



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Departamento de Engenharia Elétrica

Lucas Simões de Oliveira

## **Modelagem e Simulação de um Sistema Fotovoltaico em Matlab/Simulink**

Campina Grande, Paraíba

Maio 2014

Lucas Simões de Oliveira

## **Modelagem e Simulação de um Sistema Fotovoltaico em Matlab/Simulink**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Geração de Energia Elétrica

Orientador: George Rossany Soares de Lira

Campina Grande, Paraíba

Maio 2014

Lucas Simões de Oliveira

## **Modelagem e Simulação de um Sistema Fotovoltaico em Matlab/Simulink**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.

---

**George Rossany Soares de Lira**  
Orientador

---

**Tarso Vilela Ferreira**  
Avaliador

Campina Grande, Paraíba  
Maio 2014

*A meus pais, que me ensinaram a caminhar.*

# Agradecimentos

Agradeço a meus pais, Vicente e Sara, por todo amor, carinho e ensinamentos durante toda minha vida.

Agradeço também a toda minha família, que mesmo com a distância, sempre acompanhou de perto meu crescimento pessoal e profissional.

Meus agradecimentos aos amigos feitos durante a graduação, companheiros de trabalhos e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação, e que espero que possam continuar presentes em minha vida.

Agradeço a George Lira, meu orientador, pela orientação e empenho dedicado à elaboração deste trabalho além de todas as conversas e orientações profissionais.

E finalmente, gostaria de agradecer ao corpo docente, à direção e à administração por seu trabalho na formação de todos os alunos desta instituição.

*“Viva como se fosse morrer amanhã.  
Aprenda como se fosse viver para sempre.”  
- Mahatma Gandhi*

# Resumo

Este trabalho trata da modelagem de um sistema de energia fotovoltaica para fornecer uma plataforma de estudos e simulações. O sistema foi instalado no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande. Realizou-se um estudo teórico dos modelos de células solares disponíveis na literatura, além de uma análise dos custos envolvidos e da viabilidade técnico-econômica do projeto. Os modelos foram equacionados matematicamente e simulados através das ferramentas computacionais Matlab e Simulink. A comparação dos resultados foi feita utilizando os modelos mais representativos e as medições experimentais. Após uma análise dos dados optou-se por adotar um dos modelos propostos para simulações futuras do sistema fotovoltaico.

**Palavras-chaves:** Energia Fotovoltaica. Modelo Painel Solar. Simulação Sistema Fotovoltaico.

# Abstract

This report presents a photovoltaic generation model developed for the Matlab/Simulink environment as a simulation platform to support studies in this field. This simulation platform was installed at the High Voltage Laboratory at the Federal University of Campina Grande. The platform was built based on a preliminary study of a variety of solar cells models and also on a cost and feasibility analysis. At first, the different cell models were mathematically analyzed and then simulated in Matlab / Simulink. Next, the most representative models were chosen, regarding the simulation results. The results for those models were then compared to the experimental measurements. The model chosen to represent the system in simulations was the one with the closest results to the experimental measurements.

**Key-words:** Photovoltaic Energy. Solar Panel Modelling. Photovoltaic System Simulation.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Evolução de capacidade instalada e energia gerada a partir da geração solar. . . . .	12
Figura 2 – Circuito equivalente simplificado de uma fotocélula. . . . .	15
Figura 3 – Curva corrente-tensão de uma célula iluminada ou sem iluminação. . .	16
Figura 4 – Modelo simplificado de duas células conectadas em série com sombreamento parcial. . . . .	17
Figura 5 – Modelo completo de uma célula solar. . . . .	17
Figura 6 – Efeito da irradiação no painel fotovoltaico. . . . .	18
Figura 7 – Efeito da temperatura no painel fotovoltaico. . . . .	19
Figura 8 – Curvas I-V de um painel e de uma carga. . . . .	20
Figura 9 – Curvas $IxV$ e $P_{max}$ para diferentes irradiações. . . . .	20
Figura 10 – Visão geral de um sistema fotovoltaico. . . . .	21
Figura 11 – Bateria estacionária adquirida para aplicações futuras. . . . .	21
Figura 12 – Inversor adquirido para aplicações futuras. . . . .	22
Figura 13 – Carga variável utilizada nas medições. . . . .	25
Figura 14 – Circuito simplificado modelado no Simulink. . . . .	26
Figura 15 – Bloco para a influência da temperatura e da irradiação na fonte de corrente. . . . .	27
Figura 16 – Bloco para a influência da temperatura na corrente reversa do diodo. .	27
Figura 17 – Circuito completo de um painel solar. . . . .	28
Figura 18 – Modelo simulink final do painel e suas entradas e saídas. . . . .	28
Figura 19 – Curva $IxV$ do painel usando o 1° modelo. . . . .	31
Figura 20 – Potência do painel usando o 1° modelo. . . . .	32
Figura 21 – Curvas I-V para diferentes irradiações usando o 2° modelo. . . . .	33
Figura 22 – Curvas de potência usando o 2° modelo. . . . .	33
Figura 23 – Curvas I-V para diferentes temperaturas usando o 2° modelo. . . . .	34
Figura 24 – Curvas de potência para diferentes temperaturas usando o 2° modelo. .	34
Figura 25 – Curvas I-V para diferentes irradiações usando o 3° modelo. . . . .	35
Figura 26 – Curvas de potência para diferentes irradiações usando o 3° modelo. . .	36
Figura 27 – Curvas I-V para diferentes temperaturas usando o 3° modelo. . . . .	36
Figura 28 – Curvas de potência para diferentes temperaturas usando o 3° modelo. .	37
Figura 29 – Comparação curvas I-V dos modelos para diferentes irradiações. . . . .	38
Figura 30 – Comparação curvas de potência dos modelos para diferentes irradiações.	39
Figura 31 – Comparação curvas I-V dos modelos para diferentes temperaturas. . . . .	39

Figura 32 – Comparação curvas de potência dos modelos para diferentes temperaturas. . . . .	40
Figura 33 – Comparação curvas I-V dos modelos e das medições. . . . .	41
Figura 34 – Comparação curvas de potência dos modelos e das medições. . . . .	42

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Perda de potência devido ao ângulo de desalinhamento. . . . .	23
Tabela 2 – Características elétricas do painel KD240GX-LFB. . . . .	24
Tabela 3 – Características elétricas simuladas do modelo simulink completo. . . . .	32
Tabela 4 – Características elétricas simuladas do 3° Modelo. . . . .	35
Tabela 5 – Valores medidos e valores gerados pelos modelos . . . . .	43
Tabela 6 – Irradiação mensal média. . . . .	44
Tabela 7 – Energia produzida mensalmente pelos painéis. . . . .	45
Tabela 8 – Custos envolvidos no projeto. . . . .	45

# Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HSP	Horas de Sol Pleno
LAT	Laboratório de Alta Tensão
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência - <i>Maximum Power Point Tracking</i>
MPP	Ponto de Máxima Potência - <i>Maximum Power Point</i>
PDE	Plano Decenal de Energia
PRS	Período de Retorno Simples
STC	Condições Padrões de Teste - <i>Standard Test Conditions</i>
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

# Sumário

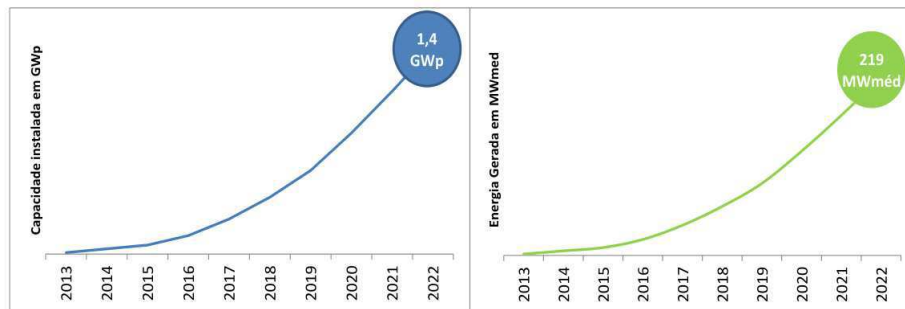
<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>12</b>
1.1	Motivação	13
1.2	Objetivos	13
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>14</b>
2.1	Painéis Fotovoltaicos	14
2.2	Componentes Adicionais de um Sistema Fotovoltaico	21
<b>3</b>	<b>Material e Métodos</b>	<b>24</b>
3.1	Material	24
3.2	Métodos	25
<b>4</b>	<b>Resultados e Análises</b>	<b>31</b>
4.1	Resultados 1° Modelo	31
4.2	Resultados 2° Modelo	32
4.3	Resultados 3° Modelo	35
4.4	Comparações entre modelos	38
4.5	Comparações com medições experimentais	41
4.6	Análise financeira	43
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>47</b>
	Referências	48
	ANEXO A <i>Datasheet</i> Painei	49
	ANEXO B <i>Datasheet</i> Inversor	51

# 1 Introdução

A geração de energia elétrica usando fontes renováveis apresenta um crescimento cada vez maior em todo o mundo, devido ao baixo impacto ambiental e a possibilidade de redução da dependência de combustíveis fósseis. Dentre as diversas fontes renováveis disponíveis (sol, vento, chuva, marés e energia geotérmica) vale destacar a energia solar devido ao grande potencial gerador da região nordeste do Brasil.

No Plano Decenal de Energia, há uma previsão de um montante de 1,9 TWh devido à penetração de sistemas de geração solar fotovoltaica nas classes residencial e comercial (equivalente a 219 MW<sub>méd</sub> em 2022). A evolução da capacidade instalada e a respectiva energia gerada são apresentadas na Figura 1.

**Figura 1** – Evolução de capacidade instalada e energia gerada a partir da geração solar.



Fonte: EPE - PDE 2022

A geração de energia elétrica usando painéis solares, possibilita tanto a criação de grandes unidades de geração próximas aos centros de consumo quanto a instalação de pequenas unidades geradoras, que consomem a própria energia produzida. Este sistema de geração distribuída já foi regulamentado pela resolução da ANEEL 482/2012, em que foram estabelecidas normas para a participação no Sistemas de Compensação de Energia, dando assim, um incentivo ainda maior para o uso, pesquisa e desenvolvimento destas fontes energéticas.

No desenvolvimento do trabalho será feita, inicialmente, uma abordagem dos princípios físicos de funcionamento de painéis fotovoltaicos e dos demais componentes necessários para a geração, tais como conversores e inversores. Também serão detalhados e explicados os diversos parâmetros presentes em um *datasheet* de um painel solar comercial. Na próxima etapa será feita uma análise e discussão dos resultados obtidos para cada um dos modelos avaliados, bem como a comparação com os dados fornecidos pelo fabricante e uma análise econômica do projeto. O trabalho é finalizado com as conclusões

das atividades desenvolvidas e propostas de melhorias que podem ser desenvolvidas em trabalhos futuros.

## 1.1 Motivação

A crescente demanda mundial por fontes alternativas de energia e a necessidade de acompanhar esta tendência são fatores que impulsionam o estudo da energia solar. Assim, para expandir esta tecnologia é necessário o estudo da mesma em centros de pesquisa para familiarizar os profissionais da área com as questões envolvidas, tais como montagem do sistema, princípio de operação, conexão com a rede elétrica, além de problemas econômicos e de regulamentação.

Deste modo, o trabalho desenvolvido poderá servir de base para diversas outras atividades de pesquisa e ensino na UFCG, levando a um contato acadêmico e profissional cada vez maior com a energia fotovoltaica.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos realizar a modelagem do sistema de painéis fotovoltaicos a serem instalados no Laboratório de Alta Tensão - LAT. Desenvolvendo um modelo representativo do painel em ambiente Matlab e Simulink, para auxiliar no projeto e testes de futuras modificações do sistema. Além de realizar a montagem dos módulos e a comparação entre os parâmetros medidos e os simulados.

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 Painéis Fotovoltaicos

O painel fotovoltaico é um dispositivo composto pela interligação em série/paralelo de diversas células solares, de modo a aumentar a sua potência. Cada célula é formada por silício dopado para a formação de uma junção PN, se esta junção for atingida por um fóton com energia suficiente para vencer a *band gap* do silício haverá a circulação de elétrons pela célula, conforme detalhado em (LORENZO, 1994).

