água. O dispositivo ii) é o circuito de potência para controle da intensidade das lâmpadas, iii) é o refletor do simulador solar com conjunto de lâmpadas halógenas, iv) é tanque de 50 litros de água sempre cheia para manter a pressão de água constante, v) é o sensor de vazão, vi) é válvula manual para controlar abertura e fechamento da passagem de água, vii) é sensor de temperatura tipo LM35 e viii) é painel fotovoltaico modelo SV140D12, cuja características elétricas são re-presentadas na Tabela 4.1. O dispositivo i) possui canal de comunicação serial RS-232 que permite transferência de dados de tensão, corrente e temperatura do painel fotovoltaico.

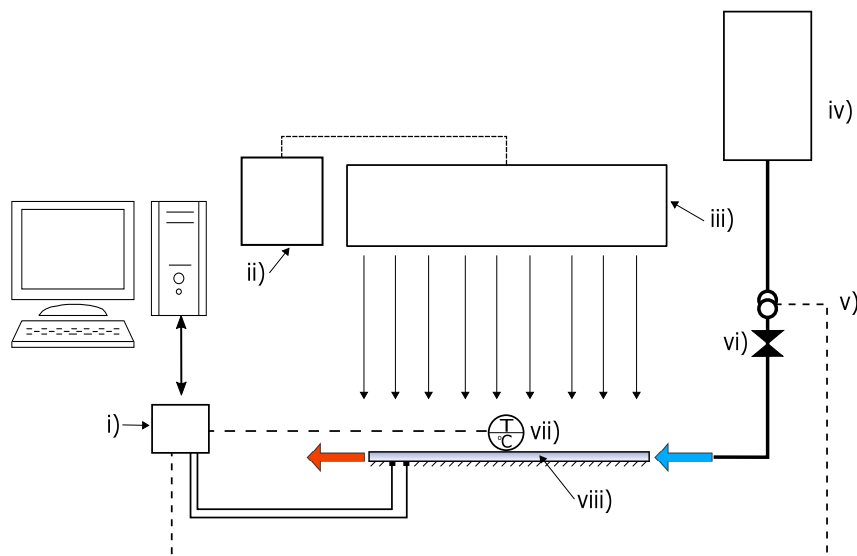


Figura 4.9 - Esquemático do protótipo.

Tabela 4.1 - Especificações do Módulo

Modelo	SV140D12
Tensão de circuito aberto (Voc)	22,2 V
Operação ótima de tensão (Vmp)	18,0 V
Corrente de curto circuito (Isc)	8,36 A
Operação ótima de corrente (Imp)	7,67 A
Máxima potência (Pmax)	140Wp
Tipo de célula	Silício policristalino

4.2 Bancada otimizada

Determinar os melhores parâmetros que influenciam a não-uniformidade da irradiância sobre o plano alvo requer repetição de testes físicos e verificação da resposta, ou seja, realizar experimento prático, avaliar resultados, alterar os parâmetros necessários e repetir o processo. Este método têm custo elevado, além de exigir bastante tempo. A alternativa ideal para contornar o problema é usar modelo computacional capaz de simular condições reais.

Com auxílio de software de simulação multifísica e módulo *Ray Tracing*, que permite verificar o caminho dos raios luminosos, é possível encontrar os parâmetros ideais para alcançar resultados desejados.

Pode-se usar métodos de força bruta ou tentativa e erro para encontrar os melhores parâ-

metros que satisfaçam as características do idealizado. Este método portanto, é demorado e não inteligente pois depende de chutes do operador. Há técnicas de otimização que ajudam na busca automática de parâmetros que se aproximam do ponto ótimo. A Figura 4.10 representa o fluxograma de otimização por algoritmo genético, que apresenta vantagem sobre outros algoritmos, pois varre todo conjunto universo em busca da solução ótima global e não depende de chute inicial.

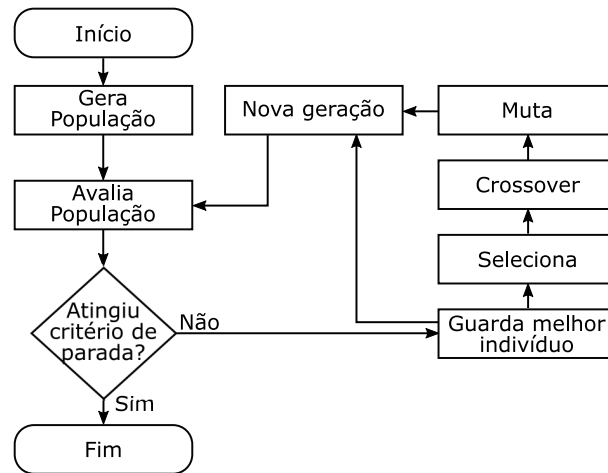


Figura 4.10 - Fluxograma do algoritmo genético.

Algoritmo genético é método de otimização ou busca inspirado na evolução de populações de seres vivos, que favorecem seleção natural e sobrevivência dos mais aptos. As técnicas de otimização geralmente necessitam de conjunto universo que limita o espaço de busca de todas soluções possíveis e uma função de avaliação, ou função objetivo, de cada solução, que consiste em localizar o máximo ou o mínimo da função. É necessário definir os parâmetros que influenciam a resposta do sistema, chamados genes. Cada gene afeta a resposta com intensidade diferentes. Um conjunto de genes forma um indivíduo, que por sua vez gera uma população. Deve-se inicialmente gerar a população inicial com n indivíduos, avaliar cada um através da função objetivo. Se atingiu critério de parada o processo é encerrado, senão os genes de alguns indivíduos são alterados para formar nova população e começa-se a iteração novamente (BROWNLEE, 2011).

A determinação da geometria do refletor da bancada laboratorial depende de otimização. A forma final da estrutura, portanto, é vinculada a esta etapa.

O objetivo é encontrar a geometria que melhor distribui uniformemente a intensidade da

irradiância sobre todos os pontos do painel fotovoltaico. Será usado painel de aproximadamente $1 \times 1,7 \text{ m}$, com área $1,7 \text{ m}^2$. Deverá ser observado a intensidade dentro desta área. Deseja-se resposta menor que 10%, para que o simulador solar seja classificado de acordo com a Tabela 3.1.

Para alcançar os resultados esperados as seguintes etapas são seguidas: i) desenvolvimento de modelo computacional usando software de simulação com módulo *Ray Tracing*, ii) desenvolvimento do algoritmo genético para otimização dos parâmetros e iv) construção da bancada.

4.2.1 Modelamento do sistema

Sabe-se que concentradores parabolóides podem ser usados para convergir a luz que radia das lâmpadas de luminárias devido a suas características de reflexão. Parábola representada por $y = x^2$, pode refletir os feixes de luz que entram paralelos ao eixo das ordenadas para o foco F , Figura 4.11, onde i) representa a parábola e os traços tracejados representam os raios de luz que chegam paralelos ao eixo das ordenadas (BEN et al., 2015).

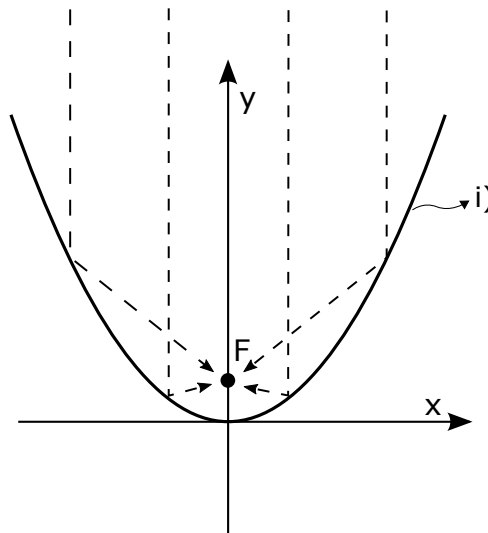


Figura 4.11 - Característica de reflexão da parábola.

É usado lâmpadas de haletos metálicos, modelo HQI-BT 400 W/D PRO Osram, que possui alta conformidade com espectro solar, de acordo com a folha de dados. A distância da base até o foco de radiação da lâmpada é de 17 cm , sendo posicionada na vertical.

A equação que define a geometria da luminária do simulador solar é descrita em (4.1),

que representa a curva do refletor, cujas paredes laterais são fechadas.

$$y = -a \cdot x^2 + b \quad (4.1)$$

Para valores arbitrários de a e b em (4.1), obtém-se a curva ilustrada pela Figura 4.12, que representa a vista lateral do refletor no plano cartesiano, sendo que as linhas tracejadas são as paredes laterais, formando câmara fechada quando estendida no eixo z , produzindo objeto 3D. O parâmetro F indica o ponto de radiação luminosa da lâmpada, que é fixa.

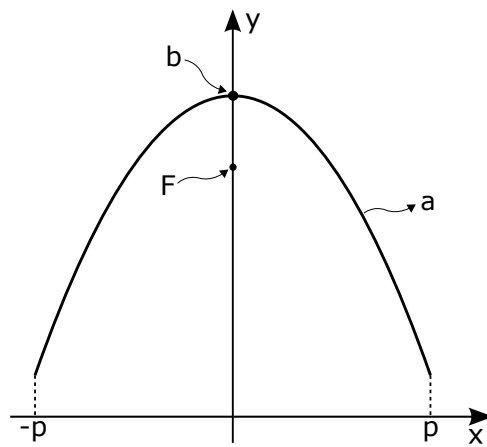


Figura 4.12 - Característica de construção do refletor.

Como ilustra a Figura 4.13, variações no parâmetro b influencia a altura da luminária que cruza o eixo y , variações em a definem abertura ou fechamento da curva do refletor e mudanças no parâmetro p modificam o domínio de (4.1).

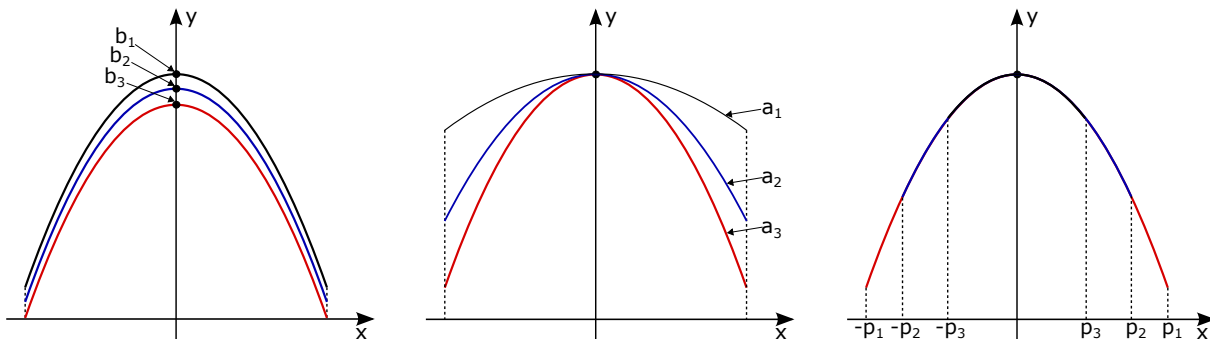


Figura 4.13 - Característica de construção do refletor.

As variáveis a , b e p devem ser limitadas em região conveniente a otimização. Para isso tem-se que b pode variar entre $0,3\text{ m}$, pois deve-se considerar a altura da lâmpada na vertical, e $1,5\text{ m}$. O parâmetro $a = 0$ representa curva paralela ao eixo X na altura b . Portanto é possível variar a entre 0 e 4, quando a curva se aproxima do eixo X, não podendo conter valores com imagem negativa. Já o parâmetro p define o comprimento do refletor. Adotando-se a posição fixa no painel fotovoltaico abaixo no refletor, paralela ao eixo X para $y = 0$, os valores de p podem variar de 0,5 a 1,2, sendo o menor valor restringido pelas dimensões do painel fotovoltaico.

Portanto as restrições impostas aos parâmetros a , b e p seguem como (4.2):

$$\begin{aligned} 0,3 &\leq b \leq 1,5 \\ 0,5 &\leq p \leq 1,2 \\ 0 &\leq a \leq \frac{b}{p^2} \end{aligned} \tag{4.2}$$

É adicionado condicional ao parâmetro a para que se garanta que a curva não contenha imagem negativa, pois pode-se gerar erros de simulação. Para garantir que toda curva sempre possua imagem positiva, atribui-se a condição limite de b/p^2 .

Sabendo que a profundidade do painel fotovoltaico é $1,7\text{ m}$, define-se que o refletor terá 2 m . A área mínima de iluminação é de $1,7\text{ m}$, a mesma área do dispositivo fotovoltaico usado como referência.

Todos parâmetros definidos são adicionados e modelado no software de simulação multi-física com módulo de *Ray Tracing*.

Após otimização dos parâmetros a , b e p é construída a estrutura do simulador solar projetado.

O correto funcionamento do sistema depende de conjunto de circuitos eletrônicos a fim de adquirir as informações elétricas necessárias do dispositivo fotovoltaico sobre teste. Deseja-se obter dados de tensão, corrente, temperatura do módulo fotovoltaico, temperatura ambiente interna do simulador solar. São controlados fluxo de ar para sistema de resfriamento da luminária e fluxo de água para o sistema de arrefecimento do módulo fotovoltaico.

