



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA
CAMPUS JEQUIÉ, CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA
MECÂNICA, COM ÊNFASE EM MECATRÔNICA.

RAYAN PINHEIRO SOARES

Eficiência da Convenção Fotovoltaica: Explorando as Características de Lote
de Células Solares de Silício Policristalino

JEQUIÉ-BA

2023

RAYAN PINHEIRO SOARES

Eficiência da Convenção Fotovoltaica: Explorando as Características de Lote
de Células Solares de Silício Policristalino

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIENCIA E
TECNOLOGIA DA BAHIA, CAMPUS JEQUIÉ
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA
MECÂNICA, COM ÊNFASE EM MECATRÔNICA.

Orientador: Prof. Dr. Maxson Souza Vieira.

Jequié-Ba

2023

RAYAN PINHEIRO SOARES

Eficiência da Convenção Fotovoltaica: Explorando as Características de Lote de Células Solares de Silício Policristalino

A banca examinadora, abaixo listada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso: “Eficiência da Convenção Fotovoltaica: Explorando as Características de Lote de Células Solares de Silício Policristalino”, elaborado por “RAYAN PINHEIRO SOARES”, como requisito parcial para obtenção do grau em Bacharelado em Engenharia Mecânica, com ênfase em Mecatrônica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia.

Jequié-BA, 15/12/2023

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Maxson Souza Vieira

IFBA

(Orientador)

Prof. Dr. Eduardo Cezar Barbosa de Barros Aragão

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Prof. Dr. Michel Felipe Lima de Araújo

Universidade Estadual de Santa Cruz

Agradecimentos

- Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas e instituições que tornaram possível a realização deste trabalho de conclusão de curso.
- Primeiramente, quero agradecer ao meu orientador, Dr. **Maxson Vieira**, por sua valiosa orientação, apoio incansável e sabedoria compartilhada ao longo deste processo. Sua dedicação e comprometimento foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.
- À minha família, agradeço o apoio incondicional, paciência e incentivo ao longo desta jornada acadêmica. O amor e encorajamento de vocês foram a força motriz por trás de cada passo que dei. Agradeço especialmente o apoio da minha noiva e todos os momentos juntos.
- Aos professores, agradeço pelas enriquecedoras, contribuições e pelo ambiente acadêmico estimulante que moldou o meu aprendizado.
- Um agradecimento especial aos professores **Beloto**, **Berni** e **Rafael** por fornecerem seus conhecimentos para minha pesquisa e ao Rafael por proporcionar a estadia enquanto eu realizava os experimentos. Eles enriqueceram a qualidade do meu trabalho.
- Por fim, expresso minha gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para este projeto, direta ou indiretamente. Sua colaboração foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.
- Este trabalho não teria sido possível sem o suporte dessas pessoas e instituições. A todos vocês, muito obrigado.

Rayan Pinheiro Soares

“Quanto maior o conhecimento, menor o ego, quanto maior o ego, menor o conhecimento.”

- Albert Einstein

Resumo

O sistema de medição de resposta espectral é crucial para analisar as características das células, determinando parâmetros como resposta espectral e eficiência. Esse sistema avalia como um detector responde a diferentes comprimentos de onda da luz, sendo essencial na caracterização das células para diversas aplicações. Com isso, a pesquisa sobre radiação solar em células fotovoltaicas se beneficia diretamente da análise detalhada das características espectrais das células, para a otimização de sistemas de geração de energia. Dessa forma, este trabalho se propõe a caracterizar um lote de células solares de silício policristalino com o intuito de obter curvas de corrente por tensão ($I \times V$) das células solares e verificar a padronização da resposta espectral das amostras. Diante desse contexto, procedeu-se à realização de uma simulação em vinte células fotovoltaicas nas dependências do laboratório do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Nessa simulação, reproduziu-se a incidência dos raios solares, com o intuito de gerar dados que viabilizassem a análise dos parâmetros elétricos, tais como tensão, corrente e eficiência da célula. Posteriormente, empregou-se um monocromador, dispositivo incumbido de regular o comprimento de onda da luz incidente e de detectar as diferentes faixas de luz incidente nas células solares, possibilitando, assim, a obtenção da resposta espectral que representa a variação da eficiência da célula em diferentes partes do espectro solar, proporcionando o ajuste das propriedades celulares para obtenção do máximo aproveitamento da luz solar disponível. Em vista disso, foi possível observar que das vinte células analisadas, dezenove obtiveram um resultado. Posteriormente, foram examinadas apenas seis células fotovoltaicas para a análise da resposta espectral, identificando assim uma irregularidade na curva, onde, em um ponto específico, ocorre uma queda significativa, seguida imediatamente por uma retomada ao estado normal. Isso conduziu à conclusão de que, em determinado ponto, houve uma diminuição na incidência de luz nas células solares. Em suma, foi possível perceber que a maioria das células analisadas está no padrão da curva $I \times V$ e com uma eficiência relativamente adequada para a sua utilização.

Palavras-chave: *Caracterização das células solares; silício policristalino; curvas $I \times V$; padronização das células solares.*

Abstract

The spectral response measurement system is crucial for analyzing cell characteristics and determining parameters such as spectral response and efficiency. This system evaluates how a detector responds to different wavelengths of light, making it essential in characterizing cells for various applications. Therefore, research on solar radiation in photovoltaic cells directly benefits from the detailed analysis of the cells' spectral characteristics, optimizing energy generation systems. This work aims to characterize a batch of polycrystalline silicon solar cells to obtain current-voltage curves ($I \times V$) of the solar cells and verify the standardization of the spectral response of the samples. Given this context, a simulation was carried out on twenty photovoltaic cells on the premises of the National Institute for Space Research (INPE) laboratory. In this simulation, the incidence of solar rays was reproduced to generate data that would enable the analysis of electrical parameters such as voltage, current, and cell efficiency. Subsequently, a monochromator was used, a device responsible for regulating the wavelength of the incident light and detecting the different bands of light incident on the solar cells. This made it possible to obtain the spectral response that represents the variation in the cell's efficiency in different parts of the solar spectrum, providing adjustment of cellular properties to obtain maximum use of available sunlight. In view of this, it was possible to observe that of the twenty cells analyzed, nineteen obtained satisfactory results, remaining 2% above the expected efficiency. Subsequently, only six photovoltaic cells were examined to analyze the spectral response, thus identifying an irregularity in the curve where, at a specific point, a significant drop occurs, followed immediately by a return to the normal state. This led to the conclusion that, at a certain point, there was a decrease in the incidence of light on the solar cells. In short, it was possible to see that the majority of the cells analyzed are in the $I \times V$ curve pattern and have relatively adequate efficiency for their use.

Keywords: *Characterization of solar cells; polycrystalline silicon; $I \times V$ curves; standardization of solar cells; solar cells.*

Lista de figuras

Figura 1: Radiação solar global diária, média anual (Atlas Solari métrico do Brasil: banco de dados Solari métricos (2000)).	16
Figura 2: O custo das células fotovoltaicas em função do tempo.viii.	19
Figura 3: Espectro solar fora da atmosfera comparado com o espectro de corpo negro em 5800K.ix.	20
Figura 4: Espectro solar direto ao nível do mar comparado com o espectro solar fora da atmosfera.ix	21
Figura 5: Radiação global composta pelas componentes da radiação direta, difusa e refletida.ix.	22
Figura 6: A posição em graus e valores das diferentes massas de ar.ix	23
Figura 7: Espectros padrão de referência AM0, AM1.5G e AM1.5D.ix	23
Figura 8: Células de silício monocristalino.xii	24
Figura 9: Células de silício policristalino.xii	25
Figura 10: Células de silício amorfo.xii	26
Figura 11: Diagrama simples de um sistema de medida de curva IxV. ix.	27
Figura 12: Lâmpada do sistema de caracterização de curva IxV de células solares de silício do CELSOL.	27
Figura 13: Diagrama típico do sistema de medida de resposta espectral.ix	28
Figura 14: Identificação das placas solares.	29
Figura 15: Foto da montagem para caracterização da resposta espectral (1 - espectro radiômetro, 2 - fonte de alimentação, 3 - medidor de tensão).	30
Figura 16: Monocromador determinação do comprimento de onda Sistema de medida de corrente por tensão do CELSOL.	30
Figura 17: Curva característica I x V típica de uma placa.	31
Figura 26: Corrente de máxima potência e média móvel de dois números.	38
Figura 29: Fator de preenchimento.	40
Figura 30: Eficiência.	40
Figura 31: Comparação do fator de preenchimento e a eficiência.	41
Figura 32: Comparação entre a potência nominal e a Eficiência.	41
Figura 33: Comparação entre as curvas placas.	42
Figura 33: Comprimento de onda / U-Off/P da placa analisada C1.	43
Figura 34: Comprimento de onda / U-Off/P da placa analisada C06.	43
Figura 35: comprimento de onda / U-Off/P da placa analisada C13.	44
Figura 36: relação da faixa entre 450nm e 500nm	44
Figura 37: Comparação relação da faixa entre 450nm e 500nm.	45

Lista de tabelas

Tabela 1: todos os dados de C1 a C20 das placas solares	32
---	----

Lista de abreviaturas e siglas

IFBA: Instituto Federal da Bahia

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

CELSOL: Grupo de Células Solares

IxV: Corrente por tensão

UFPE: Universidade Federal de Pernambuco

CHESF: Companhia Hidroelétrica do São Francisco

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

LAS: Laboratório Associado de Sensores e Materiais

SCD2: Satélite brasileiro

PAR: Radiômetro portátil fotossinteticamente ativo

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

UVs: Radiações ultravioletas.

AM0 O espectro fora da atmosfera

AM1, AM1.5 e AM2: Espectros solares terrestres

CIS: Disseleneto de cobre-índio

CdTe: Telureto de cádmio

ISO: International Organization for Standardization

IEC: International Electrotechnical Commission

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

NIST: Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia

CBA: Classe B Alto

CAA: Classe A Alto

C1 a C20: Placa analisada

Lista de símbolos

Γ	Letra grega Gama
λ	Comprimento de onda
%	Porcentagem
E	Intensidade de campo elétrico
H	Intensidade de campo magnético
D	Densidade de fluxo elétrico
B	Densidade de fluxo magnético
ρ	Densidade de carga elétrica
\mathbf{j}	Densidade de corrente elétrica
nm	nanômetro
Pa	Pascal
sen	seno
W/m	watt por metro quadrado
V	volts
A	amperagem
V _{ca}	Tensão de circuito aberto
I _{cc}	corrente de curto circuito
P _{mp}	Potência nominal
V _{mp}	Tensão de máxima potencia
I _{mp}	Corrente de máxima potencia
FF	Fator de Preenchimento
IEA	Agência Internacional de Energia

Sumário

1	Introdução.....	15
2.	Objetivo.....	17
2.1	Objetivo Geral.....	17
2.2	Objetivo Especifico	17
3	Referencial teórico	18
3.1	Energias renováveis.....	18
3.2	Energia solar	18
3.3	Espectro Solar.....	20
3.4	Células solares	23
3.5	Sistema de medida corrente por tensão (IxV)	26
3.6	Sistema de medida de resposta espectral	28
4.	Metodologia.....	28
5.	Resultados e discussão	31
5.1	Simulador Solar	31
5.2	Resposta Espectral.	42
6	Conclusão.....	46
	Referências	47

1 Introdução

A crescente demanda por energia limpa e renovável, impulsionada pela necessidade de mitigar as mudanças climáticas e reduzir a dependência de fontes de energia não renovável, tem colocado a energia solar no centro das atenções. Dentre as diversas possibilidades do mercado de energia solar, as células solares obtidas por silício policristalino desempenham um papel crucial no cenário da energia fotovoltaica, devido à sua disponibilidade e custo relativamente baixo. Mesmo com redução de custo devido a utilização de silício policristalino, as atuais placas de energia fotovoltaicas possuem baixa eficiência. A eficiência da conversão fotovoltaica dessas células solares é um fator crítico na determinação da viabilidade e do desempenho dos sistemas fotovoltaicosⁱ.