De acordo com (VITORINO, 2008), atualmente existem diversos tipos de células com diferentes materiais, e comercialmente há um domínio do silício cristalino. Três tecnologias influem no custo, rendimento e aplicações da célula:

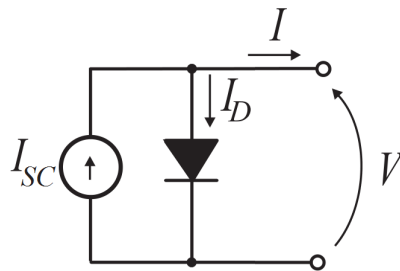
- Silício Cristalino: É a tecnologia mais empregada no mercado atualmente, com uma participação de 95% do mercado de células fotoelétricas. Pode ser dividido em múltiplas categorias, de acordo a a cristalinidade e o tamanho dos cristais. Estas células são inteiramente baseadas no principio de uma junção PN.
  - Silício Monocristalino (c-Si): Tendem a ser mais caras, pois são cortadas a partir de um cristal cilíndrico único de Si, que não cobre toda a área de um modulo sem um desperdício substancial de silício refinado. Assim, a maioria dos painéis de c-Si possuem zonas descobertas nos quatro cantos das células. Como as células são originadas de um único cristal, a estrutura apresenta uma maior uniformidade, possibilitando um rendimento de cerca de 21%;
  - Silício Policristalino (poly-Si ou mc-Si): São mais baratas que o silício monocristalino, pois são constituídos de pequenos cristais de Si, reduzindo o desperdício e o tamanho do bloco de silício necessário. Porém a descontinuidade da estrutura molecular dificulta o movimento de elétrons, comprometendo assim o rendimento, que é de cerca de 13%;
- Silício Amorfo (a-Si): Células de silício amorfo são as mais baratas, pois utilizam apenas uma fração do material necessário para as outras células, entretanto, possuem defeitos estruturais que devem ser tratados com a adição de hidrogênio para viabilizar seu uso. São utilizados em equipamentos solares simples como relógios e calculadoras. Representam aproximadamente 3,7% do mercado de células fotoelétricas e têm rendimento de cerca de 7%.

### 2.1.1 Células solares e seu modelo simplificado

Os fótons de uma fonte luminosa ao incidirem sobre uma célula solar são absorvidos pela mesma. Caso estes fótons absorvidos possuam energia suficiente para vencer a banda proibida do material semicondutor, elétrons serão arrancados dos átomos e poderão circular pelo material em um sentido definido, devido a orientação da junção PN. Esta circulação de elétrons, juntamente com o campo elétrico interno à célula originado pela junção resultam na potência disponível da célula, de acordo com (LORENZO, 1994).

Um modelo equivalente bastante simplificado de uma fotocélula pode ser representado como um diodo real em paralelo com uma fonte de corrente, conforme ilustrado na Figura 2, onde a corrente fornecida pela fonte de corrente é proporcional ao fluxo de energia solar incidente na célula.

**Figura 2** – Circuito equivalente simplificado de uma fotocélula.



Fonte: Adaptação de (VITORINO, 2008).

Existem dois parâmetros fundamentais no trabalho de modelagem de uma fotocélula. A corrente de curto circuito  $I_{SC}$ , corrente esta que circula quando os terminais estão curto-circuitados, e a tensão de circuito aberto  $V_{OC}$ , que é a tensão presente entre os terminais quando há uma impedância infinita conectada entre os mesmos. Estas condições são os pontos extremos da curva I-V de uma célula fotovoltaica.

Quando os terminais estão curto-circuitados, nenhuma corrente circula pelo diodo  $I_d = 0$  (pois  $V_d = 0$ ), assim pode-se escrever a equação da corrente que circula para a carga da seguinte forma:

$$I = I_{SC} - I_D, \quad (2.1)$$

$$I = I_{SC} - I_S \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right), \quad (2.2)$$

em que: I - Corrente que circula para a carga;  $I_{SC}$  - Fonte de corrente constante igual à especificação do painel;  $I_D$  - Corrente que circula pelo diodo;  $I_S$  - Corrente reversa



máxima de saturação do diodo;  $q$  - Carga de um elétron;  $k$  - Constante de Boltzmann;  $T$  - Temperatura da célula em Kelvin;

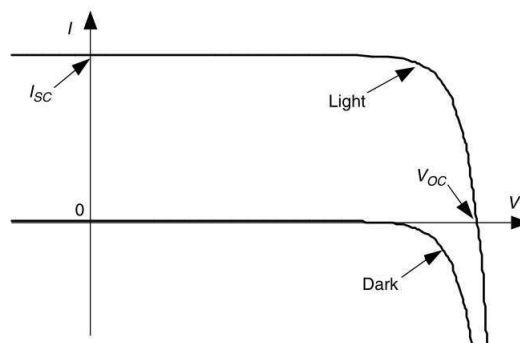
Com os terminais em aberto, a corrente circulante fica reduzida a  $I = 0$ , e pode-se resolver (2.2) para a tensão  $V_{OC}$ :

$$V = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right), \quad (2.3)$$

em que:  $I$  - Corrente que circula para a carga;  $I_{SC}$  - Fonte de corrente constante igual à especificação do painel;  $I_D$  - Corrente que circula pelo diodo;  $I_S$  - Corrente reversa máxima de saturação do diodo;  $q$  - Carga de um elétron;  $V$  - Tensão nos terminais do diodo;  $k$  - Constante de Boltzmann;  $T$  - Temperatura da célula em Kelvin;

Tanto em (2.2) quanto em (2.3), a corrente de curto-circuito  $I_{SC}$  é diretamente proporcional a irradiação solar, ou seja, agora é possível plotar curvas corrente-tensão para dois modos de operação, com iluminação e sem iluminação solar, conforme representado na Figura 3.

**Figura 3** – Curva corrente-tensão de uma célula iluminada ou sem iluminação.



Fonte: (MASTERS, 2013).

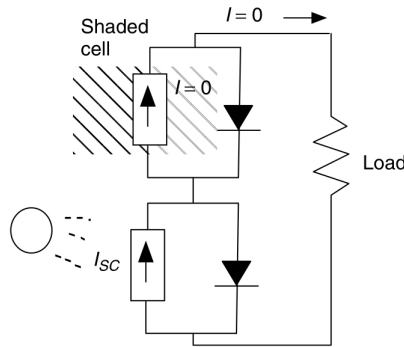
### 2.1.2 Modelo detalhado de uma célula solar

Embora o modelo descrito anteriormente forneça um entendimento básico do funcionamento de uma fotocélula, o mesmo nem sempre é adequado para a representação de um painel solar, pois existem parâmetros que afetam o desempenho do mesmo que não foram levados em consideração durante a modelagem. Por exemplo: para formar um painel há a conexão série de diversas células, e se houver o sombreamento de qualquer célula a mesma não produzirá corrente.

Assim, com o sombreamento em uma célula modelada pelo circuito simplificado da Figura 2,  $I_{SC} = 0$  e o diodo está reversamente polarizado, ou seja, de acordo com o

modelo simplificado, caso qualquer uma das células esteja sombreada não haverá potência entregue à carga por todo o painel (Figura 4), o que é irreal. Deste modo é necessário desenvolver um modelo mais complexo que represente adequadamente o fenômeno do sombreamento.

**Figura 4** – Modelo simplificado de duas células conectadas em série com sombreamento parcial.



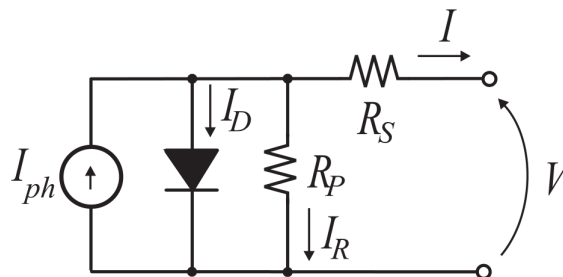
Fonte: (MASTERS, 2013).

Pode-se adicionar uma resistência de dispersão  $R_P$  em paralelo, na qual circulará uma porção da corrente gerada pela fonte, deste modo:

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V}{R_p}. \quad (2.4)$$

Além da resistência de dispersão, para um modelo ainda mais representativo pode-se adicionar uma resistência em série  $R_S$  visando contabilizar a resistência de junção dos contatos de conexão das células e a resistência do próprio semiconductor. O modelo de uma célula completa pode ser visto na Figura 5.

**Figura 5** – Modelo completo de uma célula solar.



Fonte: (VITORINO, 2008).

A corrente que circula para a carga pode ser escrita como:

$$I = I_{ph} - I_D - I_R. \quad (2.5)$$

Substituindo as expressões da corrente do diodo (2.2) e da corrente da resistência em paralelo (2.4) em (2.5) obtêm-se:

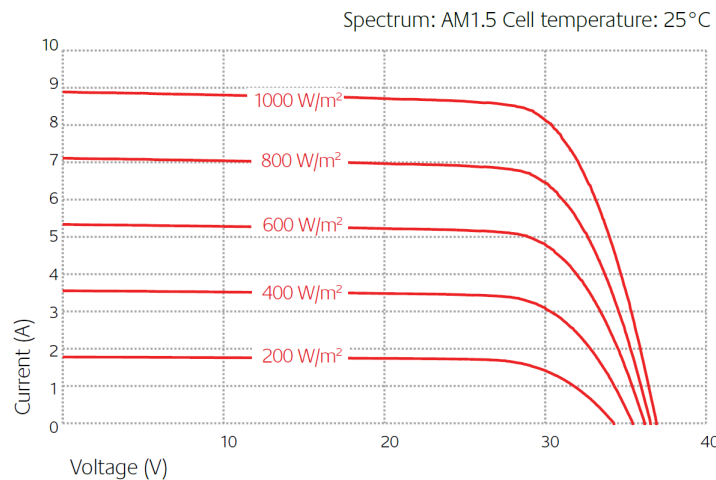
$$I = I_{ph} - I_S \left( e^{\frac{q(V+R_S I)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_P}, \quad (2.6)$$

em que:  $I$  - Corrente que circula para a carga;  $I_{ph}$  - Fonte de corrente dependente da irradiação solar;  $I_S$  - Corrente reversa máxima de saturação do diodo;  $q$  - Carga de um elétron;  $V$  - Tensão nos terminais da célula;  $k$  - Constante de Boltzmann;  $T$  - Temperatura da célula em Kelvin;  $R_S$  - Resistência Série;  $R_P$  - Resistência Paralela

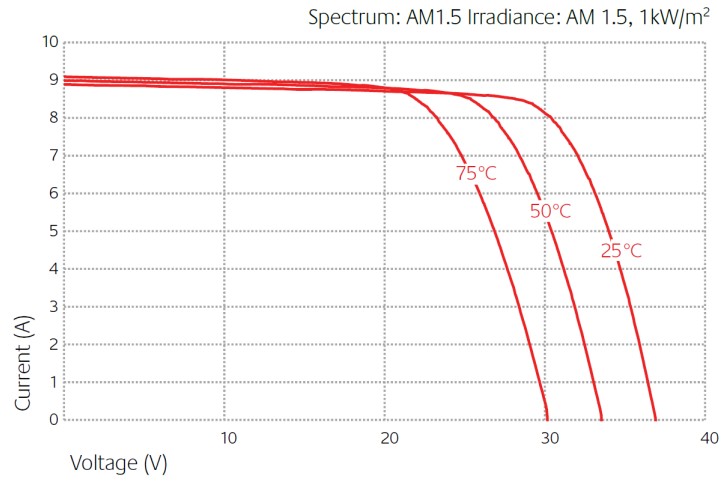
### 2.1.3 Impacto da irradiação e temperatura

A intensidade da irradiação solar afeta a fonte de corrente  $I_{ph}$  de forma direta, ou seja, ao haver uma redução na irradiação há uma redução de mesma proporção na corrente de curto-circuito, além de afetar levemente a tensão de circuito aberto  $V_{OC}$  devido à relação logarítmica entre elas. Já para variações na temperatura da célula, conforme a temperatura aumenta, há um pequeno aumento na corrente de curto-circuito e uma queda substancial na tensão de circuito aberto devido à alteração na corrente reversa máxima de saturação do diodo, conforme detalhado em (MASTERS, 2013). A influência da irradiação e da temperatura na curva I-V de um painel ser observada na Figura 6 e na Figura 7.

