

Guilherme Carneiro de Olivera Campos

**Simulação computacional de
potência e energia de um
módulo fotovoltaico**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso da
Engenharia de Controle e Automação da
Universidade Federal de Uberlândia - UFU -
Câmpus Santa Mônica, como requisito para
a obtenção do título de Graduação em
Engenharia de Controle e Automação

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Engenharia Elétrica

Orientador: Fabio Vicenzi

UBERLÂNDIA

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE
UBERLÂNDIA FACULDADE DE
ENGENHARIA ELÉTRICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Os abaixo assinados, por meio deste, certificam que leram e recomendam para a Faculdade de Engenharia Elétrica a aceitação da dissertação intitulada "**Simulação computacional de potência e energia de um módulo fotovoltaico**" por **Guilherme Carneiro de Oliveira Campos** como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia de Controle e Automação**.

Uberlândia, 18 de Julho de 2023

Orientador:

Prof. Dr. Fábio Vicenzi Romualdo da Silva

Banca examinadora:

Prof.Dr. Renato Santos Carrijo

Prof.Dr. Eder Alves de Moura

Agradecimentos

O autor desse documento agradece a empresa Re:energisa pelo tempo investido no desenvolvimento do próprio dentro da empresa, e em especial aos engenheiros Rafael Alexandre Silva de Carvalho e Guilherme Couto Damasceno pelo imenso carinho e conhecimento agregado durante a estadia na empresa. Também há gratidão aos pais Wilton Rodrigues Campos e Claudia Aparecida de Oliveira Campos por todo o apoio e ajuda durante a formação. E por fim, aos amigos de curso e da vida Luiz Fernando Soares e João Pedro De Oliveira Teixeira por todos os momentos enriquecedores na Universidade.

Resumo

Atualmente, as necessidades energéticas da população mundial mostra-se cada vez mais demandadas. Por isso fez-se importante o estudo de fontes alternativas de energias renováveis, sendo a principal a solar, para suprir e substituir as gerações não renováveis ou nocivas ao meio ambiente. O objetivo dessa obra é elaborar um estudo sobre como aspectos de sujidade, como sombreamento, sujeira nos módulos dentre outros podem impactar na geração de energia, através dos módulos fotovoltaicos e obter resultados simulados da curva característica. Foi realizado um comparativo dos resultados levantados via linguagem python de uma simulação numérica utilizando parâmetros reais, com valores de medições reais de grandezas elétricas, de forma que foi possível autenticar o teorema do modelo proposto do diodo único, com a finalidade de traçar melhores estratégias de limpeza e manutenção.

Palavras-chave: fotovoltaica, diodo único, geração, simulação, python.

Abstract

Currently, the energy needs of the world's population are increasingly demanding. That is why the study of renewable energy sources has become important, the main one being solar, to supply and replace non-renewable or environmentally harmful generations. The purpose of this document is not to discuss ways of generating solar energy, but rather a study on how aspects of dirt, such as shading, dirt on the modules, among others, can impact energy generation through photovoltaic modules. A comparison of the results collected via python from a numerical simulation using real parameters was carried out, with values of real measurements of electrical quantities, so that it was possible to authenticate the theorem of the standard model of the single diode, with the intention of tracing the best cleaning and maintenance strategies.

Keywords: photovoltaic, single-diode, generation, simulation, python.

Lista de ilustrações

Figura 1 - Representação de um módulo PV	12
Figura 2- Curvas características célula fotovoltaica	11
Figura 3 - Curvas características para diversas temperaturas.	13
Figura 4 - Modelo do circuito equivalente de uma célula PV	13
Figura 5 - Curva característica I-V destacando os parâmetros elétricos.....	14
Figura 6 - Curva característica I-V destacando os parâmetros elétricos.....	16
Figura 7 – Equacionamento De Soto	18
Figura 8 - Parâmetros do modelo em questão	20
Figura 9 - Função responsável para utilização da biblioteca.....	20
Figura 10 - Função responsável para utilização da biblioteca.....	21
Figura 11 - Implementação das perdas do sistema	22
Figura 12 - Potência injetada visto pelo multimedidor.....	24
Figura 13 - Potência injetada real.....	24
Figura 14 – Energia injetada.	25

Lista de tabelas

Tabela 1 – Dados da usina utilizada	18
---	----

Lista de abreviaturas e siglas

a	<i>fator idealidade</i>
FF	<i>Fator de Forma</i>
I	<i>corrente total</i>
I_{ph}	<i>corrente fotogerada;</i>
I_{sc}	<i>Corrente de circuito aberto</i>
I_{o1}	<i>corrente de saturação reversa</i>
J_{sc}	<i>Densidade de corrente de curto circuito</i>
η	<i>Eficiência</i>
PV	<i>photovoltaic</i>
q	<i>carga elétron</i>
T	<i>temperatura</i>
V	<i>tensão</i>
V_{oc}	<i>Tensão de circuito aberto</i>

Sumário

1		
1	Introdução.....	10
1.1	Objetivo.....	1
	o	
2	Referencial	
	Teórico.....	11
2.1	Módulo fotovoltaico e característica da curva IxV.....	11
2.2	Modelo do diodo	
	único.....	13
2.2.1.	Tensão de circuito	
	aberto.....	15
2.2.2.	Corrente de curto	
	circuito.....	15
2.2.3.	Fator de	
	forma.....	15
2.2.4.	Eficiência.....	16
3	Metodologia.....	17
4	Conclusão.....	26

1 Introdução

Nas ultimas duas décadas, o assunto energia solar tem sido amplamente discutido como a principal forma alternativa de geração de energia, já são amplamente utilizados em uma escala consideravel e existem também grandes usinas fotovoltaicas ao redor do Brasil com boa capacidade de geração de energia, com impactos mínimos ao meio ambiente. Devido a isso, é importante entender a respeito do principal dispositivo capaz de converter essa energia solar em energia elétrica, o chamado PV, ou apenas módulo fotovoltaico. Essa nomenclatura é um termo tecnico para denominarmos uma placa solar, popularmente conhecida. De acordo com Jaíba Solar [2], um PV é composto de células solares, feitas por semicondutores, majoritariamente o silício, entre 36 a 72 células, e é utilizada para a captação da luz solar, com o intuito de converter a luz solar em energia elétrica fotovoltaica. As células do módulo fotovoltaico são responsáveis pela geração da energia solar, uma vez que ocasionam o efeito fotovoltaico, que absorve a energia da radiação solar para que a corrente elétrica passe pelo o caminho entre dois pontos em direções opostas.

Como o material de uma placa fotovoltaica é composto de silício, logo fez-se a analogia de levantar um circuito equivalente que pudesse representar o comportamento de tais placas no âmbito teórico. Daí surgiu o modelo do diodo único (*single diode pv model*), uma vez que o material utilizado nos diodos também são semicondutores. E através desse modelo pode-se realizar simulações computacionais, envolvendo banco de dados e python, para simular um comportamento ideal dos parametros elétricos gerados nas placas, realizando um comparativo com os parâmetros reais, e buscar compreender as possiveis razões da diferença entre os dados coletados e simulados.

1.1 Objetivo

O objetivo desse estudo é obter os parâmetros do circuito teórico do modelo do diodo unico para encontrar a curva I-V, levando em consideração a temperatura e a irradiância no plano, e através dessa curva, obter os valores de tensão e corrente no ponto de máxima potência e comparar com os dados coletados. Encontrando o valor da potência de um módulo, escalona-se para a usina inteira, considerando que estão na mesma topologia e compartilham do mesmo fabricante.

