

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CÉSAR RIBEIRO DE ALMEIDA

**PROPOSTA DE AJUSTE DINÂMICO PARA CARACTERIZAÇÃO DE
CURVAS TÍPICAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

VIÇOSA
2022

CÉSAR RIBEIRO DE ALMEIDA

**PROPOSTA DE AJUSTE DINÂMICO PARA CARACTERIZAÇÃO DE
CURVAS TÍPICAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 – Projeto de Engenharia II – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Heverton Augusto Pereira
Coorientador: Prof. Dr. Victor Pellanda Dardengo

VIÇOSA
2022

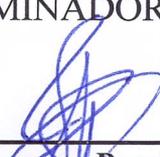
CÉSAR RIBEIRO DE ALMEIDA

**PROPOSTA DE AJUSTE DINÂMICO PARA CARACTERIZAÇÃO DE
CURVAS TÍPICAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

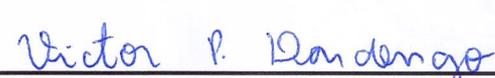
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 492 – Monografia e Seminário – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 12 de dezembro de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA



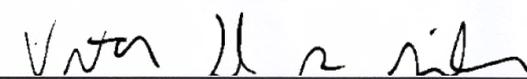
Prof. Dr. Heverton Augusto Pereira - Orientador
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. Victor Pellanda Dardengo - Coorientador
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. Denilson Eduardo Rodrigues- Membro
Universidade Federal de Minas Gerais



Eng. Vitor Dimas Siqueira Silva - Membro
Universidade Federal do Espírito Santo

Dedico esse trabalho e todo meu esforço à minha mãe, que nunca mediu esforços para me dar o que estava ao seu alcance e o que também não estava.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, a Deus, pela minha vida e por permitir que eu tivesse saúde e determinação para ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo desses anos de graduação.

Aos meus professores do ensino básico que sempre foram grandes profissionais e fomentadores da minha curiosidade.

Aos meus pais, que são meus grandes exemplos de profissionalismo, dedicação e esforço. Agradeço por todo apoio, amor e exemplo que sempre me proporcionaram ao longo de toda minha vida.

Às minhas irmãs, Marianne e Sarah, minhas maiores amigas, que nunca deixaram de torcer por mim e sempre foram minhas maiores incentivadoras para tudo.

Aos meus primos, Natan, Willian e Isaac, pela parceria, apoio e conversas de sempre, durante todos esses anos.

Por fim, agradeço ao grupo de pesquisa GESEP, principalmente aos professores Heverton Pereira, Erick Brito e Victor Dardengo, pela orientação, paciência, profissionalismo, referência e competência, tornando essa experiência proveitosa e gratificante.

Resumo

Um módulo fotovoltaico tem a influência de diversos fatores na sua performance, tais como sombreamento total ou parcial, sujidade e até mesmo defeitos elétricos. Com o objetivo de analisar esses impactos na produtividade do módulo fotovoltaico, são utilizados dispositivos caracterizadores de curvas de módulos, que são equipamentos que apontam quais são as possíveis imprecisões. Esses dispositivos têm como finalidade traçar curvas características de um módulo fotovoltaico, avaliando seu desempenho a partir de análises. Este trabalho altera a taxa de amostragem utilizada anteriormente entre região linear e não linear, para uma única taxa em toda a curva, utilizando uma carga capacitiva. Além disso, é feita uma metodologia que encontra o tempo de aquisição mais adequada de acordo com as condições climáticas encontradas. Os resultados mostram que para situações de alta irradiância solar, baixa e irradiância parcial, a curva que era descrita em até 16,5% do tempo total, passa a ser representada em 93,25% do novo tempo em alguns casos. Com base nos resultados notou-se a necessidade da utilização de sensores de corrente mais precisos, além de um microcontrolador com maior capacidade de processamento.

Palavras-chaves: Módulos Fotovoltaicos, Caracterizador de Curva, Tempo de Aquisição.

Abstract

A photovoltaic module has the influence of several factors on its performance such as total or partial shading, and dirt. In order to analyze these impacts on the productivity of the photovoltaic module under these conditions, devices that characterize module curves are used, which are equipment that point out what are the possible inaccuracies. These devices are intended to trace characteristic curves of a photovoltaic module, evaluating its performance from analysis. This work changes the previously used sampling rate between linear and non-linear region, to a single rate throughout the curve, using a capacitive load. In addition, a methodology is made that finds the most appropriate acquisition time according to the climatic conditions encountered. The results show that for situations of high solar irradiance, low and partial irradiance, the curve that was described in up to 16.5% of the total time, is now represented in 93.25% of the new time in some cases. Based on the results, it was noted the need to use more accurate current sensors, in addition to a microcontroller with greater processing capacity

Key-words: Photovoltaic Modules, Curve Characterizer, Acquisition Time.

Sumário

1. Introdução	13
1.1 Cenário nacional e mundial na geração de energia solar.....	14
1.2 Energia Solar	16
1.3 Organização do Trabalho.....	17
1.4 Objetivos.....	17
1.4.1 Objetivos Gerais	17
1.4.2 Objetivos Específicos	18
2. Revisão Bibliográfica	19
2.1 Irradiância Solar	19
2.2 Circuito Equivalente de um Módulo Fotovoltaico	24
2.3 Caracterizador de Curvas (Carga Capacitiva)	29
3. Metodologia	33
3.1 Funcionamento do Caracterizador e Regime Transitório da Carga Capacitiva	33
3.2 Limitações Encontradas no Dispositivo Caracterizador Atualmente	36
3.3 Estratégias para Melhorar a Resolução de Dados no Caracterizador	46
4. Resultados e Discussões	50
4.1 Curvas Características Obtidas com Baixa Irradiância Solar	50
4.2 Curvas em Condições de Alta Irradiância Solar.....	54
4.3 Curvas para Sombreamento Parcial do Painel Fotovoltaico	60
5. Conclusões e Propostas de Continuidade	65
6. Referências Bibliográficas.....	66
Referências	66

Lista de Figuras

Figura 1 - Matriz Elétrica Mundial em 2019. Fonte: (IEA, 2021).	14
Figura 2 - Matriz Elétrica Brasileira. Fonte: (IEA, 2021).	15
Figura 3 - Mapa mundial com índices de irradiância. Fonte: (SolarGIS, 2022).	20
Figura 4 - Desenho simplificado do efeito fotoelétrico. Fonte: (ENEM, 2020).....	20
Figura 5 - Representação simplificada de uma célula fotovoltaica. Fonte: (Solar B. E., 2022).	21
Figura 6 - Estruturação de um arranjo fotovoltaico a partir da célula fotovoltaica. Fonte: (Viglus, 2015).	22
Figura 7 - Arranjo fotovoltaico em série. Fonte: (Carneiro, 2010).	23
Figura 8 - Arranjo fotovoltaico em paralelo. Fonte: (Carneiro, 2010).	23
Figura 9 - Associação série-paralelo de módulos fotovoltaicos. Fonte: (Carneiro, 2010).	23
Figura 10 - Circuito representativo de um módulo fotovoltaico. Fonte: (Viglus, 2015).....	24
Figura 11 - Curva característica ideal de $I \times V$ e $P \times V$ de um módulo fotovoltaico. Fonte: (CARLETTE, 2015).	27
Figura 12 - $I \times V$ para diferentes intensidades de irradiância solar. Fonte: (Bühler, 2011).	28
Figura 13 - $P \times V$ para diferentes intensidades de irradiância solar. Fonte: (Bühler, 2011). ...	28
Figura 14 - $I \times V$ variando a temperatura. Fonte: (Bühler, 2011).	29
Figura 15 - $P \times V$ variando a temperatura. Fonte: (Bühler, 2011).....	29
Figura 16 - Representação do método da carga resistiva variável. Fonte: (E. Durán, 2008). ..	30
Figura 17 - Esquema simplificado da carga eletrônica. Fonte: (E. Durán, 2008).	30
Figura 18 - Carga capacitiva em série com um módulo fotovoltaico. Fonte: (E. Durán, 2008).	31
Figura 19 - Curvas de $I \times t$ e $V \times t$ no carregamento do capacitor. Fonte: (E. Durán, 2008). ..	31
Figura 20 - Fluxograma do caracterizador atual. Fonte: Autor.	33
Figura 21 - Circuito Simplificado do caracterizador fotovoltaico. Fonte: (BRITO E. M., ANALISADOR DE CURVAS CARACTERISTICAS DE PAINEL FOTOVOLTAICO, 2016).	34
Figura 22 - Carga capacitiva em série com os terminais do módulo fotovoltaico. Fonte: Autor.	34
Figura 23 Capacitores em série com a resistência no primeiro caso. Fonte: autor.....	35
Figura 24 - Curva $I \times V$ com alta irradiância solar. Resultado obtido no dia 18/10/2022 às 10:47. Fonte: Autor.	37
Figura 25 - Curva $P \times V$ com alta irradiância solar. Resultado obtido no dia 18/10/2022 às 10:47. Fonte: Autor.	38

Figura 26 - Curva I x V a respeito da Figura 24 exportada ao MATLAB. Fonte: Autor.....	39
Figura 27 - Curva I x V a respeito da Figura 24 exportada ao MATLAB. Fonte: Autor.....	39
Figura 28 - Curva I x V em condições de baixa irradiância solar. Dados obtidos no dia 09/11/2022 às 09:58. Fonte: Autor.	40
Figura 29 - Curva P x V em condições de baixa irradiância solar. Dados obtidos no dia 09/11/2022 às 09:58. Fonte: Autor.	40
Figura 30 - Curva I x V a respeito da Figura 28 exportada ao MATLAB. Fonte: Autor.....	41
Figura 31 - Curva P x V a respeito da Figura 29 exportada ao MATLAB. Fonte: Autor.....	41
Figura 32 - Curva teórica de Corrente <i>versus</i> Tensão dividido em região linear e não linear. Fonte: (Lopes, 2021).....	44
Figura 33 - Corrente <i>versus</i> Tensão com baixa irradiância solar. Voc = 41,28V e Isc = 2,43A. Fonte: Autor.....	45
Figura 34 - Tensão <i>versus</i> Tempo com baixa irradiância solar. Voc = 41,28V e Isc = 2,43A. Fonte: Autor.....	45
Figura 35 - Corrente <i>versus</i> Tempo (em milissegundos). Teste realizado no dia 19/09/2022 às 10:42. Fonte: Autor.....	47
Figura 36 - Tensão <i>versus</i> Tempo (em milissegundos). Teste realizado no dia 19/09/2022 às 10:42. Fonte: Autor.....	47
Figura 37 - Fluxograma descritivo da metodologia de aumento de dados nas curvas características de um traçador de curvas. Fonte: Autor.	49
Figura 38 - Curva <i>versus</i> Tensão para baixa irradiância obtida pelo aplicativo. Dados obtidos dia 11/11/2022 às 08:40. Fonte: Autor.	50
Figura 39 - Curva Potência x Tensão para baixa irradiância solar obtida pelo aplicativo. Dados obtidos dia 11/11/2022 às 08:40. Fonte: Autor.....	51
Figura 40 - Curva de Corrente x Tensão a respeito da Figura 38 exportada para o MATLAB. Fonte: Autor.....	51
Figura 41 - Curva de Corrente x Tensão a respeito da Figura 39 exportada para o MATLAB. Fonte: Autor.....	52
Figura 42 - Identificação do primeiro valor maior que 0,95*Voc. Fonte: Autor.	52
Figura 43 - Corrente x Tensão com o novo valor de K em baixa irradiância. Dados obtidos no dia 11/11/2022 às 08:44. Fonte: Autor.	52
Figura 44 - Potência x Tensão com o novo valor de K em baixa irradiância. Dados obtidos no dia 11/11/2022 às 08:44. Fonte: Autor.	53
Figura 45 - Curva de Corrente x Tensão a respeito da Figura 43 exportada para o MATLAB. Fonte: Autor.....	53
Figura 46 - Curva de Potência x Tensão a respeito da Figura 44 exportada para o MATLAB. Fonte: Autor.....	54
Figura 47 - Curva I x V para alta irradiância solar com dados exportados para o MATLAB. Dados obtidos no dia 18/11/2022 às 10:20. Fonte: Autor.	55
Figura 48 - Curva P x V para alta irradiância com dados exportados para o MATLAB. Dados obtidos no dia 18/11/2022 às 10:20. Fonte: Autor.....	55

Figura 49 - Curva I x V para alta irradiância com $K = 3$. Dados obtidos no dia 18/11/2022 às 10:38. Fonte: Autor.....	56
Figura 50 - Curva P x V para alta irradiância solar com $K = 3$. Dados obtidos dia 18/11/2022 às 10:38. Fonte: Autor.....	56
Figura 51 - Curva I x V com $I_{SC} = 9,85$ A e $V_{oc} = 41,23$ V. Dados adquiridos no dia 18/10/2022 às 10:47. Fonte: Autor.	57
Figura 52 - Curva P x V com $I_{sc} = 9,85$ A e $V_{oc} = 41,23$ V. Dados adquiridos no dia 18/10/2022 às 10:47. Fonte: Autor.	57
Figura 53 - Curva I x V com $I_{sc} = 10,31$ e $V_{oc} = 39,17$. Dados adquiridos no dia 18/10/2022 às 10:25. Fonte: Autor.....	58
Figura 54 - Curva P x V com $I_{sc} = 10,31$ A e $V_{oc} = 39,17$ V. Dados adquiridos no dia 18/10/2022 às 10:25. Fonte: Autor.	58
Figura 55 - Curva I x V com $I_{sc} = 2,52$ A e $V_{oc} = 41,73$ V. Dados adquiridos no dia 19/09/2022 às 10:21. Fonte: Autor.	59
Figura 56 - Curva P x V com $I_{sc} = 2,52$ A e $V_{oc} = 41,73$ V. Dados adquiridos no dia 19/09/2022. Fonte: Autor.....	59
Figura 57 - Corrente <i>versus</i> Tensão em condições de sombreamento parcial. Dados obtidos no dia 28/11/2022 às 10:20. Fonte: Autor.	60
Figura 58 - Potência <i>versus</i> Tensão em condições de sombreamento parcial. Dados obtidos no dia 28/11/2022 às 10:20. Fonte: Autor.	60
Figura 59 - Curva de I x V da Figura 61 exportada ao MATLAB. Fonte: Autor.	61
Figura 60 - Curva de P x V da Figura 62 exportada ao MATLAB. Fonte: Autor.....	61
Figura 61 - Curva I x V em condições de sombreamento com $K=2,6$. Dados adquiridos no dia 28/11/2022 às 10:24. Fonte: Autor.	62
Figura 62 - Curva P x V em condições de sombreamento com $K=2,6$. Dados adquiridos no dia 28/11/2022 às 10:24. Fonte: Autor.	62
Figura 63 - Curva de I x V da Figura 66 exportada ao MATLAB. Fonte: Autor.	63
Figura 64 - Curva de I x V da Figura 67 exportada ao MATLAB. Fonte: Autor.	63

Lista de Tabelas

Tabela - 1 - Consumo de Energia no Brasil de 2016 a 2020. Fonte: (Energia, 2021).....	14
Tabela 2 - Informações do Módulo Fotovoltaico Jinko JKM330P no STC (Irradiância de 1000[W/m ² e Temperatura de 25°C]). Fonte: (Solar J. , 2015).	37
Tabela 3 - Pontos de interesse obtidos por meio do App. GTracer a respeito das curvas obtidas na Figura 24 e Figura 25. Fonte: Autor.....	38
Tabela 4 - Pontos mais importantes a respeito das curvas da Figura 28 e Figura 29. Fonte: Autor.	41
Tabela 5 - Informações dos pontos de interesse a respeito da Figura 38 e Figura 39. Fonte: Autor.	51
Tabela 6 - Informações dos pontos de interesse a respeito das curvas da Figura 43 e Figura 44. Fonte: Autor.	53
Tabela 7 - Medições dos pontos de interesse das curvas da Figura 57 e Figura 58. Fonte: Autor.	61
Tabela 8 - Condições dos valores de interesse das curvas na Figura 61 e Figura 62. Fonte: Autor.	63

1. Introdução

Desde o desenvolvimento humano nas Revoluções Industriais iniciadas na Europa no século XVIII, a demanda de energia elétrica aumentou cada vez mais ao longo dos anos, devido ao crescimento populacional mundial, mais fácil acesso de diferentes populações à tecnologia, e o avanço tecnológico (Viglus, 2015). Com isso, a geração de energia elétrica vem ganhando cada vez mais destaque devido a conscientização sobre os impactos que elas podem trazer, além de serem desenvolvidas novas formas na geração de energia para que se tenha menor ou nenhum impacto ambiental.

Dentre as alternativas referentes a utilização de energias renováveis, uma se destaca na geração em menor escala, sendo o sistema fotovoltaico. Embora dependa de condições climáticas para seu pleno funcionamento, essa alternativa pode ser utilizada para gerar energia numa escala residencial ou industrial, com alternativa de ser on-grid ou off-grid. Logo, fica claro o crescimento nessa área de pesquisa por ser visto como solução em inúmeros contextos.

Segundo dados da Empresa de Pesquisa e Tecnologia (Energia, 2021) na Tabela - 1, o consumo de energia no Brasil só cresceu de 2016 a 2020, com queda de 1,4% no comparativo de 2021 para 2020. No entanto esse fenômeno ocorreu na situação ímpar da pandemia, o que revela que a demanda de energia brasileira ainda apresenta forte tendência de crescimento. Na análise de cada região do país no período citado, todas as regiões apresentam aumento comparado a 2016, com destaque para a região Centro-Oeste que apresenta um crescimento de 11%, além de ser a região que, assim como o Norte, apresentou crescimento também em 2020 (Energia, 2021).

Atualmente, 60,2% da geração de energia no Brasil se dá por meio de hidrelétricas, seguida de usinas termelétricas (23,5%) e energia eólica (11,4%) (Energia, 2021). Nota-se que a maior fonte de energia elétrica é dependente de condições climáticas, não podendo contar com seu pleno funcionamento em períodos de seca, além da segunda maior fonte causar impactos ambientais, que precisa de combustíveis fósseis, que são limitados. Com base nos fatos explanados, fica claro que a demanda energética do Brasil só tende a crescer, e é fundamental que as novas gerações de energia sejam das mais variadas para que não se tenha a dependência de uma única, como é a realidade do país referente à hidroelétricas. Dentre as alternativas, também é importante optar pelas que se reduzem os impactos ambientais, utilizando cada vez mais energias renováveis.

Tabela - 1 - Consumo de Energia no Brasil de 2016 a 2020. Fonte: (Energia, 2021).

	2016	2017	2018	2019	2020	$\Delta\%$ (2020/2019)	Part. % (2020)	
Brasil	461.780	467.161	474.820	482.226	475.648	-1,4	100,0	Brazil
Norte	34.265	34.510	32.433	33.045	34.670	4,9	7,3	North
Nordeste	79.501	79.731	80.505	83.586	81.165	-2,9	17,1	Northeast
Sudeste	231.013	232.515	238.753	238.451	233.032	-2,3	49,0	Southeast
Sul	82.426	84.997	86.663	88.738	87.906	-0,9	18,5	South
Centro-Oeste	34.574	35.408	36.466	38.406	38.874	1,2	8,2	Midwest

1.1 Cenário nacional e mundial na geração de energia solar

Com base nos dados do (IEA, 2021), a matriz elétrica mundial em 2021 apresentou mais da metade composta por fontes não renováveis, com destaque no carvão mineral com 36,8% sendo o maior, seguido do gás natural, 23,5% e nuclear, 10,2% (IEA, 2021). As energias renováveis se mostram como minoria, e a solar ainda é pouco relevante nesse cenário, dividindo com outras fontes em 8,2%, como visto na Figura 1. No entanto, no cenário nacional, esses dados são bem diferentes, já que proporcionalmente é utilizado muito mais energia renovável comparado ao mundo, sendo aproximadamente 83%, justificando o motivo do Brasil ser referência nesse quesito, com 1,7% sendo de energia solar em 2021, mostrado na Figura 2.

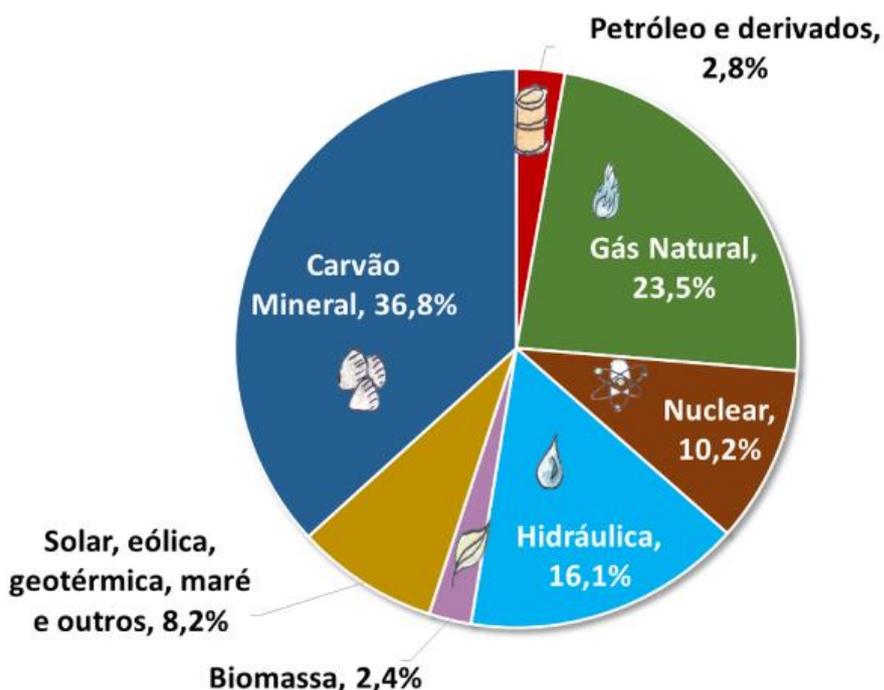


Figura 1 - Matriz Elétrica Mundial em 2019. Fonte: (IEA, 2021).