A Figura 4.14 representa esquemático de funcionamento do simulador solar otimizado, composto pela estrutura e circuitos eletrônicos de aquisição e controle de variáveis, na qual: i) é circuito de controle de temperatura da luminária, ii) é circuito de controle do sistema de arrefecimento do dispositivo fotovoltaico, iii) é circuito de aquisição dos dados de tensão e corrente do ponto de máxima potência, iv) é circuito de conversão de comunicação serial RS-485/RS-232, v) é circuito de alimentação, vi) é microinversor de frequência conectado a rede para aquisição da máxima potência do módulo fotovoltaico, vii) é dispositivo sobre teste, viii) é estrutura otimizada da luminária, ix) é conjunto de lâmpadas usadas, x) é cabine de suporte e proteção dos circuito eletrônicos e xi) é computador para recebimento dos dados via comunicação serial.

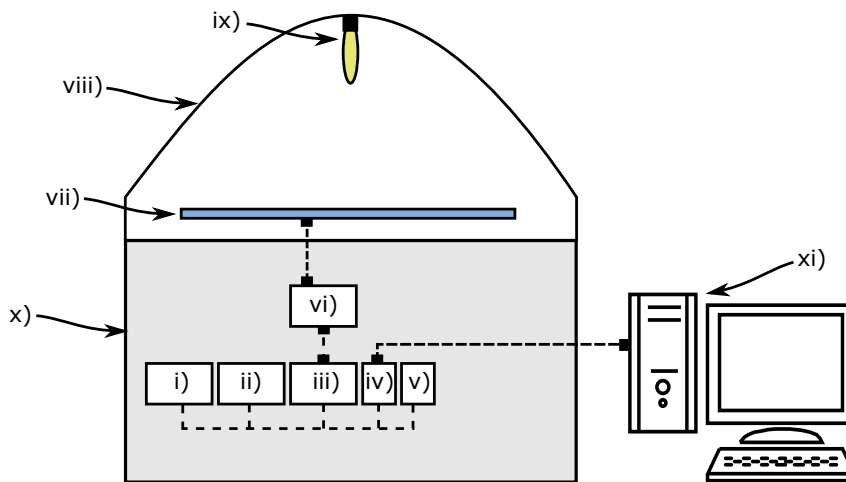


Figura 4.14 - Esquemático da estrutura da bancada laboratorial otimizada.

Com propósito de controlar a temperatura interna da luminária é usado controlador PI em malha de circuito fechado, como descrito na Figura 4.15, na qual é empregado sensores de temperatura e microcontrolador para ajuste de sinal do atuador. *Setpoint* (SP) é valor adotado como referência de temperatura do sistema, ou seja, medida empregada na qual conjunto de atuadores tenta manter saída do processo constante.

Atuadores são elementos que respondem sinais mecânicos, elétricos ou pneumáticos a fim de controlar processos. É empregado exaustor e ventilador elétricos como atuadores no controle de temperatura da luminária. O fluxo de ar frio que entra no processo, troca calor com o sistema por convecção e sai com temperatura mais elevadas. A velocidade da troca de calor depende do fluxo de ar e conseqüentemente da velocidade de rotação do exaustor e ventilador. A Figura 4.16 representa circuito de controle da temperatura

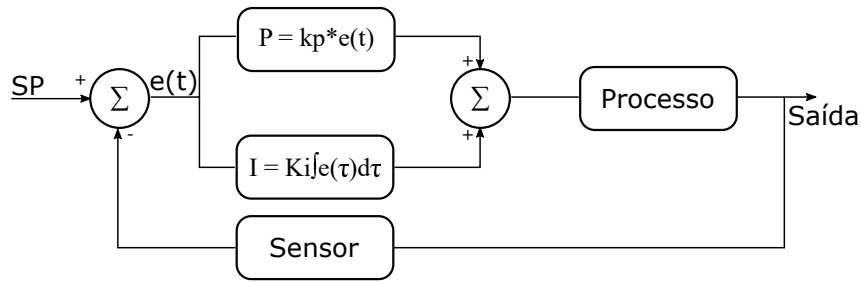


Figura 4.15 - Malha de controla fechada PI usada para controle de temperatura interna da luminária.

interna da luminária composto por Triac de potência, como descrito na Figura 4.6, que controla carga de corrente alternada. A carga controlada são motores que giram as hélices do exaustor e ventilador.

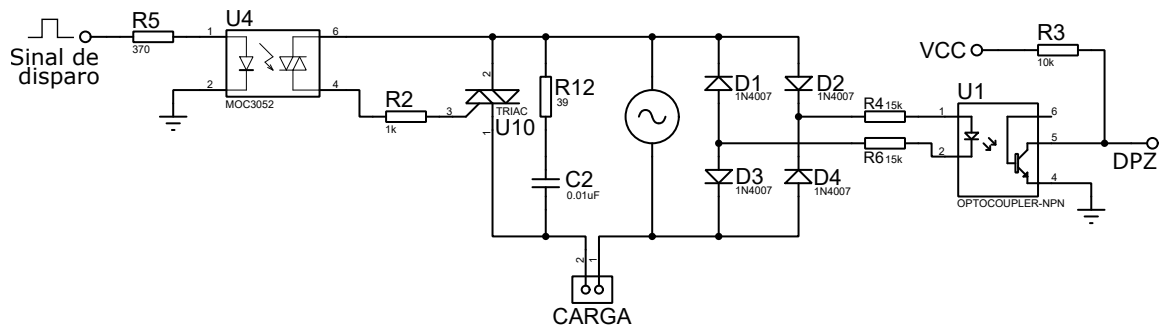


Figura 4.16 - Circuito de controle da temperatura interna da bancada laboratorial.

O sinal de disparo, Figura 4.16, regulado pelo circuito de controle, Figura 4.15, aciona disparo do Triac que por conseguinte controla a velocidade de rotação dos motores. Circuito detector de passagem por zero (DPZ) auxilia na identificação da tensão igual a zero volts da rede elétrica. O ângulo de disparo, ou sinal de disparo, é contado a partir da tensão igual a zero e fecha o ciclo quando a tensão atinge este patamar novamente, sendo contado de 0° a 180° .

Com propósito de controlar fluxo de água do sistema de arrefecimento do dispositivo fotovoltaico é usado válvula solenoide que permite ou não a vazão de água. Para ligar ou desligar o solenoide é necessário circuito auxiliar, Figura 4.17, composto por relé. Este elemento é acionado por tensão lógica de 5 volts, fechando contato da chave. Diodo (D1) de roda livre é necessário, posicionando-o em antiparalelo com relé, com finalidade de garantir correto funcionamento do chaveamento, impedindo que os contatos normalmente aberto

permaneçam fechados. Quando o sinal de disparo permanece em estado lógico alto (5V), há passagem de corrente pela bobina do relé e transistor BC548, fechando os contatos do relé. Após sinal de chaveamento baixo (0V), D1 dissipa energia armazenada nas bobinas do relé, forçando abertura dos contatos. O circuito *snubber* formado pelo resistor (R3) e capacitor (C2) garantem corrente funcionamento da válvula solenoide, assim como D1, forçando desarmazenamento de energia nas bobinas do solenoide.

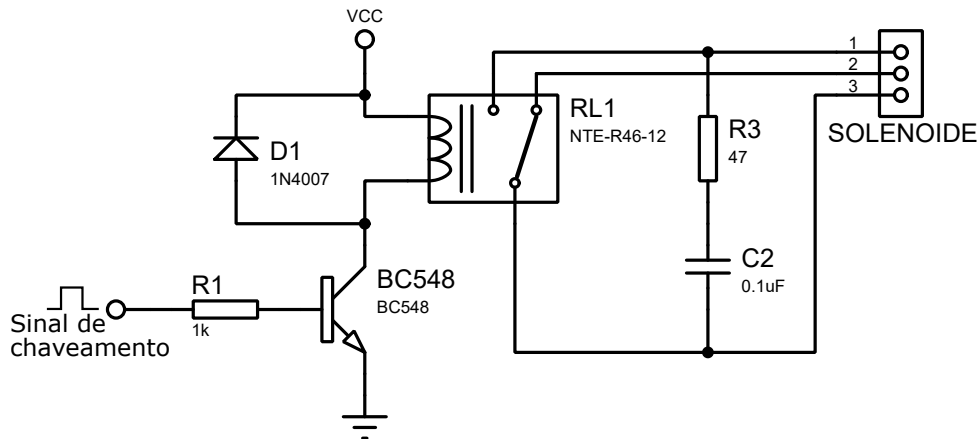


Figura 4.17 - Circuito de controle do fluxo de água do sistema de arrefecimento do dispositivo fotovoltaico.

Para aquisição de tensão e corrente de máxima potência no ramo CC entre o microinversor de frequência e módulo fotovoltaico é usado circuito divisor de tensão composto pelo resistores R5 e R6 de 1% para garantir menor erro de medição e resistor shunt (shunt-1) para medição da corrente no mesmo ramo. Partindo-se o princípio da lei de Ohm $V = R \times I$, a corrente que passa pelo resistor é divisão entre a queda de tensão medida e a resistência conhecida. Amplificador operacional propicia ganho da queda de tensão medida entre os terminais do resistor shunt, garantindo maior precisão de medida. A representação do circuito pode ser analisada pela Figura 4.18.

Cada módulo de circuito impresso é dotado de comunicação serial, disponível pelo microcontrolador ATmega328p nas portas Rx e Tx, responsável pela leitura e escrita de informações, respectivamente. Entretanto, a comunicação dá-se apenas entre dois dispositivos. Como trata-se de três placas independentes e deve haver comunicação entre elas, é necessário circuito de conversão de comunicação serial TTL/RS-232/RS-485, pois o padrão RS-485 suporta até 32 dispositivos na rede, viabilizando a comunicação entre a placas e o computador. O circuito da Figura 4.19 é usado para conexão com computador.

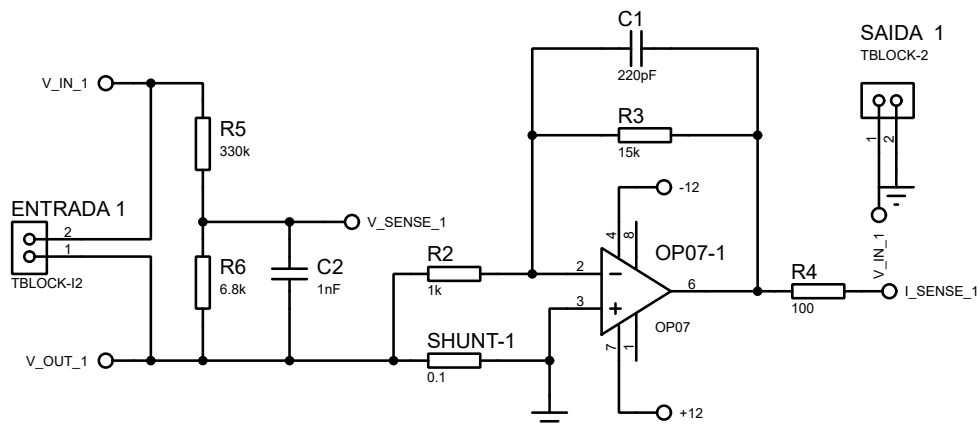


Figura 4.18 - Circuito de aquisição de tensão e corrente de máxima potência do dispositivo fotovoltaico.

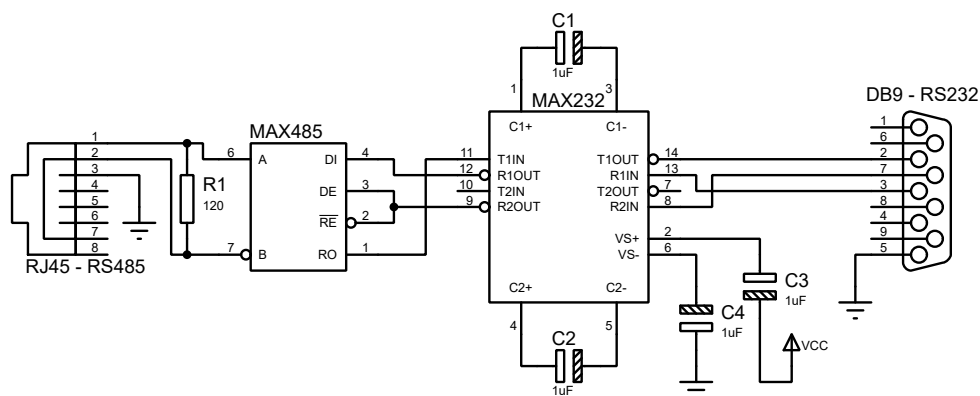


Figura 4.19 - Conversor serial RS-232/RS-485.

A alimentação das placas é fornecida pelo circuito da fonte de alimentação e tensão simétrica, representada na Figura 4.20.

4.3 Experimentos propostos

Série de testes e experimentos são propostos a fim de verificar a robustez do aparato desenvolvido e avaliar a técnica de resfriamento usada.

Primeiramente é avaliado as características construtivas do protótipo : i) não-uniformidade da intensidade da radiação solar incidente do dispositivo sobre teste, ii) conformidade com o espectro solar das lâmpadas usadas e iii) estabilidade temporal da irradiância. Posteriormente são avaliados igualmente as características da bancada otimizada.

