

CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE DIFERENTES TIPOS DE CÉLULAS SOLARES

Bianca Midori Habiro (IC) e Mariana Amorim Fraga (Orientadora)

Apoio: PIVIC Mackenzie

RESUMO

A caracterização elétrica de células solares é uma etapa fundamental para otimizar e aprimorar a eficiência, durabilidade e desempenho desses dispositivos fotovoltaicos. Este artigo apresenta os progressos realizados e os resultados da caracterização elétrica de diferentes tipos de células solares de silício: monocristalino (mono-Si), policristalino (poli-Si) e amorfo (a-Si). Inicialmente, a proposta da pesquisa era desenvolver um sistema compacto para caracterização de células solares que possibilitasse a obtenção dos parâmetros elétricos de forma prática e rápida, com aplicações didáticas e laboratoriais. Para avaliar o grau de precisão do sistema desenvolvido, diferentes células solares comerciais foram caracterizadas utilizando um aparato experimental convencional que permite a análise da influência de fatores, tais como o tipo de material semicondutor usado e a área da célula, sobre a eficiência desses dispositivos, quando expostos a luz artificial e a luz solar. Devido as dificuldades na aquisição de materiais, o sistema de caracterização ainda não foi finalizado. No entanto, as medidas realizadas com o aparato convencional permitiram um estudo detalhado da potência, eficiência e o fator de preenchimento (FF) de cada tipo de célula.

Palavras-chave: Caracterização elétrica. Célula solar. Eficiência.

ABSTRACT

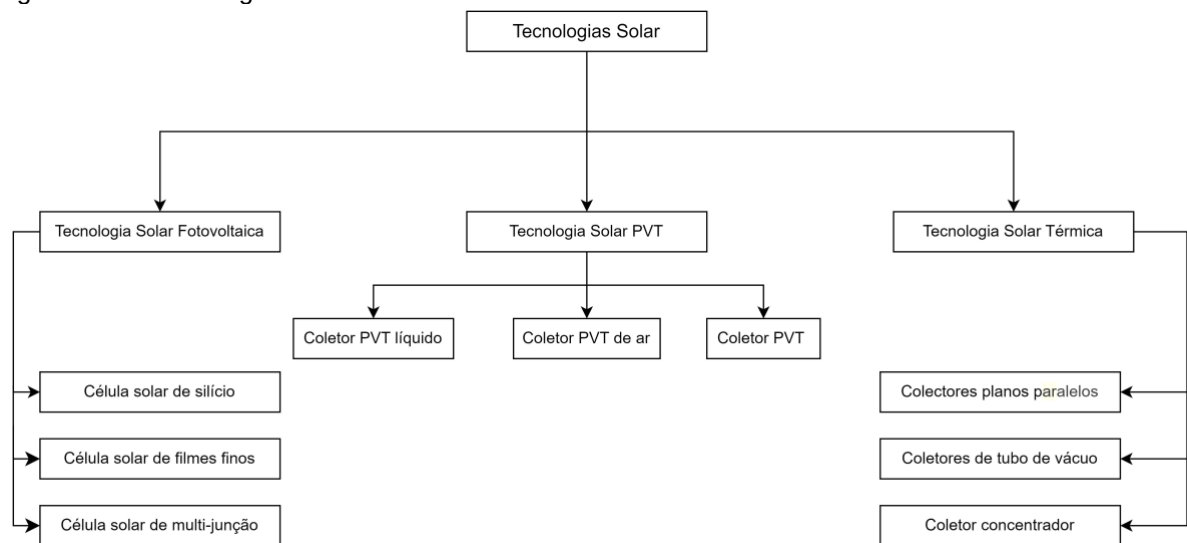
The electrical characterization of solar cells is a fundamental step to optimize and improve the efficiency, durability, and performance of these photovoltaic devices. This article presents the progress made and the results of the electrical characterization of different types of solar cells: monocrystalline (mono-Si), polycrystalline (poly-Si) and amorphous (a-Si). Initially, the research proposal was to develop a compact system for the characterization of solar cells that would allow obtaining the electrical parameters in a practical and fast way, with didactic and laboratory applications. To evaluate the degree of precision of the developed system, different commercial solar cells were characterized using a conventional experimental apparatus that allows the analysis of the influence of factors, such as the type of semiconductor material used and the area of the cell, on the efficiency of these devices, when exposed to artificial light and sunlight. Due to difficulties in acquiring materials, the characterization system has not yet been finalized. However, the measurements carried out with the conventional apparatus allowed a detailed study of the power, efficiency, and the fill factor (FF) of each type of cell.

Keywords: Electrical Characterization. Solar Cell. Efficiency.

1. INTRODUÇÃO

O cenário da energia solar vem expandindo consideravelmente com o passar dos anos, sendo observados altos investimentos em pesquisas para o aprimoramento da produção de energia elétrica a partir deste tipo de energia (HAMADANI, *et al.*, 2015). Diversas tecnologias estão em desenvolvimento (Figura 1.1), a maioria delas são baseadas nas chamadas células solares, dispositivos que, basicamente, realizam a conversão da energia produzida por feixes de luz em energia elétrica na forma de corrente contínua.

Figura 1.1 – Tecnologias Solares



Fonte: Adaptada de Ramos, Alcaso e Cardoso (2019)

No entanto, as baixas taxas de eficiência energética ainda são um problema em dispositivos fotovoltaicos, ou seja, há necessidade de se desenvolver soluções para melhorar a eficiência e reduzir perdas nesses equipamentos. Essas perdas podem ser associadas a diversos fatores, que serão descritos nas seções seguintes, porém, pode-se citar, principalmente, o efeito da temperatura como uma das causas da baixa taxa de rendimento de dispositivos fotovoltaicos (DINCER, *et al.*, 2010).

A partir dessa questão, surgiram diferentes tipos de células solares, isto é, componentes fabricados por materiais semicondutores diversos, desde a mais comum de silício até as células de filmes finos. Assim, existe a necessidade de caracterizar essas células para suas aplicações. De modo geral, para aplicações de pequeno porte, isto é, em casos nos quais a tensão e corrente requeridas não são elevadas, o foco maior na caracterização destes componentes encontra-se no levantamento aproximado de uma curva de corrente versus tensão para incidências comuns as que seriam obtidas em um dia de sol comum (KWAPIL, *et al.*, 2019).

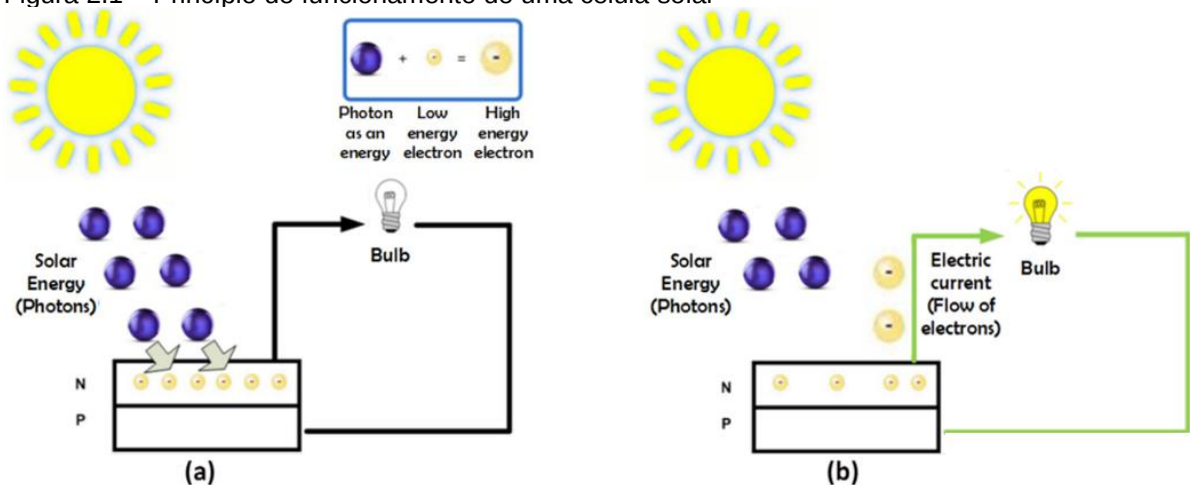
A análise experimental destes componentes mostra-se um desafio devido às diferenças de comportamento a luz solar e a luz artificial. Na segunda, o fator temperatura é extremamente relevante, chegando a deformar as curvas características dos componentes, impedindo a caracterização fiel para estes. Outro desafio que deve ser explorado é a falta de instrumentos adequados para a análise de pequenas células não comerciais, isto é, para concluir a caracterização de células solares de filme finos ou de materiais semicondutores emergentes (KUMAVAT, *et al.*, 2017), por exemplo, alguns parâmetros terão que ser alterados, logo, é necessário um arranjo prático que permita que estas mudanças sejam realizadas facilmente.