**Figura 6** – Efeito da irradiação no painel fotovoltaico.



Fonte: Datasheet Painel KD240GX-LFB, Anexo A.

**Figura 7** – Efeito da temperatura no painel fotovoltaico.

Fonte: Datasheet Painel KD240GX-LFB, Anexo A.

Estes efeitos são equacionados matematicamente de acordo com (2.7) e (2.8). A obtenção dos parâmetros destas equações é feita com métodos numéricos de regressão não-linear na curva I-V do painel estudado.

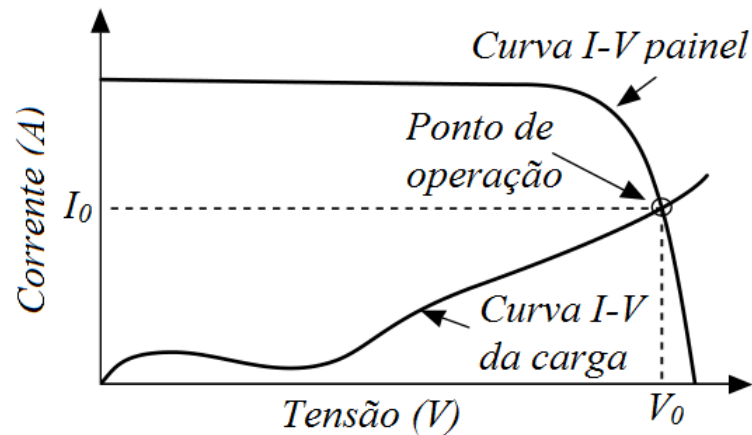
$$I_{ph} = [I_{SC} + \alpha (T - 298)] \frac{Irr}{1000}, \quad (2.7)$$

$$I_S(T) = I_S \left( \frac{T}{T_{nom}} \right)^3 e^{\left[ \left( \frac{T}{T_{nom}} - 1 \right) \frac{E_g}{nV_t} \right]}, \quad (2.8)$$

em que:  $I_{ph}$  - Fonte de corrente dependente da irradiação solar;  $I_{SC}$  - Fonte de corrente constante igual à especificação do painel;  $I_S$  - Corrente reversa máxima de saturação do diodo;  $\alpha$  - Coeficiente de temperatura de  $I_{SC}$ ;  $T$  - Temperatura da célula em Kelvin;  $T_{nom}$  - Temperatura padrão da célula em Kelvin;  $Irr$  - Irradiação solar em  $W/m^2$ ;  $E_g$  - Energia da banda proibida do semiconductor;  $n$  - Fator de idealidade do semiconductor;  $V_t$  - Tensão térmica;

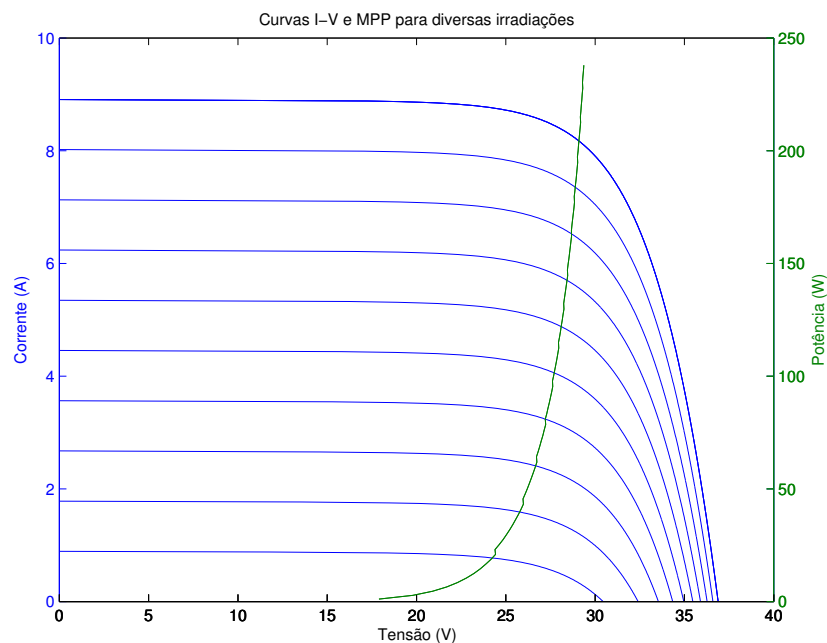
#### 2.1.4 Ponto de Máxima Potência

As células solares possuem uma relação complexa entre irradiação, temperatura e resistência total que produz uma resposta não-linear. Embora a curva I-V de um painel solar defina todas as possíveis combinações de tensão e corrente para as mais variadas condições ambiente, a curva em si não possui um ponto definido de operação, de acordo com Masters (2013). Este ponto é função da carga que será conectada ao painel, ou seja, o ponto de operação do sistema (Painel + Carga) é determinado pela intersecção das curvas I-V do painel e da carga, como pode ser observado na Figura 8.

**Figura 8** – Curvas I-V de um painel e de uma carga.

Fonte: Adaptação de (MASTERS, 2013).

Conforme ilustrado na Figura 9 há um ponto ótimo de operação para cada tipo condição ambiental na qual o painel está submetido, este ponto é denominado Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point*, MPP) e assegura que o painel fornece a sua potência máxima. Para garantir a operação do painel neste local é utilizado um dispositivo denominado Rastreador do Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point Tracker*, MPPT) que faz o sistema funcionar próximo ao joelho da curva I-V.

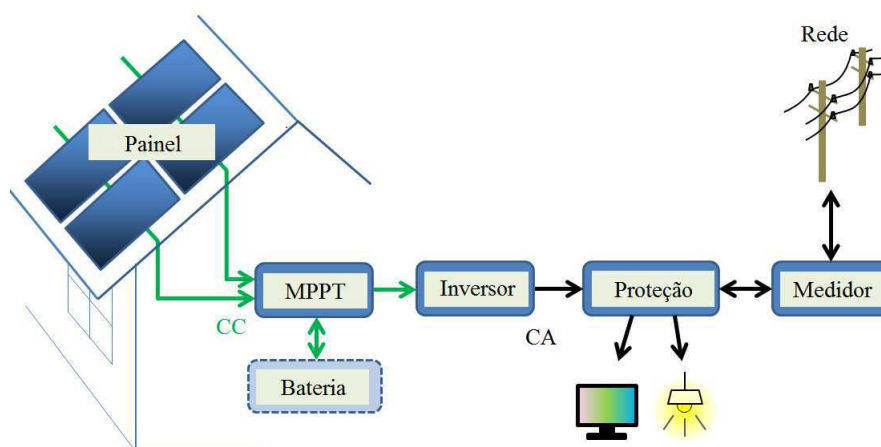
**Figura 9** – Curvas  $I \times V$  e  $P_{max}$  para diferentes irradiações.

Fonte: Autor.

## 2.2 Componentes Adicionais de um Sistema Fotovoltaico

A geração de energia elétrica fotovoltaica possui diversos componentes que podem ser adicionados para trazer melhorias ao sistema, seja em confiabilidade, eficiência, armazenamento ou conversão de energia. É ilustrado na Figura 10 um possível arranjo para uma aplicação de energia solar.

**Figura 10** – Visão geral de um sistema fotovoltaico.



Fonte: Adaptação de (S-KEI, 2011).

### 2.2.1 Baterias

O uso de baterias permite um sistema mais confiável, capaz de fornecer energia elétrica mesmo durante a noite ou em casos de pouca irradiação solar. As baterias podem ser em um sistema interligado à rede elétrica ou em um sistema isolado.

**Figura 11** – Bateria estacionária adquirida para aplicações futuras.



Fonte: Autor.

Quando a bateria está descarregada, há uma grande diferença entre a tensão de máxima potência do painel e a tensão de recomendada de carregamento da bateria, assim o MPPT é fundamental para ajustar essa diferença. Quando as baterias de um sistema desconectado da rede estão completamente carregadas, a produção do painel pode exceder as necessidades das cargas locais, sendo necessário que o MPPT retire o painel do ponto de maior potência e o leve a um ponto de operação que seja compatível com a demanda. Já no caso de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, toda a potência excedente fornecida pelos módulos solares pode ser enviada (e em alguns casos vendida) à rede. Deste modo o MPPT irá sempre tentar operar o painel no seu ponto de maior potência.

### 2.2.2 Inversores

O inversor de potência de painéis solares é um dispositivo eletrônico que realiza a conversão da corrente contínua (CC) de saída de um painel solar para uma corrente alternada (CA), conforme indicado na Figura 10, de frequência compatível com a rede local, que pode ser conectada à rede elétrica ou usada em uma rede local isolada. É um componente fundamental para o sistema fotovoltaico que permite sua aplicação a dispositivos comuns de consumidores.

**Figura 12** – Inversor adquirido para aplicações futuras.



Fonte: Autor.

Inversores de potência projetados especialmente para a aplicação solar possuem algumas funcionalidades extras como o MPPT e a capacidade de proteção através da remoção da conexão dos painéis com a rede elétrica em caso de falha na rede. Sua função é proteger trabalhadores da companhia distribuidora que esperam que as linhas da área da falta estejam desenergizadas quanto para evitar variações na frequência de saída do inversor devido a uma falta de sinal sincronizante da rede.

### 2.2.3 Rastreadores

O rastreador solar é um dispositivo responsável por ajustar a angulação de um painel de modo que ele esteja sempre orientado em direção ao sol, reduzindo o ângulo entre sua normal o raio incidência e conseqüentemente aumentando o rendimento do painel. O sol possui um movimento de  $360^\circ$  de leste à oeste por dia, de um ponto fixo na terra a porção visível deste movimento está limitada a  $180^\circ$  durante um período de aproximadamente 12 horas (1/2 dia). Efeitos locais do horizonte, podem reduzir este ângulo de visibilidade para cerca de  $150^\circ$ , assim, um painel com uma orientação fixa entre o nascente e o poente do sol irá ver um movimento de  $75^\circ$  em cada lado, e de acordo com a Tabela 1 perderá cerca de 75% da energia durante as primeiras horas da manhã e do final da tarde.

**Tabela 1** – Perda de potência devido ao ângulo de desalinhamento.

<b>i</b>	<b>Perda = <math>1 - \cos(i)</math></b>	<b>i</b>	<b>Horas</b>	<b>Perdas</b>
$0^\circ$	0%	$15^\circ$	1	3,4%
$1^\circ$	0,015%	$30^\circ$	2	13,4%
$3^\circ$	0,14%	$45^\circ$	3	30%
$8^\circ$	1%	$60^\circ$	4	>50%
$23,4^\circ$	8,3%	$75^\circ$	5	>75%

Fonte: (CLARKE, 2011).

Além do movimento Leste-Oeste o sol também apresenta um movimento Norte-Sul que depende da estação do ano. Este movimento sofre grande influência da latitude do local de instalação e tem um impacto bem menor no rendimento do painel, estatísticas recentes sugerem que o rastreamento Norte-Sul seja responsável por uma diferença da ordem de 4%, de acordo com (COOKE, 2014).

Sistemas de rastreamento são amplamente utilizados em aplicações comerciais de maior potência, porém ainda há discussão sobre o rastreamento de um único eixo (Leste-Oeste) ou de dois eixos (Leste-Oeste e Norte-Sul), tendo em vista que os benefícios adicionais do rastreamento de dois eixos são poucos e aumentam consideravelmente o grau de complexidade do problema.



## 3 Material e Métodos

### 3.1 Material

O projeto e implementação de um sistema fotovoltaico envolve diversos equipamentos, conforme representado na Figura 10. Para a modelagem do comportamento do painel foram necessários: o painel a ser instalado no laboratório e uma carga variável para variar o ponto de operação do painel, ilustrado na Figura 8. O projeto e instalação do sistema fotovoltaico, incluindo a escolha e dimensionamento do painel e de demais equipamentos como baterias, circuitos de proteção, MPPT e inversores, foi detalhado em Suassuna (2014).

O painel utilizado para as medições foi o KD240GX-LFB da Kyocera, cujo *datasheet* encontra-se disponível no Anexo A e as principais características elétricas podem ser observadas na Tabela 2. A carga utilizada foi um conjunto de resistências variáveis, ver Figura 13, que podem ser conectadas em série ou paralelo, dependendo do valor de resistência desejada e mudam o ponto de operação do painel, permitindo o levantamento da curva I-V.

