



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

EVALDO CHAGAS GOUVÊA

Resposta espectral de células fotovoltaicas em condições reais de operação

Guaratinguetá
2017

EVALDO CHAGAS GOUVÊA

**Resposta espectral de células fotovoltaicas em condições reais de
operação**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Gestão Ambiental e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

Guaratinguetá
2017

G719r Gouvêa, Evaldo Chagas
Resposta espectral de células fotovoltaicas em condições reais de
operação / Evaldo Chagas Gouvêa – Guaratinguetá, 2017.
74 f : il.
Bibliografia: f. 65-69

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

1. Energia solar. 2. Silício. 3. Espectro solar. I. Título

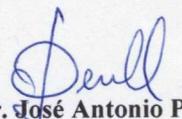
CDU 620.91(043)

EVALDO CHAGAS GOUVÊA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

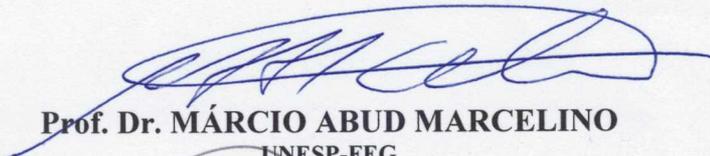


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

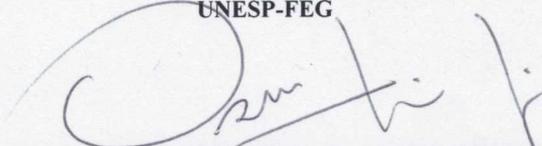
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
Orientador / UNESP-FEG



Prof. Dr. MÁRCIO ABUD MARCELINO
UNESP-FEG



Prof. Dr. OSIRIS CANGILIERI JUNIOR
PUC/PR

Abril de 2017

DADOS CURRICULARES
EVALDO CHAGAS GOUVÊA

NASCIMENTO	09.11.1987 – GUARATINGUETÁ / SP
FILIAÇÃO	José Irineu de Gouvêa Elza Maria das Chagas Gouvêa
2007 / 2011	Curso de Graduação Engenharia Elétrica na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela vida, saúde e paz,
aos meus pais, *José Irineu e Elza*, pela dedicação por todos esses anos,
ao meu orientador, *Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza*, pelo seu apoio e paciente orientação durante a realização desta pesquisa,

às funcionárias e funcionários da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, especialmente da Biblioteca, Pós-Graduação e Oficina Mecânica, pela disposição em ajudar os alunos,

aos colegas e professores do Campus, por suas valiosas dicas e informações passadas durante as diversas e agradáveis conversas que ocorreram durante o curso.

“Se enchermos a cabeça em vez dos bolsos,
não seremos roubados.”

Provérbio chinês

RESUMO

Uma das alternativas à utilização de combustíveis fósseis é a energia solar, obtida pelo uso de painéis fotovoltaicos. A existência de diferenças diárias, sazonais e regionais na distribuição espectral da luz do sol pode produzir variações na capacidade de produção de energia dos painéis. O objetivo deste trabalho é verificar como a geração de energia de células fotovoltaicas varia em função dos diferentes comprimentos de onda do espectro da luz solar, quando as células estão submetidas a condições reais de operação. Este trabalho possui caráter experimental. Dois painéis fotovoltaicos policristalinos idênticos foram montados lado a lado. Oito diferentes filtros de cor, com curvas conhecidas de distribuição espectral, foram instalados sobre um dos painéis e foi registrada a quantidade de energia gerada por cada painel ao longo do dia. Cada filtro permite apenas a passagem de uma determinada faixa de comprimentos de onda da luz solar. Foi calculada a eficiência relativa de cada filtro, dada pela relação entre a quantidade de energia gerada pelo painel com filtro e a gerada pelo painel sem filtro, de referência. Os resultados indicam que os painéis produzem mais energia na faixa do vermelho, com eficiência relativa de 23,83%, sendo, portanto, mais sensíveis à radiação nesta faixa de comprimentos de onda. Por outro lado, ocorre uma redução da resposta do painel na faixa do verde e azul, apresentando eficiências de 19,15% e 21,58% respectivamente. Isso mostra que painéis fotovoltaicos não respondem de maneira uniforme à luz solar. A radiação infravermelha, além de produzir um aumento de temperatura, exerce um importante papel na produção total de energia, com eficiência de 13,56%. Conclui-se que painéis de silício cristalino não respondem de maneira uniforme à luz solar. Os painéis produzem energia nas faixas não-visíveis do espectro; sendo o infravermelho um importante componente do espectro. As respostas espectrais em condições reais de operação apresentam diferenças significativas em relação àquelas obtidas nas condições padrão de ensaio.

PALAVRAS-CHAVE: Energia solar. Células fotovoltaicas. Silício cristalino. Espectro solar. Eficiência energética.

ABSTRACT

Solar energy is an alternative to fossil fuels. It can be obtained through the use of photovoltaic panels. There are daily, seasonal and regional differences in the spectral energy distribution of sunlight that can result in variations in the energy production capacity of the panels. The objective of this study is the verification of the photovoltaic cell's response to different wavelengths of the sunlight's spectrum, under real operating conditions. This is an experimental study. Two identical polycrystalline photovoltaic modules were mounted side-by-side. Eight different color filters, each one with a specific spectral distribution curve, were installed above one of the panels and the daily generated energy of each panel was registered. Each color filter allows just a specific wavelength range of solar spectrum to pass through it. The relative efficiency of each filter was calculated; it is given by the relation between the energy generated by the solar panel with filter and the solar panel without filter. The results indicate that the panels produce more power in the red range (with a relative efficiency of 23.83%) and therefore they are more sensitive to radiation at this wavelength range. Also, the panel's response is reduced in the color ranges of green and blue, with efficiency of 19.15% and 21.58%, respectively. This shows that photovoltaic panels do not respond uniformly to sunlight. Infrared radiation, which leads to an increased temperature, plays an important role in the total energy production. The relative efficiency of infrared filter is 13.56%. It can be concluded that crystalline silicon photovoltaic modules do not respond uniformly to sunlight. Photovoltaic panels are able to produce energy not only with visible light but also with non-visible wavelengths, being infrared an important component of solar spectrum. The spectral responses under real operating conditions are significantly different from the responses obtained at the standard test conditions.

KEYWORDS: Solar energy. Photovoltaic cells. Crystalline silicon. Solar spectrum. Energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Combinações de elementos fotovoltaicos: (a) célula; (b) módulo ou painel; (c) arranjo	28
Figura 2 –	Célula monocristalina	29
Figura 3 –	Célula policristalina	30
Figura 4 –	Célula flexível CIGS	31
Figura 5 –	Células sensibilizadas por corantes instaladas na lateral de um edifício.....	31
Figura 6 –	Estrutura básica de uma célula fotovoltaica	32
Figura 7 –	Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica	32
Figura 8 –	Curva característica I-V de uma célula ou módulo fotovoltaico	33
Figura 9 –	Espectro padrão AM1.5	34
Figura 10 –	Circuito para medição manual da curva I-V de uma célula ou módulo fotovoltaico	34
Figura 11 –	Curva P-V de um módulo fotovoltaico	35
Figura 12 –	Imagem real da montagem experimental	37
Figura 13 –	Circuito utilizado para medições	38
Figura 14 –	Painel fotovoltaico Suntech STP022-12/D	39
Figura 15 –	Medidor de energia em corrente contínua	39
Figura 16 –	Circuito do banco de resistores de potência	40
Figura 17 –	Distribuição espectral de energia dos filtros primários: (a) Infravermelho; (b) Vermelho; (c) Verde; (d) Azul	41
Figura 18 –	Distribuição espectral de energia dos filtros secundários: (a) Amarelo; (b) Frost; (c) Âmbar; (d) Lavanda	42
Figura 19 –	Elementos de um diagrama de caixa modificado	48
Figura 20 –	Curvas características I-V e P-V do Painel 1	51
Figura 21 –	Curva característica P-R do Painel 1	51
Figura 22 –	Curvas características I-V e P-V do Painel 2	52
Figura 23 –	Curva característica P-R do Painel 2	52
Figura 24 –	Comparação entre eficiências relativas dos filtros de cor	57
Figura 25 –	Resposta espectral na literatura: (a) Dirnberger et al. (2015); (b) Nofuentes et al. (2014)	61

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1 –	Especificações dos filtros de cor	40
Quadro 2 –	Observações climáticas padronizadas	44
Tabela 1 –	Especificações técnicas dos painéis fotovoltaicos	38
Tabela 2 –	Características técnicas dos medidores de energia em corrente contínua .	39
Tabela 3 –	Níveis de radiação diários padronizados	46
Tabela 4 –	Dados do levantamento da curva característica do Painel 1, realizado em 7 abr. 2016	49
Tabela 5 –	Dados do levantamento da curva característica do Painel 2, realizado em 8 abr. 2016	50
Tabela 6 –	Características elétricas nominais e reais dos painéis fotovoltaicos	54
Tabela 7 –	Níveis de radiação categorizados por estação do ano	55
Tabela 8 –	Níveis de radiação categorizados por mês	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIST	<i>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology</i> (Instituto Nacional para Ciência e Tecnologia Industrial Avançada)
AM	<i>Air Mass</i> (Massa de Ar)
APE	<i>Average Photon Energy</i> (Energia Média do Fóton)
BIPV	<i>Building Integrated Photovoltaics</i> (Sistema Fotovoltaico Integrado à Construção)
CdTe	Telureto de cádmio
CEPAGRI	Centro de Pesquisas Meteorológicas Aplicadas à Agricultura
CIEMAT	<i>Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas</i> (Centro de Investigações Energéticas, Ambientais e Tecnológicas)
CIGS	Cobre-índio-gálio-selênio
CIS	Cobre-índio-selênio
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
DSSC	<i>Dye Sensitized Solar Cell</i> (Célula Solar Sensibilizada por Corante)
EVA	Acetato de etil-vinila
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IR	Infravermelho
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (Display de Cristal Líquido)
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
MM	<i>Mismatch Factor</i> (Fator de Descasamento Espectral)
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i> (Laboratório Nacional de Energias Renováveis)
PV	Módulo Fotovoltaico
PV1	Painel 1
PV2	Painel 2
SED	<i>Spectral Energy Distribution</i> (Distribuição Espectral de Energia)
Si	Silício
Si-gM	Silício grau metalúrgico
Si-gS	Silício grau solar
SiO ₂	Sílica

STC	<i>Standard Test Conditions</i> (Condições Padrão de Ensaio)
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UV	Ultravioleta
ZnO	Óxido de zinco

LISTA DE SÍMBOLOS

I	corrente
D	diodo
R_S	resistência série
R_P	resistência paralela
V	tensão
P	potência
P_{MP}	ponto de potência máxima
V_{OC}	tensão de circuito aberto
I_{SC}	corrente de curto-circuito
V_{MP}	tensão na máxima potência
I_{MP}	corrente na máxima potência
FF	fator de forma
η	eficiência
A	área do módulo
G	irradiância
R	resistência
η_r	eficiência relativa
E_{PV1}	quantidade de energia do painel fotovoltaico sem filtro
E_{PV2}	quantidade de energia do painel fotovoltaico com filtro
\overline{P}	potência média
Δt	intervalo de tempo de medição registrado no dia
\overline{P}_U	potência média unitária
n_{CEL}	número de células do painel fotovoltaico
A_{CEL}	área de uma célula
E_U	energia unitária
$\overline{\overline{P}}$	média das potências médias
n_M	número de medições
F_1	primeiro fator de correção
$\overline{\eta}_r$	eficiência relativa média
F_2	segundo fator de correção
$\eta_{r\text{ corr}}$	eficiência relativa corrigida

T_c temperatura de trabalho das células

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.2	MOTIVAÇÃO	16
1.3	OBJETIVOS	16
1.4	METODOLOGIA DA PESQUISA	17
1.5	DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	17
2	MATERIAL	18
2.1	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.2	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	25
2.2.1	Histórico do desenvolvimento das células fotovoltaicas	25
2.2.1.1	Breve histórico brasileiro	27
2.2.2	Tipos de células fotovoltaicas	27
2.2.3	Características de células fotovoltaicas	31
3	MÉTODO	37
3.1	LOCAL DOS EXPERIMENTOS	37
3.2	MONTAGEM DO EXPERIMENTO	37
3.3	MÉTODO DE CÁLCULO E ANÁLISE	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	49
4.2	CONDIÇÕES DE IRRADIÂNCIA	54
4.3	RESPOSTA ESPECTRAL DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	57
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	62
5.1	CONCLUSÕES	62
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICE A - Dados experimentais coletados	70
	ANEXO A - Aceite para publicação de artigo em periódico internacional	74

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O século XX testemunhou grandes avanços em ciência e tecnologia. No entanto, quando se trata de fontes de energia, boa parte do mundo moderno continua dependendo das mesmas tecnologias do século XVIII: os combustíveis fósseis, notadamente carvão, petróleo e gás natural. Estes combustíveis representaram 66,4% do consumo mundial de energia em 2014 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016), são abundantes, fáceis de transportar e têm alta densidade energética; porém, causam grandes impactos no meio ambiente pela emissão de compostos químicos capazes de acelerar mudanças climáticas. Além disso, a maior parte das reservas está concentrada em poucos países que controlam a produção e o preço destes energéticos, constituindo-se em uma possível ameaça à segurança no fornecimento de energia dos demais países, que precisam buscar alternativas (GOLDEMBERG; LUCON, 2012).

Uma das alternativas é o aproveitamento da energia solar. Amplamente disponível em quase todo o globo, gratuita e praticamente inesgotável na escala humana de tempo, a energia proveniente do sol é hoje uma fonte energética altamente promissora e com grande potencial para suprir parte das necessidades humanas.

A energia solar pode ser convertida diretamente em energia elétrica através da utilização de painéis fotovoltaicos, cuja eficiência se altera de acordo com a tecnologia empregada em sua fabricação e principalmente pelas condições ambientais do local em que são instalados, como, por exemplo, a massa de ar (AM, do inglês *Air Mass*). A massa de ar é um fator que modifica a quantidade de energia solar absorvida pela superfície terrestre (MEKHILEF; SAIDUR; KAMALISARVESTANI, 2012). A luz solar atravessa diferentes espessuras da camada de ar ao longo de cada dia, devido ao movimento aparente do sol no céu, motivo pelo qual se considera para testes de painéis fotovoltaicos uma massa de ar média, equivalente ao padrão internacional AM1.5. Entretanto, existem diferentes quantidades de material particulado em suspensão na atmosfera de cada região do planeta, além de diferenças diárias, sazonais e regionais na distribuição espectral da radiação solar ao nível do solo (ANDREWS; PEARCE, 2013). Isso faz com que seja imprecisa a suposição de que toda a radiação recebida pelos painéis fotovoltaicos equivale ao padrão AM1.5.

1.2 MOTIVAÇÃO

A resposta do painel em condições reais de operação pode diferir das especificações técnicas obtidas em testes de laboratório realizados em condições controladas, ou a partir de modelagens realizadas pelos fabricantes do equipamento.

As células fotovoltaicas que compõem o painel podem ser mais sensíveis a determinados comprimentos de onda do espectro da luz solar. Isso pode ser determinado através de ensaios laboratoriais, utilizando equipamentos específicos como o simulador solar. Porém, estes aparelhos não são capazes de reproduzir as variações reais de radiação e temperatura ambiente às quais os painéis fotovoltaicos estão submetidos ao longo do dia em uma instalação ao ar livre.

A pesquisa desenvolvida nesta dissertação apresenta um método para verificação do efeito da resposta espectral sobre a geração de energia de células fotovoltaicas em diferentes faixas de comprimentos de onda do espectro da luz solar. Nos trabalhos presentes na literatura, as células fotovoltaicas são expostas ao espectro total da luz do sol. Neste trabalho, as células são expostas a apenas uma parte do espectro solar de cada vez por meio de diferentes filtros de cor. Além disso, as células estarão sujeitas a condições climáticas reais de operação, isto é, às variações diárias e sazonais do espectro da luz solar e temperatura, as quais influenciam diretamente a produção de energia de painéis fotovoltaicos. As condições climáticas não são consideradas ao se caracterizar os módulos sob as STC, o que pode conduzir a diferenças significativas entre os parâmetros elétricos nominais e reais.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é verificar como a geração de energia de células fotovoltaicas varia em função das diversas faixas de comprimentos de onda do espectro da luz solar, quando as células estão submetidas a condições reais de operação.

Este trabalho possui como objetivos específicos:

- a) Determinar as características elétricas reais dos módulos fotovoltaicos empregados e suas curvas características;
- b) Determinar as condições de irradiância, a partir de observações climáticas padronizadas;

c) Determinar a resposta espectral das células fotovoltaicas para diferentes comprimentos de onda da luz solar, realizando uma comparação entre os resultados obtidos para cada faixa de comprimentos de onda.

1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA

Conforme Marconi e Lakatos (2010), este trabalho pode ser classificado como uma pesquisa de natureza básica, de objetivos descritivos, com abordagem combinada e método experimental.

É de natureza básica por procurar ampliar o conhecimento científico, sem haver a preocupação com a aplicação prática e imediata dos resultados alcançados. Os objetivos são descritivos, pois visam descrever as características do fenômeno observado e estabelecer relações entre as variáveis. A utilização de técnicas estatísticas para quantificar os resultados e sua análise lógica e indutiva permite classificar a abordagem como sendo mista, contendo aspectos quantitativos e qualitativos. O método empregado é experimental, pois a pesquisa envolve a observação sistemática de variáveis que podem influenciar a resposta espectral das células fotovoltaicas.

1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

No capítulo 2 são apresentadas uma ampla revisão bibliográfica e informações sobre células fotovoltaicas, contendo um histórico do desenvolvimento das células, assim como os tipos existentes, seu princípio de funcionamento e características elétricas. Os procedimentos utilizados para a realização do trabalho e o método de análise dos dados são apresentados no capítulo 3. O capítulo 4 contém discussões acerca das características elétricas das células, condições de irradiância e resposta espectral obtidas nos experimentos. As conclusões e sugestões de trabalhos futuros encontram-se no capítulo 5.

2 MATERIAL

2.1 REVISÃO DE LITERATURA

Os módulos fotovoltaicos (PVs) comerciais são caracterizados por diversos parâmetros elétricos, os quais são determinados pelos fabricantes sob condições padrão de ensaio (*Standard Test Conditions*, STC): irradiância de 1.000 W/m², temperatura das células de 25 °C e espectro da luz solar no padrão AM1.5. Entretanto, estes parâmetros não podem ser utilizados para estimar a produção de energia de um módulo em condições reais de operação, visto que a produção de energia nessas condições difere sensivelmente das STC devido a uma diversidade de fatores ambientais continuamente variáveis, da localização geográfica do módulo e da resposta espectral de cada tecnologia fotovoltaica (CAÑETE; CARRETERO; SIDRACH-DE-CARDONA, 2014; DIRNBERGER et al., 2015; KURNIC et al., 2011).

Dentre os fatores que modificam a capacidade de produção de energia dos módulos fotovoltaicos, pode-se citar a temperatura de operação, a velocidade do vento, a irradiância e o espectro da luz solar, os quais têm sido estudados por diversos autores. Ishii, Otani e Takashima (2011) avaliaram os efeitos da temperatura e espectro solar sobre o desempenho de painéis de três tecnologias diferentes no Japão, calculando os fatores térmico e espectral para cada um deles. Eles concluíram que a temperatura de operação contribui entre 15% e 20% na redução de eficiência de módulos de silício policristalino; a contribuição do espectro solar é menor, cerca de 3%. Para células de silício amorfo, porém, a influência do espectro (12%) é maior do que a da temperatura (8%). Isso indica que cada tecnologia de fabricação de células é sensível a diferentes fatores.

A localização geográfica e forma de montagem alteram o regime de temperatura ao qual os módulos estão submetidos. Kurnic et al. (2011) monitoraram painéis montados em *rack* aberto, sem sistema auxiliar de ventilação e módulos instalados em telhados na Eslovênia, registrando seu desempenho (produção de energia) e temperatura. Tais autores também realizaram um balanço térmico e energético do sistema. Foram utilizados módulos flexíveis de silício amorfo e células multijunção. Os módulos monitorados possuíam dois tipos de montagem: *rack* aberto com ventilação natural e montagem em telhado não-ventilado, ambos com inclinação de 30°. A temperatura ambiente, temperatura dos painéis e a curva I-V foram acompanhados em tempo real para diferentes regimes de operação (circuito aberto e com busca do ponto de potência máxima). Os resultados alcançados permitem concluir que o tipo de montagem é capaz de provocar modificações na temperatura dos painéis: montagem não-

ventilada, como a feita em telhados, resulta em um aumento da temperatura do painel. Este aumento pode ser minimizado se houver incidência de vento, que reduz a diferença de temperatura entre o módulo e o ambiente, e se o regime de operação for o de busca do ponto de máxima potência, isto é, se o painel trabalha com uma carga tal que a potência fornecida seja a mais alta possível. Além disso, a diferença de temperatura entre painel e ambiente depende da eficiência: quanto maior a eficiência do módulo, menores são as perdas e menor será a temperatura de trabalho.

Tossa et al. (2016) compararam três tipos de painéis fotovoltaicos (silício monocristalino, policristalino e célula híbrida de silício amorfo/microcristalino) sob o clima sub-saariano de Burquina Faso. Os módulos foram instalados um metro acima da estrutura do telhado, com boa circulação de ar. Eles notaram que os coeficientes de temperatura dos painéis, especialmente o que se relaciona à potência máxima fornecida, variam conforme o nível de irradiância recebido, ou seja, não são constantes da forma como é exibido nas folhas de dados dos fabricantes. Foi necessário expressá-los em função de um valor médio, além de diferirem, em condições reais, dos valores obtidos pelos fabricantes nas STC. Tais autores destacaram que as condições padrão de ensaio não podem, em geral, ser alcançadas em condições reais de operação.