Assim, a área de energia solar é ampla, porém ainda pouco explorada, então, a análise de componentes geradores de energia elétrica a partir desta mostra-se importante, mas também complicada. A partir destes pontos, a pesquisa aqui descrita busca desenvolver análises flexíveis para diferentes células solares, comerciais ou não (DINCER, *et al.*, 2010).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Como citado anteriormente, células solares convertem a energia gerada por feixes de luz, principalmente a solar, em energia elétrica e são compostas por diversos materiais semicondutores, os quais passam a conduzir eletricidade na presença de luz ou calor. Esse processo concretiza-se a partir da transferência da energia de um fóton de luz para um portador de carga, o que separa a parte positiva desse portador de sua contraparte negativa, ou seja, do seu elétron associado, gerando uma diferença de potencial e permitindo a extração de uma corrente elétrica, ao fechar o circuito, como mostra a Figura 2.1 (ABDELHADY, *et al.*, 2017).

Figura 2.1 – Princípio de funcionamento de uma célula solar

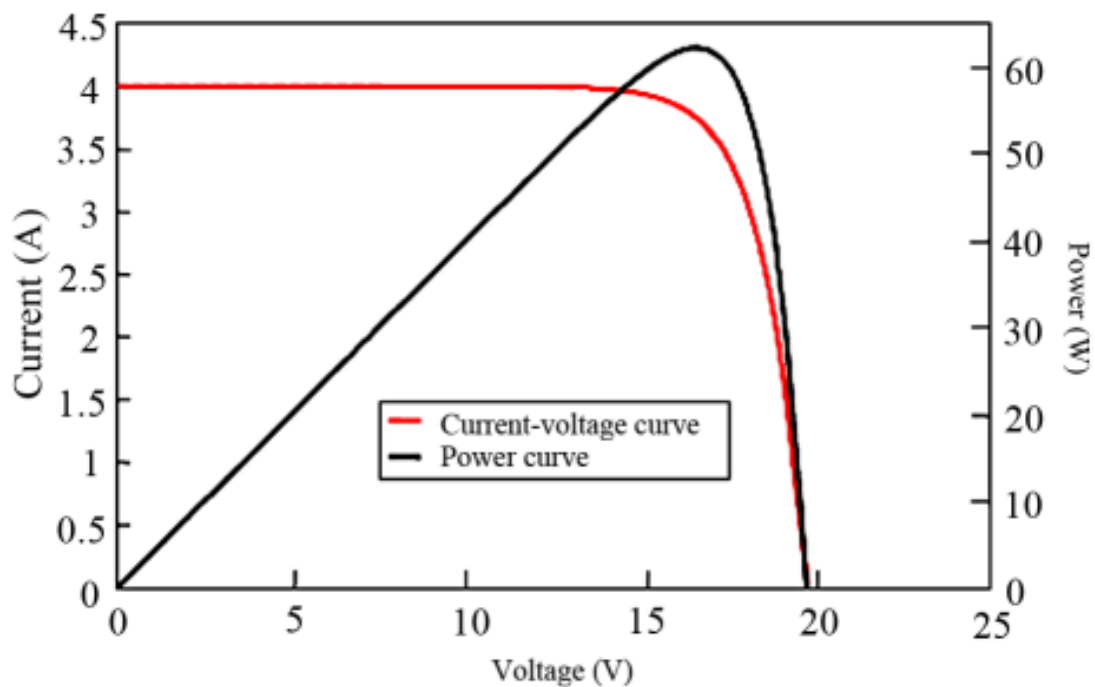


Fonte: Abdelhady, Abd-Elhady e Fouad (2017)

Com o avanço das tecnologias fotovoltaicas, novas células solares começaram a ser produzidas, algumas comerciais e outras ainda em fase de teste inicial, independentemente de sua situação, é sempre importante caracterizar esta célula solar. A caracterização de uma célula solar inclui o levantamento de seu comportamento em determinada condição de incidência solar.

Diversos parâmetros podem ser usados para caracterizar uma célula solar e seu desempenho. De modo geral, as principais informações são retiradas da curva de corrente-tensão ($I-V$), entre elas estão: a tensão máxima de saída, que é o parâmetro que explicita a tensão máxima produzida na potência máxima do dispositivo, a corrente de curto circuito, que destaca a corrente na célula quando a tensão nesta é nula e é representada no gráfico quando a linha cruza no eixo y de corrente, e a tensão de circuito aberto, que demonstra a tensão máxima disponível na célula, ocorrendo quando a corrente é igual a zero. Logo, pode ser graficamente identificada pelo ponto no qual o gráfico cruza o eixo x de tensão (Hamadani, *et al.*, 2015).

Figura 2.2 – Curva característica $I \times V$ de uma célula solar



Fonte: Amiry, Benhmida, Bendaoud, Hajjaj, Bounouar, Yadir e Sidki (2018)

A curva $I-V$ demonstra a geração elétrica da célula solar, a qual pode ser afetada por múltiplos fatores, destacando-se: a incidência solar, a orientação da célula em relação à fonte de luz, a temperatura de operação, entre outros fatores. Para facilitar comparações entre as curvas comerciais, é recomendado a padronização das condições de operação, seguindo o standard reporting conditions (SRC) ou standard test conditions (STC), que determina uma

intensidade de radiação solar padrão para 1000 W/m², massa de ar para 1.5, temperatura da célula para 25 °C e velocidade do vento para 1 m/s. O STC busca padronizar os testes da ação da célula solar para um dia de sol com céu limpo, com pouca presença de nuvens [5, 7].

Além das informações de tensão e corrente, outros parâmetros podem ser obtidos para descrever características da célula solar estudada naquele determinado instante, entre os quais, destacam-se: a resposta espectral, o fator de preenchimento, que também pode ser obtido a partir da curva de corrente-tensão e representa as perdas internas da célula, de modo que graficamente é observado no quanto a curva desvia do formato retangular, os coeficientes de temperatura que indicam quanto a temperatura influencia o desempenho daquele componente e a eficiência quântica (KUSUMA, *et al.*, 2018). Esses fatores são relevantes para os processos de desenvolvimento, produção e refinamento de uma nova célula solar. Ademais, para criar as chamadas células de referência, isto é, células solares que podem ser usadas como base de comparação para outras células solares a serem examinadas podendo servir para verificar os dados fornecidos pelos fabricantes. Esses parâmetros são obtidos de modo a focar na maior precisão possível de se obter (HAMADANI, *et al.*, 2015).