**Tabela 2** – Características elétricas do painel KD240GX-LFB.

Dados do painel fotovoltaico (STC)		
Potência Máxima	245	W
Tensão no MPP ( $V_{mp}$ )	29,8	V
Corrente no MPP ( $I_{mp}$ )	8,23	A
Tensão de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ )	36,9	V
Corrente de Curto Circuito ( $I_{sc}$ )	8,91	A
Eficiência	14,8	%

Fonte: Datasheet Painel KD240GX-LFB, Anexo A.

**Figura 13** – Carga variável utilizada nas medições.

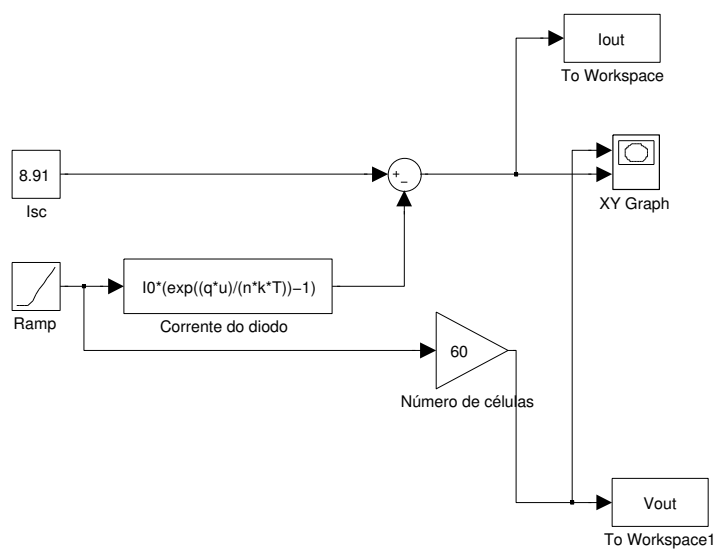
Fonte: Autor.

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 1° Modelo

Usando o circuito equivalente discutido na subseção 2.1.1, foi criado o modelo mais básico possível do painel solar onde a fonte de corrente apresenta um valor constante e igual a corrente de curto circuito e as 60 células são ligadas em série, ou seja, a corrente total será a mesma e a tensão será a soma das tensões de 60 células, conforme representado na Figura 14. Para esta modelagem foi utilizado o ambiente Simulink do Matlab, que através da conexão de blocos e definição de equações permite a criação de diversos modelos matemáticos.

Figura 14 – Circuito simplificado modelado no Simulink.

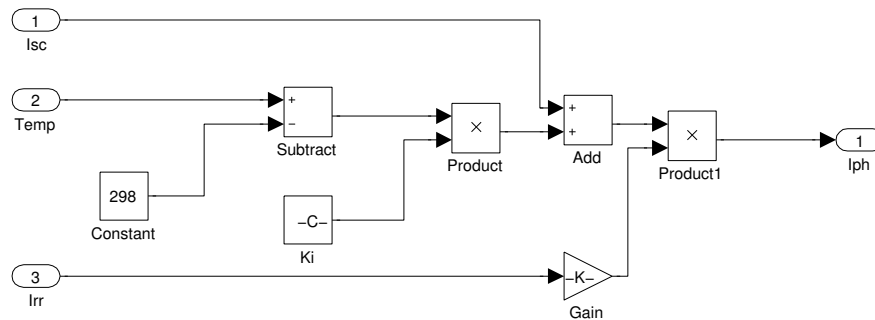


Fonte: Autor.

### 3.2.2 2° Modelo

Visando um modelo detalhado do painel, passaram a ser levadas em consideração as resistências série e paralela, além do efeito da irradiação solar e da temperatura no desempenho do painel, descritos na subseção 2.1.2 e subseção 2.1.3, conforme proposto por Salmi et al. (2012). Para a modelagem dos efeitos da temperatura e irradiação utilizou-se (2.7) para originar o circuito descrito na Figura 15.

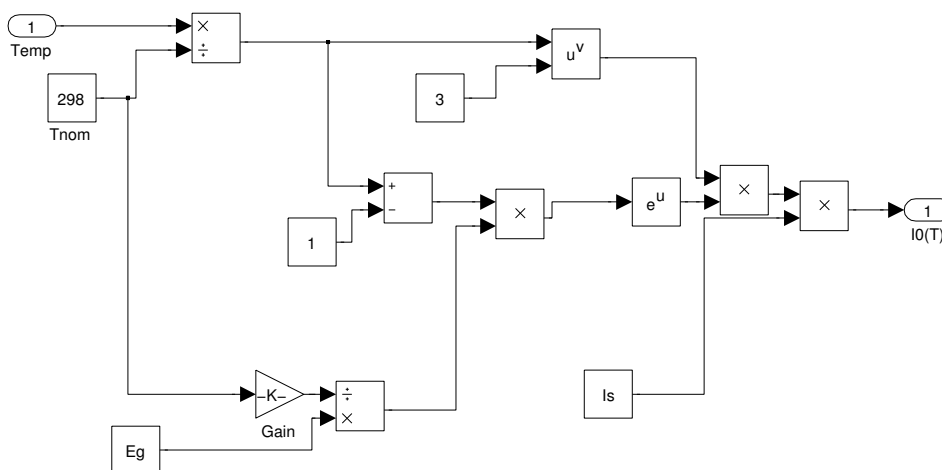
**Figura 15** – Bloco para a influência da temperatura e da irradiação na fonte de corrente.



Fonte: Autor.

Para contabilizar o efeito da temperatura na corrente reversa do diodo  $I_S$  foi usada como base (2.7), que está representada na Figura 16.

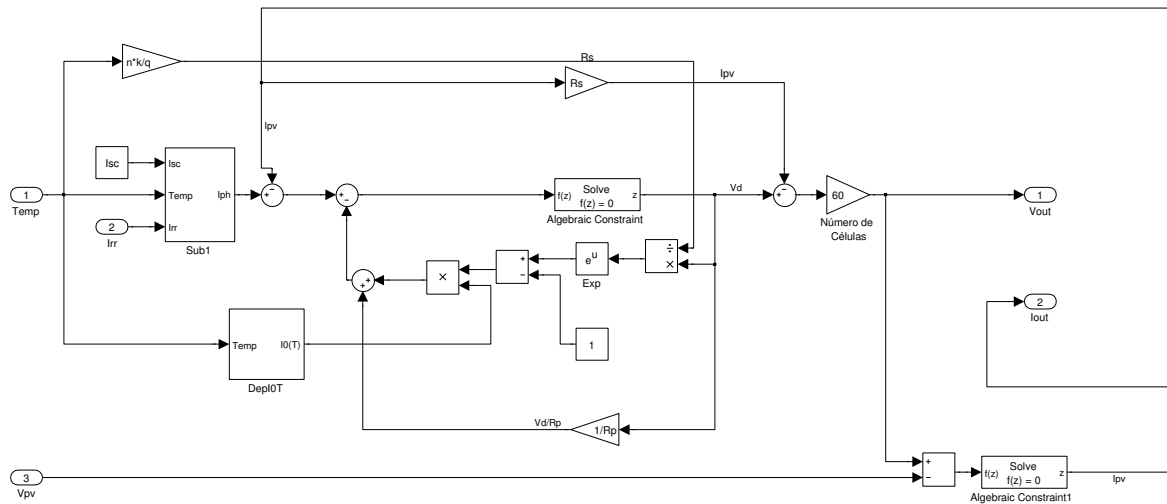
**Figura 16** – Bloco para a influência da temperatura na corrente reversa do diodo.



Fonte: Autor.

Fazendo as conexões dos blocos descritos anteriormente nos elementos que sofrem seus efeitos, pode-se obter o sistema completo, representado na Figura 17.

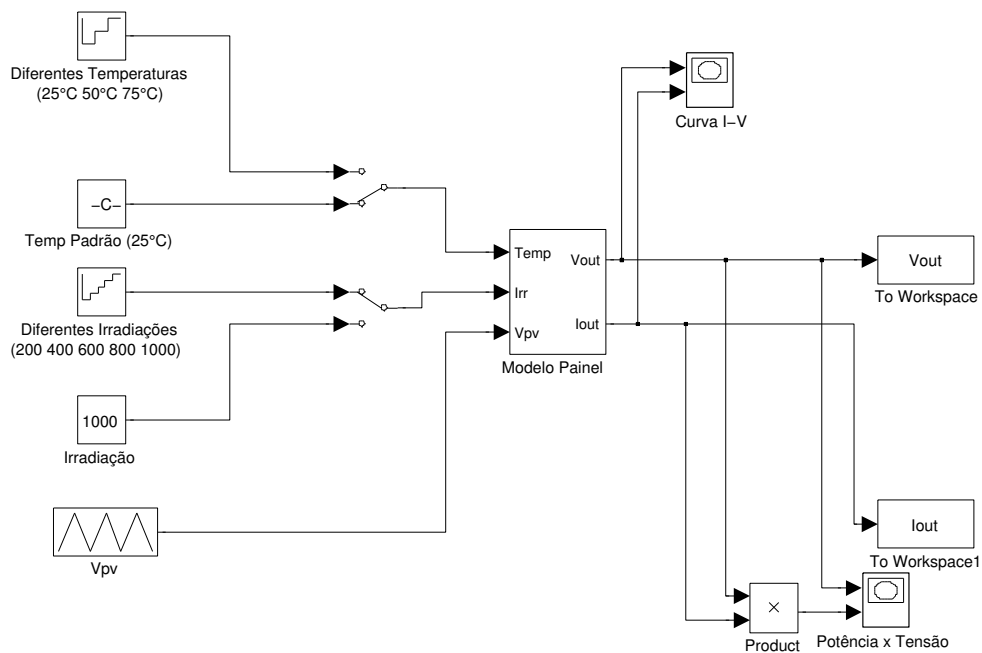
**Figura 17** – Circuito completo de um painel solar.



Fonte: Autor.

Pode-se também encapsular todo o sistema, conforme a Figura 18, para uma fácil visualização dos parâmetros de entrada e a resposta do painel além de facilitar a conexão de diversos painéis para a formação de matrizes.

**Figura 18** – Modelo simulink final do painel e suas entradas e saídas.



Fonte: Autor.

### 3.2.3 3° Modelo

Na literatura existem diversos modelos de células solares, o modelo mais preciso é conhecido como o *Double-Diode Model* e utiliza dois diodos em um circuito equivalente proposto por Gow e Manning (1999), porém a presença dos diodos trás consigo complexidades devido às duas exponenciais e aos seis parâmetros a serem atribuídos. Tendo em vista que alguns parâmetros do painel são difíceis de se medir ( $I_s$ ,  $n$ ,  $R_s$ ,  $R_p$ ), um modelo representativo do painel que utilize apenas parâmetros do *datasheet* é desejável. Tal modelo foi proposto por Bellini et al. (2009), onde foram estabelecidos coeficientes  $C_1$  e  $C_2$  que ponderam as características elétricas fornecidas pelo fabricante para a criação da curva I-V, sem haver a necessidade de métodos numéricos.

$$I = I_{SC} \cdot \left[ 1 - C_1 \cdot \left( e^{\left( \frac{V_p}{C_2 \cdot V_{OC}} \right)} - 1 \right) \right], \quad (3.1)$$

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_{MP}}{I_{SC}} \right) \cdot e^{\left( \frac{-V_{MP}}{C_2 \cdot V_{OC}} \right)}, \quad (3.2)$$

$$C_2 = \frac{\left( \frac{V_{MP}}{V_{OC}} - 1 \right)}{\ln \left( 1 - \frac{I_{MP}}{I_{SC}} \right)}, \quad (3.3)$$

em que os coeficientes  $C_1$  e  $C_2$  dependem dos seguintes parâmetros do módulo:

- $I_{SC}$  - Corrente de curto circuito
- $V_{MP}$  - Tensão no ponto de máxima potência
- $V_{OC}$  - Tensão de circuito aberto
- $I_{MP}$  - Corrente no ponto de máxima potência

Para levar em conta os efeitos das variações de temperatura e irradiação foram escritas as equações (3.4, 3.5, 3.6 e 3.7). Os parâmetros  $I_{SCS}$ ,  $V_{OCS}$ ,  $I_{MPS}$  e  $V_{MPS}$  são os valores fornecidos pelo fabricantes nas STCs ( $G_S = 1000W/m^2$  e  $T_S = 25^\circ C$ ), já  $\alpha$  e  $\beta$  são os coeficientes de temperatura de  $I_{SC}$  e  $V_{OC}$  respectivamente.

$$I_{SC}(G, T) = I_{SCS} \frac{G}{G_S} [1 + \alpha (T - T_S)], \quad (3.4)$$

$$V_{OC}(T) = V_{OCS} + \beta (T - T_S), \quad (3.5)$$

$$I_{MP}(G, T) = I_{MPS} \frac{G}{G_S} [1 + \alpha (T - T_S)], \quad (3.6)$$

$$V_{MP}(T) = V_{MPS} + \beta(T - T_S). \quad (3.7)$$

Ainda é possível melhorar a precisão do modelo adicionando um termo de correção  $\Delta V(G) = V_{OCS} - V_{OCm}$  que leva em consideração a variação da tensão em função da irradiação solar.

$$V_{OC}(G, T) = V_{OCS} + \beta(T - T_S) - \Delta V(G), \quad (3.8)$$

$$V_{MP}(G, T) = V_{MPS} + \beta(T - T_S) - \Delta V(G). \quad (3.9)$$

E  $V_{OCm}$  é a tensão de circuito aberto da curva I-V do painel adaptada das STCs para a irradiação presente, ou seja:

$$V_{OCm} = C_2 \cdot V_{OCS} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{\left(1 - \frac{I_t}{I_{SCS}}\right)}{C_1} \right], \quad (3.10)$$

e,

$$I_t(G) = I_{SCS} \frac{G}{G_S}. \quad (3.11)$$

Estas equações foram escritas e adaptadas para dar origem a um script Matlab.