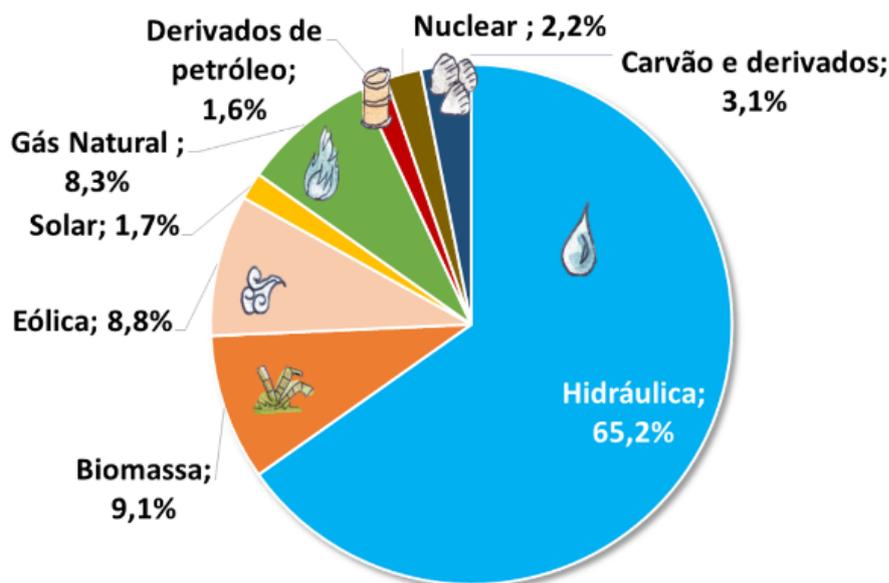


Figura 2 - Matriz Elétrica Brasileira. Fonte: (IEA, 2021).

A geração de energia fotovoltaica vem ganhando protagonismo ao longo dos últimos anos no país, sendo a geração de energia solar a que mais cresceu no último ano (2021), por volta de 60% (GOV, 2022). Essa expansão nos últimos anos fez essa fonte de energia sair dos 0,02% da matriz energética total em 2016 (BIG, 2016) e atualmente ser responsável por 2,6%, produzindo 16.752 GWh (Energia, 2021).

Um dos motivos causadores da ampliação desse setor também no mundo se dá pelo motivo dessa fonte precisar de um recurso infinito, que é irradiância solar. Com isso, o crescimento desse sistema de geração também é notado em alguns países onde pelo menos parte do seu território está em clima tropical, como no caso de México, Paquistão, Chile, com grande destaque para a China, que apresentou o maior crescimento do mundo em 2016, além de atualmente ser o país mais capacitado nessa geração de energia (Solar P. , 2017). Outra característica benéfica à expansão é a fácil manutenção dos sistemas, além de ter garantia das empresas com média próxima aos 20 anos (BRITO E. M., ANALISADOR DE CURVAS CARACTERISTICAS DE PAINEL FOTOVOLTAICO, 2016).

Com base no Portal Solar (Solar P. , 2017), é possível afirmar que a energia fotovoltaica tem se mostrado forte tendência no mundo partindo-se do número de variedades encontradas cada vez mais, focada na melhor eficiência das placas para as mais variadas condições. Além disso, o fator da competitividade no mercado também é crucial no desenvolvimento da mesma, justificando a variedade na composição do material, destacando principalmente as placas de silício cristalino, sendo que o monocristalino refere a placas mais eficientes devido à sua pureza,

e o policristalino, que é interessante ao mercado devido ao seu baixo custo. Outro tipo de módulo que ganha cada vez mais destaque são os bifaciais, que tem como objetivo captar energia do sol não só pela parte frontal, mas também da parte traseira, mais utilizados em grandes projetos com estruturas no solo. Por fim, assim como o policristalino, módulos de filme fino tem como foco o baixo custo, que traz como consequência menor eficiência, podendo ser composto de Silício amorfo (a-Si), Disseleneto de Cobre Índio e Gálio (CIGS), e Telureto de Cádmio (CdTe) (DAGOSTIN, 2021).

1.2 Energia Solar

Dentre a variedade de módulos fotovoltaicos, é fundamental que seus fabricantes informem todas características relevantes de um módulo solar para que seja possível a escolha de qual é a mais adequada para cada situação. As principais características estão vinculadas ao tipo de material, valores de tensão e corrente, se referindo à tensão e corrente de máxima potência (V_{mp} e I_{mp} respectivamente), tensão de circuito aberto (V_{oc}) e Corrente de Curto-Circuito (I_{sc}), eficiência da placa, peso, largura e outros. No entanto, no caso de potência nominal, há uma padronização das condições em que essas medidas são feitas, com a condição de irradiância padrão sendo de $1000W.m^{-2}$ e temperatura de $25^{\circ}C$. Contudo, é evidente que as condições climáticas são variáveis, e por consequência variando os valores de tensão, corrente e potência gerada, evidenciando a demanda de estudo na área (Mahmoud, 2014).

Para que seja possível analisar esses valores nas mais variadas condições, são utilizados equipamentos conhecidos como analisadores ou caracterizadores de módulos, que visam diagnosticar e detectar possíveis falhas, construídos de maneira a traçar curvas características de um módulo fotovoltaico. A curva de corrente em função da tensão ($I \times V$) e potência em função da tensão ($P \times V$) são utilizadas para indicar a eficiência do módulo em estudo. Com elas, é possível concluir se a placa se encontra em condições de sombreamento ou sujidade, altas temperaturas que limitam sua geração de potência, ou problemas de conexão entre as placas.

A partir dessas curvas, é possível fazer a comparação dos valores de tensão de circuito aberto e tensão de máxima potência, V_{oc} e V_{mp} , corrente de curto-circuito e corrente de máxima potência, I_{sc} e I_{mp} , e ponto de máxima potência, P_m , das condições em que a placa foi medida com as condições ideais dos valores fornecidos pelo datasheet. O dispositivo utilizado nesse trabalho adquire esses dados a partir de uma carga capacitiva que, a partir de semicondutores, ficam instantes chaveado em série com uma carga resistiva e instantes

chaveado em série com o painel em foco, enviando esses dados via *bluetooth* para outro dispositivo que expõe as curvas.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho possui seis capítulos. O primeiro apresenta uma breve introdução relacionado a energia solar fotovoltaica, relacionado ao atual cenário no Brasil e no Mundo. O segundo capítulo traz uma revisão acerca do fenômeno do efeito fotovoltaico a partir da irradiância solar, progredindo para o funcionamento de uma célula fotovoltaica e sua distribuição em um módulo. Depois é apresentado o circuito simplificado do módulo assim como influências externas em suas curvas características.

Seguidamente, é mostrado o funcionamento do caracterizador de curvas utilizada nesse trabalho, com explicação dos transitórios da carga capacitiva, atuais limitações no funcionamento do dispositivo, acompanhado do novo método a fim de melhorar o tempo de aquisição do mesmo.

O quarto capítulo trás os resultados experimentais das curvas características, utilizando o comparativo das curvas obtidas no método anterior com o método proposto nesse trabalho, evidenciando sua eficiência. Em seguida, é feita a conclusão dos dados obtidos, do método utilizado e explicitado limitações que podem ser alteradas futuramente a fim de se adquirir dados de maior precisão. Por fim, no último capítulo é exibido todas referências utilizadas nesse trabalho.

1.4 Objetivos

O trabalho vigente tem o objetivo de melhorar seu funcionamento de um caracterizador de módulos fotovoltaicos, partindo de uma melhor distribuição de pontos a fim de se ter dados mais conclusivos no funcionamento do mesmo, principalmente na precisão do ponto de máxima potência em condições de baixa irradiância solar.

1.4.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral desse trabalho é aumentar a frequência de dados na região de interesse do caracterizador fotovoltaico, referindo-se à tensão e corrente de máxima potência, como também tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito. Esse objetivo visa melhorar principalmente a resolução da curva $P \times I$ em baixa irradiância, já que nessas condições o atual dispositivo se mostra impreciso. Esses dados serão obtidos a partir da carga capacitiva do

dispositivo, em que valores de tensão e corrente são adquiridos, salvos e apresentados no smartphone através de um aplicativo, enviados por via *bluetooth*.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Propor uma distribuição de dados uniforme ao longo de toda a curva em função do tempo.
- Determinar os impactos no carregamento do capacitor em condições de total irradiância solar, irradiância parcial e em condições de total sombreamento num painel fotovoltaico.
- Desenvolver uma janela de dados variável de acordo com as situações climáticas encontrada.
- Identificar quais as limitações encontradas no microcontrolador utilizado no dispositivo usado nesse trabalho, como também as limitações nos sensores de corrente.

2. Revisão Bibliográfica

Para a melhor compreensão do trabalho é feita uma revisão nos tópicos de maior importância no tema que será abordado. Com isso, a revisão inicia com assuntos mais básicos partindo da irradiância solar, e focando no tema central, citando a modelagem e composição dos módulos, ao seu circuito equivalente, chegando por fim no caracterizador de curvas.

2.1 Irradiância Solar

A forma de dimensionar o calor e luz que vem do Sol, a partir de fótons que saem de sua superfície, e atingem a superfície da Terra, leva em conta a potência recebida por unidade de área. Com isso, no Sistema Internacional de medidas, essa grandeza é definida com a unidade $[W/m^2]$. Dessa forma, a irradiância solar apresenta grande variação na sua incidência ao redor do mundo, que pode variar de acordo com a época do ano, latitude da região que se queira analisar, e altitude dessa localização.

Com base na Figura 3 apresentada, é possível averiguar a influência da irradiância solar relacionada à latitude. Sabe-se que os trópicos de Câncer e Capricórnio se trata de linhas imaginárias que delimitam até onde os raios do Sol atingem a Terra perpendicularmente ao longo de um ano, levando em conta a inclinação do eixo da Terra. Dessa forma, é notado o favorecimento de regiões equatoriais e tropicais no quesito incidência solar comparado as regiões restantes. Com isso, o cenário brasileiro se mostra propício para aproveitar essa incidência na geração de energia, já que possui o quinto maior território do mundo, além de aproximadamente toda sua extensão estar localizada entre o trópico de capricórnio e a linha do equador.

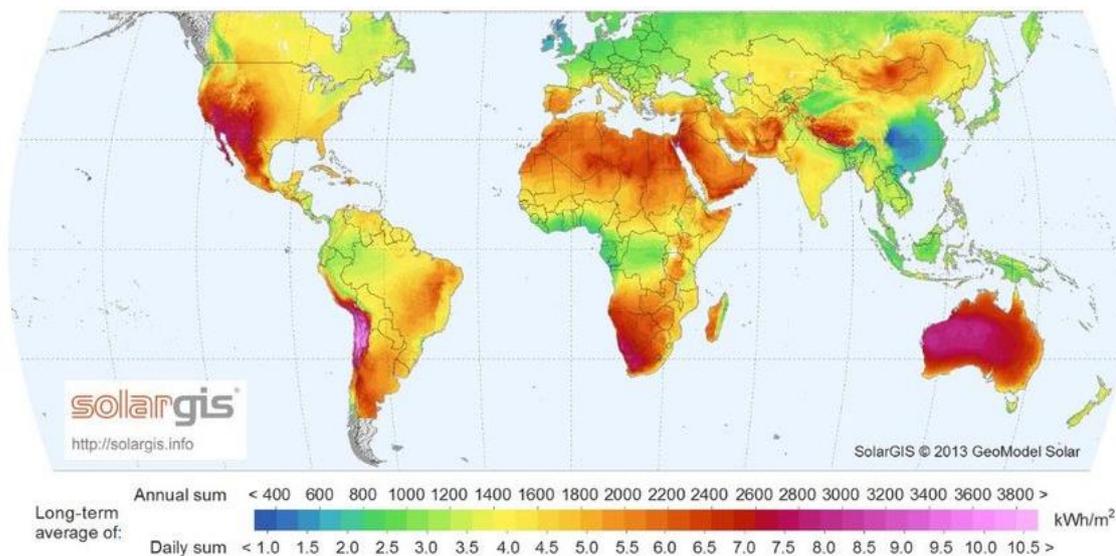


Figura 3 - Mapa mundial com índices de irradiância. Fonte: (SolarGIS, 2022).

2.1.1 Conversão de Luz Solar em Energia Elétrica

O fenômeno responsável pela conversão de radiação eletromagnética em energia elétrica é denominado efeito fotovoltaico. Esse evento foi descoberto inicialmente pelo físico francês Bequerel no início do século XIX, obtido a partir de seu trabalho com células eletrolíticas, utilizando soluções aquosas ácidas com eletrodos de metal nobre. Entretanto, a primeira vez que esse fenômeno foi efetivamente visto, foi por Adams, físico inglês que utilizando um sólido no selênio validaram o ocorrido em meados de 1880. Com os avanços tecnológicos da época, foi possível esboçar o que seria a primeira célula fotovoltaica, feita a partir de selênio, ainda no fim do século XIX. Consequentemente, no ano de 1914 o efeito fotovoltaico é relacionado a barreira de potencial elétrico pela primeira vez, que orientou a criação das primeiras células fotoelétricas (OLIVATI, 2000).

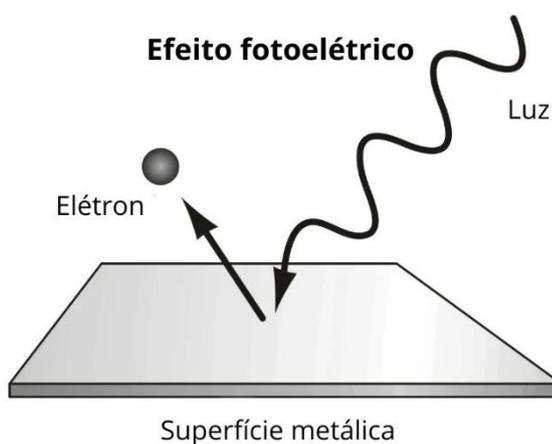


Figura 4 - Desenho simplificado do efeito fotoelétrico. Fonte: (ENEM, 2020).

2.1.2 Células Fotovoltaicas

Para proporcionar um melhor entendimento de célula fotovoltaica, pode-se assimilá-lo a um diodo de junção p-n exposto à luz. Como observado na Figura 5, a incidência direta da luz do Sol em uma célula fotovoltaica causa a liberação de carga, por meio de seus portadores, que gera uma corrente elétrica (representado pelo ligamento da lâmpada) caso a junção esteja conectada por um material condutor. Em razão da propriedade semicondutora desse material, a energia do fóton incidente desencadeia na libertação dos elétrons covalentes do mesmo, dependendo da energia da onda de luz e também material que compõe o painel (Villalva, 2010).

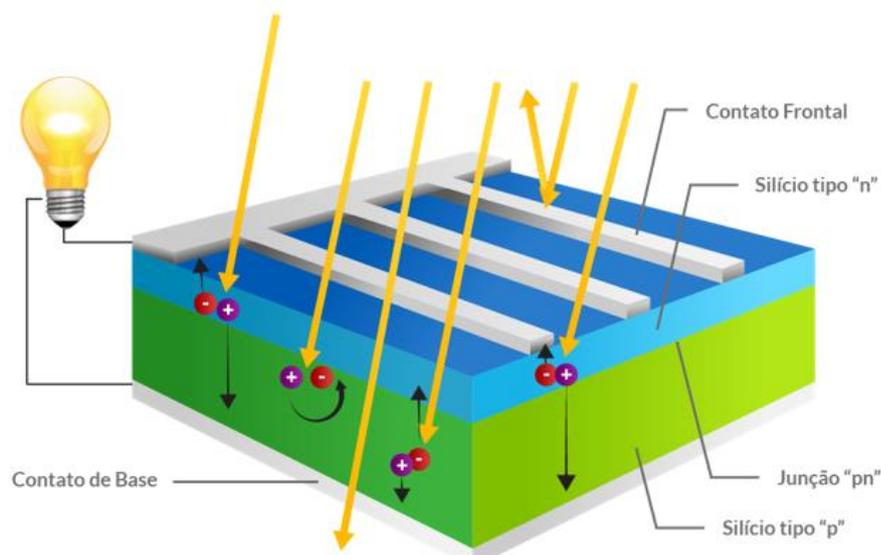


Figura 5 - Representação simplificada de uma célula fotovoltaica. Fonte: (Solar B. E., 2022).

Dentre outras variáveis que afetam o desempenho desse fenômeno, cabe citar o fluxo luminoso incidente na placa e também a capacidade de absorção desse material. Quanto à absorção, primeiramente destaca a reflectância desse semicondutor, mobilidade eletrônica, taxa de recombinação, banda de energia (conhecido também por bandgap), dentre outros. Quanto ao fluxo luminoso, tem-se a variabilidade de energia dos fótons, sendo que os de menor energia em alguns casos não sejam capazes de ser superior à banda de energia, não gerando tensão e nem corrente. Para o caso de energia superior ao bandgap, o excesso aproveitado para a geração de energia elétrica é meramente dissipado na forma de calor no material (Villalva, 2010).

2.1.3 Disposição das Células em um Módulo Fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico tem sua estrutura feita a partir de um grupo de células fotovoltaicas que na maioria dos casos são feitas por silício monocristalino ou policristalino, com sua eficiência variando de 7% a 18% em média (Viglus, 2015).

Para que seja necessário que um sistema fotovoltaico gere energia o suficiente para injetar na rede, é necessário dispor de um arranjo fotovoltaico. Atualmente, os módulos variam muito a depender de cada demanda, gerando potência de 5W a valores superiores a 500W, o que ainda é pouco relevante comparado com à rede. No entanto, para contornar esse ponto, a conexão de vários módulos fotovoltaicos em série ou paralelo para que esses valores de potência sejam somados e depois, injetados na rede. Como pode ser observado na Figura 6, a geração de energia de uma célula é agregada a várias outras em um módulo, que também são acrescentados a outros módulos a fim de se gerar energia suficiente conforme a demanda.

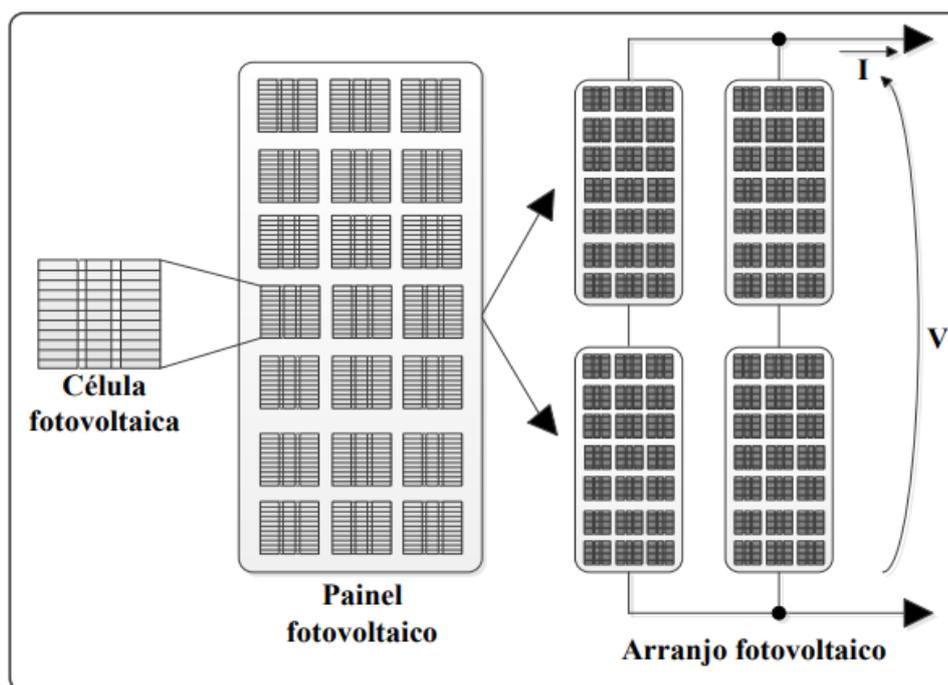


Figura 6 - Estruturação de um arranjo fotovoltaico a partir da célula fotovoltaica. Fonte: (Viglus, 2015).

Na associação de módulos em série, é preciso que a saída positiva esteja conectada ao terminal negativo do módulo seguinte, fazendo que a tensão seja somada, enquanto a corrente mantenha o valor de cada módulo isoladamente, que pode ser observado na Figura 7. Em contrapartida, a associação em paralelo soma a corrente de cada painel enquanto mantém os valores de tensão de cada um deles, visto na Figura 8.

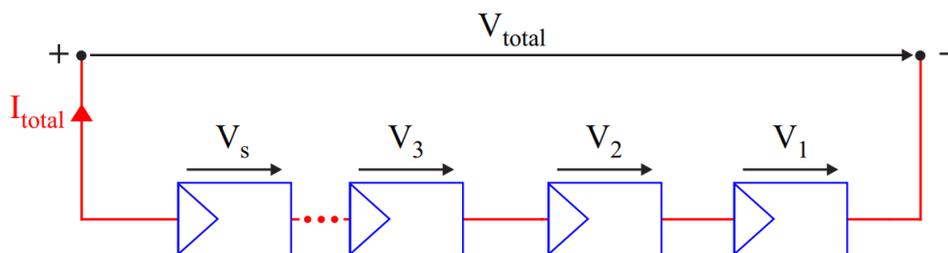


Figura 7 - Arranjo fotovoltaico em série. Fonte: (Carneiro, 2010).

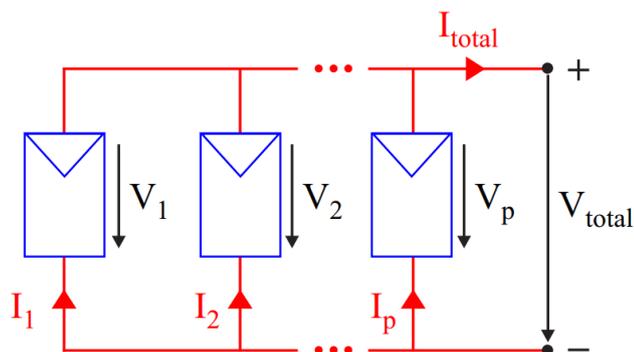


Figura 8 - Arranjo fotovoltaico em paralelo. Fonte: (Carneiro, 2010).