Para avaliação da não-uniformidade, é dividido a área do módulo fotovoltaico em 36 partes,

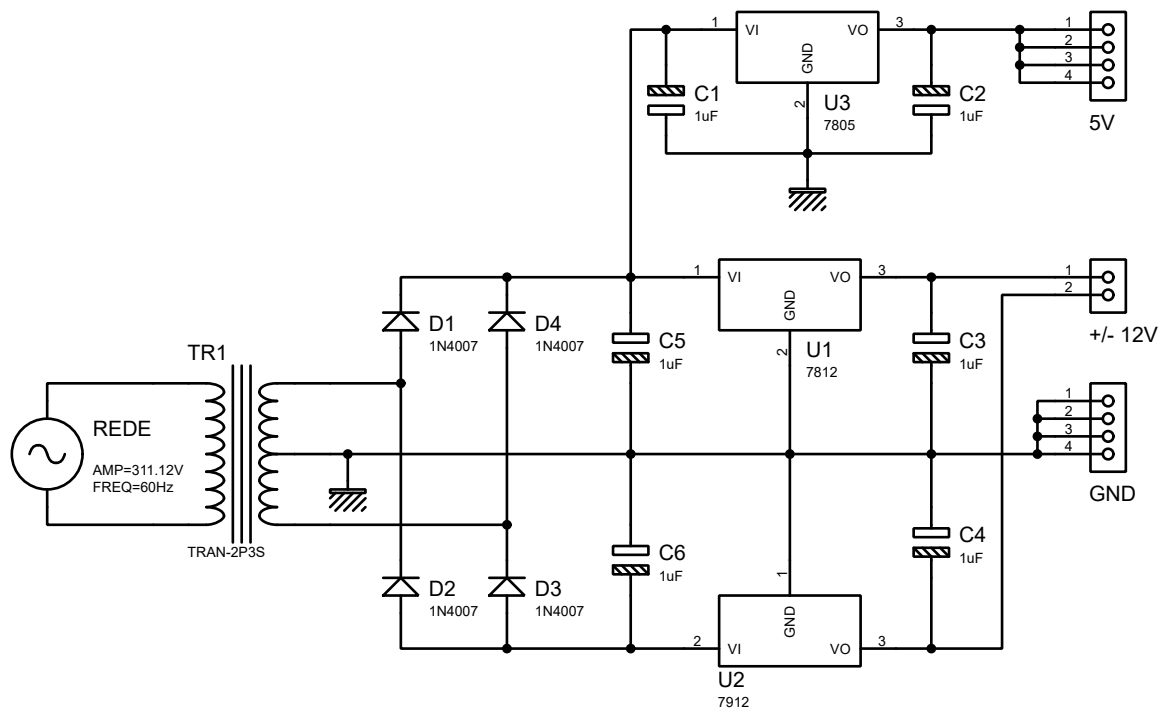


Figura 4.20 - Fonte de alimentação e tensão simétrica.

na qual é medido a irradiância através do medidor solar TES-1333. A conformidade com espectro solar é realizada exclusivamente pela análise da folha de dados da lâmpada usada, haja vista o custo elevado de sensores que atendam esta finalidade. A estabilidade temporal é medida pela variação da irradiância do simulador solar durante período de 60 minutos.

Em seguida é avaliado o ganho de eficiência no dispositivo fotovoltaico em teste quando submetido a técnica de resfriamento usando água. A fim de realizar os teste de eficiência na conversão de energia solar em energia elétrica é utilizado primeiramente o protótipo de simulador solar e posteriormente o simulador solar otimizado. É aplicado várias vazões de água na superfície do painel fotovoltaico: 1 L/min, 2 L/min, 3 L/min e 4 L/min, observando-se a tensão, corrente e temperatura do módulo fotovoltaico. De posse dos dados será avaliado a vazão que proporciona melhor ganho na performance elétrica, quando comparado a módulo sem modificação.

É realizado análise comparativa qualitativa do sistema medido com o sistema teórico para gráficos da corrente em função do tempo ($I \times T$), tensão em função da tempo ($V \times T$), potência em função da tempo ($P \times T$) e temperatura em função do tempo ($C \times T$). É avaliado de forma qualitativa a influência da temperatura do módulo fotovoltaico quando operando como sistema de resfriamento. Termovisor ITMV-100 da Instrutemp, é usado

para aferição da temperatura instantânea em todos pontos do módulo.

4.4 Considerações

Aplicar as técnicas corretas na construção do protótipo e simulador são imprescindíveis para aquisição de dados confiáveis. Deve-se atentar para as características construtivas do simulador solar, pois possui geometria complexa, dificultando a manufatura do aparato. A parametrização correta do algoritmo genético e simulação do sistema proporcionam qualidade na resposta de otimização.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Este capítulo destina-se a apresentação dos resultados adquiridos usando as metodologias apresentadas. Este capítulo é dividido em duas partes: i) apresentação do protótipo de bancada laboratorial desenvolvida e análise dos resultados do sistema de resfriamento do módulo fotovoltaico e ii) apresentação do desenvolvimento e análise dos resultados da bancada laboratorial otimizada.

5.1 Protótipo de bancada laboratorial não otimizada

A Figura 5.1 apresenta o protótipo da bancada laboratorial desenvolvida, na qual 1 representa a luminária, 2 é entrada de água, 3 é perfil metálico perfurado para distribuição de água sobre o painel, 4 é módulo fotovoltaico sobre teste e 5 é calha de saída de água. O módulo fotovoltaico é apoiado em suporte metálico inclinado em 16° disposto em mesa de 80 cm altura do chão. A luminária, desenvolvida como representa a Figura 4.1, é sustentado por duas roldanas e inclinada de forma paralela a superfície do módulo fotovoltaico. O perfil metálico perfurado permite espalhamento da água na superfície do módulo como mostra a Figura 5.1.

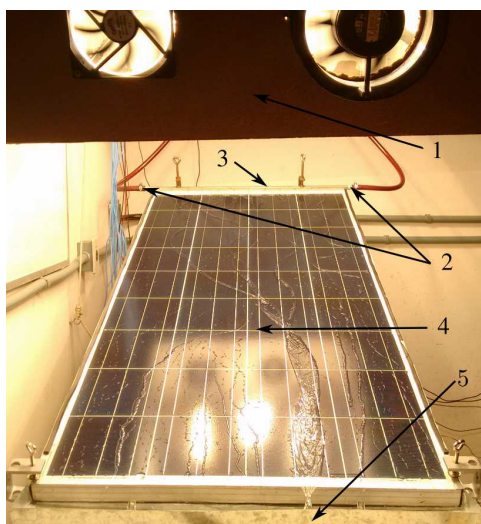


Figura 5.1 - Protótipo de Bancada laboratorial desenvolvida.

Exaustores são dispostos na lateral da luminária com propósito de resfriá-la e manter temperatura branda em seu interior, evitando danificar as lâmpadas. A fim de controlar a

intensidade da radiação incidente na superfície do dispositivo fotovoltaico, desenvolve-se controladores de carga para regular a tensão eficaz nos terminais de cada lâmpada. A Figura 5.2 mostra o *dimmer* desenvolvido, na qual observa-se o conjunto de Triacs em contato com dissipador de calor e circuito de disparo. É possível controlar, através dos potenciômetros, grupos de lâmpadas independentes, como exemplifica a Figura 4.4

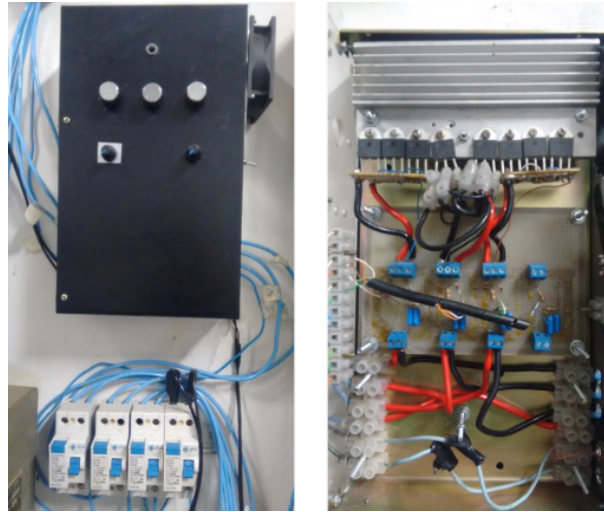


Figura 5.2 - Controlador de carga desenvolvido para controlar três conjuntos de carga somando 14kW.

Sensor de vazão de efeito hall modelo YF-S201 com range de 1 a 30 L/min e exatidão de 10% é usado para aferição da vazão de água que entra no sistema de resfriamento. Display informativo de vazão instantânea, acoplado ao sensor de vazão, é usado como indicativo para ajuste manual da vazão de água aplicada sobre o módulo fotovoltaico. Válvula manual de estrangulamento permite controle de fluxo de água que sai do tanque de armazenamento para o sistema de arrefecimento do dispositivo fotovoltaico. O conjunto é apresentado na Figura 5.3, na qual i) representa a luminária, ii) é painel fotovoltaico, iii) é conversor CC-CC boost conectado a carga resistiva, iv) é perfil metálico perfurado, v) é display para visualização da vazão instantânea, vi) é válvula manual e sensor de vazão e vii) é caixa d'água para abastecer o sistema de resfriamento.

A fim de classificar o protótipo de simulador solar, de acordo com as normas da IEC apresentadas na Tabela 3.1, uma série de medições são realizadas para dimensionar: a não-uniformidade da irradiância, estabilidade temporal e conformidade da distribuição do espectro.

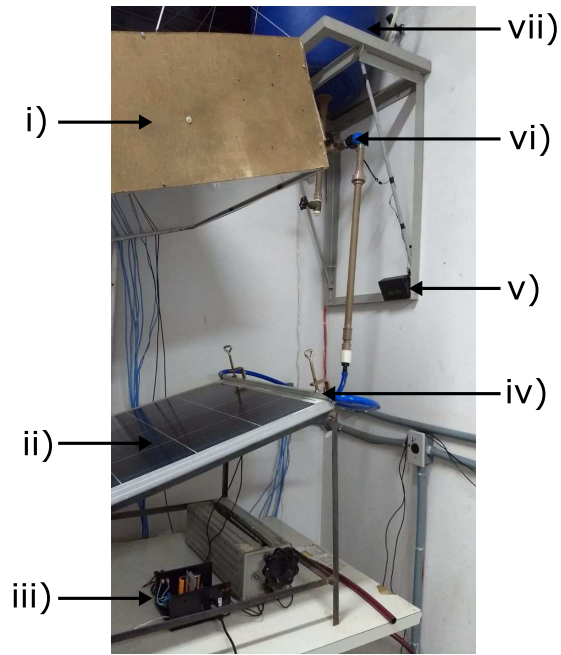


Figura 5.3 - Protótipo de bancada laboratorial desenvolvida.

A não-uniformidade de irradiância incidente sobre plano alvo é calculada a partir de (3.1) e depende da variação da irradiância sobre os pontos de medição. A Figura 5.4 representa a irradiância simulada através de software com módulo *Ray Tracing*. Os dados mostram resultado para painel fotovoltaico com área de $0,98m^2$ com dimensão de, $Y = 66$ centímetros e $X = 148$ centímetros, respectivamente. A simulação indica irradiância com maior intensidade no centro do módulo fotovoltaico, aproximadamente $1300W/m^2$, e intensidade mais brandas nas laterais, em torno de $700W/m^2$.

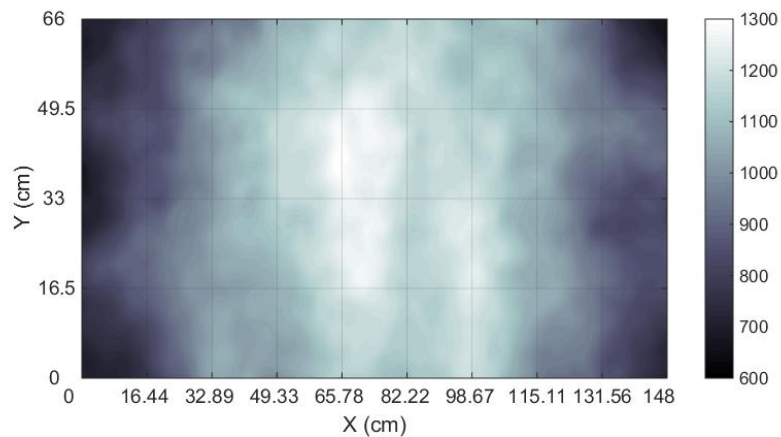


Figura 5.4 - Simulação da irradiância sobre painel fotovoltaico.

A Figura 5.5 ilustra a distribuição de irradiância medida incidente no plano alvo. Foi usado medidor de potência solar TES-1333 para medição da irradiância em 36 pontos da superfície do plano alvo, divididos em 9 partes no eixo X e 4 partes no eixo Y , como representa a Figura 5.5. Em conformidade do resultado simulado, os dados medidos mostram padrão de distribuição de intensidade de irradiância similares: maior no centro do dispositivo fotovoltaico, aproximadamente $1300W/m^2$ e menor nas extremidades, cerca de $700W/m^2$.

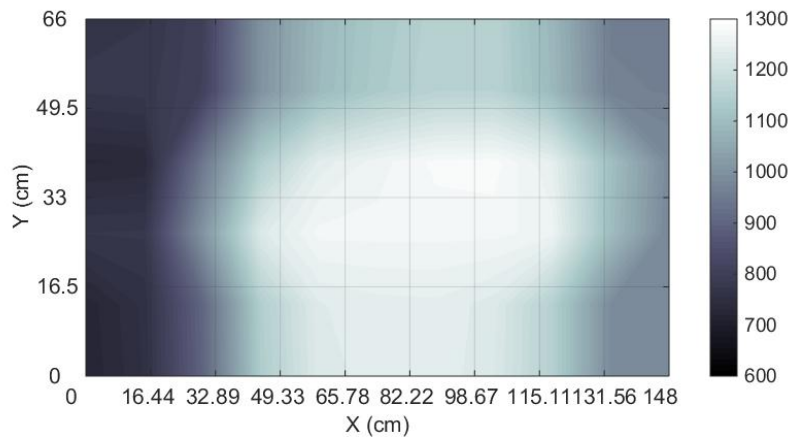


Figura 5.5 - Irradiância medida sobre painel fotovoltaico.