A incidência de vento pode alterar a temperatura de trabalho das células. Kaldellis, Kapsali e Kavadias (2014) investigaram os efeitos da variação de temperatura e influência da velocidade do vento através de medições em campo de dois sistemas fotovoltaicos comerciais de médio porte por um ano. O primeiro é um Sistema Fotovoltaico Integrado à Construção (*Building Integrated Photovoltaics*, BIPV) com 81 kWp montado no telhado de uma indústria, em local com baixa incidência de ventos. O segundo está em uma fazenda solar, área aberta e com ventos consideráveis, apresentando potência de 150 kWp. Ambos utilizam células de silício policristalino e situam-se na Grécia. De forma semelhante a Kurnic et al. (2011), Kaldellis, Kapsali e Kavadias (2014) concluíram que a temperatura do módulo é influenciada pela temperatura ambiente, nebulosidade e velocidade do vento, sendo este último um fator preponderante sobre a temperatura. Além disso, a irradiância solar tem o maior impacto na produção de energia de um painel. Outros fatores também modificam o potencial energético de sistemas fotovoltaicos, tais como a deposição de poeira na superfície e ângulo de incidência da luz. Kaldellis, Kapsali e Kavadias (2014) afirmam que o impacto da velocidade do vento é geralmente desprezado na determinação da temperatura e consequente eficiência do módulo; a maior parte dos modelos de estimativa da temperatura das células não considera o efeito de resfriamento do vento por falta de dados específicos sobre esta variável.

Segundo a revisão feita por Sargunanathan, Elango e Mohideen (2016), existem diversos métodos efetivos de resfriamento para painéis fotovoltaicos, com o objetivo de aumentar a eficiência. Os métodos podem ser divididos em ativos e passivos. Dentre eles incluem-se trocadores de calor com tubos de alumínio ou cobre percorridos por fluido refrigerante; dissipadores de calor com aletas, com ventilação natural ou forçada; *spray* contínuo de água na superfície dos painéis; e circulação direta de líquido na parte traseira de módulos com concentração solar. Nižetić et al. (2016) aplicaram um *spray* de água dos dois lados de um painel. Bahaidarah, Baloch, Gandhidasan (2016) e Jakhar, Soni e Gakkhar (2016) conduziram revisões sobre sistemas com concentração solar. Esses métodos são capazes de reduzir a temperatura de sistemas fotovoltaicos desde poucos graus Celsius até dezenas de graus Celsius, provocando uma elevação da eficiência e potência máxima alcançadas, que variam conforme o método empregado.

A potência máxima que um painel fotovoltaico pode alcançar varia de acordo com as variações do espectro solar recebido pelo componente e do ângulo de incidência da luz, que se alteram ao longo do dia e do ano (CAÑETE; CARRETERO; SIDRACH-DE-CARDONA, 2014). As STC, no entanto, não consideram essas variações ao determinar a potência nominal dos módulos, porém diversos autores têm recentemente abordado o tema em seus estudos. Cañete, Carretero e Sidrach-de-Cardona (2014) fizeram uma análise comparativa da eficiência de diferentes tecnologias de painéis fotovoltaicos sob condições climáticas reais do sul da Espanha e propuseram um modelo empírico para estimar a produção diária de energia. Quatro tipos de células foram estudados: telureto de cádmio (CdTe), silício amorfo, silício policristalino e células híbridas de silício amorfo/microcristalino. Informações sobre a irradiância no plano do módulo, temperaturas do módulo e ambiente, velocidade e direção do vento, umidade relativa do ar e curva característica foram coletadas a cada cinco minutos. Tais autores relataram que filmes finos (CdTe e silício amorfo) apresentam maior variabilidade na produção de energia de acordo com as estações do ano, enquanto as células de silício policristalino têm produção quase constante. Isso indica que células cristalinas são menos sensíveis às mudanças sazonais do espectro do que os filmes finos. Além disso, a eficiência diária das células de silício policristalino mostrou ser 7,6% menor em condições reais de operação do que nas condições padrão de ensaio devido à alta temperatura de trabalho.

A produção de energia de sistemas fotovoltaicos pode ser estimada por meio das condições atmosféricas do local de instalação. Amrouche, Guessoum e Belhamel (2012) propuseram um modelo de determinação da curva característica de um módulo usando o comportamento da radiação solar e temperatura do painel. Este modelo foi baseado na

semelhança existente entre a curva característica e a resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem. Hernandez, Vallejo e Gordillo (2013) desenvolveram um método para estimar a produção de energia de BIPVs operando fora das condições padrão de ensaio. Garcia-Domingo et al. (2014) analisaram a influência de condições atmosféricas sobre sistemas fotovoltaicos com concentração solar. Em todos estes trabalhos, foram consideradas diferentes combinações de irradiância e temperatura, porém as variações do espectro foram desconsideradas.

Dirnberger et al. (2015) avaliaram dados de irradiância coletados na Alemanha durante um período de três anos e meio, focando no impacto do espectro na produção mensal de energia de painéis fotovoltaicos de CdTe, silício amorfo, silício cristalino (comum e de alta eficiência), e células CIGS (cobre-índio-gálio-selênio). Eles utilizaram o fator de descasamento espectral (*Mismatch factor*, MM) dado pela norma IEC 60904-7, da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC, *International Electrotechnical Commission*), para calcular o impacto do espectro no aumento ou diminuição da energia produzida pelos módulos. O fator MM expressa quanta irradiância a mais ou a menos o dispositivo fotovoltaico recebe quando comparado aos seus valores nominais. Para isto, foi necessário medir o espectro incidente com um espectrômetro. Tais autores afirmam em seu trabalho que a influência das variações espectrais no desempenho de PVs depende da resposta espectral de cada tecnologia de células fotovoltaicas. Ademais, a irradiância espectral efetiva, isto é, aquela que realmente contribui para a geração de corrente no painel, é diferente do espectro padrão AM1.5 empregado nos testes de células e módulos em laboratório, o qual abrange uma ampla faixa de comprimentos de onda. Em geral, os painéis não respondem ao espectro AM1.5 completo.

A resposta espectral de células fotovoltaicas foi alvo do trabalho de Nagae et al. (2006), que propuseram um método para separar a influência da variação do espectro solar e da temperatura sobre a potência de saída de um PV, a fim de melhor entender o efeito do espectro. Mais recentemente, Nofuentes et al. (2014) verificaram a relação entre o recíproco do fator espectral e a energia média do fóton (*Average Photon Energy*, APE), variáveis utilizadas para representar a curva do espectro da luz solar através de um valor único. Fernandez et al. (2016) analisaram o impacto do espectro sobre o desempenho de sistemas fotovoltaicos comuns e com alta concentração solar, submetidos às mesmas condições atmosféricas. Tais autores concluíram que ambos os sistemas apresentam variações sazonais em seu desempenho e que sistemas com concentração mostram uma dependência do espectro 5% superior aos sistemas comuns. O impacto da distribuição espectral sobre a produção de energia de oito diferentes tecnologias de células fotovoltaicas foi analisado por Alonso-Abella

et al. (2014) em quatro locais da Europa. Eles revelaram que as variações mensais do espectro se reduzem à medida que a latitude diminui. Além disso, quanto maior o período de integração (de mensal para anual, por exemplo), menor é o impacto solar na produção de energia. Em um interessante estudo, Dirnberger, Müller e Reise (2015) tratam sobre as incertezas que influenciam o impacto espectral, isto é, as diferenças entre o espectro solar recebido por células fotovoltaicas, a resposta espectral dos PVs e a faixa de comprimentos de onda à qual os instrumentos de medição do espectro são sensíveis. Eles reportaram que o impacto espectral é da mesma ordem de grandeza do fator de descasamento espectral e depende do tipo de painel analisado, variando entre 0,9% e 1,8%. Ainda, eles afirmam que o impacto espectral pode ser reduzido ao se utilizar uma faixa de comprimentos de onda entre 350 nm e 1.050 nm para análise.

A massa de ar é capaz de modificar o desempenho de módulos fotovoltaicos. Roumpakias, Zogou e Stamatelos (2015) investigaram a relação entre AM e a eficiência real de células fotovoltaicas. Eles concluíram que a eficiência na conversão de energia diminui sensivelmente quando o ângulo solar é menor que 45° e a irradiância é inferior a 200 W/m². Baig, Fernandez e Mallick (2016) determinaram o desempenho em longo prazo de um BIPV com concentração solar sob diferentes condições de espectro e massa de ar. Theristis et al. (2016) estudaram a sensibilidade espectral de células de tripla junção com concentração, para diferentes valores de massa de ar, espessura óptica do aerossol e umidade relativa do ar. Tais autores afirmam que quanto maior o valor da massa de ar, menor tende a ser o desempenho espectral e elétrico da célula. Este resultado é compatível com o trabalho de Roumpakias, Zogou e Stamatelos (2015).

Da mesma maneira que métodos de resfriamento foram propostos para reduzir o impacto da temperatura e elevar a eficiência de sistemas fotovoltaicos, formas de aumentar a produção de energia através da modificação do espectro da luz recebida pelo painel foram pesquisados por vários autores. O desempenho de células fotovoltaicas é reduzido por fatores como absorção óptica, reflexão de parte da luz, transporte e coleta de portadores de carga (APOSTOLUK et al., 2014). Além disso, as células não respondem aos fótons de todos os comprimentos de onda da luz do espectro com a mesma eficiência (KLAMPAFTIS; RICHARDS, 2011).

A fim de elevar a absorção óptica, Dijk et al. (2016) desenvolveram uma armadilha externa capaz de aumentar a quantidade de luz absorvida pela célula. O dispositivo proporciona um aumento de até 15% na captação de luz e pode ser adaptado a qualquer tipo de célula. Métodos para redução da reflexão da luz utilizam, em geral, camadas

antirreflexivas. Chang et al. (2011) aplicaram uma camada antirreflexiva constituída por tetrafluormetano e oxigênio sobre células de silício amorfo através de um processo simples e de baixo custo, que resultou em um aumento de 3,5% na eficiência da célula. Atyaoui et al. (2013) fizeram uso de uma camada tratada com elementos de terras-raras para melhorar células de silício cristalino, obtendo um elevação na eficiência que variou entre 42% e 71%, de acordo com o elemento terra-rara empregado.

O efeito antirreflexivo pode ser alcançado não apenas com a aplicação de uma camada sobre a célula, mas também pela modificação da superfície do semiconductor, embora este processo resulte em ganhos menores na eficiência. Liu et al. (2014) criaram uma camada antirreflexiva por meio da gravação de íons reativos com ataque ácido, produzindo uma superfície texturizada em células policristalinas. Eles obtiveram uma elevação de 0,51% no rendimento de uma célula de 225 cm². Analogamente, Chen, Lin e Hong (2015) usaram a gravação de íons reativa com o intuito de produzir monoestruturas piramidais na superfície de células policristalinas. Esse tratamento reduziu a refletância das células e aumentou a coleta de portadores de carga. O resultado foi um incremento de 0,64% na eficiência da célula.

A resposta de células à faixa do ultravioleta (UV) e azul, onde estão presentes os fótons mais energéticos, é bem mais baixa do que para os comprimentos de onda mais longos do vermelho e infravermelho (IR) (KLAMPAFTIS; RICHARDS, 2011) devido à velocidade de recombinação que ocorre com os portadores fotogerados (APOSTOLUK et al, 2014). Klampaftis e Richards (2011) mostraram em seu trabalho um método para aumento de eficiência de módulos de silício policristalino que não requer modificações significativas no processo de fabricação de PVs, por meio da adição de uma camada luminescente redutora ao EVA¹ dos painéis. Essa camada age mudando os componentes UV e azul da luz incidente para comprimentos de onda maiores, reduzindo a energia dos fótons para que eles sejam absorvidos pela célula e gerem energia. Segundo os autores, apesar deste método ter sido proposto há várias décadas, a camada luminescente redutora é acrescentada com o uso de uma camada extra de vidro ou acrílico sobre o painel, o que implica aumento de custo do processo de fabricação do módulo e das perdas por absorção e reflexão.

Para realizar a cobertura com a camada redutora, Klampaftis e Richards (2011) dissolveram corantes luminescentes em EVA usando processos mecânicos para mistura e extrusão, de forma a garantir uniformidade na espessura. Quatro células policristalinas foram encapsuladas com o EVA tratado utilizando-se um laminador a vácuo. O desempenho das

¹ Acetato de etil-vinila (em inglês, *Ethylene-vinyl acetate*). É um polímero utilizado para encapsular as células fotovoltaicas, a fim de protegê-las das intempéries, proporcionando maior durabilidade ao componente.

células foi posteriormente medido com o emprego de um simulador solar classe A (alta precisão) e um espectrômetro. Os resultados indicam que o corante luminescente absorve fótons na faixa dos 300 nm a 400 nm e reemite-os entre 400 nm e 570 nm, faixa na qual a eficiência quântica de absorção de luz é mais alta. Ocorreu um aumento de 1,19% na eficiência das células devido à camada luminescente redutora, com uma elevação da produção de energia projetada em 0,18%. Tais autores concluem que a eficiência deste método pode ser aumentada alterando-se a concentração de corante no EVA ou pela utilização de diferentes substâncias luminescentes. Além disso, este método pode ser aplicado a outros tipos de células que também contenham uma camada de encapsulamento em EVA. Um método semelhante foi estudado por Atre e Dionne (2011).

Seguindo a mesma linha de pesquisa, Apostoluk et al. (2014) analisaram a aplicação de uma camada de nanopartículas de ZnO (óxido de zinco) agindo como camada luminescente redutora em células fotovoltaicas de silício cristalino, CIGS e CdTe. Eles realizaram simulações utilizando os dados advindos de modelos com as características reais das diversas células e verificaram os resultados das simulações com a deposição de uma camada de nanopartículas de ZnO sobre as células de teste. Tais autores constataram que houve um aumento na eficiência, fator de forma e densidade de corrente em todos os tipos de células fotovoltaicas. No entanto, o grau de melhoria foi diferente para cada tecnologia: para o silício cristalino o aumento foi pequeno, mas para o CdTe chegou a 15%. Bu (2014) empregou uma camada de óxido de zinco dopado com alumínio sobre células de silício cristalino. Ele reportou que houve um aumento de 20% na eficiência da célula devido à adição do alumínio. Além disso, a camada é de filme fino, de baixo custo e de fácil aplicação.

Outro método de modificação do espectro da luz emprega filtros de cor. Wen et al. (2015) desenvolveram células fotovoltaicas com microfuros de alumínio no eletrodo traseiro, filtros de cor e filtros polarizadores para aumentar a eficiência do uso da energia em *displays* e telas LCD (*Liquid Crystal Display*, ou *Display* de Cristal Líquido). Estas células podem ser empregadas em sensores de imagem, *displays* coloridos de grande porte e módulos fotovoltaicos semitransparentes. Landrock et al. (2011) desenvolveram um simulador solar com lâmpadas de tungstênio e correção de cor utilizando filtros de baixo custo. Tais autores argumentam que o custo de simuladores solares comerciais é alto (na faixa de milhares de dólares), o que dificulta a pesquisa e desenvolvimento de células fotovoltaicas por pesquisadores e laboratórios, especialmente quando é necessário realizar testes que envolvam resposta espectral.

Simuladores solares comerciais são geralmente compostos por uma fonte de luz (lâmpada Xenon) e filtros e lentes de colimação para correção do espectro da lâmpada e adequação ao padrão AM1.5 (MENG; WANG; ZHANG, 2011). Lâmpadas LED (*Light Emitting Diode*, Diodo Emissor de Luz) também podem ser utilizadas (GRANDI; IENINA; BARDHI, 2014). O aparato construído por Landrock et al. (2011) faz uso de seis lâmpadas halógenas (com filamento de tungstênio) de 50 W. Um *dimmer* foi incorporado ao circuito para controle da intensidade da luz. Além disso, as lâmpadas podem ser acionadas de forma independente. A fonte de luz foi avaliada segundo três parâmetros: resposta espectral, uniformidade espacial e estabilidade temporal. O espectro da luz foi medido com um espectrômetro de alta resolução e foi comparado ao padrão AM1.5 para determinar como a luz deve ser corrigida. A uniformidade e estabilidade foram verificadas com um medidor de radiação solar. Apesar de o equipamento desenvolvido ser capaz de atingir até 3.500 W/m² de irradiância, ele não recria corretamente o espectro solar devido à diferença entre a curva de resposta das lâmpadas e o padrão AM1.5, especialmente nas faixas do ultravioleta e infravermelho; a fonte de luz apresentou temperatura de cor de 3.200 K.

Para corrigir o espectro das lâmpadas, Landrock et al. (2011) optaram por quatro filtros de cor de baixo custo. Dois filtros têm o propósito de reduzir o calor que atingiria as células em teste; o terceiro serve para corrigir a temperatura de cor das lâmpadas, de 3.200 K para 5.200 K, e o quarto atenua a radiação IR que alcança a superfície onde serão posicionadas as células. Aqueles autores concluíram que os filtros corrigiram satisfatoriamente o espectro das lâmpadas halógenas, reduzindo o erro médio quadrático entre o padrão AM1.5 e as lâmpadas; contudo, a intensidade máxima da fonte de luz foi reduzida — de 3.500 W/m² para 200 W/m². Isso pode ser compensado pelo aumento no número de lâmpadas. Eles destacam que o equipamento desenvolvido não pode substituir simuladores solares comerciais, porém pode ser empregado por pesquisadores para efetuar testes preliminares de células fotovoltaicas a um custo relativamente baixo.

2.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

2.2.1 Histórico do desenvolvimento das células fotovoltaicas

Segundo a norma NBR 10899:2013 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a célula fotovoltaica é um dispositivo fotovoltaico elementar especificamente

desenvolvido para realizar a conversão direta de energia solar em energia elétrica (ABNT, 2013). Este dispositivo utiliza o efeito fotovoltaico para funcionar.

O efeito fotovoltaico foi descoberto em 1839 pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel, quando observou que dois eletrodos de latão imersos em uma solução ácida produziam uma corrente contínua ao serem iluminados pela luz do sol. Em 1876, W. Smith, W. G. Adams e R. E. Day observaram um efeito similar em um dispositivo de estado sólido fabricado com selênio. Alguns anos depois, em 1883, o americano C. E. Fritts dispôs uma folha de selênio amorfo sobre uma folha de metal e a cobriu com um fino filme transparente contendo ouro; ele notou que esta montagem produzia uma corrente contínua constante e de intensidade considerável ao ser exposta à luz do sol. Este dispositivo é um dos primeiros que podem ser denominados *célula fotovoltaica*. Na época, ainda não havia uma explicação teórica para o funcionamento do efeito fotovoltaico e havia muito ceticismo sobre a capacidade da montagem de Fritts realmente conseguir converter a luz solar em eletricidade. Este ceticismo foi reduzido quando o alemão Werner Siemens, respeitado especialista em eletricidade na época, verificou que as alegações de Fritts estavam corretas. Apesar disso, a eficiência destes dispositivos era menor que 1% (FRAAS; PARTAIN, 2010).

A explicação teórica do efeito fotovoltaico somente surgiu em 1904, fruto do trabalho do alemão Albert Einstein, o qual lhe rendeu um Prêmio Nobel em 1921. A prova prática da explicação de Einstein se deu em 1916 com o experimento de Robert Millikan (KISSELL, 2012).

Em 1918, o cientista polonês Jan Czochralski inventou um método de produção de silício monocristalino, o que permitiu a criação das primeiras células fotovoltaicas de silício em 1941. Em 1932, o efeito fotovoltaico foi observado em um composto de sulfeto de cádmio, abrindo as portas ao futuro desenvolvimento de células de filmes finos (KISSELL, 2012).

Comercialmente, as primeiras células fotovoltaicas modernas surgiram em 1954, quando Chapin e outros, trabalhando nos Laboratórios Bell, nos Estados Unidos, inventaram e demonstraram um processo de difusão para a introdução controlada de impurezas em cristais de silício, processo hoje conhecido como dopagem. Eles produziram uma célula fotovoltaica com 6% de eficiência (FRAAS; PARTAIN, 2010). Mais tarde, incentivados pelo setor de telecomunicações, que buscava fontes alternativas de energia para sistemas instalados em localidades remotas, e pelo setor aeroespacial, que necessitava de uma fonte de energia para alimentar equipamentos eletrônicos no espaço, diversos pesquisadores sistematicamente elevaram a eficiência das células a 15%. Apesar disso, o altíssimo custo delas restringia sua utilização a poucas aplicações, mantendo a indústria fotovoltaica em pequena escala.

A crise do petróleo de 1973 ampliou significativamente o interesse na energia solar. Os módulos fotovoltaicos utilizados no espaço foram modificados para resistirem às condições climáticas da superfície terrestre, atingindo eficiências da ordem de 10%. Em laboratório, a eficiência das células alcançou 25% (FRAAS, PARTAIN, 2010). Segundo o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB), em 1978 a produção da indústria fotovoltaica já ultrapassava a marca de 1 MW ao ano (CRESESB, 2014).

Desde então, o crescimento da indústria de células fotovoltaicas tem ocorrido de forma exponencial. Apenas vinte anos depois, em 1998, a produção mundial de células já havia atingido a marca de 150 MW. Em 2012, já era superior a 36 GW (CRESESB, 2014).