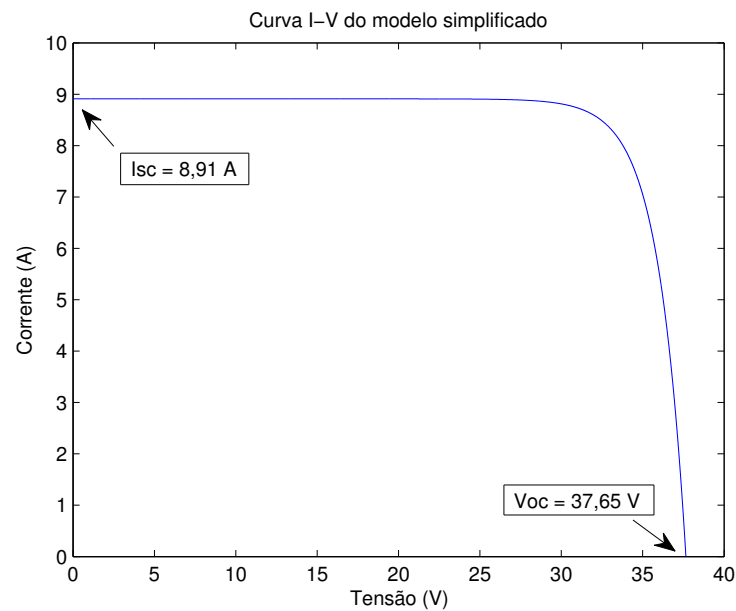
## 4 Resultados e Análises

### 4.1 Resultados 1° Modelo

Executando a simulação no ambiente simulink e selecionando as variáveis no intervalo de interesse é possível traçar as curvas da Figura 19 e Figura 20.

Pode-se perceber que a corrente de curto circuito condiz com o valor do *datasheet*, uma vez que ela foi usada como parâmetro de entrada no modelo. Já a tensão do painel é função das características do diodo (fator de idealidade -  $n$ ) e das condições ambientes (temperatura -  $T$ ) de modo que a tensão obtida pelo modelo se encontra maior que a especificada pelo fabricante.

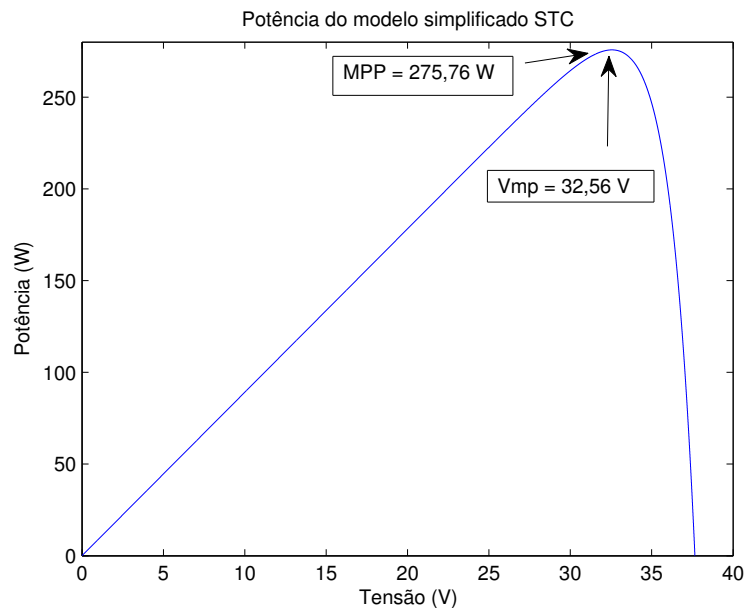
**Figura 19** – Curva  $I \times V$  do painel usando o 1° modelo.



Fonte: Autor.

Vale ressaltar que a potência máxima do painel calculada utilizando este modelo não condiz com o limite operacional do mesmo, que é de 245W. O painel foi modelado como uma fonte de corrente constante, que não sofre influência da temperatura e irradiação. Deste modo, foi necessário o desenvolvimento de um modelo mais adequado.



**Figura 20** – Potência do painel usando o 1° modelo.

Fonte: Autor.

## 4.2 Resultados 2° Modelo

Utilizando os circuitos descritos na subseção 3.2.2 e o ambiente Simulink para as simulações, é possível obter uma das curvas ilustradas nas Figuras 21, 22, 23 e 24.

As curvas obtidas com este modelo apresentam comportamento semelhante ao esperado teoricamente, considerando a influência da irradiação e da temperatura nos gráficos de um painel solar. Entretanto existem diversas constantes presentes nesse modelo que são de difícil medição, de tal modo que seus valores foram estimados com base em valores usuais disponíveis na literatura, comprometendo assim a representação específica do sistema montado no LAT.

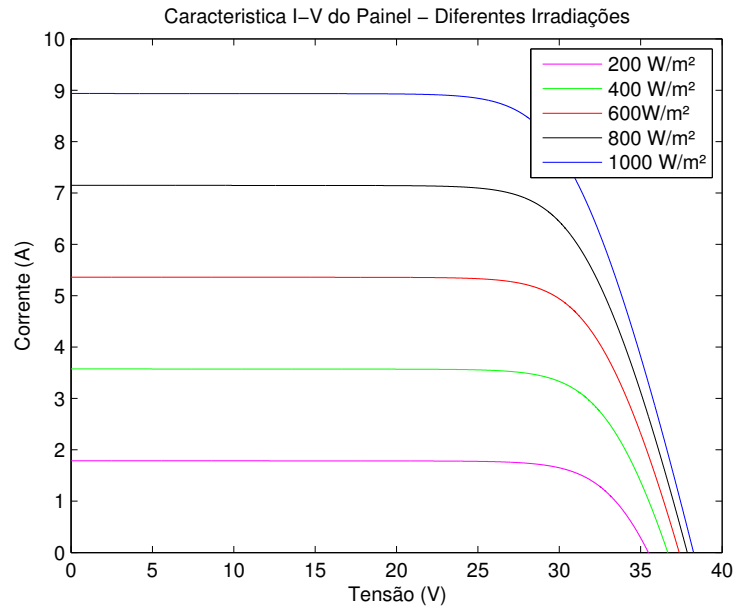
Foram obtidos também os principais pontos de interesse do modelo, representados na Tabela 3, estes pontos podem ser comparados com valores do *datasheet* para uma análise teórica do modelo.

**Tabela 3** – Características elétricas simuladas do modelo simulink completo.

Irradiação	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)	MPP (W)	$V_{mp}$ (V)	$I_{mp}$ (A)
1000	37,00	8,94	228,32	27,50	8,30
800	36,60	7,15	186,71	28,00	6,67
600	36,10	5,36	142,54	28,40	5,02
400	35,40	3,57	96,01	28,60	3,36
200	34,20	1,79	47,62	28,40	1,68

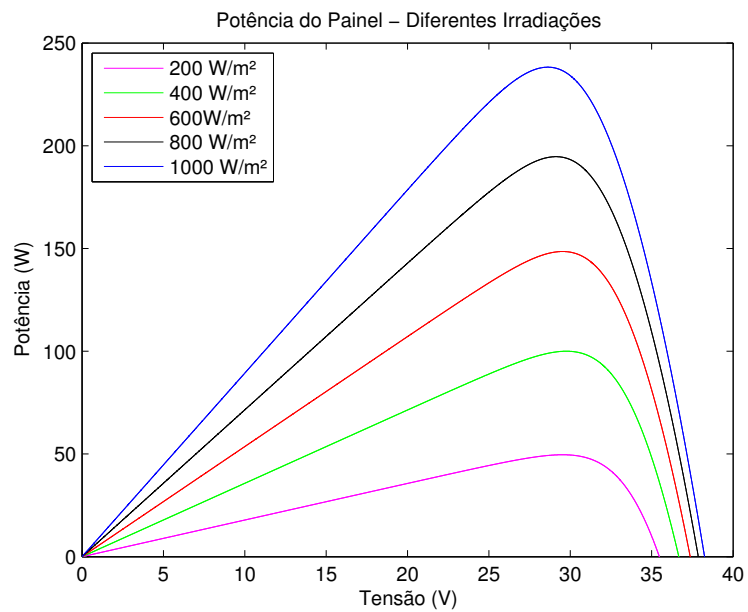
Fonte: Autor.

**Figura 21** – Curvas I-V para diferentes irradiações usando o 2º modelo.



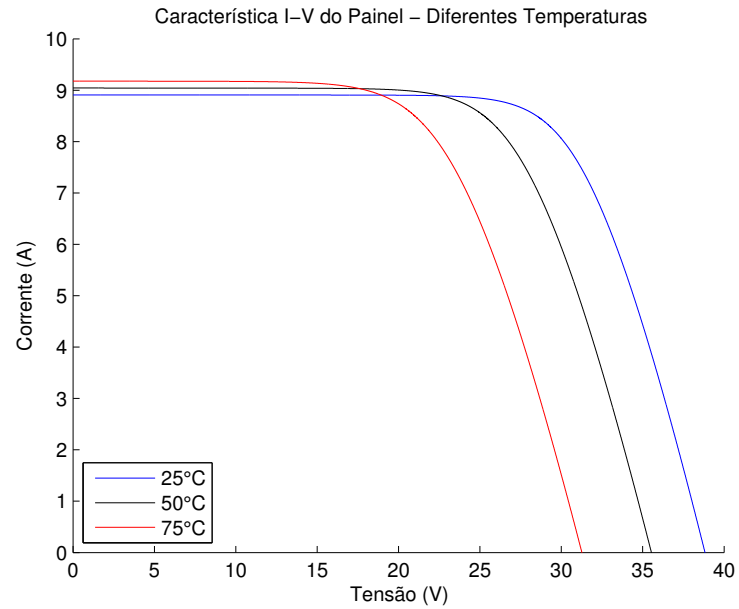
Fonte: Autor.

**Figura 22** – Curvas de potência usando o 2º modelo.



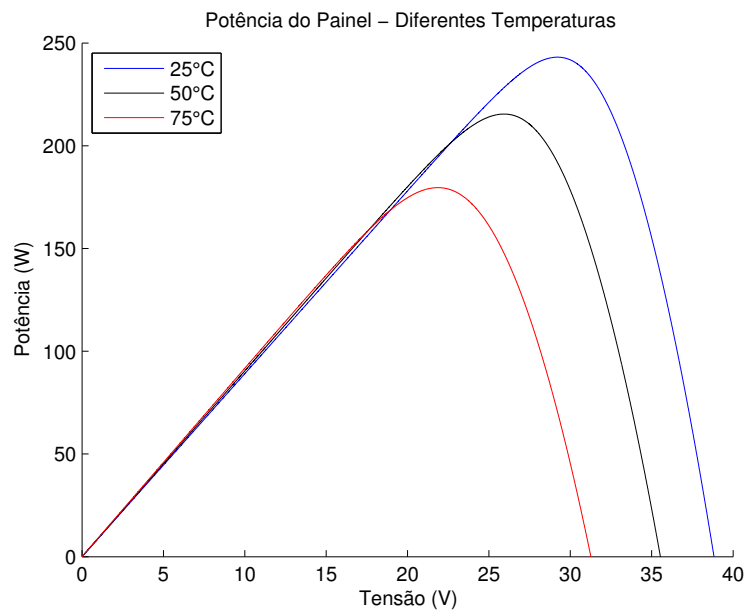
Fonte: Autor.