Portanto, o valor calculado da não-uniformidade do simulador solar, para os dados simulados, considerando $G_{max} = 1261 W/m^2$ e $G_{min} = 709,7 W/m^2$ de acordo com (3.1), é $S_{ups} = 27,97\%$.

O valor calculado da não-uniformidade do simulador solar, para os dados medidos, considerando $G_{max} = 1284 W/m^2$ e $G_{min} = 721,8 W/m^2$ de acordo com (3.1), é $S_{upm} = 28,02\%$.

O erro relativo E_r da não-uniformidade entre o valor simulado e valor medido é calculado em (5.1):

$$E_r = \left| \frac{S_{ups} - S_{upm}}{S_{ups}} \right| \cdot 100 = 0,17\% \quad (5.1)$$

onde S_{us} representa o valor da não-uniformidade simulado e S_{um} representa o valor medido. O erro relativo calculado é baixo, o que valida a simulação. Porém, o valor da não-uniformidade medida é $28,02\%$, o que não classifica o simulador solar em nenhuma

classe de acordo com a norma da IEC, como representa a Tabela 3.1.

A estabilidade temporal S_e , calculada a partir de (3.2), é função da variação da irradiância medida num ponto no intervalo de 60 minutos. O medidor solar TES-1333 foi usado para realizar as medições, posicionando-o no centro do plano alvo. A Figura 5.6 representa a estabilidade temporal do simulador solar.

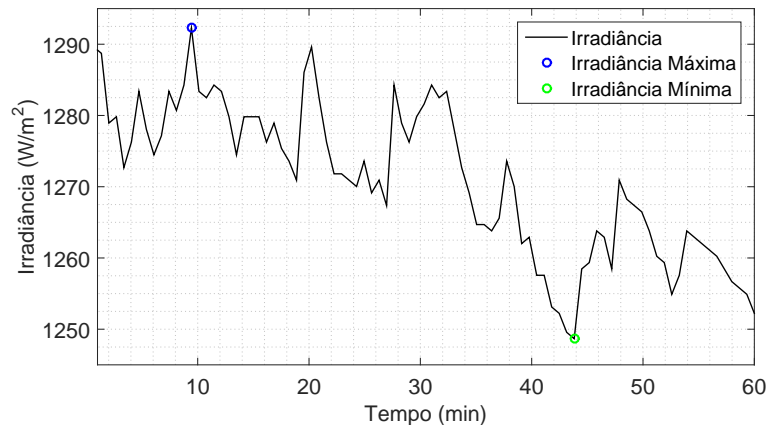


Figura 5.6 - Intensidade da irradiância durante 60 minutos.

O valor da estabilidade temporal medida S_e , considerando $G_{max} = 1292 W/m^2$ e $G_{min} = 1249 W/m^2$, é $S_e = 1,69\%$, de acordo com (3.2), classificando o simulador como Classe A, conforme Tabela 3.1, pois S_e é menor que 2%.

A distribuição espectral da lâmpada usado no protótipo do simulador solar é ilustrada na Figura 5.7. O modelo da lâmpada halógena é Philips Plusline Large de 2000W e temperatura de cor de 2900 K. A distribuição espectral da lâmpada é comparada com AM1,5 como referência.

É necessário a classificação do simulador solar para a distribuição do espectro. É realizada comparação da potência para cada faixa de comprimento de onda, de acordo com Tabela 3.2, e classificado de acordo com Tabela 3.1 para cada intervalo. A classificação total do simulador solar é o pior caso da conformidade com o espectro medido de todos os intervalos.

A Tabela 5.1 apresenta a conformidade como espectro em relação a AM1,5, classificado com referência a Tabela 3.1, para cada intervalo de comprimento de onda. Nota-se que

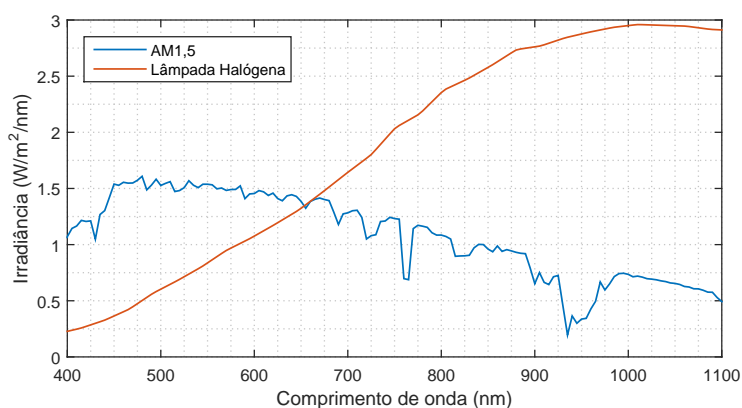


Figura 5.7 - Distribuição do espectro da lâmpada halógena usada no protótipo.

não foi possível classifica-la para algumas faixas de comprimento de onda, tornando este o pior caso. Portanto, não é factível a classificação do simulador solar consoante a norma da IEC para dispositivos comerciais.

Tabela 5.1 - Classificação do protótipo com a conformidade do espectro.

Intervalo de comprimento de onda (nm)	Conformidade com o espectro (S_p)	Classe
400 - 500	0,2185	-
500 - 600	0,2695	-
600 - 700	0,7314	Classe B
700 - 800	1,7225	Classe C
800 - 900	2,6624	-
900 - 1100	5,6555	-

A classificação geral do simulador obedece a Tabela 3.1, sendo escolhido o pior índice de classificação. Conforme Tabela 5.2 protótipo de bancada laboratorial desenvolvido não pode ser classificado como simulador solar comercial.

Tabela 5.2 - Classificação geral do protótipo de simulado solar desenvolvido.

Característica	Classe
Equivalência com o espectro padrão (S_p)	-
Não-uniformidade (S_u)	-
Estabilidade Temporal (S_e)	Classe A

5.1.1 Testes de eficiência energética usando bancada não otimizada

Usando o protótipo da bancada laboratorial desenvolvida, foi elaborado experimento para teste de eficiência na conversão energética de painel fotovoltaico. Sabendo que a temperatura influencia negativamente a conversão da radiação solar em eletricidade, aplicou-se água na superfície do painel com propósito de retirar a maior quantidade de calor do painel fotovoltaico. O balanço de energia sobre o dispositivo é descrito na Figura 2.16. Foi aplicado diferentes vazões de água: 1, 2, 3 e 4 litros por minuto.

O painel fotovoltaico sobre teste é fabricado pelo Tecnometal, modelo SV140D12, de 140 Watts-pico (Wp), cujas características são apresentadas na Tabela 4.1.

O simulador solar foi fixado com irradiância de $800W/m^2$, para que todos os testes sejam realizados sobre mesma condições de iluminação. O aparato é disposto em sala fechada com finalidade de isolar a influência de agentes externos, como temperatura e radiação solar. Durante 30 minutos o painel fotovoltaico, sem arrefecimento, foi exposto ao simulador solar. Foi registrado dados de: temperatura do painel, tensão de máxima potência e corrente de máxima potência. A medição realizado com o dispositivo fotovoltaico sem sistema de resfriamento é tomado como referência para as medições realizadas quando o painel é submetido a escoamento de água em sua superfície.

A Figura 5.8 representa a temperatura de operação do módulo fotovoltaico em função do tempo em segundos. Nota-se que o painel fotovoltaico sem sistema de resfriamento atinge temperatura elevadas, próximo de $70^{\circ}C$. Há redução significativa aplicando-se água na superfície do módulo, reduzindo cerca de $20^{\circ}C$ no fim do intervalo de medição.

Esperava-se relação direta da redução de temperatura com aumento de vazão de água, entretanto a Figura 5.8 ilustra comportamento diferente. A Figura 5.9 ilustra imagem térmica do painel fotovoltaico quando é aplicado água a taxa de vazão de 2 litros por minuto. Observando a imagem térmica, percebe-se aleatoriedade no caminho percorrido pela água na superfície do módulo, deixando pontos mais quentes, como representa a Tabela 5.3.

O sensor de temperatura, fixado na parte central traseira do painel fotovoltaico, realiza aquisição dos dados. Como a trajetória da água na superfície do módulo é aleatória, o sensor se expõe a variação de temperatura na microrregião que está fixado, justificando variabilidade nos dados apresentados na Figura 5.8 e a não relação direta da redução de temperatura com aumento da vazão de água.

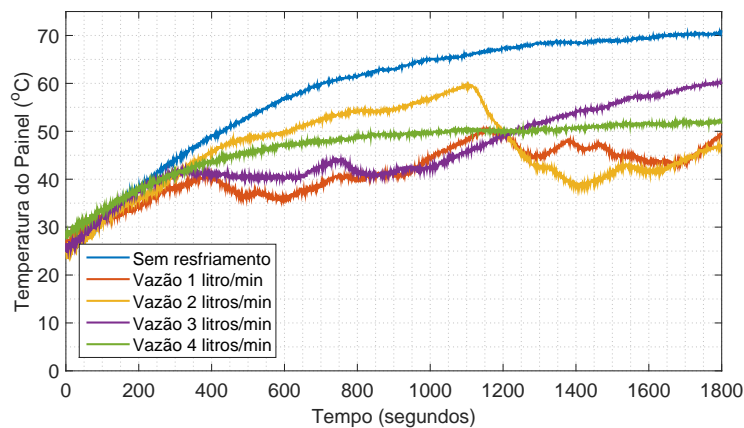


Figura 5.8 - Influência do escoamento de água na superfície do módulo fotovoltaico em referência ao painel sem resfriamento.

Constatou-se que quanto maior a vazão do fluido refrigerante sobre o módulo fotovoltaico, maior é a tendência de estagnação da trajetória da água, contribuindo, assim, com o surgimento de pontos mais quentes, como destaca a Tabela 5.3. A aleatoriedade na trajetória da água contribui para o arrefecimento de toda área do painel, pois favorece a troca de calor em todos pontos. Sendo assim, nota-se que a vazão de água que contribuir com maior índice de aleatoriedade na trajetória resultará em melhor arrefecimento do módulo.

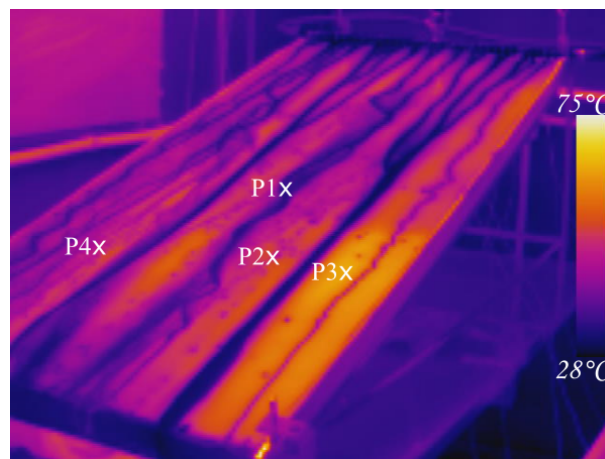


Figura 5.9 - Imagem térmica do painel fotovoltaico quando submetido a vazão de 2 litros por minuto.

Quando o painel fotovoltaico é resfriado, a tensão aumenta com taxa maior que a redução da corrente. O gráfico ilustrado na Figura 5.10, revela aumento de tensão quando usado técnica de refrigeração. Para vazão de 2 litros por minuto há maior aleatoriedade na tra-

Tabela 5.3 - Temperaturas indicadas pelo termovisor para vazão de 2 litros por minuto.

Marcadores	Temperatura (°C)
P1	34,5
P2	40,1
P3	58,3
P4	38,8

jetória da água, evidenciando melhor arrefecimento do módulo, pois favorece a troca de calor em toda área do painel e conseqüentemente resulta em nível maior de tensão. Como para as outras vazões a trajetória percorrida pela água sobre a superfície do painel permaneceu estagnada, o surgimento de áreas quentes impactou negativamente o incremento na tensão.

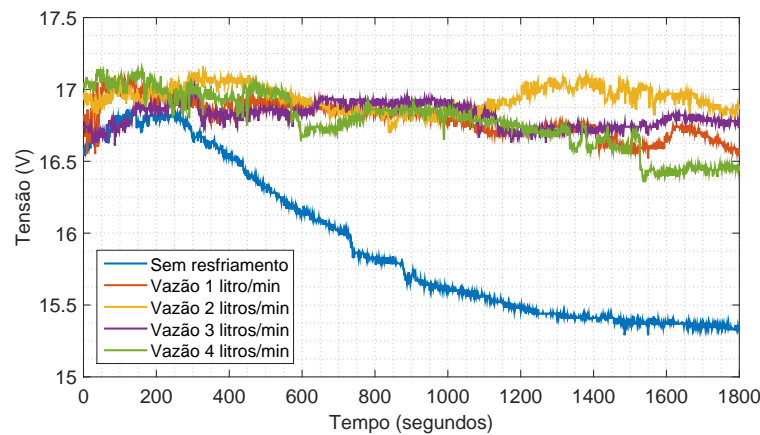


Figura 5.10 - Influência da temperatura de operação do módulo na tensão de máxima potência para diferentes vazões de água.

A corrente não é intensamente afetada pela temperatura, como observado na Figura 5.11, permanecendo constante durante todo intervalo de medição.

A irregularidade da camada de água sobre o painel fotovoltaico pode gerar desvio no balanço energético, apresentado na Figura 2.16, que pressupõe camada de água uniforme, causando mutação no ponto de máxima potência. A potência gerada quando o dispositivo fotovoltaico é submetido a resfriamento por água aumenta em conformidade com a variação da tensão, visto que a corrente permanece praticamente constante. A taxa de vazão de água que proporciona maior geração de potência é de 2 litros por minuto, como apresenta a Figura 5.12.