2.2.1.1 Breve histórico brasileiro

O desenvolvimento de células fotovoltaicas no Brasil começou na década de 1950 no que hoje é o Centro Técnico Aeroespacial e na Universidade de São Paulo, com atividades voltadas à produção de silício monocristalino pelo método Czochralski. Células de filmes finos começaram a ser desenvolvidas na década de 1970 no Instituto Militar de Engenharia. Naquela época, o desenvolvimento nacional equiparava-se aos países mais avançados, devido à crise do petróleo. Porém, nos anos 1980, a falta de incentivos ao setor fez a indústria fotovoltaica brasileira encolher sensivelmente, havendo apenas um tímido desenvolvimento de tecnologia em escala de laboratório (CRESESB, 2014).

A partir dos anos 1990, iniciaram-se pesquisas para o uso de células fotovoltaicas no primeiro satélite brasileiro. Recentemente, células de tripla junção estão sendo testadas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, na cidade de São José dos Campos, Estado de São Paulo, para utilização em aplicações espaciais (CRESESB, 2014).

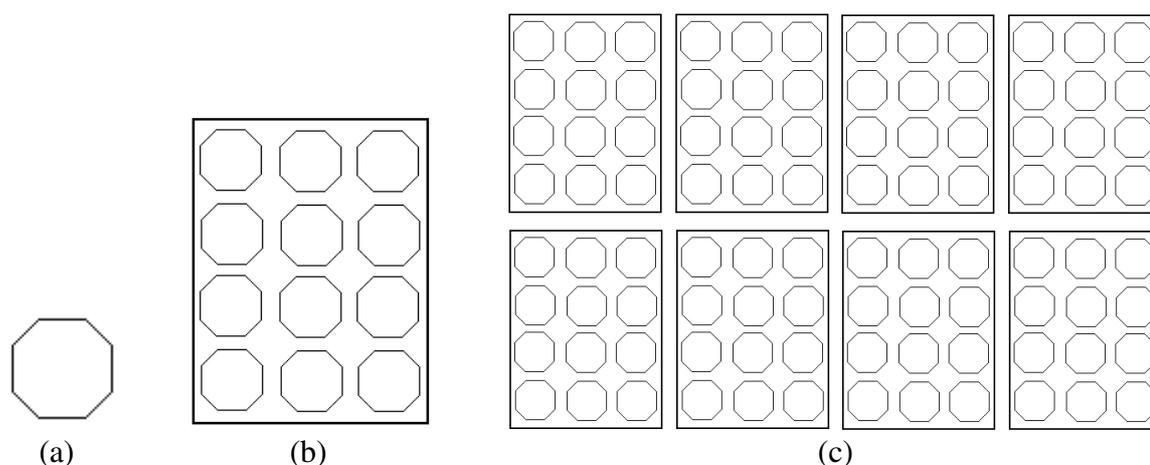
Outros tipos mais recentes de células fotovoltaicas também têm sido desenvolvidos no país. Células sensibilizadas por corantes e células baseadas em materiais orgânicos vêm sendo alvo de pesquisas em diversas universidades, como o Instituto de Química da Universidade de São Paulo e o Laboratório de Nanotecnologia e Energia Solar da Universidade de Campinas.

2.2.2 Tipos de células fotovoltaicas

Sistemas fotovoltaicos são sistemas capazes de gerar energia elétrica a partir da incidência de luz solar sobre arranjos fotovoltaicos. Estes arranjos são formados pela combinação em série e em paralelo de diversos módulos fotovoltaicos (também chamados de

módulos solares ou painéis solares), que são uma unidade básica formada por um conjunto de células, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica em corrente contínua (ABNT, 2013). Por sua vez, os módulos são compostos internamente por várias células fotovoltaicas interligadas geralmente em série, contendo apenas dois terminais: um positivo e um negativo. A diferença entre célula, módulo e arranjo fotovoltaico é mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Combinações de elementos fotovoltaicos: (a) célula; (b) módulo ou painel; (c) arranjo.



Fonte: Autor.

Embora as denominações *módulo solar* e *painel solar* sejam comumente aplicadas aos equipamentos comercializados no mercado, é preferível utilizar os termos *módulo fotovoltaico* ou *painel fotovoltaico* para designar o conjunto encapsulado de células, visto que a energia solar pode ser usada tanto para geração de energia elétrica quanto para aquecimento de fluidos. Muitos fabricantes denominam, erroneamente, seus equipamentos para aquecimento de água de *painéis solares*, sendo que o termo mais adequado para sistemas solares de aquecimento é *coletores solares*. Portanto, para distinguir claramente os dois tipos de sistemas, recomenda-se o emprego dos termos técnicos *painel* ou *módulo fotovoltaico* (PV) para geração de eletricidade (KISSELL, 2012).

As células fotovoltaicas que compõem os módulos podem ser produzidas com diferentes materiais e por processos industriais variados. O material mais empregado é o silício grau solar (Si-gS), com 99,9999% de pureza, também conhecido como 6N (seis nove), que é obtido a partir da purificação do silício grau metalúrgico (Si-gM), o qual contém 99% de pureza. Este, por sua vez, é obtido através de uma reação química entre areia (que é basicamente composta de sílica, SiO₂) ou quartzo junto a carvão em um forno a arco elétrico (CRESESB, 2014).

Conforme as tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas foram evoluindo, tornou-se habitual dividi-las em três gerações. As células de primeira geração utilizam silício cristalino para sua fabricação. O silício cristalino pode ser classificado em monocristalino e policristalino.

As células de silício monocristalino foram as primeiras a surgir no mercado. Produzidas a partir de um lingote cilíndrico composto por um único cristal de silício de alta pureza que posteriormente é fatiado para fabricar as células, elas são um dos tipos mais eficientes de células do mercado e possuem um custo mais elevado que a tecnologia policristalina. Possuem espessura de 0,2 mm e formato octogonal, pelo fato de serem extraídas de um lingote cilíndrico e serem cortadas de maneira a reduzir ao máximo a perda de material. Por isso, ao serem dispostas em um módulo fotovoltaico retangular, ocorrem espaços vazios entre as células, mesmo que elas fiquem dispostas lado a lado (CRESESB, 2014). Segundo o Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL, *National Renewable Energy Laboratory*), nos Estados Unidos, a eficiência máxima (valor absoluto) obtida em laboratório para este tipo de célula é de 25,3% (NREL, 2017). Uma célula monocristalina é mostrada na Figura 2.

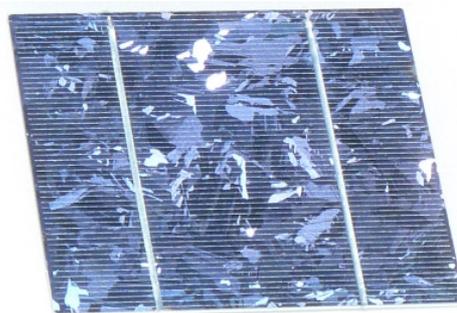
Figura 2 – Célula monocristalina.



Fonte: Adaptado de Wikimedia Commons (2016b).

As células de silício policristalino, também chamadas de multicristalinas, surgiram após as células monocristalinas. Seu processo de fabricação é diferente, pois em vez de se formar um único cristal de silício, elas são produzidas a partir de um grande bloco retangular de silício solidificado contendo diversos cristais com dimensões na ordem de centímetros. Como consequência, este tipo de célula possui uma aparência que lembra vidro temperado trincado (KISSELL, 2012), conforme exibido na Figura 3.

Figura 3 – Célula policristalina.



Fonte: Adaptado de Wikimedia Commons (2016b).

Nota-se, na Figura 3, que a célula é retangular pelo fato de ser extraída de um bloco retangular de silício, minimizando a perda de material em relação às células monocristalinas. A eficiência das células policristalinas é ligeiramente menor que a das monocristalinas devido à presença de interfaces entre os vários cristais (CRESESB, 2014); contudo, seu custo é mais baixo em decorrência do processo de fabricação ser menos complexo. O valor máximo de eficiência alcançado em laboratório é de 21,3% (NREL, 2017).

A redução da potência nominal de módulos fotovoltaicos de silício cristalino varia entre 0,5% e 1% ao ano (CRESESB, 2014). Em geral, os fabricantes estimam que seus painéis fornecerão cerca de 80% da potência nominal após 25 anos de uso (CRESESB, 2014).

As células de segunda geração não utilizam silício cristalino para sua fabricação, mas sim silício amorfo, isto é, que não se apresenta organizado na forma de cristais, porém preserva suas características de semicondutor. Além do silício, outros elementos químicos podem ser empregados. Por possuírem uma alta taxa de absorção óptica, é possível fabricar células muito finas, motivo pelo qual as células de segunda geração são comumente denominadas de *células de filmes finos*.

O processo de fabricação de filmes finos é bastante diferente do silício cristalino, ocorrendo através da sucessiva deposição de camadas de semicondutores sobre uma superfície (o substrato). Esta superfície pode ser feita de material rígido ou flexível, abrindo um leque de oportunidades de aplicação destas células como, por exemplo, em construções arquitetônicas (telhados e janelas) e aparelhos eletrônicos portáteis (relógios, calculadoras e carregadores de bateria para celulares). Os materiais mais utilizados em células de segunda geração são: silício amorfo, telureto de cádmio (CdTe), células cobre-índio-selênio (CIS) ou cobre-índio-gálio-selênio (CIGS), células do grupo III-V e células multijunção. Uma célula flexível CIGS é mostrada na Figura 4.

As células de terceira geração englobam as tecnologias mais recentes, como as células sensibilizadas por corantes, células orgânicas e outras tecnologias ainda em fase de

desenvolvimento. Cabe ressaltar que células sensibilizadas por corantes (*Dye Sensitized Solar Cell*, DSSC) começaram a ser desenvolvidas na década de 1980 por Michael Grätzel. Este tipo de célula não usa material semicondutor para funcionar, mas sim a absorção de luz em um corante; por esta razão, ela é considerada uma célula fotoquímica e não uma fotovoltaica. A luz incidente no corante provoca a liberação de elétrons que passam a circular entre os eletrodos e um circuito externo. Um exemplo de células DSSC instaladas em um edifício pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 4 - Célula flexível CIGS.



Fonte: Wikimedia Commons (2016a).

Figura 5 - Células sensibilizadas por corante instaladas na lateral de um edifício.



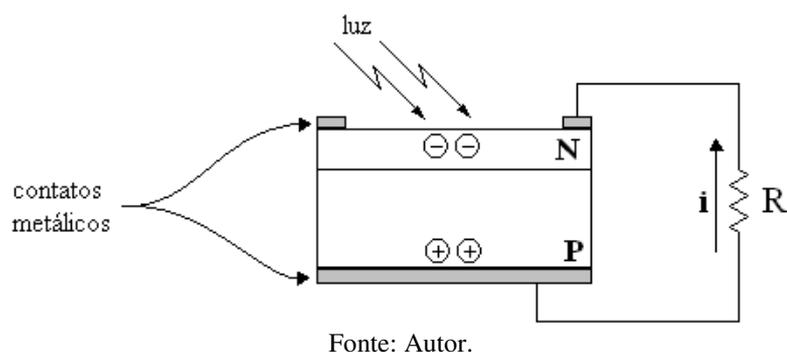
Fonte: Wikimedia Commons (2016c).

2.2.3 Características de células fotovoltaicas

Uma célula fotovoltaica de silício cristalino possui a mesma estrutura básica de um diodo, com uma junção $P-N$ que é exposta à luz do sol. A Figura 6 permite visualizar a estrutura da célula e auxilia na compreensão de seu funcionamento. Ao ser iluminada, os fótons da luz atingem o semicondutor tipo N , na face superior da célula, fornecendo energia aos elétrons, que se libertam da banda de valência e passam a ser elétrons livres na banda de condução. Quando a célula é conectada a um elemento ou circuito externo, como um resistor,

por exemplo, os elétrons do lado N fluem em direção ao lado P , onde se recombinam com as lacunas, gerando uma corrente elétrica pelo circuito externo. A célula possui contatos metálicos em ambas as faces para conexão a outras células ou elementos externos (KISSEL, 2012; FRAAS; PARTAIN, 2010).

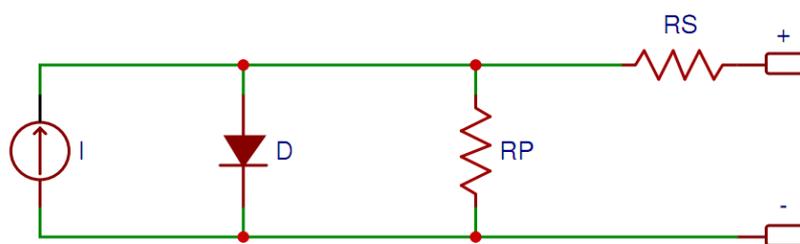
Figura 6 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica.



O circuito equivalente de uma célula, ilustrado na Figura 7, é composto por quatro elementos. A fonte de corrente I representa a corrente fornecida pela célula ao ser iluminada pela luz solar. O diodo D representa o comportamento da célula quando ela não recebe luz; nesta situação, a corrente I é zero e a célula é capaz de absorver a energia vinda de um circuito externo (CRESESB, 2014).

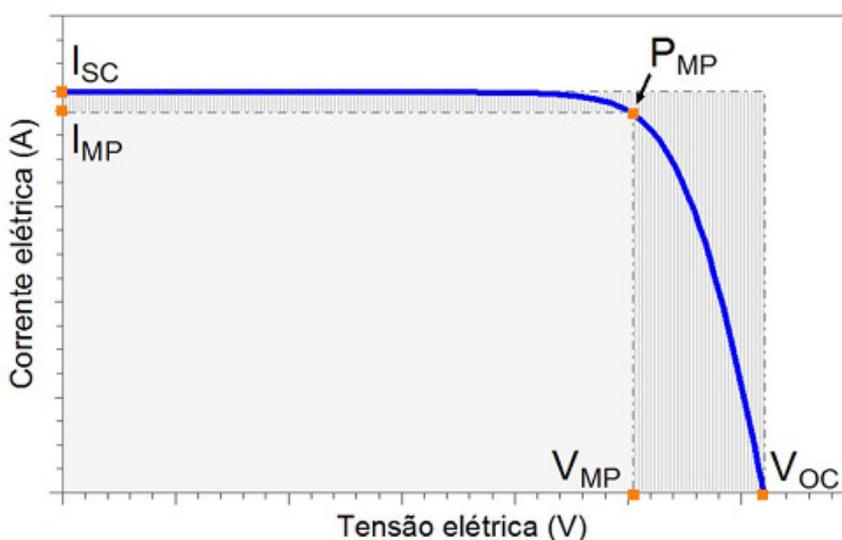
Células fotovoltaicas apresentam perdas internas que reduzem sua eficiência, sendo representadas no modelo da Figura 7 por duas resistências equivalentes: série e paralelo. A resistência série R_S tem origem na resistência do semiconductor, nos contatos metálicos da célula e na junção entre semiconductor e contato metálico. A resistência paralela R_P representa as perdas causadas por defeitos na estrutura cristalina do semiconductor, especialmente nas bordas da célula, que criam caminhos para correntes de fuga, assim como perdas originadas por resistências em paralelo entre o contato metálico e a face superior, as camadas semicondutoras e o contato inferior (CRESESB, 2014).

Figura 7 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.



A curva I-V, ou *curva característica*, é o gráfico que relaciona a corrente produzida e a tensão gerada nos terminais de uma célula ou de um módulo fotovoltaico e é a principal informação do componente. A partir dessa curva é possível determinar diversos parâmetros elétricos da célula ou módulo, tais como: tensão de circuito aberto (V_{OC}), corrente de curto-circuito (I_{SC}), ponto de potência máxima (P_{MP}), tensão na máxima potência (V_{MP}) e corrente na máxima potência (I_{MP}). A curva I-V, exemplificada na Figura 8, pode ser determinada em laboratório utilizando-se um simulador solar e um equipamento de medição automatizado de alta precisão (CRESESB, 2014) em condições padrão de ensaio: irradiância constante de 1.000 W/m^2 , temperatura das células constante de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e espectro da luz aplicada à célula no padrão AM1.5, descrito na norma internacional ASTM G173-03:2012 (ASTM INTERNATIONAL, 2012) e mostrado graficamente na Figura 9.

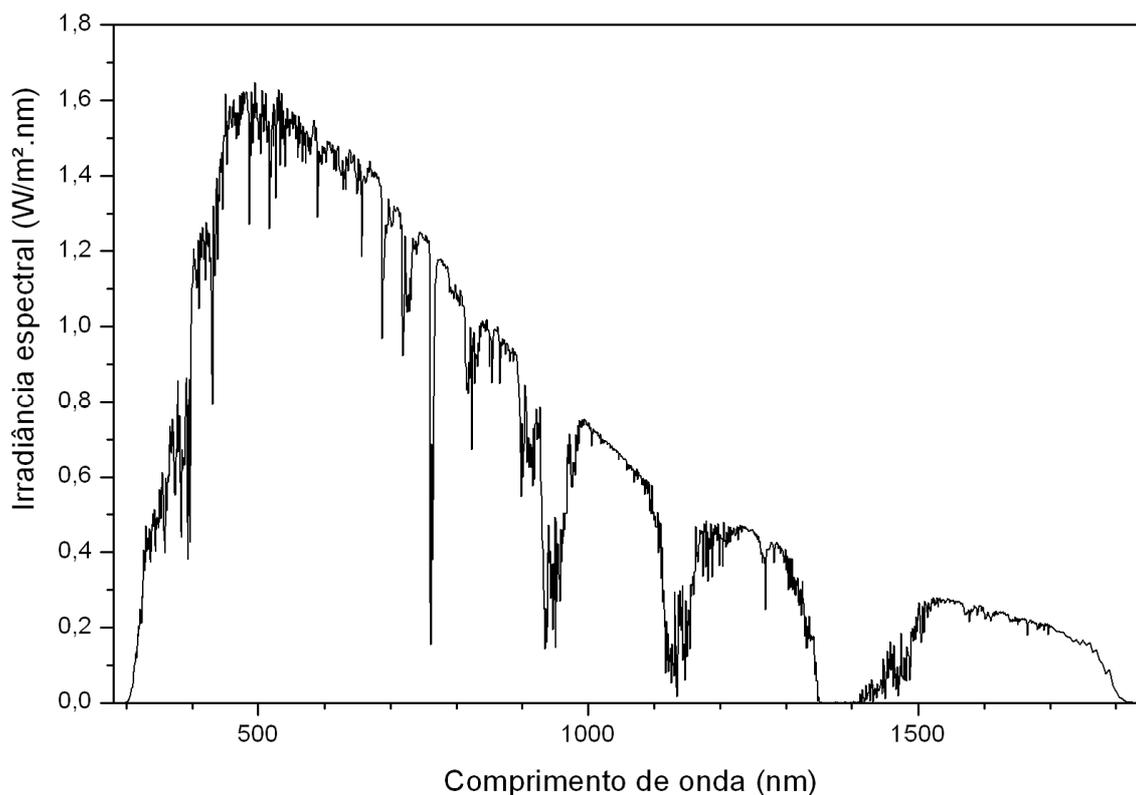
Figura 8 – Curva característica I-V de uma célula ou módulo fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de CRESESB (2014).

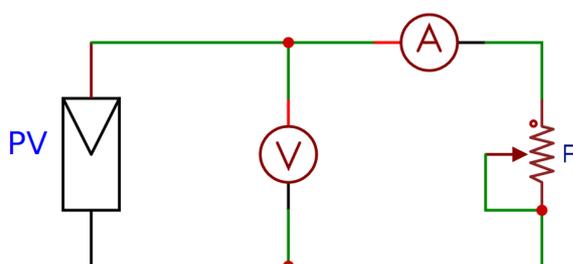
A curva característica também pode ser determinada manualmente com o emprego de um circuito simples de medição tal qual o exibido na Figura 10, composto por um reostato de potência, um voltímetro e um amperímetro. A resistência do reostato varia de zero até seu valor máximo em pequenos incrementos e, a cada incremento, são registradas a tensão e corrente fornecidas pela célula ou módulo. Neste caso, a curva se aproxima ao máximo da operação real do módulo, pois geralmente é obtida em condições reais de irradiância, temperatura das células e espectro da luz solar.

Figura 9 – Espectro padrão AM1.5.



Fonte: Adaptado da norma ASTM G173-03:2012.

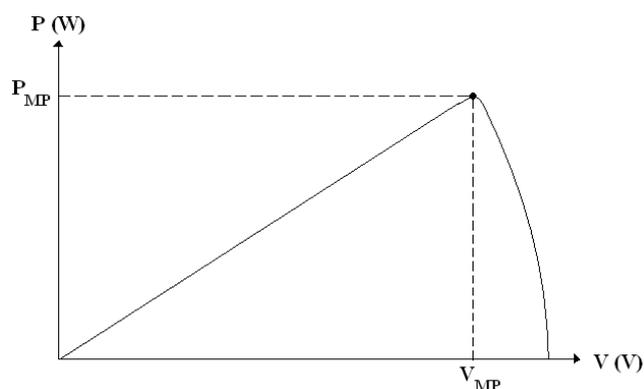
Figura 10 – Circuito para medição manual da curva I-V de uma célula ou módulo fotovoltaico.



Fonte: Autor.

A curva P - V é derivada da curva I - V e mostra a relação entre a potência gerada pelo módulo e a tensão em seus terminais. A partir desta curva é determinado o ponto de potência máxima (P_{MP}), valor pelo qual o módulo é comercializado. Esta curva, esquematizada na Figura 11, é obtida matematicamente através da multiplicação dos pares de valores (V, I) extraídos da curva I - V .