Para realizar a caracterização elétrica adequada de uma célula solar é necessário levar em conta não somente sua curva I-V e seu comportamento em geral, mas também ter conhecimento dos fatores que podem afetar o seu desempenho. Entre esses fatores, um dos principais é o efeito da temperatura, pois, células solares reagem de duas maneiras ao aumento de sua temperatura. Seu coeficiente de temperatura relativo à tensão de circuito aberto é negativo, com o aumento da temperatura, a banda proibida desses semicondutores diminui e, conseqüentemente, a tensão de circuito aberto também cai, abaixando a energia elétrica produzida consideravelmente, já que uma queda na tensão para uma mesma corrente de curto-circuito resultará em uma diminuição na potência máxima produzida pela célula. Já o coeficiente de temperatura em relação à corrente de curto-circuito é positivo, com a elevação da temperatura, a corrente aumenta, justamente pela diminuição da banda gap do semicondutor, que aumenta a percentagem de luz absorvida pelo equipamento. De modo geral, em células solares de silício, a produção de tensão tende a ser maior em temperaturas mais baixas, sendo necessário montagens experimentais e comerciais que incluam mecanismos responsáveis por manter a temperatura baixa para não afetar a ação das células (DINCER, *et al.*, 2010).

Outro parâmetro importante de uma célula solar é a eficiência de conversão de energia. Esse parâmetro representa a percentagem de potência convertida vinda da fonte de luz para a energia elétrica e coletada, quando essa célula é ligada a um circuito externo. Ele é calculado a partir da potência máxima dividida pela irradiação da luz e pela área de superfície da célula. Atualmente, a maior parte das células solares demonstram baixa

eficiência de conversão, sendo necessário desenvolver mecanismos que melhorem esse fator ou diminuam seu impacto no desempenho final do dispositivo. Há diferentes soluções para a questão da baixa conversão de energia. Entre elas, a redução do reflexo da luz incidente, a partir de uma camada antirreflexo, e o confinamento da luz em superfícies texturizadas. De modo geral, foi concluído que diminuir o reflexo da luz que incide sobre a célula solar aumenta sua taxa de conversão (DINCER, *et al.*, 2010).

Além disso, utilizando-se a técnica de rastrear o ponto de máxima potência é possível mudar a carga total equivalente de um conjunto de células solares, ajustando o ponto de trabalho dele, isto é, forçando a célula a trabalhar na potência máxima quando a temperatura e a intensidade de radiação estão mudando, o que pode influenciar diretamente na melhoria da eficiência do conjunto de módulos solares.

3. METODOLOGIA

3.1. Desenvolvimento de um sistema para a caracterização elétrica de células solares

A ideia inicial propõe o desenvolvimento de um aparato composto por duas partes, uma base e um suporte. A base contaria com um painel frontal com alguns orifícios, que seriam utilizados para realizar conexões com aparelhos de medição elétrica. Além disso, contaria também com rodas para facilitar a mobilidade do aparato e com buracos que permitam regular o suporte de acordo com a necessidade de cada experimento. O aparato final foi projetado para ser feito com base de acrílico (ou MDF), com um suporte metálico ajustável, suporte de encaixe da célula e seus ajustes de inclinação (Figura 3.1.1). No entanto, a demora na aquisição dos materiais e as dificuldades encontradas no desenvolvimento do aparato não permitiram finalizá-lo durante a iniciação científica. Com isso, as medidas foram realizadas em um aparato convencional.

Figura 3.1.1 - Projeto da estrutura mecânica do sistema de caracterização de mini painéis solares: (a) base e suporte do painel, (b) sistema de regulação horizontal para fixar painéis de diferentes tamanhos, (c) sistema de regulação horizontal para fixar o painel em diferentes inclinações, (d) Um painel quadrado no suporte e (e) um painel circular no suporte.

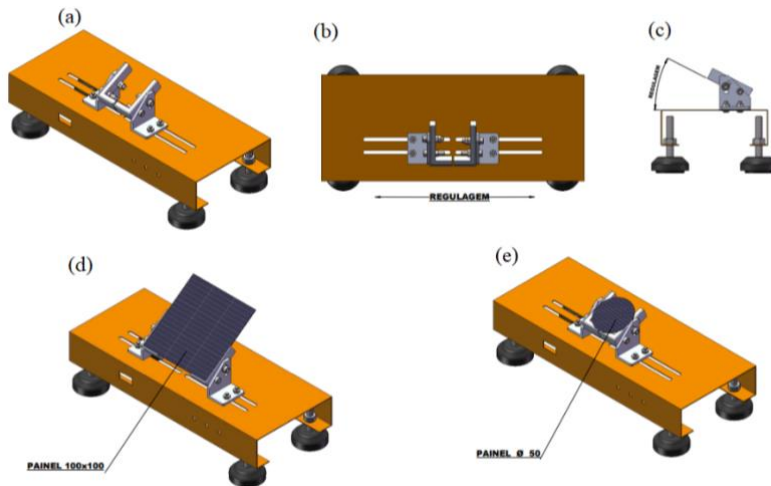


Figura 3.1.2 - Fotografias dos suportes desenvolvidos: (a) utilizando MDF, (b) utilizando acrílico e (c) medidas de teste do multímetro realizadas.

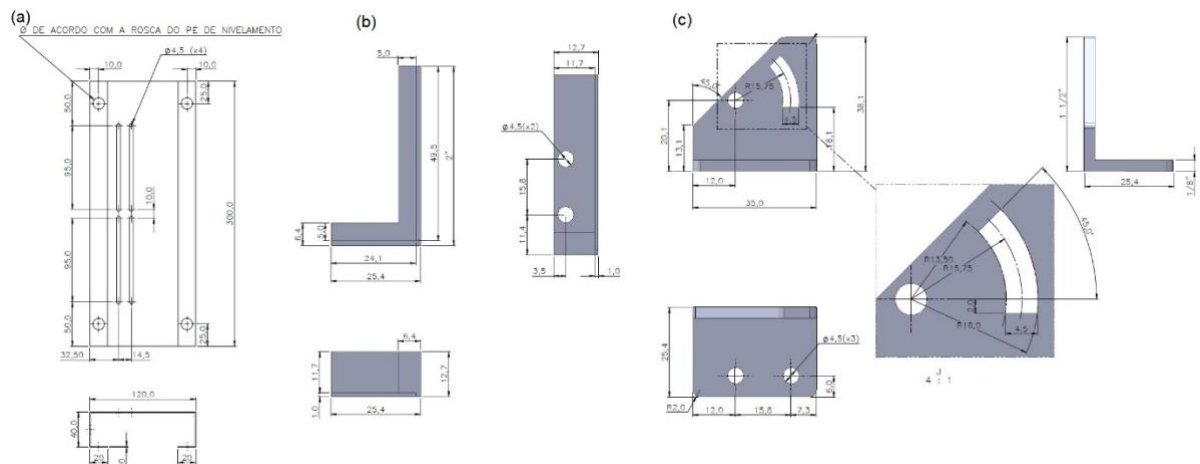
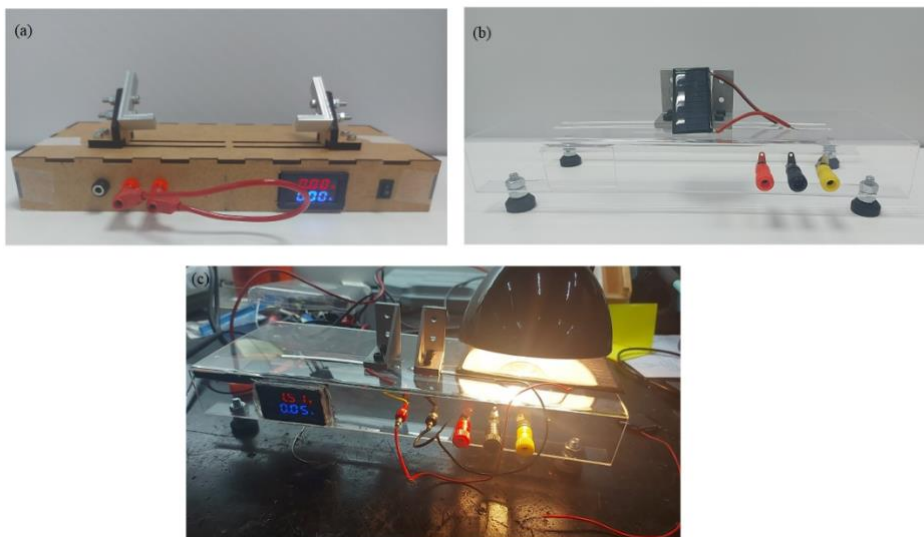