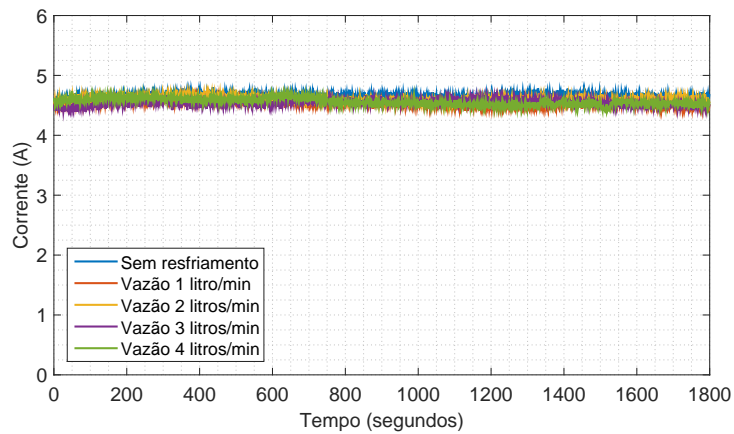


Figura 5.11 - Influência da temperatura de operação do módulo na corrente de máxima potência para diferentes vazões de água.

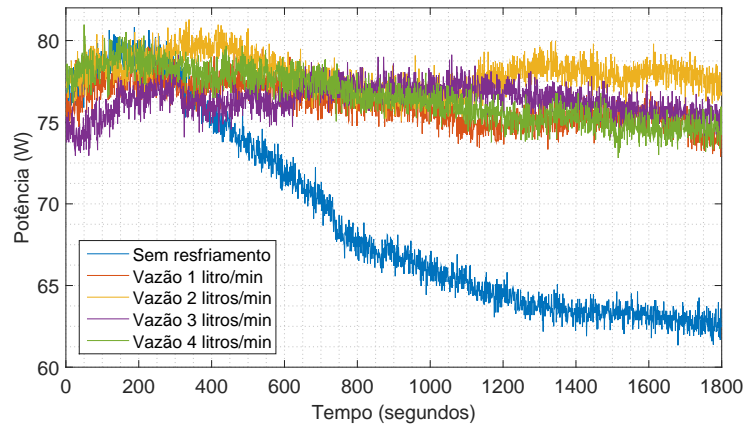


Figura 5.12 - Influência da temperatura de operação do módulo no ponto de máxima potência para diferentes vazões de água.

A taxa (Kp) da variação de potência pela variação de temperatura é obtida pelos dados da Figura 5.12 e Figura 5.8, calculado em (5.2), a partir dos dados potência $P_s = 62\text{ W}$, $P_c = 77\text{ W}$ e temperatura $^{\circ}C_s = 70\text{ W}$, $^{\circ}C_c = 50\text{ W}$, que resulta em $Kp = -0,75\text{W}/^{\circ}C$:

$$Kp = \frac{P_s - P_c}{^{\circ}C_s - ^{\circ}C_c} \quad (5.2)$$

onde P_s e P_c representam a de potência final do sistema sem resfriamento e com resfriamento à vazão de 2 litros por minuto, respectivamente. $^{\circ}C_s$ e $^{\circ}C_c$ são a temperatura para os mesmos pontos de potência medidos. Portanto, há perda de aproximadamente 0,75 W

para aumento de cada grau na temperatura do módulo.

É calculado a potência média produzida pelo módulo, com base na Figura 5.12 e avaliado o ganho na eficiência de conversão energética, a partir de (2.13). A Tabela 5.4 indica o ganho de eficiência para cada taxa de vazão de água em relação ao painel sem resfriamento.

Tabela 5.4 - Potência produzida e ganho de eficiência para cada taxa de vazão de água.

Vazão de água (L/min)	Potência média (W)	Ganho de eficiência (%)
Sem resfriamento	68.70	-
1	75.64	10,10
2	77.59	12,94
3	75.94	10,53
4	76.16	10,85

A partir da técnica usada, é observado que a vazão de 2 litros por minuto proporciona 12,94% de aumento na eficiência de conversão energética. Esse resultado evidencia que a relação entre ganho de potência gerada pela vazão não é diretamente proporcional, tendo em conta que a trajetória percorrida pela água nas diferentes vazões divergem-se e tendem a permanecer estagnadas para vazões mais altas, diminuindo o arrefecimento na área total do módulo fotovoltaico e contribuindo com o surgimento de pontos mais quentes. Para essa vazão, obteve-se distribuição de água na maior parte da superfície do painel fotovoltaico, diminuindo a temperatura de toda área, proporcionando ganho expressivo de tensão e consequentemente de potência.

Vale destacar, ainda, que elevado fluxo de água sobre o painel fotovoltaico pode resultar em perdas maiores por reflexão (Q_r) dos raios luminosos na camada de água, como indica o balanço energético da Figura 2.16.

5.2 Bancada laboratorial otimizada

Haja vista que as características do protótipo de bancada laboratorial não podem ser classificadas como simulador solar comercial, é realizada otimização do parâmetro de não-uniformidade da luminária a fim de que se obtenha melhor classificação possível. Os parâmetros de conformidade com o espectro padrão e estabilidade temporal depende da escolha da lâmpada com base na folha de dados do fabricante.

Com base no fluxograma da Figura 4.10 definiu-se algoritmo genético com intuito de otimizar a não-uniformidade de irradiância do simulador solar. A princípio o algoritmo gera

população inicial de 50 indivíduos aleatoriamente dentro do conjunto universo restrito por (4.2), como discutido na Seção 4.2.1. Três genes, a , b e p , são modificados com propósito de minimizar a função objetivo, alvo de avaliação do algoritmo. Como deseja-se otimizar a não-uniformidade do simulador solar, a escolha da função de avaliação converge a minimização de (3.1), que leva em conta a variação da intensidade de radiação solar sobre o plano alvo.

Após criação da população inicial, cada indivíduo é avaliado com base na função de avaliação. O critério de parada é definido pela quantidade de gerações Q_g . Se $Q_g \geq 100$, então o algoritmo encerra o processo de iteração, como apresenta a Figura 4.10. Definiu-se o critério de parada com base no elevado custo computacional da simulação envolvendo Ray Tracing e no exagerado tempo gasto em cada iteração.

De posse da avaliação de todos os indivíduos, se não atingido o critério de parada, armazena-se o melhor indivíduo da geração, seleciona-se 4 indivíduos por torneio, realiza-se crossover de genes, executa-se mutação dos genes, gera-se nova população e repete-se o processo com a geração recém criada.

A Figura 5.13 apresenta a função de avaliação do melhor indivíduo por cada geração, sendo que o seu valor converge para 0.0764 na centésima geração.

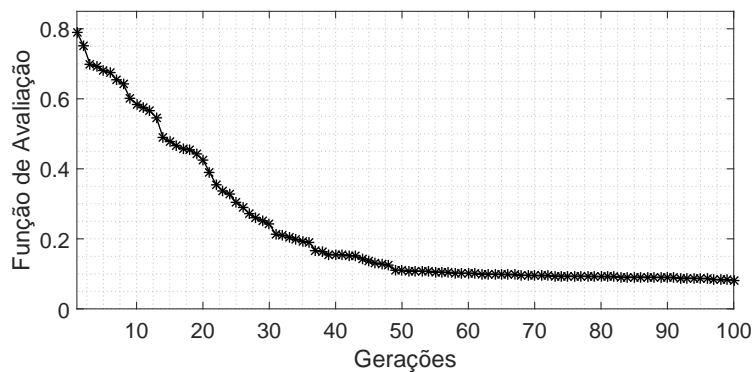


Figura 5.13 - Evolução da função de avaliação para cada geração do algoritmo genético.

A resposta do algoritmo indica conjunto de soluções que apresentam valores adequados para os genes a , b e p , os parâmetros do algoritmo genético e a função de avaliação para cada indivíduo, como mostra a Tabela 5.5. São apresentados os 5 melhores indivíduos da última geração que representam as possíveis soluções de otimização. Para todas as

soluções apresentadas é possível construir o simulador solar observando-se os valores de a , que indica a curvatura da luminária; b , que representa a altura do cume da luminária em relação ao plano alvo e p , que representa largura simétrica da luminária em relação ao eixo das abscissas, como descreve (4.1) em relação a Figura 4.12.

Tabela 5.5 - Conjunto de respostas da otimização do sistema.

Indivíduo	Genes			Parâmetros		Função de avaliação
	a	b	p	G_{max}	G_{min}	
1	-0,7603	0,755	0,8157	173,04	148,46	0,0764
2	-0,7633	0,755	0,8176	172,93	147,37	0,0798
3	-0,7601	0,755	0,8149	173,51	146,98	0,0827
4	-0,7615	0,755	0,8193	173,48	146,72	0,0835
5	-0,7681	0,755	0,8313	173,71	145,38	0,0887

Escolheu-se o indivíduo que apresenta menor valor da função de avaliação para construção do simulador solar. A Figura 5.14 representa a resposta da simulação, para o indivíduo 1, que mostra a distribuição da intensidade de radiação luminosa incidente sobre plano alvo de 1 metro por 1,7 metros.

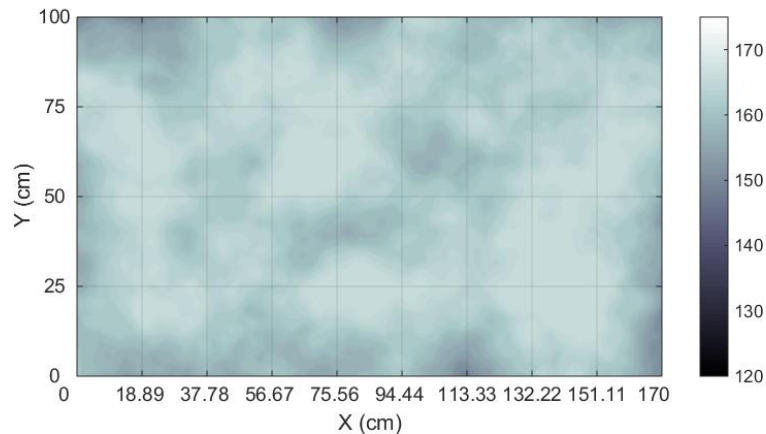


Figura 5.14 - Simulação da irradiância, em W/m^2 , do simulador solar otimizado sobre painel fotovoltaico.

A não-uniformidade simulada do simulador solar otimizado (S_{uos}) é calculada com base em (3.1). São levados em conta os valores de irradiância G_{max} e G_{min} sobre a área de interesse, Figura 5.14, para o indivíduo 1, resultando em $S_{uos} = 7,64\%$.

O simulador solar construído com base nos parâmetros otimizados é representado na

Figura 5.15, na qual: i) representa a lâmpada utilizada, ii) é o painel fotovoltaico em teste e iii) é o compartimento dos componentes eletro-eletrônicos construídos.

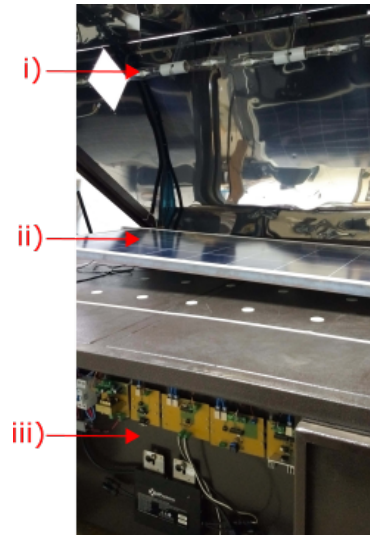


Figura 5.15 - Perspectiva geral da bancada otimizada desenvolvida.

A Figura 5.16 representa o detalhamento da disposição dos equipamentos eletrônicos confeccionados, na qual: i) são os disjuntores de energização do sistema; ii) é a fonte de alimentação; iii) é o conversor RS-232/RS-485; iv) é o sensor de tensão e corrente; v) **datalogger** de temperatura; vi) circuito de controle da temperatura interna da luminária e; vii) é o microinversor de frequência conectado aos terminais do painel fotovoltaico.

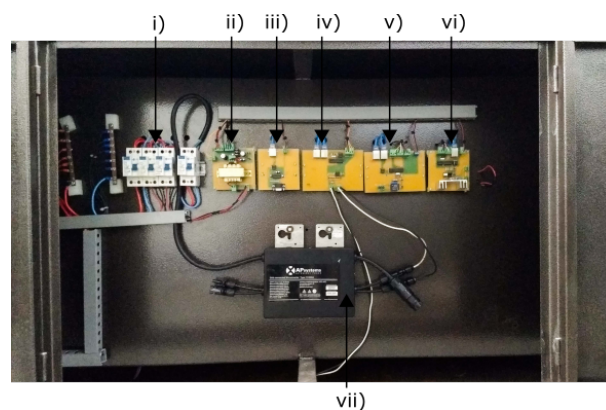


Figura 5.16 - Conjunto de placas eletrônicas desenvolvidas.

A Figura 5.17 ilustra a perspectiva interna do simulador solar desenvolvido, na qual: i)

representa a lâmpada utilizada, ii) é o exaustor para controle da temperatura interna da luminária; iii) é o painel fotovoltaico em teste e; iv) são os terminais de conexão do painel fotovoltaico com o microinversor de frequência.