Figura 11 – Curva P-V de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Autor.

Os módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado vêm acompanhados de uma folha de especificações contendo diversos parâmetros elétricos do equipamento. Estes são determinados através da curva característica, conforme ilustrado na Figura 8. Os parâmetros *tensão de circuito aberto*, *corrente de curto-circuito*, *tensão na potência máxima*, *corrente na potência máxima* e *ponto de potência máxima* são obtidos diretamente da curva I-V. Outros parâmetros, tais como *fator de forma*, *eficiência* e *relação potência/área* são calculados de forma indireta.

A tensão de circuito aberto (V_{OC}) é a tensão entre os terminais do painel quando ele está sendo iluminado mas não está conectado a nenhuma carga. Ela varia conforme a temperatura das células: quanto maior a temperatura, menor será a V_{OC} . A corrente de curto-circuito (I_{SC}) é a maior corrente que o módulo pode fornecer e é medida quando a tensão entre os terminais do módulo é zero, ou seja, quando os terminais estão curto-circuitados. I_{SC} varia linearmente com a irradiância recebida pelo módulo, apresentando também dependência com a área de cada célula e com o espectro da luz recebida.

A tensão na potência máxima (V_{MP}) e a corrente na potência máxima (I_{MP}) são obtidas a partir do cruzamento das curvas I-V e P-V, sendo que esta última fornece o ponto de potência máxima (P_{MP}). Deve-se ressaltar que para que o painel forneça a potência máxima, todas as condições utilizadas para o teste de laboratório devem ser atendidas; porém, em uma instalação real dos painéis, estas condições são raramente atingidas, o que resulta em uma redução da potência máxima que o componente pode fornecer. Por este motivo, no projeto de sistemas fotovoltaicos deve-se considerar o maior valor de potência que os painéis podem fornecer em condições reais de operação, em vez do valor nominal expresso na folha de especificações, sob risco de o sistema não suprir adequadamente a carga a ele conectada.

O fator de forma (FF) está relacionado com as perdas nas resistências série e paralelo das células do painel; quanto menor o FF , maiores as perdas. Este fator é calculado por meio da equação (1) e representa a razão entre a potência máxima e os valores extremos de tensão e corrente do painel, sendo expresso em valores percentuais.

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \cdot 100 = \frac{V_{MP} \cdot I_{MP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \cdot 100 \quad (1)$$

A eficiência (η) define a taxa máxima de conversão da energia luminosa recebida em energia elétrica e é expressa por meio da equação (2).

$$\eta = \frac{P_{MP}}{A \cdot G} \cdot 100 \quad (2)$$

sendo η a eficiência em valores percentuais, A a área do módulo em m^2 e G a irradiância incidente em W/m^2 . Para o cálculo da eficiência, geralmente se considera que a irradiância é $1.000 W/m^2$. A área A pode ser a área total do painel, incluindo a moldura e outras partes construtivas, ou apenas a área das células, sendo a primeira forma a mais comum.

A relação *potência por área* (P_{MP}/A), dada pela equação (3), pode ser considerada como uma medida de eficiência do módulo, informando quanta potência o painel pode gerar para cada unidade de área. É útil no projeto de sistemas fotovoltaicos para a determinação da quantidade de módulos necessária para se atingir um certo valor de potência. Grosso modo, quanto maior o valor de P_{MP}/A , mais eficiente é o painel, pois produz mais energia com menor quantidade de semicondutor.

$$P_{MP} / A = \frac{P_{MP}}{A} \quad (3)$$

sendo P_{MP}/A dada em W/m^2 .

É oportuno mencionar que a unidade de potência nominal utilizada em células e painéis fotovoltaicos é representada como *watt-pico* (Wp) em lugar de *watt* (W), pois representa o valor máximo que o componente pode produzir (ABNT, 2013; CRESESB, 2014).

3 MÉTODO

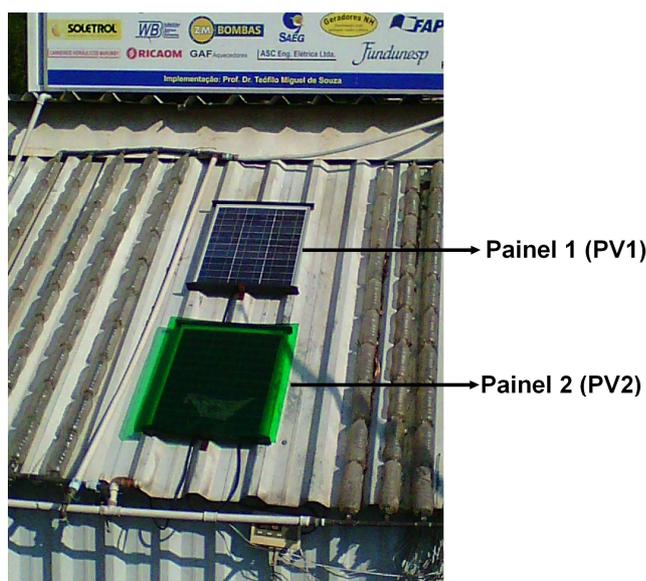
3.1 LOCAL DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos foram realizados no Centro de Energias Renováveis da Faculdade de Engenharia da UNESP (Universidade Estadual Paulista), *campus* de Guaratinguetá (latitude 22°28' Sul, longitude 45°6' Oeste, altitude 530 m). Segundo o CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura), o local apresenta classificação climática de Köppen *Aw* (tropical chuvoso com inverno seco), com temperaturas médias variando entre 18,2 °C em julho e 24,8 °C em fevereiro (CEPAGRI, 2016). A radiação solar global varia entre o valor mínimo de 3,02 kWh.m⁻².dia⁻¹ em junho e máximo de 5,35 kWh.m⁻².dia⁻¹ em novembro (CRESESB, 2016).

3.2 MONTAGEM DO EXPERIMENTO

Para a realização deste estudo, dois painéis fotovoltaicos iguais foram montados sobre um telhado metálico com estruturas de suporte individuais, conforme exemplificado na Figura 12. O telhado possui inclinação de 32° em relação à horizontal e está orientado a 40° Leste.

Figura 12 – Imagem real da montagem experimental.

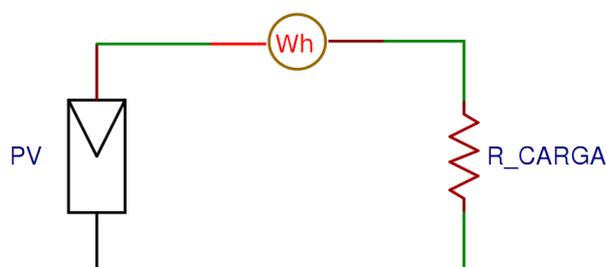


Fonte: Autor.

Na Figura 13 é mostrado um diagrama esquemático do circuito utilizado para realização das medições. Cada um dos painéis fotovoltaicos foi conectado a um watt-horímetro (medidor

de energia em corrente contínua) e em seguida a um banco de resistores de potência, que age como carga para o painel.

Figura 13 – Circuito utilizado para medições.



Fonte: Autor.

Os painéis fotovoltaicos empregados nos experimentos apresentam potência nominal de 22 Wp e possuem 36 células de silício policristalino. Suas especificações técnicas estão descritas na Tabela 1 e na Figura 14 é apresentada uma foto do painel.

Tabela 1 – Especificações técnicas dos painéis fotovoltaicos.

Característica	Valor
Fabricante	<i>Suntech</i>
Modelo	STP022-12/D
Tecnologia da célula	policristalina
Potência máxima (P_{MP})	22 Wp
Corrente na P_{MP} (I_{MP})	1,31 A
Tensão na P_{MP} (V_{MP})	16,8 V
Corrente de curto-circuito (I_{SC})	1,61 A
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	21 V
Temperatura nominal de operação da célula (T_{NOCT})	50 °C
Peso	3,2 kg
Dimensões	559 x 407 x 25 (mm)
Tensão máxima do sistema	715 V
Corrente máxima do fusível série	3 A

Fonte: Empresa *Suntech*.

Figura 14 – Painel fotovoltaico Suntech STP022-12/D.



Fonte: Autor.

Os dois watt-horímetros são fabricados pela empresa britânica *Portable Power Supplies* e suportam até 250 W de potência. A Tabela 2 contém as características técnicas e na Figura 15 é mostrada uma imagem de um dos medidores.

Tabela 2 – Características técnicas dos medidores de energia em corrente contínua.

Característica	Valor
Fabricante	<i>Portable Power Supplies</i>
Modelo	<i>Premium USB + DC Power Monitor</i>
Tensão máxima suportada	50 V
Resolução de tensão	0,0001 V
Corrente máxima suportada	5 A
Resolução de corrente	0,0001 A
Potência máxima suportada	250 W
Capacidade de medição acumulada de energia	9999 Ah
Erro	$\pm 0,2\%$ até 2 A; $< 1\%$ até 5A

Fonte: Portable Power Supplies (2014).

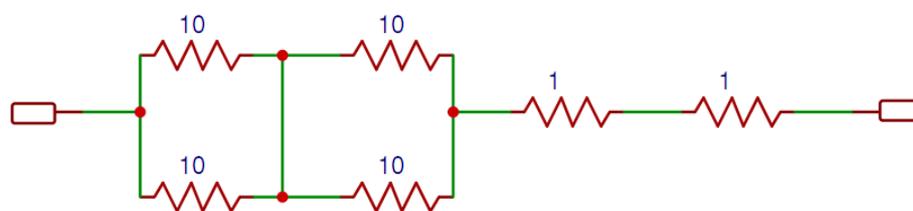
Figura 15 – Medidor de energia em corrente contínua.



Fonte: Autor.

O banco de resistores de potência é composto por quatro resistores de $10\ \Omega / 10\ \text{W}$ e dois resistores de $1\ \Omega / 10\ \text{W}$, conectados de maneira a produzir uma resistência equivalente de $12\ \Omega$, de acordo com o ilustrado na Figura 16. O arranjo foi concebido desta forma para que houvesse uma divisão da potência dissipada total entre vários resistores, pois os componentes de maior potência disponíveis no momento da montagem do experimento eram de $10\ \text{W}$.

Figura 16 – Circuito do banco de resistores de potência.



Fonte: Autor.

Oito filtros de cor foram fixados, um por vez, sobre um dos painéis fotovoltaicos (Painel 2). Cada filtro apresenta uma curva de distribuição espectral de energia (*Spectral Energy Distribution*, SED) diferente, abrangendo diversos comprimentos de onda dentro do espectro da luz visível e infravermelho. Os filtros foram divididos em dois grupos, de acordo com as características de suas curvas SED. Quatro deles foram denominados *filtros primários*, pois abrangem, de forma isolada, as principais faixas de comprimentos de onda dentro do espectro visível; os outros quatro filtros possuem curvas que incluem várias faixas de comprimentos de onda simultaneamente, sendo denominados *filtros secundários*. Os nomes técnicos, os números de identificação e os nomes em português adotados neste estudo são mostrados no Quadro 1.

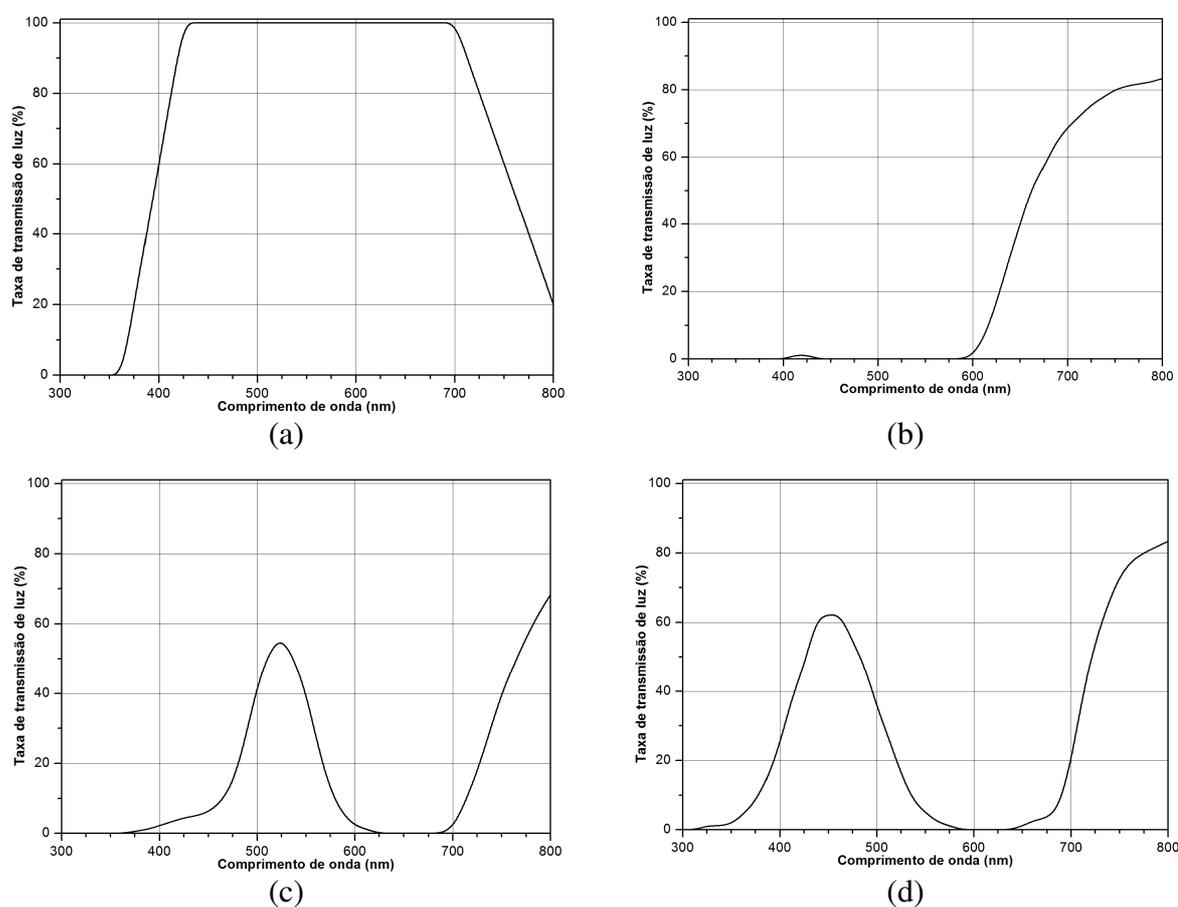
Quadro 1 – Especificações dos filtros de cor.

Fabricante: Cotech Sensitizing LTD		
Produto: Regular lighting filter		
Número	Nome original	Nome adotado em português
269	Heat Shield	Infravermelho (IR)
027	Medium Red	Vermelho
124	Dark Green	Verde
132	Medium Blue	Azul
010	Medium Yellow	Amarelo
253	Hampshire Frost	Frost
317	Dark Amber	Âmbar
343	Special Medium Lavender	Lavanda

Fonte: Cotech Sensitizing (2014).

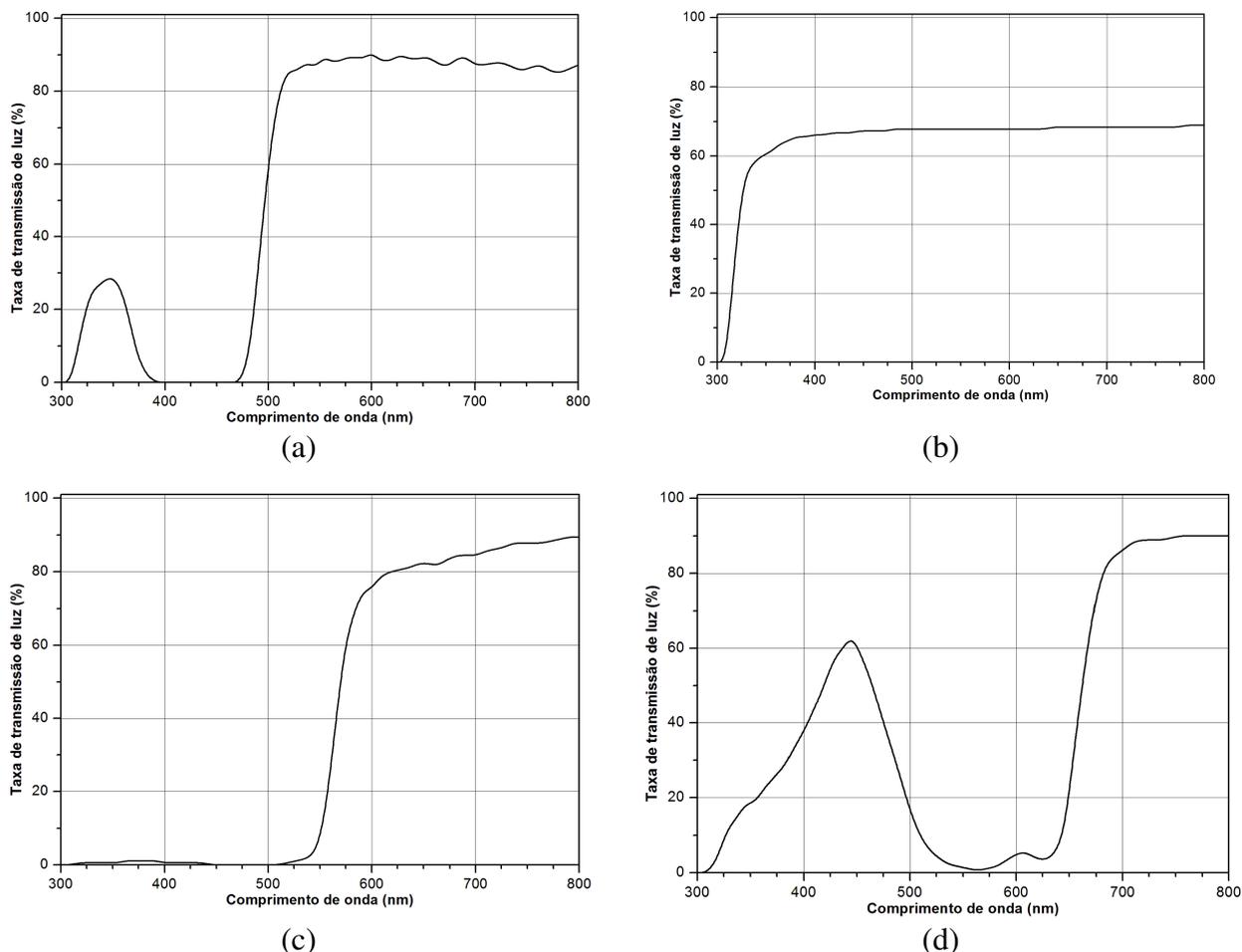
A Figura 17 ilustra as curvas SED dos filtros primários: Infravermelho, Vermelho, Verde e Azul. Pode-se visualizar, na Figura 18, as curvas dos filtros secundários: Amarelo, Frost, Âmbar e Lavanda. Cada filtro deixa passar apenas uma parte do espectro da luz; a exceção é o filtro Infravermelho, que se caracteriza por permitir que praticamente toda a luz visível passe por ele, bloqueando os raios infravermelhos. Além disso, por serem fabricados com material plástico, todos os filtros bloqueiam raios ultravioletas (comprimentos de onda abaixo de 300 nm).

Figura 17 – Distribuição espectral de energia dos filtros primários: (a) Infravermelho; (b) Vermelho; (c) Verde; (d) Azul.



Fonte: Adaptado de Cotech Sensitizing (2014).

Figura 18 – Distribuição espectral de energia dos filtros secundários: (a) Amarelo; (b) Frost; (c) Âmbar; (d) Lavanda.



Fonte: Adaptado de Cotech Sensitizing (2014).

3.3 MÉTODO DE CÁLCULO E ANÁLISE

Antes de iniciar a coleta de dados, foi necessário determinar qual o valor ótimo para o banco de resistores de potência, que é o valor no qual ocorre a máxima transferência de potência do painel para a carga. Este ponto pode ser determinado através do levantamento da curva característica do painel. Para isso, foi utilizado o circuito mostrado na Figura 13, com um reostato de potência (0-300 Ω , com capacidade máxima de 300 W) substituindo o banco de resistores. Iniciando-se em 0 Ω , a cada incremento do reostato, mediu-se a tensão e corrente produzidas pelo painel e, a partir destes pares de valores, pôde-se determinar a curva I-V do painel fotovoltaico analisado.

A partir da curva característica, é possível derivar outras curvas de operação do painel, tais como a de potência *versus* tensão (P-V) e de potência *versus* resistência equivalente (P-R). A relação entre as diferentes curvas características é regida pelas leis de Ohm. O valor

ótimo para o banco fixo de resistores é o valor de resistência equivalente no qual o painel produz a maior potência de saída.

De posse das características técnicas básicas dos painéis fotovoltaicos (exibidas na Tabela 1) e com a medição da área de uma célula e área total do painel, outros parâmetros elétricos podem ser determinados, tais como o fator de forma, a relação potência/área e a eficiência máxima teórica.

Após o cálculo do banco de resistores de potência, procedeu-se à coleta de dados experimentais. A cada dia, foi registrado pelos watt-horímetros: o intervalo de tempo de medição (em horas, minutos e segundos) durante o qual ocorreu o registro dos dados; a quantidade de energia gerada pelo painel fotovoltaico sem filtro (Painel 1) durante o intervalo de medição, em Wh; e a quantidade de energia produzida pelo painel com filtro (Painel 2), no mesmo intervalo. Os medidores são ligados e desligados simultaneamente, produzindo a mesma medida de tempo para os dois módulos. Além disso, somente os dias com intervalos de medição superiores a uma hora foram considerados válidos.