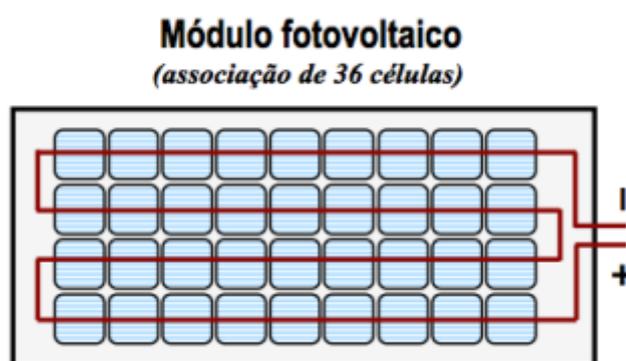
2 Referencial teórico

Neste capítulo serão abordados as teorias utilizadas para o embasamento do estudo em questão.

2.1 Módulo Fotovoltaico e característica da curva IxV

De acordo com um estudo realizado na Universidade do Minho por um mestrando Carneiro [1], A potência máxima que é alcançada através da utilização de uma única célula fotovoltaica não excede, regra geral, a potência de 3W. É por essa razão que não se vê essas células sendo utilizadas de forma isoladas, e sim um conjunto de células que são agrupados em série, em formato de filas, com seus devidos polos, conforme mostra a figura 1, formando assim uma placa fotovoltaica.

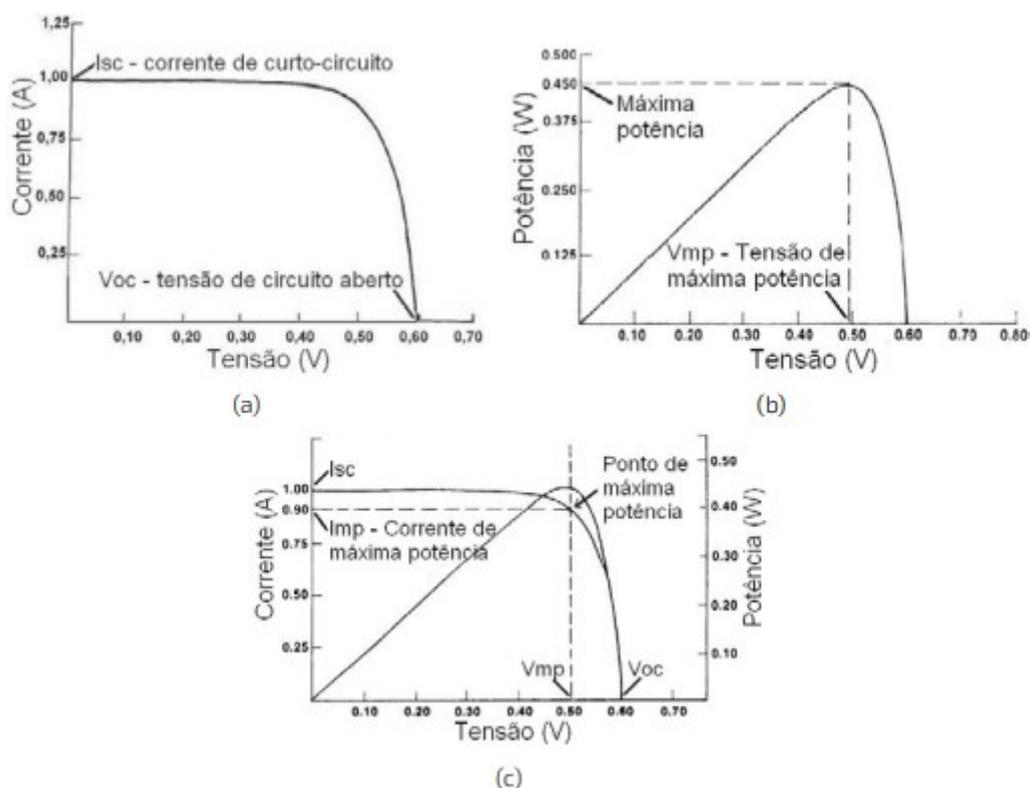
Figura 1 – Representação de um módulo fotovoltaico



Fonte: Módulos fotovoltaicos (2010)

Tais células, assim como qualquer dispositivo elétrico/eletrônico, possuem curvas características de parâmetros elétricos, como tensão(V), corrente(A) e potência(W). Os parâmetros de tensão do circuito aberto, chamado V_{OC} , corrente de circuito aberto, chamado I_{SC} , tensão de máxima potência, chamado V_{mp} e corrente de máxima potência, chamado I_{mp} , de acordo com Jaíba Solar[2], são parâmetros que definem a característica da placa a ser utilizada, como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Curvas características célula fotovoltaica

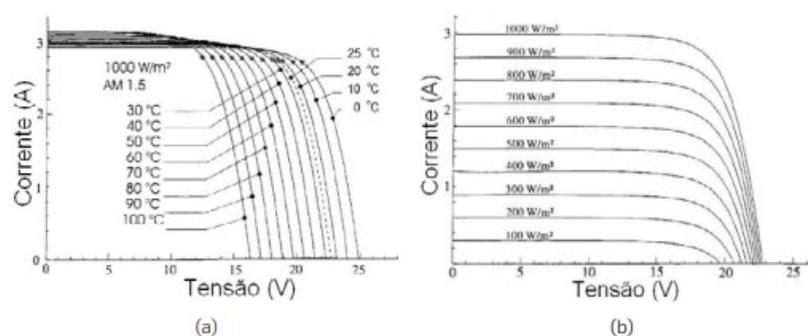


Fonte: Jaíba Solar (2017)

Além, há dos parâmetros elétricos outros fenômenos que também podem influenciar na curva característica de uma célula, como a irradiância e a Temperatura. Por padrão, as curvas são parametrizadas para temperatura ambiente de 25 °C e irradiância de 1 KW/m². Porém, sabe-se que em uma aplicação real, dificilmente as condições ideais serão atingidas, por isso foram feitas estimativas de dados para outras condições de temperatura.

O maior valor da potência, de acordo com a curva, é atingido no seu joelho, ou seja, no último ponto de tensão em que a corrente é constante. Infelizmente, esse ponto ideal de operação dificilmente pode ser mantido, já que no mundo real os fenômenos de temperatura são sempre alterados, pois um painel de módulos fotovoltaicos é exposto ao sol de forma direta. A figura 3 mostra as variações em diferentes temperaturas.

Figura 3 – Curvas características para diversas temperaturas.

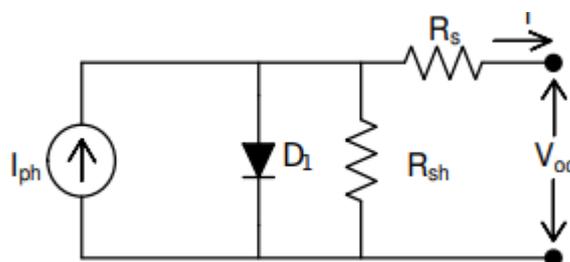


Fonte: Jaíba Solar (2017)

2.2 Modelo do diodo único

Foi definido através de um modelo, que uma célula fotovoltaica tem seu circuito equivalente, da mesma forma que um motor de indução trifásico também pode ser representado teoricamente por um determinado circuito em determinadas condições, também foi realizado uma representação teórica de um modelo que representasse o comportamento elétrico de uma célula fotovoltaica, conforme visto na figura a seguir:

Figura 4 – Modelo do circuito equivalente de uma célula PV.