**Figura 23** – Curvas I-V para diferentes temperaturas usando o 2° modelo.



Fonte: Autor.

**Figura 24** – Curvas de potência para diferentes temperaturas usando o 2° modelo.



Fonte: Autor.

### 4.3 Resultados 3° Modelo

Partindo da descrição das equações abordadas na subseção 3.2.3 e utilizando o script Matlab, foi possível obter as famílias de curvas apresentadas nas Figuras 25, 26, 27 e 28. Os principais pontos de interesse foram utilizados para criar a Tabela 4, permitindo a comparação com o modelo anterior e com as informações do fabricante.

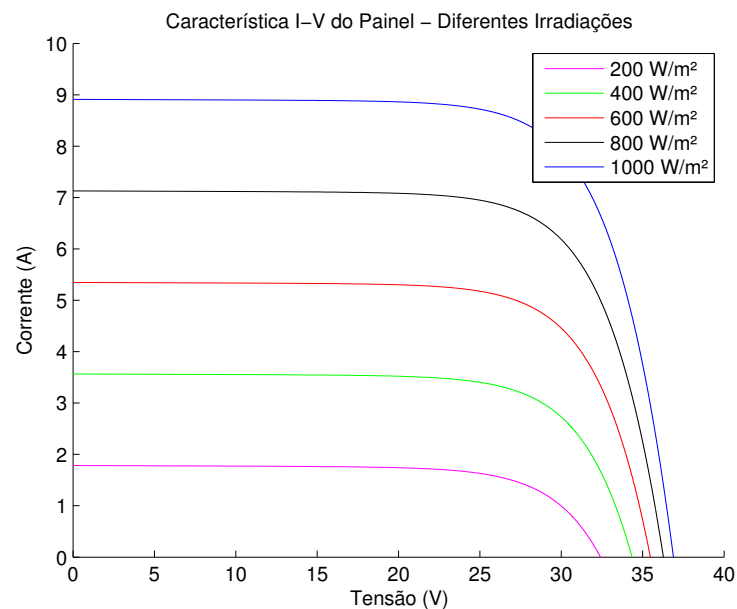
Analisando as curvas obtidas é possível notar um comportamento mais próximo da realidade nas curvas de potência, onde os pontos de máxima potência apresentam um comportamento exponencial (semelhante ao da Figura 9).

**Tabela 4** – Características elétricas simuladas do 3° Modelo.

Irradiação	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)	MPP (W)	$V_{mp}$ (V)	$I_{mp}$ (A)
1000	36,90	8,91	237,88	29,37	8,32
800	36,29	7,13	187,21	28,93	6,69
600	35,49	5,35	137,16	28,34	5,03
400	34,37	3,56	88,12	27,43	3,36
200	32,46	1,78	40,95	25,78	1,68

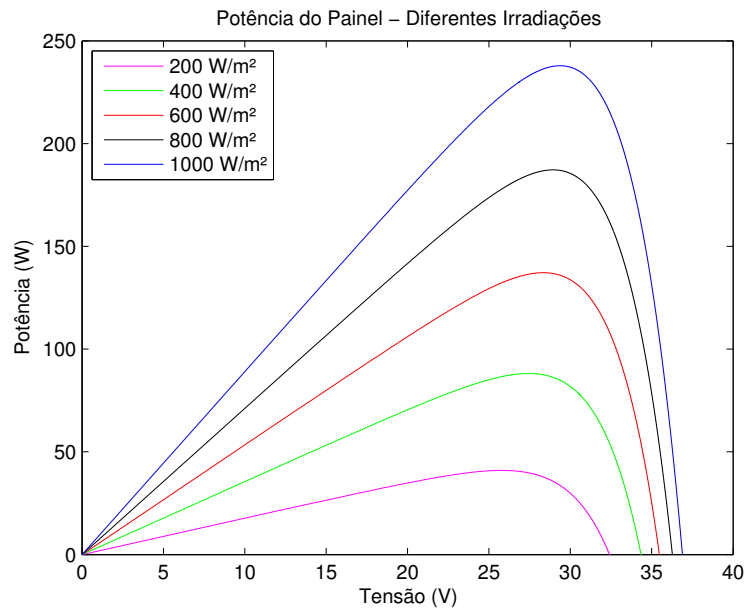
Fonte: Autor.

**Figura 25** – Curvas I-V para diferentes irradiações usando o 3° modelo.



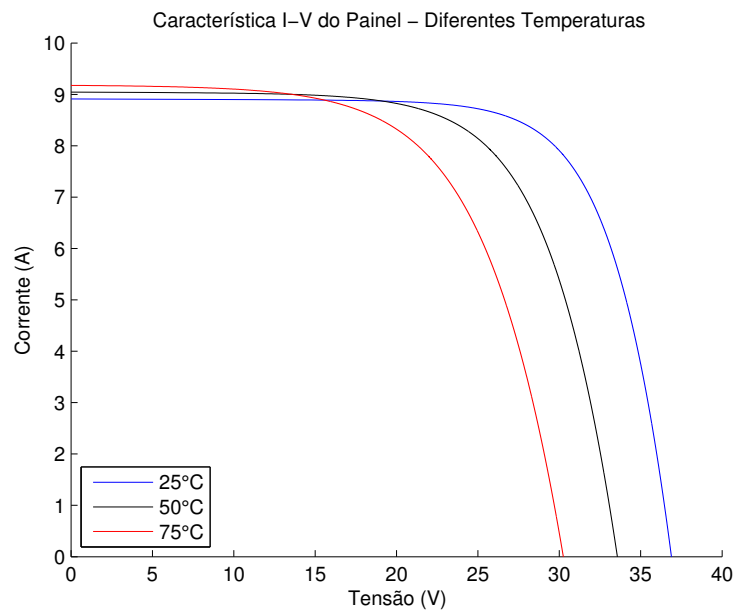
Fonte: Autor.

**Figura 26** – Curvas de potência para diferentes irradiações usando o 3º modelo.



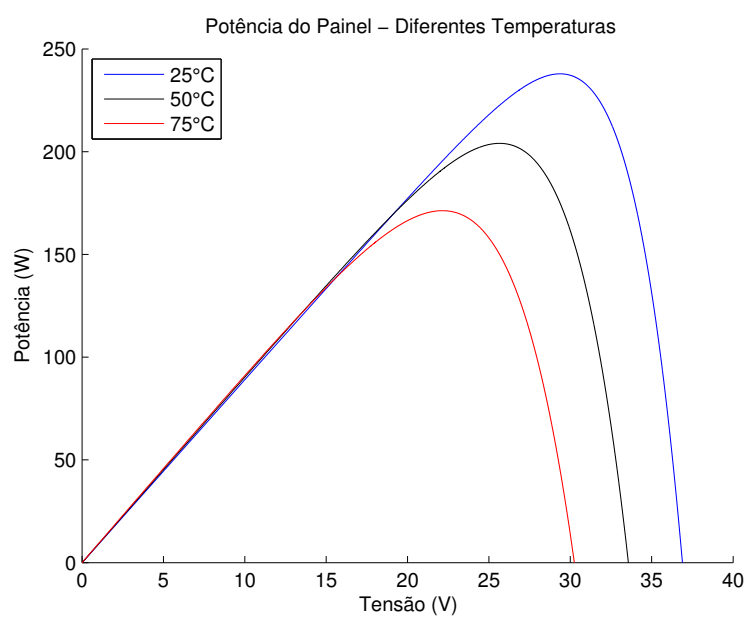
Fonte: Autor.

**Figura 27** – Curvas I-V para diferentes temperaturas usando o 3º modelo.



Fonte: Autor.

**Figura 28** – Curvas de potência para diferentes temperaturas usando o 3° modelo.



Fonte: Autor.

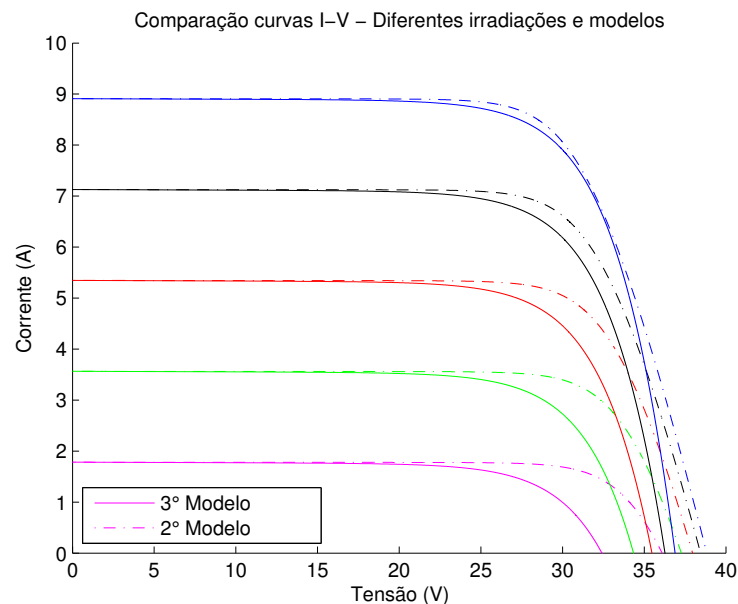
## 4.4 Comparações entre modelos

A comparação do comportamento das curvas I-V e de potência dos modelos para diferentes irradiações e temperaturas pode ser observada nas Figuras 29, 30, 31, 32. Para estas comparações o 1° modelo desenvolvido foi omitido uma vez que sua representação era extremamente simplificada e não corresponderia a um comportamento de um painel real, conforme detalhado na seção 4.1.

Deve-se notar nas figuras citadas o distanciamento dos modelos quando o painel se aproxima da operação de circuito aberto (com cargas de alta impedância conectadas em seus terminais), esta diferença de comportamentos é devida à presença de parâmetros do painel que são de difícil medição ( $I_s$ ,  $n$ ,  $R_s$ ,  $R_p$ ), assim, foram usados valores usuais propostos na literatura, que diferem dos obtidos no método usado pelo modelo de Bellini et al. (2009).

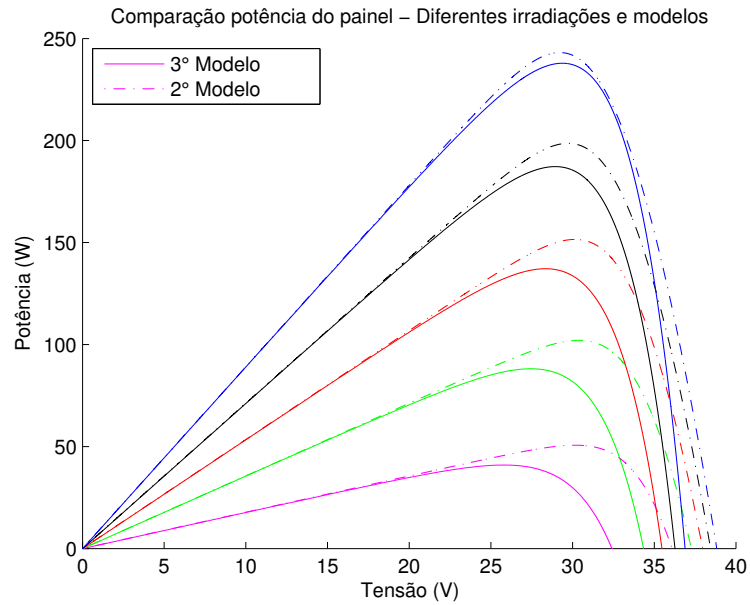
É possível realizar uma tentativa de adaptação do 2° modelo ao comportamento desejado do painel, variando as variáveis intrínsecas do modelo ( $I_s$ ,  $n$ ,  $R_s$ ,  $R_p$ ) até se obter uma curva com o formato desejado que se aproxime do fornecido pelo fabricante. Este processo porém é ineficiente devido a necessidade de varias tentativas e erros, além do fato que as variáveis estão inter-relacionadas de maneira complexa.

