



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**UNIDADE ARAXÁ**

**ULLISSES ZOROASTRO CUNHA DE CARVALHO**

**MÉTODO PARA CORREÇÃO DE CURVAS DE POTÊNCIA EM MÓDULOS  
FOTOVOLTAICOS**

ARAXÁ/MG

2023

**ULLISSES ZOROASTRO CUNHA DE CARVALHO**

**MÉTODO PARA CORREÇÃO DE CURVAS DE POTÊNCIA EM PAINÉIS  
SOLARES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Automação Industrial, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientadora: Profa. Dra. Aline Fernanda Bianco Mattioli.

ARAXÁ/MG

2023



ATA Nº 10 / 2023 - DFGAX (11.57.03)

Nº do Protocolo: 23062.059637/2023-88

Araxá-MG, 05 de dezembro de 2023.

**Ata de Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Automação Industrial do Aluno Ullisses Zoroastro Cunha de Carvalho**

Às **dezoito horas** do dia **quatro de dezembro de dois mil e vinte e três**, reuniu-se, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG/ Campus Araxá, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado **Método para correção de curvas de potência em painéis solares**, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial. Abrindo a sessão, a Presidente da Comissão, **Profª. Aline Fernanda Bianco Mattioli**, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, concedeu a palavra ao candidato, **Ullisses Zoroastro Cunha de Carvalho**, para a exposição de seu trabalho. Após a apresentação, seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Ultimada a arguição, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Após a reunião da Comissão Examinadora, o candidato foi considerado: **APROVADO**, obtendo nota final de: **95/100 (noventa e cinco)**. O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pela Presidente da Comissão. O aluno, abaixo assinado, declara que o trabalho ora identificado é da sua autoria material e intelectual, excetuando-se eventuais elementos, tais como passagens de texto, citações, figuras e datas, desde que devidamente identificadas a fonte original. Declara ainda, neste âmbito, não violar direitos de terceiros. Nada mais havendo a tratar, a Presidente encerrou os trabalhos. O Prof. Leandro Resende Mattioli, responsável pela disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, lavrou a presente ATA, que, após lida e aprovada, será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora e pelo candidato.

Araxá, **04 de dezembro de 2023.**

Assinado eletronicamente por:

- Presidente e Orientador: Profª. Aline Fernanda Bianco Mattioli
- Membro Titular: Prof. Carlos Antonio de Medeiros
- Membro Titular: Profª. Joice Kamila Alves
- Professor da Disciplina TCC 2: Prof. Leandro Resende Mattioli
- Aluno: Ullisses Zoroastro Cunha de Carvalho

(Assinado digitalmente em 06/12/2023 12:59 )  
ALINE FERNANDA BIANCO MATTIOLI  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DFGAX (11.57.03)  
Matrícula: 2720850

(Assinado digitalmente em 06/12/2023 19:48 )  
CARLOS ANTONIO DE MEDEIROS  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DFGAX (11.57.03)  
Matrícula: 1373519

(Assinado digitalmente em 07/12/2023 10:38 )  
Joice Kamila Alves  
PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO  
DFGAX (11.57.03)  
Matrícula: 3299869

(Assinado digitalmente em 08/12/2023 07:12 )  
LEANDRO RESENDE MATTIOLI  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DELMAX (11.57.05)  
Matrícula: 2973183

(Assinado digitalmente em 06/12/2023 13:03 )  
Ullisses Zoroastro Cunha de Carvalho  
DISCENTE  
Matrícula: 201514550326

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número:  
**10**, ano: **2023**, tipo: **ATA**, data de emissão: **05/12/2023** e o código de verificação: **d2aefec82a**

## RESUMO

As energias renováveis estão ganhando cada vez mais destaque na matriz elétrica global. A facilidade de renovação, a redução de impactos ambientais e a escassez de recursos naturais, como petróleo, gás natural e carvão mineral, impulsionaram um novo mercado de geração de energia renovável, com destaque para energia fotovoltaica. Nesse sistema, a geração de energia ocorre por meio da transformação dos raios solares em eletricidade, utilizando módulos fotovoltaicos. Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho é apresentar um conhecimento científico sobre esse modelo de geração de energia, abrangendo toda a estrutura até a parte matemática. Para isso, realizou-se uma pesquisa com base em um *Datasheet* de um módulo fotovoltaico, obtendo dados relevantes para aplicação de modelos matemáticos na correção de curvas de potência. Utilizando *softwares* como QCAD, GNUPLOT e Matlab, foram geradas as curvas de potência, permitindo avaliar e demonstrar como cada modelo matemático se comporta em relação ao gráfico apresentado no *Datasheet*. Os resultados desta pesquisa mostraram que todos os ajustes tiveram um desempenho excelente, conforme a análise dos erros de cada um, sendo que o ajuste por Regressão Não Linear via Método dos Mínimos Quadrados obteve uma melhor resposta através da obtenção de um polinômio de grau 6.

**Palavras-chave:** energias renováveis; energia fotovoltaica; modelos matemáticos; curva de potência.

## ABSTRACT

Renewable energies are gaining increasing prominence in the global electrical grid. The ease of renewal, the reduction of environmental impacts, and the scarcity of natural resources such as oil, natural gas, and coal have driven a new market for renewable energy generation, with a focus on photovoltaic energy. In this system, energy generation occurs through the transformation of solar rays into electricity, using photovoltaic modules. In this scenario, the objective of this work is to present scientific knowledge about this energy generation model, covering the entire structure up to the mathematical aspects. To achieve this, research was conducted based on a *Datasheet* of a photovoltaic module, extracting relevant data for application in mathematical models for power curve corrections. Using *software* such as QCAD, GNUPLOT and Matlab, power curves were generated to evaluate and demonstrate how each mathematical model behaves in relation to the presented graphs. The results of this research indicated that all adjustments performed exceptionally well, as evidenced by the analysis of the errors associated with each one, where the adjustment via the Nonlinear Regression using Least Squares Method obtaining a better response by obtaining a polynomial of degree 6.

**Keywords:** renewable energies; photovoltaic energy; mathematical models; power curve.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica .....                                | 14 |
| Figura 2 - Estrutura física de um módulo fotovoltaico.....                                  | 15 |
| Figura 3 - Ranking dos painéis solares mais eficientes do mercado .....                     | 16 |
| Figura 4 - <i>Datasheet</i> módulo solar Luxen modelo M10/182mm Cell . 144 Half-Cell Layout | 17 |
| Figura 5 - Gráfico I-V.....   | 19 |
| Figura 6 - Exemplos de Valores para o coeficiente de correlação de Pearson.....             | 24 |
| Figura 7 - Diagrama de Dispersão associado à Tabela 2.....                                  | 27 |
| Figura 8 - Reta Ajustada aos dados da Tabela 2.....   | 28 |
| Figura 9 - Diagrama de Dispersão associado à Tabela 3.....                                  | 29 |
| Figura 10 - Reta Ajustada aos dados da Tabela 3.....  | 29 |
| Figura 11 - Diagrama de Dispersão aos Dados da Tabela 4.....                                | 33 |
| Figura 12 - Parábola Ajustada aos Dados da Tabela 4 .....                                   | 33 |
| Figura 13 - Diagrama de Dispersão associado à Tabela 5.....                                 | 35 |
| Figura 14 - Curva Exponencial ajustada aos dados da Tabela 5 .....                          | 35 |
| Figura 15 - Diagrama de Dispersão associados aos dados da Tabela 6 .....                    | 37 |
| Figura 16 - Curva Logarítmica associada aos dados da Tabela 6 .....                         | 37 |
| Figura 17 - Ideia sobre o EMQ.....  | 39 |
| Figura 18 - Dados do Datasheet .....  | 41 |
| Figura 19 - Modelo de Uma Célula Fotovoltaica .....   | 41 |
| Figura 20 - Script do Matlab para o Método Newton Raphson (SEGUEL, 2009).....               | 44 |
| Figura 21 - Aproximação via Newton Raphson (SEGUEL, 2009) .....                             | 45 |
| Figura 22 - Aproximação da curva Característica com o PVSIM do Matlab (HOO, 2023).....      | 46 |
| Figura 23 - Aproximação via Polinômio de Grau 6 .....                                       | 48 |
| Figura 24 - Comparação entre os Métodos de Ajuste das Curvas.....                           | 49 |
| Figura 25 - Datasheet do Painel Solar .....   | 56 |

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Análises do coeficiente de correlação .....                      | 23 |
| Tabela 2 - Exemplo de pontos $(x_i, y_i)$ para um ajuste linear,.....       | 27 |
| Tabela 3 - Exemplo de pontos $(x_i, y_i)$ para um ajuste linear,.....       | 28 |
| Tabela 4 - Exemplo de pontos $(x_i, y_i)$ para um polinomial de grau 2..... | 32 |
| Tabela 5 - Exemplo de pontos $(x_i, y_i)$ para uma curva exponencial .....  | 34 |
| Tabela 6 - Exemplo de pontos $(x_i, y_i)$ para uma curva logarítmica .....  | 36 |
| Tabela 7 - Dados <i>Datasheet</i> .....                                     | 40 |
| Tabela 8 - Características do Módulo PV .....                               | 44 |
| Tabela 9 - Erros Médios Quadráticos .....                                   | 49 |
| Tabela 10 - EMQ de Polinômios de Outros Graus .....                         | 50 |



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|         |  |
|---------|--|
| EVA     | Acetato de Vinil-etila                                   |
| STC     | Do inglês Standard Test Conditions                       |
| BAPV    | Do inglês Building Applied Photovoltaic System           |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia |
| VMP     | Tensão de Máxima Potência                                |
| IMP     | Corrente de Máxima Potência                              |
| ISC     | Corrente Elétrica de Curto-circuito                      |
| VOC     | Tensão de Circuito Aberto                                |
| PMP     | Potência Máxima ou de Pico                               |
| MMQ     | Método dos Mínimos Quadrados                             |
| EMQ     | Erro Médio Quadrático                                    |
| CAD     | Do inglês Computer-Aided Design                          |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....   | 11 |
| 2. REVISÃO DA LITERATURA.....   | 13 |
| 2.1. Células fotovoltaicas.....   | 13 |
| 2.2. Módulos fotovoltaicos .....  | 14 |
| 2.3. Parâmetros elétricos de um módulo fotovoltaico .....               | 17 |
| 2.4. Modelos matemáticos .....  | 20 |
| 3. METODOLOGIA .....  | 22 |
| 3.1. Ajuste de curvas via Método dos Mínimos Quadrados.....             | 22 |
| 3.1.1. Variáveis Correlacionadas.....                                   | 22 |
| 3.1.2. Correlação Linear.....   | 23 |
| 3.1.3. Regressão Linear .....   | 25 |
| 3.1.4. Regressão Polinomial.....  | 30 |
| 3.1.5. Regressão Exponencial .....                                      | 34 |
| 3.1.6. Regressão Logarítmica.....                                       | 36 |
| 3.2. Métricas para Avaliação da Qualidade do Ajuste via Regressão ..... | 38 |
| 4. ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS .....                                  | 40 |
| 5. CONCLUSÕES.....  | 51 |
| 6. REFERÊNCIAS .....  | 52 |
| APÊNDICE A .....  | 55 |

## 1. Introdução

O planeta Terra possibilitou ao ser humano se adaptar a diversas situações ao disponibilizar vários tipos de fontes de energia, que são classificadas como renováveis e não renováveis. As energias renováveis, como o próprio nome diz, são aquelas que se renovam automaticamente, como a energia solar, a energia eólica e a energia proveniente de hidrelétricas. Já as energias não renováveis, são produzidas através da queima de algum combustível fóssil, como carvão mineral, petróleo e lenha, entre outras coisas que não vão mais se renovar, ou seja, tem uma quantidade limitada e que poderá acabar devido ao uso irracional (EPE, 2022).

Atualmente, cada país possui uma matriz energética, que é um conjunto de fontes de energia, ou seja, ela representa o conjunto de fontes disponíveis em um país, estado ou no mundo para suprir a necessidade (demanda) de energia. O mundo possui uma matriz energética com 85% de energias não renováveis, como carvão, petróleo e gás natural, e apenas 15% de energias renováveis, como energia solar, eólica, biomassa e hidrelétricas. (EPE, 2022) Nesse cenário, o Brasil vem se destacando por ter um percentual bem diferente em relação à matriz energética mundial, com 48% de toda sua matriz energética composta por energias renováveis, como as hidrelétricas, derivados de cana, energia eólica e solar (GOV.BR, 2021).

Um dos modelos de geração de energia mais promissores atualmente é a energia solar, com baixo custo de manutenção, fácil instalação e por ser uma fonte de energia limpa e renovável. A energia solar gera eletricidade e calor com grande capacidade de reaproveitamento, tornando-a muito atrativa em todo o planeta e principalmente no Brasil, onde temos uma irradiação solar privilegiada.

A energia solar se divide em três grupos, sendo energia solar fotovoltaica, com geração de energia elétrica através dos raios solares; energia solar térmica, que usa os raios solares para aquecimento de água; energia solar heliotérmica, que utiliza o calor do sol para geração de energia elétrica. Entre esses três grupos, a energia solar fotovoltaica, que já existe há mais de 100 anos, se destaca por ser a fonte de energia limpa que mais cresce no mundo, nas áreas de tecnologia, investimentos e instalações.

A energia solar fotovoltaica é produzida dentro de sistemas compostos por painéis solares e inversores. Os módulos fotovoltaicos (conhecidos como placas solares) conseguem captar a luz do sol, transportando essa energia para o inversor solar, onde é transformada em energia elétrica, ou seja, a energia é gerada a partir do efeito fotovoltaico (PORTAL SOLAR, 2022).

Devido ao avanço das tecnologias de geração de energia fotovoltaica e da busca por uma melhor eficiência de geração dos módulos solares, este trabalho tem como finalidade estudar a curva de potência tensão ( $v$ ) *versus* corrente ( $I$ ) de um módulo fotovoltaico, com foco no modelo matemático da curva de potência, para mostrar como essa curva se comporta em diferentes modelos matemáticos.

Os modelos matemáticos são baseados em princípios e relações matemáticas precisas. Eles permitem uma representação quantitativa e precisa de fenômenos complexos. Ao utilizar modelos matemáticos, é possível obter resultados confiáveis e acurados, fornecendo uma compreensão mais profunda e precisa do sistema em estudo.