Com os dados experimentais, são calculadas grandezas adicionais necessárias para a análise dos resultados de cada filtro utilizado. A *eficiência relativa* é a relação entre a quantidade de energia gerada em um dia pelo painel com filtro e a produzida pelo painel sem filtro, o qual é utilizado como base para comparação, conforme indicado pela equação (4).

$$\eta_R = \frac{E_{PV2}}{E_{PV1}} \cdot 100 \quad (4)$$

sendo η_R a eficiência relativa (valor percentual), E_{PV2} a quantidade de energia do painel com filtro (em Wh) e E_{PV1} a quantidade de energia do painel sem filtro (em Wh). Por exemplo, se em um determinado dia o módulo com filtro vermelho gerar 12 Wh e o módulo sem filtro gerar 60 Wh, tem-se uma eficiência relativa de 20% para este filtro. A equação (4) é aplicada a todos os filtros exceto o Infravermelho. Este filtro, por possuir a característica de bloquear (e não de *permitir*) a passagem dos raios infravermelhos, necessita de uma forma diferente para cálculo da eficiência relativa, que está expressa na equação (5).

$$\eta_R = \left(1 - \frac{E_{PV2}}{E_{PV1}} \right) \cdot 100 \quad (5)$$

Diariamente, também foram anotadas as condições climáticas observadas no local dos experimentos, divididas em seis categorias, de acordo com o Quadro 2.

Quadro 2 – Observações climáticas padronizadas.

Clima	Descrição	Valores típicos de irradiância
Ensolarado	Céu limpo, sem nuvens.	> 850 W/m ²
Ensolarado, poucas nuvens	Céu limpo, com poucas nuvens esparsas.	> 700 W/m ²
Sol entre nuvens	Céu predominantemente limpo, mas ocorrem nuvens que bloqueiam o sol por tempo significativo.	variável, atingindo no mínimo 300 W/m ²
Parcialmente nublado	Céu predominantemente nublado, com vários momentos de abertura de sol entre as nuvens.	variável, atingindo no mínimo 300 W/m ²
Nublado	Céu nublado o tempo todo, ou com pouquíssimas aberturas de sol.	< 300 W/m ²
Chuvoso	Chuvoso o tempo todo.	< 100 W/m ²

Fonte: Autor.

A partir dos dados coletados, foram criadas cinco outras grandezas para auxiliar a análise dos resultados: *potência média*, *potência média unitária*, *energia unitária*, *nível de radiação* e *média das potências médias*. A *potência média* é definida como a relação entre a quantidade de energia produzida pelo painel sem filtro e o intervalo de medição, conforme as equações (6) e (7).

$$\bar{P} = \frac{E_{PV1}}{\Delta t} \quad (6)$$

$$\Delta t = [horas] + \frac{[minutos]}{60} + \frac{[segundos]}{3600} \quad (7)$$

sendo \bar{P} a potência média (em W), E_{PV1} a quantidade de energia do painel sem filtro (em Wh) e Δt o intervalo de tempo de medição registrado no dia, convertido em valor decimal através da equação (7). A utilização desta grandeza permite uma previsão da quantidade de energia produzida em diferentes condições climáticas, sem que seja preciso medir a irradiância diariamente. Medir a irradiância demandaria um sistema completo de aquisição e armazenamento de dados; ao excluir essa medição, simplifica-se a coleta de informações e reduzem-se consideravelmente os custos com equipamentos. Além disso, a irradiância muda constantemente ao longo do dia, começando com um valor mínimo no início do dia, passando pelo máximo ao meio-dia e novamente atingindo o mínimo no fim do dia, necessitando da construção de uma curva diária de irradiância que precisaria ser analisada matematicamente.

A potência média expressa um valor médio da produção de energia dos módulos fotovoltaicos ao longo do dia, sendo um valor de interpretação mais simples e imediata.

A *potência média unitária*, definida na equação (8), expressa a quantidade de energia gerada a cada metro quadrado de área do painel. Apesar de não apresentar relação direta com a resposta espectral das células fotovoltaicas, esta grandeza é bastante útil para a análise das condições de irradiância do local. É útil também para o projeto de sistemas fotovoltaicos, nos quais se precisa de uma estimativa da quantidade de painéis necessária para se atingir uma determinada produção de energia.

$$\overline{P}_U = \frac{\overline{P}}{n_{CEL} \cdot A_{CEL}} \quad (8)$$

sendo \overline{P}_U a potência média unitária (em W/m²), \overline{P} a potência média (em W), n_{CEL} o número de células do PV e A_{CEL} a área de uma célula (em m²).

A integração da curva diária de irradiância (obtida com um sistema de aquisição de dados) ao longo do tempo fornece a quantidade de energia recebida pelo PV por metro quadrado. Multiplicando-se esse valor pela eficiência do painel, obtém-se a quantidade de energia produzida por metro quadrado. No entanto, é possível extrair a energia produzida sem o uso de um sistema de aquisição de dados. A grandeza *energia unitária*, calculada através da equação (9), fornece a mesma informação utilizando apenas os dados disponibilizados pelo medidor do painel sem filtro e a área das células do painel.

$$E_U = \frac{E_{PVI}}{n_{CEL} \cdot A_{CEL}} \quad (9)$$

sendo E_U a energia unitária (em Wh/m²), E_{PVI} a energia produzida pelo painel sem filtro (em Wh), n_{CEL} o número de células e A_{CEL} a área de uma célula (em m²). É importante frisar que tanto no cálculo da potência média unitária quanto no da energia unitária é empregada a área total das células do painel, pois se deseja conhecer os parâmetros reais de desempenho das células fotovoltaicas.

O cálculo da potência média permite a classificação de cada dia de medição de acordo com o nível de radiação recebido pelos módulos fotovoltaicos sem filtros. Para isso, as observações climáticas obtidas nos noventa primeiros dias de medição foram relacionadas com as respectivas potências médias. Os valores de \overline{P} foram agrupados em torno dos valores

mais frequentes observados, resultando em nove categorias diferentes. Essas nove categorias foram reduzidas a apenas cinco através do cálculo da média de \bar{P} de cada uma e agrupamento daquelas que apresentaram valores semelhantes. A razão para estas reduções é simplificar a interpretação dos níveis de radiação, que podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Níveis de radiação diários padronizados.

Nível de radiação	\bar{P} (W)	Condições climáticas típicas
Alta	≥ 11	Ensolarado; ensolarado, poucas nuvens.
Média-alta	9 – 10,999	Sol entre nuvens.
Média-baixa	5 – 8,999	Sol entre nuvens; parcialmente nublado.
Baixa	2,5 – 4,999	Nublado.
Muito baixa	$< 2,5$	Nublado; chuvoso.

Fonte: Autor.

A *média das potências médias* é um indicador do potencial de geração de energia de módulos fotovoltaicos em um determinado período (mensal, sazonal ou anual, por exemplo). Seu cálculo, expresso na equação (10), é definido como a média aritmética dos valores de \bar{P} num período específico.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n_M} \bar{P}_i}{n_M} \quad (10)$$

sendo \bar{P} a média das potências médias (em W) e n_M o número de medições de potência média do período considerado.

É preciso aplicar dois fatores de correção aos valores de eficiência relativa encontrados para cada filtro. O fator F_I minimiza a diferença intrínseca existente entre cada módulo fotovoltaico. Ambos os módulos são do mesmo modelo e passaram pelo mesmo processo de fabricação. Porém, eles podem apresentar pequenas diferenças em suas curvas características, o que pode resultar em uma diferença na quantidade de energia gerada por cada painel, mesmo que estejam submetidos a condições semelhantes de irradiância e temperatura. Isso justifica a utilização deste fator de correção. F_I é calculado através de 15 medições experimentais, tomadas em dias não-consecutivos, nas quais não foi instalado nenhum filtro sobre os painéis fotovoltaicos. A média aritmética dos valores de eficiência relativa de cada medição foi calculada e convertida de valor percentual para absoluto, obtendo-se assim o fator F_I , conforme equação (11).

$$F_1 = \frac{\sum_{i=1}^{15} \eta_{ri}}{15} = \overline{\eta_r} \text{ (sem filtro)} \quad (11)$$

sendo $\overline{\eta_r}$ a eficiência relativa média (valor percentual).

O fator de correção F_2 serve para corrigir as diferenças existentes entre as taxas de transmissão de luz de cada filtro, devido às diferentes características de suas curvas SED. Para calcular este fator, as curvas de distribuição espectral de cada filtro são aplicadas ao espectro padrão AM1.5, dado pela norma G173-03:2012 da *ASTM International*² (ASTM INTERNATIONAL, 2012) e é feita a integração no intervalo de comprimentos de onda de 280 nm a 4.000 nm, obtendo-se o valor da irradiância total. Em seguida, estes valores são normalizados entre eles, sendo escolhida a irradiância total do filtro azul como valor de referência, de acordo com a equação (12). O filtro azul foi escolhido por ter a maior irradiância total dentre os filtros primários; no entanto, qualquer outro filtro poderia ter sido escolhido como referência.

$$F_{2f} = \frac{G_{AZUL}}{G_f} \quad (12)$$

sendo F_{2f} o fator de correção F_2 específico para o filtro f (adimensional), G_{AZUL} a irradiância total do filtro azul (em W/m²) e G_f a irradiância total do filtro f .

Aplicam-se os fatores de correção F_1 e F_2 aos valores de eficiência relativa encontrados em todos os oito filtros, de acordo com a equação (13).

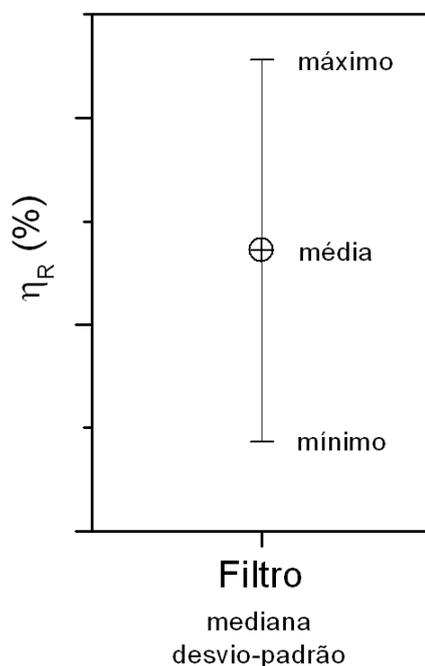
$$\eta_{r\text{ corr}} = \frac{\eta_r \cdot F_2}{F_1} \quad (13)$$

sendo $\eta_{r\text{ corr}}$ a eficiência relativa corrigida.

Em seguida, medidas estatísticas são utilizadas para as análises: média, mediana, desvio-padrão, valor mínimo e valor máximo. Estas medidas são dispostas em um diagrama de caixa modificado, que permite uma comparação visual entre as eficiências relativas obtidas para cada filtro e exibe os respectivos valores numéricos. A Figura 19 ilustra um exemplo de diagrama de caixa modificado com a explicação do significado de cada um de seus elementos.

² ASTM é a antiga sigla da Sociedade Americana para Testes e Materiais (*American Society for Testing and Materials*). Em 2001, o nome da entidade foi alterado para *ASTM International*, deixando de ser uma sigla.

Figura 19 – Elementos de um diagrama de caixa modificado.



Fonte: Autor.

A discussão dos resultados ocorre por meio de comparações entre as estatísticas de cada filtro. O método de cálculo empregado nesta dissertação é bastante diferente dos utilizados na literatura, pois equipamentos de medição sofisticados, tais como espectrômetros e piranômetros, não foram utilizados aqui para realizar as medições da resposta espectral. Por este motivo, métodos e resultados que envolvam variáveis como *energia média do fóton*, *fator de descasamento espectral* e *fator espectral* não podem ser comparados diretamente com os resultados deste trabalho. No entanto, é possível realizar uma comparação entre a resposta espectral em condições reais de uso e a resposta espectral obtida em laboratório por outros pesquisadores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

O levantamento definitivo da curva característica de cada módulo ocorreu nos dias 7 e 8 abr. 2016, entre 11h30min e 12h15min, horário em que a irradiância solar se mantém relativamente constante e próxima ao valor máximo. A condição climática nesses dias e nos dias anteriores aos ensaios estava estável, sendo classificada como *Ensolarado*, sem quaisquer nuvens no céu, de acordo com o Apêndice A e Quadro 2. Conforme as Tabelas 4 e 5, nas quais são exibidos os resultados do levantamento de dados, a irradiância variou pouco, entre 987 W/m² e 994 W/m² para o Painel 1 e entre 990 W/m² e 999 W/m² para o Painel 2. A temperatura dos módulos também apresentou pequenas discrepâncias, com valor médio de 57 °C para o Painel 1 e 58,9 °C para o Painel 2. Essas pequenas diferenças não comprometem a análise das curvas características dos módulos, mesmo que os ensaios tenham sido realizados em dias distintos, pois os valores obtidos para irradiância e temperatura foram muito próximos.

Tabela 4 – Dados do levantamento da curva característica do Painel 1, realizado em 7 abr. 2016.

(continua)						
Hora	Irradiância (W/m ²)	Temperatura do PV (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Resistência (Ω)
11h28min	987	58,7	0,267	1,63	0,44	0,164
			7,41	1,58	11,68	4,690
			8,06	1,56	12,61	5,167
			8,65	1,528	13,20	5,661
			9,11	1,486	13,46	6,131
11h34min	994		9,67	1,451	14,03	6,664
			10,20	1,413	14,41	7,219
			10,83	1,394	15,10	7,769
			11,46	1,376	15,74	8,328
			11,99	1,340	16,07	8,948
			12,61	1,26	15,92	10,008
			12,97	1,219	15,86	10,640
			13,49	1,139	15,36	11,844
11h41min	992		13,99	1,045	14,62	13,388
			14,55	0,929	13,53	15,662
			15,05	0,816	12,29	18,444
			15,56	0,698	10,86	22,292
			16,01	0,583	9,33	27,461
			16,51	0,448	7,392	36,853
			16,99	0,301	5,12	56,445

Tabela 4 – Dados do levantamento da curva característica do Painel 1, realizado em 7 abr. 2016.

Hora	Irradiância (W/m ²)	Temperatura do PV (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	(conclusão)
						Resistência (Ω)
11h47min	990	55,3	17,50	0,142	2,49	123,239
			17,74	0,066	1,175	268,788

Fonte: Autor.

Tabela 5 – Dados do levantamento da curva característica do Painel 2, realizado em 8 abr. 2016.

Hora	Irradiância (W/m ²)	Temperatura do PV (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Resistência (Ω)
11h51min	999	59,0	0,4162	1,585	0,66	0,263
			7,36	1,503	11,04	4,897
			8,04	1,493	11,70	5,385
			8,47	1,477	12,48	5,735
			9,05	1,458	13,18	6,207
			9,68	1,433	13,85	6,755
11h57min	993		10,26	1,408	14,45	7,287
			10,99	1,388	15,26	7,918
			11,52	1,370	15,81	8,409
			12,15	1,347	16,35	9,020
			12,49	1,304	16,30	9,578
			13,00	1,285	16,61	10,117
			13,58	1,272	17,26	10,676
			14,09	1,255	17,66	11,227
12h04min	993		14,58	1,177	17,18	12,387
			14,98	1,108	16,57	13,520
			15,53	0,956	14,85	16,245
			16,03	0,796	12,75	20,138
			16,49	0,628	10,35	26,258
			17,05	0,394	6,71	43,274
12h09min	990	58,7	17,50	0,193	3,37	90,674
			17,73	0,067	1,18	264,627

Fonte: Autor.

A partir dos dados de tensão e corrente e das leis de Ohm, três curvas características podem ser obtidas para cada painel: $I-V$, $P-V$ e $P-R$. As curvas $I-V$ e $P-V$ são combinadas em um único gráfico para melhor representar a relação entre estas três grandezas elétricas. Por meio da curva $P-R$ é possível determinar o valor da resistência equivalente da carga conectada ao módulo que provoca a maior produção de potência. As curvas características do Painel 1 estão graficamente representadas nas Figuras 20 e 21 e as do Painel 2 nas Figuras 22 e 23.

Figura 20 – Curvas características I-V e P-V do Painel 1.

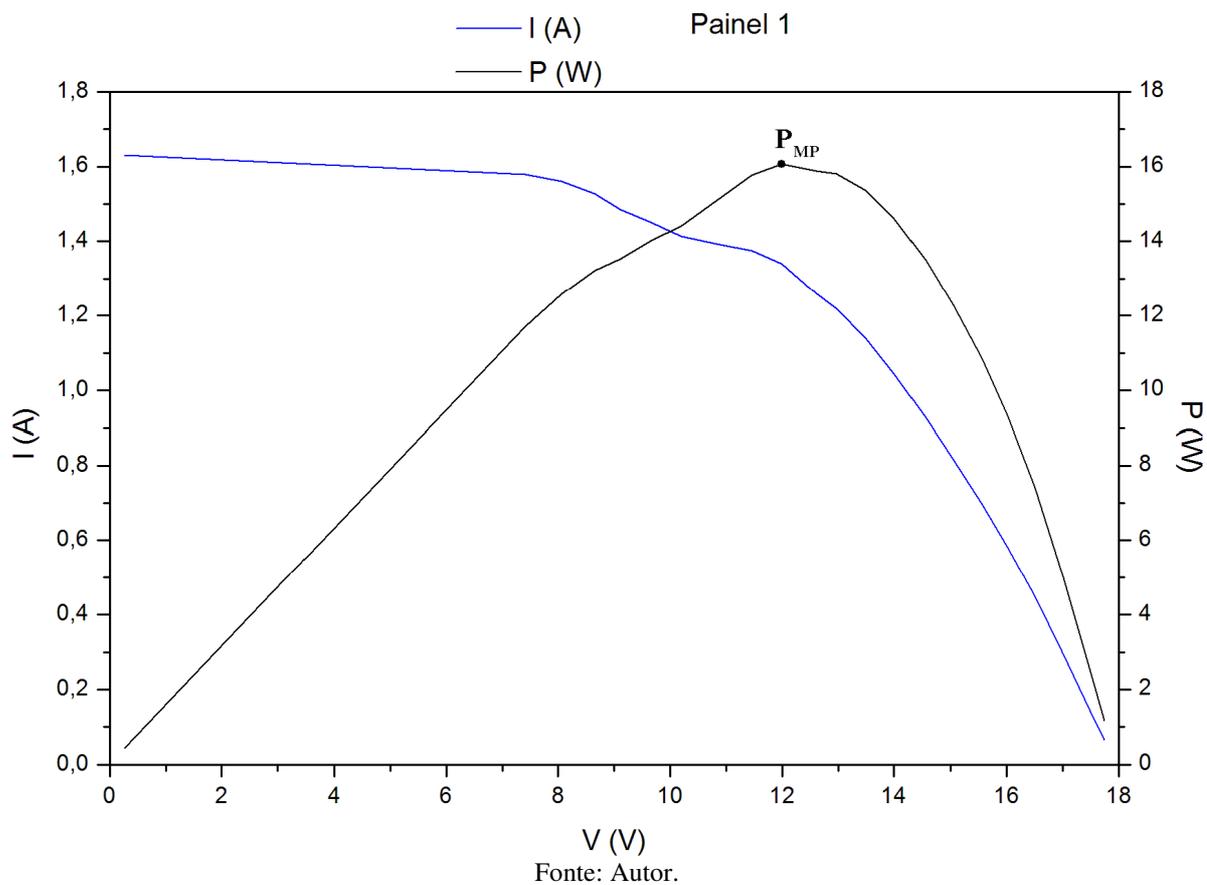


Figura 21 – Curva característica P-R do Painel 1.