**Figura 29** – Comparação curvas I-V dos modelos para diferentes irradiações.



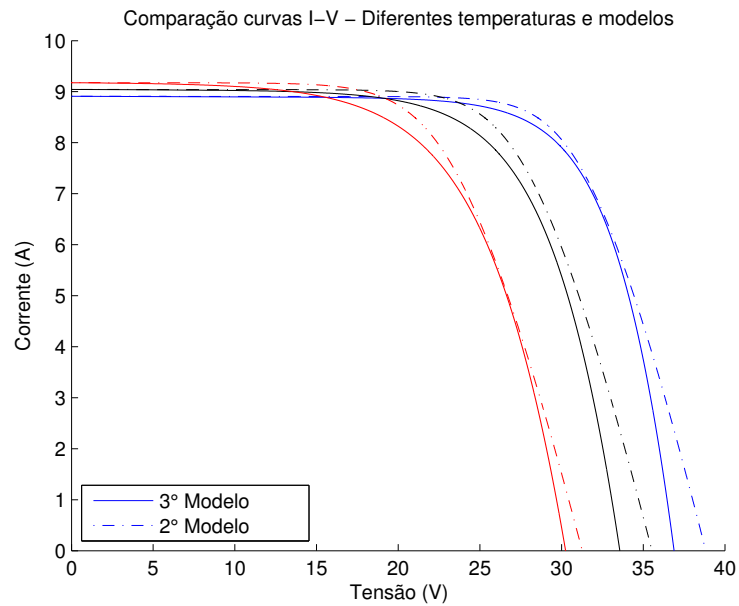
Fonte: Autor.

**Figura 30** – Comparação curvas de potência dos modelos para diferentes irradiações.



Fonte: Autor.

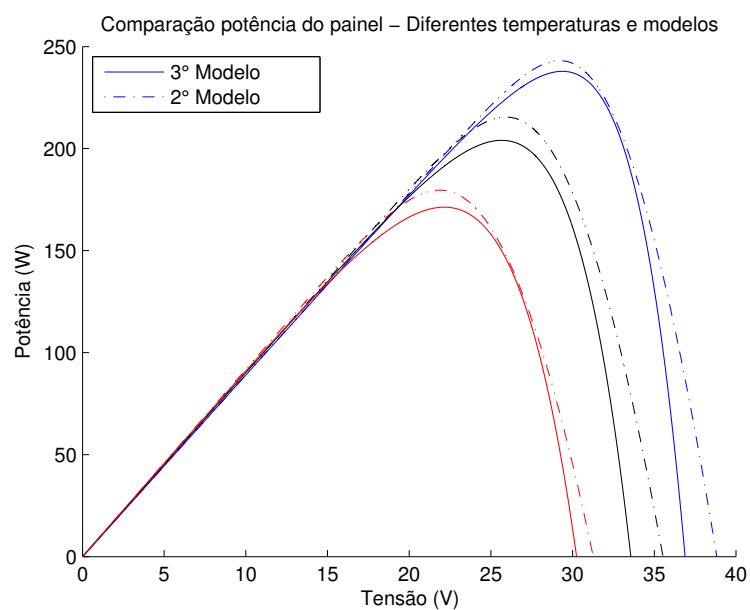
**Figura 31** – Comparação curvas I-V dos modelos para diferentes temperaturas.



Fonte: Autor.



**Figura 32** – Comparação curvas de potência dos modelos para diferentes temperaturas.

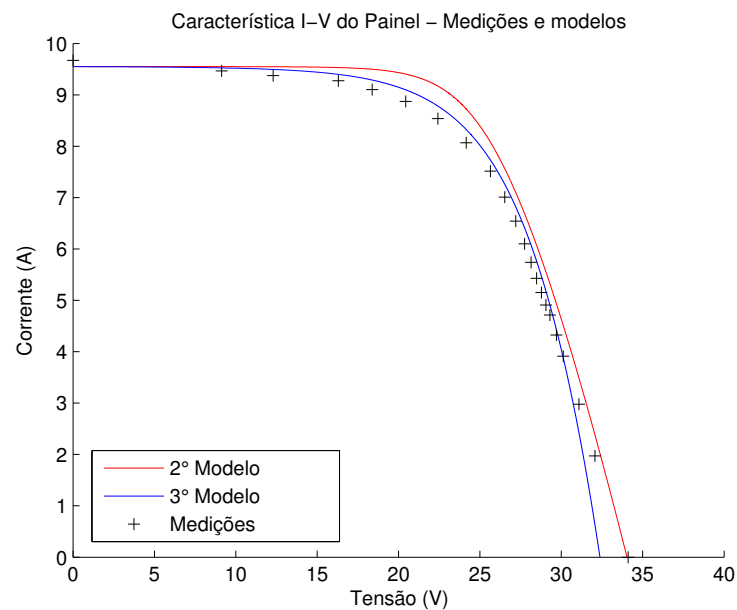


Fonte: Autor.

## 4.5 Comparações com medições experimentais

É importante ressaltar que o banco de carga deve ser projetado para suportar a potência nominal do painel (245W), independente da configuração dos seus resistores e que as medições devem ser feitas com a ligação direta entre a carga e o painel, sem a presença dos demais equipamentos (controladores de carga e baterias), pois estes iriam alterar o comportamento do painel e da sua curva. Em futuras medições é interessante o projeto de uma carga com um passo menor de variação, o que permitiria um maior número de pontos de medição (destacados nas Figuras 33 e 34).

**Figura 33** – Comparação curvas I-V dos modelos e das medições.

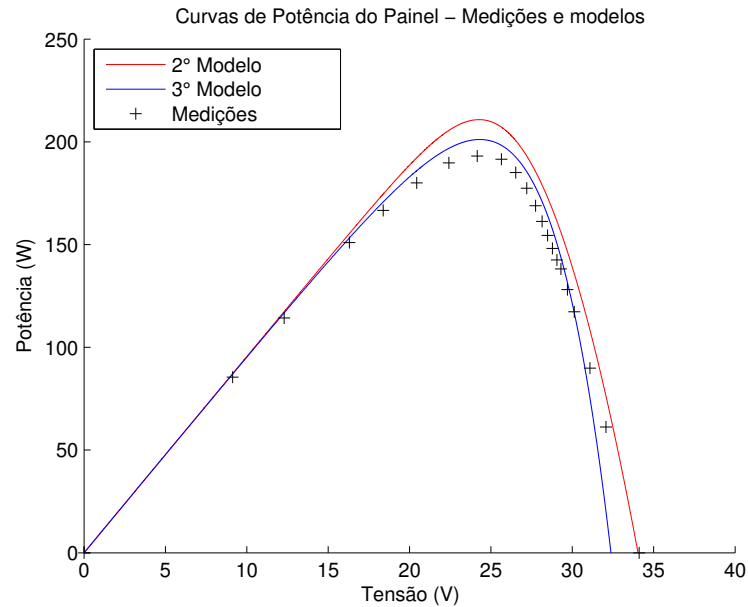


Fonte: Autor.

Nota-se nas Figuras 33 e 34 a maior proximidade entre o 3º modelo e as medições na parte central da curva, junto ao MPP, que é a região de principal interesse de um painel solar em operação. O 2º modelo está mais próximo das condições extremas (curto-circuito e circuito aberto) entretanto nota-se uma escassez de pontos nestas regiões, devido ao passo de variação do banco de cargas.

É possível também aplicar o coeficiente de determinação  $R^2$  para uma análise quantitativa das comparações, como mostrado em (LIRA, 2012). Este coeficiente indica quão bem os pontos de medições se adequam a determinado modelo. E é definido de acordo com a Equação 4.1.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}, \quad (4.1)$$

**Figura 34** – Comparação curvas de potência dos modelos e das medições.

Fonte: Autor.

na qual:

$$SS_{res} = \sum_i^k (y_i - f_i)^2, \quad (4.2)$$

$$SS_{tot} = \sum_i^k (y_i - \bar{y})^2, \quad (4.3)$$

em que:  $SS_{res}$  - Soma residual quadrática;  $SS_{tot}$  - Soma total dos quadrados, proporcional à variância;  $k$  - Número de amostras;  $y_i$  - Valor medido;  $f_i$  - Valor do modelo;  $\bar{y}$  - Valor médio das medições.

Assim, se o coeficiente de determinação apresentar valores próximos de 1, conclui-se que o modelo representa de forma satisfatória o comportamento dos dados medidos. Analisando a Tabela 5 é possível concluir que o 3º modelo representa melhor as medições realizadas experimentalmente.

**Tabela 5** – Valores medidos e valores gerados pelos modelos

Tensão (V)	$I_{medido}(A)$	$I_{2^{\circ}modelo}(A)$	$I_{3^{\circ}modelo}(A)$
0,00	9,67	9,50	9,55
9,13	9,47	9,49	9,53
12,30	9,37	9,49	9,49
16,30	9,27	9,48	9,40
18,38	9,10	9,46	9,29
20,44	8,87	9,39	9,10
22,42	8,54	9,20	8,78
24,16	8,07	8,83	8,32
25,64	7,52	8,26	7,73
26,52	7,01	7,79	7,26
27,20	6,54	7,35	6,82
27,74	6,10	6,97	6,41
28,14	5,74	6,64	6,08
28,48	5,43	6,39	5,76
28,78	5,15	6,13	5,47
29,06	4,91	5,86	5,17
29,30	4,72	5,65	4,91
29,70	4,33	5,26	4,43
30,12	3,91	4,84	3,88
31,08	2,98	3,85	2,43
32,07	1,97	2,75	0,63
34,10	0,00	0,29	0,00
$R^2$		0,9220	0,9894

## 4.6 Análise financeira

A análise econômica será feita com base nos custos envolvidos com o projeto atual, consistiu na aquisição de um painel solar, juntamente com diversos equipamentos auxiliares para a geração fotovoltaica. Futuramente há a possibilidade de expandir a capacidade instalada de modo que todo o sistema de iluminação do LAT possa ser suprido pelos painéis solares.

### 4.6.1 Estimativa da energia produzida

Utilizando informações disponíveis em diversas fontes como: o Atlas da Energia Solar do Brasil, bibliografias internacionais ou bancos de dados, é possível obter médias e distribuições de irradiação solar na região de instalação dos painéis solares. É importante ressaltar que estes dados devem apenas servir apenas como uma base para estimativa, por a radiação solar é de certa forma aleatória, sendo influenciada por diversos fatores como as mudanças climáticas e emissões de gases.

A cidade de Campina Grande está localizada nas seguintes coordenadas: 7°13'50''

S e 35°52'52" O. Usando dados do *Atmospheric Science Data Center* da NASA (NASA, 2014), pôde-se construir a Tabela 6 que fornece a média mensal de irradiação do local da instalação para uma superfície compensada com um ângulo igual a sua latitude (neste caso 7°).

Usando estas informações é possível estimar a energia produzida pelos painéis mensalmente utilizando (4.4).

**Tabela 6** – Irradiação mensal média.

Média de 22 anos para a Latitude -7.213 e Longitude -35.909	
Mês	Irradiação mensal média em uma superfície compensada para o equador ( $kWh/m^2/dia$ )
Janeiro	5,83
Fevereiro	5,80
Março	5,52
Abril	5,08
Mai	4,79
Junho	4,30
Julho	4,45
Agosto	5,05
Setembro	5,56
Outubro	5,98
Novembro	6,09
Dezembro	5,95
<b>Média Anual</b>	<b>5,36</b>

Fonte: (NASA, 2014).

$$E_P = P_{nom} \cdot HSP \cdot \eta_{conversor}, \quad (4.4)$$

em que:  $E_P$  - Energia produzida pelo painel;  $P_{nom}$  - Potência nominal do painel; HSP - Horas de sol pleno, quantidade média de horas em um dia em que o há uma intensidade de radiação de  $1000W/m^2$ ;  $\eta_{conversor}$  - Rendimento do conversor  $CC/CA$ ;

Como pode ser observado na Tabela 7 o sistema poderá produzir anualmente cerca de 407,75kWh.