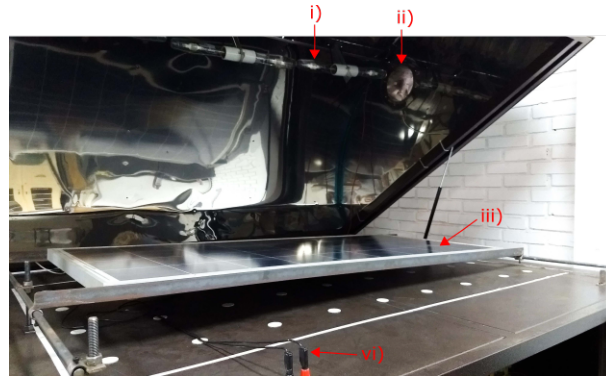


Figura 5.17 - Vista interna da bancada otimizada desenvolvida.

A não-uniformidade medida do simulador solar otimizado (S_{uom}) é calculada com base em (3.1). A Figura 5.18 ilustra a distribuição de irradiância medida incidente no plano alvo. Foi usado medidor de potência solar TES-1333 para medição da irradiância em 36 pontos da superfície do plano alvo, divididos em 9 partes no eixo X e 4 partes no eixo Y . Os valores de $G_{max} = 166.6W/m^2$ e $G_{min} = 136.4W/m^2$ resultam em $S_{uom} = 9.96\%$.

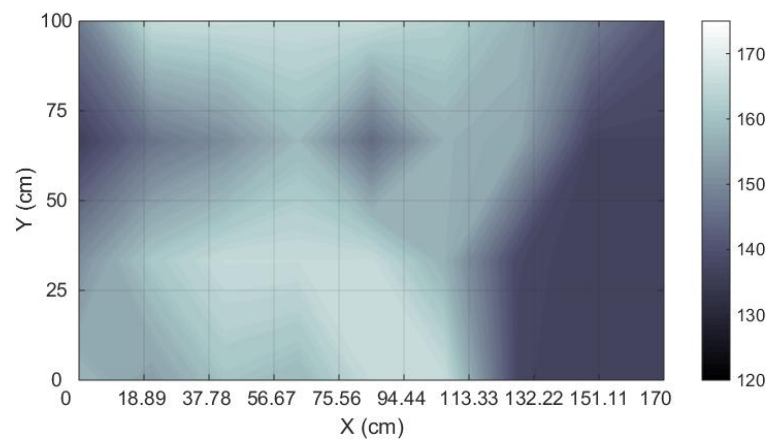


Figura 5.18 - Valores medidos da irradiância, em W/m^2 , do simulador solar otimizado sobre painel fotovoltaico.

O erro relativo da não-uniformidade simulada e medida do simulador solar otimizado é calculado em (5.3)

$$E_r = \left| \frac{S_{uos} - S_{uom}}{S_{uos}} \right| \cdot 100 = 30,36\% \quad (5.3)$$

A diferença entre a não-uniformidade simulada e medida dá-se pelas características não ideais dos materiais usados na construção e principalmente da manufatura do simulador solar, pois pequenas variações nos valores dos genes a e p , resultam em grandes variações na função de avaliação, como observado na Tabela 5.14. O perfeito alinhamento das lâmpadas, a curvatura e o índice de reflexão da luminária dificilmente aproximam-se com exatidão dos parâmetros otimizados. O valor medido é aceitável apesar do grande erro relativo entre a não-uniformidade simulada e medida, pois o simulador solar pode ser classificado com Classe C, de acordo com a norma IEC 904-9.

Outro parâmetro de classificação é a conformidade de distribuição do espectro da lâmpada. A Figura 5.19 apresenta a distribuição do espectro para a lâmpada de haleto metálico Osram HQI-BT 400 W/D PRO adquirida da folha de dados e comparada com o espectro padrão AM1,5.

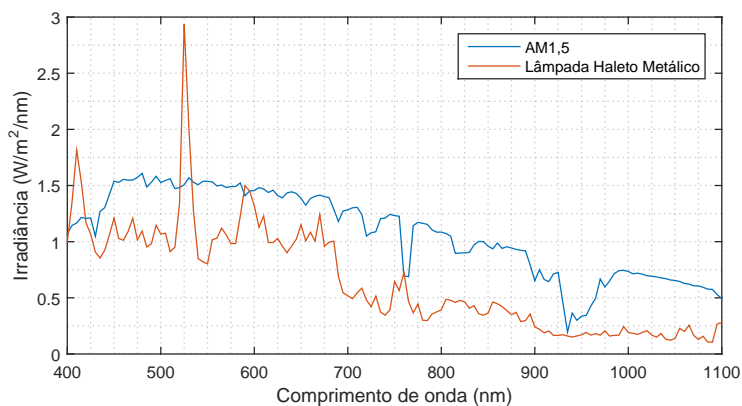


Figura 5.19 - Distribuição espectral da lâmpada usada na bancada laboratorial otimizada.

O valor da distribuição do espectro para cada intervalo de comprimento de onda é apresentado na Tabela 5.6. Pode-se classifica-la como Classe C.

A estabilidade temporal S_e , calculada a partir de (3.2), é função da variação da irradiância medida em um ponto no intervalo de 60 minutos. O medidor solar TES-1333 foi usado para realizar as medições, posicionando-o no centro do plano alvo. A Figura 5.20 representa a estabilidade temporal do simulador solar otimizado.

Tabela 5.6 - Classificação da banca laboratorial otimizada em relação a conformidade com o espectro padrão.

Intervalo de comprimento de onda (nm)	Conformidade com o espectro	Classe
400 - 500	1,0400	Classe A
500 - 600	0,8238	Classe A
600 - 700	0,7723	Classe A
700 - 800	0,4081	Classe C
800 - 900	0,4190	Classe C
900 - 1100	0,4288	Classe C

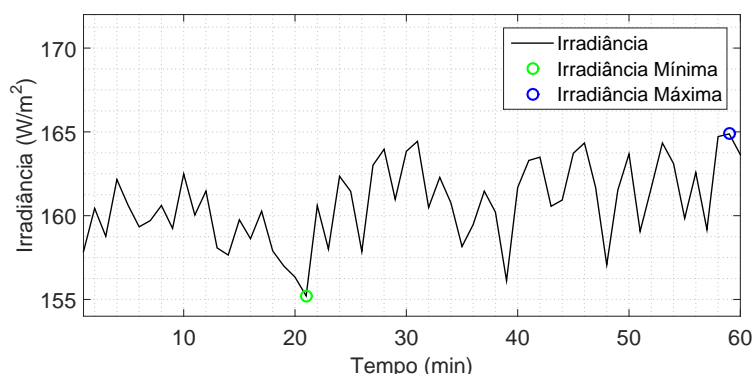


Figura 5.20 - Intensidade da irradiação durante 60 minutos medidos no simulador solar otimizado.

Para $G_{max} = 164.9 \text{ W/m}^2$ e $G_{min} = 155.2 \text{ W/m}^2$ tem-se $S_e = 3.03\%$, classificando o simulador solar como Classe B de acordo com a norma IEC 904-9.

A classificação geral do simulador solar otimizado obedece a Tabela 3.1, sendo escolhido o pior índice de classificação. Conforme Tabela 5.7 a bancada laboratorial desenvolvida pode ser classificada como simulador solar comercial Classe C.

Tabela 5.7 - Classificação geral do simulador solar otimizado.

Característica	Classe
Equivalência com o espectro padrão (S_p)	Classe C
Não-uniformidade (S_u)	Classe C
Estabilidade Temporal (S_e)	Classe B

Observa-se na Figura 5.21 a geometria da seção transversal da luminária do protótipo e do simulador solar otimizado. É representado, também, o painel fotovoltaico (SV140D12 da Metaltec) sobre teste. O protótipo desenvolvido tem pior índice de não uniformidade

e menor área de trabalho se comparado ao simulador solar otimizado. O protótipo tem capacidade para iluminar área de aproximadamente 0,66 por 1,48 metros, enquanto o simulador solar otimizado ilumina área de 1 por 1,7 metros. O aparato otimizado mostra-se mais adequado que o protótipo desenvolvido para testes de eficiência energética, pois trata-se de simulador solar Classe C de acordo com a norma IEC 904-9.

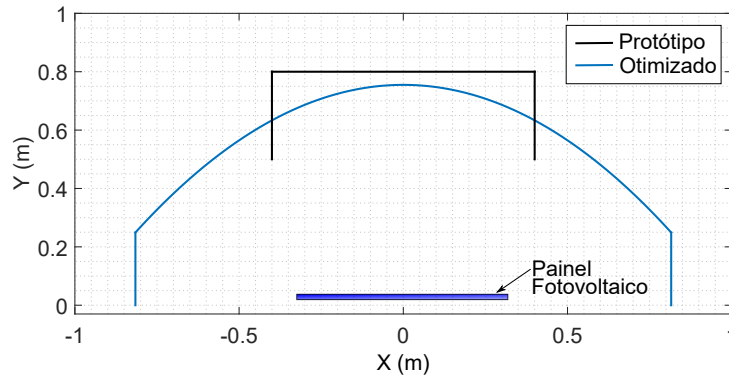


Figura 5.21 - Geometria do protótipo sobre o otimizado.

O valor médio de irradiância do protótipo ($800W/m^2$), mostra-se mais adequado ao valor exigido para os testes de levantamento da curva característica de painéis fotovoltaicos sobre teste. O valor médio de irradiância do simulador solar otimizado é de $152W/m^2$. O problema pode ser corrigido com a substituição das lâmpadas Osram HQI-BT 400 W/D PRO por outras similares de maior potência.

5.2.1 Característica elétrica do painel fotovoltaico usando bancada otimizada

É realizado ensaio experimental a fim de comparar as propriedades elétricas do painel fotovoltaico SV140D12, Tabela 4.1, quando simulado através de algoritmo computacional usando aproximação do circuito equivalente com um diodo, Figura 2.10, e as propriedades elétricas medidas usando o simulador solar otimizado.

Para a simulação das características elétricas é levado em conta os dados de placa do painel fotovoltaico SV140D12, Tabela 4.1 quando submetido a irradiância média de $152 W/m^2$ a temperatura de operação de $47^{\circ}C$. Para a simulação usa-se valores de $R_{sh} = 157,2\Omega$ e $R_s = 0,159\Omega$, obtidos através de algoritmo de otimização, Apêndice B.1 e Apêndice B.2, baseados em (2.4), (2.8) e (2.9). A irradiância média foi escolhida com base nos valores medidos no simulador solar otimizado, Figura 5.18. A temperatura escolhida dá-se a partir

do gráfico da Figura 5.22, que representa a evolução da temperatura de operação do módulo fotovoltaico em função do tempo quando submetido a teste no simulador solar otimizado. Observa-se que a temperatura tende a estabilizar em aproximadamente 47°C .

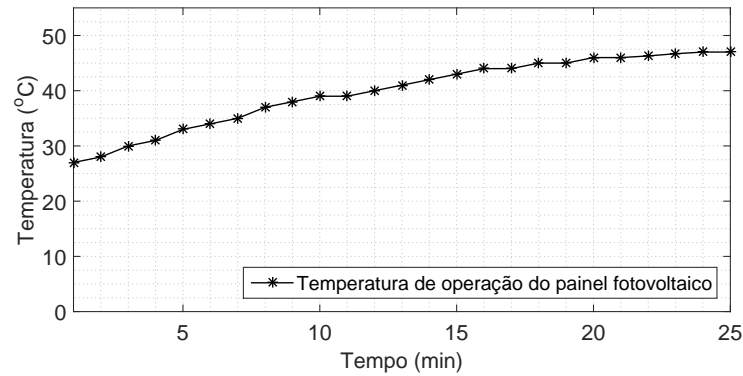


Figura 5.22 - Evolução da temperatura de operação do painel fotovoltaico quando submetido a teste no simulador solar otimizado.

A análise comparativa entre os valores das características elétricas simuladas do painel fotovoltaicos modelo SV140D12, e medidos usando o simulador solar otimizado desenvolvido, é realizada a fim de garantir a aproximação dos resultados teóricos e práticos.

Variando-se a impedância conectada ao painel fotovoltaico, usando um reostato, é possível obter a curva característica do painel fotovoltaico da corrente pela tensão. A Figura 5.23 representa os pontos medidos da curva característica do painel fotovoltaico, sobre irradiância média de $152\text{ W}/\text{m}^2$; a regressão não linear dos pontos medidos e a curva característica simulada com irradiância média de $152\text{ W}/\text{m}^2$ e temperatura de operação do módulo fotovoltaico de 47°C .

A qualidade do ajuste, calculado pelo Erro da Raiz Média Quadrada (RMSE) entre a curva simulada e a regressão não linear da curva característica medida é igual a 0,12. Quanto menor o valor de RMSE melhor a qualidade de ajuste.

A Figura 5.24 representa a curva elétrica do painel fotovoltaico da potência pela tensão, quando simulado com irradiância de $152\text{ W}/\text{m}^2$ a temperatura de operação de 47°C , e medido, quando a irradiância segue o padrão de distribuição da Figura 5.18, na qual o ponto de máxima potência do painel fotovoltaico pode ser visualizado para a curva simulada e medida. A potência máxima simulada é 17.69 W e a medida é 19.21 W ,

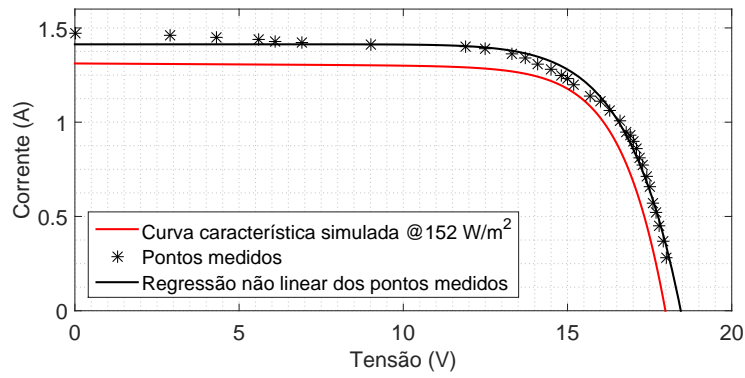


Figura 5.23 - Dados da característica elétrica do painel fotovoltaico sobre teste no simulador solar otimizado.

resultando em erro relativo de 8.6%.