A eficiência de células fotovoltaicas é afetada por uma série de fatores, incluindo impurezas, defeitos de cristalização, material da camada ante refletora e variações nas características do lote. Esta pesquisa visa aprofundar a compreensão das características de lote de células solares de silício policristalino.ⁱⁱ

Mediante pesquisas que demonstram o avanço da eficiência das células solares, políticas de incentivo têm sido implementadas recentemente para promover a utilização de sistemas fotovoltaicos para a geração de eletricidade, de acordo com a LEI Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022. O marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS) alteram as Leis n.º 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e dão outras providências. Essas políticas visam atender a comunidades isoladas das redes de transmissão de energia elétrica e promover o desenvolvimento regional no restante do país. Essas leis estão em consonância com pesquisas recentemente divulgadas sobre a radiação solar no Brasil.ⁱⁱⁱ

O Atlas Solar métrico do Brasil, desenvolvido pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), em parceria com a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) e o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), fornece estimativas da radiação solar incidente no país, conforme Figura 1. Este gráfico foi realizado com base na interpolação e extrapolação de

2. Objetivo

2.1 Objetivo Geral

Caracterizar as células solares de silício policristalino. Analisar as propriedades e características das células solares de silício policristalino, com o intuito de avaliar sua eficiência e desempenho em diferentes condições de iluminação e temperatura

2.2 Objetivo Específico

Obter curvas $I \times V$ das células solares de silício policristalino de fabricação chinesa.

Verificar padronização da resposta espectral das células solares de fabricação chinesa.

3 Referencial teórico

3.1 Energias renováveis

A energia disponível para uma população pode ser oriunda de diferentes fontes, dentre elas fontes renováveis e não renováveis. Neste cenário, o Brasil se destaca pela grande dependência da geração de energia pelas hidrelétricas, aproveitando a riqueza natural de sua geografia. De acordo com a Agência Internacional de Energia, em 2016, cerca de 43,5% da matriz energética renovável do Brasil era composta por biomassa, energia hidráulica, solar e eólica. Isso indica a necessidade de investimentos em fontes de energia sustentáveis, reduzindo a dependência do petróleo e seus derivados.^{vi}

Compartilhada pelo especialista Pedro Jará Xavier, que possui mais de 33 anos de experiência no setor elétrico brasileiro, essa informação destaca que as energias renováveis ganharam importância devido às preocupações com o meio ambiente, como o aquecimento global, além de representarem uma opção econômica mais eficiente. Isso pode aliviar a carga sobre o governo e aproveitar as vastas riquezas naturais do país^{vii}.

O conjunto de energias renováveis é constituído por várias técnicas de conversão energética, que culmina na produção de energia elétrica. Como exemplo, é possível citar a utilização no Brasil de energia proveniente da biomassa, energia eólica e energia solar. Entretanto, a energia solar obtida por meio de painéis fotovoltaicos se destaca por sua grande versatilidade, baixo impacto ambiental e baixo custo.

3.2 Energia solar

A história da energia solar tem raízes nas antigas civilizações. Por exemplo, em 212 a.C., Arquimedes utilizou espelhos para concentrar os raios solares e incendiar as velas de uma frota inimiga. A partir do final do século XIX, foram desenvolvidos aquecedores baseados em energia solar que alimentavam motores. Somente no século XX, com a popularização da energia elétrica e a descoberta dos materiais semicondutores, a energia solar passou a ser utilizada em grande escala.

A utilização da energia solar como fonte alternativa de energia elétrica começou nos Estados Unidos em 1959, inicialmente visando a geração de eletricidade para satélites. A utilização em residências foi prejudicada pelos altos custos e baixa eficiência dos painéis fotovoltaicos, mas desde então, o preço diminuiu mais de 1000%. Avanços significativos também ocorreram no desenvolvimento destes materiais, tornando possível alcançarem eficiências de quase 30%.

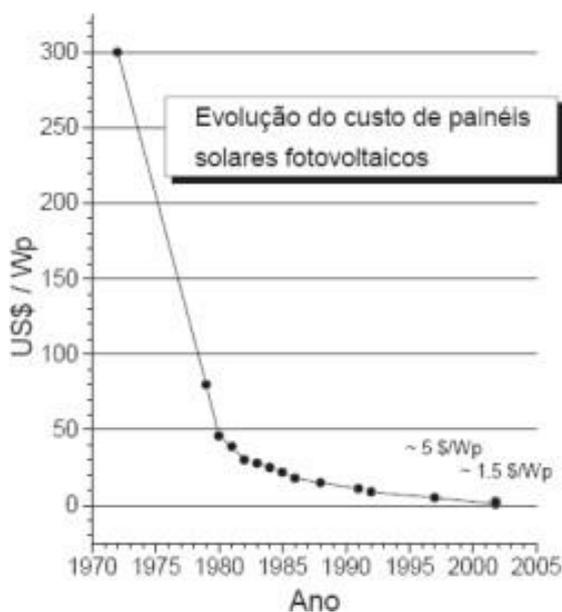


Figura 2: O custo das células fotovoltaicas em função do tempo.viii.

Apesar dos custos ainda serem relativamente altos, o mercado de energia solar continua a crescer. À medida que os custos caíram para cerca de US\$ 2,50 por watt pico, a energia fotovoltaica tornou-se competitiva em relação a geradores a diesel. A expectativa é que com a contínua redução de custos, a preferência dos consumidores por essa energia sustentável impulse ainda mais essa tecnologia, com a indústria buscando produzir energia a um custo de US\$ 0,06 a US\$ 0,09 por kWh até a primeira década do século XXI.viii

Em paralelo à redução de custos de produção de painéis fotovoltaicos, políticas públicas são essenciais para a disseminação do uso da energia solar. Desde a aprovação da Resolução nº 482 da ANEEL em dezembro de 2012, os sistemas fotovoltaicos podem ser conectados à rede elétrica, dando maior

viabilidade de utilização para o usuário final.

3.3 Espectro Solar

A radiação eletromagnética emitida por um objeto, que depende exclusivamente de sua temperatura e não de sua composição, é conhecida como radiação de corpo negro. No caso do Sol, sua radiação eletromagnética se assemelha à de um corpo negro, uma vez que a maior parte de seu espectro é de natureza térmica, resultando na emissão máxima na faixa do espectro visível. Na Figura 3, apresenta-se o espectro de corpo negro a uma temperatura de 5800K. Juntamente com o espectro solar observado fora da atmosfera, cobre a faixa de 200 a 2400 nm.^{ix}

O Sol emite uma ampla gama de radiação eletromagnética, que varia desde raios cósmicos até ondas curtas. Aproximadamente 99% dessa radiação é representada pela faixa de radiação infravermelha, que se estende aproximadamente de 760 a 1 μm . No entanto, a faixa de luz visível se destaca em intensidade em relação ao restante do espectro solar, embora seja estreita, contribuindo com cerca de 47,3% da irradiância total, em comparação com os 46,7% da radiação infravermelha e 6,1% da radiação ultravioleta. Quando a radiação solar entra na atmosfera terrestre, ela sofre uma série de fenômenos físicos que interferem no espectro solar terrestre. A Figura 4 mostra tanto o espectro solar fora da atmosfera quanto o espectro solar direto ao nível do mar. É evidente que a irradiância total na superfície terrestre é menor em relação à irradiância total fora da atmosfera devido aos fenômenos de absorção e difusão da radiação em determinadas regiões do espectro ao penetrar na atmosfera.

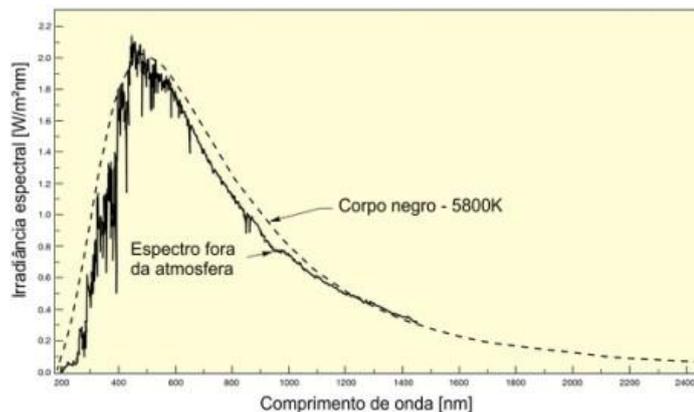


Figura 3: Espectro solar fora da atmosfera comparado com o espectro de corpo negro em 5800K.^{ix}



Figura 4: Espectro solar direto ao nível do mar comparado com o espectro solar fora da atmosfera. ix

A radiação solar é composta por diferentes componentes que interagem com a atmosfera, nomeadamente a radiação direta, a radiação difusa e a radiação refletida. Essas componentes têm um impacto significativo no espectro solar à superfície terrestre. A radiação direta consiste na luz solar que incide perpendicularmente sobre uma superfície, enquanto a radiação difusa é dispersa pelas nuvens e pelo ambiente circundante. A radiação refletida depende das características locais, como o albedo da superfície (mar ou terra). A soma dessas três componentes é referida como radiação global, representando assim a totalidade da energia solar proveniente de todas as direções. A Figura 5 oferece uma representação ilustrativa das diversas componentes da radiação solar à superfície terrestre, demonstrando como uma parte significativa da radiação é refletida e absorvida pela atmosfera.