Em síntese, as duas formas de associação de painéis são utilizadas simultaneamente em um sistema fotovoltaico, a fim de obter a tensão e corrente necessária para gerar a potência a depender da demanda, com a alternativa de armazenar a energia por meio de baterias num sistema denominado off-grid, ou injetada na rede, conhecida como on-grid. O esquema de associação série-paralelo é representado na Figura 9 a seguir.

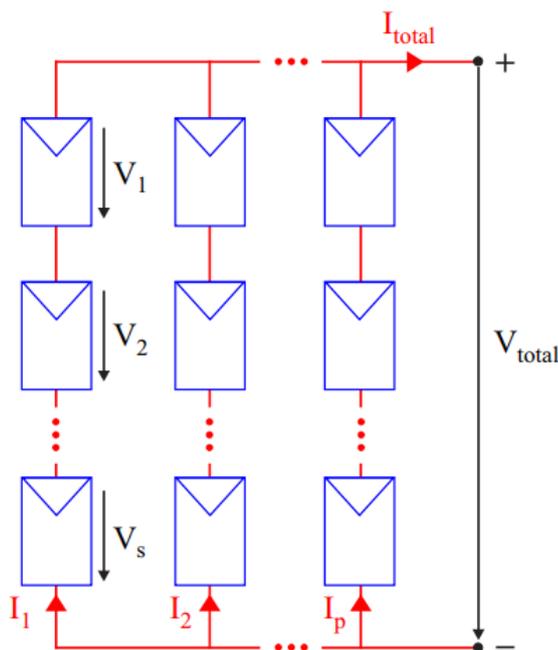


Figura 9 - Associação série-paralelo de módulos fotovoltaicos. Fonte: (Carneiro, 2010).

2.2 Circuito Equivalente de um Módulo Fotovoltaico

A fim de apresentar o funcionamento do arranjo fotovoltaico descrito anteriormente, é preciso utilizar o circuito equivalente de um painel para melhor assimilar suas propriedades elétricas, curvas características, influências externas na produção de energia, dentre outros. Como pode ser observado na Figura 10, o circuito equivalente é representado de forma simples, com uma fonte de corrente, um diodo, e dois resistores, com o valor de tensão na saída representando a tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico.

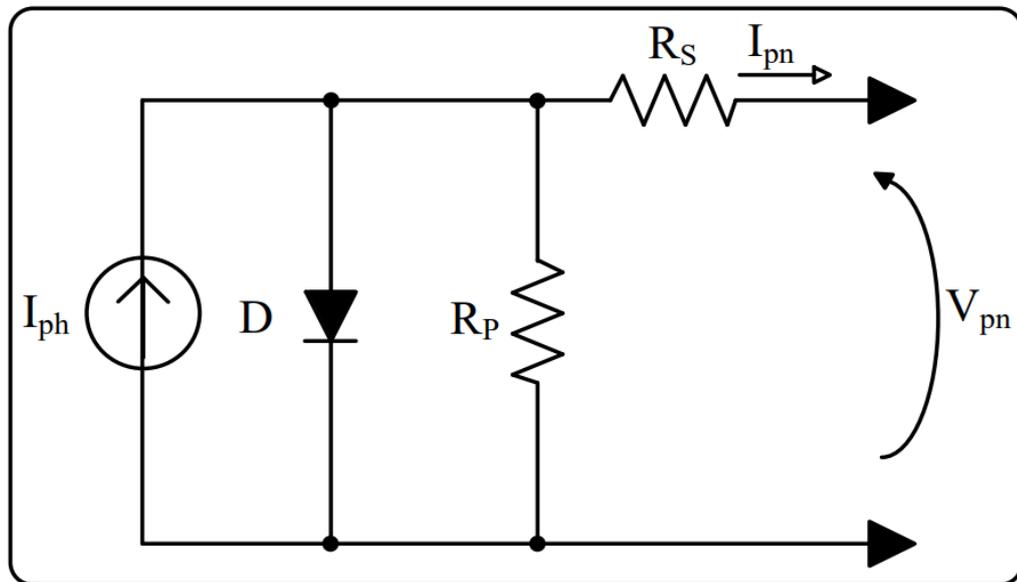


Figura 10 - Circuito representativo de um módulo fotovoltaico. Fonte: (Viglus, 2015).

Com o circuito mostrado acima, seu equacionamento se mostra necessário em razão do valor de I_{pn} , que se trata da corrente que é fornecida pelo módulo a partir da energia solar. Com isso, sua equação é obtida pela equação (1):

$$I_{pn} = I_{ph} - I_r \times \left[e^{\frac{q(V_{pn} + I_{pn} \times R_s)}{\eta \times k \times T}} - 1 \right] - \frac{V_{pn} + I_{pn} \times R_s}{R_p} \quad (1)$$

Nela as variáveis são:

I_{pn} – Corrente do painel;

I_{ph} – Fotocorrente resultante da incidência da luz solar no painel;

I_r – Corrente de saturação reversa da célula;

q – carga do elétron = $1,6 \times 10^{-19}$ [C];

V_{pn} – Tensão de saída do painel;

n – Fator de qualidade da junção p-n;

k – Constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ [J/K];

T – Temperatura da célula [K];

R_s – Resistência série da célula;

R_p – Resistência paralela da célula.

A equação (1) da Fotocorrente Resultante (I_{ph}) é obtida na equação (2), enquanto a de Corrente de Saturação é descrita na equação (3):

$$I_{ph} = [I_{SC} + \alpha \times (T - T_r)] \times \frac{P_s}{1000} \quad (2)$$

$$I_r = I_{rr} \times \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \times e^{\left[\frac{q \times E_g}{\eta \times k} \times \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (3)$$

Em que:

I_{sc} – Corrente de curto-circuito;

α – Coeficiente de temperatura de I_{sc} ;

T_r – Temperatura de referência = 298k;

P_s – Intensidade de radiação solar [W/m^2];

I_{rr} – Corrente de saturação reversa de referência;

E_g – Energia da banda proibida para o silício = 1,1eV.

Com base nas equações (1), (2) e (3), nota-se que todas as variáveis citadas podem ser obtidas em catálogos ou serem estimados, a não ser a variável I_{rr} . Essa incógnita pode ser alcançada se considerar I_{pn} como zero, já que se trata de um circuito aberto onde ela é encontrada. Sendo assim, a tensão de saída é apenas a tensão de circuito aberto, e considerando $T = T_r$, I_{rr} é obtida a partir da seguinte equação (4):

$$I_{rr} = \left(\frac{I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_p}}{e^{\left[\frac{q \times V_{OC}}{\eta \times k \times T} \right]} - 1} \right) \quad (4)$$

A fim de solucionar a equação (1), o método de Newton referente a métodos numéricos pode ser utilizado, expresso pela próxima equação:

$$X_{(n+1)} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \quad (5)$$

O valor de n representa a n-ésima iteração do cálculo I_{pn} representa a equação (1), enquanto $f'(I_{pn})$ representa sua derivada. Com isso, a equação (1) pode ser descrita da seguinte forma:

$$f(I_{pn}) = I_{ph} - I_{pn} - I_r \times \left[e^{q(V_{pn} + I_{pn} \times R_s) / \eta \times k \times T} - 1 \right] - \frac{V_{pn} + I_{pn} \times R_s}{R_p} \quad (6)$$

E sua derivada é mostrada por:

$$f'(I_{pn}) = -1 - I_r \times \left[e^{q(V_{pn} + I_{pn} \times R_s) / \eta \times k \times T} - 1 \right] \times \frac{q \times R_s}{\eta \times k \times T} - \frac{R_s}{R_p} \quad (7)$$

Com isso, os parâmetros restantes podem ser alcançados estimando as resistências R_p e R_s a partir de curvas características $I \times V$ (Corrente por Tensão) fornecida pelo fabricante do módulo. Sendo assim, R_s e R_p podem ser obtidas a partir das equações (8) e (9), respectivamente.

$$R_s < \frac{V_{OC} - V_{MPP}}{I_{MPP}} \quad (8)$$

$$R_p > \frac{V_{MPP}}{I_{SC} - I_{MPP}} \quad (9)$$

Dentre as variáveis apresentadas, V_{oc} se trata da tensão de circuito aberto, V_{mp} da tensão de máxima potência, I_{mp} da corrente no ponto de máxima potência e I_{sc} a corrente de curto-circuito. Os parâmetros restantes geralmente são obtidos em condições padrões de teste, como temperatura de 25°C, AM (atmosfera atravessada pela luz do sol) de 1,5, dentre outros.

2.3 Curvas Características de um Módulo Fotovoltaico

Além da importância do conhecimento e entendimento da curva característica de um módulo fotovoltaico na obtenção de parâmetros relevantes no equacionamento a partir do circuito simplificado, também é percebido sua importância a fim de saber quais valores de tensão, corrente e potência é gerada a cada instante no seu funcionamento usual.

Com base na Figura 11, é revelado as principais curvas características que um módulo fotovoltaico, sendo elas $I \times V$ (corrente por tensão) e $P \times V$ (potência por tensão), de um módulo genérico em condições ideais de uso. Além das curvas, também é importante destacar alguns pontos que tem grande importância, começando pela curva de corrente, que é iniciada por I_{sc} , valor de corrente máximo, tratando da corrente de curto-circuito. Ainda nessa curva nota-se o último ponto, V_{oc} , que é o mesmo valor nas duas curvas, se tratando da tensão de circuito aberto, maior tensão de toda a curva. Entre esses dois valores é encontrado um valor intermediário, onde se têm o V_{mp} e I_{mp} . Esse valor, em boa parte das vezes, é o ponto de interesse numa curva característica, já que nele é onde se tem a máxima geração de potência, se tratando de tensão de máxima potência e corrente de máxima potência, respectivamente.

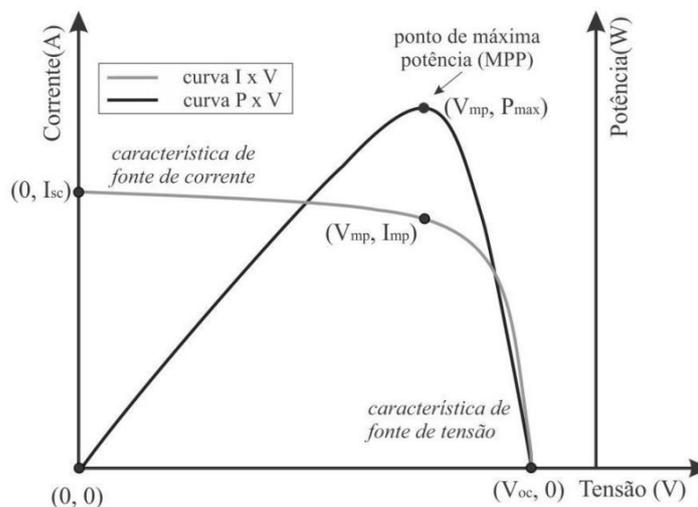


Figura 11 - Curva característica ideal de $I \times V$ e $P \times V$ de um módulo fotovoltaico. Fonte: (CARLETTE, 2015).

Esses pontos, assim como a curva, podem servir como auxiliares quando há intenção de entender o motivo da geração de energia não ser a máxima indicada no datasheet de um painel. Dentre os motivos que causam essa geração não estar na máxima potência, nota-se a influência de fatores externos, como temperatura e irradiância solar mostrados nas figuras a seguir adquiridos matematicamente.

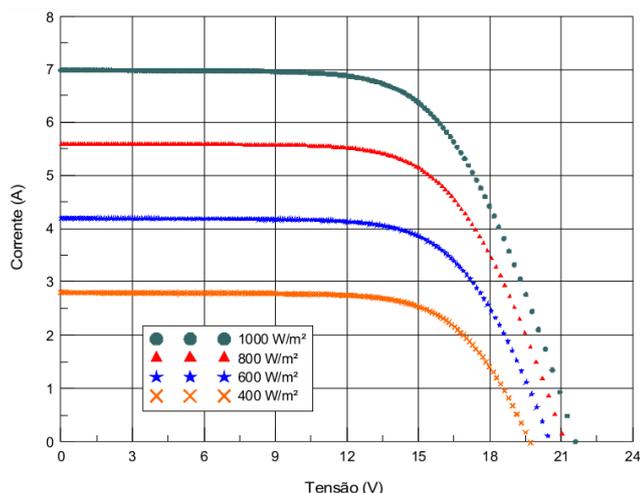


Figura 12 - I x V para diferentes intensidades de irradiação solar. Fonte: (Bühler, 2011).

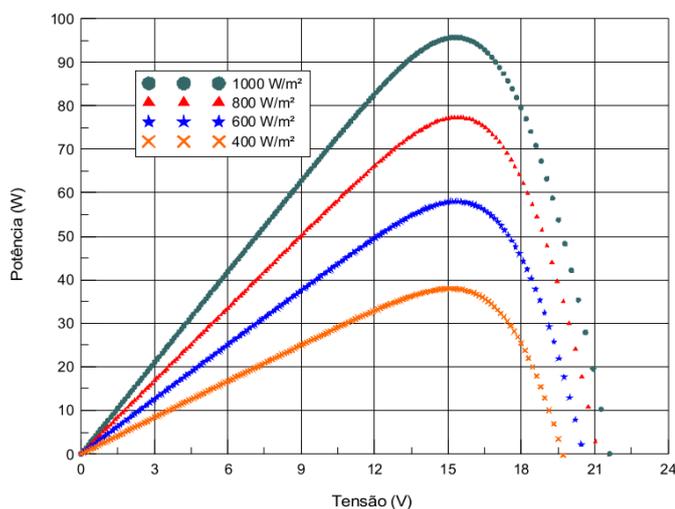


Figura 13 - P x V para diferentes intensidades de irradiação solar. Fonte: (Bühler, 2011).

As figuras Figura 12 e Figura 13 foram simuladas para um módulo que possui 36 células, com todos os dados sendo obtidos a temperatura de 25 °C. Note que quanto maior a irradiação solar, maior será a geração de energia elétrica.

Os dois gráficos mostrados nas Figura 14 e Figura 15 foram gerados sob condições externas de 1000W/m². Com essas curvas é revelado que quanto maior a temperatura, menor será a geração de energia, com um pico de produção a 15°C.

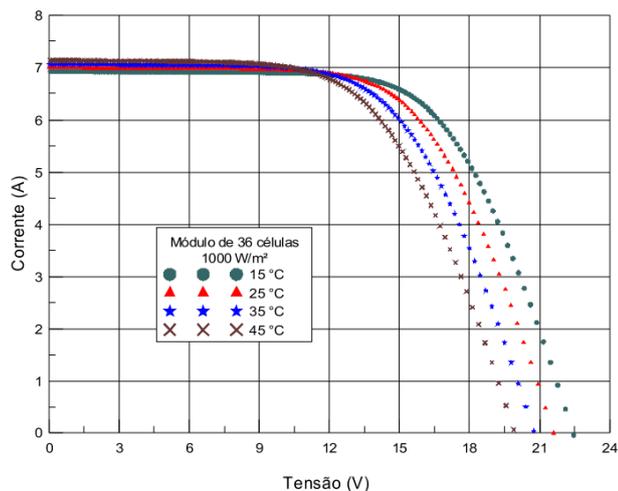


Figura 14 - I x V variando a temperatura. Fonte: (Bühler, 2011).

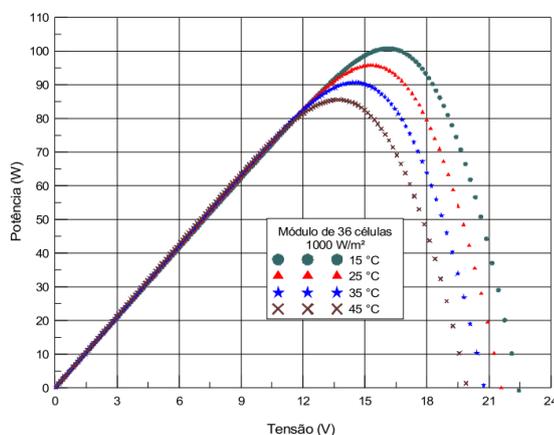


Figura 15 - P x V variando a temperatura. Fonte: (Bühler, 2011).

2.4 Caracterizador de Curvas (Carga Capacitiva)

Com a utilização crescente de energia fotovoltaica vem a grande variedade de módulos que são criados cada vez mais, com o objetivo dessas empresas serem mais competitivas no mercado. Com isso, os caracterizadores de curvas se apresentam como necessidade nesse meio tanto para as empresas, quanto para os consumidores, que para algum problema, o mesmo poderá ser solucionado mais rápido na identificação do defeito com suas curvas características traçadas.

Fundamentalmente, a estratégia mais observada de se ter essa curva, é simplesmente controlando a corrente provida do módulo entre o ponto de curto-circuito (ponto inicial) até o ponto de circuito aberto do módulo (E. Durán, 2008) . Com isso, é notado que a carga do dispositivo caracterizador é ponto chave para se ter esses dados, destacando três cargas que são

vistas como alternativa para essa questão. Dentre essas possibilidades, as de maior evidência são cargas resistivas, cargas eletrônicas e cargas capacitivas.

Na utilização de uma carga resistiva, é necessário que a resistência seja variável, para que seja obtido as informações iniciais e finais. No entanto, esse método apresenta grande limitação para atingir o valor final, já que é impossível que um resistor aumente o suficiente para ser infinito, inviabilizando o valor exato de V_{oc} . Porém, é possível que a resistência atinja valores grandes o suficiente para se ter suas respectivas curvas, mas sem apresentar grande precisão. O modelo simplificado desse método é observado na Figura 16.

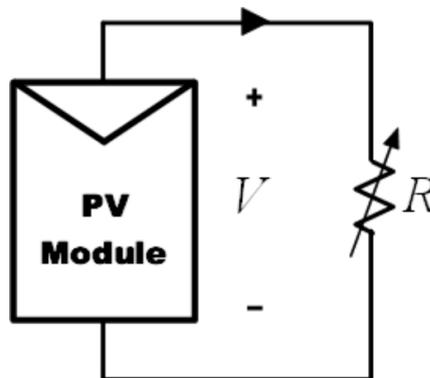


Figura 16 - Representação do método da carga resistiva variável. Fonte: (E. Durán, 2008).

No método da carga eletrônica, o objetivo também se trata de inicialmente ter uma impedância zero e variá-la até o infinito. Com a utilização dessa carga eletrônica, que se trata de um transistor, a impedância entre o dreno e fonte é controlada pela tensão na porta do transistor, tornando possível variar a impedância percebida do painel. Esse método apresenta a mesma limitação do anterior a respeito da impedância infinita, que não é possível de ser obtido, porém a resistência é variada eletricamente, mostrando ser vantajosa a anterior, que é mecânica (BRITO E. M., 2014). Concluindo, seu esquema simplificado pode ser visto na Figura 17.

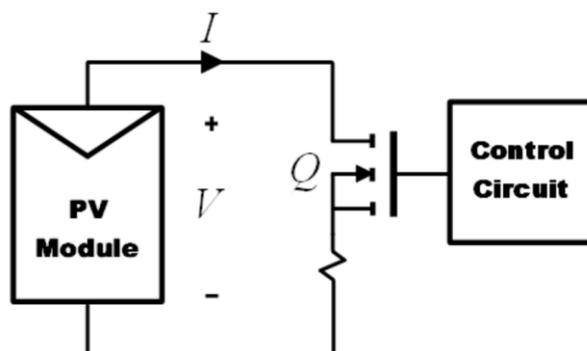


Figura 17 - Esquema simplificado da carga eletrônica. Fonte: (E. Durán, 2008).

Por fim, o método da carga capacitiva é a melhor alternativa das apresentadas, já que possui baixo custo sem deixar de expor alta precisão. Seu funcionamento acontece a partir do carregamento do capacitor, sendo que no instante inicial ele tem que estar completamente descarregado, onde passa a corrente I_{sc} que começa o processo de carregamento do mesmo. Ao longo do carregamento, os dados de corrente e tensão são obtidos, até o seu carregamento completo, que a partir desse momento passa a apresentar alta impedância, que seria o equivalente à impedância de circuito aberto. Para que seja possível todo esse processo, é necessário a utilização de algum chaveamento responsável por iniciar o processo de carregamento e também o de descarregamento, exigindo que em um momento o capacitor esteja em série com o painel solar, e outro em série com um resistor.

A seguir, na Figura 18 é apresentado o esquema simplificado do circuito com a carga capacitiva junto ao módulo. Posteriormente é mostrado na Figura 19 as curvas que descrevem o comportamento de tensão x tempo e corrente x tempo ao longo do carregamento do capacitor.

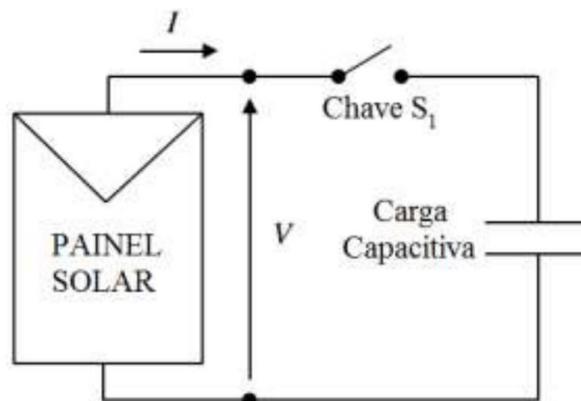


Figura 18 - Carga capacitiva em série com um módulo fotovoltaico. Fonte: (E. Durán, 2008).

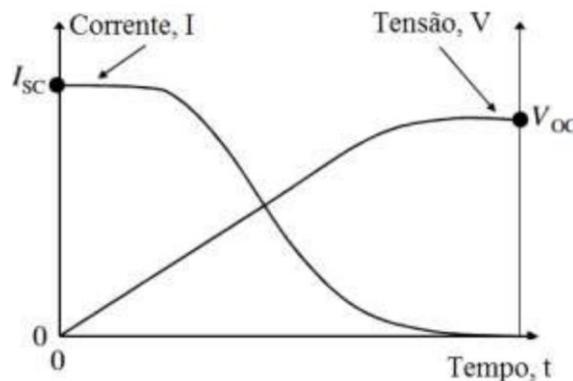


Figura 19 - Curvas de $I \times t$ e $V \times t$ no carregamento do capacitor. Fonte: (E. Durán, 2008).