Quando aplicados na correção de curvas de potência de módulos fotovoltaicos, trazem benefícios como maior precisão, identificação de perdas e problemas, otimização do desempenho e previsão de desempenho futuro. Nesse sentido, a justificativa desse trabalho se dá por demonstrar qual modelo matemático é o mais indicado para a aplicação em correção de curvas de potência de módulos fotovoltaicos.

O objetivo desse trabalho é apresentar a aplicação de modelos matemáticos para a correção de uma curva de potência de um módulo fotovoltaico, a fim de encontrar equações que descrevam, com o máximo de eficiência, ou com o mínimo de erro, o comportamento das variáveis analisadas - tensão ( $v$ ) *versus* corrente ( $I$ ) -, ou seja, obter um gráfico das curvas características de fácil análise e que seja capaz de representar todos os dados apresentados. Com essa equação, podemos corrigir a curva de potência de um módulo fotovoltaico, a fim de obter resultados para mostrar qual modelo matemático é mais eficiente.

## 2. Revisão da Literatura

Ao longo deste capítulo serão discutidos e apresentados tópicos que fundamentam esse projeto. Será mostrada a composição e o funcionamento das células fotovoltaicas através da composição dos módulos, parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico e modelos matemáticos aplicados ao ajuste da curva característica.

### 2.1. Células fotovoltaicas

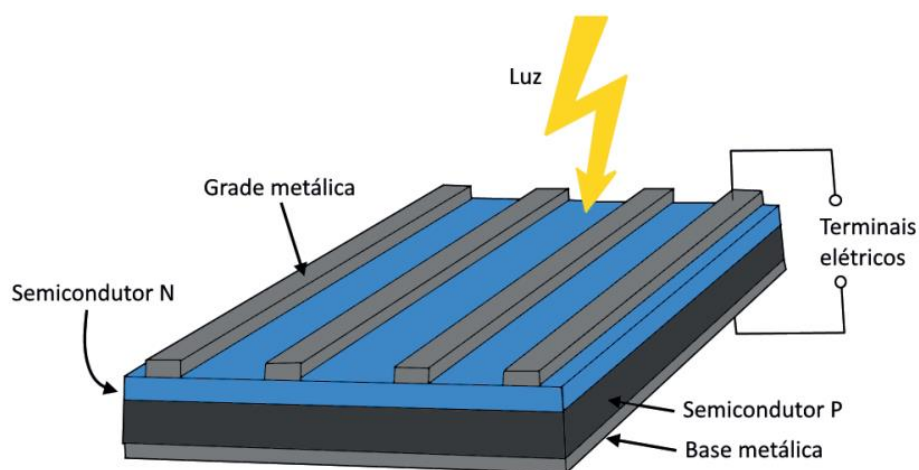
Para compreender melhor o que são as células fotovoltaicas, primeiramente, é preciso explicar seu princípio de funcionamento, que é definido como efeito fotovoltaico, o qual, segundo Junior e Mariano (2022), acontece através da conversão direta da energia da luz em energia elétrica, utilizando o espectro visível. Para que isso seja possível, utiliza-se o dispositivo de conversão denominado célula fotovoltaica que, em sua maioria, é fabricado de silício cristalino ou outros componentes químicos.

O silício é um material semicondutor, ou seja, possui características de condutor ou de isolador, a depender do nível de tensão aplicado. Neste caso, as células fotovoltaicas são essencialmente diodos de grande área otimizados para aproveitar o efeito fotovoltaico. Esse efeito ocorre em qualquer diodo semicondutor exposto à radiação. (PINHO e GALDINO, 2014).

Um diodo é um dispositivo semicondutor que funciona como um interruptor unidirecional para a corrente elétrica. Ele permite facilmente a passagem da corrente em uma direção, enquanto impede significativamente o fluxo de corrente na direção oposta. (FLUKE, 2023). Segundo Rezende (2004, p. 168), a dopagem de diferentes regiões de um material semicondutor com impurezas distintas possibilita a fabricação de uma ampla gama de dispositivos eletrônicos. Essa técnica resulta na formação de uma junção  $p-n$  em um semicondutor, onde uma região é do tipo  $p$  e outra é do tipo  $n$ , separadas por uma camada de transição fina. A maioria dos dispositivos semicondutores possui pelo menos uma junção  $p-n$ . O comportamento dos elétrons e buracos nas junções de um dispositivo determina as características de corrente-tensão (I-V) de seus diferentes terminais.

Uma célula fotovoltaica geralmente é composta pela junção de duas camadas de material semicondutor, uma do tipo  $p$  e outra do tipo  $n$ . No entanto, também existem células fotovoltaicas de múltiplas junções, que possuem um número maior de camadas. Embora tenham mais camadas, o funcionamento dessas células é semelhante ao das células de duas camadas. As células de múltiplas junções têm a capacidade de gerar mais energia, porém, devido ao seu maior custo, não são tão amplamente utilizadas como as células de duas camadas (VILLALVA e GAZOLI, 2012). A Figura 1 representa a estrutura de uma célula fotovoltaica de duas camadas, além de uma grade de coletores metálicos na parte superior e uma base metálica na parte inferior.

Figura 1 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica



Fonte: (OLIVEIRA, 2019)

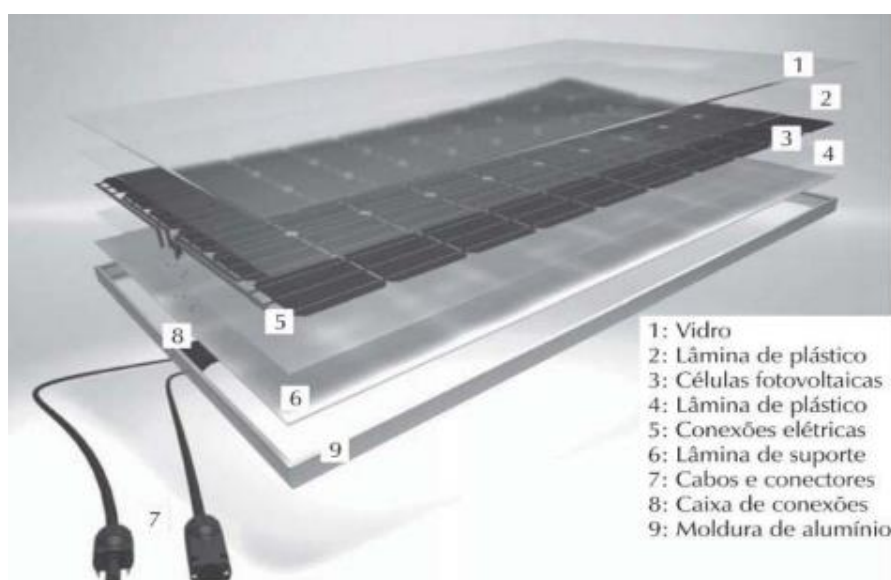
## 2.2. Módulos fotovoltaicos

Módulos fotovoltaicos, também conhecidos como painéis solares, são compostos por conjuntos de células fotovoltaicas fixadas em uma estrutura rígida e interligadas eletricamente, na maioria dos casos, em série, para obter-se uma maior tensão.

O módulo fotovoltaico tem diversas funções. Além de compor a associação de células solares, ele também desempenha o papel de proteger as células contra condições climáticas adversas, isolar eletricamente as células de contatos externos e fornecer rigidez

mecânica ao conjunto. O módulo fotovoltaico, ilustrado na Figura 2, é composto por uma cobertura frontal feita de vidro temperado e antirreflexivo. Ele também possui um material encapsulante transparente e isolante, conhecido como EVA (acetato de vinil-etila). As células fotovoltaicas são conectadas entre si por pequenas tiras metálicas, proporcionando contatos externos de saída. Na parte traseira do módulo, geralmente há uma cobertura feita de polifluoreto de vinila, uma estrutura metálica que sustenta todo o equipamento, e uma caixa de conexões elétricas. (JUNIOR e MARIANO, 2022).

Figura 2 - Estrutura física de um módulo fotovoltaico



Fonte: (VILLALVA e GAZOLI, 2012)

Os módulos fotovoltaicos estão disponíveis em uma ampla variedade de tamanhos, dependendo de sua potência. Além disso, atualmente é possível encontrá-los em diferentes cores, o que permite seu uso também como revestimento arquitetônico. No que diz respeito às aplicações, os módulos fotovoltaicos podem ser instalados nos telhados e coberturas de edifícios, conhecidos como sistemas fotovoltaicos integrados em edificações (BAPV, do inglês Building Applied Photovoltaic System). Os sistemas BAPV não apenas geram eletricidade, mas também oferecem funcionalidades adicionais aos edifícios. Eles podem fornecer proteção contra a radiação solar, isolamento térmico,

resistência à chuva, sombreamento parcial de áreas, substituição de telhas, entre outros benefícios. (JUNIOR e MARIANO, 2022)

Os módulos fotovoltaicos mais modernos possuem algumas característica em comum, como o máximo de potência gerada com melhor eficiência, isso quer dizer que não basta um módulo ser potente e não ter uma boa eficiência. A eficiência de uma placa solar indica a sua capacidade de transformar a energia solar em eletricidade por unidade de área. Na Figura 3, conforme apontado por Casarin (2023), estão as 10 primeiras posições do ranking dos painéis solares mais eficientes do mercado:

Figura 3 - Ranking dos painéis solares mais eficientes do mercado

| Posição | Companhia      | Série          | Tamanho | Tecnologia | Potência | Eficiência |
|---------|----------------|----------------|---------|------------|----------|------------|
| 1º      | Aiko Solar     | ABC White hole | 182     | ABC        | 610 W    | 23,6%      |
| 2º      | Longi          | Hi-MO 6        | 182     | HPBC       | 590 W    | 22,8%      |
| 2º      | Maxeon         | Maxeon 6       | -       | IBC        | 440 W    | 22,8%      |
| 4º      | Jinko          | Tiger Neo      | -       | TOPCon     | 585 W    | 22,65%     |
| 5º      | Huasun         | Himalaya       | 210     | HJT        | 700 W    | 22,53%     |
| 5º      | Jolywood       | Niwa Light     | 182     | TOPCon     | 440 W    | 22,53%     |
| 7º      | Canadian Solar | HiHero         | 182     | HJT        | 440 W    | 22,5%      |
| 8º      | Astronergy     | Astro N5       | 182     | TOPCon     | 625 W    | 22,4%      |
| 8º      | JA Solar       | DeepBlue 4.0   | 182     | TOPCon     | 625 W    | 22,4%      |
| 8º      | TW Solar       | -              | -       | TOPCon     | 430 W    | 22,4%      |

Fonte: (CASARIN, 2023)

O setor solar tem experimentado um crescimento significativo nos últimos anos, com redução de preços em equipamentos como módulos fotovoltaicos. Vários artigos recentes têm se concentrado em construir analisadores de módulos fotovoltaicos de baixo custo, com o objetivo de detectar defeitos. Exemplos incluem analisadores de curvas de painéis fotovoltaicos baseados em cargas capacitivas, análise de comportamento de curvas I-V



experimentais e teóricas e desenvolvimento de modelos matemáticos para obter circuitos equivalentes de sistemas fotovoltaicos. (NOBERTO e LEMOS, 2019)

### 2.3. Parâmetros elétricos de um módulo fotovoltaico

Os parâmetros elétricos de um módulo fotovoltaico são normalmente encontrados no *Datasheet*, também conhecido como folha de dados. Esses *Datasheets* estão geralmente disponíveis nos portais dos fabricantes de módulos fotovoltaicos ou escritos numa etiqueta atrás dos módulos fotovoltaicos.

Segundo a Portaria nº 004 do Inmetro (INMETRO, 2011), os parâmetros elétricos que devem ser contidos em um módulo fotovoltaico são: potência máxima, tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito, corrente no ponto de máxima potência, tensão no ponto de máxima potência. Na Figura 4, podemos ver um exemplo de *Datasheet* de um módulo fotovoltaico.

Figura 4 - *Datasheet* módulo solar Luxen modelo M10/182mm Cell . 144 Half-Cell Layout

| ELECTRICAL PARAMETERS  |           |        |
|--|-----------|--------|
| POWER CLASS  | LNVU-550M |        |
|  | STC       | NOCT   |
| Maximum power (Pmax)   | 550W      | 417W   |
| Open Circuit Voltage (Voc)   | 50.32V    | 48.10V |
| Short Circuit Current (Isc)  | 13.90A    | 11.07A |
| Voltage at Maximum power (Vmpp)  | 42.28V    | 39.90V |
| Current Maximum Power (Impp)   | 13.01A    | 10.45A |
| MODULE EFFICIENCY (%)  | 21.28%    |        |
| STC: Irradiance 1000W/m², cell temperature 25°C, AM1.5G      NOCT: Irradiance 800W/m², ambient temperature 20°C, wind speed 1m/s, AM1.5G |           |        |

Fonte: (LUXEN, 2023)

A potência máxima de um módulo fotovoltaico corresponde, então, ao produto da tensão de máxima potência (VMP) e corrente de máxima potência (IMP) nas condições-padrão de ensaio (STC). (PINHO e GALDINO, 2014)

A tensão de circuito aberto pode ser determinada para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância total. Nessa condição, o conversor não está fornecendo corrente

para um dispositivo externo, e a tensão medida nos terminais do conversor reflete a tensão gerada internamente pelos painéis fotovoltaicos. (JUNIOR e MARIANO, 2022)

Já a corrente de circuito aberto pode ser determinada para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância total. Nessa condição, os terminais de saída do conversor são conectados diretamente, formando um curto-circuito, o que permite medir a corrente máxima que o conversor pode fornecer. (JUNIOR e MARIANO, 2022)

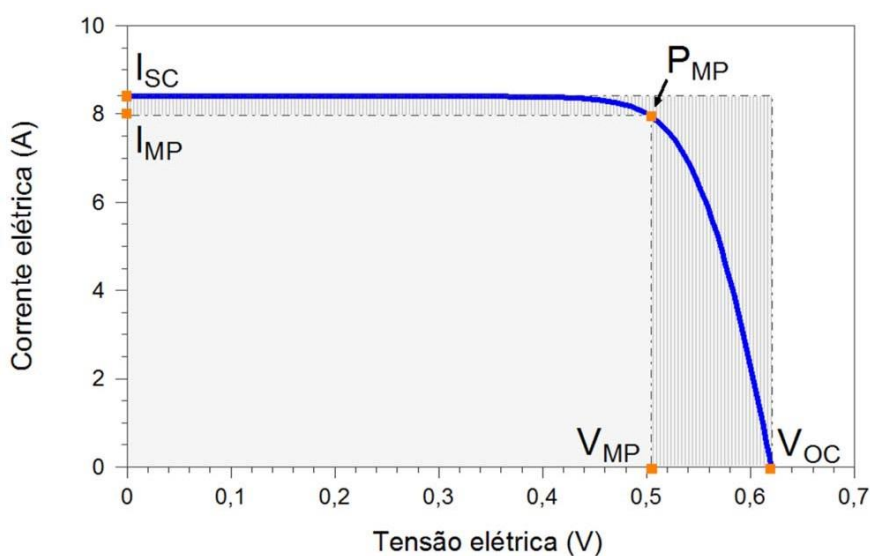
A tensão de máxima potência (VMP) é o valor da tensão nos terminais do módulo quando ele fornece sua potência máxima nas condições padronizadas de teste. Em outras palavras, é a tensão do módulo no ponto de máxima potência (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

A corrente de máxima potência (IMP) é o valor da corrente nos terminais do módulo fotovoltaico quando ele fornece sua potência máxima nas condições padronizadas de teste. Em outras palavras, é a corrente no ponto de máxima potência do módulo (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

A corrente elétrica em uma célula fotovoltaica pode ser entendida como a combinação da corrente gerada pelos fótons absorvidos da radiação solar e a corrente de uma junção *p-n* no escuro, que se comporta como um diodo semicondutor. Essa relação entre corrente e tensão no dispositivo é conhecida como curva I-V ou curva característica (PINHO e GALDINO, 2014). Na Figura 5 podemos analisar que a corrente elétrica em uma célula fotovoltaica de silício de 156mm x 156mm, nas condições-padrão de ensaio, varia em função da diferença de potencial aplicada.