Figura 3.1.3 - Dimensões do sistema de caracterização de mini painéis solares: (a) base de acrílico (ou MDF), (b) cantoneira de alumínio para ajuste de inclinação, (c) cantoneira de alumínio para fixar o painel

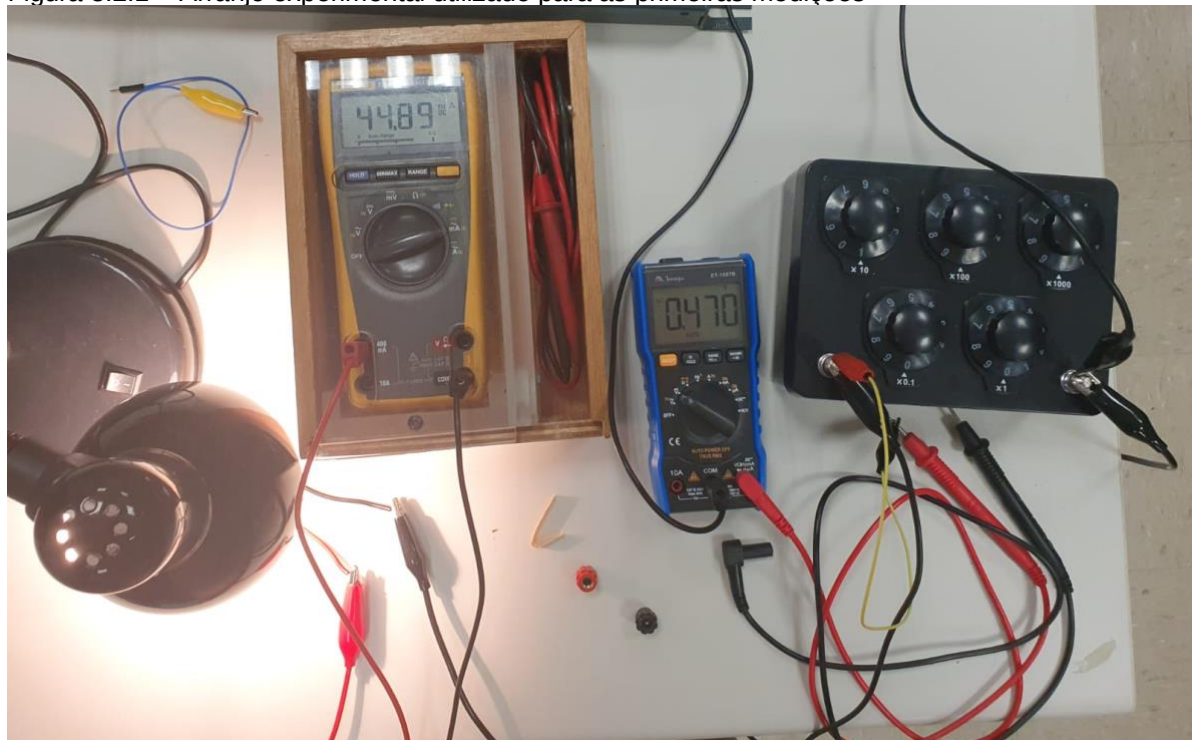


3.2. Caracterização elétrica de células solares utilizando um aparato convencional

Para realizar as medidas, foram selecionadas cinco células solares de silício: quatro de cristalino e uma de amorfo. As quatro de silício cristalino com diferentes dimensões de 30 mm X 25 mm, 70 mm X 70 mm, 45 mm X 55 mm e 85 mm X 115 mm. Estes componentes foram utilizados em ambos os testes com luz artificial e luz solar natural e são células comerciais encontradas a venda em facilmente diferentes localizações, permitindo a comparação dos resultados com os dados fornecidos e conhecidos pelo mercado.

Para caracterizar eletricamente a célula solar, como citado anteriormente, é importante começar com o levantamento da curva I-V do componente. Para isto, é necessário obter diferentes pontos de corrente e tensão. Assim, foi utilizada a caixa de resistência variável, seus valores foram elevados progressivamente, de modo que variaram de forma não uniforme com valores entre 1 Ω e 9900 Ω , como mostra a Figura 3.2.1. A utilização desse componente deve-se ao fato de que é muito mais fácil de determinar o valor da resistência em uso do que quando utilizando um potenciômetro, por exemplo, permitindo uma análise mais precisa e concreta, resultando em uma comparação pertinente.

Figura 3.2.1 – Arranjo experimental utilizado para as primeiras medições

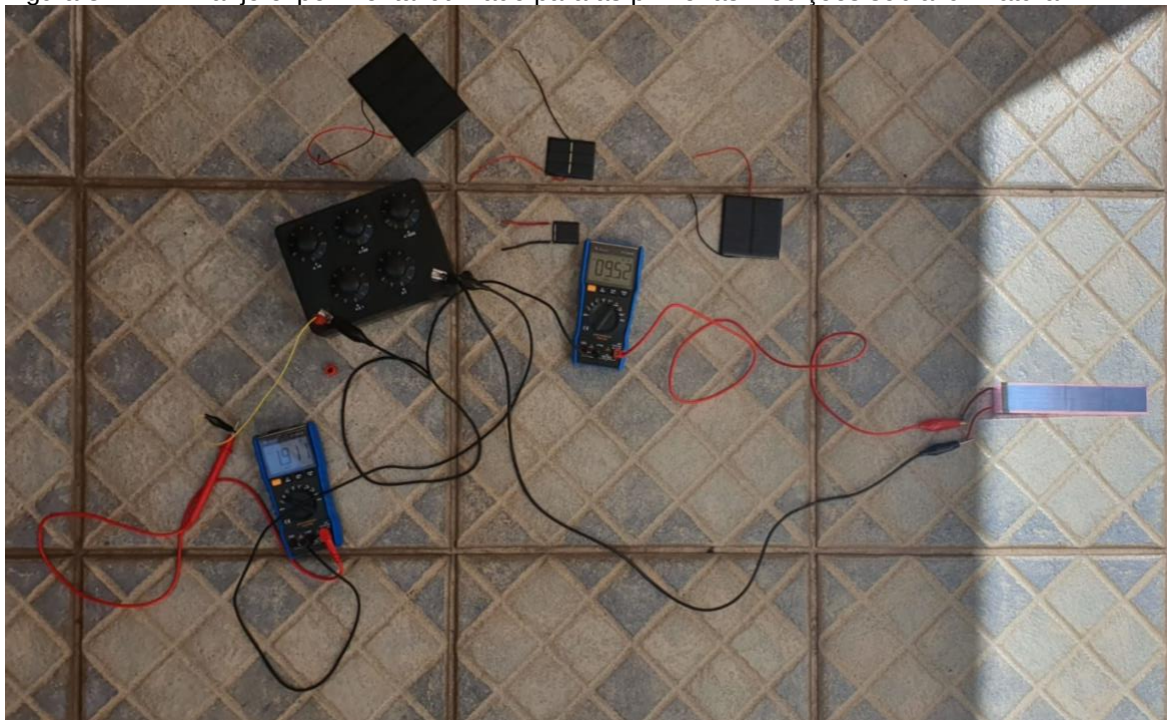


A Figura 3.2.1 ilustra o arranjo experimental básico montado para realizar as medições das células solares sob luz artificial. Como é possível observar, foram utilizados dois multímetros para medir simultaneamente a corrente e a tensão fornecida pela célula quando utilizada uma carga. Como carga, foi utilizada a caixa preta com resistência controlável seguindo os procedimentos de variar os valores para obter a curva I-V desejada.