Esse último método apresentado é o que será utilizado nesse trabalho para obter tanto a curva de $I \times V$ quanto $P \times V$. Será aqui estudado o tempo de carregamento do capacitor, métodos a fim de obter a coleta do carregamento o mais próximo possível desse tempo, melhor distribuição dos pontos da curva com o objetivo de melhorar sua resolução, em condições de muita irradiação solar, baixa irradiação, e irradiação parcial sobre o módulo.

3. Metodologia

Este capítulo expõe o esquema de carregamento e descarregamento de uma carga capacitiva no caracterizador fotovoltaico utilizado nesse trabalho. Com isso, o esquema de medição dos valores de tensão e corrente ao longo do carregamento também é mostrado, assim como o tempo de aquisição de dados, e limitações encontradas no seu funcionamento a fim de serem solucionados nos próximos tópicos. Na Figura 20 a seguir é mostrado o diagrama utilizado antes das alterações vigentes, que servirá de comparação mais tarde.

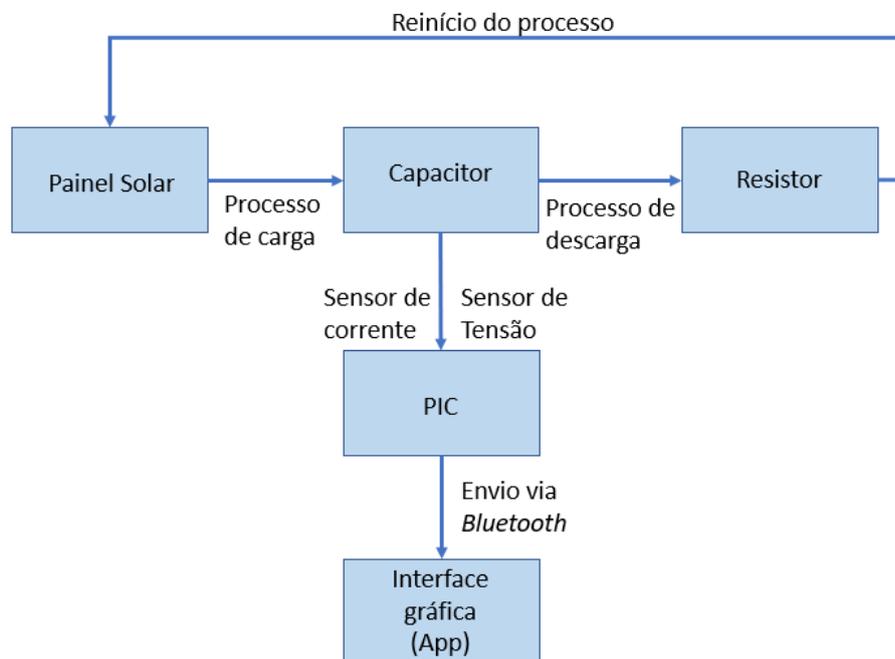


Figura 20 - Fluxograma do caracterizador atual. Fonte: Autor.

3.1 Funcionamento do Caracterizador e Regime Transitório da Carga Capacitiva

O circuito equivalente do caracterizador pode ser observado na Figura 21. A princípio, os componentes observados são três IGBTs que atuam chaveando no circuito, dois capacitores em paralelo que tem o simples objetivo de somar a capacitância total, que poderia ser substituído por um único capacitor maior, os terminais de um painel fotovoltaico que alimenta a carga capacitiva, e por fim os sensores de tensão e corrente.

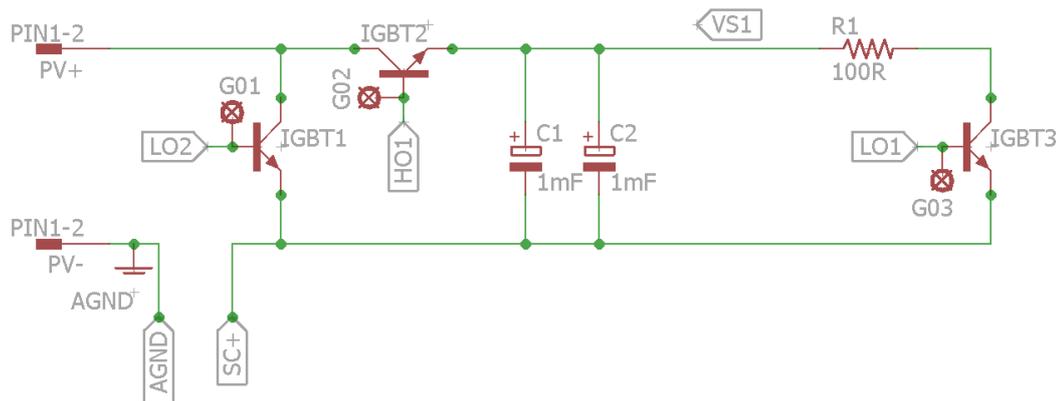


Figura 21 - Circuito Simplificado do caracterizador fotovoltaico. Fonte: (BRITO E. M., ANALISADOR DE CURVAS CARACTERISTICAS DE PAINEL FOTOVOLTAICO, 2016).

Para se entender o funcionamento do circuito da Figura 21, é preciso entender a atuação dos IGBTs devido aos seus estados e combinações, que resultam em duas situações. O primeiro caso, os chaveamentos dos IGBTs são alterados a fim de carregar o capacitor para medir os valores de tensão e corrente nesse período transitório. Para isso, o IGBT3 deixa de conduzir, enquanto o IGBT2 conduz, conectando a carga capacitiva em série com o painel fotovoltaico. Nesse momento, o capacitor que estava completamente descarregado, passa a carregar com o valor de I_{sc} sendo medido pelo IGBT1 instantes antes do chaveamento do IGBT2. Para essa combinação dos IGBTs há o circuito simplificado na Figura 22 a seguir.

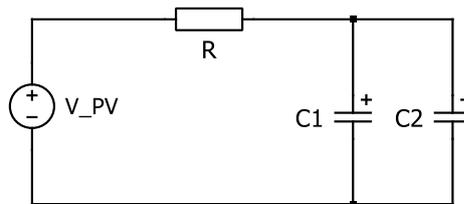


Figura 22 - Carga capacitiva em série com os terminais do módulo fotovoltaico. Fonte: Autor.

Quando esse processo é iniciado, a tensão do capacitor sai de zero e aumenta até atingir o valor V_{oc} do módulo. Ao mesmo tempo, a corrente que saiu do valor inicial de I_{sc} , diminui até zero, descrevendo todo o processo de carregamento da carga. A partir das leis de Kirchhoff de tensão, tem-se a seguinte equação (10):

$$V_0 = v_R(t) + v_C(t) \quad (10)$$

Com isso, tem-se:

$$V_0 = \frac{1}{C} \int i dt + Ri \quad (11)$$

Derivando essa equação em relação ao tempo, é obtido:

$$\frac{di}{i} = -\frac{dt}{\tau} \quad (12)$$

Em que:

$$\tau = RC \quad (13)$$

O parâmetro obtido na equação (13) é a constante de tempo RC do circuito da Figura 22. Integrando a equação (12) de zero até o instante t, tem-se:

$$i(t) = \frac{V_0}{R} e^{-t/\tau} \quad (14)$$

Substituindo a Equação (14) na Equação (10), é conseguido o comportamento da tensão do capacitor durante seu carregamento:

$$v_C(t) = V_0 (1 - e^{-t/\tau}) \quad (15)$$

Em um segundo instante, trata-se do estado que o circuito fica na maior parte do tempo, que é o IGBT1 aberto, assim como o IGBT2, e o IGBT3 conduzindo. Essa situação refere ao tempo em que o capacitor está conectado em série com uma resistência, responsável por seu descarregamento, enquanto as conexões com os terminais do módulo são ignoradas. Para essa nova combinação dos IGBTs há o circuito simplificado na Figura 23 a seguir:

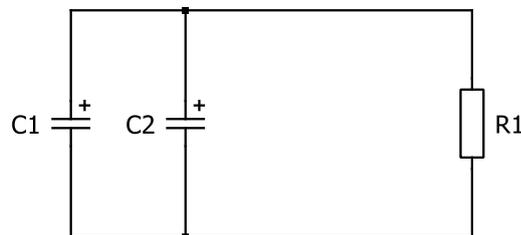


Figura 23 Capacitores em série com a resistência no primeiro caso. Fonte: autor.

Nesse início de descarregamento, o capacitor possui uma tensão de Voc, e diminuirá até o valor zero. No instante do chaveamento, a corrente do circuito é Voc/R1, e em razão do capacitor estar em série com o resistor, tem-se:

$$v_R(t) = v_C(t) \quad (16)$$

Onde,

$$v_C(t) = -(1/C) \int i dt \quad (17)$$

Com o sinal negativo indicando a queda de tensão no capacitor. Fazendo os mesmos passos do regime transitório anterior, adquire-se a seguinte equação:

$$i(t) = \frac{V_d}{R} e^{-t/\tau} \quad (18)$$

Mudando o valor de corrente para o de tensão no capacitor, tem-se:

$$v_C(t) = V_d e^{-t/\tau} \quad (19)$$

Todo o processo de carregamento do capacitor, que se trata da curva de interesse para o traçador de curvas é mostrado Figura 19, onde revela o comportamento da tensão e da corrente em relação ao tempo.

Depois da descrição dos dois possíveis estados de chaveamento, quando se mostra necessário a obtenção das curvas características, é necessário enviar um sinal ao dispositivo para mudá-lo do primeiro estado para o segundo. O segundo estado tem breve duração e instantes depois do total carregamento do capacitor, visto nas equações, o segundo estado de chaveamento retorna, descarregando o capacitor, o deixando a disposição caso seja necessário fazer uma nova leitura.

Para que esses dados do período transitório do carregamento sejam obtidos, o microcontrolador PIC, modelo PIC18F4550 de 40 pinos, tem atuação fundamental para adquirir esses dados (que nesse trabalho são 400 de tensão e 400 de corrente). Seu acionamento, junto a todo o chaveamento já explicado, ocorre por via *bluetooth* por via de um smartphone, onde será esboçado a curva Corrente *versus* Tensão e Potência *versus* Tensão.

3.2 Limitações Encontradas no Dispositivo Caracterizador Gtracer

Nos tópicos seguintes são apresentadas algumas limitações encontradas no dispositivo utilizado nesse trabalho, desenvolvido pelo GESEP (Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência), que serão questões a serem melhorados seguidamente. Todos os testes a seguir foram obtidos a partir de um módulo da marca JINKO de 330Wp, que tem suas

principais informações na Tabela 2 (Solar J. , 2015). Além disso, os dados do dispositivo caracterizador foram expostos no aplicativo desenvolvido também pelo GESEP, por meio de um smartphone, e também exportados para o programa MATLAB 2016.a com o objetivo de ter maior precisão nos dados recebidos. Para cada teste foram obtidos 400 pontos de tensão e 400 pontos de corrente, com a carga capacitiva sendo de 2200 μ F.

Tabela 2 - Informações do Módulo Fotovoltaico Jinko JKM330P no STC (Irradiância de 1000[W/m² e Temperatura de 25°C]). Fonte: (Solar J. , 2015).

Parâmetros	Valores
Potência Máxima (Pmax)	330 W
Tensão de Máxima Potência (Vmp)	37,8 V
Corrente de Máxima Potência (Imp)	8,74 A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	46,9 V
Corrente de Curto-Circuito (Isc)	9,14 A
Eficiência do Módulo STC (%)	17,01%
Kv	-0,1407 V/K
Ki	0,06 A/K
Rp	19699,740894 Ω
Rs	0,0060 Ω

3.2.1 Distribuição de Pontos na Curva com Alta x Baixa Irradiância Solar

Verificando o funcionamento do dispositivo caracterizador, a princípio foram obtidas as curvas características nas condições de muita irradiância solar e baixa irradiância. Primeiramente, os resultados a respeito da curva de Corrente versus Tensão e Potência versus Tensão são observados na Figura 24 e Figura 25, onde se nota curvas muito próximas das curvas teóricas apresentadas no tópico 2.2.1, o que mostra ser um resultado satisfatório.

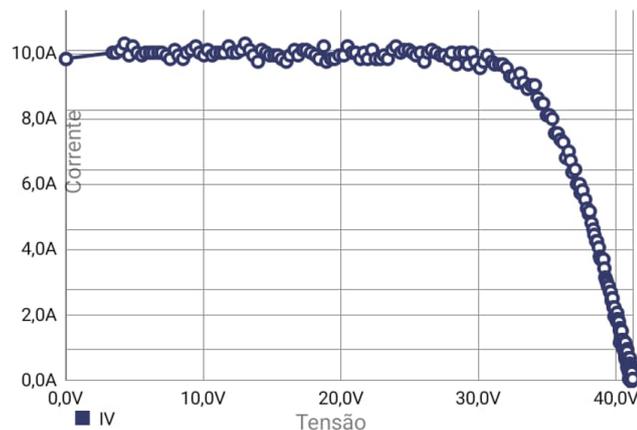


Figura 24 - Curva I x V com alta irradiância solar. Resultado obtido no dia 18/10/2022 às 10:47. Fonte: Autor.

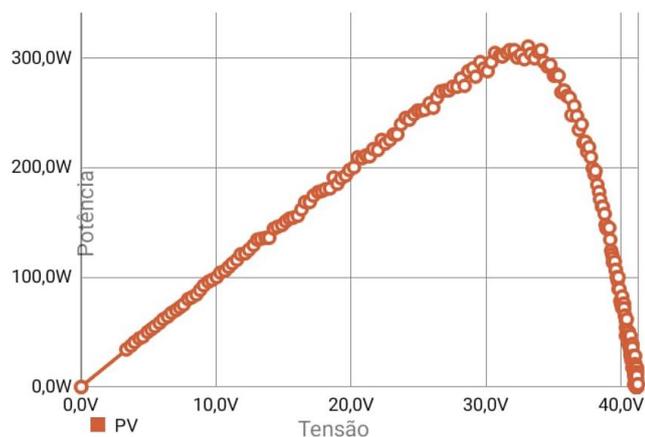


Figura 25 - Curva P x V com alta irradiância solar. Resultado obtido no dia 18/10/2022 às 10:47. Fonte: Autor.

Tabela 3 - Pontos de interesse obtidos por meio do App. GTracer a respeito das curvas obtidas na Figura 24 e Figura 25. Fonte: Autor.

	Medições
Voc	41.23
Isc	9.85
Vmp	33.07
Imp	9.39

Dessa forma, é possível concluir que o número de dados obtido ao longo da curva apresenta muitas informações com precisão, como valores de Vmp, Imp, Voc e Isc. No entanto, Nota que há mais pontos concentrados no fim das duas curvas, o que sugere um tempo de aquisição de dados maior que o período transitório de carregamento do capacitor, onde é revelado na Figura 26 e Figura 27 com esses dados exportados ao MATLAB.

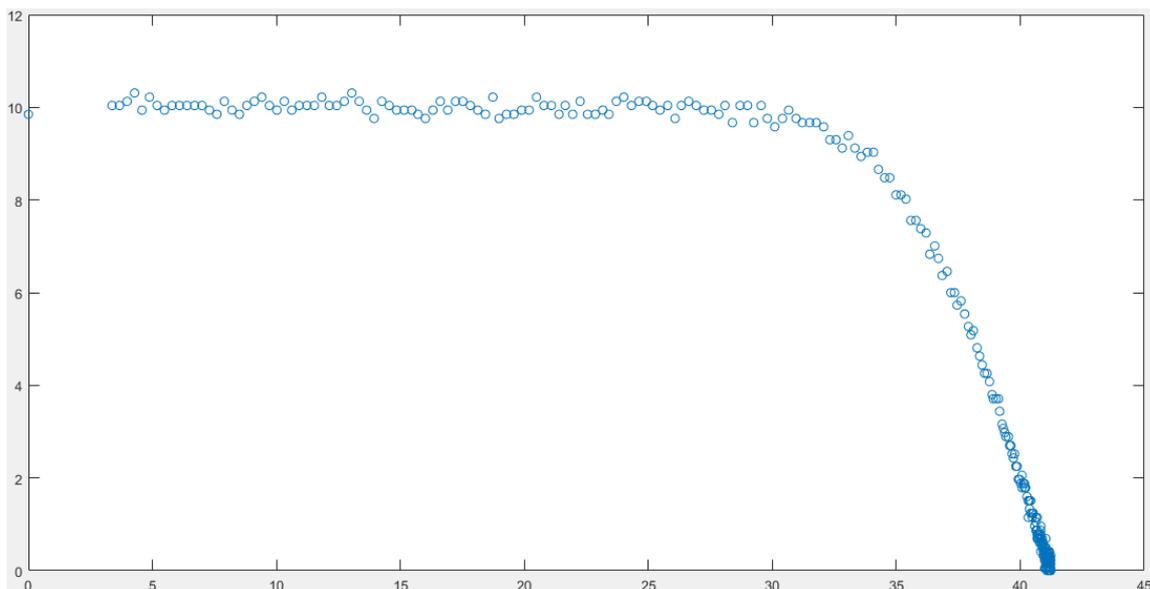


Figura 26 - Curva I x V a respeito da Figura 24 exportada ao MATLAB. Fonte: Autor.

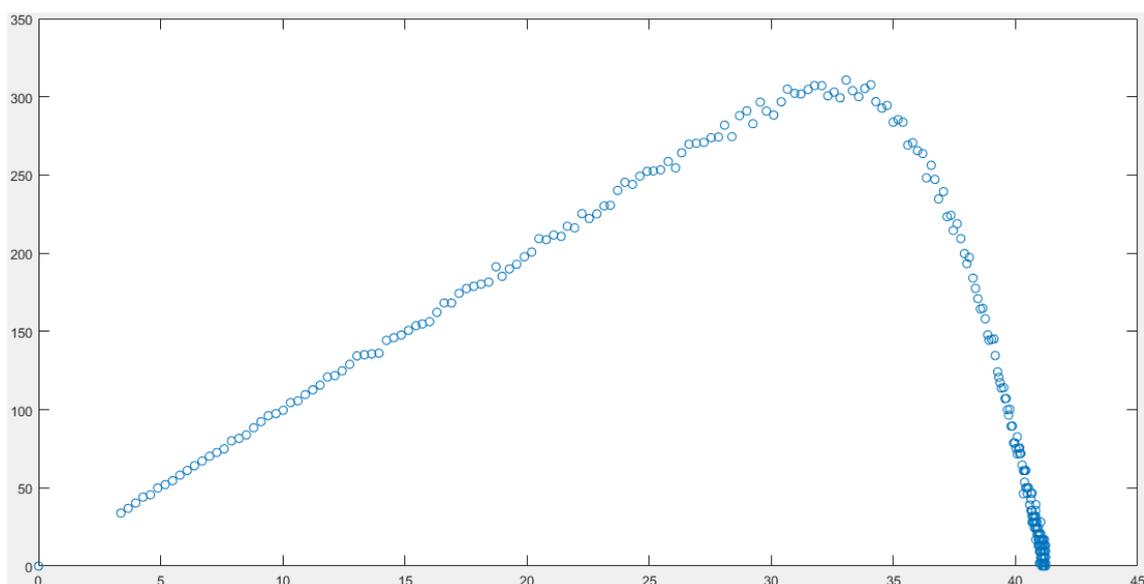


Figura 27 - Curva I x V a respeito da Figura 24 exportada ao MATLAB. Fonte: Autor.

Com base nos dois resultados expostos na Figura 26 e Figura 27, fica claro observar que por mais que tenha boa precisão nas informações de interesse da curva, há muitos dados que são perdidos em razão do tempo de aquisição de dados ser consideravelmente maior que o carregamento do capacitor. Com base na tabela em formato EXCEL fornecida pelo aplicativo GTracer, o valor de V_{oc} desse teste (41,3V) já é encontrado na posição 378 dos 400 pontos totais, repetindo nas posições restantes.

Além disso, sabendo que a curva de Tensão x tempo apresenta comportamento de convergência para o Voc, se subtraído 1V de Voc, é obtido 40,3V. Esse valor já é alcançado na posição 167, revelando que na variação de 97,5% (40,3/41,3) da tensão (de completamente descarregado até 40,3V), é utilizado apenas 41,75% (167/400) dos dados.

Ademais, essa perda é ainda mais significativa para condições de baixa irradiância solar, como pode ser visto nas figuras Figura 28, Figura 29 e Tabela 4, enquanto as Figura 30 e Figura 31 são extraídas para o MATLAB.

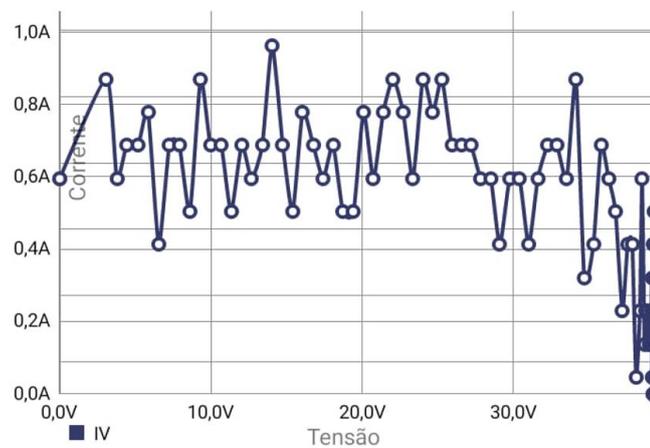


Figura 28 - Curva I x V em condições de baixa irradiância solar. Dados obtidos no dia 09/11/2022 às 09:58. Fonte: Autor.

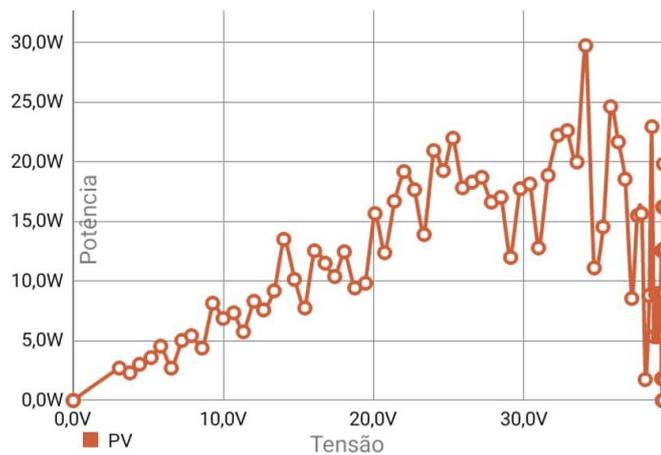


Figura 29 - Curva P x V em condições de baixa irradiância solar. Dados obtidos no dia 09/11/2022 às 09:58. Fonte: Autor.