Alguns parâmetros elétricos importantes são destacados, incluindo a corrente elétrica de curto-circuito (ISC), que é a corrente quando não há resistência externa; a tensão de circuito aberto (VOC), que é a tensão quando não há corrente fluindo; a potência máxima ou de pico (PMP), que é a potência máxima que o dispositivo pode fornecer; e a corrente (IMP) e tensão (VMP) no ponto de potência máxima, respectivamente. (PINHO e GALDINO, 2014)

Figura 5 - Gráfico I-V



Fonte: (PINHO e GALDINO, 2014)

Manter o sistema fotovoltaico operando com alto rendimento ao longo do tempo de funcionamento não é uma tarefa simples. É necessário um projeto bem executado para evitar problemas como sombreamento, inclinação inadequada dos módulos e instalação mal dimensionada (NOBERTO e LEMOS, 2019)

Considerando que os módulos solares estão sujeitos a diversas condições ambientais, é possível que sua curva instantânea de corrente-tensão (I-V) não corresponda àquela fornecida pelo *Datasheet*. Para contornar essa variação, é comum representar o painel por meio de seus modelos equivalentes, a partir dos quais é possível obter equações matemáticas. Essas equações possibilitam a determinação dos parâmetros do painel, incluindo suas resistências, permitindo assim replicar a curva I-V do módulo de forma mais precisa (CORNELIUS, MAIA, *et al.*, 2018).

Na literatura encontramos modelos matemáticos que podem ser utilizados para corrigir a curva I-V. No próximo tópico, serão apresentados alguns desses modelos matemáticos e a literatura pertinente.

## 2.4. Modelos matemáticos

A curva corrente *versus* tensão, chamada de curva I-V, é uma curva característica de módulos fotovoltaicos que serve para a avaliação destes módulos. Essa curva traz informações importantes a respeito das características construtivas dos painéis e, além disso, sobre a *string* destes painéis, que é o componente de proteção da parte CC (Corrente Contínua) do sistema fotovoltaico (CUNHA, 2021).

Através dessa curva característica é possível extrair parâmetros importantes sobre o módulo fotovoltaico como, por exemplo, a corrente e a tensão máxima, seu maior ponto de potência, a diferença de temperatura em determinados pontos, entre outras questões que influenciam consideravelmente no desempenho do módulo (ANJOS, 2019).

Dessa forma, o desenvolvimento de um traçador de curva I-V apresenta uma importância significativa para a avaliação do módulo fotovoltaico, verificando possíveis defeitos nas células, a partir de descontinuidades na curva característica natural do traçador (ARAÚJO, LOPES e BEZERRA, 2020)

Embora a curva I-V não represente o comportamento dinâmico do módulo, ela permite a comparação qualitativa entre geradores, pois espera-se que um gerador, que é claramente melhor que outro de mesma tecnologia nas condições padrão, permaneça melhor quando estas condições variem em campo. Isto torna a curva I-V, nas condições padrão, a principal referência quando da avaliação do comportamento elétrico de um módulo fotovoltaico (RAMOS, 2006).

Um estudo sobre as células fotovoltaicas com foco na formulação matemática do comportamento da potência da curva característica, infere em como os fatores definidos pelo ajuste são influenciados por variações nas condições a que um módulo é submetido, como a temperatura e a radiação solar incidente por unidade de área (SILVA, 2019).

Além disso, o ajuste de curvas via Regressão Linear ou Polinomial, como forma de aproximar funções que melhor ajustam um conjunto de pontos, é recomendado, uma vez que, por exemplo, o Método dos Minimos Quadrados busca minimizar erros através da soma dos quadrados residuais da regressão, melhorando assim o grau de ajuste do modelo.

A escolha da fórmula a ser utilizada, baseia-se em uma função que tenha comportamento semelhante de uma curva característica que, segundo Silva (2019), foi

um polinômio de grau 5. No presente trabalho, encontrou-se como melhor ajuste um polinômio de grau 6, como será visto no Capítulo 4, através do menor Erro Médio Quadrático que será detalhado posteriormente.

### 3. Metodologia

Neste capítulo serão mostrados diversos tipos de regressão, através de aproximações por retas, parábolas, curva exponencial e logarítmica. Também será apresentado o conceito de Erro Médio Quadrático que, posteriormente, será utilizado para avaliar a qualidade do ajuste das curvas características de um módulo fotovoltaico.

#### 3.1. Ajuste de curvas via Método dos Mínimos Quadrados

O ajuste de curvas constitui uma alternativa mais adequada que a interpolação na obtenção de uma função matemática para representar um determinado fenômeno quando se deseja efetuar análises que vão além do intervalo de valores obtidos experimentalmente (ALMEIDA, 2015).

O Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) fornece um suporte a esse recurso matemático, sendo um procedimento mais eficiente e versátil na busca da função de ajuste. Isso porque, ele consiste em minimizar o quadrado da soma dos desvios, fazendo-se com que o erro quadrático tenda a zero, por meio de cálculos de derivadas de primeira ordem.

No decorrer deste capítulo será mostrado como o MMQ se desenvolve para ajustes lineares, polinomiais, exponenciais e logarítmicos. Todas as fórmulas matemáticas deduzidas neste capítulo podem ser encontradas em diversas referências como (TRIOLA, 2018) e (LARSON e FARBER, 2015).

##### 3.1.1. Variáveis Correlacionadas

Em diversos processos e aplicações em engenharia, é comum observar um grande número de variáveis dependentes entre si. Ao grau de dependência entre duas variáveis, denomina-se correlação.

Para se analisar a correlação entre as variáveis, estas são representadas em um sistema ortogonal através de pares ordenados  $(x_i, y_i)$ , obtendo-se, então, uma nuvem de

pontos, denominada Diagrama de Dispersão, que oferece uma ideia da correlação existente. Este é considerado o melhor método de examinar os dados no que se refere à ocorrência de tendências (lineares ou não), agrupamentos de uma ou mais variáveis, mudanças de espalhamento de uma variável em relação à outra e verificação da ocorrência dos valores discrepantes (GUIMARÃES, 2008).

### 3.1.2. Correlação Linear

A intensidade da correlação linear é medida através de um coeficiente de Pearson calculado da seguinte forma:

$$r = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}$$

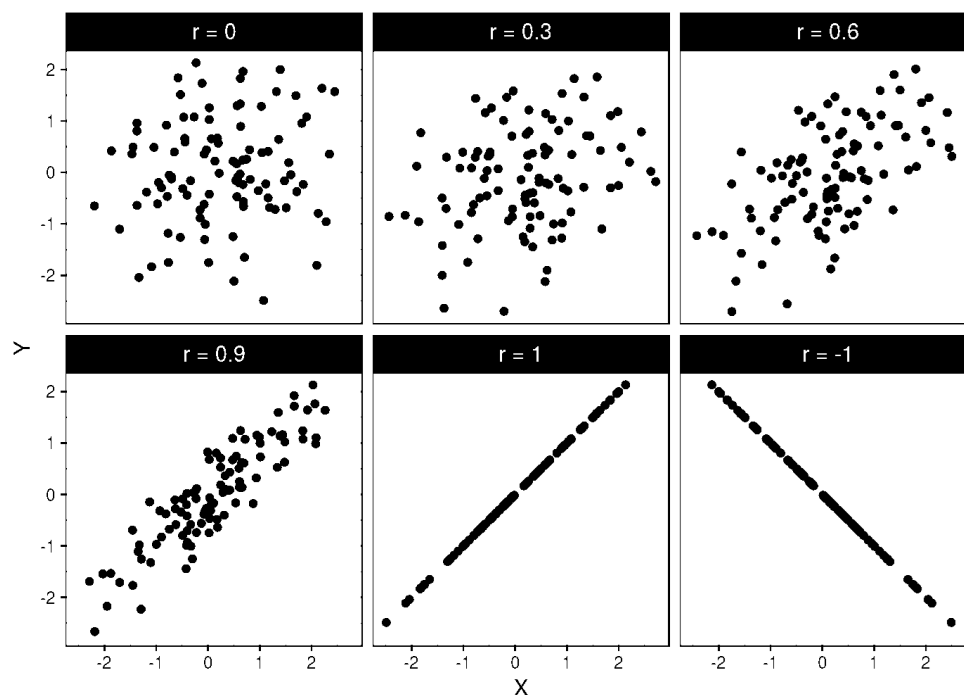
Os valores de  $r$  estão compreendidos entre  $[-1,1]$  e as análises dadas a partir do valor de  $r$  estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Análises do coeficiente de correlação

|   |   |
|---|---|
| <b><math>r = 1</math></b>                 | Correlação linear perfeita positiva.    |
| <b><math>r = -1</math></b>                | Correlação linear perfeita negativa.    |
| <b><math>r = 0</math></b>                 | Não há correlação linear.               |
| <b><math>0,6 \leq r \leq 1</math></b>     | Forte correlação linear positiva.       |
| <b><math>-1 \leq r \leq -0,6</math></b>   | Forte correlação linear negativa.       |
| <b><math>0,3 \leq r \leq 0,6</math></b>   | Fraca correlação linear positiva.       |
| <b><math>-0,6 \leq r \leq -0,3</math></b> | Fraca correlação linear negativa.       |
| <b><math>0 \leq r \leq 0,3</math></b>     | Correlação linear muito fraca positiva. |
| <b><math>-0,3 \leq r \leq 0</math></b>    | Correlação linear muito fraca negativa. |

Graficamente, representa-se algumas das correlações da Tabela 1 na Figura 6.

Figura 6 - Exemplos de Valores para o coeficiente de correlação de Pearson



Fonte: (PARREIRA, 2018)

Observe que, quando o coeficiente  $r = 0$ , o gráfico torna-se uma nuvem de pontos embaralhados entre si que não evidenciam qualquer correlação entre as variáveis.

Já, quando  $r = 0,3$ , os dados ainda estão sem uma forma específica, mas já indicam uma tendência de reta crescente, devido a um certo agrupamento. Quando  $r = 0.6$  e  $r = 0.9$ , os pontos começam a ficar um pouco mais próximos e menos dispersos, indicando uma aproximação de reta.

E, finalmente, quando  $r = 1$  e  $r = -1$ , nota-se que os pontos coincidem exatamente com o formato de uma reta, tornando-se, assim, uma correlação perfeita crescente (maiores valores de  $x$  indicam menores valores de  $y$ ) e decrescente (menores valores de  $x$  indicam maiores valores de  $y$ ), respectivamente.



### 3.1.3. Regressão Linear

O Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) pode ser utilizado para ajustar dados através de um polinômio de grau maior ou igual a um. Neste trabalho, serão detalhados: o ajuste linear e polinomial de grau 2, através de uma reta, e uma parábola, respectivamente. Ajustes para polinômios de graus maiores que 2 podem ser deduzidos a partir de uma extensão da teoria apresentada. Também serão vistos ajustes exponenciais e logarítmicos, através da associação direta com o modelo linear.

Quando pretende-se estudar uma variável em função de outra, faz-se uma Análise de Regressão. Partindo dos valores da variável independente, é possível estimar os valores da variável dependente. Tem-se que:

- $x$ : variável independente
- $y$ : variável dependente.

A equação da reta visando a regressão linear é obtida a partir das variáveis preditas e é dada por:

$$y = ax + b$$

Considerando a aproximação acima com resíduo  $e$ , definido como a diferença entre o valor real da variável dependente e o valor predito pelo modelo, segue que:

$$y = ax + b + e$$

A soma dos quadrados dos resíduos, por sua vez, é dada por:

$$S_r = \sum (y_i - ax_i - b)^2.$$

**Observação:** Todos os somatórios utilizados neste capítulo variam de 1 a  $n$ , ou seja,  $\sum f(x) = \sum_1^n f(x)$ , onde  $n$  é o número de pontos.

Derivando  $S_r$  e igualando a zero, a fim de obter o mínimo, tem-se que:

$$\frac{dS_r}{db} = -2\sum (y_i - ax_i - b) = 0$$

$$\frac{dS_r}{da} = -2\sum x_i(y_i - ax_i - b) = 0$$

Como  $\sum b = nb$ , segue que

$$\begin{aligned}\sum y_i &= a\sum x_i + nb \\ \sum x_i y_i &= a\sum x_i^2 + b\sum x_i\end{aligned}$$

Matricialmente,

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \end{bmatrix}$$

Isolando os coeficientes  $b$  e  $a$  na equação acima, segue que:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} n & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} &= \frac{1}{n\sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i} \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & -\sum x_i \\ -\sum x_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \end{bmatrix} \\ b &= \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \\ a &= \frac{-\sum x_i \sum y_i + n\sum x_i y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}\end{aligned}$$

O valor de  $b$  pode ser simplificado através da seguinte equação:

$$b = \bar{y} - a\bar{x},$$

onde  $n$  é o número de observações e

- $\bar{x} = \sum \frac{x_i}{n}$  é a média de  $x$  e
- $\bar{y} = \sum \frac{y_i}{n}$  é a média de  $y$ .