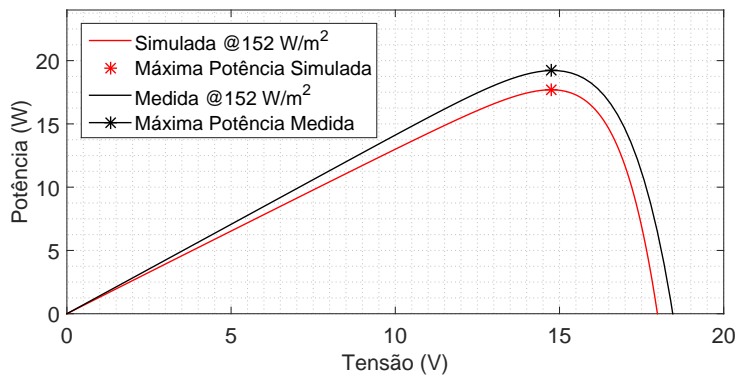


Figura 5.24 - Potência elétrica simulada e medida.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver bancada laboratorial com distribuição de radiação luminosa otimizada para teste de eficiência energética em dispositivos fotovoltaicos, quando submetido a resfriamento com água.

O trabalho foi dividido na construção de protótipo e posteriormente na fabricação da bancada otimizada. Os equipamentos possuem sensores de tensão e corrente do ramo CC para verificação da máxima potência, além de conversores de energia com algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência. É usado sensor de temperatura em contato com a superfície do painel para medição da temperatura de operação do módulo fotovoltaico.

Na primeira etapa, de desenvolvimento do protótipo de simulador solar, as características de não-uniformidade, conformidade com espectro padrão e estabilidade temporal, do aparato, mostraram-se inadequadas para classificação comercial em referência as normas da IEC 904-4.

Entretanto, o protótipo da banca laboratorial, ou simulador solar, proporciona dados para análise da eficiência energética na conversão de radiação luminosa em eletricidade através de técnica da aplicação de água na superfície frontal do painel fotovoltaico. Esta técnica de arrefecimento do módulo promove ganho de 12,94% na geração de energia quando aplicado vazão de água de 2 litros por minuto. Além de proporcionar maior geração de energia, o sistema de arrefecimento limpa a superfície do módulo fotovoltaico, diminuindo gastos periódicos com limpeza.

A fabricação da bancada laboratorial otimizada considera os resultados obtidos por otimização utilizando algoritmo genético, que evidencia não-uniformidade Classe C, conformidade com espectro padrão Classe C e estabilidade temporal Classe B. A classificação comercial geral do aparato é, portanto, definido como Classe C, de acordo com as normas IEC 904-9.

A comparação entre as características elétricas do painel fotovoltaico simuladas e medidas no simulador solar otimizado, mostram conformidade entre os dados teóricos e práticos. O erro RMSE medido é de apenas 0,12 entre o dados da curva característica simulada e a medida. O erro relativo do ponto de máxima potência entre os dados simulados e medidos é de 8,6%. O valores confirmam a eficácia do aparato desenvolvido para teste de

eficiência energética, pois há grande conformidade entre as características do espectro e temperatura ambiente do simulador solar com os padrões do sol.

6.1 Contribuições do Trabalho

Este trabalho faz parte do Projeto de Pesquisa CNPQ 468544/2014-3, intitulado "Estudos de viabilidade técnica e econômica, do uso de água para melhoria da eficiência da conversão de painéis fotovoltaicos", que visa pesquisa, projeto e implantação de uma estrutura laboratorial e usina de geração fotovoltaica, para subsidiar estudos técnicos e análises econômicas, para avaliar diferentes metodologias e soluções tecnológicas bem como as relações de custo benefício do uso de águas residuais na melhoria da eficiência de conversão (FV).

As contribuições do trabalho podem, assim, ser descritas:

Artigos em revista:

- **Increasing photovoltaic panel power through water cooling technique**
Publicado em Transactions on Environment and Electrical Engineering (TEEE), Vol 2, No 1 (2017), páginas 60-66.
DOI: 10.22149/teee.v2i1.90

Artigos em congresso:

- **Electrical performance evaluation of PV panel through water cooling technique**
Publicado em 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016 IEEE.
Congresso realizado nos dias 7-10 de julho de 2016, em Florença, Itália.
DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555643

Patentes:

- **Bancada de simulação solar com distribuição uniforme de irradiância para testes de eficiência energética em painéis fotovoltaicos.**
Número do pedido: BR 10 2018 004505 9.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Propor sistema eletrônico para dimerização das lâmpadas da bancada laboratorial otimizada, a fim de controlar a intensidade luminosa incidente sobre o plano alvo.
- Propor metodologia para melhora de classificação geral do aparato de acordo com a norma da IEC.
- Desenvolver estudo de otimização para minimização da vazão de água sobre o painel fotovoltaico que proporciona melhor rendimento.
- Desenvolver mecanismo para melhora da distribuição de água na superfície do painel fotovoltaico.
- Substituição das lâmpadas do simulador solar otimizado por similares de maior potência, objetivando aumentar a irradiância incidente no plano alvo.

APÊNDICE A

Circuito conversor Boost

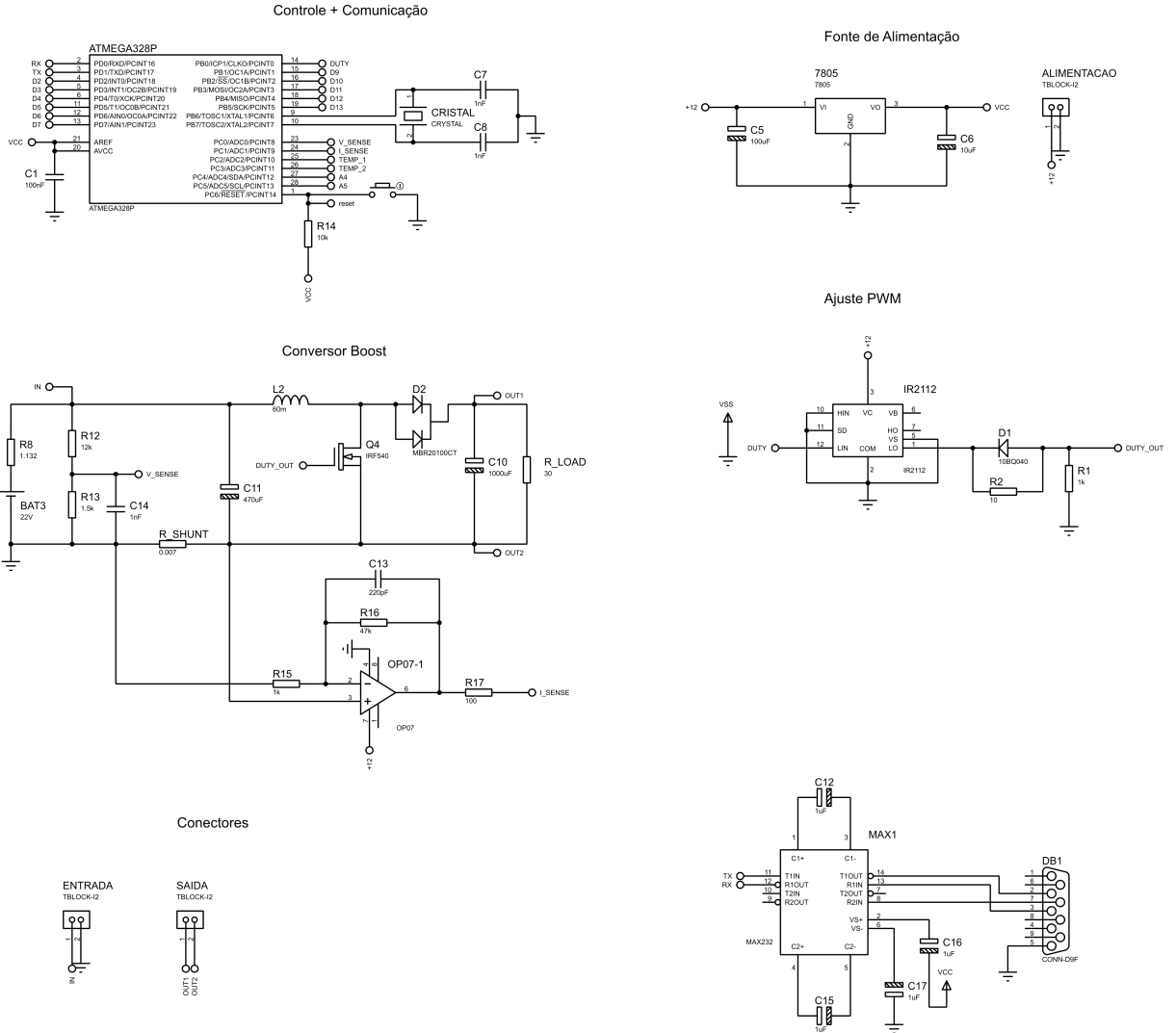


Figura A.1 - Circuito completo do conversor Boost.

APÊNDICE B

Códigos usados para simulação.

B.1 Função de otimização das resistências série e paralela.

mainOt.m

```
1 clear all; format long; clc; warning off;
2 x0 = [500 0.1]; %Chute inicial para [Rs Rsh]
3 [x, fval] = fminsearch(@ot, x0) %Otimização
```

B.2 Código de otimização.

ot.m

```
1 function error = ot( x )
2 %%
3 %Painel fotovoltaico SV140D12 140W
4 VocSTC=22.2; % Tensão em circuito aberto (STANDARD)
5 IscSTC=8.36; % Corrente em curto circuito (STANDARD)
6 VmpSTC=18; % Tensão na máxima potência (STANDARD)
7 ImpSTC=7.67; % Corrente na máxima potência (STANDARD)
8 ki=2.3e-3; % Coeficiente de temperatura de I
9 kv=-0.95e-1; % Coeficiente de temperatura de V
10 ns=36; % Número de células da placa
11 PmpE=138.06; % Potência máxima
12
13 %Constantes
14 k=1.3806503E-23; %constante de Boltzmann
15 q=1.60217646E-19; %carga do eletron
16 a1=1.2; %fator de idealidade do diodo
17
18 %Temperatura e Radiação
19 Tstc=25+273.15; %Temperatura operação (STANDARD)
20 Gstc=1000; %Irradiância (STANDARD)
21
22 %Resistências
23 Rp=x(1);
24 Rs=x(2);
```

```

25
26 %Inicialização das variáveis
27 G=[1000]; %Irradiância de operação
28 Tv=25; %Temperatura de operação
29 T(1:length(G))=Tv+273.15;
30 sizeT=size(G);
31 z=1;
32
33 %%
34 %Cálculo da corrente e potência
35 while z<=sizeT(2);
36     Vt=k*T(z)/q;
37     I01=(IscSTC+ki*(T(z)-Tstc))/(exp(q*(VocSTC+kv*(T(z)-Tstc))
38         /...
39         (ns*k*T(z)*a1))-1);
40     Iph=((IscSTC+ki*(T(z)-Tstc))*G(z)/Gstc);
41     %Voc=ns*a1*Vt*log(Iph/I01);
42     V=[0:0.01:VocSTC];
43     sizeV=length(V);
44     I=[1:sizeV];
45     P=[1:sizeV];
46
47     smallpositive=0.001;
48     j=1;
49     while(j<=sizeV)
50         f=1;
51         while(abs(f)>smallpositive)
52             Id1=I01*(exp(q*(V(j)+I(j)*Rs)/(ns*k*T(z)*a1))-1);
53             f=Iph-Id1-V(j)/Rp-I(j)*Rs/Rp-I(j);
54             fline=-I01*Rs*q/(a1*ns*k*T(z))*exp((V(j)+I(j)*Rs)*q
55                 /...
56                 (a1*ns*k*T(z)))-Rs/Rp-1;
57             I(j)=I(j)-f/(fline);
58             P(j)=V(j)*I(j);
59         end;

```

```

59         j=j+1;
60     end;
61
62     z=z+1;
63 end
64
65 %%
66 %Erro
67
68 error = abs(max(P) - PmpE)
69
70 end

```

B.3 Código de simulação do painel fotovoltaico.

```

                                curva.m
1  clc; clear all; close all; warning off;
2  %%
3  %Painel fotovoltaico SV140D12 140W
4  VocSTC=22.2; % Tensão em circuito aberto (STANDARD)
5  IscSTC=8.36; % Corrente em curto circuito (STANDARD)
6  VmpSTC=18; % Tensão na máxima potência (STANDARD)
7  ImpSTC=7.67; % Corrente na máxima potência (STANDARD)
8  ki=2.3e-3; % Coeficiente de temperatura de I
9  kv=-0.95e-1; % Coeficiente de temperatura de V
10 ns=36; % Número de células da placa
11 PmpE=138.06; % Potência máxima
12
13 %Constantes
14 k=1.3806503E-23; %constante de Boltzmann
15 q=1.60217646E-19; %carga do eletron
16 a1=1.2; %fator de idealidade do diodo
17
18 %Temperatura e Radiação
19 Tstc=25+273.15; %Temperatura operação (STANDARD)
20 Gstc=1000; %Irradiância (STANDARD)

```

```

21
22 %Resistências
23 Rp=157.2;
24 Rs=0.159;
25
26 %Inicialização das variáveis
27 G=[1000]; %Irradiância de operação
28 Tv=25; %Temperatura de operação
29 T(1:length(G))=Tv+273.15;
30 sizeT=size(G);
31 z=1;
32
33 %%
34 %Cálculo da corrente e potência
35 while z<=sizeT(2);
36     Vt=k*T(z)/q;
37     I01=(IscSTC+ki*(T(z)-Tstc))/(exp(q*(VocSTC+kv*(T(z)-Tstc))
38         /...
39         (ns*k*T(z)*a1))-1);
40     Iph=((IscSTC+ki*(T(z)-Tstc))*(G(z)/Gstc);
41     Voc=ns*a1*Vt*log(Iph/I01);
42     V=[0:0.01:Voc];
43     sizeV=length(V);
44
45     I=[1:sizeV];
46     P=[1:sizeV];
47
48     smallpositive=0.001;
49     j=1;
50     while(j<=sizeV)
51         f=1;
52         while(abs(f)>smallpositive)
53             Id1=I01*(exp(q*(V(j)+I(j)*Rs)/(ns*k*T(z)*a1))-1);
54             f=Iph-Id1-V(j)/Rp-I(j)*Rs/Rp-I(j);
55             fline=-I01*Rs*q/(a1*ns*k*T(z))*exp((V(j)+I(j)*Rs)*q
56                 /...