Para encontrar os valores de corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto, as medições foram realizadas uma por vez, com apenas um multímetro e sem carga. O mesmo arranjo foi utilizado para testar as cinco diferentes células comerciais com diferentes tamanhos e tipos de materiais. Como luz artificial foi utilizada uma lâmpada halógena simples (potência de 70W) instalada em uma luminária que foi posicionada a cerca de 7,5 cm de distância da célula, permitindo a obtenção de resultados sem sobreaquecer a célula.

Após a realização dos primeiros testes utilizando essa luminária artificial, passou-se para o próximo estágio da caracterização que foi a comparação com dados obtidos sob a luz solar natural. Para isso, foi realizado um outro experimento com outro arranjo experimental em um ambiente diferente.

Figura 3.2.2 – Arranjo experimental utilizado para as primeiras medições sob a luz natural



A Figura 3.2.2 mostra o arranjo experimental utilizado para realizar os testes na luz solar natural, assim, pode-se observar que, novamente, foram utilizados dois multímetros, que medem simultaneamente a corrente e a tensão no circuito com carga. A carga utilizada foi a mesma caixa resistiva utilizada na montagem com a luz halógena, sendo que sua resistência foi alterada progressivamente até obter pontos suficientes para conseguir traçar uma curva I-V daquela célula. Os ensaios a curto circuito e circuito aberto também foram realizados sem carga e com medições consecutivas de ambos valores extremos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a conclusão de cada experimento os dados obtidos foram adicionados a uma planilha para análise e comparação de resultados. A partir dos dados obtidos, realizou-se cálculos para determinar a potência, o FF e a eficiência de cada célula. A seguir estão os valores obtidos após o experimento com a luz halógena artificial para cada célula solar citada anteriormente.

Tabela 4.1 – Dados obtidos dos ensaios com luz artificial

Placa comercial de silício 30X25				Placa comercial de silício 70X70				Placa comercial de silício 45X55			
Voc	1,187	V		Voc	6,274	V		Voc	1,75	V	
Isc	45,75	mA		Isc	51,65	mA		Isc	101,6	mA	
Resistência	V (V)	I (mA)	P (mW)	Resistência	V (V)	I (mA)	P (mW)	Resistência	V (V)	I (mA)	P (mW)
1	0,073	45,14	3,30	1	0,078	51,68	4,03	1	0,159	101,5	16,14
10	0,474	45,18	21,42	10	0,526	50,82	26,73	10	1,065	99,5	105,97
30	0,917	30,05	27,56	30	1,539	50,32	77,44	30	1,518	49,8	75,60
70	1,039	14,84	15,42	70	3,45	49,07	169,29	70	1,624	23,09	37,50
90	1,059	11,72	12,41	90	4,332	47,9	207,50	90	1,641	18,16	29,80
150	1,074	7,16	7,69	150	5,418	36,08	195,48	150	1,661	11,06	18,37
200	1,085	5,42	5,88	200	5,601	27,95	156,55	200	1,664	8,31	13,83
400	1,092	2,73	2,98	400	5,825	14,56	84,81	400	1,675	4,2	7,04
600	1,094	1,83	2,00	600	5,881	9,81	57,69	600	1,675	2,8	4,69
800	1,092	1,37	1,50	800	5,901	7,38	43,55	800	1,673	2,11	3,53
1000	1,092	1,09	1,19	1000	5,913	5,9	34,89	1000	1,669	1,67	2,79
3000	1,093	0,37	0,40	3000	5,947	1,99	11,83	3000	1,67	0,57	0,95
5000	1,092	0,22	0,24	5000	5,931	1,2	7,12	5000	1,666	0,34	0,57
8000	1,091	0,15	0,16	8000	5,926	0,75	4,44	8000	1,657	0,22	0,36
9900	1,084	0,12	0,13	9900	5,913	0,6	3,55	9900	1,653	0,17	0,28
Área (mm ²)	FF	η (eficiência)		Área (mm ²)	FF	η (eficiência)		Área (mm ²)	FF	η (eficiência)	
0,00075	0,507425	1,87%		0,0049	0,640338	2,16%		0,002475	0,595993	2,18%	

Tabela 4.2 – Dados obtidos dos ensaios com luz artificial

Placa comercial de filme fino 180X30				Placa comercial de silício 85X115			
Voc	1,647	V		Voc	13,47	V	
Isc	34,36	mA		Isc	38,24	mA	
Resistência	V (V)	I (mA)	P (mW)	Resistência	V (V)	I (mA)	P (mW)
1	0,058	35,16	2,039	1	0,06	38,57	2,31
10	0,336	31,91	10,722	10	0,402	38,4	15,44
30	0,801	26,36	21,114	30	1,173	38,42	45,07
70	1,297	18,49	23,982	70	2,682	38,22	102,51
90	1,395	15,49	21,609	90	3,442	38,4	132,17
150	1,491	9,95	14,835	150	5,703	38,08	217,17
200	1,518	7,59	11,522	200	7,45	37,3	277,89
400	1,552	3,89	6,037	400	11,59	29,04	336,57
600	1,561	2,61	4,074	600	12,14	20,27	246,08
800	1,562	1,97	3,077	800	12,33	15,46	190,62
1000	1,563	1,58	2,470	1000	12,43	12,42	154,38
3000	1,568	0,53	0,831	3000	12,64	4,23	53,47
5000	1,565	0,32	0,501	5000	12,61	2,55	32,16
8000	1,565	0,2	0,313	8000	12,63	1,59	20,08
9900	1,564	0,16	0,250	9900	12,63	1,29	16,29
Área (mm ²)	FF	η (eficiência)		Área (mm ²)	FF	η (eficiência)	
0,0054	0,423770	0,23%		0,009775	0,653423	1,75%	

A partir destes dados foi gerado um gráfico por célula que reúne as curvas I-V e a curva que relaciona potência com tensão, permitindo analisar não só o comportamento elétrico básico da célula – corrente e tensão de acordo com a variação das cargas resistivas utilizadas – mas também analisar qual o ponto de maior eficiência de entrega de potência, isto é, o ponto no qual a relação entre corrente e tensão proporciona a maior quantidade de potência entregue pela célula. As figuras a seguir ilustram os gráficos obtidos de acordo com cada célula.