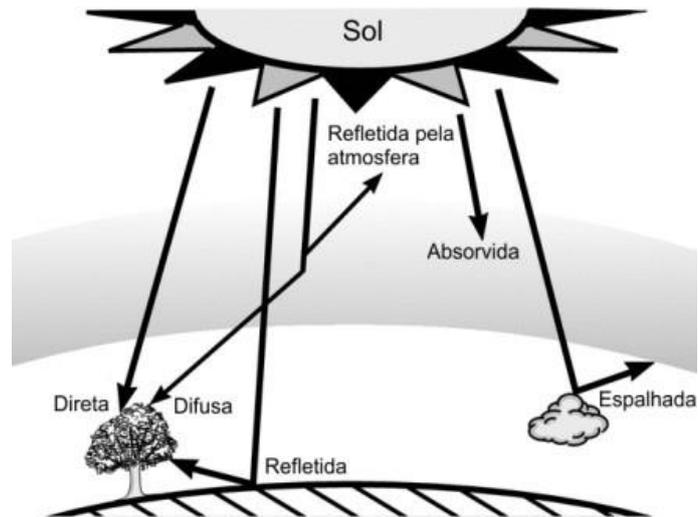


Figura 5: Radiação global composta pelas componentes da radiação direta, difusa e refletida.^{ix}

O trajeto óptico que a radiação solar percorre na Terra influencia o espectro solar. Esse percurso óptico é conhecido como “Massa de ar” (*Air Mass* em inglês). Isso implica que existe uma camada de ar pela qual a radiação solar passa, o que determina o seu espectro. O valor da massa de ar é igual a 1 ao nível do mar, sob uma pressão de $1,013 \times 10^5$ Pa, em condições de céu claro, quando o Sol está diretamente acima da superfície terrestre, no ponto mais alto, conhecido como zênite. Este valor varia com o ângulo em que a radiação solar percorre dentro da atmosfera terrestre, como mostrado na Figura 6. O espectro fora da atmosfera é denominado de AM0. Para caracterização de células solares, também são comumente utilizados os espectros AM 1,5G e AM 1,5D da ASTM, ambos com angulação de $48,2^\circ$, conforme ilustrado na Figura 7.^{ix}

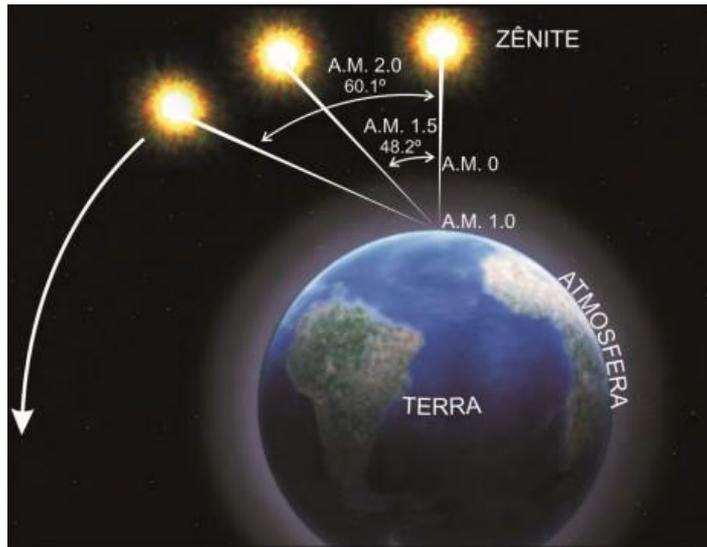


Figura 6: A posição em graus e valores das diferentes massas de ar.*ix*

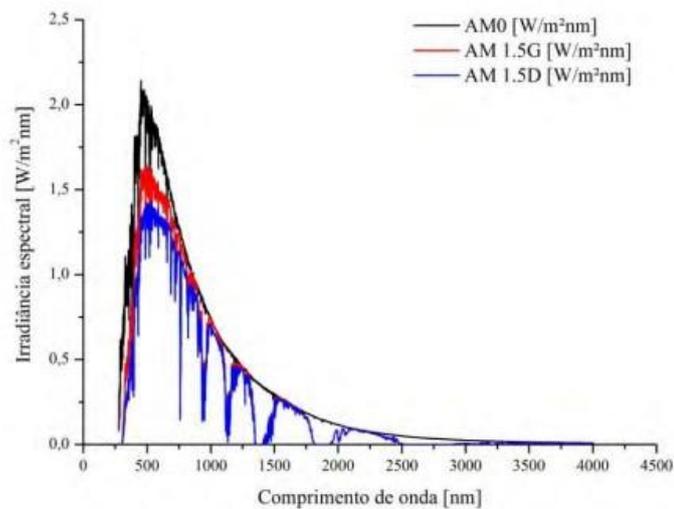


Figura 7: Espectros padrão de referência AM0, AM1.5G e AM1.5D.*ix*

3.4 Células solares

De acordo com Januzzi, Varella e Gomes (2009), as células fotovoltaicas disponíveis comercialmente são fabricadas principalmente a partir de silício, nas formas de monocristalino, policristalino e amorfo. Além disso, também existem células fabricadas com outros materiais, como disseleneto de cobre índio (CIS) e telúrio de cádmio (CdTe).^x

O silício emerge como o material predominante na produção de células solares, não apenas devido à sua abundância na Terra, mas também devido à vasta experiência acumulada pela indústria de microeletrônica, sua baixa taxa de contaminação e sua notável durabilidade (CECCHINI, 2003). A escolha entre a utilização do silício monocristalino, policristalino ou amorfo ocorre no início do processo de manufatura e depende das características finais do produto.^{xi}

As células fotovoltaicas à base de silício monocristalino, conforme ilustrado na Figura 8, enfrentam o inconveniente de possuírem um elevado custo de produção devido à quantidade significativa de materiais requeridos e à energia necessária durante o processo de fabricação, conforme apontado pelo CRESESB/CEPEL em 2008. Por outro lado, as células de silício policristalino, conforme ilustrado na Figura 9, possuem baixo valor de produção, mas também possuem baixa eficiência, em torno de 13% (CRESESB/CEPEL, 2008).^{xii}

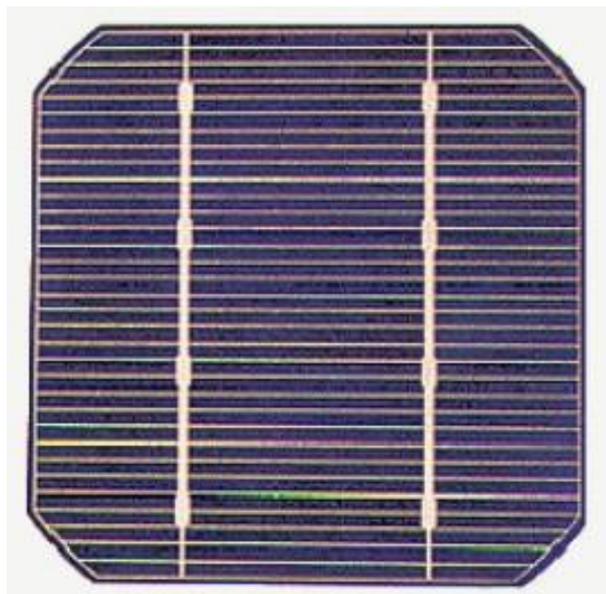


Figura 8: Células de silício monocristalino.xii

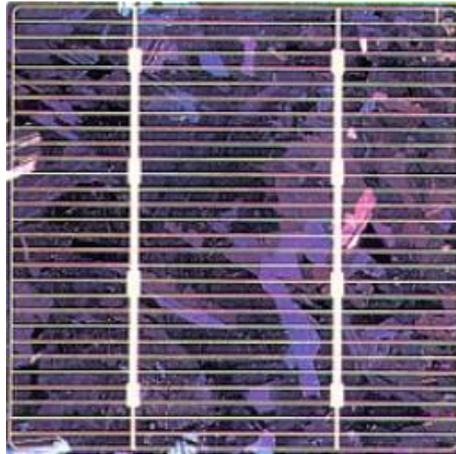


Figura 9: Células de silício policristalino.xii

As células de silício amorfo, conforme ilustrado na Figura 10, são produzidas por meio da deposição de finas camadas de silício sobre substratos de vidro ou metal. Sua eficácia na conversão de energia solar em eletricidade varia entre 5% e 7%. Os principais desafios que impedem a adoção generalizada das células de filmes finos estão relacionados à sua confiabilidade em comparação com as células de silício cristalino (CRESESB/CEPEL, 2008). No entanto, esse problema tem sido mitigado pela adoção de células de múltiplas camadas. ^{xii}

Nos últimos anos, houve avanços significativos no desenvolvimento de materiais fotovoltaicos e melhorias na eficiência de conversão. Eficiências na faixa de 18% a 24% têm sido alcançadas em células tradicionais de base de silício, fabricadas tanto com material monocristalino quanto policristalino. Estes dados estão alinhados com as perspectivas de crescimento no mercado

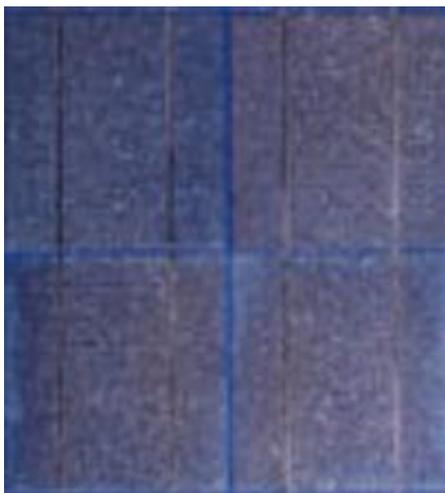


Figura 10: Células de silício amorfo.xii

3.5 Sistema de medida corrente por tensão (IxV)

Um dos principais métodos de caracterização de células solares é a curva Corrente por Tensão. Este método é empregado para determinar os parâmetros elétricos associados ao desempenho de um detector, que pode ser tanto um fotodiodo quanto uma célula solar de silício. Isso permite a determinação dos seguintes parâmetros: corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, corrente de máxima potência, tensão de máxima potência, eficiência e fator de preenchimento. Essas medidas podem ser realizadas diretamente com a luz solar, entretanto, para padronização, é comumente realizada em laboratório através de Simulador Solar e sistema de aquisição de dados.

O sistema básico de medição da curva IxV é composto por um simulador solar, um suporte de amostras com controle de temperatura, uma carga variável, um sistema de medição de corrente e tensão e um sistema de aquisição de dados. A Figura 11 ilustra o diagrama simplificado do sistema. O simulador solar é o componente central do sistema e consiste em uma fonte de tensão estabilizada, um sistema ótico para colimar a luz, um fotodiodo para ajuste de potência e estabilização da lâmpada, bem como uma lâmpada de alta potência que simula a radiação solar. Dependendo dos filtros óticos usados, ele pode simular espectros como AM0 para radiação solar fora da atmosfera ou AM1, AM1.5 ou AM2 para radiação solar dentro da atmosfera. A norma IEC 60904-9 Ed.2, de 2006, define os padrões usados na caracterização de dispositivos fotovoltaicos para uso em terra.^{xiii}

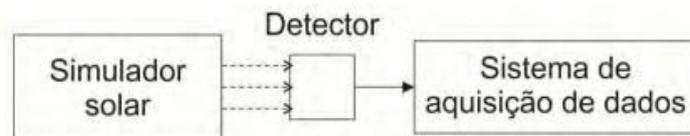


Figura 11: Diagrama simples de um sistema de medida de curva IxV. ix.