Tabela 4 - Pontos mais importantes a respeito das curvas da Figura 28 e Figura 29. Fonte: Autor.

	Medições
Voc	39.37
Isc	0.6
Vmp	34.13
Imp	0.87

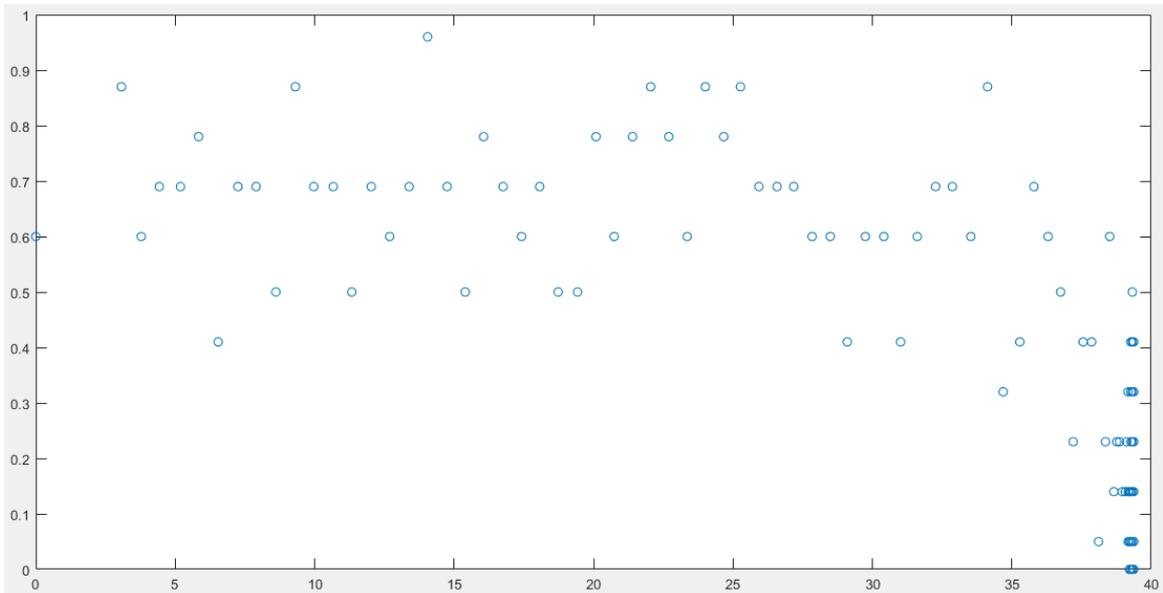


Figura 30 - Curva I x V a respeito da Figura 28 exportada ao MATLAB. Fonte: Autor.

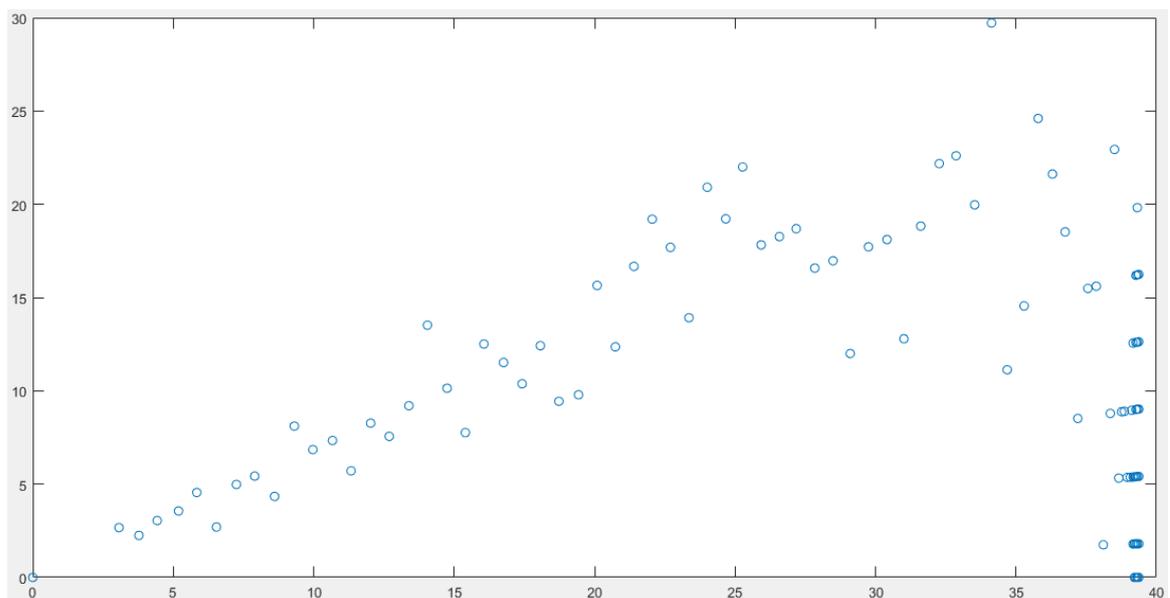


Figura 31 - Curva P x V a respeito da Figura 29 exportada ao MATLAB. Fonte: Autor

Com base nas informações obtidas das curvas características do dispositivo, primeiro destaca o ruído nas grandezas referentes à corrente, que é de 0,1A. Esse ruído atrapalha sobre alguma possível conclusão acerca do gráfico, já que em condições de baixa irradiância solar, a corrente de I_{sc} está geralmente abaixo dos 2,5A. Essa propriedade afeta também a curva de $P \times V$, uma vez que ela é obtida a partir do produto da tensão e corrente acerca de cada ponto.

Além disso, fica claro que essa curva é inconclusiva também por motivo dos pontos estarem relativamente longes um do outro, revelando que a janela de aquisição de dados para essas condições se mostra inadequada. Esse fato faz com que na tentativa de se fazer um teste com o propósito de ter o ponto de V_{mp} e I_{mp} haverá dificuldade, porque a variação dos pontos tanto em relação à potência quanto aos valores de tensão, se apresentam com baixa precisão.

A partir da tabela do EXCEL dessas medições, dentre os 400 pontos de tensão, o valor V_{oc} (39,27V) já é alcançado na posição 177, e a posição $V_{oc} - 1V$ (38,27V) é encontrado na posição 62. Com base nisso, a curva tem relação pior comparado a condições de alta irradiação, pois no atual caso, numa variação de 97,5% da tensão, tem-se o uso de apenas 15,5% de variação nos dados do gráfico.

3.2.2 Tempo da Janela de Dados do Carregamento do Capacitor

Como foi revelado, o tempo de aquisição de dados se mostrou inadequado para condições em que se há baixa irradiância, e conclusivo para alta irradiância, mesmo utilizando apenas 41,75% de todos os dados adquiridos para descrever essa curva. Dessa forma, é notado a necessidade de se obter uma nova forma de se adquirir o tempo da janela de dados, já que a forma utilizada no dispositivo se mostra consideravelmente maior do que o necessário.

A equação do tempo total de aquisição de dados é exposta na equação a seguir:

$$t_{aq} = 7 * \frac{V_{oc}}{I_{sc}} * 2200/1000 \quad (20)$$

A ideia inicial dessa equação era de garantir que todo o carregamento do capacitor seria registrado pelo microcontrolador. Partindo que em condições ideais o valor total de carregamento de um capacitor é de $5RC$, a equação acima propõe a se aproximar do tempo de carregamento teórico, utilizando uma margem de erro superdimensionada, para não ser perdido nenhum dado do período transitório. Além disso, foi provado no artigo (BRITO, PEREIRA, RIBEIRO, & CUPERTINO, 2016) por meio de testes que o tempo real de carregamento de um

capacitor está a cerca de 12%-13% acima do valor teórico. Com isso, tem-se o entendimento do valor 7 multiplicando a constante RC.

Esse valor que multiplica a constante será denominado como K, que tem grande importância no entendimento do trabalho aqui proposto. Fazendo um comparativo entre o tempo de carregamento teórico do capacitor com o tempo total de aquisição do dispositivo, a divisão de Voc por Isc tem a intenção de representar a resistência do carregamento do capacitor. No entanto, é concluído que não há boa aproximação com esse valor, já que o tempo de aquisição sugere tempo menores que o 5RC, como será visto futuramente. O valor de 2200 se trata da capacitância do capacitor, dada em μF , e o valor 1000 tem como objetivo obter o tempo total em milissegundos.

Como foi mostrado, apenas a variável K seria um parâmetro razoável a ser alterado na intenção de obter um tempo de aquisição mais adequado, uma vez que Voc e Isc dependem das condições climáticas em que a medida é feita, e a capacitância é um valor constante. Dessa forma, a metodologia desse trabalho cabe em aprimorar o valor da variável K a fim de ter um tempo de aquisição do dispositivo mais próximo do tempo de carregamento do capacitor.

Também é notório que essa equação não leva em conta condições de baixa irradiância solar, uma vez que nos casos estudados, para condições de muita irradiação a corrente Isc, valor que é utilizado no denominador da equação, pode alcançar valores superiores a 9A (9,85A no caso estudado), enquanto em baixa irradiância, esse valor é inferior a 1A (0,6A). Como a tensão não apresenta variações abruptas em relação as condições climáticas, essa variação de corrente faz com que o tempo de aquisição de dados de baixa irradiância passe a ser consideravelmente maior que o tempo de alta irradiância, justificando o fato de no caso estudado, 84,5% do tempo é rejeitado.

3.2.3 Ineficiência de Variar a Frequência de Dados na Região Não Linear

Uma importante característica na curva de Corrente *versus* Tensão é o comportamento linear entre as duas grandezas no início do gráfico, mantendo este comportamento instantes antes de atingir o ponto de máxima potência. Depois desse ponto, é visto o comportamento não linear na curva, onde uma baixa variação de tensão resulta numa grande variação de corrente.

Com isso, visando melhorar essa questão no caracterizador utilizado nesse trabalho, há uma nova distribuição de pontos entre as regiões citadas, sendo que 1/3 do total de pontos são utilizados na região linear, uma vez que não se precisa de muita informação por se tratar de uma região de comportamento previsível, enquanto os 2/3 restantes são utilizados para descrever a região não-linear. A forma de adicionar essa função no dispositivo caracterizador foi por meio de análises nas curvas teóricas de $I \times V$, feito no trabalho (Lopes, 2021), observado na Figura 32 a seguir. Com isso, foi averiguado que o ponto em que ocorre essa mudança é a 80% da tensão V_{oc} , ou se for necessário deixar essa ação em função do tempo, foi provado que ocorre a 45% do tempo total de carregamento do capacitor.

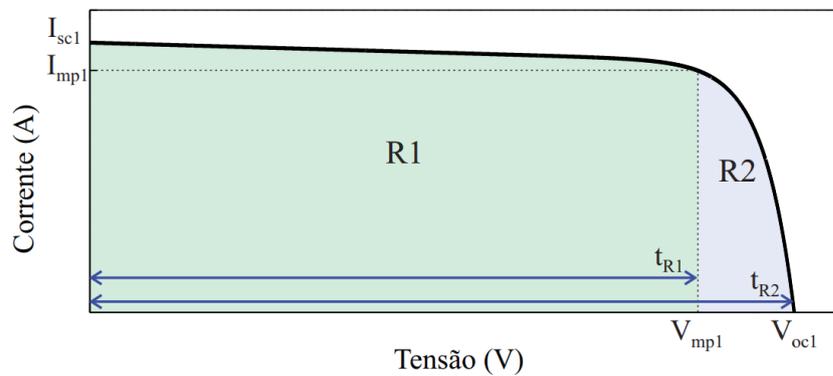


Figura 32 - Curva teórica de Corrente *versus* Tensão dividido em região linear e não linear. Fonte: (Lopes, 2021).

Entretanto, quando feito esses testes em condições reais, verificou-se que com a equação (20) do tempo de aquisição de dados, a curva apresenta muitos valores repetidos, já que o tempo de aquisição de dados é consideravelmente maior que o tempo real de carregamento. Essas condições podem ser notadas na Figura 33, obtido com baixa irradiação solar, com I_{sc} de 2,43A e V_{oc} de 41,28V.

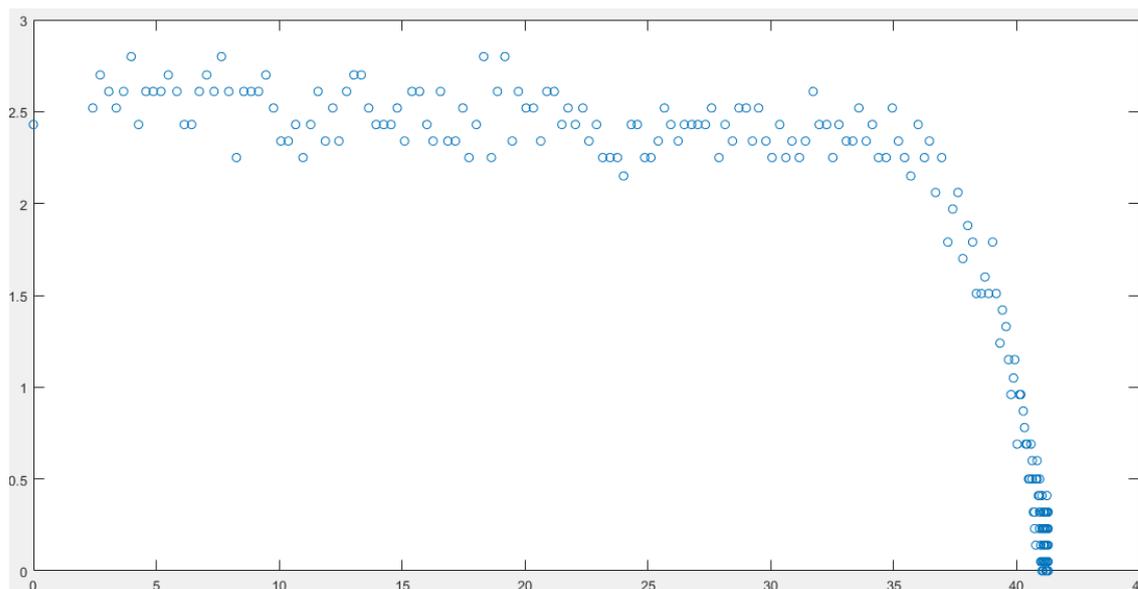


Figura 33 - Corrente *versus* Tensão com baixa irradiância solar. $V_{oc} = 41,28V$ e $I_{sc} = 2,43A$. Fonte: Autor.

Com a Figura 33 fica claro que o comportamento da curva real não apresenta o ponto de máxima potência a 80% da tensão V_{oc} , uma vez que é sabido que há grande repetição entre os valores finais de tensão. Para ficar mais conclusivo, na Figura 34 é visto a curva Tensão *versus* Tempo do mesmo teste feito na Figura 33.

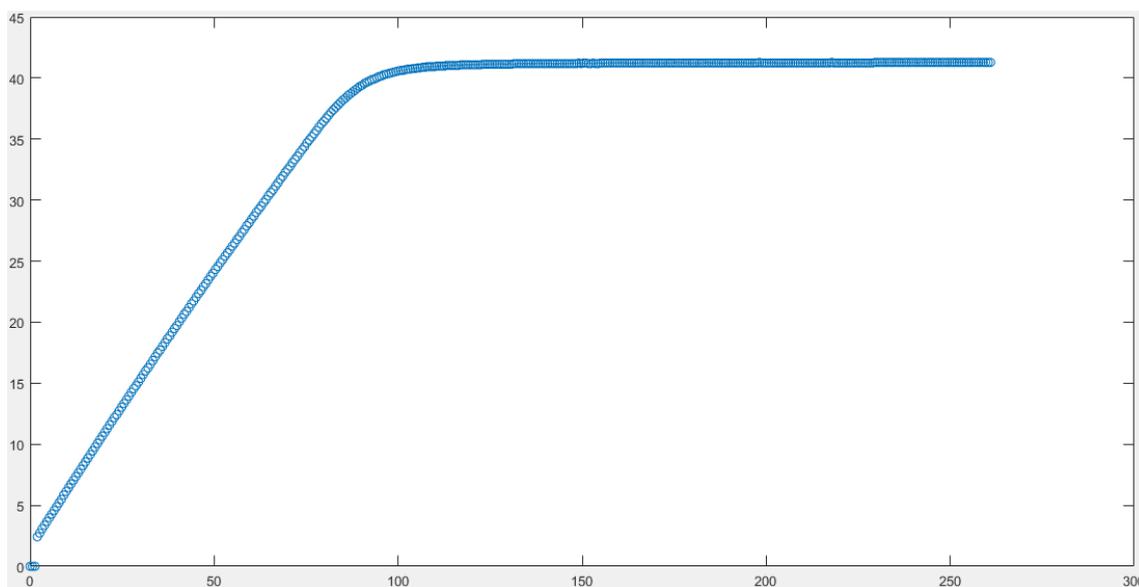


Figura 34 - Tensão *versus* Tempo com baixa irradiância solar. $V_{oc} = 41,28V$ e $I_{sc} = 2,43A$. Fonte: Autor.

Essa figura confirma que em condições reais com o atual método de se ter a aquisição de dados, a 45% do tempo total já é obtido 41,08V, valor muito próximo à tensão V_{oc} (41,28V), evidenciando já estar distante do V_{mp} (33,024V utilizando 80% de V_{oc}).

Dessa forma, mesmo com o funcionamento dessa função de se obter uma maior frequência de dados nos últimos 20% valores de tensão, ele se mostra imperceptível, já que mais de 20% dos valores finais são repetitivos.

3.3 Estratégias para Melhorar a Resolução de Dados no Caracterizador

Considerando as deficiências identificadas na distribuição de dados nas curvas características do módulo fotovoltaico, nessa seção é revelado uma estratégia que tem como objetivo atingir um tempo de aquisição de dados adequado tanto para regiões de alta irradiância quanto para baixa irradiância solar.

3.3.1 Equação para Adquirir o Valor de K Dinâmico

Como ficou exposto no tópico 3.2.2.1, o tempo de aquisição de dados do dispositivo caracterizador se mostra inadequado, principalmente em condições de baixa irradiância, uma vez que a corrente I_{sc} diminui drasticamente, aumentando notadamente esse tempo total. A fim de contornar essa situação, foi proposto um novo modelo para adquirir essa variável, sendo necessário dois ciclos completos do capacitor para isso. Dessa forma, os 400 pontos de tensão e corrente seriam melhor distribuídos, fornecendo mais informações às curvas.

Partindo da equação (20), as grandezas V_{oc} , I_{sc} , 2200 (capacitância), e 1000 (Para ter a resposta em milissegundos) serão todas mantidas, enquanto o valor 7 será chamado de variável K. Essa nova variável será obtida a partir de uma simples regra de três analisada da seguinte forma:

_ Para o valor de K igual a 7 é obtido 400 pontos, e foi verificado que o capacitor atinge o valor V_{oc} muito antes disso.

_ Logo, para atingir algum valor específico de tensão, basta identifica-lo no vetor posição, multiplica-lo por 7 (valor de K utilizado até então), e dividir pelos 400 pontos.

Com base nisso, é obtido a seguinte equação:

$$K = (\text{Posição da tensão no vetor}) * \frac{7}{400} \quad (21)$$

3.3.2 Melhoramento do Valor de K

Na equação (21) foi utilizado valores de tensão para ser identificado no vetor. Esse valor não foi arbitrário, já que os valores de corrente apresentam grandes ruídos devido as limitações

do medidor de corrente do dispositivo. Para ficar mais claro, é exposto as curvas Corrente *versus* Tempo e Tensão *versus* Tempo a seguir:

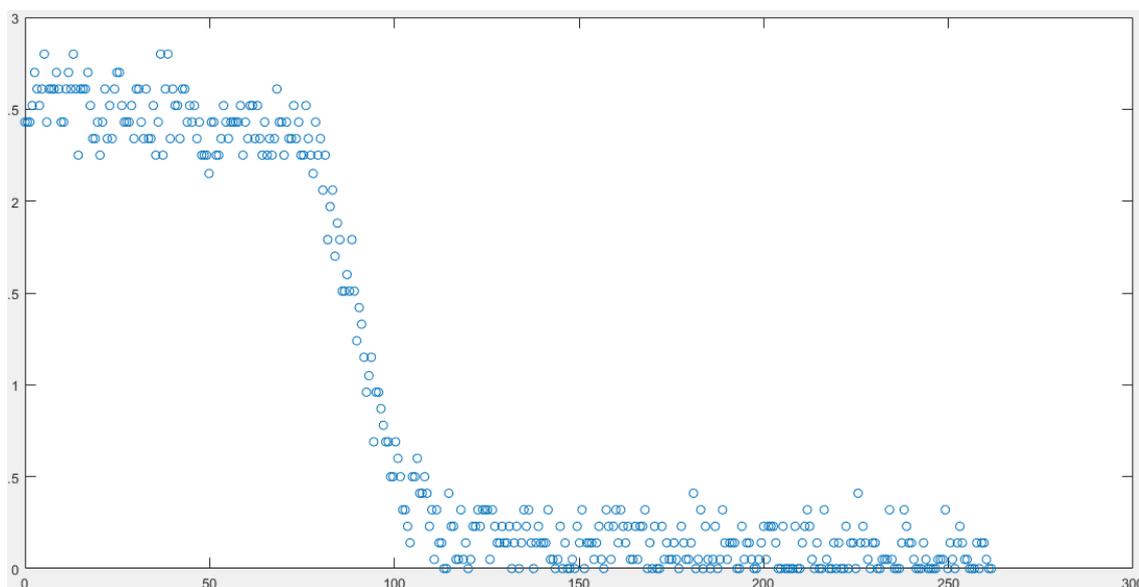


Figura 35 - Corrente *versus* Tempo (em milissegundos). Teste realizado no dia 19/09/2022 às 10:42. Fonte: Autor.