Fonte: LUNA (2013)

A grande vantagem desse modelo é sua representação das perdas ôhmicas do dispositivo, pela sua resistência série (R_s) e paralelo (R_{sh}). O diodo em questão se trata de uma junção pn, que basicamente faz o diodo atuar como chaveamento, permitindo a passagem de corrente somente por um sentido. A equação, encontrada através da lei de Ohm de nós, que define de forma equacionada a corrente é mostrada por, utilizando também o conceito do diodo ideal desenvolvido por William Bradford Shockley (1910-1989) (1):

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V + IR_s}{akT}} - 1 \right) - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (1)$$

No qual:

I: corrente total [A];

I_{ph} : corrente foto gerada [A];

I_{o1} : corrente de saturação reversa [A];

q: carga elétron ($1,62 \cdot 10^{-19}$ [C]);

k: constante de Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{m}^2 \text{kg/s}^2 \text{K}$)

T: temperatura [K];

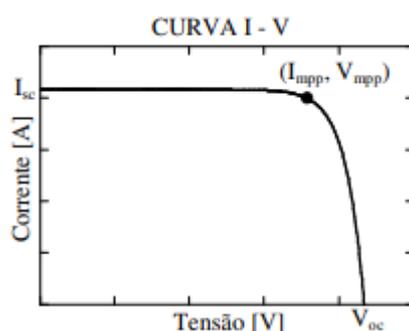
R_s : Resistência série [Ω];

R_{sh} : Resistência paralelo [Ω];

a: fator idealidade.

Com base nessa equação, é possível parametrizar os módulos PV levando em consideração as especificações técnicas dos fabricantes, assim como também é possível traçar uma curva IxV com o mesmo comportamento da curva característica citada anteriormente, como pode-se verificar em figura 5.

Figura 5 – Curva I-V.



Fonte: Carneiro, Joaquim A. O (2010)

Também é possível adquirir mais alguns dados pertinentes dessa análise, tais como: a Tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito, fator de forma e por fim a eficiência. Conceitos esses estudados por PINHO & GALDINO (2014).

2.2.1. Tensão de circuito aberto

A definição de tensão de circuito aberto para PINHO & GALDINO (2014), consiste em “*Máxima tensão entre os terminais da célula fotovoltaica quando não há corrente elétrica circulando, considerando as condições padrão de teste.*” Na

prática, esse parâmetro pode ser obtido através do uso de um voltímetro posicionado nos terminais de um módulo. Porém, é possível calculá-lo através da equação (1), de acordo com o próprio autor, derivando a equação chega-se em (2):

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2)$$

Fonte: PINHO & GALDINO (2014)

2.2.2. Corrente de curto circuito

Trata-se da máxima corrente que é também é possível adquiri-la através da medição direta, posicionando um amperímetro em série com um curto-circuito do módulo. Por se tratar de uma corrente que circula em uma área semi-condutora, pode-se deduzir que o seu valor varia conforme a área empregada da célula fotovoltaica, e as outras considerações previamente estabelecidas também se aplicam nesse parâmetro, como a irradiância solar e a sua distribuição ao redor do módulo. Também é possível calcular a densidade da corrente, dividindo I_{sc} pela sua respectiva área de atuação, conforme equação de Maxwell:

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{A} \quad (3)$$

Pode-se observar através da definição de densidade de corrente que esse parâmetro pode-se alterar dependendo da tecnologia e topologia empregada, portanto é importante checar o datasheet dos fabricantes caso esse parâmetro seja relevante para o projetista.

2.2.3. Fator de forma

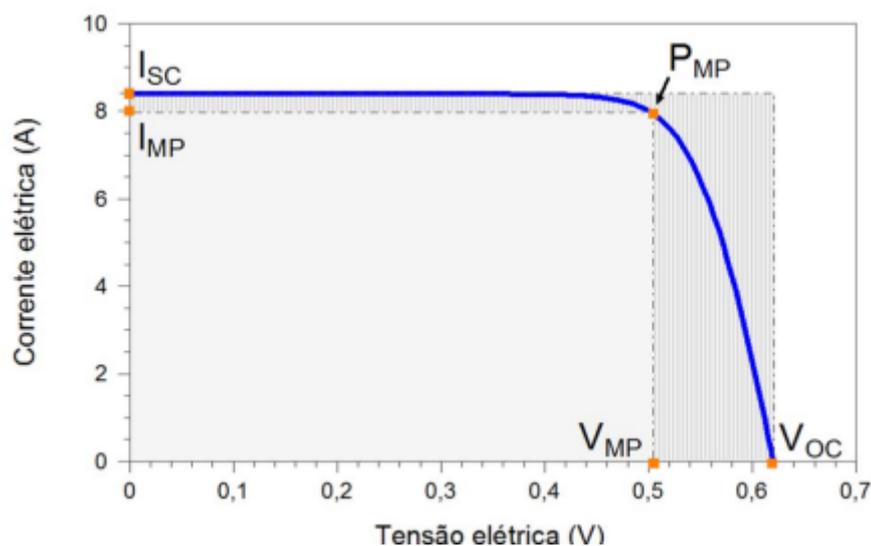
De acordo com a literatura de PINHO & GALDINO (2014), “Fator de forma é a razão entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto circuito com a tensão de circuito aberto” e pode ser definida pela equação (4):

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (4)$$

Esse parâmetro nos permite observar que quanto menor forem as perdas resistivas, mais próxima de uma geometria retangular a curva IxV será, e de acordo com a literatura de PINHO & GALDINO (2014), as resistências em série e em paralelo são os

parâmetros mais relevantes em sua variação, conforme podemos verificar na figura 6.

Figura 6 – Curva característica I-V destacando os parâmetros elétricos



Fonte: PINHO & GALDINO (2014)

2.2.4. Eficiência

Em suas análises, PINHO & GALDINO (2014) definiram a eficiência como o parâmetro que indica a efetividade da conversão de energia solar em elétrica. Ela relaciona a potência da incidência solar com a potência elétrica produzida pela célula fotovoltaica, e sua equação é dada por (5):

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{A \cdot G} \cdot 100\% = \frac{P_{MP}}{A \cdot G} \cdot 100\% \quad (5)$$

No qual:

I_{sc} : Corrente de curto circuito [A];

V_{oc} : Tensão de curto aberto [A];

FF: fator de forma

A: Área da Célula Fotovoltaica (m²)

G: Irradiância solar incidente (W/m²) = 1367W/m²

P_{mp} : Ponto de máxima potência obtida da curva I-V

3 Metodologia

Para o desenvolvimento desse projeto foi necessário uma ampla pesquisa nas bibliografias citadas, assim como uma vivência mínima nas situações cotidianas de uma empresa cuja função é geração e distribuição de energia solar.

Todos os materiais necessários para o estudo já estavam disponíveis na empresa, sendo feito assim o levantamento do estudo posteriormente. Uma pequena equipe fora designada para o estudo de caso, podendo utilizar do grande banco de dados disponível.

O procedimento adotado para a simulação foi na integração da linguagem Python, como mencionado anteriormente, mais especificamente na plataforma “Anaconda Jupyter”, que possui suporte para as bibliotecas necessárias.