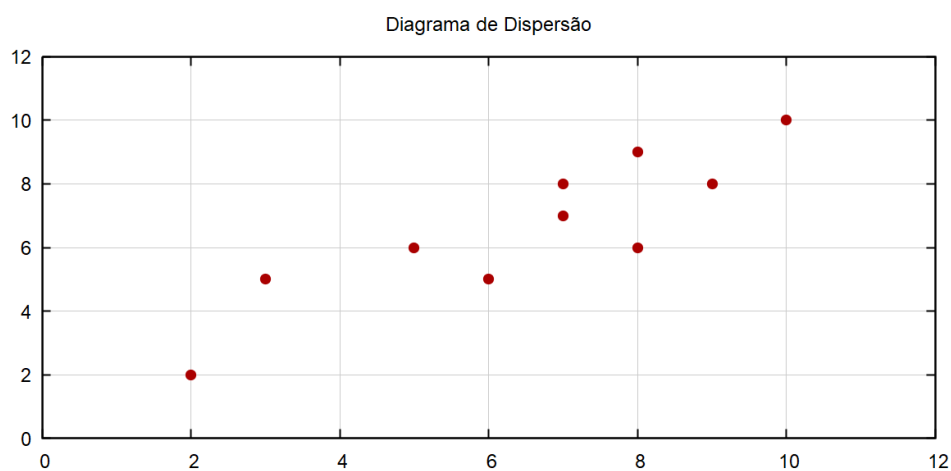
A Tabela 2 mostra um exemplo dos cálculos de  $a$  e  $b$  para um problema genérico.

Tabela 2 - Exemplo de pontos  $(x_i, y_i)$  para um ajuste linear,

| $x_i$    | $y_i$ | $x_i y_i$ | $x_i^2$ |
|----------|-------|-----------|---------|
| 5        | 6     | 30        | 25      |
| 8        | 9     | 72        | 64      |
| 7        | 8     | 56        | 49      |
| 10       | 10    | 100       | 100     |
| 6        | 5     | 30        | 36      |
| 7        | 7     | 49        | 49      |
| 9        | 8     | 72        | 81      |
| 3        | 5     | 15        | 9       |
| 8        | 6     | 48        | 64      |
| 2        | 2     | 4         | 4       |
| $\Sigma$ | 65    | 65        | 481     |

cujo Diagrama de Dispersão é dado por:

Figura 7 - Diagrama de Dispersão associado à Tabela 2



Fonte: Autoria Própria (2023)

Os coeficientes  $a$  e  $b$  são dados por:

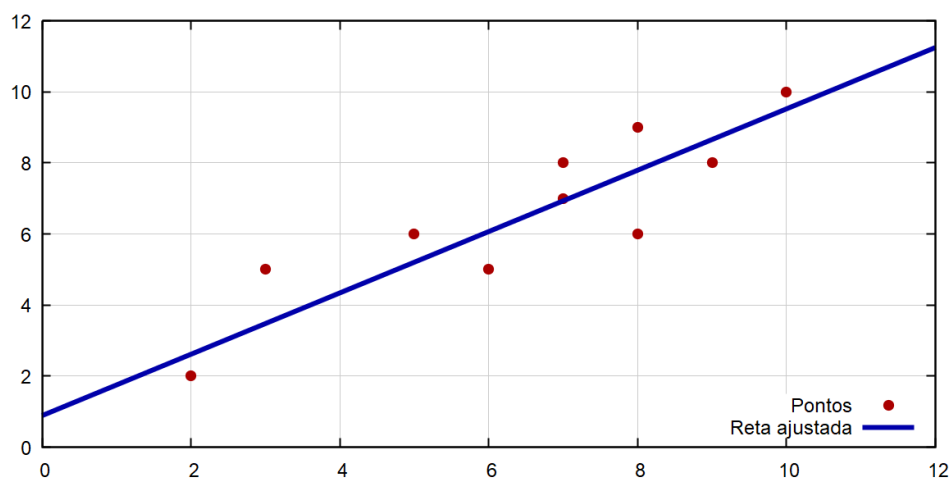
$$a = \frac{10 \cdot 473 - 65 \cdot 65}{10 \cdot 481 - 65^2} = 0,8632 \text{ e } b = \frac{65}{10} - 0,8632 \cdot \frac{65}{10} = 0,8892$$

E, portanto, a reta que aproxima os dados da Tabela 2 possui a seguinte equação:

$$y = 0,8632x + 0,8892$$

O gráfico com os pontos e a linha de tendência, neste caso, torna-se:

Figura 8 - Reta Ajustada aos dados da Tabela 2



Fonte: Autoria Própria (2023)

O coeficiente de Pearson associado à Tabela 2 é dado por

$$r = \frac{10 \cdot 473 - 65 \cdot 65}{\sqrt{[10 \cdot 481 - 65^2][10 \cdot 475 - 65^2]}} = \frac{505}{\sqrt{585 \cdot 525}} = \frac{505}{554,18} = 0,9$$

concluindo-se, portanto, que há uma forte correlação linear.

Um outro exemplo genérico pode ser visto na Tabela 3:

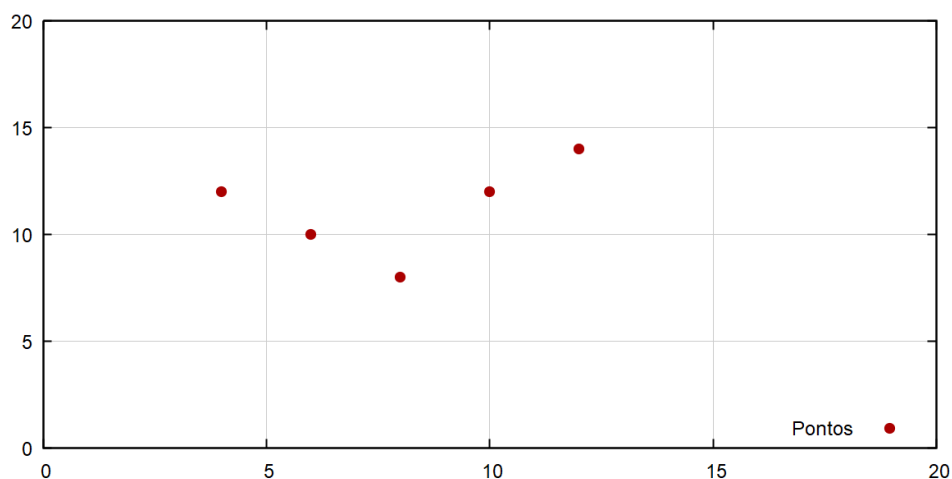
Tabela 3 - Exemplo de pontos  $(x_i, y_i)$  para um ajuste linear,

|          | $x_i$ | $y_i$ | $x_i \cdot y_i$ | $x_i^2$ | $y_i^2$ |
|----------|-------|-------|-----------------|---------|---------|
|          | 4     | 12    | 48              | 16      | 144     |
|          | 6     | 10    | 60              | 36      | 100     |
|          | 8     | 8     | 64              | 64      | 64      |
|          | 10    | 12    | 120             | 100     | 144     |
|          | 12    | 14    | 168             | 144     | 196     |
| $\Sigma$ | 40    | 56    | 460             | 360     | 648     |

Fonte: Autoria Própria (2023)

cujo diagrama de dispersão encontra-se na Figura 9.

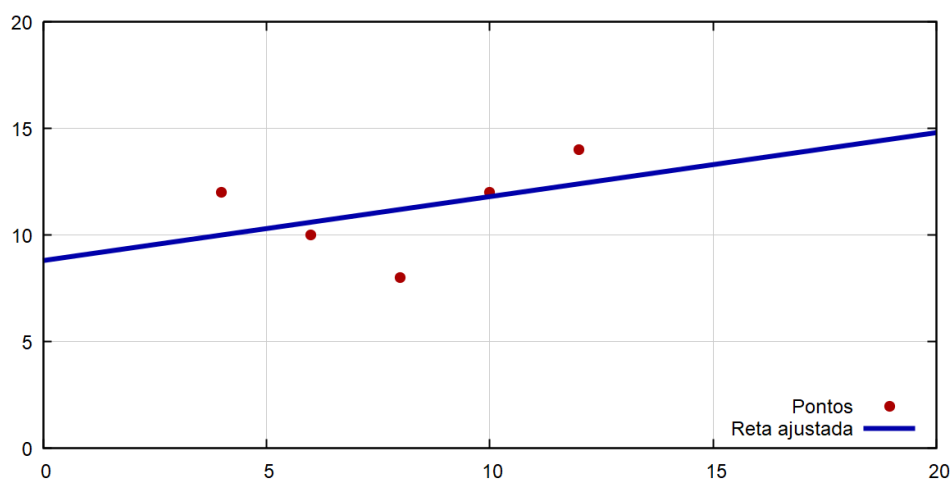
Figura 9 - Diagrama de Dispersão associado à Tabela 3



Fonte: Autoria Própria (2023)

O gráfico com a linha de tendência passando pelos pontos é dado por:

Figura 10 - Reta Ajustada aos dados da Tabela 3



Fonte: Autoria Própria (2023)

Os parâmetros que estão na equação da reta apresentada na Figura 10 são:

$$a = \frac{5 \cdot 460 - 40 \cdot 56}{5 \cdot 360 - 40^2} = 0,3$$

$$b = \frac{1760}{200} = 8,8$$

ou, equivalentemente,

$$b = 11,2 - 0,3 \cdot 8 = 8,8$$

Neste exemplo, o coeficiente de correlação de Pearson é dado por:

$$r = \frac{5 \cdot 480 - 40 \cdot 56}{\sqrt{[5 \cdot 360 - 40^2][5 \cdot 648 - 56^2]}} = \frac{60}{\sqrt{20800}} = \frac{60}{144,2} = 0,416$$

que indica uma fraca correlação linear que pode ser vista no gráfico da Figura 10, contendo os pontos e a reta ajustada ao modelo.

### 3.1.4. Regressão Polinomial

Na sequência, há a dedução da fórmula para um ajuste polinomial de segundo grau que pode ser estendida para graus maiores, conforme necessidade da aplicação em curvas características dos módulos fotovoltaicos. Seja

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + e,$$

onde  $e$  é o resíduo do polinômio. Isolando  $e$  na equação acima, obtém-se

$$e = y - a_0 - a_1x - a_2x^2$$

Se há  $n$  pontos para serem ajustados, a soma dos quadrados dos desvios é dada por

$$S_r = \sum (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2)^2$$

Calculando, primeiramente, as derivadas de  $S_r$  com relação aos coeficientes  $a$ , a fim de determinar os mínimos, obtém-se

$$\frac{dS}{da_0} = 2\sum (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2)(-1) = -2\sum (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2)$$

$$\frac{dS}{da_1} = 2\sum (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2)(-x_i) = -2\sum x_i(y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2)$$

$$\frac{dS}{da_2} = -2\sum (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2)(-x_i^2) = -2\sum x_i^2 (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2)$$

Como  $\sum a_0 = na_0$ , e igualando as derivadas acima a zero, objetivando minimizar a função, tem-se que

$$-2\sum(y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) = 0 \Rightarrow \sum(y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) = 0$$

$$\Rightarrow \sum y_i = \sum a_0 + a_1\sum x_i + a_2\sum x_i^2 \Rightarrow \sum y_i = na_0 + a_1\sum x_i + a_2\sum x_i^2$$

e

$$-2\sum x_i(y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) = 0 \Rightarrow \sum x_i(y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) = 0$$

$$\Rightarrow \sum x_i y_i - \sum x_i a_0 - \sum x_i x_i a_1 - \sum x_i x_i^2 a_2 = 0 \Rightarrow \sum x_i y_i = a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i^3.$$

Finalmente,

$$-2\sum x_i^2 (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) = 0 \Rightarrow \sum x_i^2 (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) = 0$$

$$\Rightarrow \sum x_i^2 y_i - \sum x_i^2 a_0 - \sum x_i^3 a_1 - \sum x_i^4 a_2 = 0 \Rightarrow \sum x_i^2 y_i = a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i^3 + a_2 \sum x_i^4$$

Na forma matricial, as derivadas igualadas a zero tornam-se

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \end{bmatrix}$$

Observe que, para ajustar um polinômio de grau 2, é necessário, ao menos, conhecer 3 pontos que, na matriz acima, está representado pelo número de linhas. Já o número de colunas da matriz, refere-se ao grau do polinômio somado a um.

Um exemplo de ajuste para uma função do segundo grau está na sequência. Nele, determina-se pelo Método dos Mínimos Quadrados, a equação da parábola que passa pela origem (0,0) e melhor se ajusta aos pontos (-1, 3), (1, 1) e (2, 5). Em seguida, traça-se o gráfico da curva encontrada.

A equação procurada tem a forma  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$ . Como passa pela origem, segue que  $a_0 = 0$ . O sistema matricial, então, torna-se:

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \end{bmatrix}$$

Ou seja, a linha 1 e coluna 1 foram retiradas. Isso porque a primeira coluna da matriz dos coeficientes não interfere no produto, pois multiplica  $a_0 = 0$ . Note, também, que a primeira linha dessa matriz tem origem na derivação em relação ao parâmetro  $a_0$ , que neste caso é nulo.

A Tabela 4 possui os dados necessários para o cálculo da matriz e, consequentemente,  $a_1$  e  $a_2$ .