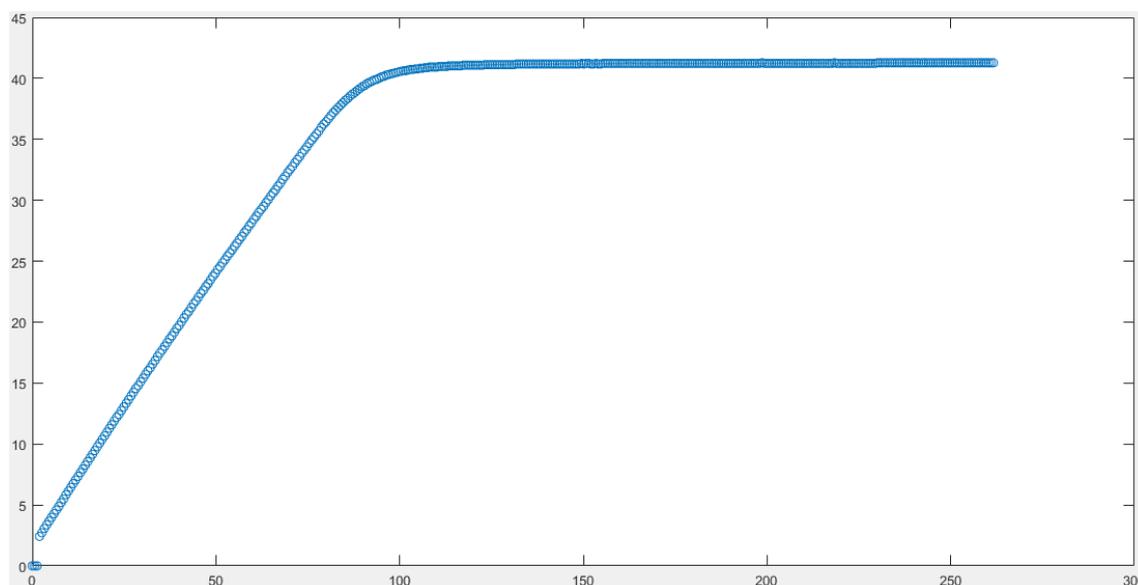


Figura 36 - Tensão *versus* Tempo (em milissegundos). Teste realizado no dia 19/09/2022 às 10:42. Fonte: Autor.

Com as imagens acima é evidente que a curva Tensão x tempo apresenta comportamento mais suave, já que sua medição tem precisão de 0,05V, enquanto a de corrente possui precisão de apenas 0,1A.

Partindo novamente da equação (21), a tensão desejada no vetor seria V_{oc} , no entanto esse valor não se mostra preciso já que a curva de carregamento apresenta uma convergência para

esse valor, fazendo valores muito próximos a ele serem repetidos inúmeras vezes. Partindo dessa afirmação, foi escolhido arbitrariamente o primeiro valor acima de 95% do valor final de tensão (Voc) a fim de filtrar valores repetitivos na convergência da curva. Com isso, a antiga equação fica da seguinte forma:

$$K = (\textit{Posição do vetor no valor } (0,95 * V_{\textit{final}})) * \frac{7}{400} \quad (22)$$

A equação acima apresenta grande dependência do último valor do vetor, que pode ser incorreto caso haja algum ruído considerável nele. Com interesse de reduzir essa dependência, o valor final de tensão é substituído pela média dos últimos 20 pontos, já que mesmo apresentando um considerável ruído em algum valor, a tendência é que os valores restantes sejam muito próximos, contornando essa possível situação. Assim, tem-se:

$$K = (\textit{Posição do vetor no valor } (0,95 * V_{\textit{final_médio}})) * \frac{7}{400} \quad (23)$$

Constatando essas observações, é notado que ainda há uma falha na equação (23). Como é procurado a posição de 95% da média final dos pontos, o último valor de tensão dessa curva não apresentaria o valor Voc. Dessa forma, passa a ser adicionado o número 30 na posição, que para todos os gráficos Tensão x tempo obtidos, foi o suficiente para alcançar a tensão Voc sem o excesso de repetição e conseqüentemente de muitas informações nas curvas.

Dito isso, a equação final utilizada no trabalho é vista a seguir:

$$K = (\textit{Posição do vetor no valor } (0,95 * V_{\textit{final_médio}}) + 30) * \frac{7}{400} \quad (24)$$

3.3.3 Fluxograma da Metodologia

Para que seja possível a aquisição das curvas características melhoradas, é preciso utilizar o dispositivo caracterizador com as propriedades antigas (valor de K igual a 7), obter o novo valor de K utilizando a equação (24) e refazer a leitura. Visando facilitar o entendimento desse método, é mostrado a seguir o fluxograma desse processo.

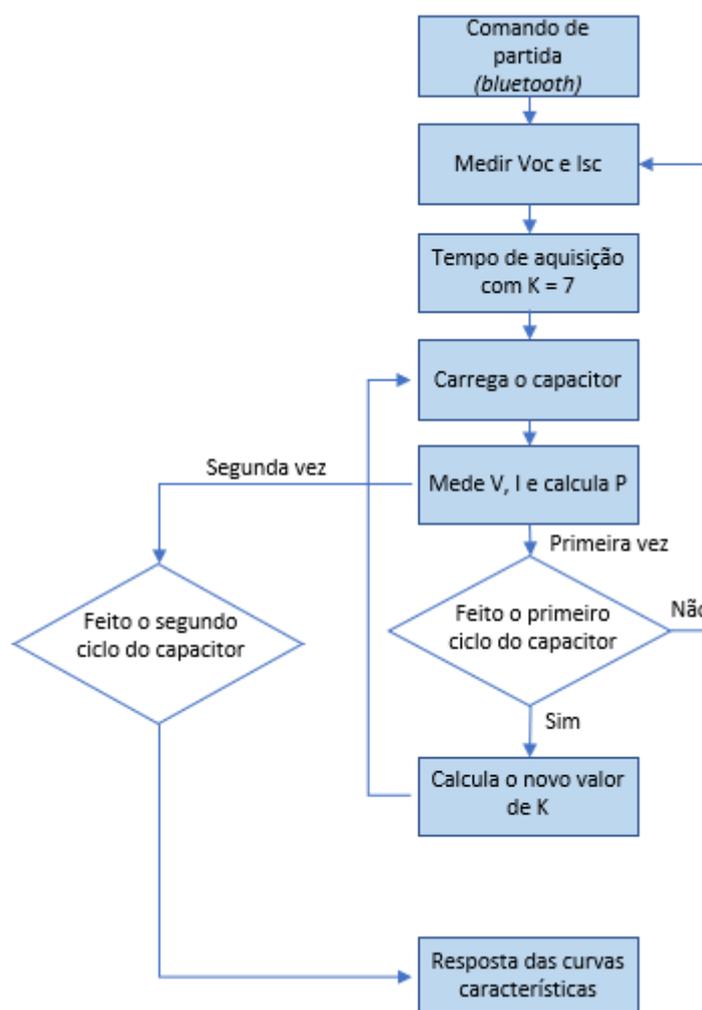


Figura 37 - Fluxograma descritivo da metodologia de aumento de dados nas curvas características de um traçador de curvas. Fonte: Autor.

4. Resultados e Discussões

Verificando o funcionamento do método apresentado no trabalho, foi obtido resultados práticos a partir do dispositivo caracterizador. O tempo da alteração do valor de K para dar início ao segundo ciclo do capacitor e adquirir a resposta final tem que ser levado em consideração, pois mesmo em questão de poucos minutos (cerca de 2 a 3 minutos) as variações de irradiância são consideráveis, trazendo consigo um leve desvio na precisão dos dados recebidos. Cada resultado será apresentado fazendo o comparativo de como esses valores seriam sem alterações e depois das alterações feitas.

4.1 Curvas Características Obtidas com Baixa Irradiância Solar

Os resultados seguintes são apresentados da seguinte forma: Curva de Corrente *versus* Tensão e Potência *versus* Tensão e depois a tabela com os valores de Voc, Vmp, Isc e Imp, com todas as informações adquiridas no aplicativo do caracterizador ainda sem utilizar o método proposto. Em seguida essas mesmas curvas são exportadas para o MATLAB, onde se tem todas as informações alcançadas no carregamento do capacitor. Em sequência todo o procedimento é repetido, no entanto, com o novo valor de K.

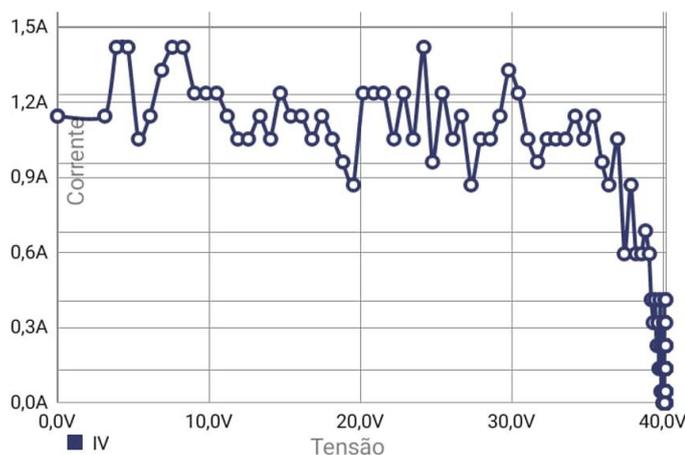


Figura 38 - Curva *versus* Tensão para baixa irradiância obtida pelo aplicativo. Dados obtidos dia 11/11/2022 às 08:40. Fonte: Autor.

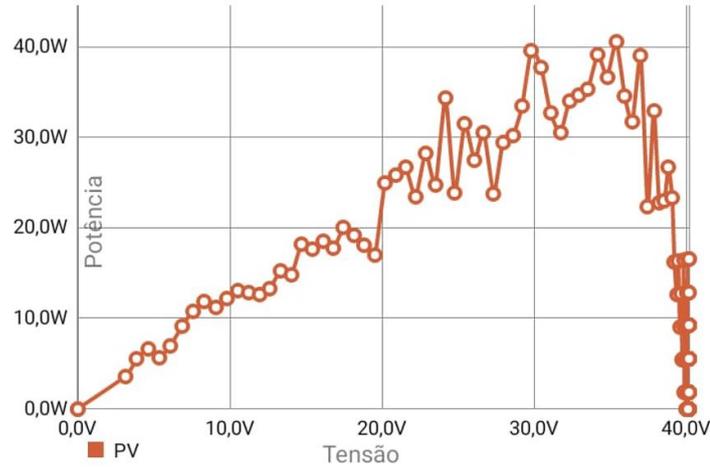


Figura 39 - Curva Potência x Tensão para baixa irradiância solar obtida pelo aplicativo. Dados obtidos dia 11/11/2022 às 08:40. Fonte: Autor.

Tabela 5 - Informações dos pontos de interesse a respeito da Figura 38 e Figura 39. Fonte: Autor.

	Medições
Voc	40.17
Isc	1.15
Vmp	35.39
Imp	1.15

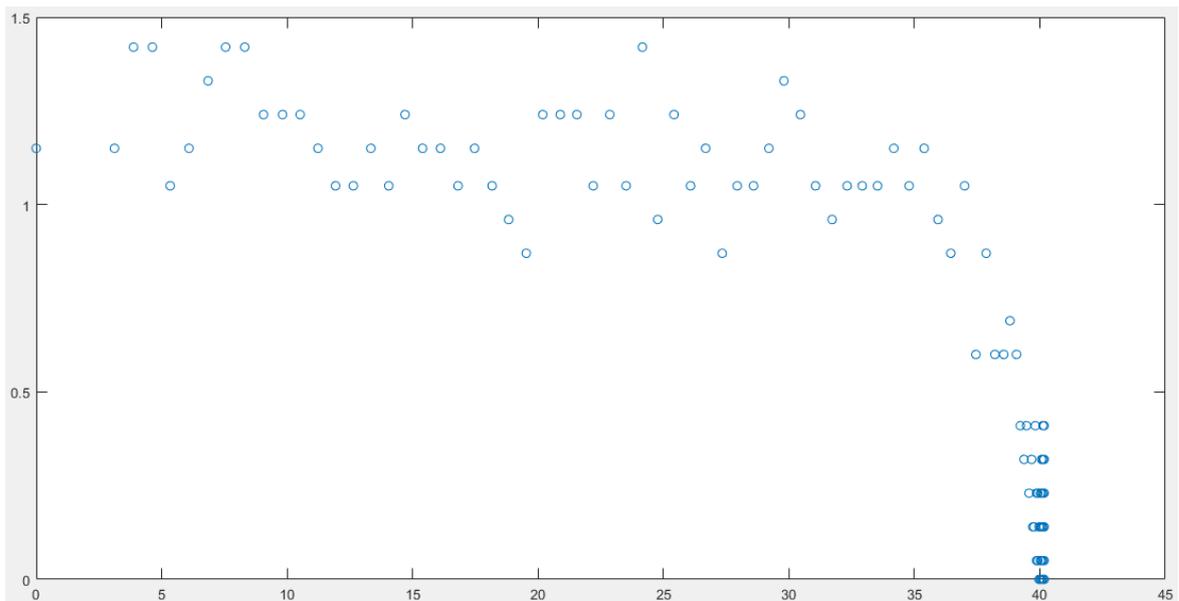


Figura 40 - Curva de Corrente x Tensão a respeito da Figura 38 exportada para o MATLAB. Fonte: Autor.

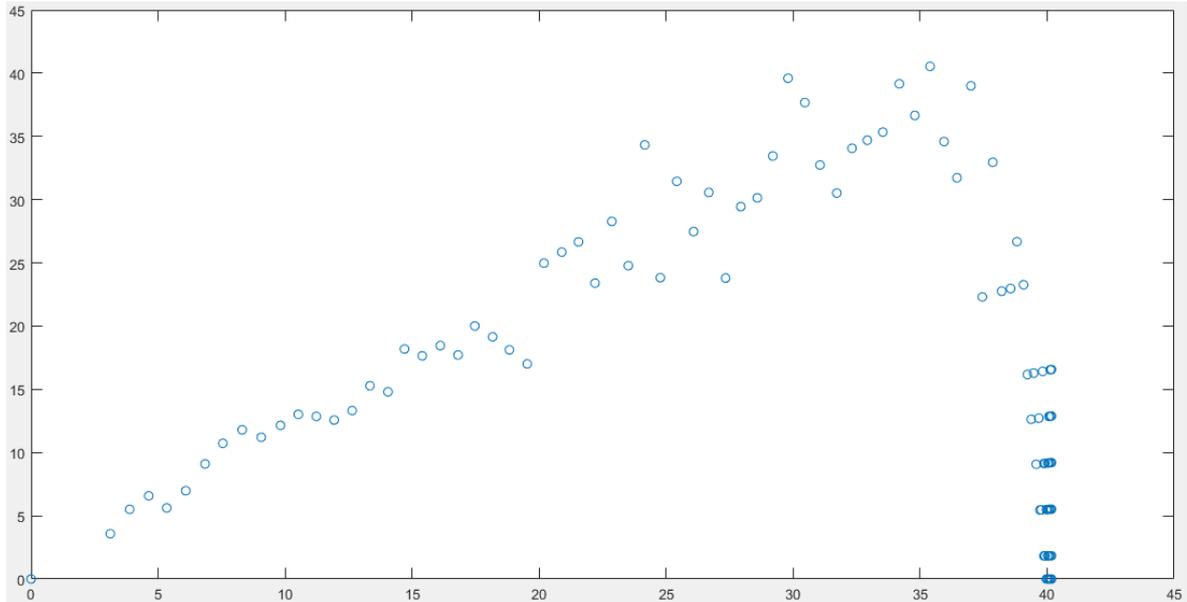


Figura 41 - Curva de Corrente x Tensão a respeito da Figura 39 exportada para o MATLAB. Fonte: Autor.

As curvas seguintes foram obtidas com o novo valor de K. O valor de 95% de Voc foi encontrada na posição 61 do vetor de tensão. Com isso, utilizando a equação (24) o valor de K utilizado foi de 1,6.

58	36,45
59	37
60	37,45
61	37,86
62	38,21
63	38,56
64	38,81

Figura 42 - Identificação do primeiro valor maior que $0,95 \cdot V_{oc}$. Fonte: Autor.

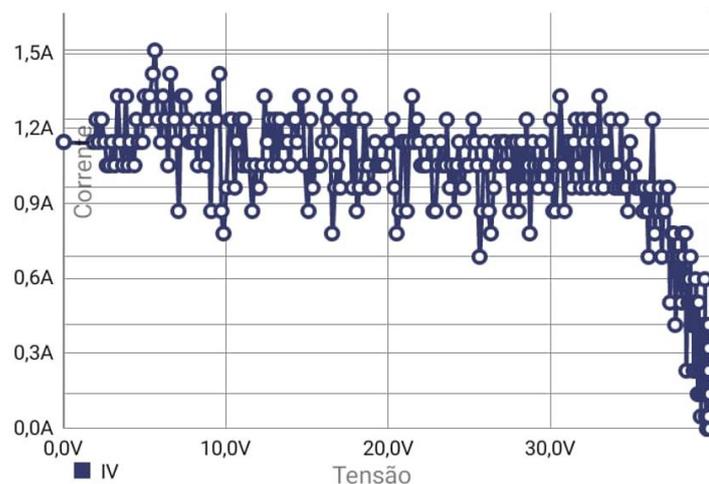


Figura 43 - Corrente x Tensão com o novo valor de K em baixa irradiância. Dados obtidos no dia 11/11/2022 às 08:44. Fonte: Autor.

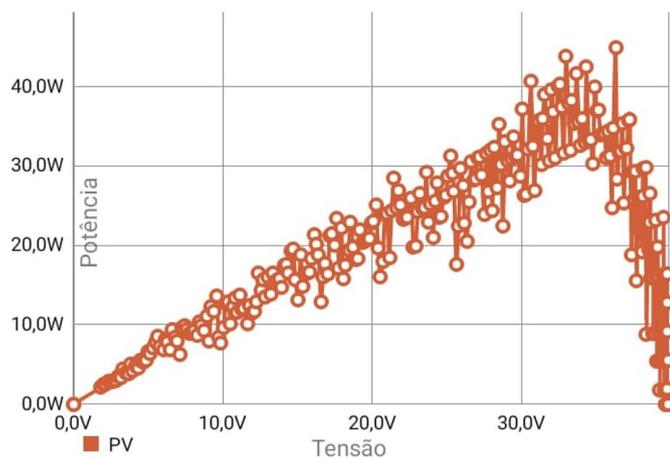


Figura 44 - Potência x Tensão com o novo valor de K em baixa irradiância. Dados obtidos no dia 11/11/2022 às 08:44. Fonte: Autor.

Tabela 6 - Informações dos pontos de interesse a respeito das curvas da Figura 43 e Figura 44. Fonte: Autor.

	Medições
Voc	39.87
Isc	1.15
Vmp	36.3
Imp	1.24

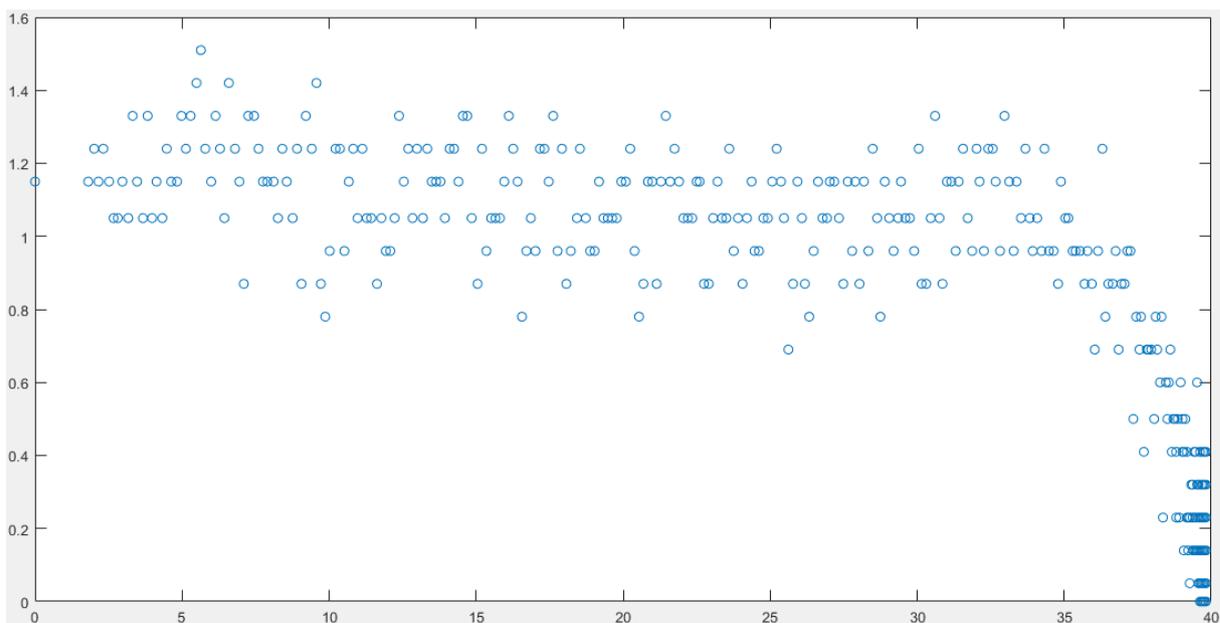


Figura 45 - Curva de Corrente x Tensão a respeito da Figura 43 exportada para o MATLAB. Fonte: Autor.