Agora que os conceitos necessários para o estudo de caso foram estabelecidos, a ideia central do documento é utilizar o software Python, juntamente com dados disponibilizados pela empresa Re:Energisa (<https://www.reenergisa.com.br>) e pelo engenheiro responsável Rafael Carvalho, para poder ser levantados os parâmetros reais e simulados lado a lado.

Etapa A – Validação dos dados

Para preservar os dados privados da empresa, não foram citados nenhum tipo de dado comprometedor e foram usados, se necessários, nomes mascarados de suas usinas. Tendo isso em mente, utilizaremos os dados do codenome usina Omega, cujo modelo do módulo em questão é o BYD330PHK, com datasheet em anexo no final do documento.

Tabela 1 – Dados da usina utilizada

Itens	TRo1	TRo2	TRo3	TRo4	TRo5	TOTAL
	QUANT.	QUANT.	QUANT.	QUANT.	QUANT.	QUANT.
Módulos	4002	4002	3480	3480	3480	18444
Mesas	69	69	60	60	60	318
Strings	138	138	120	120	120	636
Inversores	6	6	5	5	5	27
Transformadores	1	1	1	1	1	5
Potência cc(Kwp)	1320,66	1320,66	1148,4	1148,4	1148,4	6086,5
Potência ca (Kw)	1110	1110	925	925	925	4995

Etapa B – Levantamento dos parâmetros

O levantamento dos parâmetros foram realizados baseados no modelo (De Soto et al., 2006), que usa equações para expressar os cinco parâmetros primários como função da temperatura do módulo T_c e a irradiância S , mostrado pela figura a seguir:

Figura 7 – Equacionamento De Soto

$$\begin{aligned}
 I_L &= \frac{S}{S_{ref}} \frac{M}{M_{ref}} [I_{L,ref} + \alpha_{Isc} (T_c - T_{c,ref})] \\
 I_0 &= I_{0,ref} \left[\frac{T_c}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[\frac{1}{k} \left(\frac{E_{g,ref}}{T_{ref}} - \frac{E_g}{T_c} \right) \right] \\
 E_g(T_c) &= E_g(T_{ref}) [1 - 0.0002677 (T_c - T_{ref})] \\
 R_s &= \text{constant} \\
 R_{sh} &= R_{sh,ref} \frac{S_{ref}}{S} \\
 n &= \text{constant}
 \end{aligned}$$

Fonte: (De Soto et al., 2006)

A principal razão pela escolha desse levantamento de parâmetro, é que o mesmo desenvolveu uma função via Python para gerar os inputs necessários para o modelo de diodo único, com base na irradiância e temperatura do módulo. A função é chamada “calcparams_desoto” e sua biblioteca é pvlib e seus parâmetros de entrada são:

`pvlib.pvsystem.calcparams_desoto(effective_irradiance, temp_cell, alpha_sc, a_ref, I_L_ref, I_o_ref, R_sh_ref, R_s, EgRef=1.121, dEgdT=-0.0002677, irradi_ref=1000, temp_ref=25)` (De Soto et al., 2006)

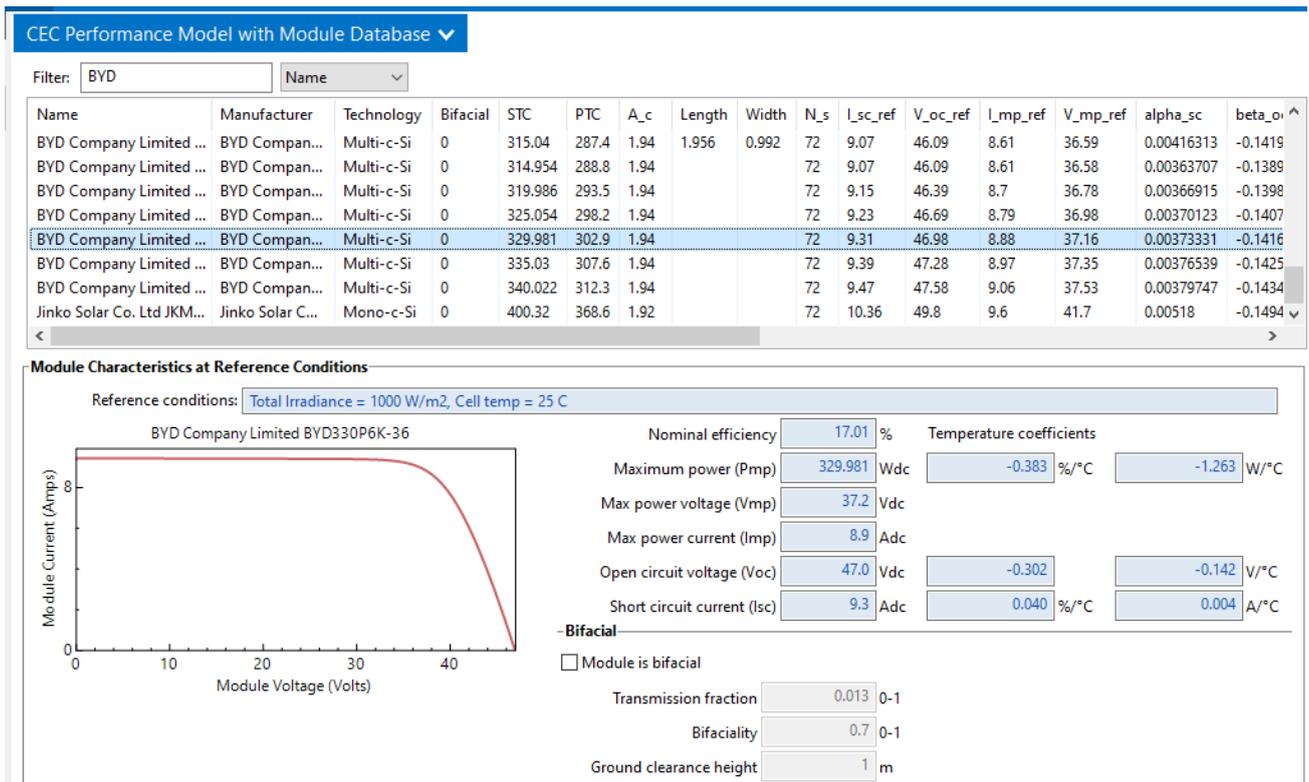
No qual:

- **effective_irradiance** (*numerico*) – Irradiancia (W/m²) convertida em fotocorrente.
- **temp_cell** (*numerico*) – Temperatura media do modulo em °C
- **alpha_sc** (*float*) – A corrente de curto circuito do coeficiente de temperatura, adquirida no datasheet da placa fotovoltaica.
- **a_ref** (*float*) – Produto de idealidade do diodo
- **I_L_ref** (*float*) – Fotocorrente na condição referência
- **I_o_ref** (*float*) – Corrente de saturação na condição referência
- **R_sh_ref** (*float*) – Resistência em paralelo
- **R_s** (*float*) – Resistência em série
- **EgRef** (*float*) – A energia de banda na temperature referência para o silicio. EgRef >0.
- **dEgdT** (*float*) – A temperature dependente da energia de banda na referência
- **irradi_ref** (*float (opcional, padrão=1000)*) – Irradiância referência da celula em W/m².
- **temp_ref** (*float (opcional, padrão=25)*) – Temperatura referência da celula em °C

Agora que sabe-se os parâmetros necessários a serem levantados para efetuar a simulação, basta identificar os valores através da situação desejada e também no datasheet do módulo fotovoltaico envolvido, no caso fora utilizado o JKM565N-72HL4.