O sistema utilizado para caracterização das curvas IxV encontra-se no Laboratório de Dispositivos Fotovoltaicos, localizado no departamento de Engenharia Espacial do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), na cidade de São José dos Campos.

O simulador solar utilizado é alimentado por uma fonte estabilizada e opera com uma lâmpada de descarga em gás de alta pressão de Xenônio de 1000 W que ilumina uma área de 152 x 152 mm e reproduz o espectro solar AM0 ou AM1.5G. O simulador consta ainda com um refletor elipsoidal, dois espelhos a 45°, um integrador ótico, um obturador (shutter), suporte para filtros e uma lente colimadora ix. A Figura 12 mostra a lâmpada do simulador juntamente com o espelho. O software “medicaoIxV.vi” determina os parâmetros elétricos da placa, fornecendo a tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, tensão no ponto de máxima potência, corrente no ponto de máxima potência, ponto de máxima potência, fator de forma e eficiência.



Figura 12: Lâmpada do sistema de caracterização de curva IxV de células solares de silício do CELSOL.

3.6 Sistema de medida de resposta espectral

A análise espectral de elementos sensores desempenha um papel crucial na determinação de diversos parâmetros além da expansividade espectral. Esses parâmetros incluem a eficiência quântica, o comprimento de difusão dos portadores minoritários, os efeitos da profundidade da junção e o impacto da camada ante refletora no desempenho da célula. ^{xiv}

Basicamente, um sistema espectral consiste em componentes essenciais, incluindo uma fonte de luz, preferencialmente uma lâmpada de filamento devido ao seu espectro bem definido, um sistema ótico composto por lentes e/ou espelhos, um monocromador ou filtros de interferência e um sistema de aquisição de dados, que pode incluir um amplificador *Lock-in* com um *chopper* ou multímetros de precisão. O diagrama típico desse sistema é ilustrado na Figura 13.

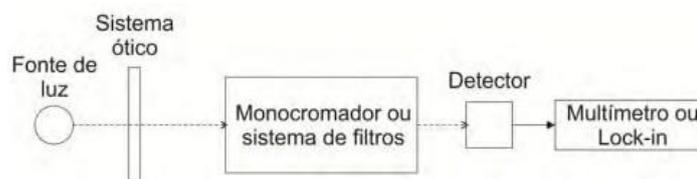


Figura 13: Diagrama típico do sistema de medida de resposta espectral.^{ix}

4. Metodologia

Vinte células solares foram caracterizadas neste trabalho, como ilustrado na Figura 14. As amostras foram adquiridas na China por meio de um site de compras e identificadas para ter um registro individual. Todo o trabalho, como justificado anteriormente, foi realizado no Laboratório de Dispositivos Fotovoltaicos - CELSOL do INPE, localizado na cidade de São José dos Campos.

As caracterizações tiveram início pelo simulador solar, onde foi possível determinar os parâmetros básicos de cada célula. Foram obtidos os gráficos de tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, tensão no ponto de máxima potência, corrente no ponto de máxima potência, ponto de máxima potência, fator de forma e eficiência da placa. Cada célula foi caracterizada cinco vezes para garantia

dos resultados, utilizando uma área de trabalho de 152 mm, de acordo com a norma IEC 60904-9.



Figura 14: Identificação das placas solares.

A segunda parte das análises consistiu na análise espectral. Para cada processo de caracterização, foi realizada inicialmente a análise da lâmpada para determinar a potência por comprimento de onda. Posteriormente, as células foram caracterizadas, varrendo os comprimentos de onda entre 350 e 1100 nm, com passos de 20 nm e abertura de fenda de 20 mm. O arranjo para tal caracterização é ilustrado na Figura 15 e o monocromador utilizado é mostrado na Figura 16.



Figura 15: Foto da montagem para caracterização da resposta espectral (1 - espectro radiômetro, 2 - fonte de alimentação, 3 - medidor de tensão).



Figura 16: Monocromador determinação do comprimento de onda Sistema de medida de corrente por tensão do CELSOL.

5. Resultados e discussão

5.1 Simulador Solar

A caracterização das propriedades elétricas de uma célula realizada por um simulador solar fornece curvas de corrente em relação à tensão (I-V), sendo que várias características são retiradas destes gráficos, como descrito no tópico 3.5. Todas as 20 amostras foram analisadas e a Figura 17 apresenta um exemplo típico da curva I-V dessas células. Para cada configuração de carga aplicada aos terminais da célula, um par de valores I e V é obtido e ao conectar esses pontos, é possível traçar a curva de corrente em relação à tensão (I versus V).

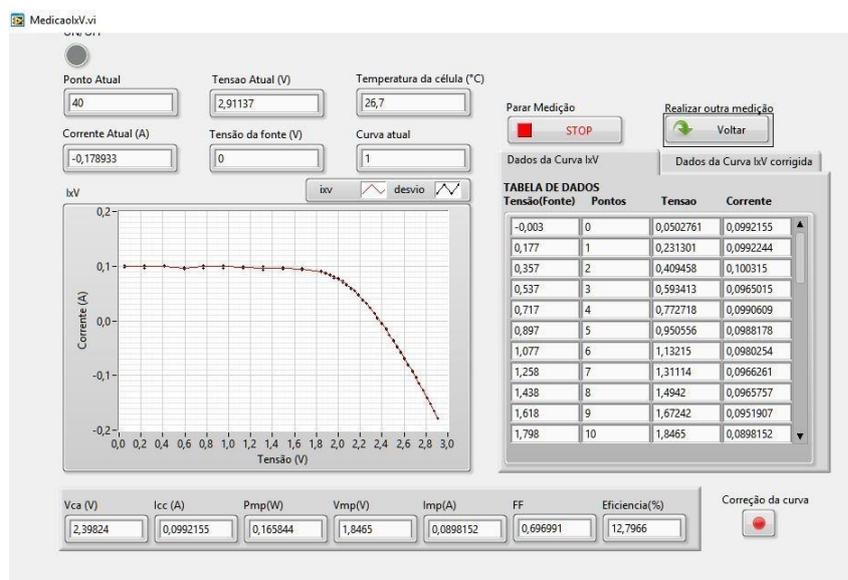


Figura 17: Curva característica I x V típica de uma placa.

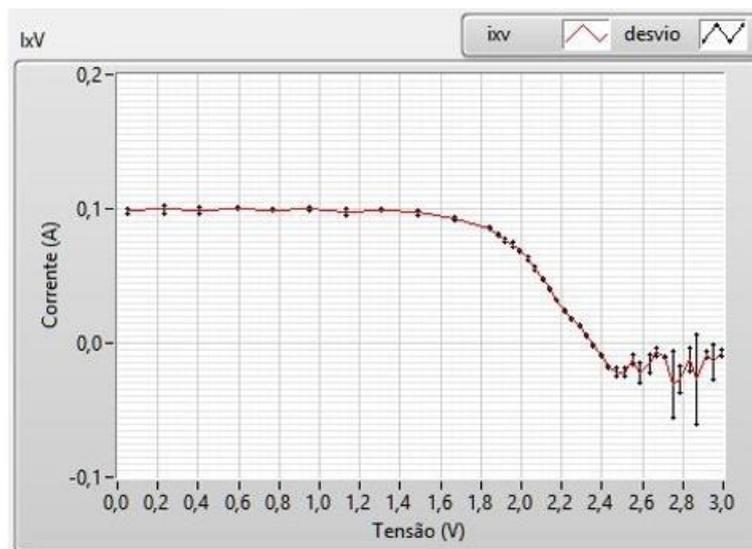
Para fins práticos, não serão mostrados os gráficos de todas as amostras, mas as médias dos valores de todos os parâmetros estão mostradas na Tabela 1. Os resultados mostram que as correntes de curto-circuito das células se mantêm praticamente constantes, por volta de 0,1 A até a tensão de circuito aberto, entre 2,2 e 2,4 V. Esses resultados indicam a boa padronização das células de todo o lote adquirido.

Através da Tabela 1, também é possível verificar que a eficiência de todo o lote possui média de 13,253%, com mínimo de 11,686% e máximo de 13,877%. Esses resultados superaram as expectativas, visto que a eficiência esperada para células de silício policristalino é de apenas 13% e mediante o baixo preço de aquisição do lote.

Tabela 1: todos os dados de C1 a C20 das placas solares

Ordem	Vca	Icc	Pmp	Vmp	Imp	FF	Eficiência
C1	2,398243	0,099215	0,165844	1,846503	0,089815	0,696991	12,796614
C2	2,357144	0,098191	0,15758	1,840896	0,0856	0,680842	12,158984
C3	2,399517	0,098769	0,172458	1,878044	0,091828	0,72768	13,274166
C4	2,400154	0,102288	0,177162	1,845484	0,095998	0,721622	13,636271
C5	2,397414	0,099851	0,17066	1,842425	0,092628	0,712917	13,08745
C6	2,40111	0,096806	0,172124	1,924495	0,089438	0,740499	13,232126
C7	2,398816	0,100901	0,178199	1,920736	0,092776	0,736227	13,749892
C8	2,35861	0,098155	0,175557	1,879701	0,093396	0,758316	13,630206
C9	2,323373	0,097314	0,150892	1,657514	0,091035	0,667382	11,686208
C10	2,360203	0,096781	0,170786	1,879	0,090892	0,747674	13,226899
C11	2,35912	0,093679	0,166527	1,838793	0,090563	0,753512	13,058874
C12	2,400983	0,095704	0,174735	1,877853	0,09305	0,760429	13,789057
C13	2,402448	0,09806	0,172606	1,882122	0,091708	0,732675	13,351332
C14	2,398753	0,100367	0,158418	1,666243	0,095075	0,657999	12,345513
C15	2,401747	0,09949	0,164745	1,877726	0,087736	0,689453	12,82259
C16	2,40213	0,099821	0,178294	1,878872	0,094894	0,743567	13,877171
C17	2,400345	0,095853	0,172227	1,840514	0,093575	0,748552	13,421676
C18	2,357718	0,095965	0,174359	1,923348	0,090654	0,770621	13,554055
C19	2,400409	0,096561	0,172259	1,877789	0,091735	0,74318	13,407452
C20	2,400409	0,098287	0,168544	1,836181	0,091791	0,714383	13,085734
Média	2,3991665	0,098173	0,1721755	1,8777575	0,091763	0,734451	13,253146

Durante as caracterizações, foi verificado um defeito em uma das células. Na Célula C2, como ilustrado na Figura 18, a corrente se mantém praticamente constante até aproximadamente 2 volts. Em uma situação de circuito aberto, em torno de 2,4 volts, a amostra demonstra um comportamento diferente das demais, com oscilações na corrente. Neste caso, foi considerada que estava danificada. Este resultado demonstra que o lote continha apenas uma célula defeituosa, e 95% das células estavam em perfeito funcionamento.



Vca	Icc	Pmp	Vmp	Imp	FF	Eficiência
2,357144	0,098191	0,157580	1,840896	0,085600	0,680842	12,158984

Figura 18: Célula C2, com seus respectivos dados.