Figura 4.1 – Gráficos das células solares sob ação da luz artificial

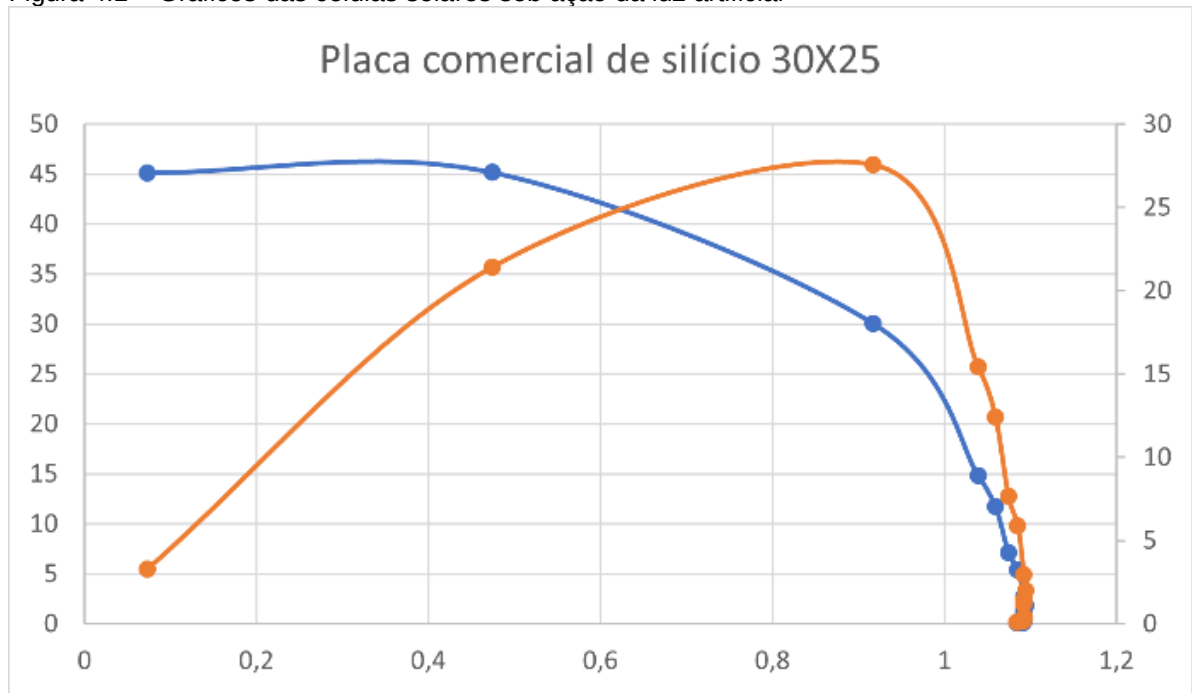


Figura 4.2 – Gráficos das células solares sob ação da luz artificial

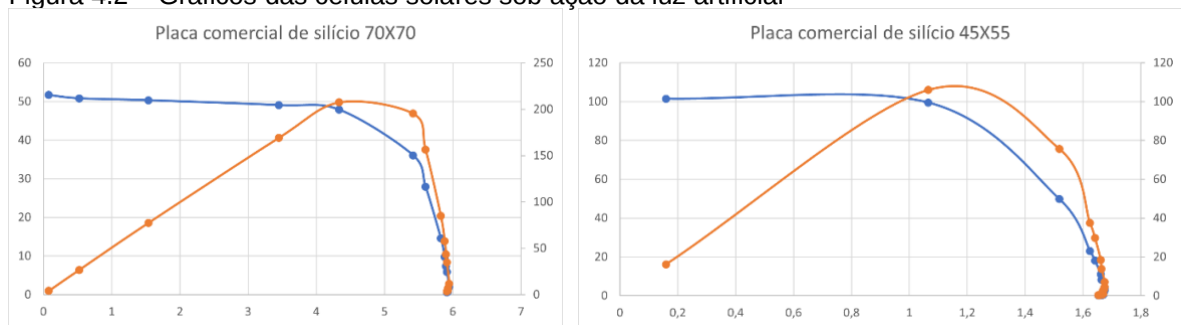
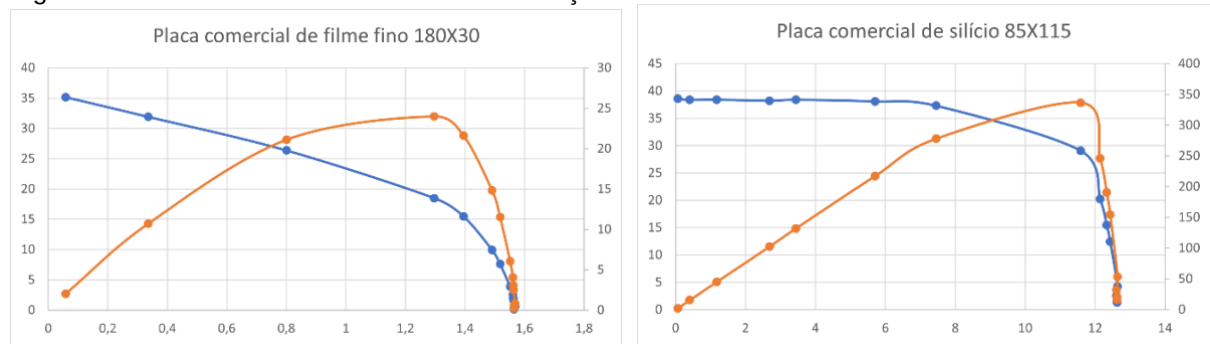


Figura 4.3 – Gráficos das células solares sob ação da luz artificial



Os mesmos dados e cálculos foram repetidos para os experimentos usando a luz solar natural, e, como os dados anteriores, tiveram seus resultados compilados em uma tabela para facilitar a sua análise e comparação. A seguir estão as tabelas que compilam todos os dados obtidos.

Tabela 4.3 – Dados obtidos com luz solar natural

Placa comercial de silício 30X25		
Voc	1,031	V
Isc	65,1	mA

Resistência	V (V)	I (mA)	P (mW)
1	0,104	62,5	6,50
10	0,63	58,27	36,71
30	0,991	32,25	31,96
70	1,082	15,3	16,55
90	1,096	12,08	13,24
150	1,114	7,4	8,24
200	1,122	5,58	6,26
400	1,135	2,83	3,21
600	1,139	1,89	2,15
800	1,132	1,41	1,60
1000	1,135	1,13	1,28
3000	1,137	0,37	0,42
5000	1,134	0,22	0,25
8000	1,131	0,13	0,15
9900	1,126	0,11	0,12

Área (mm ²)	FF	η (eficiência)
0,00075	0,476172	3,12%

Placa comercial de silício 70X70		
Voc	6,25	V
Isc	91,4	mA

Resistência	V (V)	I (mA)	P (mW)
1	0,168	90,5	15,20
10	0,982	90,4	88,77
30	2,785	90,3	251,49
70	5,271	74,6	393,22
90	5,583	61,6	343,91
150	5,937	39,48	234,39
200	6,02	30,05	180,90
400	6,16	15,41	94,93
600	6,2	10,35	64,17
800	6,22	7,78	48,39
1000	6,22	6,21	38,63
3000	6,25	2,08	13,00
5000	6,25	1,25	7,81
8000	6,25	0,78	4,88
9900	6,25	0,63	3,94

Área (mm ²)	FF	η (eficiência)
0,0049	0,602036	5,13%

Tabela 4.4 – Dados obtidos com luz solar natural

Placa comercial de silício 45X55				Placa comercial de filme fino 180X30			
Voc	1,725	V		Voc	1,9	V	
Isc	149,1	mA		Isc	256,8	mA	
Resistência	V (V)	I (mA)	P (mW)	Resistência	V (V)	I (mA)	P (mW)
1	0,262	148,2	38,83	1	0,401	240,9	96,601
10	1,301	120	156,12	10	1,481	137,1	203,045
30	1,579	51,29	80,99	30	1,758	57,16	100,487
70	1,663	23,54	39,15	70	1,835	25,96	47,637
90	1,678	18,51	31,06	90	1,851	20,41	37,779
150	1,701	11,31	19,24	150	1,878	12,48	23,437
200	1,706	8,5	14,50	200	1,887	9,4	17,738
400	1,717	4,28	7,35	400	1,899	4,74	9,001
600	1,72	2,86	4,92	600	1,904	3,16	6,017
800	1,721	2,14	3,68	800	1,891	2,36	4,463
1000	1,722	1,71	2,94	1000	1,887	1,87	3,529
3000	1,727	0,57	0,98	3000	1,89	0,62	1,172
5000	1,728	0,34	0,59	5000	1,891	0,37	0,700
8000	1,728	0,21	0,36	8000	1,89	0,23	0,435
9900	1,726	0,17	0,29	9900	1,89	0,18	0,340
Área (mm ²)	FF	η (eficiência)		Área (mm ²)	FF	η (eficiência)	
0,002475	0,607004	4,61%		0,0054	0,097632	0,65%	

Tabela 4.5 – Dados obtidos com luz solar natural

Placa comercial de silício 85X115			
Voc	13,64	V	
Isc	76,8	mA	
Resistência	V (V)	I (mA)	P (mW)
1	0,141	77	10,86
10	0,837	77	64,45
30	2,368	76,8	181,86
70	5,37	76	408,12
90	6,84	75,6	517,10
150	10,58	70,5	745,89
200	11,82	59,1	698,56
400	12,96	32,43	420,29
600	13,22	22,05	291,50
800	13,34	16,69	222,64
1000	13,4	13,36	179,02
3000	13,58	4,52	61,38
5000	13,6	2,72	36,99
8000	13,62	1,7	23,15
9900	13,62	1,37	18,66
Área (mm ²)	FF	η (eficiência)	
0,009775	0,401214	3,15%	

A partir dos dados concentrados nessas tabelas, decidiu-se caracterizar as células gerando os dois gráficos, um que mostra a curva I-V, compilando dados de corrente e tensão,

e outro com a relação da potência com a tensão. As figuras a seguir representam esses gráficos para as diferentes células analisadas.