Para o levantamento dos parâmetros de entrada, utilizou-se de um software gratuito chamado SAM (System Advisor Model). Trata-se de um aplicativo gratuito disponibilizado pelo laboratório Nacional de Energia Renovável em Colorado. Como mostrado na figura a seguir, é possível identificar o módulo em questão:

Figura 8 – Software SAM



Fonte: Software SAM

Utilizando do software, juntamente com o datasheet do módulo, foi possível chegar nos parâmetros da figura 8:

Figura 9 – Parâmetros do modelo em questão

```
#Módulo TRL para 156 cells
alpha_sc = 0.0065184
a_ref = 2.01523
I_L_ref = 13.7385
I_o_ref = 5.01702e-11
R_s = 0.180723
R_sh_ref = 109.028
EgRef = 1.121 #Valor Padrão
dEgT = -0.0002677 #Valor Padrão
```

Fonte: Autoria própria (2023)

Etapa C – Simulação do Modelo no Python

É importante pontuar que na amostra utilizada, as placas fotovoltaicas são posicionadas em duas direções distintas, uma estando a Noroeste e outra a Sudeste, devido a isso, foi necessário efetuar os cálculos separadamente para no final realizar a concatenação. No código fora utilizado uma base de dados da Usina Omega em um determinado dia, das 5:00 as 19:00, e o espaço amostral dos dados coletados são de 1 minuto.

Utilizando a IDE “Jupyter Anaconda” para a integração da linguagem Python, foram usados os seguintes comandos para obtenção da função desejada, conforme figura 9:

Figura 10– Função responsável para utilização da biblioteca

```
IL, I0, Rs, Rsh, nNsVth = pvsystem.calcpars_desoto(irrad_SE, mod_temp_SE, alpha_sc, a_ref, I_L_ref, I_o_ref, R_sh_ref, R_s, EgRef, dEgdT)

IL1, I01, Rs1, Rsh1, nNsVth1 = pvsystem.calcpars_desoto(irrad_NO, mod_temp_NO, alpha_sc, a_ref, I_L_ref, I_o_ref, R_sh_ref, R_s, EgRef, dEgdT)

curve_info = pvsystem.singlediode(photocurrent=IL, saturation_current=I0, resistance_series=Rs, resistance_shunt=Rsh, nNsVth=nNsVth, ivcurve_pnts=840, method='newton')

curve_info_1 = pvsystem.singlediode(photocurrent=IL1, saturation_current=I01, resistance_series=Rs1, resistance_shunt=Rsh1, nNsVth=nNsVth1, ivcurve_pnts=840, method='newton')

dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD SE'] = pd.Series(curve_info['p_mp'], index=dados_ufv_df.index)
dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD SE']
```

Fonte: Autoria própria (2023)

A função “`pvsystem.calcpars_desoto`” é a responsável pela captação dos parâmetros de entrada, fazendo assim os cálculos necessários para aplicar na equação do modelo citado anteriormente na equação (1).

Pode-se verificar na figura 8 que a a função responsável pela geração da curva dá-se pela “`pvsystem.singlediode`”, que recebe os parâmetros já calculados pela função `pvsystem.calcpars_desoto` e assim efetua o levantamento da curva.

Agora é necessário aplicar as perdas do sistema, para que o modelo possa se aproximar de uma situação real.No código em questão foi considerado as seguintes perdas para o cálculo da simulação:

- PVSyst - Sombreamento: -0.04% (Padrão:-0.04%);
- PVSyst - LID - Light induced degradation: -3.20% (Padrão:-1 a -3%);
- PVSyst – Perdas diversas nos módulos: -1.00% (Padrão:-2%);
- PVSyst – Perda Ohmica: -0.18% (Padrão:-1.5%);

Vale ressaltar que, de um ponto de vista de engenharia, uma perda de 0.04% é ínfima. Porém é significativo saber da existência dessa perda, pois se trata de um valor bem volátil que pode ser aumentado devido a situações adversas, como um

ambiente mais propício a sombreamento. É recomendado seguir os valores padrões fornecidos pela biblioteca caso não possua ciência das próprias perdas, porém no caso analisado foram fornecidos alguma dessas, que foi devidamente utilizado. A parte do código que implementa essas perdas podem ser observadas nas figura 10:

Figura 11 – Implementação das perdas do sistema

```
#LID - Light induced degradation NO
dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD SE'] = dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD SE']*(1-0.032)
dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD SE']
```

```
0    3.586277
1    3.597590
2    3.434379
3    3.424949
4    3.408482
```

...

```
835   1.647987
836   1.586782
837   1.628293
838   1.653115
839   1.736753
```

Name: Potência por módulo (W) - SD SE, Length: 840, dtype: float64

```
#Ohmic wiring Loss SE
dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD SE'] = dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD SE']*(1-0.0018)
dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD SE']
```

```
0    3.579822
1    3.591114
2    3.428198
3    3.418784
4    3.402346
```

...

```
835   1.645021
836   1.583925
837   1.625362
838   1.650139
839   1.733627
```

Name: Potência por módulo (W) - SD SE, Length: 840, dtype: float64

```
#Ohmic wiring Loss NO
dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD NO'] = dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD NO']*(1-0.0018)
dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD NO']
```

Fonte: Autoria própria (2023)

```

0      28.955793
1      28.733922
2      30.722321
3      29.361591
4      27.895942
...
835    13.465793
836    12.752852
837    12.818356
838    12.913253
839    13.319635
Name: Potência por módulo (W) - SD NO, Length: 840, dtype: float64

```

```

dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD SE'] = dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD SE']/1000
dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD SE']

```

```

0      0.003580
1      0.003591
2      0.003428
3      0.003419
4      0.003402
...
835    0.001645
836    0.001584
837    0.001625
838    0.001650
839    0.001734
Name: Potência por módulo (W) - SD SE, Length: 840, dtype: float64

```

```

dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD NO'] = dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD NO']/1000
dados_ufv_df['Potência por módulo (W) - SD NO']

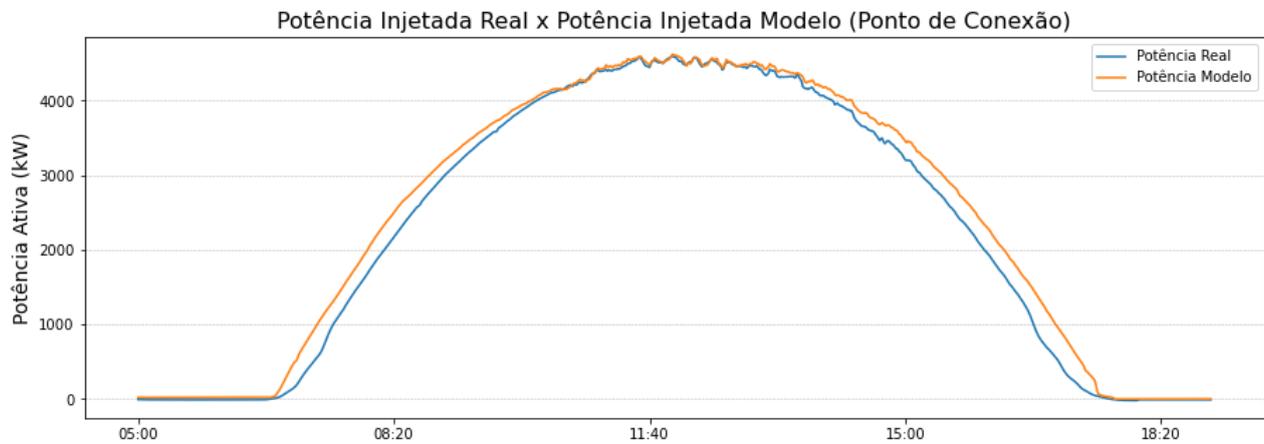
```

Fonte: Autoria própria (2023)

Pode-se observar que no último comando de código o resultado final foi dividido por 1000. Apesar de não ser necessário essa etapa, foi realizado pelo fato de que a potência em usinas fotovoltaicas geralmente é dada na escala de “Mega” (10^6).