Tabela 4 - Exemplo de pontos  $(x_i, y_i)$  para um polinomial de grau 2

| $x_i$    | $y_i$ | $x_i^2$ | $x_i^3$ | $x_i^4$ | $x_i y_i$ | $x_i^2 y_i$ |
|----------|-------|---------|---------|---------|-----------|-------------|
| -1       | 3     | 1       | -1      | 1       | -3        | 3           |
| 1        | 1     | 1       | 1       | 1       | 1         | 1           |
| 2        | 5     | 4       | 8       | 16      | 10        | 20          |
| $\Sigma$ | 2     | 9       | 6       | 8       | 18        | 24          |

Fonte: Autoria Própria (2023)

As equações de ajuste, neste exemplo, são:

$$\begin{bmatrix} 6 & 8 \\ 8 & 18 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8 \\ 24 \end{bmatrix}$$

Assim,

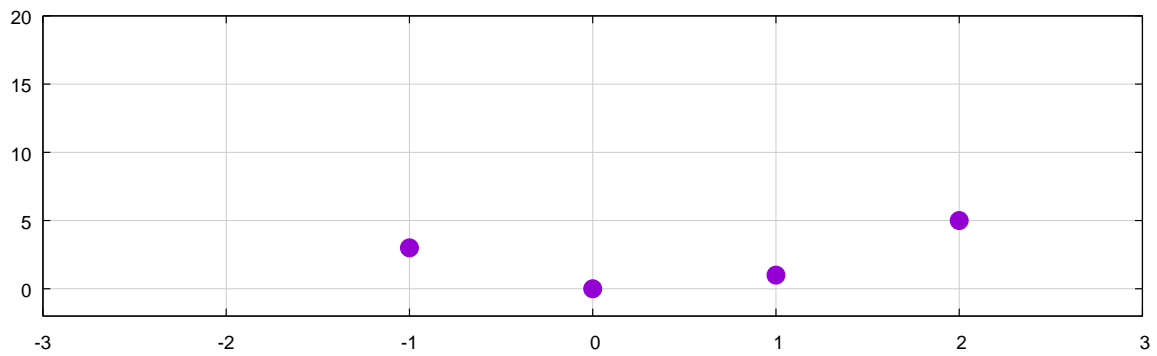
$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 & 8 \\ 8 & 18 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 8 \\ 24 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.0909 \\ 1.8182 \end{bmatrix}$$

Voltando à equação do polinômio de grau 2, tem-se que

$$y = -1.0909x + 1.8182x^2$$



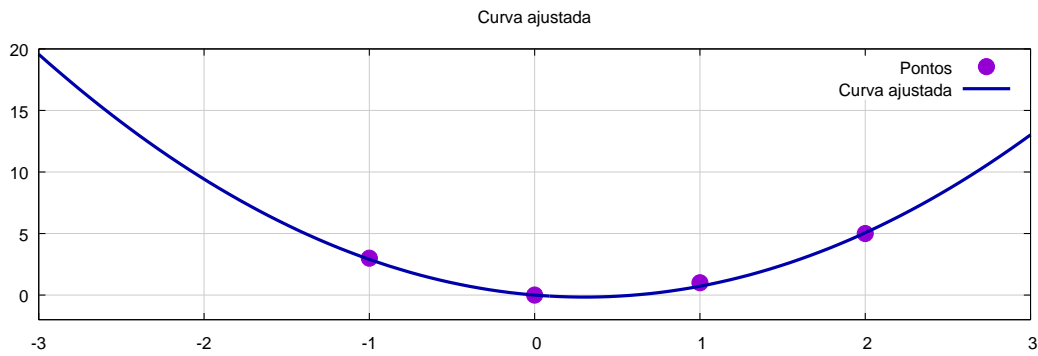
Figura 11 - Diagrama de Dispersão aos Dados da Tabela 4



Fonte: Autoria Própria (2023)

O gráfico passando pelos pontos é dado por:

Figura 12 - Parábola Ajustada aos Dados da Tabela 4



Fonte: Autoria Própria (2023)

Generalizando para quando há  $n$  pontos e deseja-se ajustar um polinômio de grau  $k$ , obtém-se o seguinte sistema:

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \cdots & \sum x_i^k \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \cdots & \sum x_i^{k+1} \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \vdots & \vdots & \sum x_i^{k+2} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ \sum x_i^k & \sum x_i^{k+1} & \sum x_i^{k+2} & \cdots & \sum x_i^{2k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \\ \vdots \\ \sum x_i^k y_i \end{bmatrix}.$$

Note que a matriz dos coeficientes possui  $k + 1$  linhas e colunas. Esta será explicitada para  $k = 6$  no Capítulo 4.

### 3.1.5. Regressão Exponencial

A ideia, nesta subseção, é ajustar um conjunto de pontos  $(x_i, y_i)$  a uma exponencial do tipo  $y = \alpha e^{\beta x}$ .

Utilizando as propriedades de logaritmo, tem-se que

$$\ln(y) = \ln(\alpha e^{\beta x}) \Rightarrow \ln(y) = \ln(\alpha) + \ln(e^{\beta x}) \Rightarrow \ln(y) = \ln(\alpha) + \beta x$$

Fazendo-se  $Y = \ln(y)$  e  $a = \ln(\alpha)$ , obtém a seguinte equação

$$Y = a + \beta x$$

que pode ser associada à uma Regressão Linear desenvolvida na Subseção 3.1.3.

Um exemplo do ajuste exponencial pode ser obtido a partir dos dados da Tabela 5 onde há valores para  $x_i$  e  $y_i$ .

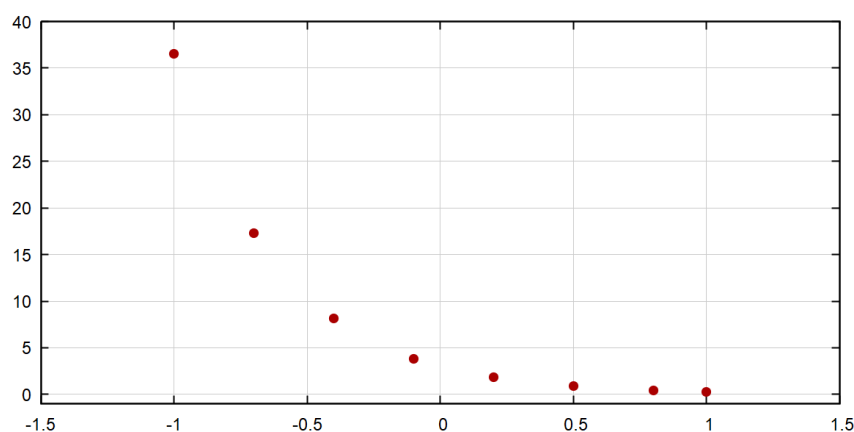
Tabela 5 - Exemplo de pontos  $(x_i, y_i)$  para uma curva exponencial

|          | $x_i$ | $y_i$  | $x_i^2$ | $\ln(y_i)$ | $x \cdot \ln(y_i)$ |
|----------|-------|--------|---------|------------|--------------------|
|          | -1    | 36,547 | 1       | 3,598599   | -3,5986            |
|          | -0,7  | 17,264 | 0,49    | 2,848623   | -1,99404           |
|          | -0,4  | 8,155  | 0,16    | 2,098631   | -0,83945           |
|          | -0,1  | 3,852  | 0,01    | 1,348592   | -0,13486           |
|          | 0,2   | 1,82   | 0,04    | 0,598837   | 0,119767           |
|          | 0,5   | 0,86   | 0,25    | -0,15082   | -0,07541           |
|          | 0,8   | 0,406  | 0,64    | -0,9014    | -0,72112           |
|          | 1     | 0,246  | 1       | -1,40242   | -1,40242           |
| $\Sigma$ | 0,3   | 69,15  | 3,59    | 8,038634   | -8,64614           |

Fonte: Autoria Própria (2023)

O Diagrama de Dispersão associado aos pontos da Tabela 5 é:

Figura 13 - Diagrama de Dispersão associado à Tabela 5



Fonte: Autoria Própria (2023)

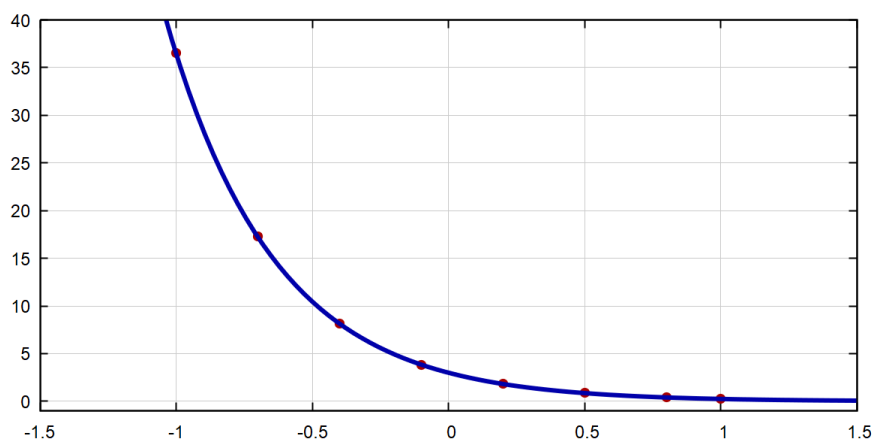
Como há 8 pontos, tem-se que  $n = 8$ . Assim, a equação para regressão linear dada na Subseção 3.1.3 torna-se:

$$\begin{bmatrix} 8 & 0,3 \\ 0,3 & 3,59 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,03 \\ -8,64 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8 & 0,3 \\ 0,3 & 3,59 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 8,03 \\ -8,64 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0974 \\ -2,4984 \end{bmatrix}.$$

Como  $\alpha = e^a$ , segue que  $\alpha = e^{1,0974} = 2,9964$  e a função exponencial que aproxima os pontos do exemplo é dada por  $f(x) = 2,9964e^{-2,4984x}$ .

O gráfico com o ajuste da função exponencial calculada acima está na Figura 14 - Curva Exponencial ajustada aos dados da .

Figura 14 - Curva Exponencial ajustada aos dados da Tabela 5



Fonte: Autoria Própria (2023)

Note que o ajuste ficou perfeito, parecendo até com uma interpolação dos pontos em vez de regressão, pois todos os pontos foram utilizados na confecção do gráfico.

### 3.1.6. Regressão Logarítmica

O ajuste de curvas logarítmicas segue o mesmo procedimento apresentado no caso exponencial. Nele, é feita uma associação com o ajuste via regressão linear, através da determinação de termos equivalentes, isto é,

$$y = a \cdot \ln(x) + b$$

passa a ser visto como

$$y = ax' + b,$$

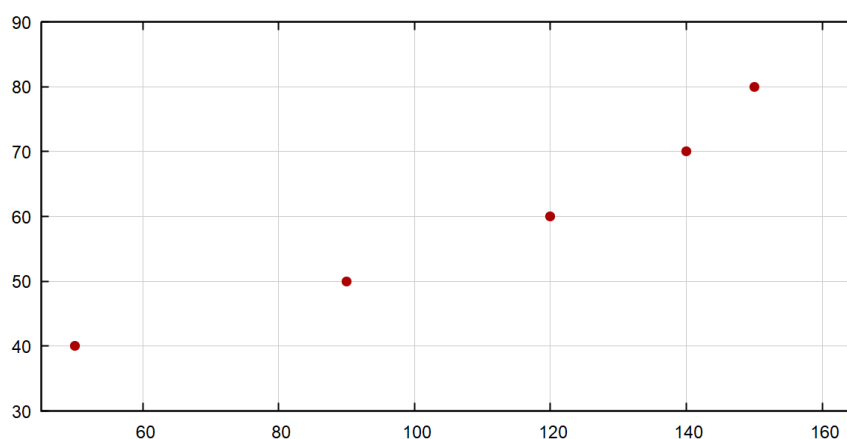
onde  $x' = \ln(x)$ .

Tabela 6 - Exemplo de pontos  $(x_i, y_i)$  para uma curva logarítmica

| $x_i$    |     | $y_i$ | $x_i'$ | $x_i' \cdot y$ | $x_i'^2$ |
|----------|-----|-------|--------|----------------|----------|
| 50       |     | 40    | 3,912  | 156,481        | 15,304   |
| 90       |     | 50    | 4,500  | 224,990        | 20,248   |
| 120      |     | 60    | 4,787  | 287,250        | 22,920   |
| 140      |     | 70    | 4,942  | 345,915        | 24,420   |
| 150      |     | 80    | 5,011  | 400,851        | 25,106   |
| $\Sigma$ | 550 | 300   | 23,152 | 1415,487       | 107,999  |

O Diagrama de Dispersão associado à Tabela 6 está na Figura 15.

Figura 15 - Diagrama de Dispersão associados aos dados da Tabela 6



Fonte: Autoria Própria (2023)

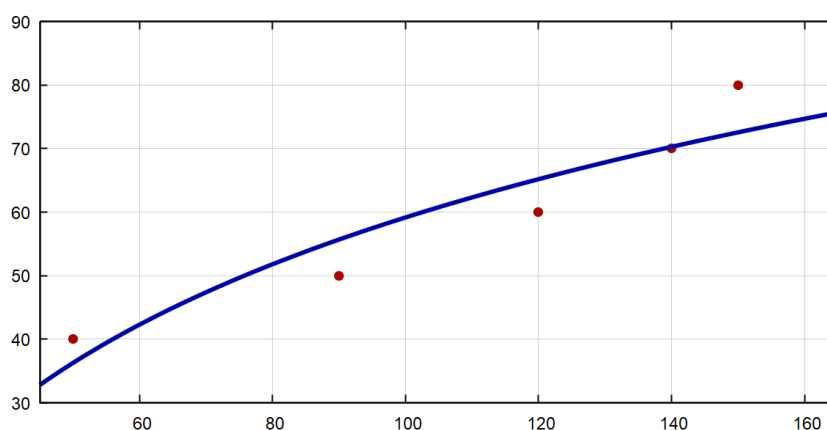
Tem-se que  $n = 5$ , pois há 5 pontos. Os coeficientes  $a$  e  $b$  são calculados por:

$$a = \frac{-\sum x'_i \sum y_i + n \sum x'_i y_i}{n \sum x'^2_i - (\sum x'_i)^2} = \frac{131,95}{4,00} = 33,019$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x} = \frac{300}{5} - 33,019 \cdot \frac{23,152}{5} = -92,889$$

O gráfico com o ajuste da função logarítmica está na sequência na Figura 16.

Figura 16 - Curva Logarítmica associada aos dados da Tabela 6



Fonte: Autoria Própria (2023)

### 3.2. Métricas para Avaliação da Qualidade do Ajuste via Regressão

Para realizar a análise de desempenho de um módulo fotovoltaico, o estudo da curva de potência I-V é imprescindível, uma vez que, através desta curva, é possível obter dados importantes sobre as características elétricas do módulo. Dentre essas características, talvez a mais importante seja a máxima potência que um módulo fotovoltaico é capaz de fornecer em certas condições de temperatura e irradiância.

A curva de potência I-V de um módulo fotovoltaico é determinada dentro das condições específicas de temperatura e irradiância de denominada condição padrão de ensaio. Sabe-se que essas condições específicas não acontecem no dia a dia na vida útil de módulos fotovoltaicos por diversos fatores, sendo assim, a curva de potência I-V requer um tratamento para se conhecer o comportamento da curva em uma condição diferente da medida e, neste caso, aplicar algum método de correção.