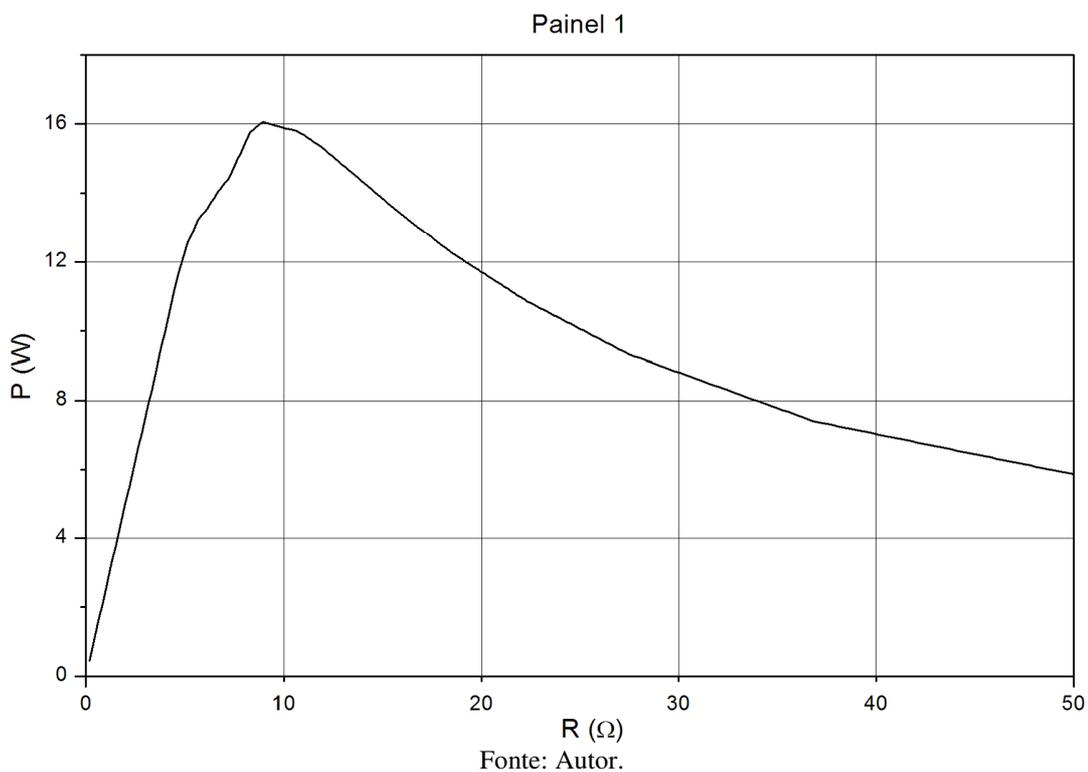
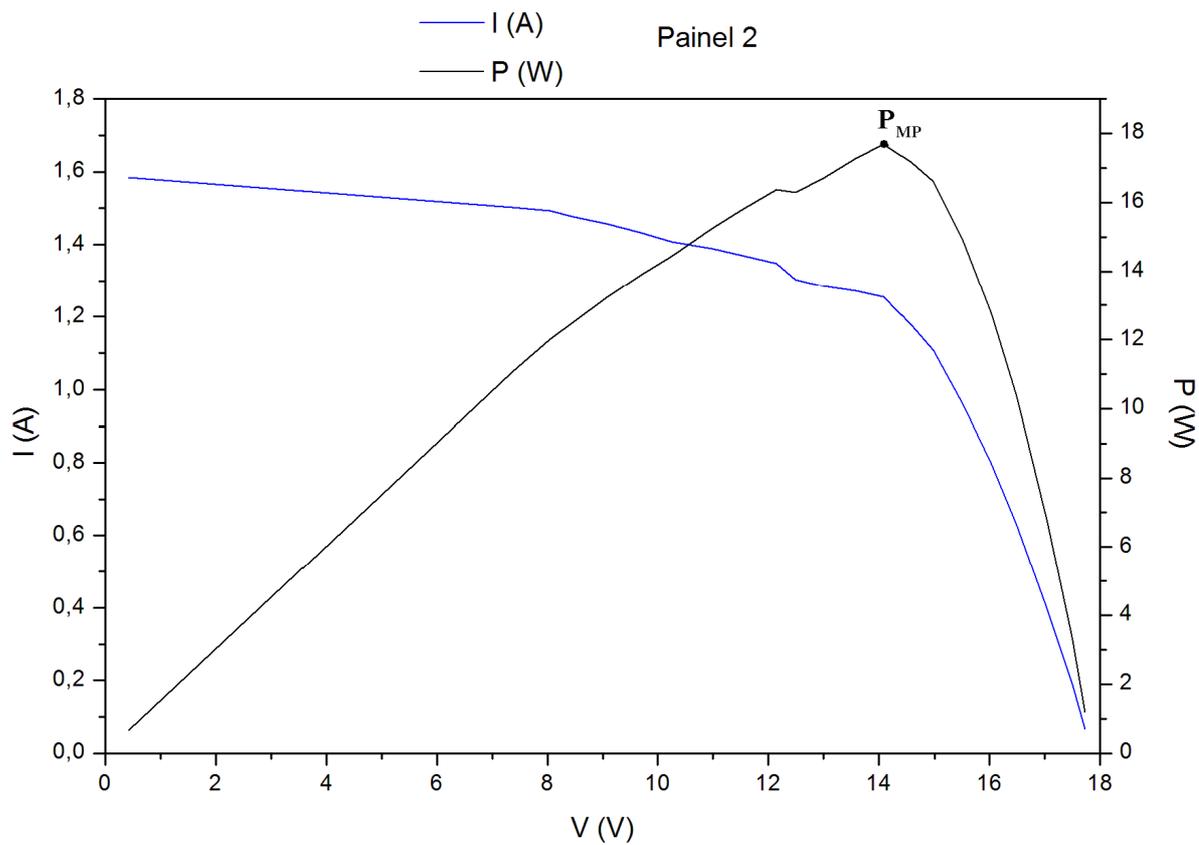
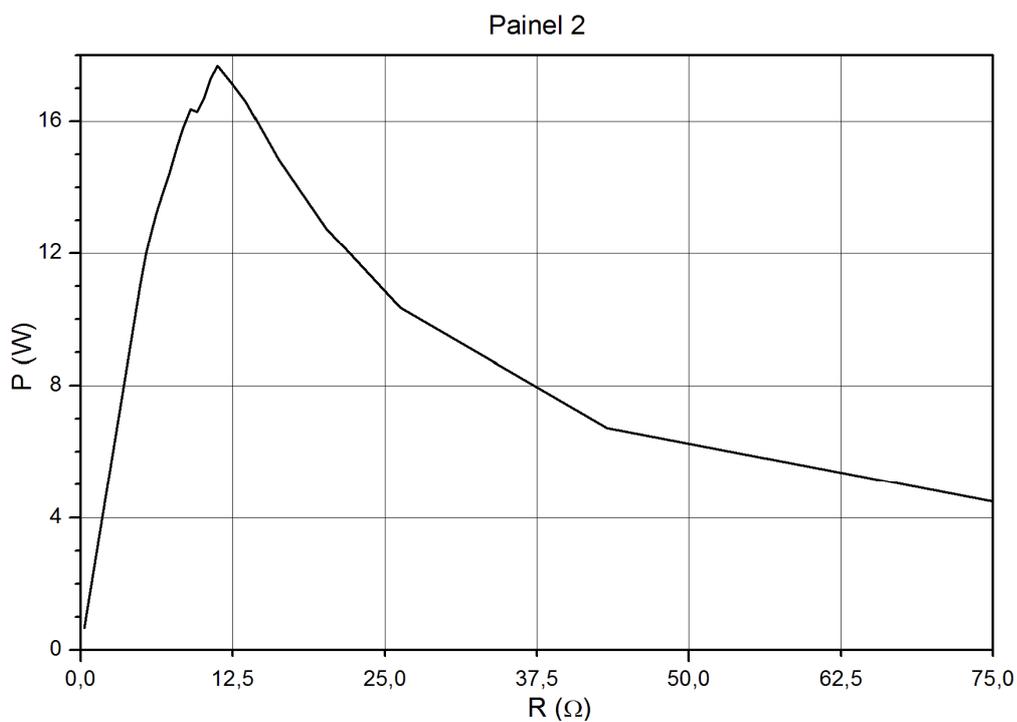


Figura 22 – Curvas características I-V e P-V do Painei 2.



Fonte: Autor.

Figura 23 – Curva característica P-R do Painei 2.



Fonte: Autor.

Percebe-se, pelas Figuras 20 e 22, que ocorrem diferenças nas curvas características de cada painel, as quais podem ser atribuídas aos elementos internos do módulo, tais como: diferenças na dopagem dos semicondutores, resistência das fitas metálicas que conectam as células e degradação pela longa exposição às intempéries. Somam-se ainda elementos externos ao painel: a resistência interna dos medidores de energia e da fiação utilizada para conectar os equipamentos. Estes fatores acarretam em disparidades no valor da resistência equivalente que provoca a máxima transferência de potência dos painéis, conforme pode ser observado nas Figuras 21 e 23.

A potência de pico para o Painel 1 (16,07 Wp) ocorre com uma resistência equivalente de 8,95 Ω , ao passo que para o Painel 2 ocorre a 11,23 Ω , com a produção de 17,66 Wp. Como a potência gerada sofre variações de acordo com a temperatura do módulo e a irradiância recebida, optou-se por utilizar um banco de resistores de potência com resistência de 12 Ω para simular uma carga para os painéis, de maneira que ambos trabalhem em uma região próxima ao ponto de máxima potência. O valor 12 Ω foi obtido durante o levantamento preliminar da curva I-V dos módulos, ocorrido em outubro de 2015, antes de iniciadas as medições diárias de energia com os filtros de cor.

As especificações técnicas fornecidas pelo fabricante contêm informações básicas obtidas em condições padronizadas de teste de módulos fotovoltaicos. A partir das informações básicas, outros parâmetros elétricos podem ser calculados: fator de forma, relação potência/área e eficiência máxima. Estes parâmetros também podem ser obtidos utilizando-se os dados das curvas características em condições reais de operação dos painéis fotovoltaicos. Na Tabela 6 são exibidas as características elétricas dos módulos, calculadas a partir dos valores nominais (valores teóricos, de laboratório e obedecendo às normas vigentes sobre módulos fotovoltaicos) e os obtidos a partir dos valores reais (oriundos do levantamento das curvas características, em condições de operação).

Pelas informações da Tabela 6, pode-se concluir que os módulos apresentam características diferentes das especificações nominais. Em especial, nota-se que a potência máxima (P_{MP}) e a tensão de circuito aberto (V_{OC}) são consideravelmente menores, devido à elevada temperatura de trabalho das células (T_C), que é mais de duas vezes maior do que a temperatura nominal de ensaio. Isto implica fatores de forma mais baixos para os painéis, assim como valores diferentes para V_{MP} e I_{MP} .

Tabela 6 – Características elétricas nominais e reais dos painéis fotovoltaicos.

Característica	Valor nominal	Valor real (PV1)	Valor real (PV2)
I_{SC}	1,61 A	1,483 A	1,591 A
V_{OC}	21 V	17,897 V	17,89 V
G	1000 W/m ²	990,75 W/m ² (valor médio)	993,75W/m ² (valor médio)
T_C	25 °C	57 °C (valor médio)	58,9 °C (valor médio)
P_{MP}	22 Wp	16,07 Wp	17,66 Wp
V_{MP}	16,8 V	11,99 V	14,09 V
I_{MP}	1,31 A	1,340 A	1,255 A
A	0,2275 m ²	0,1786 m ²	0,1786 m ²
FF	65,09%	60,53%	62,13%
$\eta_{m\acute{a}x}$	9,67%	9,08%	9,94%
$P_{M\acute{A}X}/A$	96,70 W/m ²	89,98 W/m ²	98,88 W/m ²

Fonte: coluna *Valor nominal*: empresa Suntech; colunas *Valor real*: autor.

A degradação das células por exposição às intempéries provoca uma redução da capacidade de fornecimento de corrente dos módulos, o que pode ser constatado pelos valores mais baixos de I_{SC} . Apesar de a irradiância no momento das medições ser mais baixa do que o valor nominal (0,92% e 0,5% menores, respectivamente, para o PV1 e PV2), a I_{SC} é 7,89% menor que o valor nominal para o Painel 1 e 1,18% menor para o Painel 2, indicando que o efeito da degradação das células é predominante. Vale ressaltar que a corrente de curto-circuito varia linearmente com a irradiância recebida pelo painel; portanto, a redução esperada da I_{SC} é inferior à registrada. Além das diferenças com relação às características nominais, existem diferenças entre os dois módulos, sendo que o Painel 2 apresenta características superiores ao Painel 1, com potência máxima, relação potência/área, fator de forma e eficiência mais elevadas.

Neste trabalho, o cálculo da área considera apenas a área total das células do módulo, pois se quer obter as características reais de desempenho das células. Isso resultou em um valor mais baixo de área do painel (A), alterando o cálculo de eficiência máxima e relação $P_{M\acute{A}X}/A$. Pode-se constatar que estas características variam entre cada painel, sendo que o Painel 2 apresenta melhores características do que o Painel 1 nestes quesitos.

4.2 CONDIÇÕES DE IRRADIÂNCIA

Foram realizadas 155 medições válidas no período de 16 out. 2015 a 27 set. 2016, apresentadas no Apêndice A. O menor intervalo de medição obtido foi de 1h10min51s em

23 out. 2015 e o maior intervalo foi de 6h16min31s em 15 dez. 2015. O valor médio de Δt é de 5h03min38s por dia, ao longo do período.

As medições foram obtidas predominantemente em dias com nível de radiação alto, representando 43,87% do total, seguidas por 21,94% dos dias apresentando radiação média-baixa (causada por nebulosidade variável), 15,48% com média-alta, 10,32% com muito baixa e 8,39% com nível baixo. Os dados indicam, dessa forma, que no local do experimento ocorrem muitos dias ensolarados, com poucas ou nenhuma nuvem, oferecendo condições propícias para a instalação de sistemas fotovoltaicos.

Na Tabela 7 são mostrados os níveis de radiação divididos por estação do ano. Pode-se notar que a maioria das medições foi realizada no outono e inverno. A primavera pode ser caracterizada como uma época que apresenta muita nebulosidade variável, com maior ocorrência de dias com nível médio de radiação. No verão, predominam períodos de alta radiação (35,48%) alternados com dias de muita nebulosidade e chuvas, que provocam níveis baixos de radiação. Os períodos de nebulosidade nestas estações implicam potenciais menores de geração de energia, indicados pelos valores mais baixos de \overline{P} . O outono caracteriza-se por longos períodos ensolarados, muitas vezes sem nuvens, interrompidos por breves períodos nublados e chuvosos (radiação muito baixa). De maneira semelhante ao outono, no inverno ocorrem principalmente dias com alta radiação, porém intercalados por breves períodos de nebulosidade. Outono e inverno são as épocas mais favoráveis à utilização de energia fotovoltaica, apresentando os maiores potenciais de geração de energia.

Tabela 7 – Níveis de radiação categorizados por estação do ano.

Estação	Período	n _M	\overline{P} (W)	Níveis de radiação (%)				
				Alta	Média-alta	Média-baixa	Baixa	Muito baixa
Primavera	16 out. 2015 a 18 dez. 2015	29	7,54	13,79	24,14	37,93	17,24	6,90
Verão	12 jan. 2016 a 18 mar. 2016	31	8,51	35,48	16,13	25,81	16,13	6,45
Outono	21 mar. 2016 a 20 jun. 2016	50	10,39	52,00	18,00	14,00	2,00	14,00
Inverno	21 jun. 2016 a 27 set. 2016	45	10,96	60,00	6,67	17,78	4,44	11,11

Fonte: Autor.

Entre outubro de 2015 e setembro de 2016, ocorreram dois períodos com dias consecutivos de alto nível de radiação: o primeiro entre 18 mar. 2016 e 25 abr. 2016 e o

segundo entre 14 jun. 2016 e 7 jul. 2016. Durante o primeiro período houve vinte dias ensolarados e no segundo registraram-se 16 dias.

Realizando uma análise mensal de radiação, conforme exibido na Tabela 8, é possível concluir que os meses que apresentaram predomínio de altos níveis de radiação e maiores potenciais para geração de energia fotovoltaica são: fevereiro, março, abril, junho, agosto e setembro de 2016. O valor máximo de potência média foi registrado em 24 ago. 2016, sendo igual a 16,001 W. O mês de maio de 2016 pôde ser classificado como de alta radiação, porém apresentando alternâncias significativas com dias de radiação média-alta e média-baixa, fato que reduziu seu valor de \bar{P} . Outubro, novembro e dezembro de 2015 e janeiro de 2016 classificaram-se como épocas com predomínio de baixos níveis de radiação e muita nebulosidade, o que representou uma redução da potência média e consequente diminuição do potencial de geração de energia dos painéis fotovoltaicos. Deve-se observar que, devido ao recesso escolar, no mês de julho de 2016 registraram-se apenas cinco medições, número muito inferior aos outros meses, o que impede que seja feita uma análise relevante da radiação desse mês específico em relação aos demais.

Tabela 8 – Níveis de radiação categorizados por mês.

Mês	n_M	\bar{P} (W)	Níveis de radiação (%)				
			Alta	Média-alta	Média-baixa	Baixa	Muito baixa
Outubro 2015	9	8,84	22,22	22,22	44,44	11,11	0,00
Novembro 2015	11	6,72	18,18	18,18	18,18	27,27	18,18
Dezembro 2015	9	7,25	0,00	33,33	55,56	11,11	0,00
Janeiro 2016	11	6,23	18,18	9,09	27,27	27,27	18,18
Fevereiro 2016	11	9,90	45,45	27,27	9,09	9,09	9,09
Março 2016	16	10,73	50,00	25,00	18,75	0,00	6,25
Abril 2016	16	11,35	75,00	0,00	6,25	0,00	18,75
Mai 2016	17	8,88	29,41	29,41	23,53	5,88	11,76
Junho 2016	16	10,78	56,25	6,25	18,75	0,00	18,75
Julho 2016	5	13,12	80,00	0,00	20,00	0,00	0,00
Agosto 2016	18	10,77	61,11	5,56	16,67	0,00	16,67
Setembro 2016	16	10,19	50,00	12,50	18,75	12,50	6,25

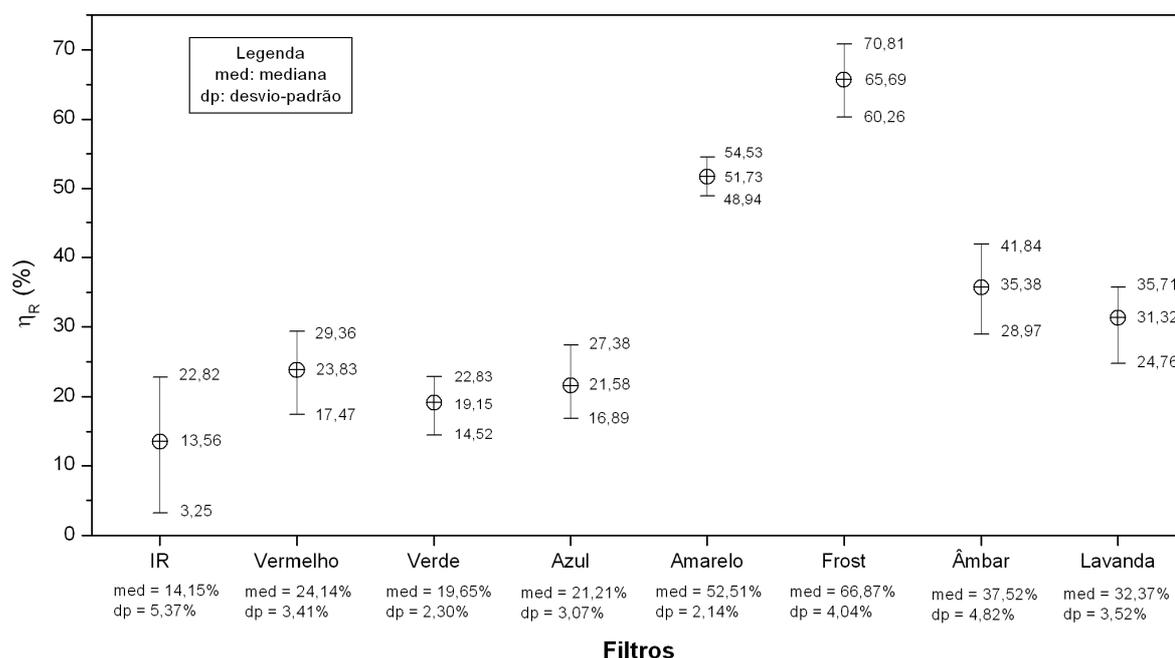
Fonte: Autor.

As condições de irradiância refletem-se na capacidade de geração de energia de cada intervalo, indicado pela potência média registrada a cada dia e pela média das potências médias em períodos distintos. Dessa maneira, as análises realizadas permitem uma previsão do potencial energético de sistemas fotovoltaicos instalados no local do experimento e podem ser estendidas a outras localidades através da coleta apropriada de dados.

4.3 RESPOSTA ESPECTRAL DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

As informações do Apêndice A são classificadas de acordo com a coluna *Filtro* para que os dados relativos a cada filtro possam ser analisados separadamente. Para cada filtro, são calculadas a média, a mediana, o desvio-padrão e os valores máximo e mínimo de eficiência relativa, com resultados mostrados na Figura 24.

Figura 24 – Comparação entre eficiências relativas dos filtros de cor.



Fonte: Autor.

Comparando-se a média e a mediana de cada filtro, é possível notar que estas grandezas apresentam valores próximos para todos os filtros. A mediana é uma medida de tendência central que não é influenciada pelos valores extremos do intervalo de dados (LIPSON; SHETH, 1973; MANDEL, 1984; MONTGOMERY, 2013; TRIOLA, 2008); portanto, isso significa que os valores extremos das medições não interferem no resultado do cálculo da média e, dessa forma, a média é um parâmetro significativo para que se proceda à comparação entre as eficiências relativas de cada filtro.

Os desvios-padrão assumiram valores relativamente pequenos se comparados às respectivas médias, mostrando assim que as eficiências relativas não variaram muito durante o período de medições. Uma exceção é o filtro infravermelho, cujo desvio-padrão apresentou o valor mais alto, evidenciando uma amplitude maior de variação de η_r , que vai de 3,25% a 22,82% para um valor médio de 13,56%. As variações diárias nas eficiências dos filtros são

causadas por variações climáticas ocorridas no local dos experimentos, tais como mudanças na nebulosidade, temperatura ambiente e variações atmosféricas, as quais provocam alterações no espectro solar recebido ao nível do solo, resultando em diferentes respostas dos painéis fotovoltaicos a cada dia de medição. A eficiência relativa avalia a produção de energia de um módulo em relação ao outro e, como os dois painéis estão instalados lado a lado e estão submetidos às mesmas condições climáticas, considerou-se não ser necessário utilizar equipamentos para medição diária da temperatura e espectro solar, visto que estas variáveis influenciam igualmente ambos os painéis.