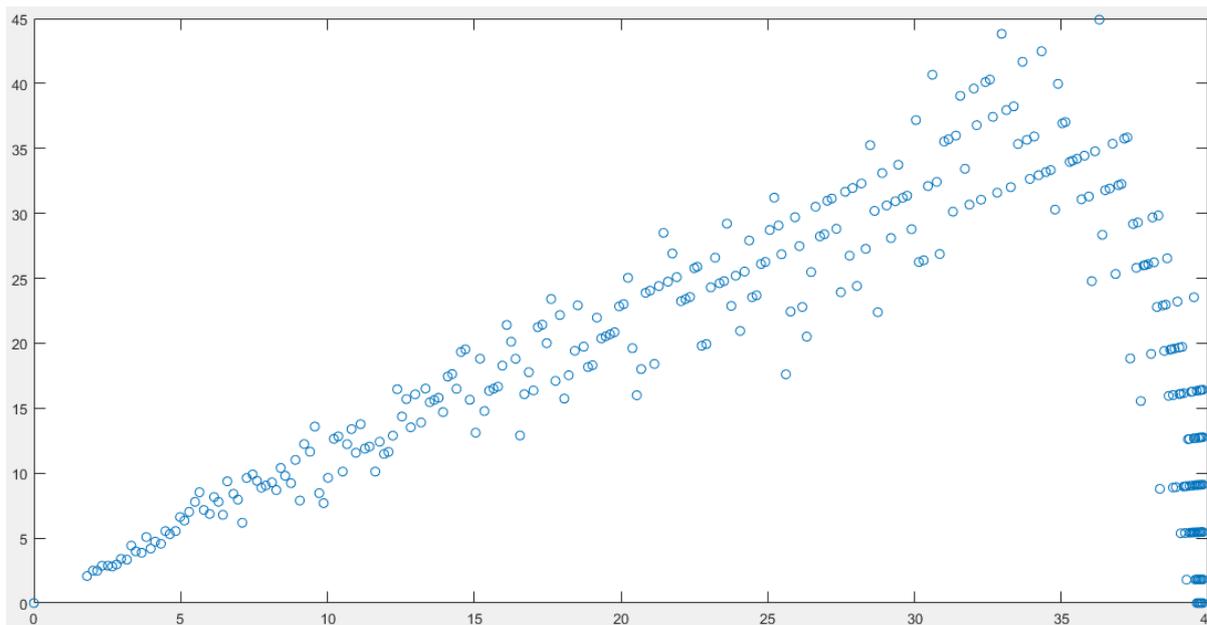


Figura 46 - Curva de Potência x Tensão a respeito da Figura 44 exportada para o MATLAB. Fonte: Autor.

Com base nos gráficos obtidos com os novos valores de K , fica claro que esses apresentam muito mais informações, melhorando a distribuição de dados, já que agora o valor de V_{oc} só é alcançado pela primeira vez na posição 373. Com isso, a fim de comparação, a primeira vez que o valor $V_{oc} - 1V$ é alcançado com o valor de K igual a 7, é na posição 66, enquanto no novo método é encontrado na posição 271.

Para melhor entendimento, nas antigas condições apenas 16,5% da curva apresentava variação de zero a $-1V$ do valor V_{oc} médio. Agora, 93,25% da curva apresenta essa mesma variação de tensão.

4.2 Curvas em Condições de Alta Irradiância Solar

A seguir é mostrado resultados a respeito de alta irradiância solar, com o valor de I_{sc} igual a 10,68 A e V_{oc} igual a 42,24 V.

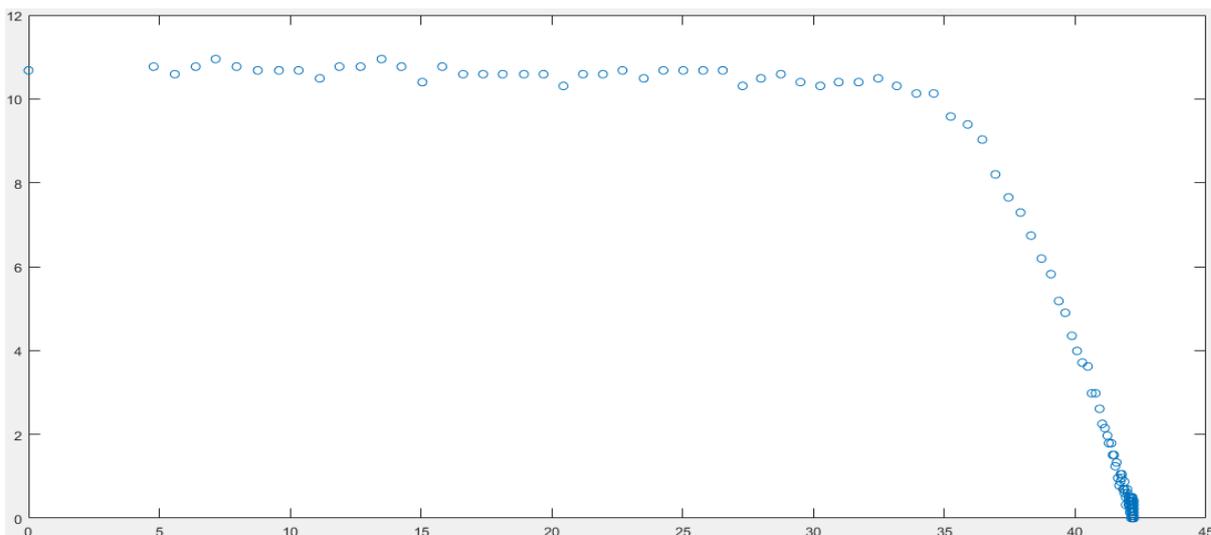


Figura 47 - Curva I x V para alta irradiância solar com dados exportados para o MATLAB. Dados obtidos no dia 18/11/2022 às 10:20. Fonte: Autor.

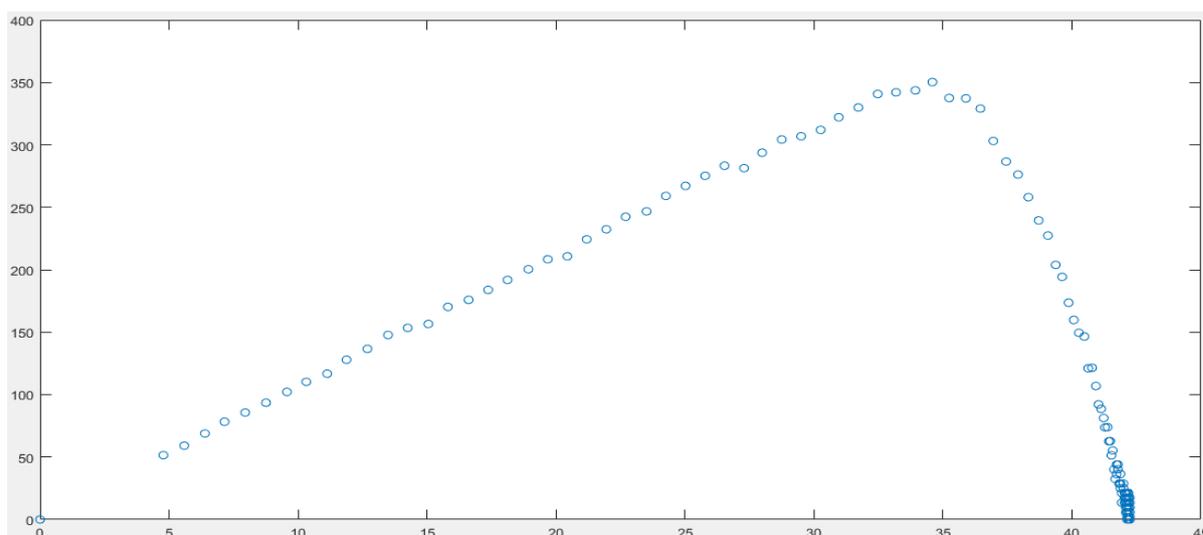


Figura 48 - Curva P x V para alta irradiância com dados exportados para o MATLAB. Dados obtidos no dia 18/11/2022 às 10:20. Fonte: Autor.

Os gráficos abaixo foram plotados instantes depois da medição acima. Foi adquirido com o valor I_{sc} igual a 10,59 A e 41,48 V. O valor de K encontrado foi igual a 3.

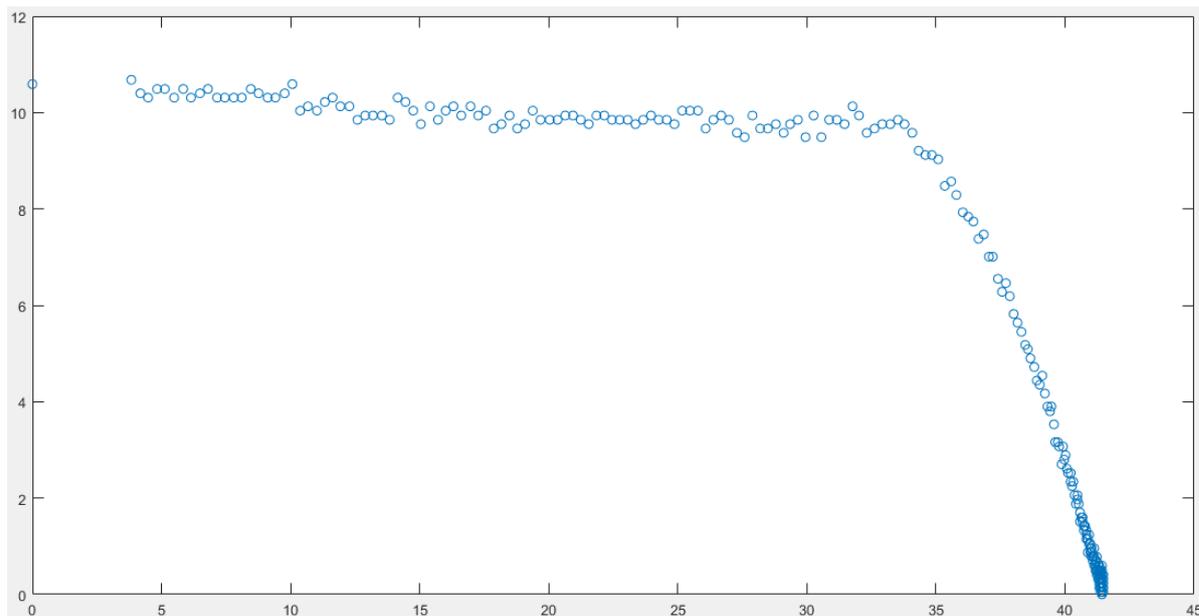


Figura 49 - Curva I x V para alta irradiância com $K = 3$. Dados obtidos no dia 18/11/2022 às 10:38. Fonte: Autor.

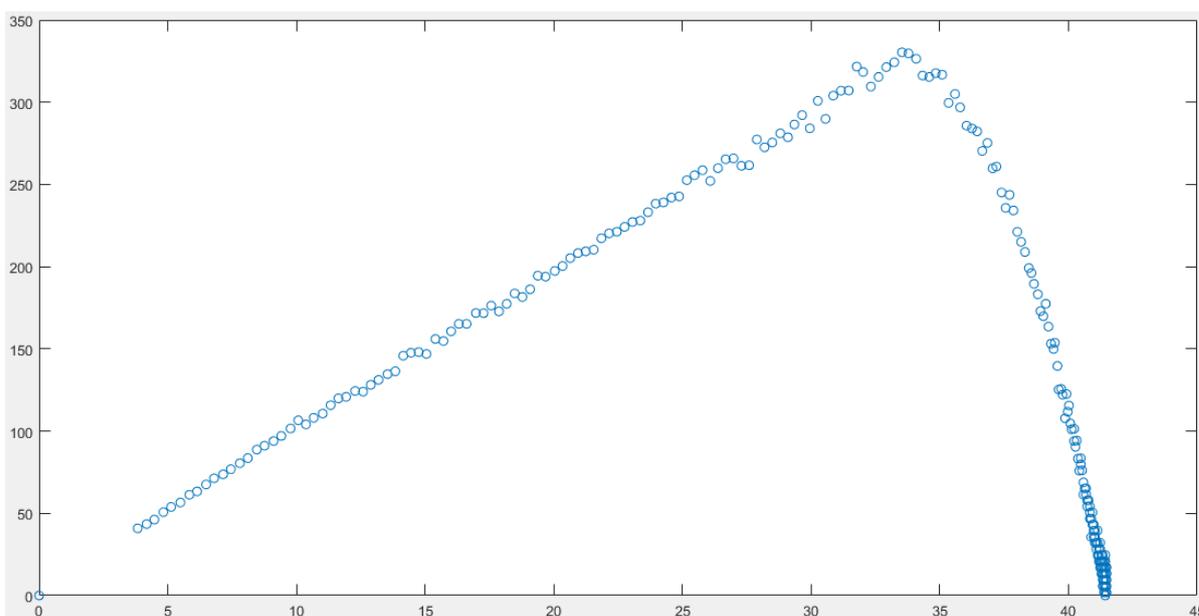


Figura 50 - Curva P x V para alta irradiância solar com $K = 3$. Dados obtidos dia 18/11/2022 às 10:38. Fonte: Autor.

4.2.1 Tempo Mínimo de Aquisição do Microcontrolador

Como já foi observado na Figura 47, Figura 48, Figura 49 e Figura 50, em condições de alta irradiação solar, o tempo de aquisição apresenta valores significativamente menor para baixa irradiância, visto que essa influência será notada no valor I_{sc} que é encontrado no

denominador da equação (24). Com isso, no momento em que o novo valor de K é encontrado, para todos os casos resultará em um tempo de aquisição menor do que K igual a 7.

É sabido que o tempo de aquisição total é na maioria das vezes encontrado na escala dos milissegundos, no entanto, o período de cada ponto pode ser encontrado na escala dos microssegundos, já que se trata do tempo de aquisição total dividido pelos 400 pontos de tensão e corrente. Dessa forma, foi atingido o tempo mínimo de aquisição de dados, onde se encontra dados inconclusivos para tempos de aquisição muito curtos, que serão verificados a seguir:

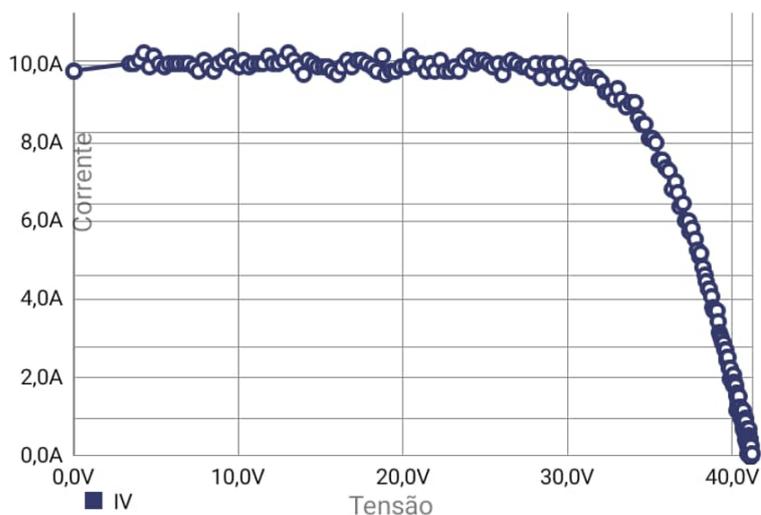


Figura 51 - Curva I x V com ISC = 9,85 A e Voc = 41,23 V. Dados adquiridos no dia 18/10/2022 às 10:47. Fonte: Autor.

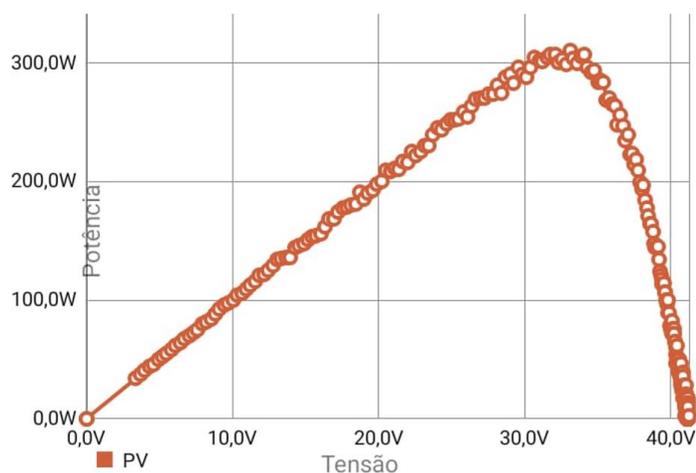


Figura 52 - Curva P x V com Isc = 9,85 A e Voc = 41,23 V. Dados adquiridos no dia 18/10/2022 às 10:47. Fonte: Autor.

Os resultados acima foram adquiridos no primeiro ciclo do capacitor, ou seja, com valor de K igual a 7. Com base nos valores obtidos e utilizando a equação de K , o valor de resposta para essa variável foi de 2,89. Com essa mudança feita, nota-se os dados inconclusivos nos resultados seguintes:

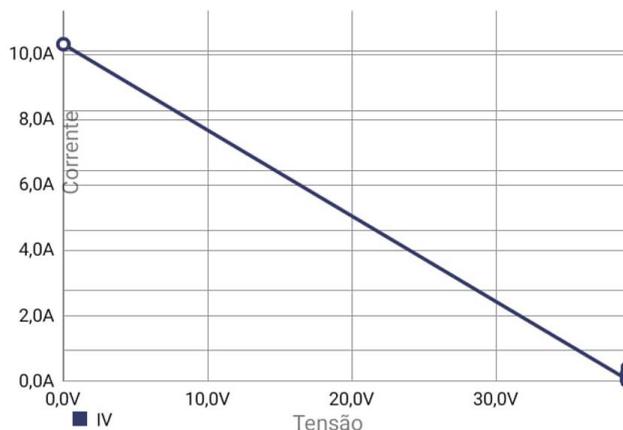


Figura 53 - Curva I x V com $I_{sc} = 10,31$ e $V_{oc} = 39,17$. Dados adquiridos no dia 18/10/2022 às 10:25. Fonte: Autor.

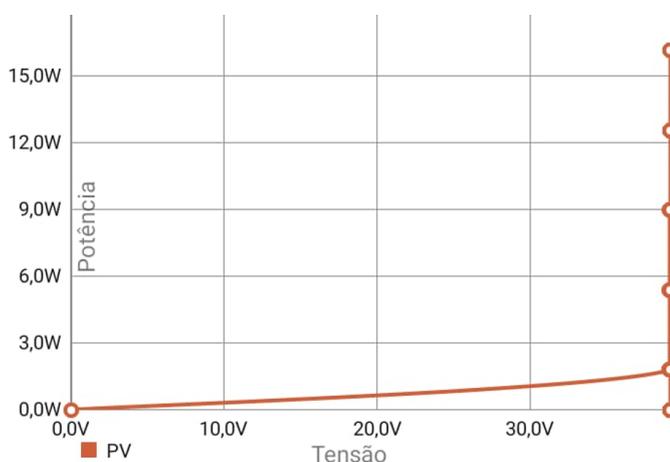


Figura 54 - Curva P x V com $I_{sc} = 10,31$ A e $V_{oc} = 39,17$ V. Dados adquiridos no dia 18/10/2022 às 10:25. Fonte: Autor.

Utilizando a equação do tempo de aquisição total partindo dos dados do teste acima e com o K de 2,89, o resultado é o tempo de 24,16 ms. Depois de refeito vários testes, foi validado que para tempos menores que 25ms o microcontrolador apresenta falhas, já que atinge seu limite na aquisição de cada ponto, que é de 62,5 μ s (frequência máxima de 16kHz). Com isso, foi adicionado no programa do PIC um tempo mínimo de aquisição de 25ms, ou seja, para casos em que o K resultante atinge valores menores que esse tempo total, o K não tem mais participação na nova leitura, sendo considerado apenas os 25 ms.

Para as condições do painel utilizado nesse experimento (de 330Wp), o tempo mínimo de 25ms não apresenta perdas significativas em suas curvas características. No entanto, no caso da utilização de painéis de maiores potências, esse tempo poderia ser muito grande comparado ao tempo de carregamento do capacitor, acarretando em perdas de informação, sugerindo uma troca no microcontrolador utilizado nesse trabalho.

Como parâmetro, um módulo de 550Wp da DAH (Solar D. , 2018), em condições ideais ele apresenta um Voc de 50,2 V e Isc de 13,78 A. Utilizando o valor de K igual a 1 a fim de obter uma estimativa de uma condição ideal, o tempo de aquisição seria de 8,01 milissegundos, revelando que aproximadamente apenas um terço dessa curva seria utilizável.

4.2.2 Ineficiência da Variação de Frequência na Região Não Linear da Curva I x V

Como foi mencionado no tópico 3.2.2. houve um estudo acerca das regiões lineares e não-lineares, com o objetivo de concentrar 2/3 dos pontos nos últimos 20% dos valores de tensão. Entretanto, com a diminuição do valor de K, foi notado uma limitação no microcontrolador na transição dessas regiões, perdendo informações importantes sobre o ponto de máxima potência, como apresentado nas figuras a seguir:

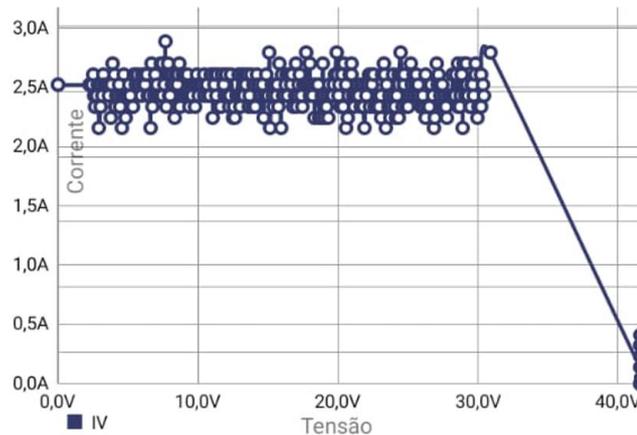


Figura 55 - Curva I x V com Isc = 2,52 A e Voc = 41,73 V. Dados adquiridos no dia 19/09/2022 às 10:21. Fonte: Autor.