Observada a relevância da curva de potência I-V, serão mostrados métodos de correção aplicadas aos módulos fotovoltaicos, baseados nos modelos matemáticos apresentados na Seção 3, objetivando obter resultados na comparação de diversos métodos e avaliar qual se encaixa melhor em cada situação.

Para isso, serão calculados os Erros Médios Quadráticos (EMQ), da sigla em inglês *Mean Squared Error (MSE)* que consistem em medir a média do erro das previsões ao quadrado, ou seja, a diferença média entre os valores previstos por um modelo e os valores reais, elevando-a ao quadrado e dividindo-a pelo número de elementos. Esse cálculo fornece, também, uma estimativa do quão bem o modelo é capaz de prever o valor de destino (precisão). Quanto maior o EMQ, pior o modelo.

A fórmula para o cálculo do EMQ é dada por:

$$EMQ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2$$

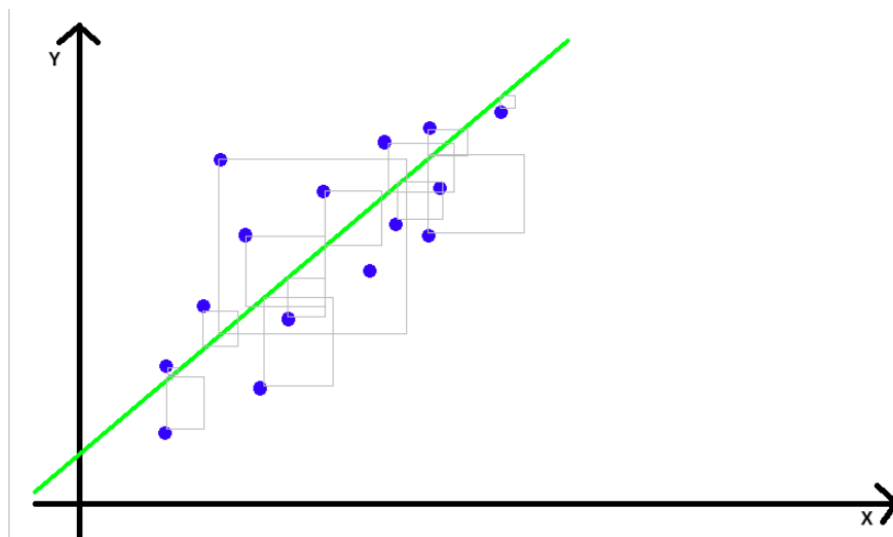
onde  $y_i$  são os valores observados e  $\tilde{y}_i$  os valores preditos via MMQ para a variável dependente.

Os EMQ são preferencialmente utilizados para avaliação da qualidade da regressão, em vez dos erros médios absolutos, pois captam melhor as tendências, tornando-se, assim,

a métrica mais utilizada para avaliar regressões de valores contínuos. Nessa métrica, erros muito grandes não são tolerados.

A Figura 17 mostra a ideia sobre como o erro quadrático é avaliado.

Figura 17 - Ideia sobre o EMQ



Fonte: (JUNIOR, 2020)

## 4. Análise de Dados e Resultados

Neste capítulo serão feitas as aproximações da curva obtida pelo *Datasheet* do painel solar ASTRO 5 da Astronergy (Apêndice A), utilizando: o método Newton Raphson (SEGUEL, 2009), o algoritmo PVSIm do *software* Matlab (HOO, 2023) e, finalmente, uma aproximação via Regressão Não Linear (MMQ), através do ajuste de um polinômio de grau 6 desenvolvido no Capítulo 3.

Em seguida, serão calculados os Erros Médios Quadráticos que demonstram o desempenho dos modelos de aproximação utilizados, evidenciando o quão boas são as técnicas desenvolvidas no trabalho.

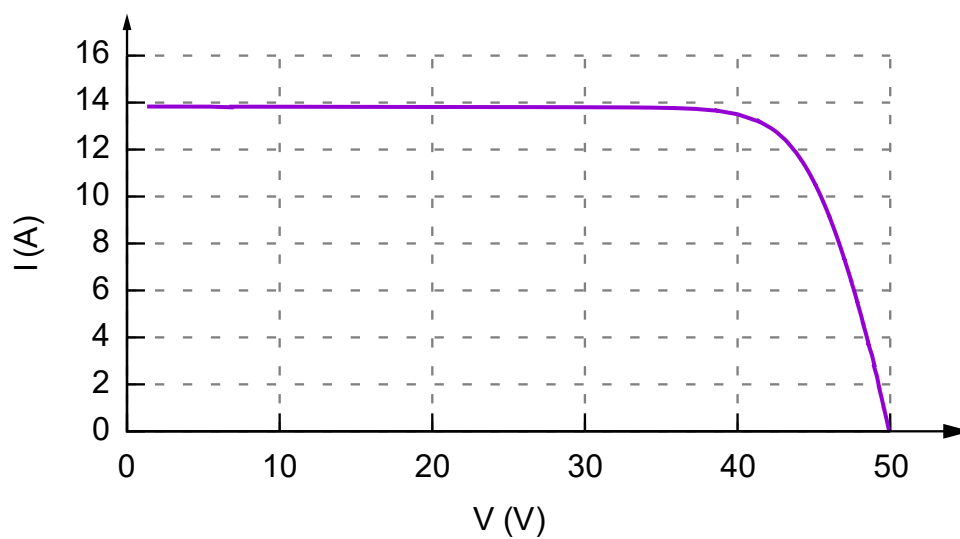
A Tabela 7 mostra os dados do *Datasheet* obtidos no QCAD, que é um *software* livre na área de CAD e o gráfico da Figura 18 associado a eles.

Tabela 7 - Dados *Datasheet*

| Tensão | Corrente | Tensão | Corrente | Tensão | Corrente | Tensão | Corrente |
|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|
| 0,000  | 13,833   | 28,951 | 13,803   | 44,334 | 11,397   | 47,847 | 5,506    |
| 1,319  | 13,832   | 30,333 | 13,801   | 44,607 | 11,103   | 47,837 | 5,502    |
| 2,701  | 13,830   | 31,715 | 13,798   | 44,745 | 10,944   | 48,041 | 5,053    |
| 4,082  | 13,829   | 33,096 | 13,793   | 45,110 | 10,491   | 48,228 | 4,599    |
| 5,464  | 13,827   | 34,478 | 13,784   | 45,109 | 10,491   | 48,218 | 4,595    |
| 6,846  | 13,799   | 35,859 | 13,767   | 45,438 | 10,037   | 48,414 | 4,147    |
| 6,846  | 13,826   | 35,859 | 13,768   | 45,458 | 10,009   | 48,593 | 3,693    |
| 8,227  | 13,825   | 37,241 | 13,730   | 45,741 | 9,584    | 48,582 | 3,688    |
| 10,991 | 13,822   | 38,621 | 13,656   | 46,025 | 9,131    | 48,802 | 3,252    |
| 12,372 | 13,820   | 38,622 | 13,662   | 46,023 | 9,130    | 48,970 | 2,796    |
| 13,754 | 13,819   | 40,002 | 13,502   | 46,289 | 8,678    | 48,931 | 2,781    |
| 16,517 | 13,816   | 41,382 | 13,197   | 46,538 | 8,223    | 49,133 | 2,340    |
| 17,899 | 13,815   | 41,386 | 13,212   | 46,725 | 7,869    | 49,272 | 1,876    |
| 19,280 | 13,814   | 42,213 | 12,903   | 46,776 | 7,770    | 49,266 | 1,874    |
| 20,662 | 13,812   | 42,525 | 12,758   | 47,007 | 7,318    | 49,438 | 1,424    |
| 22,044 | 13,811   | 43,105 | 12,425   | 47,004 | 7,316    | 49,595 | 0,968    |
| 23,425 | 13,810   | 43,280 | 12,304   | 47,227 | 6,865    | 49,592 | 0,968    |
| 24,806 | 13,808   | 43,837 | 11,870   | 47,444 | 6,414    | 49,760 | 0,517    |
| 26,188 | 13,807   | 43,857 | 11,851   | 47,435 | 6,409    | 49,909 | 0,061    |
| 27,570 | 13,805   | 43,886 | 11,826   | 47,649 | 5,960    |        |          |



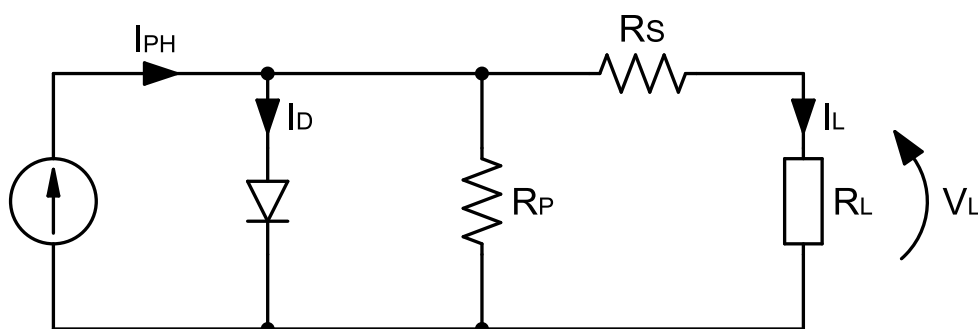
Figura 18 - Dados do Datasheet



Fonte: Autoria Própria (2023)

O algoritmo baseado no Método Newton Raphson foi obtido em (SEGUEL, 2009), o qual propôs um modelo representado no circuito da Figura 19 governado pelas seguintes equações:

Figura 19 - Modelo de Uma Célula Fotovoltaica



Fonte: Autoria Própria (2023)

Equação 1:

$$I = I_{ph} - I_r \cdot \left[ e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_S)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_P}$$

Onde:

$V$  : Tensão nos terminais de saída da célula.

$I$  : Corrente fornecida por uma célula.

$I_{ph}$  : Fotocorrente.

$I_r$  : Corrente de saturação reversa da célula.

$R_P$  : Resistência paralelo intrínseca da célula.

$R_S$  : Resistência série intrínseca da célula.

$n$  : Fator de idealidade da junção.

$T$  : Temperatura ambiente (K).

$q$  : Carga do elétron  $1.6 \times 10^{-19} C$ .

$k$  : Constante de Boltzmann  $1.38 \times 10^{-23} J / K$

Equação 2:

$$I_r = I_{rr} \cdot \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \cdot e^{\left[\frac{q \cdot E_G}{n \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right]}$$

Equação 3:

$$I_{ph} = [I_{SC} + \alpha \cdot (T - T_r)] \cdot \frac{P_{sun}}{1000}$$

Onde:

$I_{SC}$  : Corrente de curto-circuito da célula.

$\alpha$  : Coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito da célula.

$T_r$  : Temperatura de referência.

$P_{sun}$  : Radiação incidente.

$I_{rr}$  : Corrente de saturação reversa na temperatura de referência.

$E_G$  : Energia do band-gap do silício 1.1 (eV)

Equação 4:

$$I_{rr} = \frac{I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_P}}{e^{\frac{q \cdot V_{OC}}{n \cdot k \cdot T_r}} - 1}$$

Equação 5:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Onde:

$n$  : n-ésima iteração do algoritmo

$f(x_n)$  : função  $f$  avaliada em  $x_n$

$f'(x_n)$  : derivada da função  $f$  avaliada em  $x_n$

Equação 6:

$$f(I) = -I + I_{ph} - I_r \cdot \left[ e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_S)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_P}$$

Equação 7:

$$f'(I) = -1 - I_r \cdot e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_S)}{n \cdot k \cdot T}} \cdot \frac{q \cdot R_S}{n \cdot k \cdot T} - \frac{R_S}{R_P}$$

O código do Matlab utilizado para obter as curvas características a partir das equações 1 a 7 deste capítulo é dado na Figura 20 com os dados da Tabela 8.

Os valores de  $R_s$  e  $R_p$  foram ajustados de maneira empírica, a fim de obter um melhor ajuste para a aproximação das curvas.

Tabela 8 - Características do Módulo PV

|                         |                        |
|-------------------------|------------------------|
| <b>Potência</b>         | 545 W                  |
| $V_{mp}$                | 41.93 V                |
| $I_{mp}$                | 13.00 A                |
| $V_{oc}$                | 49,90 W                |
| $I_{cc}$                | 13.81 A                |
| $N_s$                   | 24                     |
| <b>Tipo de Material</b> | Silício Monocristalino |