Com esses dados foram possíveis obter os parâmetros necessários para o levantamento das curvas do modelo e real. Ainda, foi realizado uma simulação no ponto de vista de um multimedidor ABB M4M30, conforme mostrado a seguir:

Figura 12 – Potência injetada visto pelo multimetro.

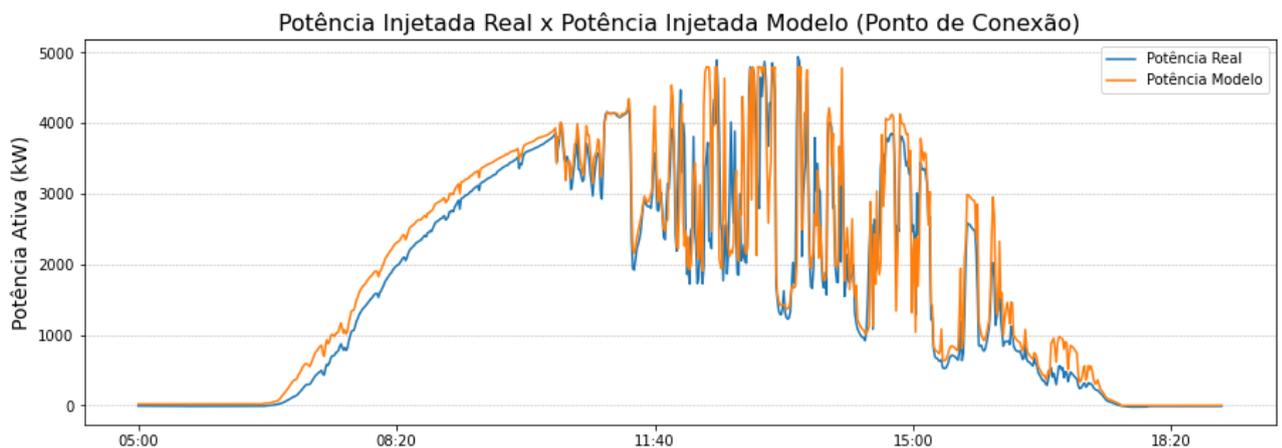


Fonte: Autoria própria (2023)

O multimetro da empresa costuma estar configurado para realizar a medição do valor médio dos parâmetros elétricos, por essa razão o gráfico teve um comportamento mais ideal, e ainda assim podemos observar que o simulador obteve um resultado similar aos valores medidos.

Também foi possível verificar o comportamento do modelo em relação a potência real vista pelos inversores na figura 11:

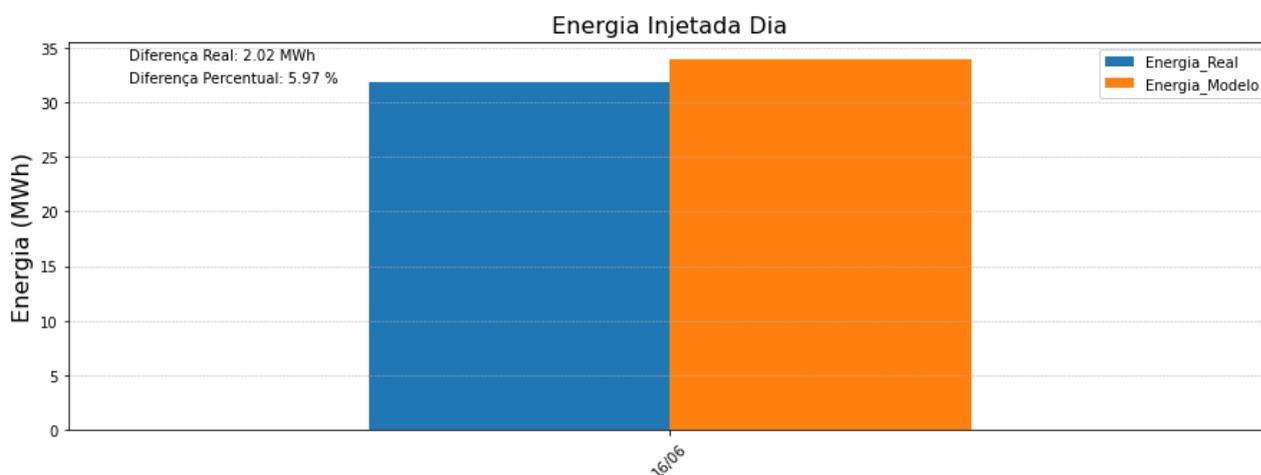
Figura 13 – Potência injetada real.



Fonte: Autoria própria

Por fim, também foi feito a comparação da energia injetada, em MWh com a simulada, obtendo-se resultados em uma margem de erro de aproximadamente 6%

Figura 14 – Energia injetada.



Fonte: Autoria própria (2023)

Os resultados da simulação mostraram-se bem satisfatórios, com uma diferença percentual pequena em relação ao resultado real. Uma vez que possui-se resultados satisfatórios, pode ser possível expandir a aplicação para outros objetivos, como estipular metas em um intervalo de tempo, verificar a performance com fabricantes diferentes e identificar possíveis falhas nas amostras.

4 Conclusão

Considerando os resultados obtidos da simulação, conclui-se que o método computacional proposto permite que seja possível determinar os parâmetros elétricos de uma placa fotovoltaica presente no mercado, para traçar as suas curvas características, encontrar a máxima potência ativa teórica e a energia máxima injetada de uma determinada usina fotovoltaica ou mesmo de uma placa isolada, fazendo-se uso dos valores de tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, fator de forma e eficiência. Porém, há uma limitação a respeito dos dados coletados de temperatura e irradiação, é necessário obtê-los anteriormente criar um banco de dados para assim ser devidamente utilizado na função.

Com os resultados obtidos, pode-se estabelecer metas de geração de energia, assim como observar momentos em que a geração atual não está de acordo com o que deveria, e assim entender, estipular e planejar medidas, se possível, para melhorar a eficiência no dia a dia, buscando amenizar gastos ou fazer estudos de melhorias nas instalações, uma vez que com um simulador em mãos, pode-se planejar soluções mais viáveis, do ponto de vista energético e financeiro.

Referências Bibliográficas

- [1] CARNEIRO A.O., Joaquim . **Módulos fotovoltaicos: características e associações**, 2010.
- [2] OLIVEIRA FRONTIN, Sergio. **Jaíba Solar Usina fotovoltaica**, 2017.
- [3] M. L. M, Luna. **Comparação e Validação de Modelos Elétricos de um Diodo e dois Diodos de um Módulo Fotovoltaico**. 2013. 34f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza (CE).
- [4] **Single Diode Models**. Disponível em < https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/reference/pv_modeling/sdm.html > Acesso em 2022.
- [5] GONÇALVES CORNELIUS, Richard et.all COSTA MAIA, Amanda; SEBASTIÃO DA SILVA, Guilherme; MACIEL KAEHLER, José Wagner. **CONSTRUÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO UTILIZANDO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON E ALGORITMOS GENÉTICOS**, 2018.
- [6] PINHO & GALDINO. **Manual de Engenharia para Sistemas fotovoltaicos**, 2014.