Para facilitar a análise dos dados apresentados na Tabela 1, foram criados gráficos com as informações mais importantes. A Figura 19 exibe os valores obtidos na análise da tensão de circuito aberto para cada célula, juntamente com a linha de tendência. As linhas entre os pontos estão presentes somente para guiar a análise. A Figura 20 inclui a média móvel entre duas células. A Figura 21 mostra a corrente de curto-circuito juntamente com a linha de tendência. Ao examinar este gráfico, é possível observar uma diferença notável na linha de tendência, que, diferentemente da tensão de circuito aberto, possui uma inclinação específica. A Figura 22 inclui a média móvel no gráfico anterior, que revela uma relação entre a tensão e a corrente.

Na tensão de circuito aberto, a média móvel geralmente está em um período semelhante ao da própria tensão, enquanto na corrente de curto-circuito, a média móvel acompanha a corrente mais de perto. Ao analisar os resultados de tensão e corrente de curto-circuito, é possível notar que, na maioria dos casos, a corrente permanece abaixo da tensão. No entanto, a Célula C2 surge como exceção.

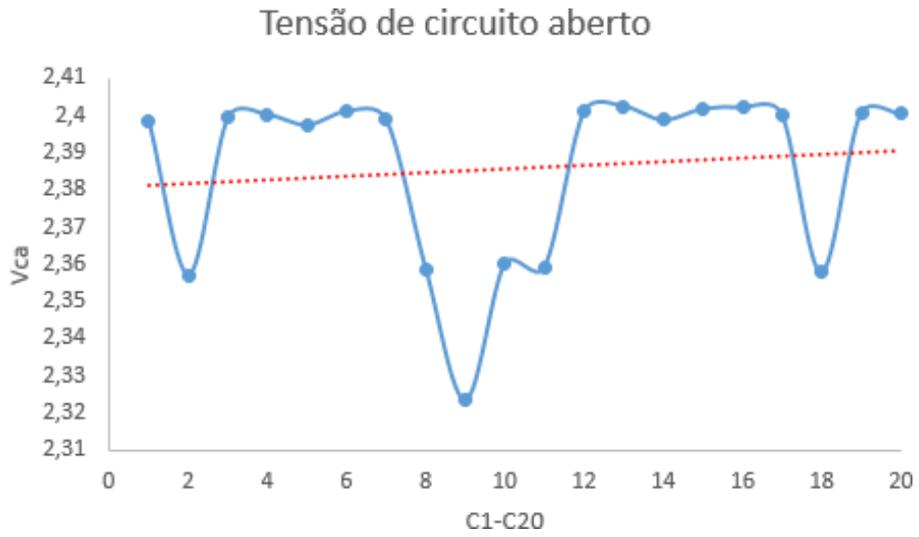


Figura 19: Tensão de circuito aberto com linha de tendência.

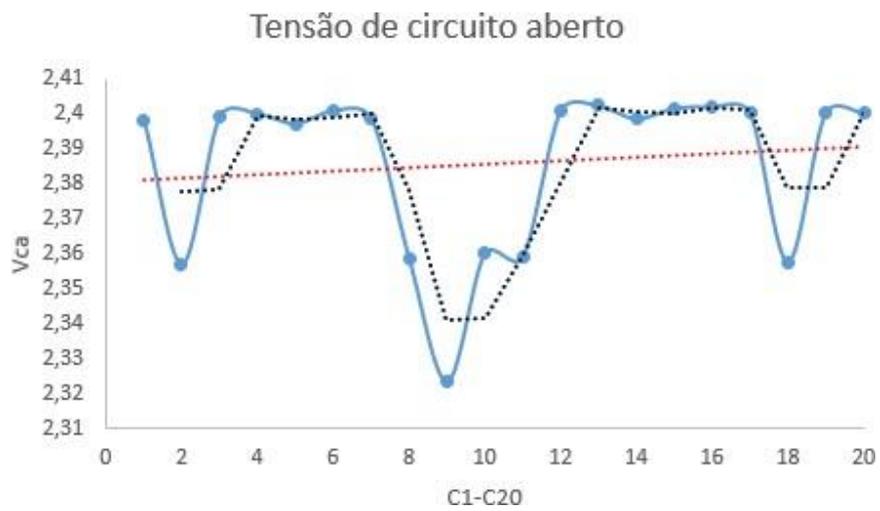


Figura 20: Tensão de circuito aberto com linha de tendência e média móvel entre as placas.

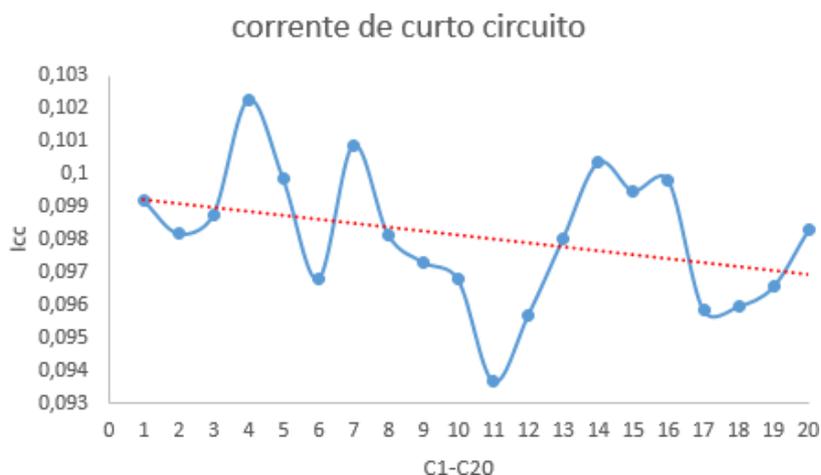


Figura 21: Corrente de circuito aberto com linha de tendência.

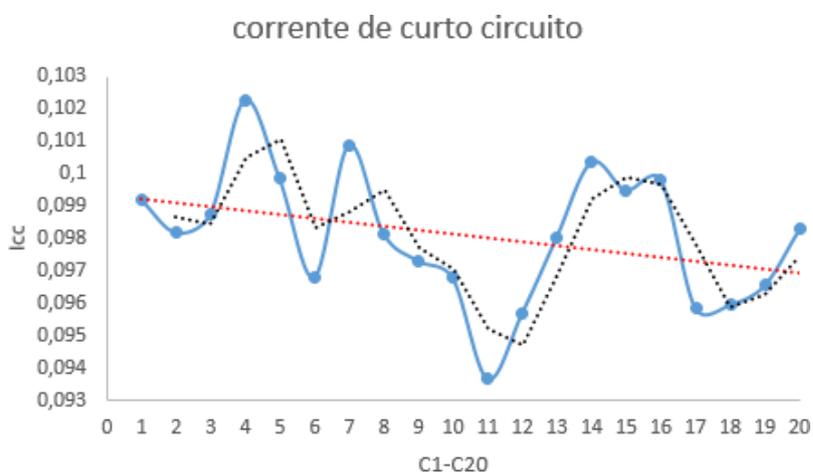


Figura 22: Corrente de circuito aberto com linha de tendência e média móvel entre as placas.

A potência nominal é uma das principais características de uma célula solar. Esse parâmetro se refere à capacidade máxima de geração de energia elétrica, considerando condições específicas de teste. A Figura 23 fornece os dados da potência nominal de cada célula, bem como a linha de tendência. É possível observar que a linha de tendência possui pequena inclinação, aproximando-se de uma estabilidade. Esse resultado sugere pequena variação na geração de energia em condições ideais.

Uma maneira de avaliar essa variação é por meio da média móvel de dois números. A Figura 24 mostra o gráfico da potência nominal juntamente com a média móvel. Nessa representação gráfica, podemos observar que a linha de tendência

tem uma angulação menor, o que indica uma maior estabilidade entre os valores das placas. Isso é fundamental para entender o desempenho real das placas solares em diversas situações.

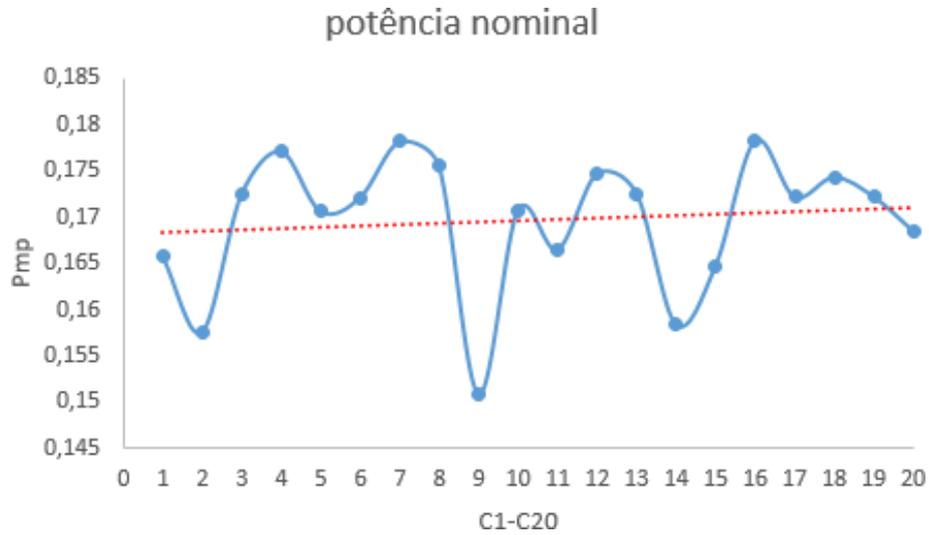


Figura 23: Potência nominal e linha de tendência.

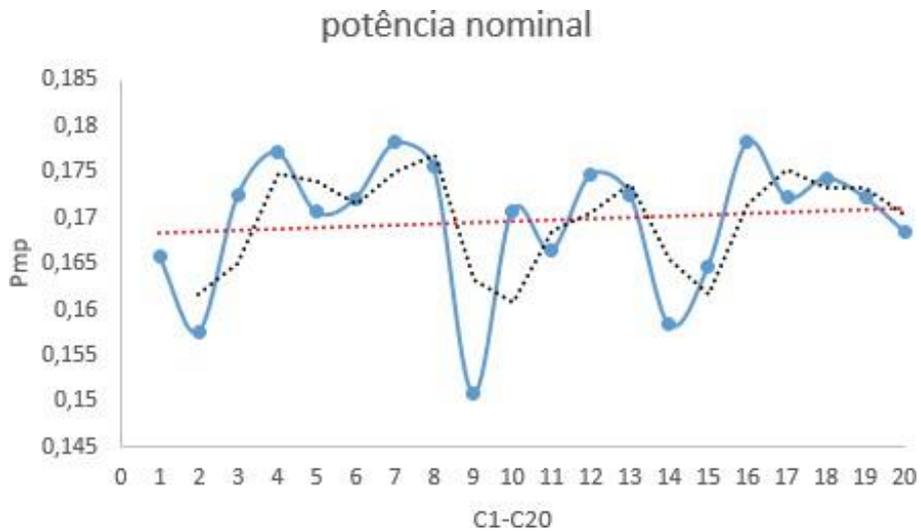


Figura 24: Potência nominal, linha de tendência. E média móvel de dois números.