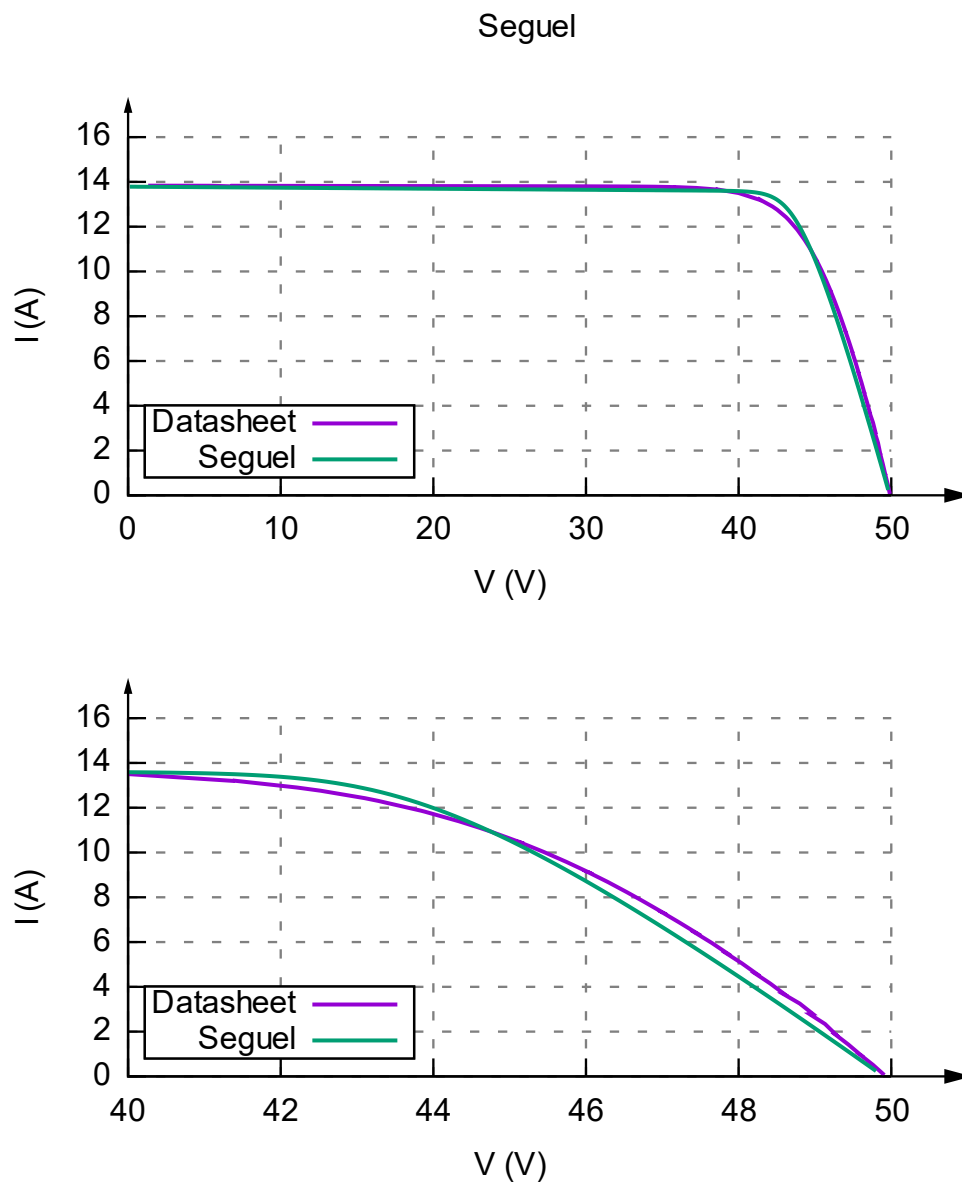
Figura 20 - Script do Matlab para o Método Newton Raphson (SEGUEL, 2009)

```
Rs=0.015;
Rp=9;
Psun=1000;
T=273+25;
Ns=24;
Np=6;
Voc=49.9/Ns;
Isc=13.81;
a=0.045/100*Isc;
n=1.2;
k=1.38e-23;
q=1.6e-19;
EG=1.1;
Tr=273+25;
Vt=n*k*T/q;
V=0:0.005:Voc;
Iph=(Isc+a*(T-Tr))*Psun/1000;
Irr=(Isc-Voc/Rp)/(exp(q*Voc/n/k/Tr)-1);
Ir=Irr*(T/Tr)^3*exp(q*EG/n/k*(1/Tr - 1/T));
I = 0;
for j=1:10
    I=I-(Iph-I-Ir.*(exp((V+I.*Rs)./Vt)-1)-(V+I.*Rs...
    )./Rp)./(-1-Ir*exp((V+I.*Rs)./Vt).*Rs./Vt-Rs./Rp);
end
matriz = [24*V(:), I(:)];
writematrix(matriz,'../excel/curva-seguel-2009.xlsx','Sheet',1);
csvwrite('../csv/curva-seguel-2009.csv', matriz);
plot(24*V,I);
```

Fonte: Autoria Própria (2023)

O gráfico obtido pelo algoritmo da Figura 20, comparado com os dados do *Datasheet* é dado na Figura 21. Observe que foi feita uma aproximação (*zoom*) no intervalo  $[40,50]$  em  $V$  que busca um melhor entendimento do decaimento da curva característica. Esse *zoom* será feito nos outros gráficos de comparação deste capítulo.

Figura 21 - Aproximação via Newton Raphson (SEGUEL, 2009)

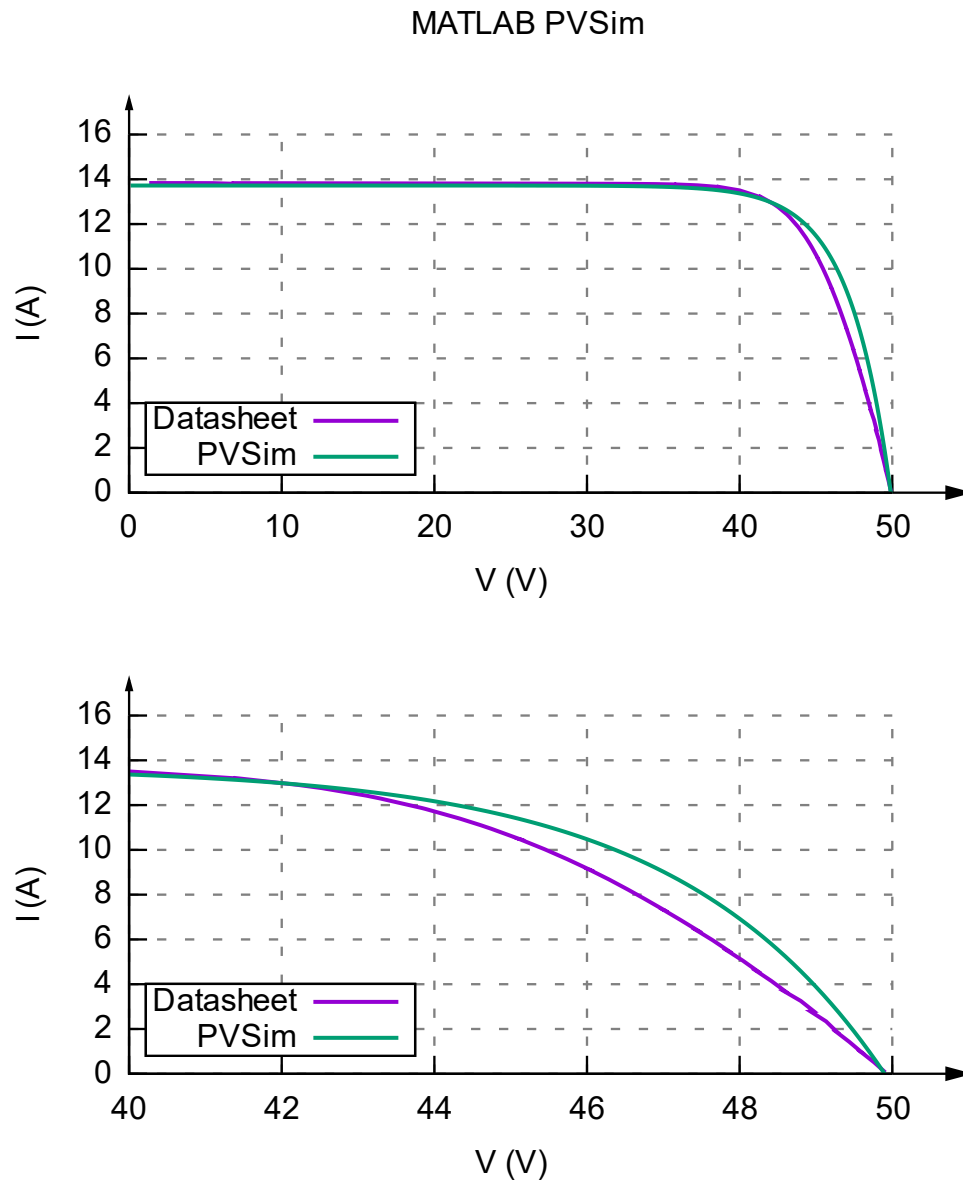


Fonte: Autoria Própria (2023)

O PVSIM do Matlab é um algoritmo iterativo de curva característica do módulo fotovoltaico que demonstra o funcionamento do mesmo (HOO, 2023). Com o carregamento do arquivo Excel (amostra de medição do módulo fotovoltaico real, no

nosso caso, com dados do *Datasheet*), o algoritmo exhibe efetivamente a curva característica I-V dada na Figura 22 já comparada à do *Datasheet*.

Figura 22 - Aproximação da curva Característica com o PVSIm do Matlab (HOO, 2023)



Fonte: Autoria Própria (2023)

O Ajuste Polinomial realizado utilizou os resultados obtidos na Seção 3.1.4, estendendo-se a dedução feita para o grau 2.

O sistema linear associado ao problema para  $n = 79$  pontos e grau  $k = 6$  é dado por:

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 & \sum x_i^7 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 & \sum x_i^7 & \sum x_i^8 \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 & \sum x_i^7 & \sum x_i^8 & \sum x_i^9 \\ \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 & \sum x_i^7 & \sum x_i^8 & \sum x_i^9 & \sum x_i^{10} \\ \sum x_i^5 & \sum x_i^6 & \sum x_i^7 & \sum x_i^8 & \sum x_i^9 & \sum x_i^{10} & \sum x_i^{11} \\ \sum x_i^6 & \sum x_i^7 & \sum x_i^8 & \sum x_i^9 & \sum x_i^{10} & \sum x_i^{11} & \sum x_i^{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \\ \sum x_i^3 y_i \\ \sum x_i^4 y_i \\ \sum x_i^5 y_i \\ \sum x_i^6 y_i \end{bmatrix}$$

Calculando-se os coeficientes, solução da equação matricial anterior, tem-se que:

$$a_0 = 13.84633,$$

$$a_1 = 0,01257,$$

$$a_2 = -0,0105,$$

$$a_3 = 0,0017,$$

$$a_4 = -0,0001,$$

$$a_5 = 2,81933e - 06 ,$$

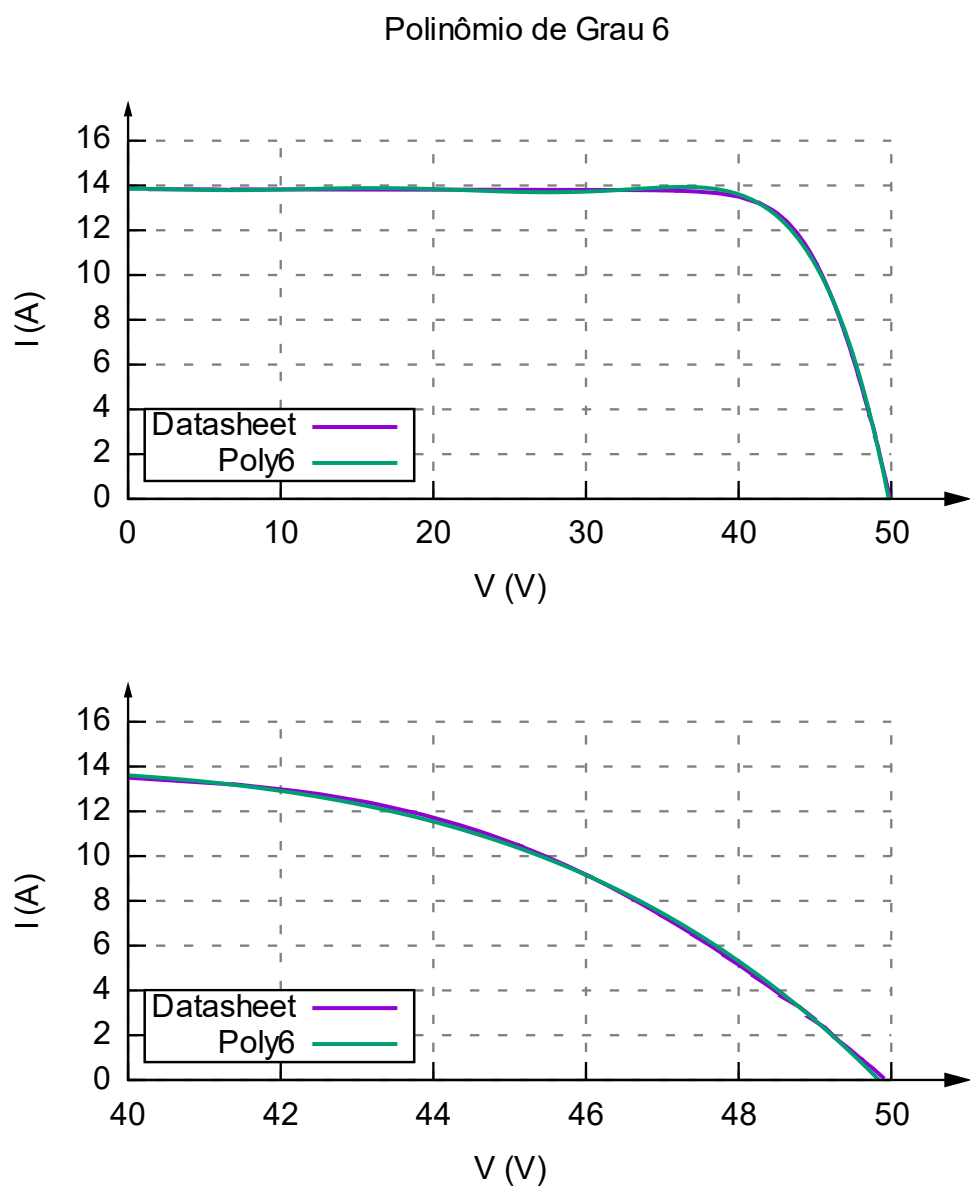
$$a_6 = -2,68488e - 08.$$

E o polinômio, por sua vez, é ajustado da seguinte maneira:

$$P_6(x) = a_6x^6 + a_5x^5 + a_4x^4 + a_3x^3 + a_1x + a_0$$

O gráfico associado a essa aproximação é dado na Figura 23.

Figura 23 - Aproximação via Polinômio de Grau 6

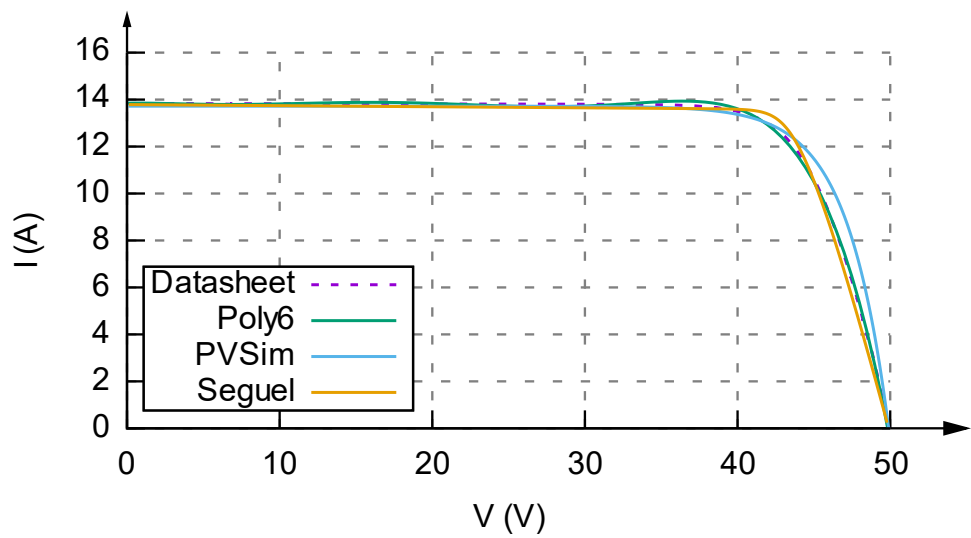


Fonte: Autoria Própria (2023)

A comparação entre os modelos propostos, quais sejam, Newton Raphson, PVsim do Matlab e ajuste polinomial via Regressão Não Linear com a curva do *Datasheet* está contida no gráfico da Figura 24.