Ao se comparar a eficiência relativa média dos filtros primários *vermelho*, *verde* e *azul*, percebe-se que o painel fotovoltaico produz mais energia na faixa de comprimentos de onda do vermelho, com η_r de 23,83%, seguido pelas faixas do azul e do verde, respectivamente. Dessa maneira, pode-se concluir que células fotovoltaicas são mais sensíveis à radiação na faixa do vermelho, que se inicia com cerca de 650 nm, conforme a Figura 17b. É interessante observar que apesar da resposta ao vermelho ser maior, visualmente o filtro vermelho é o mais escuro de todos, o que poderia levar à hipótese de que este seria o filtro com menor taxa de transmissão de luz e, por consequência, o de menor eficiência relativa. Isso significa que a aparência visual não é um fator relevante na resposta espectral; a curva de distribuição espectral de energia é que determina como será a resposta de cada filtro utilizado.

Ademais, a análise das eficiências dos filtros primários revela que há uma diferença pequena na produção de energia entre os filtros vermelho, verde e azul, variando entre 19,15% no verde e 23,83% no vermelho. Esta análise permite concluir que não há uma faixa específica e isolada na qual ocorra uma produção de energia muito superior ou muito inferior às demais. Todas as faixas de comprimento de onda contribuem de maneira significativa para a geração de energia em células fotovoltaicas de silício policristalino.

Em relação ao filtro infravermelho, a hipótese inicial, baseada nas características elétricas de células fotovoltaicas, era a de que o módulo não deveria responder de forma positiva à radiação infravermelha, já que os coeficientes de temperatura indicam que quanto maior a temperatura de trabalho das células, menor é a produção de energia. Por este motivo, o esperado é que ao instalar o filtro infravermelho sobre o Painel 2 ocorresse um aumento na energia gerada em relação ao Painel 1, pois a radiação IR (responsável pelo aumento de temperatura) seria bloqueada. No entanto, o valor médio de η_r na Figura 24 indica que, na verdade, houve uma redução na produção de energia. Isso significa que o painel responde à radiação infravermelha e gera uma quantidade de energia considerável nesta faixa de comprimentos de onda.

A radiação IR provoca dois efeitos simultâneos no painel fotovoltaico: por um lado, aumenta a temperatura do painel, o que reduz a potência gerada; por outro lado, o módulo responde a esta faixa de comprimentos de onda, contribuindo para elevar a potência gerada. A eficiência relativa média do filtro infravermelho é de 13,56% (valor positivo), o que implica dizer que o efeito da geração de energia no infravermelho supera as perdas causadas pela elevação da temperatura. Se o efeito da temperatura superasse o da produção energética, a eficiência relativa resultaria em valores negativos pois, de acordo com a equação (5), a energia gerada pelo Painel 2 seria superior a do Painel 1 devido à redução de temperatura proporcionada pelo filtro IR.

Dessa forma, conclui-se que a radiação infravermelha é um componente importante do espectro da luz solar para células fotovoltaicas cristalinas e não pode ser suprimida, o que causaria uma redução na potência gerada pelo painel fotovoltaico e, por sua vez, uma redução da eficiência geral do painel. Por este motivo, para minimizar as perdas provocadas pelo aumento da temperatura de trabalho do módulo, é necessário encontrar outros métodos que não acarretem a redução ou bloqueio da radiação infravermelha captada pelo painel.

Os filtros secundários apresentam curvas SED que abrangem diversas faixas de comprimentos de onda simultaneamente. Dessa forma, não há como analisar a resposta das células fotovoltaicas para uma faixa isolada de comprimentos de onda; a análise dos resultados destes filtros é feita por comparação direta com os filtros primários.

O filtro âmbar possui uma curva de distribuição espectral semelhante ao vermelho, porém com resposta mais ampla, abrangendo a faixa dos 550 nm a 650 nm (correspondente ao comprimento de onda da cor laranja). A eficiência relativa do filtro âmbar é, em média, 48,5% superior ao vermelho, indicando que há uma resposta significativa das células fotovoltaicas nesta faixa de comprimentos de onda do espectro da luz solar. A curva SED do filtro amarelo é ainda mais abrangente que a do âmbar, estendendo-se por todo o espectro visível, excluindo a faixa do azul e incluindo uma parte do ultravioleta (300-400 nm). A eficiência relativa do amarelo é 46,2% maior que a do âmbar, evidenciando a contribuição combinada da radiação das faixas do vermelho, laranja, verde e ultravioleta. No entanto, não foi possível determinar qual a contribuição isolada do ultravioleta, devido à junção de diversas faixas.

A curva de resposta do filtro lavanda apresenta um formato semelhante a do azul, com taxas de transmissão de luz superiores nas faixas do ultravioleta e do vermelho (650-750 nm). Apesar disso, a eficiência relativa média sofreu uma elevação de 45,1% em relação ao filtro azul, o que permite dizer que há uma resposta considerável do painel fotovoltaico nas faixas de comprimentos de onda não-visíveis, como o ultravioleta, embora esta resposta não possa

ser aferida quantitativamente e de forma individual para cada faixa de comprimento de onda pelo método empregado neste trabalho.

O filtro *frost* apresenta uma curva SED semelhante ao filtro infravermelho, abrangendo quase todo o espectro visível, porém com taxa de transmissão de luz inferior (cerca de 67%). Além disso, este filtro possui uma superfície rugosa, em contraste com os demais filtros, cujas superfícies são perfeitamente lisas. Apesar desta diferença, a eficiência relativa média do *frost* é de 65,69%, valor compatível com sua taxa de transmissão de luz, fato a partir do qual se pode concluir que a textura do filtro não influencia na resposta do painel. Assim como ocorre com o filtro vermelho, no qual se constata que a aparência visual é irrelevante para a resposta do módulo, também se pode afirmar, com o filtro *frost*, que a textura não influencia os resultados, sendo a curva de resposta espectral de cada filtro o fator relevante para a análise.

O estudo da resposta espectral em condições reais de operação, por parte de diversos pesquisadores, utiliza variáveis e métodos de análise sofisticados, os quais não podem ser diretamente comparados aos resultados deste trabalho devido ao método diferenciado aqui empregado. Por este motivo, os resultados são comparados à resposta espectral relativa (ou normalizada) obtida em laboratório, nas condições padrão de ensaio, presentes na literatura.

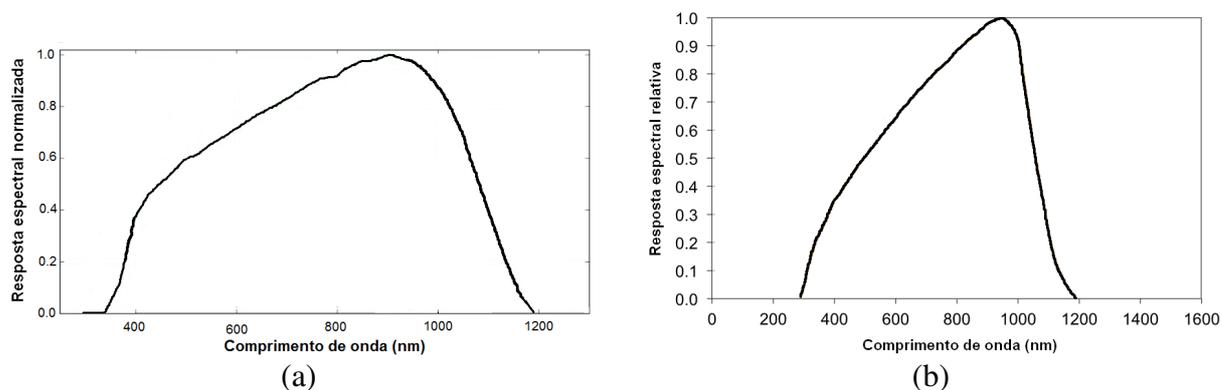
A Figura 25 mostra a resposta espectral publicada nos trabalhos de Dirnberger et al. (2015), obtida no laboratório *Fraunhofer ISE* (Alemanha), e de Nofuentes et al. (2014), medida no laboratório CIEMAT³ (Espanha). Ishii, Otani e Takashima (2011) reportam resultados semelhantes em seu trabalho conduzido nos laboratórios do AIST⁴ (Japão).

O espectro AM1.5 abrange uma faixa de comprimentos de onda que vai de 280 nm a 4.000 nm. Apesar disso, a resposta das células de silício cristalino exibida na Figura 25 é bem menor, restringindo-se entre cerca de 300 nm e 1.200 nm, cobrindo as faixas da luz visível, infravermelha e uma pequena parcela da ultravioleta. O pico da resposta ocorre entre 900 nm e 1.000 nm, na faixa do IR. Além disso, os gráficos indicam que a resposta espectral cresce de forma linear entre 400 nm e 900 nm.

³ *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas* (Centro de Investigações Energéticas, Ambientais e Tecnológicas).

⁴ *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology* (Instituto Nacional para Ciência e Tecnologia Industrial Avançada).

Figura 25 – Resposta espectral na literatura: (a) Dirnberger et al. (2015); (b) Nofuentes et al. (2014).



Fonte: Adaptado de: (a) Dirnberger et al. (2015); (b) Nofuentes et al. (2014).

Os resultados desta dissertação mostram que não há uma faixa isolada de comprimentos de onda na qual ocorra uma resposta muito superior às demais, o que condiz com os resultados da literatura. Entretanto, a resposta espectral apresenta uma redução na faixa dos 500-550 nm, correspondente à cor verde, em condições reais de operação. Dessa forma, a resposta das células de silício cristalino não cresce, portanto, de maneira linear na faixa dos 400-900 nm.

Além disso, os resultados obtidos neste trabalho apontam que o pico da resposta espectral ocorre na faixa do vermelho (cerca de 650-750 nm), diferentemente da literatura, que afirma estar na faixa do infravermelho. Mesmo que a contribuição do IR seja relevante para a produção de energia do painel, fato indicado por este estudo e pela literatura, a energia gerada nesta faixa de comprimentos de onda em condições reais de operação é bem mais baixa do que o previsto em laboratório. Se o infravermelho contribuísse com a maior parcela da produção de energia, sua eficiência relativa deveria ser maior que a do filtro vermelho, algo que não ocorre em condições reais.

De maneira geral, pode-se concluir que a resposta espectral de células fotovoltaicas em condições reais de operação é diferente da resposta obtida nas condições padrão de ensaio. Ao serem instaladas ao ar livre, as células estão submetidas a condições climáticas diversas, com variações do espectro da luz solar recebida, fato que não é previsto pelas STC.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho, verificou-se como a geração de energia de células fotovoltaicas varia em função das diferentes faixas de comprimentos de onda do espectro da luz solar. As células foram testadas sob condições reais de operação, estando sujeitas às variações ambientais do local onde foram instaladas, no *campus* da Faculdade de Engenharia da UNESP, em Guaratinguetá, Estado de São Paulo.

A caracterização dos painéis fotovoltaicos sob condições climáticas reais de operação revelou que a curva característica e os parâmetros elétricos diferem consideravelmente dos valores nominais obtidos em laboratório, sob condições controladas. Constatou-se que a potência máxima e a tensão de circuito aberto são consideravelmente mais baixas devido à alta temperatura de trabalho das células, que é mais de duas vezes maior do que a temperatura nominal de ensaio. Pôde-se verificar também que a degradação das células devido à exposição às intempéries provocou uma redução da capacidade de fornecimento de corrente dos painéis fotovoltaicos. Estes efeitos, quando combinados, produziram uma redução do potencial de produção energética dos módulos.

A análise das condições de irradiância indicou que o local do experimento apresenta características favoráveis para a utilização de energia solar, pois ocorrem muitos dias ensolarados, com poucas nuvens. Os dias com nível de radiação alto representaram cerca de 44% do período total de medições experimentais. Constatou-se que as estações do ano mais favoráveis para o uso de energia solar são o outono e o inverno. Os meses que apresentaram maiores potenciais de geração de energia foram: fevereiro, março, abril, junho, agosto e setembro de 2016.

A resposta espectral em condições reais de operação demonstrou que houve uma diferença na resposta dos módulos fotovoltaicos nas faixas do vermelho, verde e azul, com eficiências relativas de 23,83%, 19,15% e 21,58%, respectivamente. Pode-se concluir que painéis de silício cristalino não respondem de maneira uniforme à luz solar, sendo mais sensíveis à faixa do vermelho (comprimentos de onda maiores) e menos sensíveis à faixa do verde, embora a diferença entre as faixas seja pequena.

A resposta ao infravermelho, indicada pela eficiência relativa de 13,56%, comprovou que as células fotovoltaicas são capazes de gerar energia na faixa não-visível do espectro. O infravermelho, além de contribuir com a produção de energia, é responsável pela geração de

calor sobre as células. Entretanto, o efeito do calor é superado pela geração de energia, fato do qual se pode concluir que o IR é um importante componente do espectro da luz solar, motivo pelo qual não pode ser suprimido. Dessa forma, ao utilizar métodos de aumento da eficiência de painéis fotovoltaicos por meio de redução da temperatura das células, não se pode reduzir ou bloquear a radiação infravermelha, pois pode ocorrer uma redução da eficiência do dispositivo. É preciso encontrar maneiras de reduzir a temperatura sem prejudicar o infravermelho.

Além disso, a resposta espectral em condições reais de operação apresentou diferenças significativas em relação àquela obtida nas condições padrão de ensaio. Uma delas reside no comprimento de onda responsável pelo pico da resposta espectral, que em condições reais situa-se na faixa do vermelho, em lugar do infravermelho. Outra diferença está na contribuição da faixa do infravermelho para a geração de energia que, embora relevante, é de valor inferior ao indicado nas STC. Pode-se citar ainda a não-linearidade presente na resposta real das células, indicada pela redução da eficiência relativa na faixa do verde em relação ao azul e vermelho.

5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a elaboração de um novo padrão de ensaio de células fotovoltaicas que considere as variações de irradiância e temperatura de trabalho as quais os painéis possam sofrer durante sua utilização em campo. Este novo padrão pode incluir um conjunto de curvas características que reflita prováveis condições operacionais as quais os módulos comerciais possam enfrentar. Sugere-se também a elaboração de uma tabela de potência gerada *versus* condições operacionais, a partir de modelagem matemática das equações que regem o funcionamento de células fotovoltaicas, de forma que seja possível aos consumidores e projetistas estimar, de maneira simples, qual a capacidade real de produção de energia. Assim, seria possível comercializar painéis utilizando-se valores nominais mais próximos da realidade, em substituição ao método atual que emprega valores máximos dificilmente atingidos na prática.

Além disso, sugere-se a realização de testes de painéis fotovoltaicos de maior potência em condições reais de operação, a fim de verificar se ocorrem diferenças significativas no comportamento entre módulos de pequena e de grande potência. Outros tipos de células fotovoltaicas podem ser investigados, para se determinar as eventuais diferenças na resposta espectral de cada tecnologia fotovoltaica. Outro trabalho que pode ser desenvolvido consiste

na substituição dos filtros de cor empregados por filtros dicróicos, que apresentam curvas de distribuição espectral mais precisas, porém possuem um custo mais elevado. Sugere-se também verificar uma possível relação entre o ângulo de incidência da luz solar, que varia ao longo do dia, e a resposta espectral das células fotovoltaicas.

Outra sugestão para trabalhos futuros é a utilização de equipamentos de medição específicos para medição da irradiância (piranômetro) e espectro solar (espectrômetro), os quais fornecem resultados com maior precisão. Dessa forma, seria possível investigar os resultados os obtidos nas condições climáticas da região de Guaratinguetá valendo-se dos métodos de análise empregados na literatura.

REFERÊNCIAS

- ALONSO-ABELLA, M. et al. Analysis of spectral effects on the yield of different PV (photovoltaic) technologies: The case of four specific sites. **Energy**, v. 67, p. 435-443, 2014.
- AMROUCHE, B.; GUESSOUM, A.; BELHAMEL, M. A simple behavioural model for solar module electric characteristics based on the first order system step response for MPPT study and comparison. **Applied Energy**, v. 91, p. 395-404, 2012.
- ANDREWS, R. W.; PEARCE, J. M. The effect of spectral albedo on amorphous silicon and crystalline silicon solar photovoltaic device performance. **Solar Energy**, v. 91, p. 233-241, 2013.
- APOSTOLUK, A. et al. Improvement of the solar cell efficiency by the ZnO nanoparticle layer via the down-shifting effect. **Microelectronic Engineering**, v.127, p. 51-56, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10899**: Energia Solar Fotovoltaica – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASTM INTERNATIONAL. **G173-03: Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances**: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. ASTM International, 2012. 21 p.
- ATRE, A. C.; DIONNE, J. A. Realistic upconverter-enhanced solar cells with non-ideal absorption and recombination efficiencies. **Journal of Applied Physics**, v. 110, n. 034505, 2011.
- ATYAOUI, M. et al. Improvement in photovoltaic properties of silicon solar cells with a doped porous silicon layer with rare earth (Ce, La) as antireflection coatings. **Journal of Luminescence**, v. 141, p. 1-5, 2013.
- BAHAIDARAH, H. M. S.; BALOCH, A. A. B.; GANDHIDASAN, P. Uniform cooling of photovoltaic panels: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 1520-1544, 2016.
- BAIG, H.; FERNANDEZ, E. F.; MALLICK, T. K. Influence of spectrum and latitude on the annual optical performance of a dielectric based BICPV system. **Solar Energy**, v. 124, p. 268-277, 2016.
- BU, I. Y. Y. Self-assembled, wrinkled zinc oxide for enhanced solar cell performances. **Materials Letters**, v.122, p. 55-57, 2014.
- CAÑETE, C.; CARRETERO, J.; SIDRACH-DE-CARDONA, M. Energy performance of different photovoltaic module technologies under outdoor conditions. **Energy**, v. 65, p. 295-302, 2014.
- CEPAGRI. **Clima dos Municípios Paulistas**: Guaratinguetá. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>. Acesso em: 25 out. 2016.

COTECH SENSITIZING. **Regular lighting filters**. Especificações de Filtros de cor. Disponível em: <<http://www.cotech-uk.com>>. Acesso em: 20 jul. 2014.

CHANG, P.-K. et al. Improvement of the short-circuit current density and efficiency in micromorph tandem solar cells by an anti-reflection layer. **Thin Solid Films**, v. 520, p. 550-553, 2011.

CHEN, W.-H.; LIN, H.-H.; HONG, F. C.-H. Improvement of conversion efficiency of multi-crystalline silicon solar cells using reactive ion etching with surface pre-etching. **Thin Solid Films**, v. 597, p. 50-56, 2015.

CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014. 530 p. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2016.

CRESESB. **Potencial Solar – SunData**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 26 ago. 2016.

DIJK, L. et al. 3D-printed external light trap for solar cells. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 24, p. 623-633, 2016.

DIRNBERGER, D. et al. On the impact of solar spectral irradiance on the yield of different PV technologies. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 132, p. 431-442, 2015.

DIRNBERGER, D.; MÜLLER, B.; REISE, C. On the uncertainty of energetic impact on the yield of different PV technologies due to varying spectral irradiance. **Solar Energy**, v. 111, p. 82-96, 2015.

FRAAS, L.; PARTAIN, L. **Solar Cells and Their Applications**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. 644 p.

FERNANDEZ, E. F. et al. Comparative assessment of the spectral impact on the energy yield of high concentrator and conventional photovoltaic technology. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 147, p. 185-197, 2016.

GARCÍA-DOMINGO, B. et al. Modelling the influence of atmospheric conditions on the outdoor real performance of a CPV (Concentrated Photovoltaic) module. **Energy**, v. 70, p. 239-250, 2014.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. 3. ed. São Paulo: EdUSP, 2012. 400 p.

GRANDI, G.; IENINA, A.; BARDHI, M. Effective Low-Cost Hybrid LED-Halogen Solar Simulator. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 50, n. 5, p. 3055-3064, sept./oct. 2014.

HERNANDEZ, J.; VALLEJO, W.; GORDILLO, G. Practical method for estimating the power and energy delivered by photovoltaic modules operating under non-standard conditions. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 21, p. 867-875, 2013.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics 2016**. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2016.

ISHII, T.; OTANI, K.; TAKASHIMA, T. Effects of solar spectrum and module temperature on outdoor performance of photovoltaic modules in round-robin measurements in Japan. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 19, p. 141-148, 2011.

JAKHAR, S.; SONI, M. S.; GAKKHAR, N. Historical and recent development of concentrating photovoltaic cooling technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 41-59, 2016.

KALDELLIS, J. K.; KAPSALI, M.; KAVADIAS, K. A. Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece. **Renewable Energy**, v. 66, p. 612-624, 2014.

KISSEL, T. E. **Introduction to Solar Principles**. Boston: Prentice Hall, 2012. 298 p.

KLAMPAFTIS, E.; RICHARDS, B. S. Improvement in multi-crystalline silicon solar cell efficiency via addition of luminescent material to EVA encapsulation layer. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 19, p. 345-351, 2011.

KURNIC, J. et al. Outdoor testing of PV module temperature and performance under different mounting and operational conditions. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 95, p. 373-376, 2011.

LANDROCK, C. et al. An improved light source using filtered tungsten lamps as an affordable solar simulator for testing of photovoltaic cells. In: INTERNATIONAL MIXED-SIGNALS, SENSORS AND SYSTEMS TEST WORKSHOP, 17., 2011, Santa Barbara (USA). **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE, 2011. p. 153-158.

LIPSON, C.; SHETH, N. J. **Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments**. New York: McGraw-Hill, 1973. 518 p.

LIU, S. et al. Improvement of conversion efficiency of multicrystalline silicon solar cells by incorporation a reactive ion etching texturing. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 127, p. 21-26, 2014.