Para determinar a tensão de potência máxima do sistema, é necessário encontrar a combinação de tensão e corrente que resulte na potência gerada pelos painéis solares atingindo seu valor máximo, considerando as condições específicas de operação. A Figura 25 mostra a tensão de máxima potência de todas as amostras, juntamente com a linha de tendência. É possível notar que a linha de tendência das células apresenta inclinação mínima. Esses dados são importantes, uma vez que a eficiência da placa solar é diretamente determinante de sua capacidade de produção de energia.



Figura 25: Tensão de máxima potência e linha de tendência.

A corrente de potência máxima e a tensão trabalham de forma sinérgica para otimizar o desempenho das placas solares. A Figura 26 mostra os valores das correntes máximas juntamente com a linha de tendência. A média móvel, Figura 27, mostra uma inclinação menor em relação à tensão, proporcionando uma resposta mais eficaz para o conjunto das placas solares, como evidenciado mais adiante ao analisar a eficiência.

A comparação dos dados de tensão e corrente é apresentada graficamente na Figura 28. É notável um aspecto que merece atenção especial no Painel C2. Essa amostra revela queda significativa na corrente, o que pode indicar um possível problema em sua produção de energia, resultando em uma curva $I \times V$ divergente em relação ao padrão das outras placas solares.

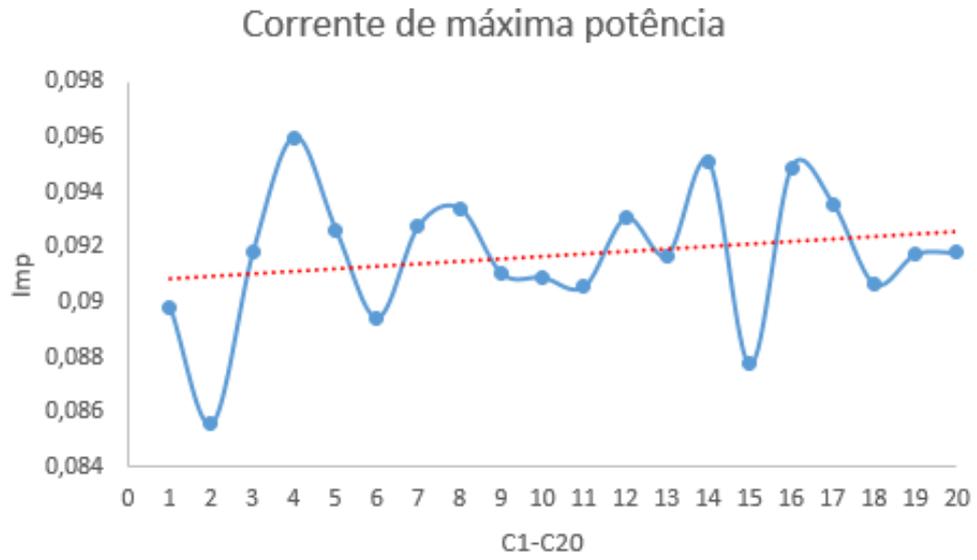


Figura 26: Corrente de máxima potência e linha de tendência.

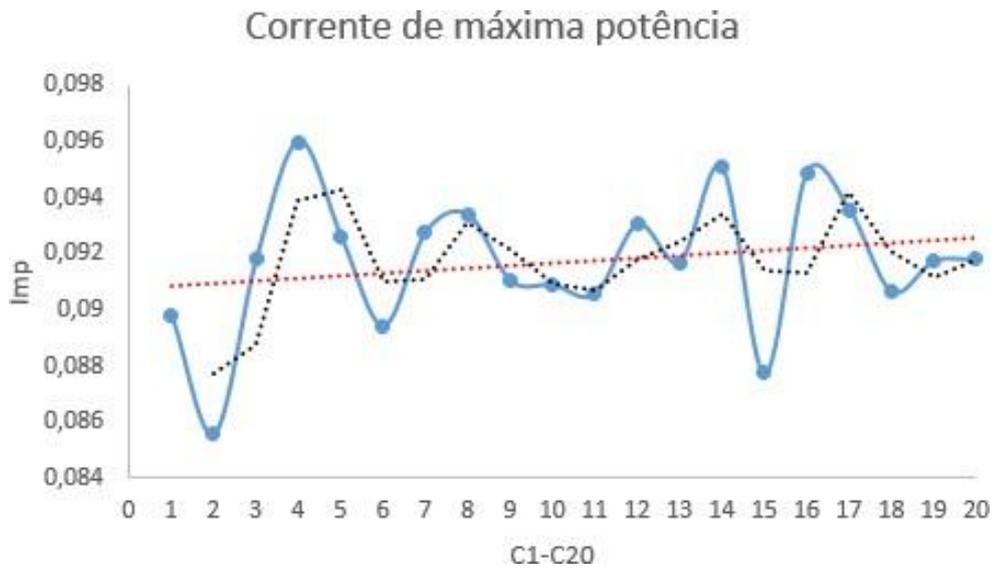


Figura 186: Corrente de máxima potência e média móvel de dois números.

Tensão de máxima potência / Corrente de máxima potência

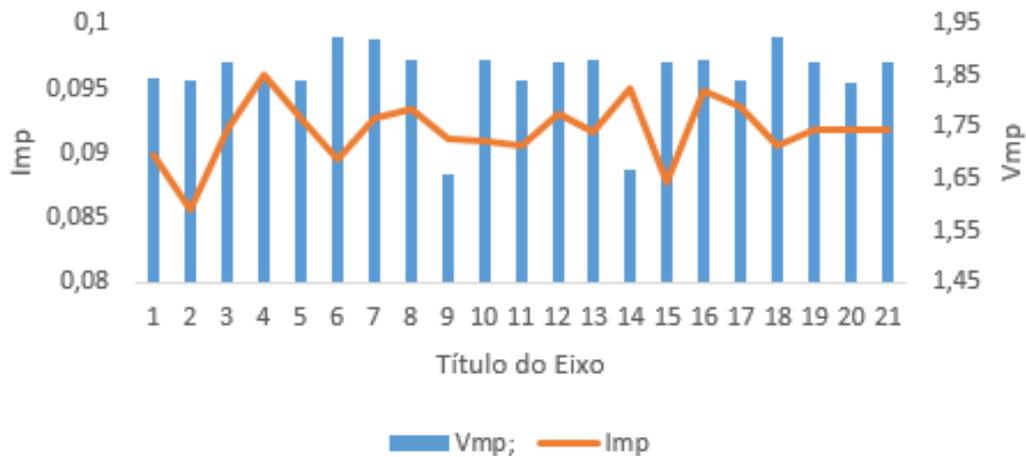


Figura 28: Comparação com a tensão e a corrente.

O fator de preenchimento é uma característica que mostra qual a eficiência ideal para uma célula solar, sendo considerada de grande importância na análise do desempenho das células solares. A Figura 29 revela os valores do fator de preenchimento para todas as 20 amostras analisadas. Os resultados indicam que apenas 3 placas solares possuem fator de preenchimento inferior a 0,71. É crucial investigar minuciosamente as causas dessa ocorrência, pois o fator de preenchimento está intrinsecamente relacionado à eficiência global das placas. A Figura 30 apresenta os dados de eficiência das amostras. A relação entre o fator de preenchimento e eficiência é claramente ilustrada na Figura 31.

Ao comparar o fator de preenchimento, é possível notar que as placas C9 e C14 demonstraram desempenho inferior, refletindo em eficiência reduzida. Por outro lado, quando o fator de preenchimento é alto, como evidenciado nas células C18 e C12, a eficiência é notavelmente superior. Essas observações enfatizam a importância de analisar as curvas $I \times V$ das células solares e coletar dados detalhados para avaliar seu desempenho.

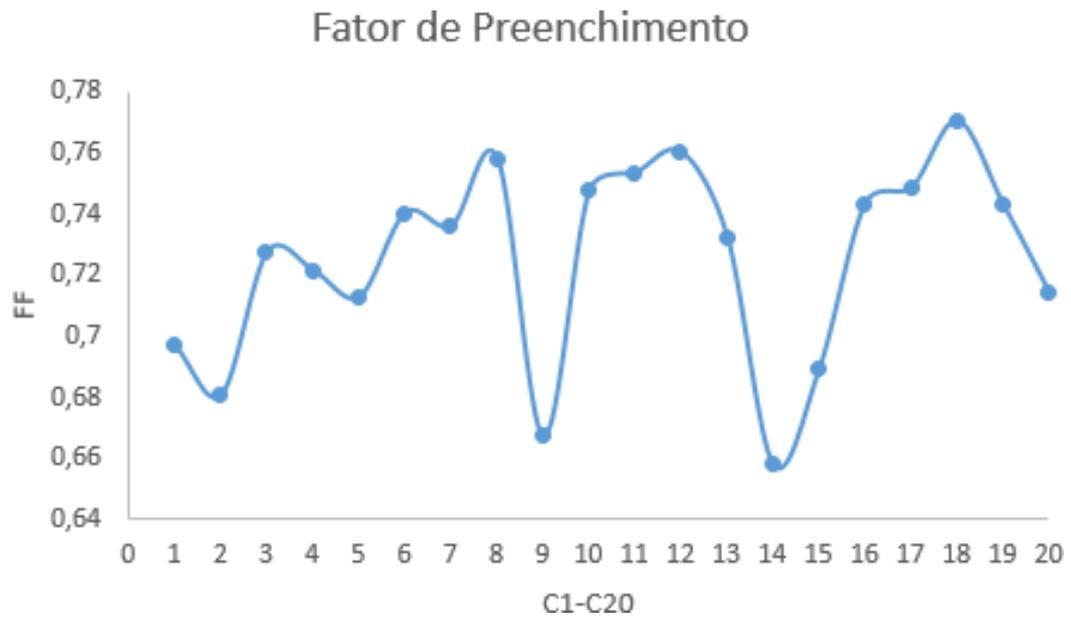


Figura 19: Fator de preenchimento.