Figura 24 - Comparação entre os Métodos de Ajuste das Curvas



Fonte: Autoria Própria (2023)

Os erros médios quadráticos associados à comparação encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Erros Médios Quadráticos

| Método                         | Erro Médio Quadrático (EMQ) |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Newton-Raphson (SEGUEL, 2009)  | 0,217097                    |
| PVSIM do Matlab (HOO, 2023)    | 0,462811                    |
| Regressão Não Linear de Grau 6 | 0,088188                    |

Fonte: Autoria Própria (2023)

Observe que a aproximação feita através do ajuste de um polinômio de sexto grau foi a que resultou em um menor erro. Entretanto, todos os ajustes tiveram um ótimo desempenho, visto que os erros foram muito próximos de zero.

Em termos de ajustes com polinômios de outros graus, foram obtidos os dados da Tabela 10.

Tabela 10 - EMQ de Polinômios de Outros Graus

| <b>Método</b>                         | <b>Erro Médio Quadrático<br/>(EMQ)</b> |
|---------------------------------------|--|
| <b>Regressão Não Linear de Grau 2</b> | 1.93100                                |
| <b>Regressão Não Linear de Grau 3</b> | 1.26284                                |
| <b>Regressão Não Linear de Grau 4</b> | 0.60744                                |
| <b>Regressão Não Linear de Grau 5</b> | 0.21174                                |
| <b>Regressão Não Linear de Grau 7</b> | 0.10402                                |

Fonte: Autoria Própria (2023)

A partir do momento que o erro aumentou, optou-se por parar de calculá-lo, uma vez que deve ser considerado um critério de parada e este foi o utilizado no trabalho.

## 5. Conclusões

Neste Trabalho de Conclusão de Curso foram apresentados métodos matemáticos, quais sejam, Newton-Raphson, PVSIM do Matlab e Método dos Mínimos Quadrados, para aproximações da curva característica I-V do painel fotovoltaico ASTRO 5 da Astronergy, cujo *Datasheet* encontra-se no Apêndice A.

O principal objetivo era aproximar a curva através do Método dos Mínimos Quadrados via Regressão Não Linear, técnica esta que foi detalhada no Capítulo 3, exemplificando-se desde uma regressão linear simples; até uma regressão polinomial de grau 2 extensível para outros graus; regressão exponencial e logarítmica. Já os outros métodos, como Newton-Raphson e PVSIM, serviram somente como parâmetros de comparação e foram referenciados ao longo do trabalho.

Já no Capítulo 4, ao ser comparado com os outros métodos, o MMQ mostrou-se melhor, através do ajuste via um polinômio de grau 6, uma vez que este produziu um menor Erro Médio Quadrático. Essa melhor aproximação também pode ser vista nos gráficos onde há as comparações individuais com a curva do *Datasheet* (Figura 21, Figura 22 e Figura 23) ou, ainda, no gráfico onde há todas as curvas (Figura 24). Principalmente no *zoom* fica clara a melhor aproximação do ajuste polinomial de grau 6.

Vale ressaltar que a aproximação da curva característica I-V de painéis fotovoltaicos é importante para a verificação do funcionamento do arranjo dos painéis, mediante os dados de temperatura e irradiação, sendo que através dela é possível observar a qualidade de desempenho dos módulos.

Como trabalhos futuros, seria interessante utilizar dados reais dos painéis, o que se mostrou ineficiente neste trabalho, dado a qualidade e quantidade de dados disponíveis no programa associado ao sistema de um dado cliente. Para isso, seria necessário desenvolver um protótipo através de um microcontrolador Arduino, por exemplo, ligado ao sistema fotovoltaico do cliente, a fim de automatizar a aquisição de dados em tempo real, seguindo a linha apresentada em (FILHO, 2019).

## 6. Referências

- ALMEIDA, Renato N. D. **O MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS: ESTUDO E APLICAÇÕES PARA O ENSINO MÉDIO**. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campo dos Goytacazes, p. 69. 2015.
- ANJOS, DANIELE A. P. D. **OBTENÇÃO DE CURVA CARACTERÍSTICA DE PLACA SOLAR FAZENDO USO**. Trabalho de conclusão de curso, Cruz das Almas, 22 fev. 2019.
- ARAÚJO, Ana L. P. L.; LOPES, Arthur V. M.; BEZERRA, Adson. **TOPOLOGIAS EM TRAÇADOR DE CURVA I-V PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**. Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2020. Fortaleza: [s.n.]. 2020.
- CASARIN, Ricardo. Portal Solar ©. **Portal Solar**, 21 mar. 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/equipamentos-fv/aiko-solar-lidera-ranking-de-paineis-solares-mais-eficientes-do-mercado-global>. Acesso em: 11 jun. 2023.
- CORNELIUS, Richard G. *et al.* **CONSTRUÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO**. Anais do 10º SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO - SIEPE, Pampa, 6 nov. 2018.
- CUNHA, André L. F. **O que é uma curva iv em sistemas fotovoltaicos?** Amperi Soluções Industriais, 2021. Disponível em: <https://amperi.com.br/canais/energia-solar/o-que-e-uma-curva-iv/>. Acesso em: 14 jun. 2023.
- EPE. EPE empresa de pesquisa energética. **EPE empresa de pesquisa energética**, 03 jan. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 14 abr. 2023.
- FILHO, José I. O. **Sistema De Aquisição Para Painéis Fotovoltaicos Com Armazenamento De Dados Em Servidor Remoto Utilizando Plataformas Open Source Raspberry PI E Arduino**. In: ABDALA, Paulo J. P. **Energia Solar e Eólica 2**. Belo Horizonte, MG: Atena Editora, 2019.
- FLUKE. **O que é um diodo**. Fluke. Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-pt/saber-mais/blog/aplicacoes-eletricas/o-que-e-um-diodo>. Acesso em: 18 jun. 2023.

GOV.BR., 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/08/energia-renovavel-chega-a-quase-50-da-matriz-eletrica-brasileira->

#:~:text=%E2%80%9CA%20matriz%20brasileira%20%C3%A9%20uma,(MME)%2C%20Andr%C3%A9%20Os%C3%B3rio. Acesso em: 13 abr. 2023.

GUIMARÃES, Paulo R. **Métodos Quantitativos Estatísticos**. 1ª. ed. Curitiba: IESDE Brasil S.A., 2008.

HOO, L. 2023. **PV Module Characteristic Curve Algorithm**. Disponível em <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/65519-pv-module-characteristic-curve-algorithm> Acesso em: 02 nov. 2023.

INMETRO, 2011. **Portaria n.º 004, de 04 de janeiro de 2011**. Dispõe sobre aprovar a revisão dos Requisitos de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF.

JUNIOR, Edson C. V. **Medidas de desempenho para regressão**, fev. 2020. Disponível em: <https://geam.paginas.ufsc.br/files/2020/02/Medida-desempenho-regressaob.pdf>.

JUNIOR, JAIR U.; MARIANO, JULIANA D. **Energia solar fotovoltaica: Princípios fundamentais**. 1. ed. Ponta Grossa: Atena Editora, v. I, 2022. Acesso em: 11 jun. 2023.

LARSON, Ron; FARBER, Betsy. **Estatística Aplicada**. São Paulo: Pearson, 2015.

LUXEN. NEO SOLAR. **NEO SOLAR**. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/placa-solar-fotovoltaica-550w-luxen-solar-lnvu-m.html>. Acesso em: 21 jun. 2023.

NOBERTO, Pablo E. D. S.; LEMOS, Erick T. Q. **Modelgame e análise experiemetal de curva I-V de modulo fotovoltaico**. Ata de defesa de projeto de Engenharia. Mossoró: [s.n.]. 2019.

OLIVEIRA, Jaqueline R. **A importância da Energia Solar para o desenvolvimento sustentável**. Ponta Grossa: Atena, 2019. Acesso em: 05 novembro 2023.

PARREIRA, Guilherme. **Coefficiente de Correlação de Pearson. Análises Estatísticas**, 2018. Disponível em: <https://gpestatistica.netlify.app/blog/correlacao/#>. Acesso em: 14 jun. 2023.

PINHO, João T.; GALDINO, Marco A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 1. ed. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014. Acesso em: 11 jun. 2023.

PORTAL SOLAR. PORTAL SOLAR. **PORTAL SOLAR**, 2022. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar>. Acesso em: 14 abr. 2023.

RAMOS, Cristina D. M. **Procedimentos para Caracterização e Qualificação de Módulos Fotovoltaicos**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 141. 2006.

REZENDE, Sérgio M. **Materiais e dispositivos eletrônicos**. 2. ed. São Paulo: Livraria Física, 2004.

SEGUEL, Julio I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**, Belo Horizonte, Agosto 2009.

SILVA, Erick D. O. **FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA CURVA CARACTERÍSTICA DE PLACA SOLAR**. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Cruz das Almas, p. 69. 2019.

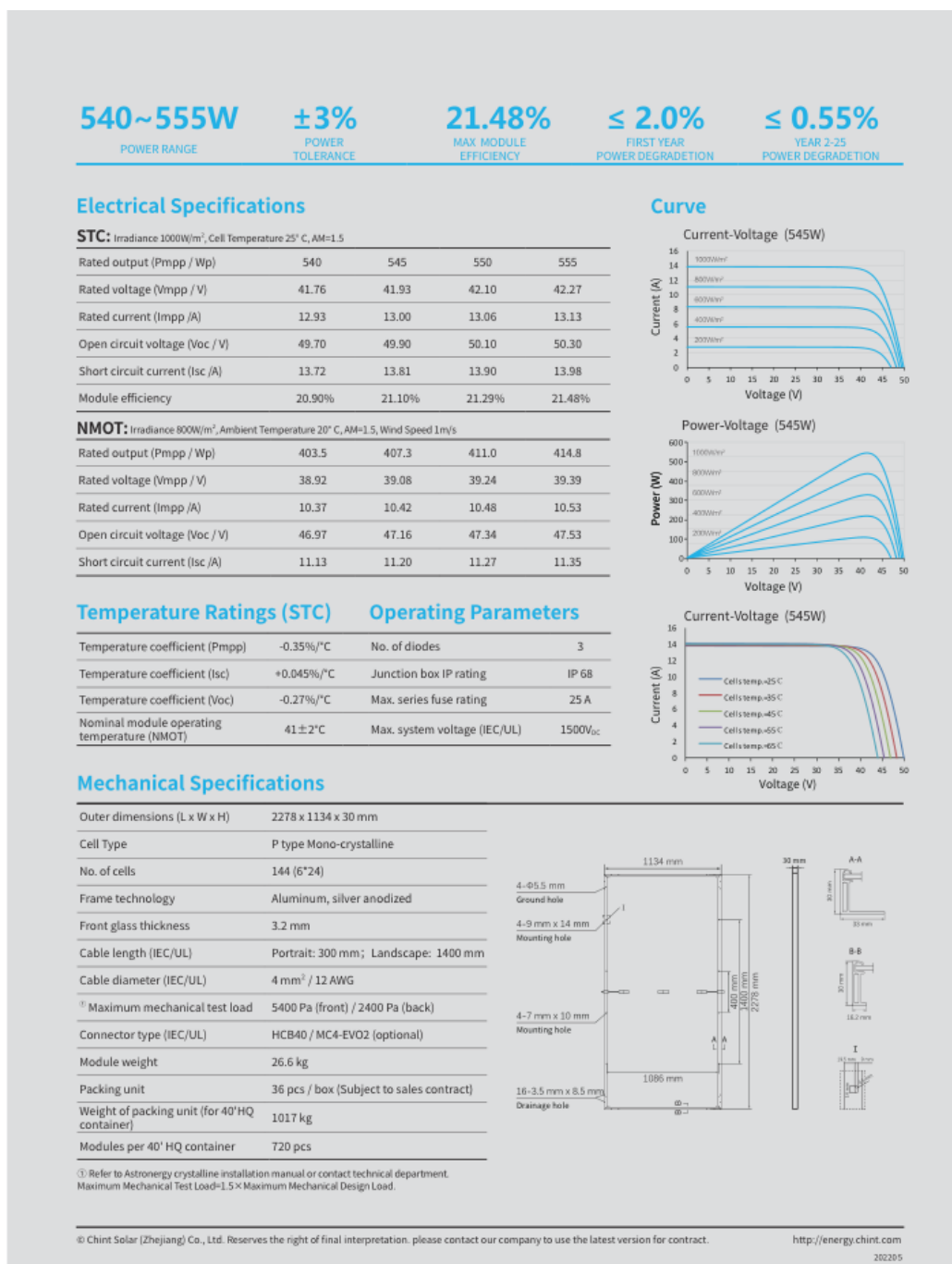
TRIOLA, Mario F. **Essentials of Statistics**. [S.l.]: Pearson, 2018.

VILLALVA, Marcelo G.; GAZOLI, Jonas R. **Energia Solar Fotovoltaica. Conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Editora Érica, v. 1, 2012. Acesso em: 11 jun. 2023.

## Apêndice A

Na Figura 25 encontra-se o *Datasheet* do painel ASTRO 5 da Astronergy, utilizado como referência para obtenção das curvas I-V via Método de Newton-Raphson (SEGUEL, 2009), PVSIM do Matlab (HOO, 2023) e Regressão Não Linear via MMQ.

Figura 25 - Datasheet do Paine Solar







---

Emitido em 18/12/2023

**CÓPIA DO TRABALHO Nº 235/2023 - DELMAX (11.57.05)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 18/12/2023 18:26 )*

**ALINE FERNANDA BIANCO MATTIOLI**

*PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO*

*DFGAX (11.57.03)*

*Matrícula: ###208#0*

*(Assinado digitalmente em 18/12/2023 18:29 )*

**Ullisses Zoroastro Cunha de Carvalho**

*DISCENTE*

*Matrícula: 2015#####6*

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: **235**, ano: **2023**, tipo:  
**CÓPIA DO TRABALHO**, data de emissão: **18/12/2023** e o código de verificação: **c7090a654f**