Figura 4.4 – Gráficos luz solar natural

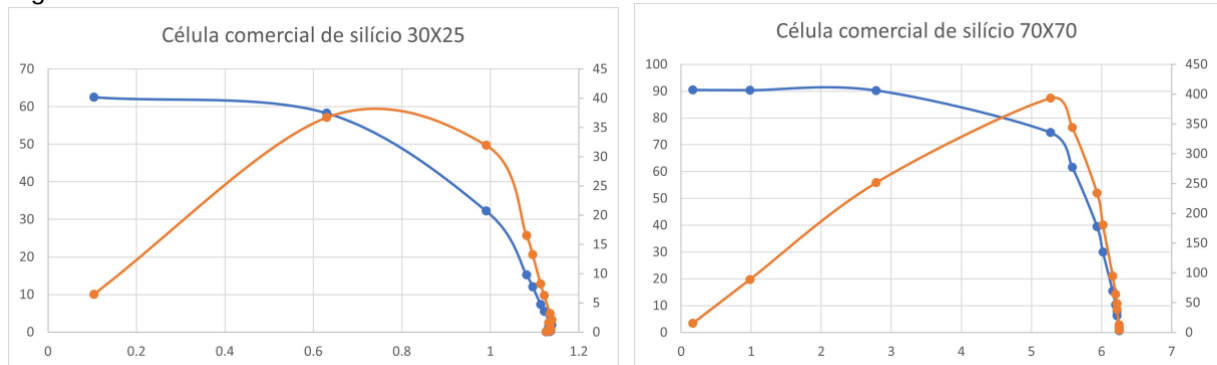


Figura 4.5 – Gráficos luz solar natural

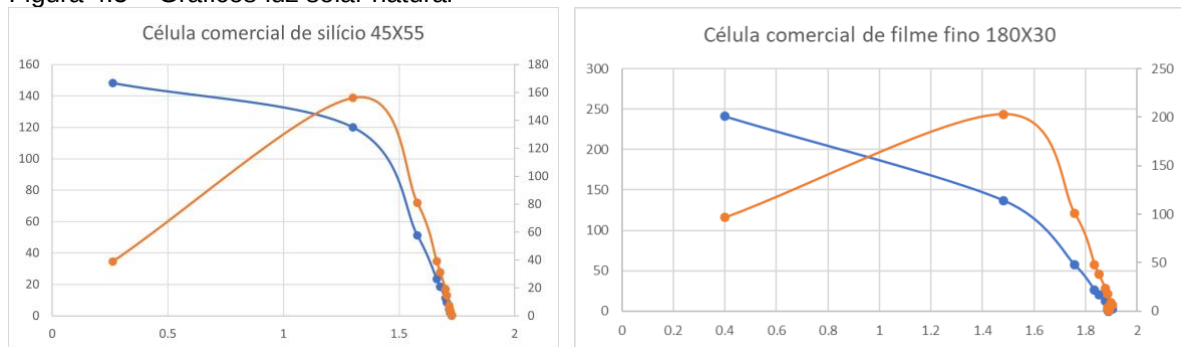
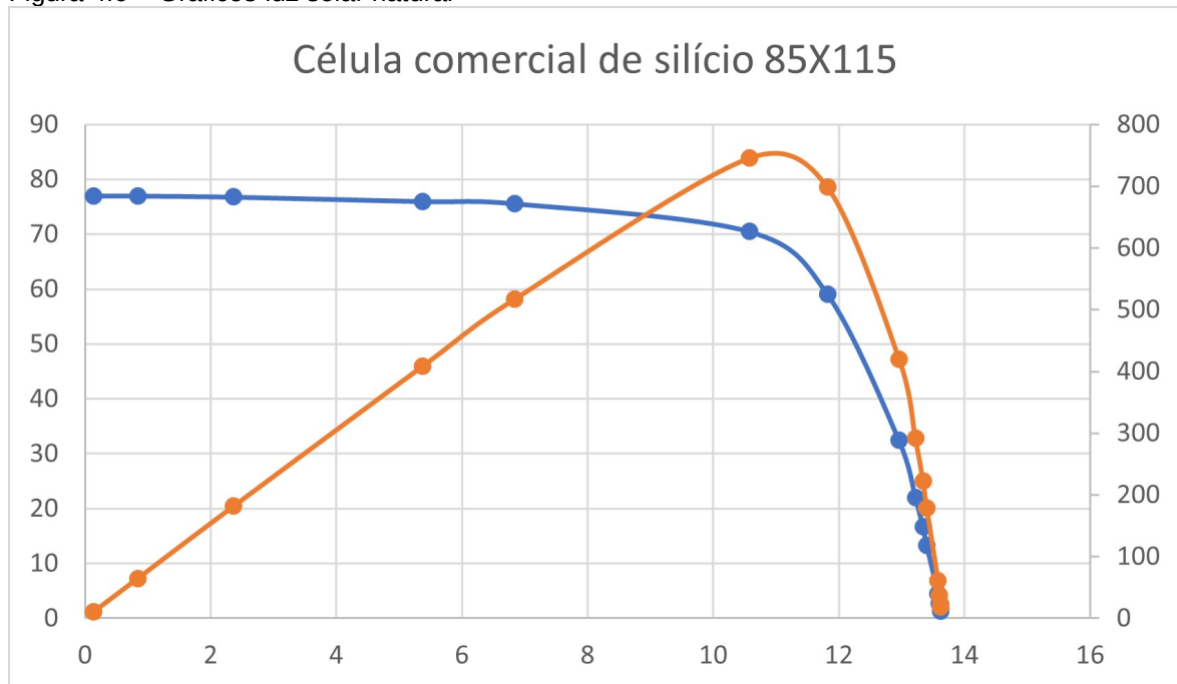


Figura 4.6 – Gráficos luz solar natural



A apresentação dos diferentes gráficos relacionando a potência com a tensão demonstram o funcionamento das células em seu melhor desempenho, isto é, ao desenvolver o gráfico de potência pode-se analisar qual o ponto de máxima potência, no qual a célula

fornece a melhor conversão entre a geração de corrente e de tensão. Geralmente, esse gráfico pode ser alterado por diversos fatores, sendo altamente influenciado pela irradiação solar e pela temperatura da célula. Em suma, os gráficos permitiram analisar qual o ponto de melhor funcionamento daquela célula específica.

Ao analisar os dados e compará-los entre si, é possível observar que usando a luz solar, a taxa de eficiência da célula é consideravelmente maior do que quando utilizando as luminárias com lâmpadas halógenas. Um dos fatores que com certeza influencia esta grande diferença é a temperatura da célula, isto pois, quando se utiliza a lâmpada artificial é perceptível pelo tato o quão quente a célula fica após pouco tempo de experimento, enquanto as células sob a luz solar natural demoram muito mais tempo para alcançar essa mesma temperatura, levando a maiores valores nos experimentos utilizando a segunda fonte de fótons.