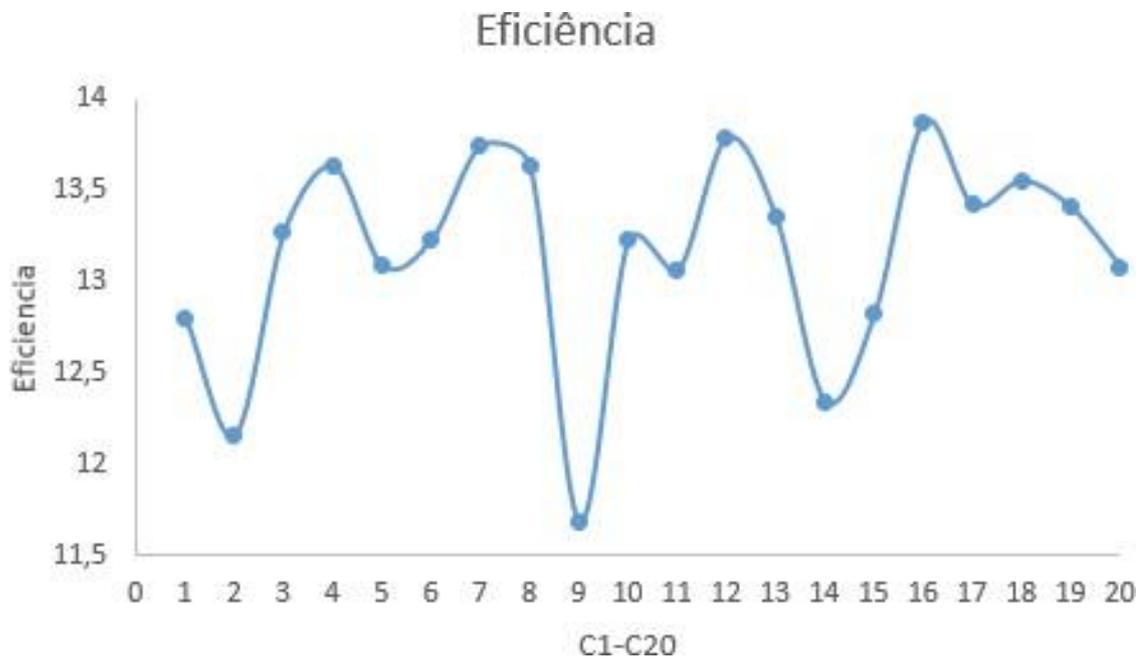


Figura 20: Eficiência.

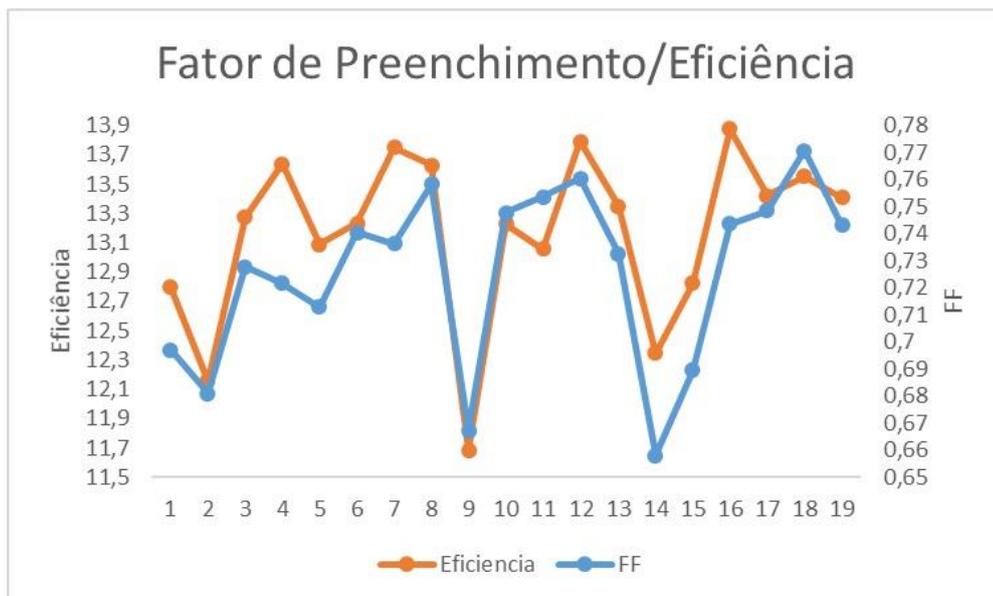


Figura 21: Comparação do fator de preenchimento e a eficiência.

Como dito anteriormente, a potência nominal é um parâmetro fundamental para avaliar a eficiência das células solares. A Figura 32 apresenta os dados da potência nominal e eficiência para as amostras analisadas. As curvas mostram de forma bastante clara que ambos os resultados estão muito próximos. Através deste gráfico, é possível notar que as amostras C11 e C16 possuem os mesmos valores de potência nominal e eficiência, o que se traduz em máxima eficiência do sistema, em que a quantidade máxima de luz solar está sendo convertida em energia elétrica.

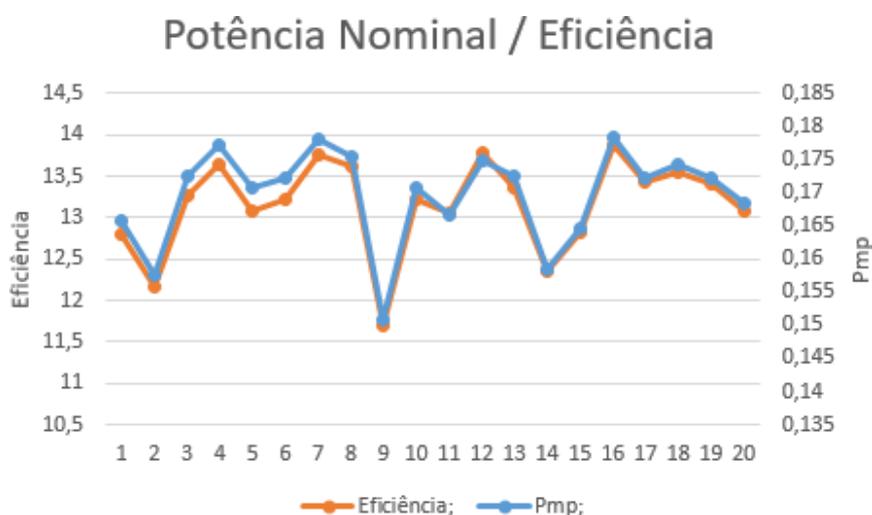


Figura 22: Comparação entre a potência nominal e a Eficiência.

5.2 Resposta Espectral.

As análises de resposta espectral são relevantes para revelar o comportamento da célula solar em função de cada comprimento de onda específico que chega à sua superfície. Devido ao grande tempo necessário para as análises e ao curto tempo de estadia no INPE, foi decidido realizar os testes de resposta espectral em somente seis amostras. Para tais análises, é imperativo realizar a caracterização da fonte de luz para ter dados de potência de cada comprimento de onda que irá chegar até as amostras. A Figura 33 mostra as curvas da potência de emissão por comprimento de onda da lâmpada utilizada. É possível perceber a homogeneidade dos gráficos.

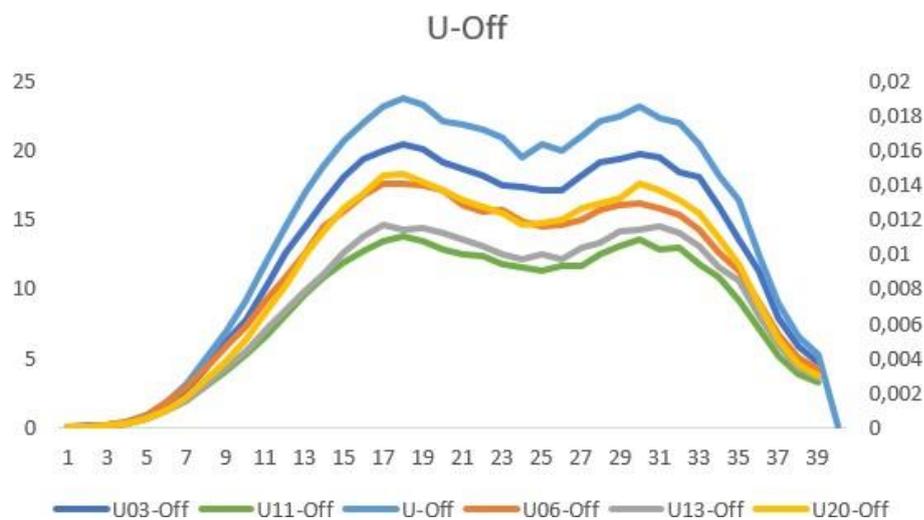


Figura 23: Comparação entre as curvas placas.

As figuras 33, 34 e 35 mostram, respectivamente, os dados obtidos para as amostras C1, C06 e C11. As curvas são uniformes e características de células solares de silício policristalino. É possível notar que as amostras demonstraram resposta do ultravioleta até o infravermelho, e alta sensibilidade na faixa entre 800 e 900 nm.

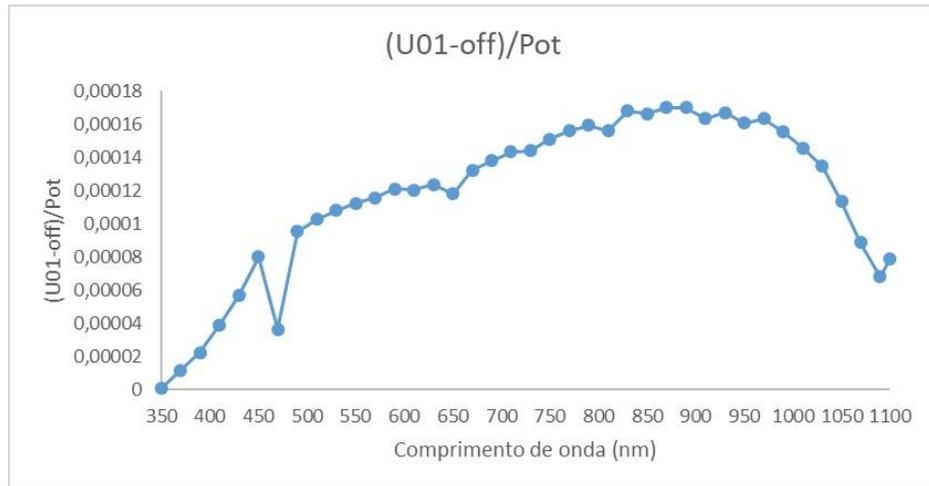


Figura 24: Comprimento de onda / U-Off/P da placa analisada C1.

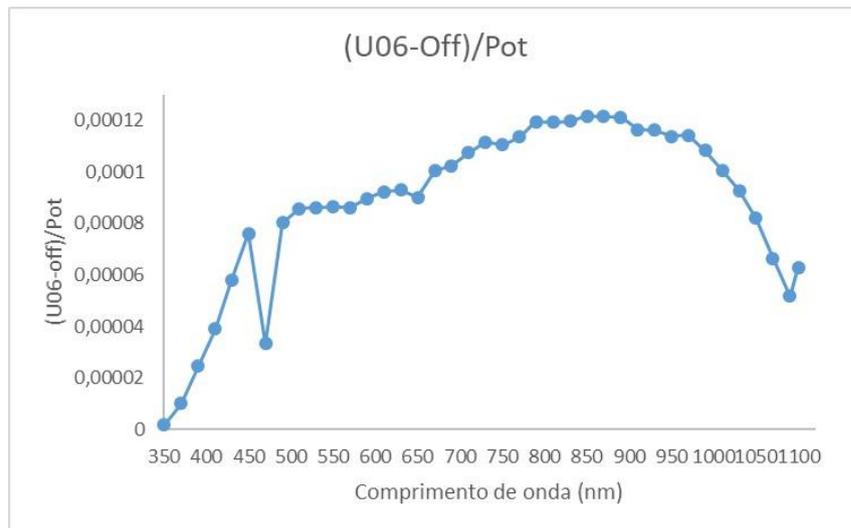


Figura 25: Comprimento de onda / U-Off/P da placa analisada C06.