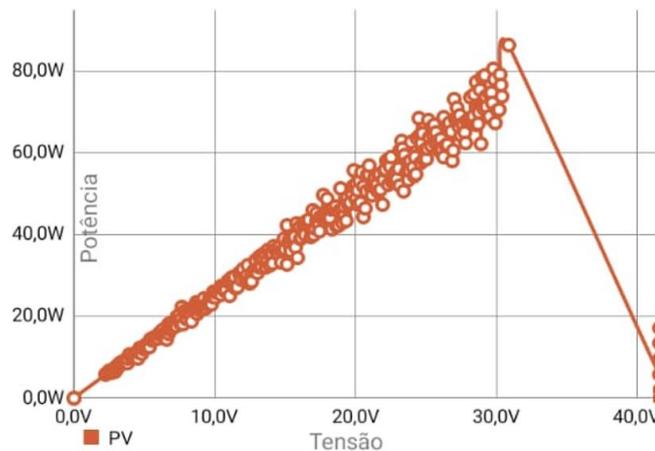


Figura 56 - Curva P x V com Isc = 2,52 A e Voc = 41,73 V. Dados adquiridos no dia 19/09/2022. Fonte: Autor.

Como a frequência de dados já foi aumentada devido ao menor período de aquisição de dados, e visando contornar a perda de informação vista acima, a função de variar a frequência de informação ao longo da curva foi removida, sem acarretar em perdas significativas na resolução da curva final.

4.3 Curvas para Sombreamento Parcial do Módulo Fotovoltaico

Nos testes seguintes é feita a análise das curvas características com sombreamento parcial (1/3 das células) com o antigo valor de K e com o valor atual.

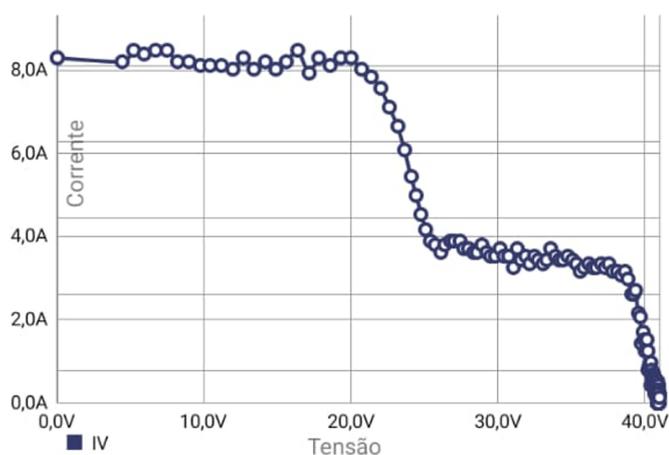


Figura 57 - Corrente versus Tensão em condições de sombreamento parcial. Dados obtidos no dia 28/11/2022 às 10:20. Fonte: Autor.

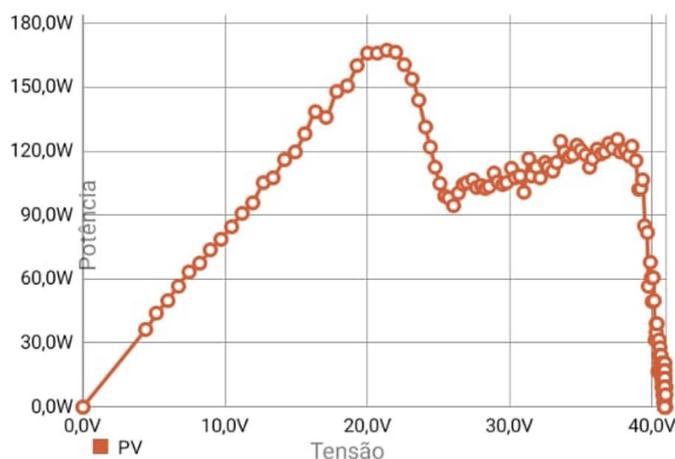


Figura 58 - Potência versus Tensão em condições de sombreamento parcial. Dados obtidos no dia 28/11/2022 às 10:20. Fonte: Autor.

Tabela 7 - Medições dos pontos de interesse das curvas da Figura 57 e Figura 58. Fonte: Autor.

Medições	
Voc	40.98
Isc	8.29
Vmp	21.35
Imp	7.84

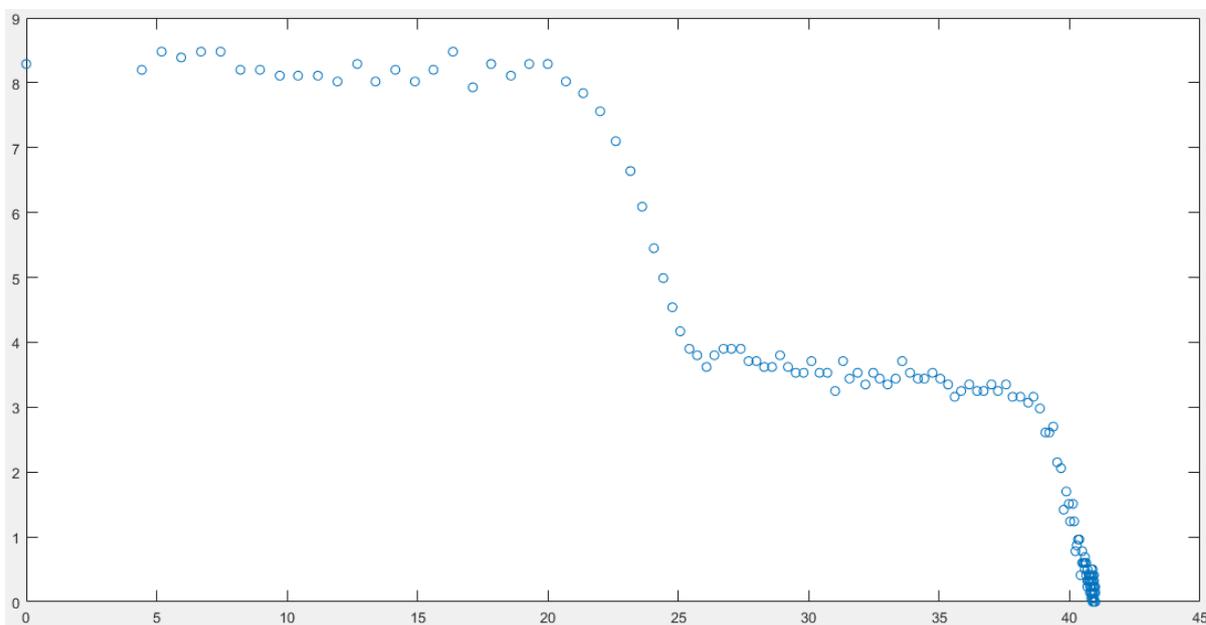


Figura 59 - Curva de I x V da Figura 57 exportada ao MATLAB. Fonte: Autor.

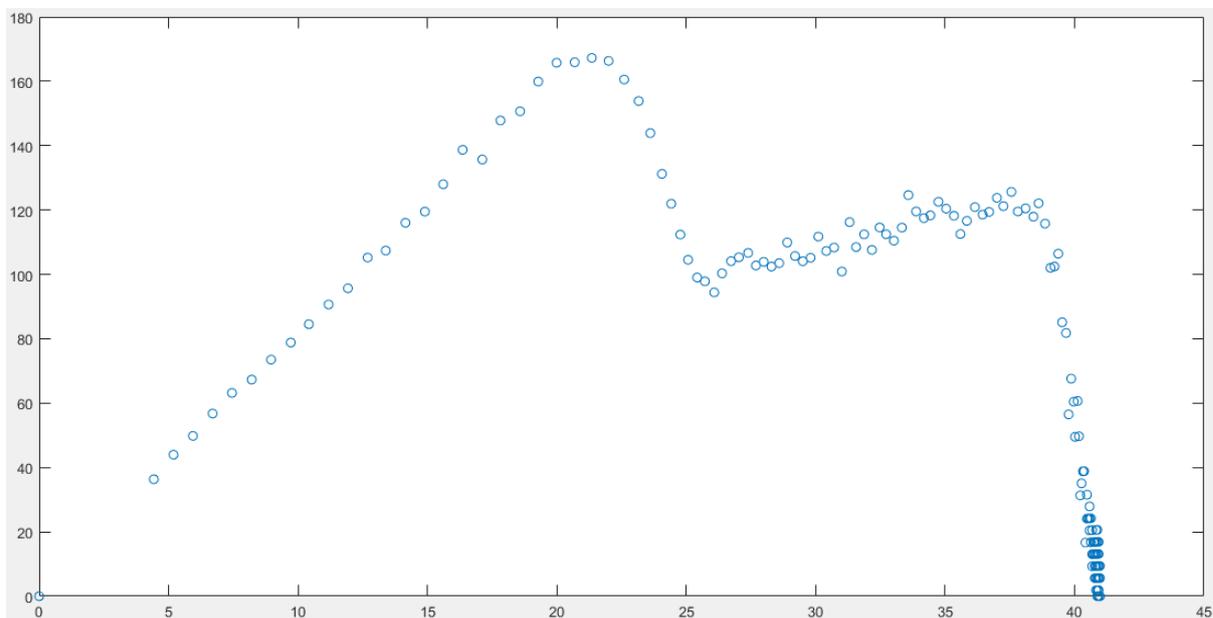


Figura 60 - Curva de P x V da Figura 58 exportada ao MATLAB. Fonte: Autor.

Com base nos valores obtidos acima, é concluído que os resultados obtidos apresentam o mesmo comportamento da curva ideal para a condição de sombreamento parcial, no entanto, possui a mesma deficiência das curvas anteriores com grande concentração dos valores próximos a V_{oc} no fim da curva. Utilizando de parâmetro o valor de $V_{oc} - 1V$ (39,98V), seu valor é encontrado já na posição 95, revelando que foi utilizado apenas 23,75% dos dados para descrever 97,56% da variação total de tensão.

Seguidamente, é visto os resultados feitos em sequência do teste acima com o valor de K igual a 2,6, resultado da equação (24). Dessa forma, tem-se:

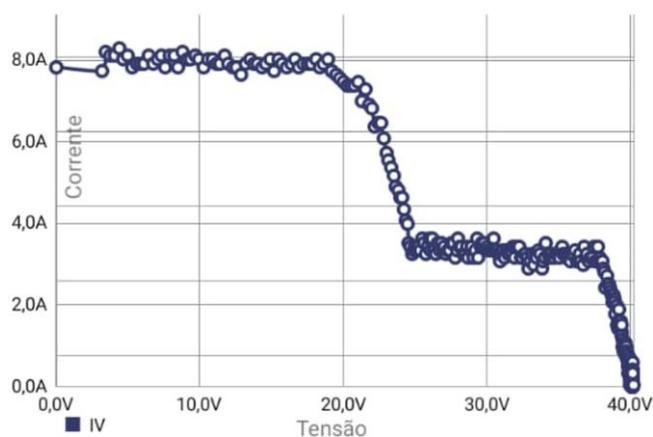


Figura 61 - Curva I x V em condições de sombreamento com $K=2,6$. Dados adquiridos no dia 28/11/2022 às 10:24. Fonte: Autor.

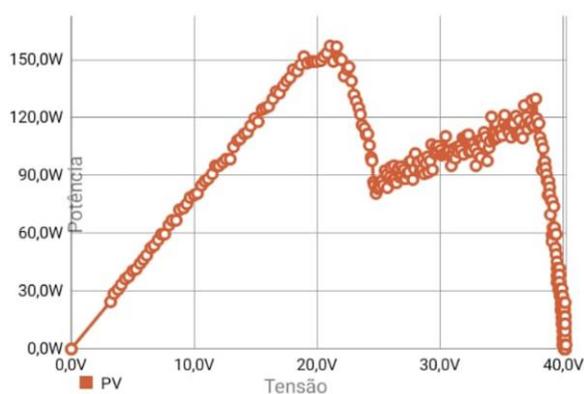


Figura 62 - Curva P x V em condições de sombreamento com $K=2,6$. Dados adquiridos no dia 28/11/2022 às 10:24. Fonte: Autor.

Tabela 8 - Condições dos valores de interesse das curvas na Figura 61 e Figura 62. Fonte: Autor.

Medições	
Voc	40.27
Isc	7.84
Vmp	21.04
Imp	7.47

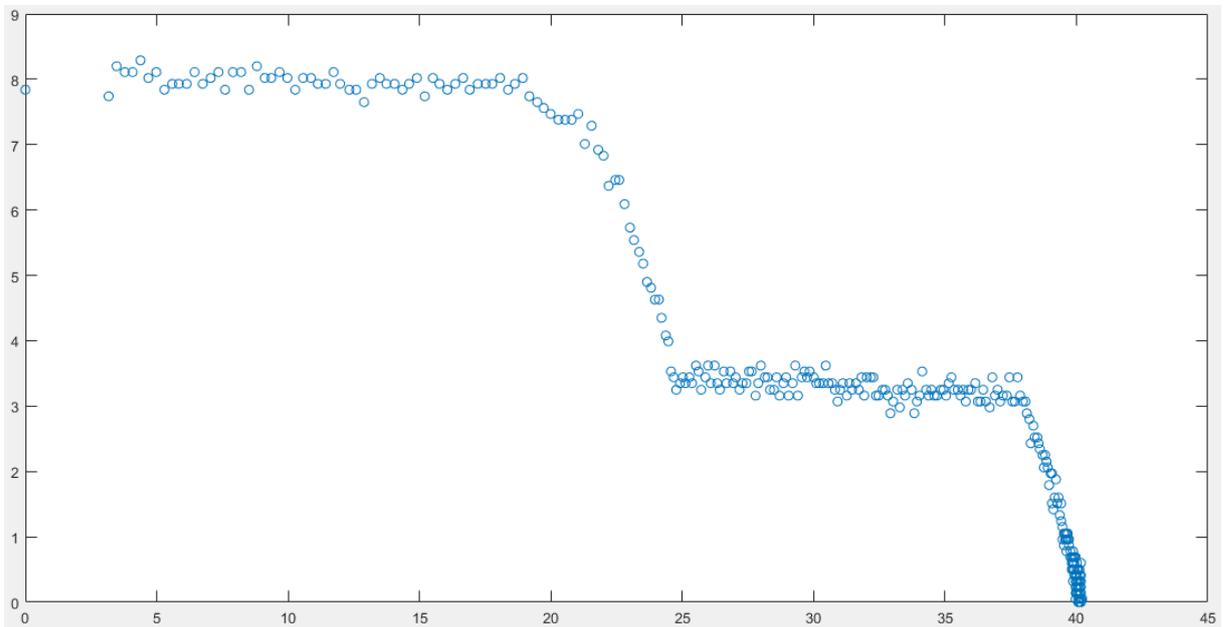


Figura 63 - Curva de I x V da Figura 61 exportada ao MATLAB. Fonte: Autor.

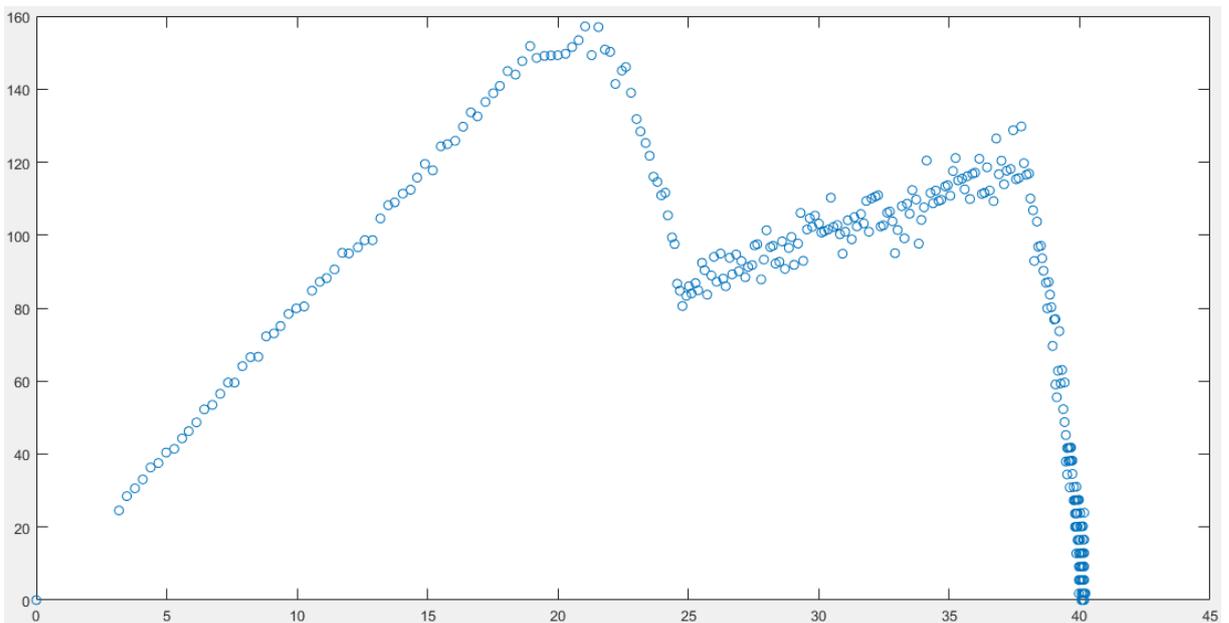


Figura 64 - Curva de I x V da Figura 62 exportada ao MATLAB. Fonte: Autor.

As imagens acima também apresentam dados significativamente próximos da curva teórica do painel sob condições de sombreamento. No entanto, é notado que nesse teste houve maior densidade de informações ao longo da variação de tensão.

Novamente utilizando a tensão de $V_{oc} - 1V$ a fim de filtrar os valores repetitivos ao longo da convergência da curva $I \times V$, essa posição é encontrada na localização 229. Dessa forma, 57,25% da curva é utilizada para descrever a variação de 97,5% do valor de tensão.

Com esses resultados é possível notar que para condições de sombreamento o método da variação do valor de K não apresenta uma melhora tão significativa comparado a condições de nenhum sombreamento. Porém, ainda apresenta grande melhora em relação aos testes feitos com o K igual a 7.

5. Conclusões e Propostas de Continuidade

Com a relevância cada vez maior da energia fotovoltaica, os caracterizadores fotovoltaicos também ganham relevância, precisando cada vez mais descrever as curvas com grande precisão para garantir a maior eficiência possível no seu uso.

Depois de ser visto nesse trabalho uma grande melhora na quantidade de informações acerca das curvas, especialmente para condições de baixa irradiância solar, seria interessante o desenvolvimento da suavização da curva a fim de descrevê-las de forma mais próxima da realidade, sem a variação considerável notada principalmente nos valores de corrente.

Com isso, fica claro que também é necessário a utilização de sensores de corrente mais precisos, pois a margem de 0,1 A tem influência muito expressiva nos valores de baixa irradiação, que fica em torno dos 2 A.

Além disso, outra limitação identificada foi no processamento do microcontrolador aqui utilizado referente ao tempo de aquisição de cada ponto da curva. Nas condições do trabalho, com uma placa de 330Wp, sua troca não acarretaria numa melhora significativa, porém, com o intuito de se ter um dispositivo que funcione bem para quaisquer painéis, seria interessante a substituição para um microcontrolador mais rápido.

Cabe destacar também a necessidade da utilização de alguma inteligência que interprete as possíveis causas da geração de energia não estar em seu máximo desempenho, a partir da interpretação automática das curvas, com o propósito de facilitar o entendimento do problema para quem não possui conhecimentos prévios a respeito da energia solar.

Finalmente, cabe ressaltar a importância de se fazer os dois ciclos do capacitor com a segunda leitura com o valor adequado de K de forma automática, visto que por mais que o processo de adquiri-lo seja rápido, as variações climáticas podem mudar em segundos, fazendo o novo valor de K já não ser mais o adequado para tais condições.

6. Referências Bibliográficas

- BIG. (2016). *Banco de informações de Geração*. ANEEL.
- BRITO, E. M. (2014). *CONSTRUÇÃO DE UM CARACTERIZADOR SOLAR BASEADO EM*. Viçosa: UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA.
- BRITO, E. M. (2016). *ANALISADOR DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE PAINEL FOTOVOLTAICO*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.
- BRITO, E. M., PEREIRA, H. A., RIBEIRO, A., & CUPERTINO, A. F. (2016). *Caracterização De Curvas De Páíséis Fotovoltaicos Baseado Ew Carga Capaciiva: AÝálise Do TraÝsitório*. Belo Horizonte: VI CoÝgresso Brasileiro de EÝergia Solar.
- Bühler, A. J. (2011). *Estudo de Técnicas de Determinação Experimental e Pós-Processamento de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CARLETTE, L. P. (2015). *COMPARAÇÃO DE ALGORITMOS DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA CARREGAMENTO DE BATERIAS EM*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.
- Carneiro, J. (2010). *MÓDULOS FOTOVOLTAICOS - Características e Associações*. Campus de Azurém: Universidade do Minho.
- DAGOSTIN, C. S. (2021). *ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO SOLAR PARA*. Porto Alegre: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.
- E. Durán, M. P.-d.-C. (2008). *DIFFERENT METHODS TO OBTAIN THE I-V CURVE OF PV MODULES: A REVIEW*. Huelva: Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference.
- ENEM, P. (2020). *Efeito Fotoelétrico*. Prepara ENEM.
- Energia, M. d. (2021). *Balanco Energético Nacional*. Brasília: EPE.
- GOV. (2022). *Geração solar deve crescer acima de 60% em 2021*. GOV.
- IEA. (2021). *Share of top producing countries in total processing of selected minerals and fossil fuels*. IEA.
- Lopes, T. A. (2021). *Caracterizador de Módulos Fotovoltaicos*. Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
- Mahmoud, M. (2014). *Transaminase perturbation in certain tissues of Schistocerca gregaria*. Cairo: Al-Azhar University.
- OLIVATI, C. D. (2000). *Efeito Fotovoltaico e Fotocondutividade em Dispositivos Poliméricos*. São Carlos: USP.
- Solar, B. E. (2022). *Célula Fotovoltaica*. BlueSol.
- Solar, D. (2018). *DHM-72X10*. Heifei: DAH Solar.
- Solar, J. (2015). *Eagle 72P 320-340 Watt*. Jinkosolar.
- Solar, P. (2017). *Energia solar tem grande crescimento em Países em desenvolvimento*. Portal Solar.
- SolarGIS. (2022). *iMaps*. SolarGis.
- Viglus, F. J. (2015). *PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM EMULADOR DE ARRANJO FOTOVOLTAICO UTILIZANDO UM CONVERSOR CC-CC TRIFÁSICO PWM*. Ponta Grossa: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ.
- Villalva, M. G. (2010). *Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica*. Campinas: UNICAMP.