Anexos

BYD

POLICRISTALINO HALF-CELL

PHK-36-SÉRIE-5BB

325-350W



*Imagem ilustrativa

- ▶ BYD325-PHK-36-5B
- ▶ BYD330-PHK-36-5B
- ▶ BYD335-PHK-36-5B
- ▶ BYD340-PHK-36-5B
- ▶ BYD345-PHK-36-5B
- ▶ BYD350-PHK-36-5B



Potência nominal
325-350W



Eficiência do módulo
até 17,71%



Tolerância positiva
de 0 a 5W

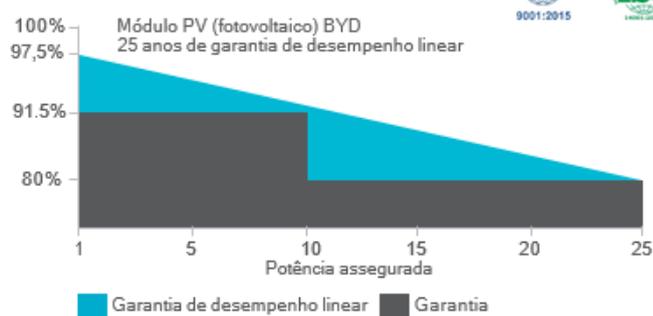


Garantia
10 anos para o produto
25 anos de desempenho linear



Aplicações

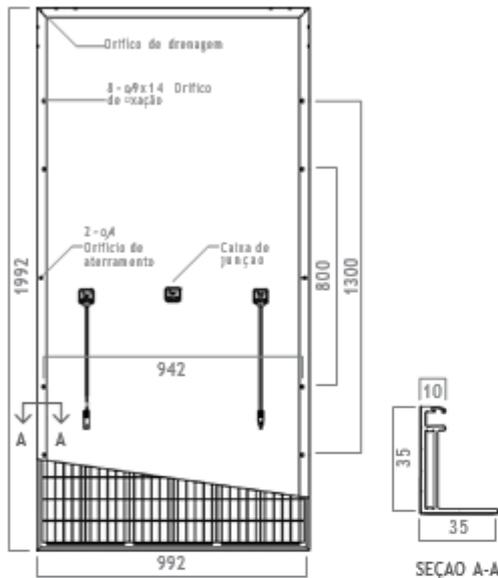
- ▶ Sistemas residenciais, comerciais, industriais e geração remota
- ▶ Aplicações on grid e off grid



BYD: O sonho da BYD vai ao encontro do que a humanidade precisa: mudar a dependência humana de energias não renováveis para energia limpa. Nossa missão é ajudar países e pessoas a superarem a crise energética e reduzirem a poluição ambiental por meio da utilização de fontes renováveis de energia. Nossos sonhos verdes: usinas e fazendas solares, estações de armazenamento de energia, veículos elétricos e soluções de mobilidade urbana estão em pleno funcionamento, e atendem públicos de diversos segmentos, abrangendo aplicações residenciais, comerciais e industriais, de pequeno, médio e grande porte. Isso é um sonho? Esses são os "sonhos verdes" da BYD diariamente sendo transformados em realidade.

BYD**POLICRISTALINO HALF-CELL**

PHK-36-SÉRIE-5BB

325-350W**FICHA TÉCNICA**

CÉLULA	156.75×78.40mm
NÚMERO DE CÉLULAS	144 (12×12) unidades
DIMENSÕES DO MÓDULO	1992mm×992mm×35mm
PESO	22.2kg
VIDRO FRONTAL	Vidro temperado de 3.2mm com revestimento AR
ESTRUTURA	Liga de alumínio anodizado
CAIXA DE JUNÇÃO	IP67(3 Diodos)
TIPO DE CONECTOR	Compatível com MC4
ÁREA DE SEÇÃO DO CABO	4,0mm ² ×450mm

COEFICIENTES DE TEMPERATURA

COEFICIENTE DE TEMPERATURA DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	0.07% / °C
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DA TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO	-0.31% / °C
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DA POTÊNCIA DE PICO	-0.39% / °C

INFORMAÇÕES SOBRE A EMBALAGEM

EMBALAGEM	40' HQ
UNIDADES / PALLET	30
PALLET / CONTAINER	22
UNIDADES / CONTAINER	660

**ESPECIFICAÇÃO ELÉTRICA**

TIPO DE MÓDULO	325PHK-36	330PHK-36	335PHK-36	340PHK-36	345PHK-36	350PHK-36
POTÊNCIA MÁXIMA (P _{máx})	325Wp	330Wp	335Wp	340Wp	345Wp	350Wp
TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO (V _{oc})	44.94V	45.19V	45.44V	45.69V	45.94V	46.19V
CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO (I _{sc})	9.14A	9.20A	9.25A	9.31A	9.36A	9.42A
TENSÃO MÁXIMA DE FUNCIONAMENTO (V _{mp})	37.57V	37.83V	38.10V	38.36V	38.62V	38.87V
CORRENTE DE POTÊNCIA DE PICO (I _{mp})	8.65A	8.72A	8.79A	8.86A	8.93A	9.00A
EFICIÊNCIA DO MÓDULO	16.45%	16.70%	16.95%	17.21%	17.46%	17.71%
TEMPERATURA DE OPERAÇÃO	-40°C~85°C					
TENSÃO MÁXIMA DO SISTEMA	1500VDC					
VALOR NOMINAL DA CORRENTE MÁXIMA DO FUSÍVEL	15A					
SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO	Classe C					
TOLERÂNCIA DE SAÍDA DE POTÊNCIA	0-5W					
VENTO / CARGA DE NEVE	2400 Pa / 5400 Pa					

*A BYD reserva-se o direito de modificar projetos, características e parâmetros técnicos dos seus produtos a qualquer momento, sem aviso prévio, uma vez que os mesmos estão sujeitos a atualizações contínuas, com a missão de sempre oferecer produtos da mais alta qualidade.

BYD ENERGY DO BRASIL

Avenida Antonio Buscato, 230 - Campinas / São Paulo
Brasil | CEP 13069-119 | Tel.: +55 19 3514-2550



www.byd.com/br +55 19 3514.2550 vendas@byd.com

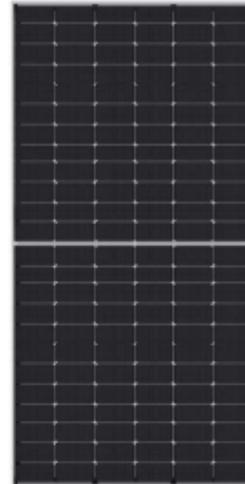
Versão 1.0.2019



www.jinkosolar.com



Tiger Neo N-type 72HL4-(V) 555-575 Watt MONO-FACIAL MODULE



N-Type

Positive power tolerance of 0~+3%

IEC61215(2016), IEC61730(2016)

ISO9001:2015: Quality Management System

ISO14001:2015: Environment Management System

ISO45001:2018

Occupational health and safety management systems

Key Features



SMBB Technology

Better light trapping and current collection to improve module power output and reliability.