```

```

55         ( a1*ns*k*T(z) )-Rs/Rp-1;
56         I(j)=I(j)-f/(fline);
57         P(j)=V(j)*I(j);
58     end;
59     j=j+1;
60 end;
61
62     z=z+1;
63 end
64
65 %%
66 %Gráficos
67 figure(1)
68 plot(V,P, 'Color', 'r', 'linewidth',1)
69 xlabel('Tensão (V)');
70 ylabel('Potência (W)');
71 axis([0 25 0 1.1*max(P)]);
72 legend('Potência');
73 grid minor;
74
75 figure(2)
76 plot(V,I, 'Color', 'r', 'linewidth',1)
77 hold on;
78 xlabel('Tensão (V)')
79 ylabel('Corrente (A)')
80 axis([0 25 0 max(I)*1.1])
81 legend('Corrente')
82 grid minor

```


REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABHAY, M. M. V.; PAVITHRAN, J.; OSTEN, K. L.; JINUMON, A.; P., M. C. Led based solar simulator. **Solar Energy**, v. 85, p. 1758–1767, 2014. [46](#)

ABREU, R. A. S. **Caracterização Elétrica De Células Solares De Tripla Junção-Gainp/gaas/ge**. Dissertação, 2006. [29](#)

ALMEIDA, M. P. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados a rede**. Dissertação, 2012. [43](#)

ARTURAS, B.; ALGIRDAS, N.; ALGIRDAS, M.; T., V. Compact hybrid solar simulator with the spectral match beyond class a. **Journal of Photonics for Energy**, v. 6(3), n. 035501, 2016. [22](#), [27](#)

Solar Simulator. 09 1996. JPH08235903. [22](#)

BEN, M. E.; GEOFFREY, B.; AKBAR, R. Development of high flux solar simulators for solar thermal research. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 141, p. 436–446, 2015. [48](#), [59](#)

BETANCUR, V.; VELÁSQUEZ, A.; VELÁSQUEZB, D.; ACEVEDO, D. Optical design of a high-power led-based solar simulator. **Proc. of SPIE**, v. 9889, 2016. [45](#)

BOXWELL, M. **Solar Electricity Handbook: A Simple, Practical Guide to Solar Energy**. [S.l.: s.n.], 2012. [21](#)

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos**. [S.l.: s.n.], 2004. [31](#)

BROWNLEE, J. **Clever Algorithms, Nature-Inspired Programming Recipes**. [S.l.: s.n.], 2011. [58](#)

Solar Simulator. 10 1978. 4,125,775. [22](#)

CHOW, T. T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. **Applied Energy**, p. 365–379, 2010. [23](#), [40](#)

EBERHARDT, D. **Desenvolvimento de um Sistema Completo para Caracterização de Células Solares**. Dissertação, 2005. [29](#), [36](#), [43](#)

EVELOY, V.; RODGERS, P.; BOJANAMPATI, S. Enhancement of photovoltaic solar module performance for power generation in the middle east. **28th IEEE SEMI-THERM Symposium**, p. 87–97, 2012. [25](#), [41](#)

GUO, K.; LUO, Z.; XIAO, G.; ZHANG, Y.; NI, M. Simplified source model for a 54 kw solar simulator. **Proceedings of international conference on materials for renewable energy and environment (ICMREE)**, vol. 1, 2013. [47](#)

Illumination system including a virtual light source. 01 1961. 3,239,660. [21](#)

HASHIM, A. H.; N., A. H.; ABDULMUNEM, R. A. Improving of the photovoltaic/thermal system performance using water cooling technique. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, v. 75, p. 604–611, 2015. [25](#), [37](#)

HUANG, B. J.; LIN, T. H.; HUNG, W. C.; SUN, F. S. Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems. **Solar Energy**, v. 70, n. 5, p. 443–448, 2001. [24](#)

IRWAN, Y. M.; LEOW, W. Z.; IRWANTO, M.; FAREQ, M.; AMELIA, A. R.; GOMESH, N.; SAFWATI, I. Indoor test performance of pv panel through water cooling method. **2015 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies**, v. 79, p. 604–611, 2015. [25](#), [41](#)

JAGER, K.; ISABELLA, O.; ARNO, H. M.; SMETS, A. C. M. M.; SWAAIJ, M. Z. **Solar Energy Fundamentals, Technology, and Systems**. [S.l.]: Delft University of Technology, 2014. [27](#), [30](#), [32](#)

JI, J.; LU, J.; CHOW, T.; HE, W.; PEI, G. A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation. **Applied Energy**, Elsevier Ltd, v. 84, p. 222–237, 2007. [24](#)

JOSHI, A. S.; TIWARI, A.; TIWARI, G.; DINCER, I.; REDDY, B. Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (pv/t) (glass-to-glass) system. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 48, p. 154–164, 2009. [39](#)

Solar Simulator. 10 1960. 3,247,367. [21](#)

KENNY, R.; VIGANÓ, D.; SALIS, E.; BARDIZZA, G.; NORTON, M.; MÜLLEJANS, H. Power rating of photovoltaic modules including validation of procedures to implement IEC 61853-1 on solar simulators and under natural sunlight. **Prog Photovolt: Res Appl**, v. 21(6), p. 1384–99, 2013. [35](#)

- KENNY, S. P.; DAVIDSON, J. H. Design of a multiple-lamp large-scale solar simulator. **Transactions of the ASME**, v. 116, p. 200–205, 1994. [45](#)
- KIM, D. J.; KIM, D. H.; BHATTARAI, S.; OH, J. H. Simulation and model validation of the surface cooling system for improving the power of a photovoltaic module. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 133, 2011. [23](#), [24](#), [25](#), [38](#), [39](#), [41](#)
- KIRK, A. P. **Solar Photovoltaic Cells Photons to Electricity**. [S.l.]: Elsevier, 2014. [27](#), [29](#)
- KJÆR, S. B. **Design and Control of an Inverter for Photovoltaic Applications**. Tese (Doutorado) — Fac. of Eng. and Science, Aalborg University, Denmark, Aalborg, Jan. 2005. [34](#), [37](#)
- KRAUTER, S.; ARAUJO, R. G.; SCHROER, S.; HANITSH, R.; SALHI, M. J.; TRIEBEL, C.; LEMOINE, R. Combined photovoltaic and solar thermal systems for facade integration and building insulation. **Sol. Energy**, v. 67, p. 239–248, 1999. [23](#), [24](#)
- Large area pulsed solar simulator**. 10 1997. JPH08235903. [22](#)
- MARKVART, T.; CASTANER, L. **Practical Handbook of Photovoltaics**. [S.l.: s.n.], 2012. [33](#)
- MENG, Q.; WANG, Y.; ZHANG, L. Irradiance characteristics and optimization design of a large-scale solar simulator. **Solar Energy**, v. 85, p. 1758–1767, 2011. [44](#), [48](#)
- Solar Simulator**. 08 1963. 3,321,620. [22](#)
- MOCELIN, A. R.; ZILLES, R.; NOVGORODCEV, A. Programa brasileiro de etiquetagem: A utilização do simulador solar do iee/usp na qualificação de módulos fotovoltaicos. **II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES**, 2008. [43](#)
- Simulador solar a LED**. 09 2009. MU8901980-6 U2. [22](#)
- NOVICKOVAS, A.; BAGUCKIS, A.; MEKYS, A.; TAMOSIUNAS, S. Compact light-emitting diode-based aaa class solar simulator: Design and application peculiarities. **IEEE Journal of Photovoltaics**, 2015. [44](#), [46](#)
- NOZIK, A. J.; CONIBEER, G.; BEARD, M. C. **Advanced Concepts in Photovoltaics**. The Royal Society of Chemistry, 2014. P001-608 p. (RSC Energy and

Environment Series). ISBN 978-1-84973-591-9. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1039/9781849739955>>. 30, 37

PETRASCH, J.; CORAY, P.; MEIER, A.; BRACK, M.; HABERLING, P.; WUILLEMIN, D.; STEINFELD, A. A novel 50kw 11,000 suns high-flux solar simulator based on an array of xenon arc lamps. **Sol Energy Eng**, v. 129(4), p. 405 – 11, 2007. 47

PINTO, J. T.; GALDINHO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Edição revisada e atualizada. [S.l.], 2014. 28, 29, 30, 32, 33, 37

POLMAN, A.; KNIGHT, M.; GARNETT, E.; EHRLER, B.; SINKE, W. Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges. **Science**, v. 352, n. 6283, 2016. 23

QIANG, F. Radiation (solar). **Encyclopedia of atmospheric sciences**, v. 5, p. 1859–1863, 2003. 21

QINGLONG, M.; YANPENG, L.; YAXIU, G. Dynamic mesh-based analysis of dynamic irradiance characteristics of solar simulator. **Optik**, v. 126, p. 4658–4664, 2015. 48

RAHMAT, A. S.; CASMIKA, S.; ELFI, Y.; IRWAN, M.; MUHAMMAD, M. M.; HAMZAH, L.; KHAIRURRIJAL. Development of a simple low-scale solar simulator and its light distribution. **2016 International Conference on Instrumentation, Control and Automation (ICA)**, 2016. 22

RODRIGUES, C. N. **Centrais Solares Fotovoltaicas Ligadas a Rede Elétrica**. Doutorado, 2008. 28

SALAM, R. A.; SAPUTRA, C.; YULIZA, E.; MEILANO, I.; MUNIR, M. M.; LATIEF, H.; KHAIRURRIJAL. Development of a simple low-scale solar simulator and its light distribution. **2016 International Conference on Instrumentation, Control and Automation (ICA)**, 2016. 47

SHARMA, M.; BANSAL, K.; BUDDHI, D. Real time data acquisition system for performance analysis of modified pv module and derivation of cooling coefficients of electrical parameters. **Procedia Computer Science**, v. 48, p. 582–588, 2015. 41

SOLANKI, S. C.; DUBEY, S.; TIWARI, A. Indoor simulation and testing of photovoltaic thermal (pv/t) air collectors. **Applied Energy**, Elsevier Ltd, v. 86, p. 2421–2428, 2009. 24, 38

- SOWMY, D. S.; SCHIAVON, P. J.; RACINE, T. Uncertainties associated with solar collector efficiency test using an artificial solar simulator. **Renewable Energy**, p. 1–8, 2016. [47](#)
- THOMAS, N.; BECK, T.; CHAKRABORTY, S.; GERBER, M.; GRAF, S.; PIAZZA, D.; ROETHLISBERGER, G. A wide-beam continuous solar simulator for simulating the solar flux at the orbit of mercury. **Meas Sci Technol**, v. 22(6), 2011. [47](#)
- TIWARI, A.; SODHA, M. S. Performance evaluation of solar pv/t system: An experimental validation. **Solar Energy**, v. 80, p. 751–759, 2006. [40](#)
- TIWARI, A.; SODHA, M. S.; CHANDRA, A.; JOSHI, J. C. Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of india. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 90, p. 175–189, 2006. [40](#)
- TROND, B.; OLE, M. L. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. **Solar Energy**, v. 55, n. 6, p. 453–462, 1995. [24](#)
- Simulador solar modular multiespectral**. 04 2009. PI0904889-9 A2. [22](#)
- VEDAT, E.; SAFAK, S.; BULENT, O. Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017. [21](#), [22](#), [43](#), [45](#), [47](#)
- VICENTE, P. S.; REIS, G. L.; VICENTE, E. M. Development of a solid-state solar simulator to test pv modules. **Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)**, 2015. [34](#)
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, n. 5, p. 222–237, 2009. [23](#), [34](#), [38](#)
- WANG, W. **Simulate a Sun for Solar Research: A Literature Review of Solar Simulator Technology**. Doutorado, 2014. [47](#)
- XU, G.-Q.; ZHANG, J.-H.; CAO, G.-Y.; XING; LI, D.-S.; YU, J.-J. Solar spectrum matching using monochromatic leds. **Lighting Res. Technol**, p. 0–11, 2015. [47](#)
- YASS, K.; CURTIS, H. B. Low-cost, air mass 2 solar simulator. **Nasa Technical Memorandum**, 1974. [48](#)
- Solar Simulator**. 07 1978. 4,423,469. [22](#)

ZONDAG, H. A. Flat-plate pv-thermal collectors and systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 891–959, 2005. [23](#), [40](#)