MANDEL, J. **The Statistical Analysis of Experimental Data**. New York: Dover, 1984. 410 p.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2010. 297 p.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; KAMALISARVESTANI, M. Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 2920-2925, 2012.

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.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. 730 p.

NAGAE, S. et al. Evaluation of the impact of solar spectrum and temperature variations on output power of silicon-based photovoltaic modules. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 90, p. 3568-3575, 2006.

NIŽETIĆ, S. et al. Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response. **Energy Conversion and Management**, v. 108, p. 287-296, 2016.

NOFUENTES, G. et al. Analysis of the dependence of the spectral factor of some PV technologies on the solar spectrum distribution. **Applied Energy**, v. 113, p. 302-309, 2014.

NREL. **Research Cell Record**: Efficiency chart. Gráfico de eficiências de células fotovoltaicas, revisado pelo NREL em 17 jan. 2017. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/pv/>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

PORTABLE POWER SUPPLIES. **Premium USB + DC Power Monitor**. Especificações do medidor de energia em corrente contínua. Disponível em: <<http://www.portablepowersupplies.co.uk/>>. Acesso em: 05 ago. 2014.

ROUMPAKIAS, E.; ZOGOU, O.; STAMATELOS, A. Correlation of actual efficiency of photovoltaic panels with air mass. **Renewable Energy**, v. 74, p.70-77, 2015.

SARGUNANATHAN, S.; ELANGO, A.; MOHIDEEN, S. T. Performance enhancement of solar photovoltaic cells using effective cooling methods: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 64, p. 382-393, 2016.

THERISTIS, M. et al. A theoretical analysis of the impact of atmospheric parameters on the spectral, electrical and thermal performance of a concentrating III-V triple-junction solar cell. **Energy Conversion and Management**, v. 117, p. 218-227, 2016.

TOSSA, A. K. et al. Energy performance of different silicon photovoltaic technologies under hot and harsh climate. **Energy**, v. 103, p. 261-270, 2016.

TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 696 p.

WEN, L. et al. Photon harvesting, coloring and polarizing in photovoltaic cell integrated color filters: efficient energy routing strategies for power-saving displays. **Nanotechnology**, v. 26, p. 1-10, 2015.

WIKIMEDIA COMMONS. **CIGS**. Imagem de uso livre, sob licença *Creative Commons*, de autoria de Dantor. Célula flexível CIGS, fabricada pela empresa Solarion AG. Disponível em: <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cigsep.jpg>>. Acesso em: 11 dez. 2016.

WIKIMEDIA COMMONS. **Comparison solar cell poly-Si vs mono-Si**. Imagem de uso livre, sob licença *Creative Commons*, de autoria de Klaus Mueller. Mostra a diferença entre tipos de

células fotovoltaicas cristalinas. Disponível em:
<<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=34948067>>. Acesso em: 24 out. 2016.

WIKIMEDIA COMMONS. **SwissTech Convention Center - Grätzel**. Imagem de uso livre, sob licença *Creative Commons*, de autoria de Chris Blaser. Células DSSC instaladas no Centro Suíço de Convenções. Disponível em:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SwissTech_Convention_Center_-_Gr%C3%A4tzel.jpg>. Acesso em: 11 dez. 2016.

APÊNDICE A - Dados experimentais coletados

Tabela A - Dados experimentais coletados.

							(continua)
Data	Δt (horas)	E_{pv1} (Wh)	E_{pv2} (Wh)	Filtro	η_r (%)	\bar{P} (W)	Radiação
16 out. 2015	4h35min40s	48,037	51,471	sem filtro	107,15	10,455	média-alta
19 out. 2015	5h49min11s	39,170	38,313	sem filtro	97,81	6,731	média-baixa
20 out. 2015	5h00min08s	69,729	66,060	IR	5,26	13,940	alta
21 out. 2015	6h00min00s	28,973	6,190	Vermelho	21,36	4,829	baixa
23 out. 2015	1h10min51s	14,525	2,359	Verde	16,24	12,301	alta
26 out. 2015	5h27min04s	56,182	13,241	Azul	23,57	10,307	média-alta
27 out. 2015	6h02min30s	36,650	31,661	IR	13,61	6,066	média-baixa
28 out. 2015	5h48min35s	38,726	7,990	Vermelho	20,63	6,666	média-baixa
29 out. 2015	5h23min49s	44,388	49,844	sem filtro	112,29	8,225	média-baixa
4 nov. 2015	4h51min10s	35,302	6,493	Verde	18,39	7,275	média-baixa
5 nov. 2015	5h39min40s	18,059	18,713	sem filtro	103,62	3,190	baixa
6 nov. 2015	1h40min16s	3,573	0,702	Azul	19,65	2,138	muito baixa
17 nov. 2015	6h04min56s	67,970	32,070	IR	8,68	11,175	alta
18 nov. 2015	6h00min03s	59,805	14,250	Vermelho	23,83	9,966	média-alta
19 nov. 2015	5h19min09s	57,580	62,764	sem filtro	109,00	10,825	média-alta
20 nov. 2015	4h29min48s	13,289	13,813	sem filtro	103,94	2,955	baixa
24 nov. 2015	6h10min52s	20,824	3,037	Verde	14,58	3,369	baixa
25 nov. 2015	5h56min35s	12,182	2,438	Azul	20,01	2,050	muito baixa
26 nov. 2015	5h28min46s	44,758	47,192	sem filtro	105,44	8,168	média-baixa
27 nov. 2015	5h07min47s	65,771	62,111	IR	5,56	12,822	alta
1 dez. 2015	5h58min47s	34,137	7,062	Vermelho	20,69	5,709	média-baixa
2 dez. 2015	5h49min29s	21,053	3,352	Verde	15,92	3,614	baixa
4 dez. 2015	4h05min00s	41,746	10,304	Azul	24,68	10,224	média-alta
9 dez. 2015	4h38min53s	36,330	31,159	IR	14,23	7,816	média-baixa
11 dez. 2015	4h26min54s	31,956	8,237	Vermelho	25,78	7,184	média-baixa
15 dez. 2015	6h16min31s	56,766	10,393	Verde	18,31	9,046	média-alta
16 dez. 2015	5h39min22s	34,577	7,338	Azul	21,22	6,113	média-baixa
17 dez. 2015	5h53min02s	38,438	33,651	IR	12,45	6,533	média-baixa
18 dez. 2015	5h31min53s	49,812	11,066	Vermelho	22,22	9,028	média-alta
12 jan. 2016	5h22min41s	16,827	17,767	sem filtro	105,59	3,129	baixa
13 jan. 2016	5h51min35s	33,502	4,942	Verde	14,75	5,717	média-baixa
14 jan. 2016	4h47min37s	17,343	18,146	sem filtro	104,63	3,618	baixa
15 jan. 2016	5h17min47s	9,294	9,797	sem filtro	105,41	1,755	muito baixa
18 jan. 2016	5h56min23s	34,253	6,738	Azul	19,67	5,767	média-baixa
21 jan. 2016	5h23min12s	18,587	16,163	IR	13,04	3,451	baixa
22 jan. 2016	4h37min50s	34,003	8,003	Vermelho	23,54	7,343	média-baixa
25 jan. 2016	5h00min02s	52,353	10,779	Verde	20,59	10,469	média-alta
26 jan. 2016	5h07min07s	66,006	17,210	Azul	26,07	12,895	alta
27 jan. 2016	5h35min23s	62,196	55,694	IR	10,45	11,127	alta
28 jan. 2016	5h21min42s	17,623	3,356	Vermelho	19,04	3,287	baixa
1 fev. 2016	6h03min48s	77,882	15,162	Verde	19,47	12,845	alta
3 fev. 2016	5h33min12s	65,915	16,402	Azul	24,88	11,869	alta
4 fev. 2016	6h03min07s	74,358	68,459	IR	7,93	12,287	alta
11 fev. 2016	4h21min05s	9,005	1,752	Vermelho	19,46	2,669	muito baixa

Tabela A - Dados experimentais coletados.

(continuação)							
Data	Δt (horas)	E_{PV1} (Wh)	E_{PV2} (Wh)	Filtro	η_r (%)	\bar{P} (W)	Radiação
15 fev. 2016	5h44min11s	56,341	10,963	Verde	19,46	9,822	média-alta
17 fev. 2016	5h53min40s	64,724	15,719	Azul	24,29	10,981	média-alta
18 fev. 2016	4h53min50s	65,098	59,706	IR	8,28	13,293	alta
19 fev. 2016	5h11min46s	50,133	11,903	Vermelho	23,74	9,648	média-alta
22 fev. 2016	5h08min29s	44,482	8,016	Verde	18,02	8,652	média-baixa
23 fev. 2016	5h35min29s	18,007	3,548	Azul	19,70	3,220	baixa
24 fev. 2016	4h54min13s	66,498	58,282	IR	12,36	13,561	alta
4 mar. 2016	4h51min57s	33,954	24,534	Amarelo	72,26	6,978	média-baixa
7 mar. 2016	5h10min54s	63,616	17,819	Vermelho	28,01	12,277	alta
8 mar. 2016	4h54min10s	61,656	54,713	Frost	88,74	12,576	alta
9 mar. 2016	5h33min43s	80,612	14,980	Verde	18,58	14,493	alta
10 mar. 2016	4h41min30s	8,607	2,994	Âmbar	34,79	1,835	muito baixa
11 mar. 2016	4h54min56s	28,093	6,977	Azul	24,84	6,362	média-baixa
15 mar. 2016	4h59min24s	54,102	20,079	Lavanda	37,11	10,842	média-alta
17 mar. 2016	4h33min22s	32,034	25,664	IR	19,89	7,031	média-baixa
18 mar. 2016	5h31min10s	77,890	58,504	Amarelo	75,11	14,112	alta
21 mar. 2016	5h07min05s	76,547	21,164	Vermelho	27,65	14,956	alta
22 mar. 2016	5h18min03s	68,599	58,251	Frost	84,29	12,941	alta
23 mar. 2016	5h33min39s	50,646	8,363	Verde	16,51	9,108	média-alta
24 mar. 2016	4h50min08s	67,848	31,921	Âmbar	47,05	14,031	alta
29 mar. 2016	5h28min51s	74,883	17,553	Azul	23,44	13,663	alta
30 mar. 2016	5h34min50s	59,708	24,366	Lavanda	40,81	10,699	média-alta
31 mar. 2016	4h28min21s	43,370	42,071	IR	3,00	9,697	média-alta
1 abr. 2016	4h52min26s	68,492	51,787	Amarelo	75,61	14,053	alta
5 abr. 2016	5h33min05s	77,716	22,447	Vermelho	28,88	13,999	alta
6 abr. 2016	5h36min00s	81,753	70,891	Frost	86,71	14,599	alta
11 abr. 2016	5h37min21s	80,750	16,266	Verde	20,14	14,362	alta
12 abr. 2016	5h26min27s	70,153	34,021	Âmbar	48,50	12,894	alta
13 abr. 2016	5h31min55s	80,554	81,845	sem filtro	101,73	14,562	alta
14 abr. 2016	4h11min51s	57,483	16,352	Azul	28,45	13,695	alta
15 abr. 2016	5h20min50s	76,924	29,856	Lavanda	38,81	14,386	alta
18 abr. 2016	5h11min58s	77,184	70,081	IR	9,20	14,845	alta
19 abr. 2016	5h16min02s	78,641	57,745	Amarelo	73,43	14,930	alta
20 abr. 2016	5h20min16s	78,073	21,376	Vermelho	27,38	14,626	alta
25 abr. 2016	5h19min31s	75,733	64,197	Frost	84,77	14,221	alta
26 abr. 2016	5h19min53s	42,083	6,949	Verde	16,51	7,893	média-baixa
27 abr. 2016	3h31min19s	2,282	0,824	Âmbar	36,11	0,647	muito baixa
28 abr. 2016	4h04min10s	5,150	0,904	Azul	17,55	1,266	muito baixa
29 abr. 2016	5h06min52s	2,990	0,846	Lavanda	28,29	0,585	muito baixa
2 maio 2016	5h23min08s	84,823	78,669	IR	7,26	15,750	alta
3 maio 2016	4h59min19s	75,409	55,318	Amarelo	73,36	15,116	alta
4 maio 2016	5h24min23s	61,840	14,999	Vermelho	24,25	11,438	alta
5 maio 2016	1h24min30s	17,897	13,515	Frost	75,52	12,708	alta
6 maio 2016	4h53min26s	53,769	9,727	Verde	18,09	10,994	média-alta
9 maio 2016	5h03min03s	55,056	24,531	Âmbar	44,56	10,900	média-alta
10 maio 2016	5h19min03s	22,600	4,831	Azul	21,38	4,250	baixa

Tabela A - Dados experimentais coletados.

							(continuação)
Data	Δt (horas)	E_{PV1} (Wh)	E_{PV2} (Wh)	Filtro	η_r (%)	\bar{P} (W)	Radiação
11 maio 2016	5h21min50s	48,344	14,790	Lavanda	30,59	9,013	média-baixa
12 maio 2016	5h34min20s	37,202	31,685	IR	14,83	6,676	média-baixa
13 maio 2016	5h10min06s	47,148	32,824	Amarelo	69,62	9,122	média-alta
16 maio 2016	5h11min38s	38,455	10,453	Vermelho	27,18	7,404	média-baixa
18 maio 2016	5h27min46s	2,436	1,894	Frost	77,75	0,446	muito baixa
19 maio 2016	3h30min08s	2,121	0,287	Verde	13,53	0,606	muito baixa
20 maio 2016	5h07min19s	66,880	31,311	Âmbar	46,82	13,058	alta
23 maio 2016	5h02min17s	25,395	5,597	Azul	22,04	5,041	média-baixa
24 maio 2016	5h08min08s	53,368	18,718	Lavanda	35,07	10,392	média-alta
30 maio 2016	4h45min43s	37,936	32,455	IR	14,45	7,966	média-baixa
6 jun. 2016	5h11min40s	40,448	27,546	Amarelo	68,10	7,787	média-baixa
7 jun. 2016	4h52min24s	6,869	1,180	Vermelho	17,18	1,410	muito baixa
8 jun. 2016	5h24min43s	75,751	63,115	Frost	83,32	13,997	alta
9 jun. 2016	5h09min20s	51,704	8,480	Verde	16,40	10,029	média-alta
10 jun. 2016	5h04min13s	37,551	14,383	Âmbar	38,30	7,406	média-baixa
14 jun. 2016	3h37min28s	56,255	13,399	Azul	23,82	15,521	alta
15 jun. 2016	4h52min13s	75,275	27,950	Lavanda	37,13	15,456	alta
16 jun. 2016	4h48min02s	72,447	61,007	IR	15,79	15,091	alta
17 jun. 2016	5h08min22s	75,633	51,702	Amarelo	68,36	14,716	alta
20 jun. 2016	4h33min21s	1,373	0,275	Vermelho	20,03	0,301	muito baixa
21 jun. 2016	2h31min06s	2,160	1,648	Frost	76,30	0,858	muito baixa
22 jun. 2016	4h41min31s	64,508	66,818	sem filtro	103,58	13,749	alta
24 jun. 2016	4h32min20s	67,034	11,903	Verde	17,76	14,769	alta
28 jun. 2016	4h22min20s	58,595	26,692	Âmbar	45,55	13,402	alta
29 jun. 2016	4h34min43s	65,686	62,977	sem filtro	95,88	14,346	alta
30 jun. 2016	3h40min50s	28,486	5,508	Azul	19,34	13,595	alta
1 jul. 2016	4h52min36s	32,171	11,866	Lavanda	36,88	6,597	média-baixa
4 jul. 2016	4h29min23s	68,041	56,445	IR	17,04	15,155	alta
5 jul. 2016	4h00min36s	60,333	15,337	Vermelho	25,42	15,046	alta
6 jul. 2016	4h34min32s	63,881	12,447	Verde	19,48	13,961	alta
7 jul. 2016	4h34min57s	67,963	16,543	Azul	24,34	14,831	alta
4 ago. 2016	5h26min9s	70,219	51,650	Amarelo	73,56	12,911	alta
5 ago. 2016	5h22min57s	79,204	66,923	IR	15,51	14,715	alta
8 ago. 2016	5h17min41s	70,633	16,478	Vermelho	23,33	13,340	alta
9 ago. 2016	5h21min02s	67,966	52,789	Frost	77,67	12,703	alta
10 ago. 2016	4h16min35s	1,488	0,212	Verde	14,25	0,348	muito baixa
11 ago. 2016	5h11min51s	8,655	3,159	Âmbar	36,50	1,655	muito baixa
12 ago. 2016	5h18min31s	82,992	22,031	Azul	26,55	15,633	alta
15 ago. 2016	5h11min54s	45,511	15,163	Lavanda	33,32	8,755	média-baixa
16 ago. 2016	4h45min19s	29,736	23,702	IR	20,29	6,253	média-baixa
18 ago. 2016	4h32min12s	62,073	42,122	Amarelo	67,86	13,683	alta
22 ago. 2016	5h11min37s	36,131	9,265	Vermelho	25,64	6,957	média-baixa
23 ago. 2016	5h14min12s	56,740	50,009	Frost	88,14	10,835	média-alta
24 ago. 2016	4h45min54s	76,245	16,215	Verde	21,27	16,001	alta
25 ago. 2016	5h20min15s	82,786	41,588	Âmbar	50,24	15,510	alta
26 ago. 2016	4h46min04s	74,152	21,009	Azul	28,33	15,553	alta

Tabela A - Dados experimentais coletados.

Data	Δt (horas)	E_{pv1} (Wh)	E_{pv2} (Wh)	Filtro	η_r (%)	(conclusão)	
						\bar{P} (W)	Radiação
29 ago. 2016	4h44min31s	70,681	28,179	Lavanda	39,87	14,905	alta
30 ago. 2016	5h31min37s	75,137	60,604	IR	19,34	13,595	alta
31 ago. 2016	5h18min21s	3,022	0,543	Vermelho	17,97	0,570	muito baixa
5 set. 2016	5h04min41s	54,882	10,469	Verde	19,08	10,808	média-alta
6 set. 2016	5h30min30s	1,661	0,298	Azul	17,94	0,302	muito baixa
8 set. 2016	5h11min52s	46,739	40,265	IR	13,85	8,992	média-baixa
9 set. 2016	5h14min07s	55,155	13,990	Vermelho	25,36	10,535	média-alta
12 set. 2016	5h18min19s	79,823	80,541	sem filtro	100,90	15,046	alta
13 set. 2016	5h27min11s	77,426	15,325	Verde	19,79	14,199	alta
14 set. 2016	5h22min07s	45,800	9,625	Azul	21,02	8,531	média-baixa
15 set. 2016	5h26min01s	60,952	48,135	IR	21,03	11,218	alta
16 set. 2016	5h18min46s	21,476	4,505	Vermelho	20,98	4,042	baixa
19 set. 2016	5h17min34s	75,897	13,908	Verde	18,32	14,340	alta
20 set. 2016	5h09min51s	30,042	5,892	Azul	19,61	5,817	média-baixa
21 set. 2016	5h19min50s	70,595	64,117	IR	9,18	13,243	alta
22 set. 2016	4h39min02s	62,672	16,568	Vermelho	26,44	13,476	alta
23 set. 2016	5h09min54s	80,341	16,545	Verde	20,59	15,555	alta
26 set. 2016	5h12min55s	20,014	3,608	Azul	18,03	3,838	baixa
27 set. 2016	5h09min48s	67,628	68,648	sem filtro	101,51	13,098	alta

ANEXO A - Aceite para publicação de artigo em periódico internacional

Figura A - Mensagem de aceite do periódico internacional *Energies*.

[Energies] Manuscript ID: energies-199299 - Major Revisions

Esme Wang <esme.wang@mdpi.com>
Responder a: esme.wang@mdpi.com
Para: Evaldo Gouvêa <gouvea.evaldo@gmail.com>
Cc: "Pedro M. Sobrinho" <sobrinho@feg.unesp.br>, "Teófilo M. Souza" <teofilo@feg.unesp.br>, Energies Editorial Office <energies@mdpi.com>

19 de maio de 2017 05:41

Dear Dr. Gouvêa,

Thank you for submitting the following manuscript to Energies (please revise on the attached version, which has been laid out):

Manuscript ID: energies-199299
Type of manuscript: Article
Title: Spectral response of polycrystalline silicon photovoltaic cells under real-use conditions
Authors: Evaldo C. Gouvêa *, Pedro M. Sobrinho, Teófilo M. Souza
Received: 11 May 2017
E-mails: gouvea.evaldo@gmail.com, sobrinho@feg.unesp.br, teofilo@feg.unesp.br

It has been reviewed by experts in the field and we request that you make major revisions before it is processed further. Please find your manuscript and the review reports at the following link:

<https://www.mdpi.com/energies/9/5/199299/revisions>

Your co-authors can also view this link if they have an account in our submission system using the e-mail address in this message.

Please revise the manuscript according to the reviewers' comments and upload the revised file by 2 June 2017. Use the version of your manuscript found at the above link for your revisions, as the editorial office may have made formatting changes to your original submission. Any revisions should be clearly highlighted, for example using the "Track Changes" function in Microsoft Word, so that changes are easily visible to the editors and reviewers. Please provide a cover letter to explain point-by-point the details of the revisions in the manuscript and your responses to the reviewers' comments. Please include in your rebuttal if you found it impossible to address certain comments. The revised version will be inspected by the editors and reviewers.

If the reviewers have suggested that your manuscript should undergo extensive English editing, please address this during revision. We suggest that you have your manuscript checked by a native English speaking colleague or use a professional English editing service.

Do not hesitate to contact us if you have any questions regarding the