Hot 2.0 Technology

The N-type module with Hot 2.0 technology has better reliability and lower LID/LETD.



PID Resistance

Excellent Anti-PID performance guarantee via optimized mass-production process and materials control.



Enhanced Mechanical Load

Certified to withstand: wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).



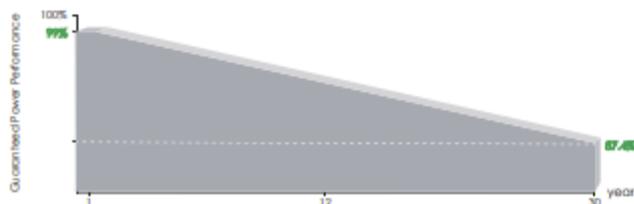
Higher Power Output

Module power increases 5-25% generally, bringing significantly lower LCOE and higher IRR.



POSITIVE QUALITY™
Certified by TÜV SÜD

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

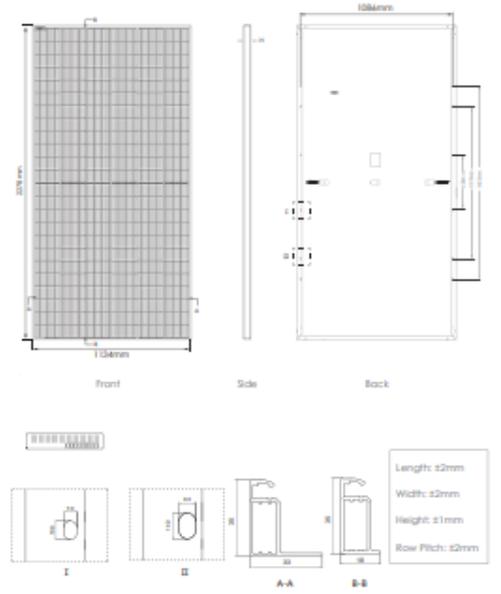


12 Year Product Warranty

30 Year Linear Power Warranty

0.40% Annual Degradation Over 30 years

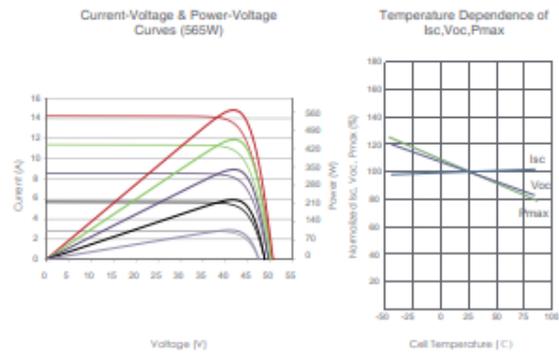
Engineering Drawings



Packaging Configuration

[Two pallets = One stack]
 31 pcs/pallets, 62 pcs/stack, 620 pcs/ 40HQ Container

Electrical Performance & Temperature Dependence



Mechanical Characteristics

Cell Type	N type Mono-crystalline
No. of cells	144 (6×24)
Dimensions	2278×1134×35mm (89.69×44.65×1.38 inch)
Weight	28 kg (61.73 lbs)
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm ² (+): 400mm, (-): 200mm or Customized Length

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM555N-72HL4		JKM560N-72HL4		JKM565N-72HL4		JKM570N-72HL4		JKM575N-72HL4	
	JKM555N-72HL4-V	JKM560N-72HL4-V	JKM565N-72HL4-V	JKM570N-72HL4-V	JKM575N-72HL4-V	JKM555N-72HL4-V	JKM560N-72HL4-V	JKM565N-72HL4-V	JKM570N-72HL4-V	JKM575N-72HL4-V
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	555Wp	417Wp	560Wp	421Wp	565Wp	425Wp	570Wp	429Wp	575Wp	432Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	41.64V	39.12V	41.77V	39.25V	41.92V	39.38V	42.07V	39.51V	42.22V	39.60V
Maximum Power Current (Imp)	13.33A	10.67A	13.41A	10.73A	13.48A	10.79A	13.55A	10.85A	13.62A	10.92A
Open-circuit Voltage (Voc)	50.34V	47.82V	50.47V	47.94V	50.60V	48.06V	50.74V	48.20V	50.88V	48.33V
Short-circuit Current (Isc)	14.07A	11.36A	14.15A	11.42A	14.23A	11.49A	14.31A	11.55A	14.39A	11.62A
Module Efficiency STC (%)	21.48%		21.68%		21.87%		22.07%		22.26%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	25A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.30%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.25%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.046%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

*STC: ☀ Irradiance 1000W/m² 🌡 Cell Temperature 25°C ☁ AM=1.5
 NOCT: ☀ Irradiance 800W/m² 🌡 Ambient Temperature 20°C ☁ AM=1.5 🌀 Wind Speed 1m/s

```

import
import
import
import
import
import sys plt
import
import pvlib
from pvlib import pvsystem
from dateutil import tz

```

```

##Parte do código da coleta de dados, sigilosa da empresa

```

```

alpha_sc=
  _ref= 2.01523
I_L_ref= 13.7385
I_o_ref= 5.01702e
R_s= 0.180723
EgRef= 1.121 #Valor padrão
dEgdT= -0.00267 #Valor Padrão

```

```

IL, IO, Rs, Rsh, nNsVth = pvsystem.calcparams_desoto(irrad, mod_temp, alpha_sc, a_

```

```

curve_info = pvsystem.singleiode(photocurrent=IL, saturation_current=IO, resisten

```

```

dados_ufv_df['Potência por modulo (W) '] = pd.Series(curve_info['p_mp'], index=dado

```

```

#Erros do pvsyst aplicados nos modulos

```

```

#Shading: Eletrical Loss acc. to strings

```

```

dados_ufv_df['Potência por modulo (W) '] = dados_ufv_df['Potência por modulo (W) '

```

```

#LID: Light i degradation

```

```

dados_ufv_df['Potência por modulo (W) '] = dados_ufv_df['Potência por modulo (W) '

```

```

#Missmatc Loss, es an strings

```

```

dados_ufv_df['Potência por modulo (W) '] = dados_ufv_df['Potência por modulo (W) '

```

```

#Ohmi wiring loss

```

```

dados_ufv_df['Potência por modulo (W) '] = dados_ufv_df['Potência por modulo (W) '

```

```

dados_ufv_df['Potência por modulo (W) '] = dados_ufv_df['Potência por modulo (W) '

```

```

    grafico
    _ufv_df.plot_line(x='Timestamp', y='Potência por modulo (W) ', label='Potência modelo')
plt.gcf().set_size_inches(10,5)
plt.title("Potência Injetada Real x Potência Injetada Modelo (Ponto de conexão)",
plt.ylabel("Potência ativa (kW)", fontsize=14)
plt.xlabel("")
plt.grid(axis='y', linestyle= '--', linewidth=0.5)

```

```

daily_energy_df.plot_bar(x='Timestamp', y='Energia (MWh)', label='Energia Modelo')
plt.gcf().set_size_inches(10,5)
plt.title("Energia injetada dia", fontsize=16)
plt.ylabel("Energia(Mwh)", fontsize=16)
plt.xlabel("")
plt.grid(axis='y', linestyle= '--', linewidth=0.5)
plt.text(-0.45, daily_energy_df['Energia Modelo'][0], "Diferença Real: "+str(round
plt.text(-0.45, daily_energy_df['Energia_Real_Consumida'][0]+1, "Difere , Percentu

```