Apesar destas diferenças, ao comparar os gráficos é perceptível as semelhanças entre os dois experimentos, isto é, mesmo obtendo taxas de conversões maiores quando testando com luz solar, as curvas I-V e de potência apresentam grande similaridade. Logo isto demonstra que o método desenvolvido pode ser utilizado para estimar o comportamento daquele equipamento mesmo quando testado em luz artificial e sofrendo com as perdas por temperatura e, conseqüentemente, sobreaquecimento da célula solar.

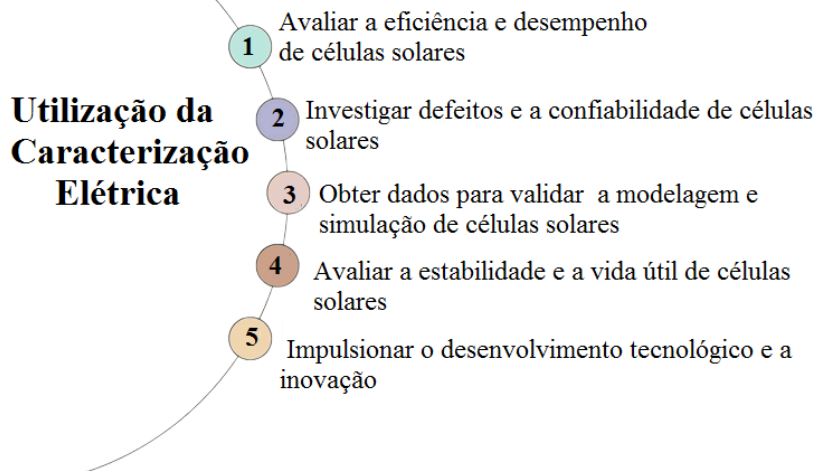
Outra comparação que pode ser feita diz respeito ao tipo de material utilizado para fabricar a célula. Devido a problemas de logística foram utilizados apenas células comerciais, isto é, células sobre as quais já existe o conhecimento sobre os resultados esperados. Analisando todas as tabelas que compilam os dados dos dois experimentos, pode-se observar que a placa de filme finos demonstra taxa de eficiência muito menor do que quando comparada com as células de silício cristalino. Esse fenômeno pode ser observado em ambos os experimentos, tanto para o teste com a luz solar quanto com a lâmpada halógena.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A leitura dos artigos permitiu compreender a relevância da caracterização elétrica para avaliar diferentes parâmetros de desempenho de células solares. A Figura 5.1 mostra os principais. Como pode ser observado, a caracterização elétrica não é apenas uma etapa fundamental para entender o funcionamento e a expectativa de entrega de potência de uma célula solar. Ela pode ser utilizada também para identificar defeitos ou problemas nas células solares, como regiões com baixa condutividade ou isolamento inadequado. Além disso, através da caracterização elétrica contínua é possível avaliar a estabilidade e a vida útil de dispositivos fotovoltaicos em diferentes condições ambientais, contribuindo para o

desenvolvimento de tecnologias mais duráveis e inovadoras que podem levar a avanços significativos tanto na eficiência quanto na redução do custo da energia solar. As medições elétricas também fornecem dados fundamentais para validar e aprimorar os modelos teóricos e simulações computacionais de células solares que ajudam a compreender os processos físicos e elétricos, que ocorrem dentro das células, e a prever seu comportamento em diferentes condições.

Figura 5.1 – Importância da caracterização elétrica de células solares



Neste estudo utilizou-se um dos modos mais fáceis de entender como uma célula funciona que é analisar sua entrega de corrente e tensão com cargas diferentes, levantando as chamadas curvas I-V da célula. A partir desta curva e de alguns conhecimentos como irradiação é possível calcular outros dados e levantar outra curva muito relevante para designar a aplicação da célula, a curva que relaciona a tensão com a potência. Adicionando as duas curvas no mesmo gráfico permite uma melhor compreensão do funcionamento otimizado daquela célula.

O objetivo de desenvolver um aparato experimental para facilitar o levantamento de dados para entender o funcionamento elétrico da célula foi adiado, sendo que o foco ficou no entendimento da caracterização elétrica destes componentes comerciais e os fatores que podem afetar o seu desempenho elétrico.

De modo geral, comprovou-se os efeitos negativos da temperatura no desempenho de conversão elétrica nas células solares, o aumento desta claramente aumenta as perdas e fora atestada pelos dados obtidos em ambos experimentos. Outro fator envolve justamente a irradiação solar que incide sobre a célula solar, uma vez que comparando os resultados de ambos os experimentos percebe-se que apesar da luz artificial da lâmpada halógena conseguir estimular a geração de energia, não se compara ao resultado que foi observado

usando a luz do sol. Por fim, foi possível observar as diferentes produções com os diferentes tamanhos de células com um mesmo material, o resultado, de modo geral, mostra que a maior área de superfície leva a uma maior produção de tensão, o que afeta diretamente a potência entregue. Logo, quanto maior a placa, maior a potência que ela entregará. No entanto, é necessário comparar também as suas eficiências para só então afirmar os benefícios e vantagens quando células solares de mesmo material, mas com dimensões diferentes são comparadas.

6. REFERÊNCIAS

ABDELHADY, S.; ABD-ELHADY, M. S.; FOUAD, M. M. **An Understanding of the Operation of Silicon Photovoltaic Panels**. Energy Procedia, v. 113, p. 466–475, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.04.041>.

AMIRY, H.; BENHMIDA, M.; BENDAOU, R.; HAJJAJ, C.; BOUNOUAR, S.; YADIR, S.; SIDKI, M. **Design and implementation of a photovoltaic I-V curve tracer: Solar modules characterization under real operating conditions**. Energy Conversion and Management, v. 169, p. 206–216, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.046>.

DINCER, F.; MERAL, M. **Critical Factors that Affecting Efficiency of Solar Cells**. Smart Grid and Renewable Energy, v. 1, n. 1, p. 47-50, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/sgre.2010.11007>.

HAMADANI, B. H.; CAMPANELLI, M. B. **Photovoltaic Characterization Under Artificial Low Irradiance Conditions Using Reference Solar Cells**. IEEE Journal of Photovoltaics, v. 10, n. 4, p. 1119-1125, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.2996241>.

HAMADANI, B.H.; DOUGHERTY, B. **Solar Cell Characterization**. Springer Series in Materials Science, v. 218, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-20331-7_8.

KUMAVAT, P. P.; SONAR, P.; DALAL, D. S. **An overview on basics of organic and dye sensitized solar cells, their mechanism and recent improvements**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 78, p. 1262–1287, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.011>.

KUSUMA, J.; BALAKRISHNA, R. G. **A review on electrical characterization techniques performed to study the device performance of quantum dot sensitized solar cells**. Solar Energy, v. 159, p. 682–696, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.037>.

KWAPIL, W.; WASMER, S.; FELL, A.; GREULICH, J. M.; SCHUBERT, M. C. **Suns-ILIT: Contact-less determination of local solar cell current-voltage characteristics**. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 191, p. 71–77, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.10.028>.

RAMOS, C. A. F.; ALCASO, A. N.; CARDOSO, A. J. M. **Photovoltaic-thermal (PVT) technology: Review and case study**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 354, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/354/1/012048>.

SCHMELA, M.; ROSSI, R.; LITS, C.; CHUNDURI, S. K.; SHAH, A.; MUTHYAL, R.; MOGHE, P.; KALAM, S.; JAMKHEDKAR, A.; GOEL, S.; SARATCHANDRA, P. **Advancements in solar technology, markets, and investments**. 2022 ISA World Solar Reports. Solar Compass, v. 6, p. 2772-9400, 2023 Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2023.100045>.

Contatos: biancahabiro@gmail.com, mariana.fraga@mackenzie.br