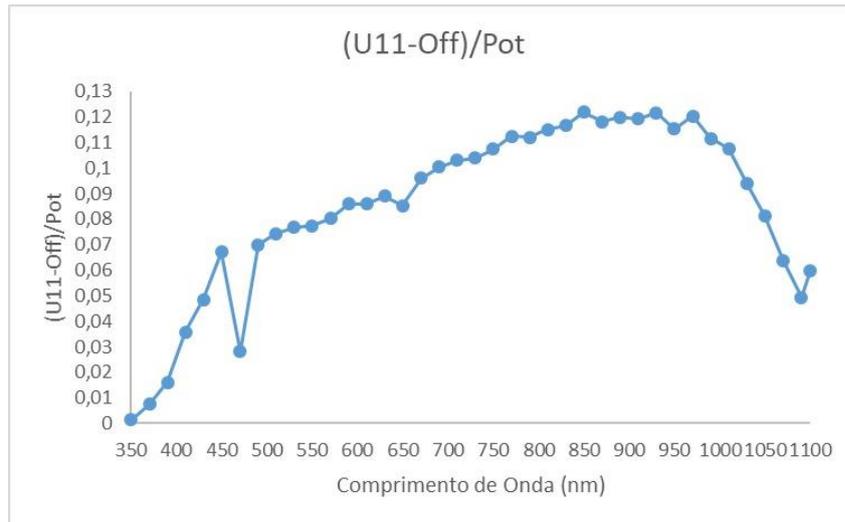


Figura 26: comprimento de onda / U-Off/P da placa analisada C13.

Todas as amostras analisadas revelaram uma queda atípica de potência na faixa entre 450 e 500 nm. Esse comportamento atípico gerou a necessidade de uma coleta de dados mais detalhada nessa região, a fim de identificar precisamente o ponto em que ocorre essa queda. Desta forma, foi realizada uma varredura detalhada na amostra C11, entre os comprimentos de onda de 430 e 470 nm, com passo de 3 nm. A Figura 36 mostra os dados desta varredura, e revela que a queda ocorre no comprimento de onda de 451 nm.

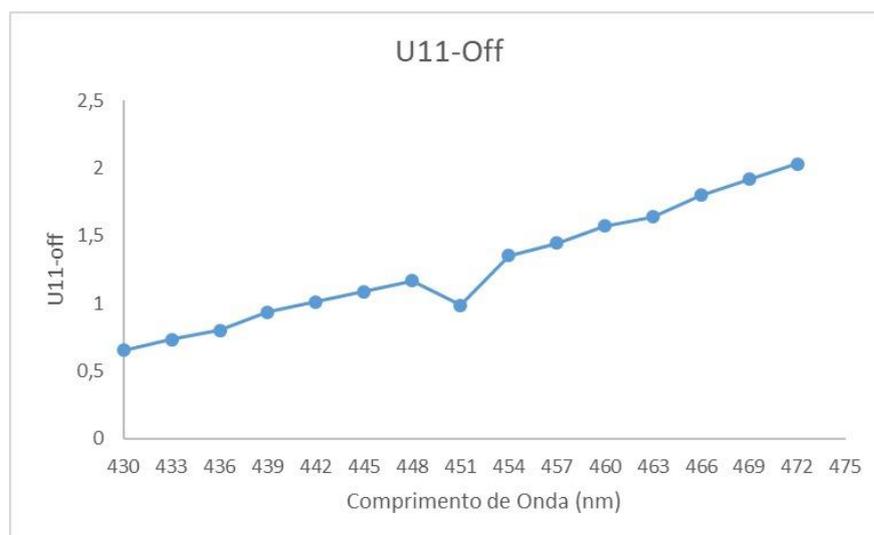


Figura 27: relação da faixa entre 450nm e 500nm

O resultado obtido não pôde ser explicado com base nas caracterizações realizadas neste trabalho, mas foi possível formular três hipóteses. A primeira hipótese é que essa queda de potência aconteceu devido a algum fator no momento da fabricação das células, como alguma impureza na rede cristalina do silício. Os restantes das hipóteses versam sobre o polímero utilizado como superfície anti-refletora em todas as células analisadas. A segunda hipótese é que há uma reflexão total do comprimento de onda de 451 nm na superfície da camada anti-refletora. A última hipótese é que há absorção deste comprimento de onda na camada anti-refletora. Estas três hipóteses só poderão ser comprovadas após futura análise do polímero.

A Figura 37 mostra todas as respostas espectrais das células testadas. É possível ver que há uma uniformidade no formato das curvas, bem como a anomalia no comprimento de onda de 451 nm.

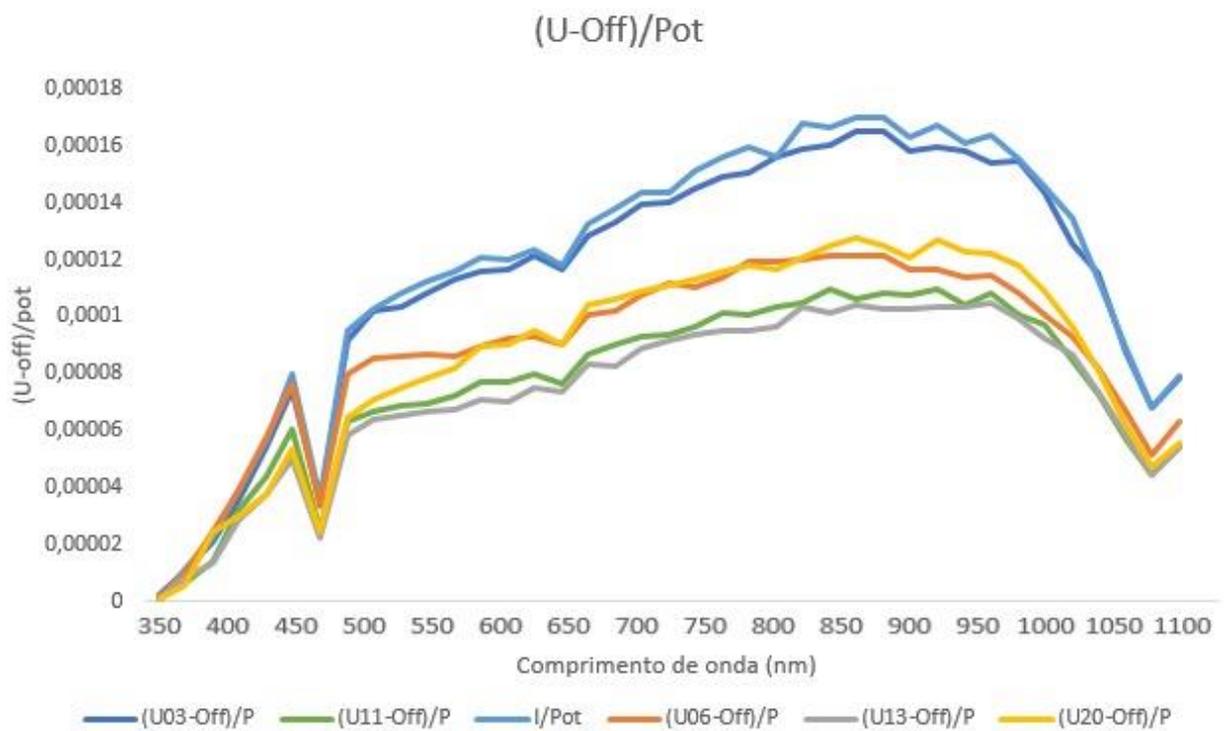


Figura 28: Comparação relação da faixa entre 450nm e 500nm.

6 Conclusão

A caracterização de células solares de silício policristalino é uma etapa essencial no desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia fotovoltaica. Através da análise das curvas IxV (corrente-tensão) e da resposta espectral das células solares, é possível obter informações importantes sobre o desempenho e a eficiência desses dispositivos. As análises das células solares de silício policristalino revelaram uma eficiência média de 13%. Além disso, é encorajador observar que 95% das células solares estão funcionando corretamente, o que significa que é possível montar um painel solar em pleno funcionamento através de células solares individuais. No entanto, observou-se uma queda abrupta na resposta espectral próximo ao comprimento de onda de 450 nm, o que pode indicar absorção ou reflexão total nessa faixa de comprimento de onda.

Tais anomalias podem ser exploradas em trabalhos futuros, em que o polímero utilizado como camada antirrefletora possa ser analisado detalhadamente.

Referências

ⁱ AQUILA, Giancarlo. Análise do impacto dos programas de incentivos para viabilizar economicamente o uso de fontes de energia renovável. 2015.

ⁱⁱ AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Atlas de energia elétrica do Brasil. 3. ed. Brasília, 2008.

ⁱⁱⁱ LEGISLAÇÃO PRESIDENCIAL Lei Nº 14.300 de 06 de Janeiro de 2022 Disponível em: [Base Legislação da Presidência da República - Lei nº 14.300 de 06 de janeiro de 2022 \(presidencia.gov.br\)](#) Acesso em: 04/01/2024.

^{iv} TIBA, C. et. al. (Coords.). Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111p

^v TIBA, C. et al. Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111p.

^{vi} EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA Matriz energética e elétrica Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> Acesso em: 04/01/2024.

^{vii} ACRÍTICA.NET Fontes de energias renováveis já representam 43,5% da matriz energética brasileira, revela especialista Disponível em: <https://www.acritica.net/editorias/economia/fontes-de-energias-renovaveis-ja-representam-435-da-matriz/297956/> Acesso em: 04/01/2024

^{viii} RUBÉRIA, STEFAN, LUTERO Energia solar fotovoltaica e perspectivas de autonomia energética para o nordeste brasileiro 2009.

^{ix} FRANCA Sistemas de caracterização de Elementos Sensores para Radiômetros Fotovoltaicos 2012

^x JANUZZI, G. DE M.; VARELLA, F. K. DE O. M.; GOMES, R. D. M. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede: Relatório final. Campinas, out, 2009.

^{xi} CECCHINI, T. Otimização das regiões altamente dopadas de células solares fabricadas por processos térmicos rápidos de pequeno porte. 2003. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

^{xii} CRESESB/CEPEL. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito; Grupo de trabalho de Energia Solar. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: 2008. 206p

^{xiii} ASTM INTERNATIONAL. Standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface. West Conshohocken, PA, 2008.

^{xiv} BELOTO, A. F. Estudo das características de células solares de silício monocristalino. 1983. 133f. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) - Instituto de Física e Química de São Carlos, São Carlos, 1983.