Um fator importante a ser observado na produção de energia é o Fator de Capacidade (FC), que relaciona a produção efetiva de uma fonte energética em um período de tempo e a capacidade total máxima neste mesmo período. Vale ressaltar que o FC difere bastante dependendo do tipo de fonte a ser analisada, para o caso da energia solar é razoável esperar um FC sempre menor que 50%, devido ao período da noite. Analisando

**Tabela 7** – Energia produzida mensalmente pelos painéis.

Mês	Dias	Potência Instalada (kWp)	Irradiação (kWh/m <sup>2</sup> )	Rendimento	Energia Produzida (kWh)
Janeiro	31	0,245	5,83	0,85	37,64
Fevereiro	28	0,245	5,80	0,85	33,82
Março	31	0,245	5,52	0,85	35,64
Abril	30	0,245	5,08	0,85	31,74
Mai	31	0,245	4,79	0,85	30,92
Junho	30	0,245	4,30	0,85	26,86
Julho	31	0,245	4,45	0,85	28,73
Agosto	31	0,245	5,05	0,85	32,60
Setembro	30	0,245	5,56	0,85	34,74
Outubro	31	0,245	5,98	0,85	38,61
Novembro	30	0,245	6,09	0,85	38,05
Dezembro	31	0,245	5,95	0,85	38,41
<b>Total Anual</b>					<b>407,75</b>

Fonte: Autor.

a produção anual do sistema fotovoltaico em estudo tem-se:

$$FC(\%) = \frac{407,75}{24 \cdot 365 \cdot 0,245} \cdot 100 = 19,00\% \quad (4.5)$$

#### 4.6.2 Custos envolvidos

Para a realização deste projeto foram cotados e adquiridos diversos equipamentos e materiais: Um painel solar, um inversor, um controlador de carga e uma bateria, bem como estruturas de suporte para a instalação dos painéis no telhado do LAT, e equipamentos da instalação elétrica (fios condutores, disjuntores, quadros de carga), não foram considerados gastos com mão de obra de serralheiros, pedreiros e engenheiros uma vez que esta mão de obra foi fornecida pelo LAT.

**Tabela 8** – Custos envolvidos no projeto.

Equipamento	Preço (R\$)	Frete (R\$)
Painel Solar 245W	1013,70	
MPPT	557,07	
Bateria Estacionária	408,27	246,53
Inversor	464,07	
Suportes	200,00	-
Demais componentes	320,00	-
<b>Total</b>	<b>2963,11</b>	

Fonte: Autor.

Assim, o custo total para a instalação foi de R\$ 3209,64, já incluindo taxas, descontos e frete. Neste projeto alguns elementos já foram sobre-dimensionados para a eventual expansão do sistema, por exemplo: os suportes foram projetados para acomodar 9 painéis, os condutores e disjuntores para um possível aumento da corrente devido a associação série/paralela de painéis, o quadro para acomodar um maior número de disjuntores. Deste modo, os custos envolvidos com o aumento da capacidade instalada serão menores. Para a condição atual de operação foram gastos R\$ 13,10 por Wp (Watt-pico) instalado.

### 4.6.3 Análise econômica

Utilizando os valores obtidos anteriormente é possível traçar uma análise econômica do investimento realizado, iniciando pelo valor da energia elétrica economizada tem-se que:

$$E_{econ} = E_{prod} \cdot Tarifa = 407,75 \cdot 0,30445 = R\$ 124,14/ano \quad (4.6)$$

Onde foi considerado o valor da tarifa de energia elétrica vigente pela companhia distribuidora de energia do estado, a Energisa Paraíba. Uma vez de posse do valor economizado anualmente é possível calcular o período de retorno simples - PRS, que quantifica o prazo necessário para recuperar o investimento realizado.

$$PRS = \frac{Investimento\ inicial}{Economias\ por\ ano} = \frac{3209,64}{124,14} = 25,85\ anos \quad (4.7)$$

Caso sejam levados em conta os elementos que compõem o valor final da conta de energia de um consumidor residencial, impostos diretos e encargos representam 39% do total da conta. Deste modo uma tarifa de 0,30445 R\$/kW se torna na verdade 0,42319 R\$/kW e o PRS se torna:

$$PRS = \frac{Investimento\ inicial}{Economias\ por\ ano} = \frac{3209,64}{172,55} = 18,6\ anos \quad (4.8)$$

Os cálculos apresentados nesta seção são versões simplificadas de uma análise de investimento onde são considerados outros fatores como: custo de capital, custo de manutenções e inflação. Se estes fatores fossem levados em conta era de se esperar um PRS mais longo, comprometendo ainda mais a viabilidade econômica do projeto.

Assim, para que a energia fotovoltaica torne-se um fonte energética competitiva e comercialmente viável, de tal forma que não fique restrita ao ambiente de acadêmico e de pesquisas, é necessário que haja incentivos e subsídios do governo de modo a diminuir o preço por Watt gerado.

## 5 Conclusão

A introdução de variáveis a um modelo de célula solar simplificado permite uma modelagem representativa do sistema, porém dificulta a mensuração de seus valores, levando à necessidade de um modelo que utilize apenas informações disponibilizadas pelos fabricantes dos painéis.

A modelagem de painéis solares foi realizada com sucesso, utilizando a fundamentação teórica de células solares como base para o desenvolvimento de três modelos. Os modelos propostos apresentavam diferentes características e, através de comparações com os dados do fabricante e medições experimentais, foi possível validar e escolher o modelo mais representativo. Com isso, agora há uma forma de simular o comportamento dos painéis a serem instalados no LAT facilitando projetos de pesquisa e eventuais expansões no sistema.

Através da análise econômica realizada, foi possível perceber que o custo da energia fotovoltaica é um fator limitante à sua expansão. Para que essa forma de geração de energia se torne competitiva e comercialmente viável, é necessário que haja incentivos e subsídios do governo de modo a diminuir o preço por Watt gerado.

Considerando que as fontes renováveis de energia estão sendo muito discutidas atualmente, identifica-se a necessidade da continuação de estudos nesta área objetivando melhorar seu desempenho.

Neste contexto, podem ser abordados em trabalhos futuros o uso de rastreadores solares, o aumento do número de painéis, a avaliação do impacto do sombreamento parcial, a possibilidade de conectar o sistema instalado no LAT à rede elétrica e a medição contínua da tensão e corrente do painel, visando o levantamento de diversas curvas para as diferentes épocas do ano e condições atmosféricas.



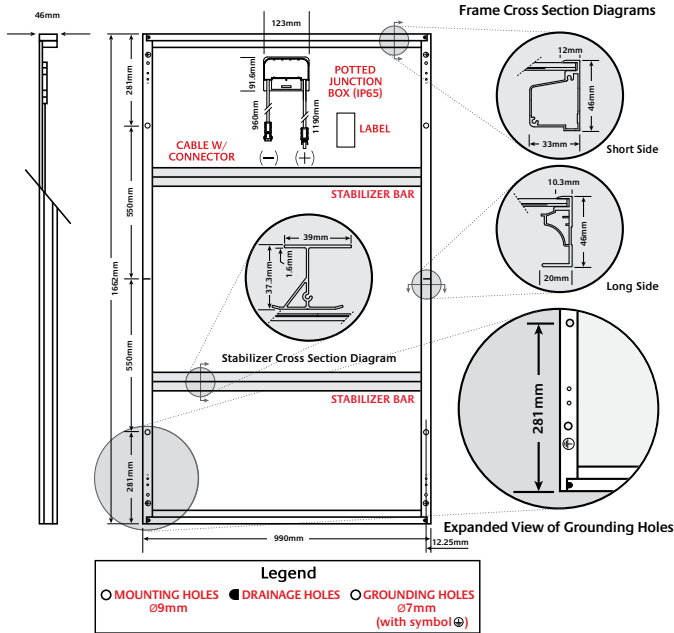
## Referências

- BELLINI, A. et al. Simplified model of a photovoltaic module. p. 47–51, Sept 2009. ISSN 1803-7232. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 38.
- CLARKE, N. *Conceitos de rastreadores solares*. 2011. Disponível em: <<http://goo.gl/51SV3y>>. Citado na página 23.
- COOKE, D. *Single vs. Dual Axis Solar Tracking*. 2014. Disponível em: <<http://altenergymag.com/emagazine/2011/04/single-vs-dual-axis-solar-tracking/1690>>. Citado na página 23.
- GOW, J.; MANNING, C. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. *Electric Power Applications, IEE Proceedings* -, v. 146, n. 2, p. 193–200, Mar 1999. ISSN 1350-2352. Citado na página 29.
- LIRA, G. R. S. de. *Monitoramento de para-raios de óxido de zinco com base na medição da corrente de fuga total*. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012. Citado na página 41.
- LORENZO, E. *Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems*. [S.l.]: Earthscan Publications Ltd., 1994. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- MASTERS, G. M. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. Second. [S.l.]: Wiley, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 16, 17, 18, 19 e 20.
- NASA. *Surface meteorology and Solar Energy*. 2014. Disponível em: <<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>>. Citado na página 44.
- S-KEI. *Simplified schematic diagram of a residential PV system*. 2011. Disponível em: <<http://goo.gl/GZvGG5>>. Citado na página 21.
- SALMI, T. et al. Matlab/simulink based modelling of solar photovoltaic cell. p. 213–218, Feb 2012. Citado na página 27.
- SUASSUNA, R. A. *Projeto e instalação de painéis fotovoltaicos no LAT-UFPG*. Campina Grande, 2014. Citado na página 24.
- VITORINO, M. A. *Sistema de bombeamento fotovoltaico com motor de indução e sem baterias*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Ago 2008. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 17.

## ANEXO A – *Datasheet* Painel

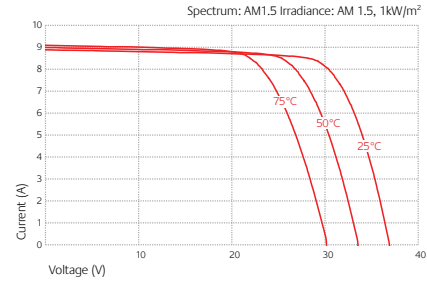
**KD245GH-4FB2**

**SPECIFICATIONS**

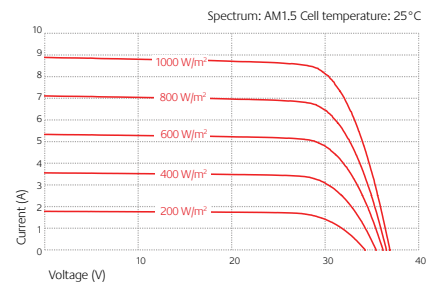


**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

Current-Voltage characteristics at various cell temperatures



Current-Voltage characteristics at various irradiance levels



**ELECTRICAL PERFORMANCE**

At 1000 W/m <sup>2</sup> (STC)*		
Maximum Power	245	W
Maximum Power Voltage (V <sub>mp</sub> )	29.8	V
Maximum Power Current (I <sub>mp</sub> )	8.23	A
Open Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )	36.9	V
Short Circuit Current (I <sub>sc</sub> )	8.91	A
Efficiency	14.8	%
At 800 W/m <sup>2</sup> (NOCT)**		
Maximum Power	176	W
Maximum Power Voltage (V <sub>mp</sub> )	26.8	V
Maximum Power Current (I <sub>mp</sub> )	6.58	A
Open Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )	33.7	V
Short Circuit Current (I <sub>sc</sub> )	7.21	A
NOCT	45	°C
Other Electrical Characteristics		
Power Tolerance	+5/-3	%
Maximum System Voltage	1000	V
Maximum Reverse Current	15	A
Series Fuse Rating	15	A
Temperature Coefficient of (V <sub>oc</sub> )	-0.36	%/C
Temperature Coefficient of (I <sub>sc</sub> )	0.06	%/C
Temperature Coefficient of Max. Power	-0.46	%/C

**MODULE CHARACTERISTICS**

Dimensions		
Length	1662 (±2.5)	mm
Width	990 (±2.5)	mm
Depth (Including Junction Box)	46	mm
Weight	20	kg
Cable	(+)1190 / (-)960	mm
Connection Type	R51-7/P51-7 (SMK PV-03 Series)	
Junction Box	123 x 91.6 x 16	mm
Number of Bypass Diodes	3	
IP Code	IP65	
Cells		
Cell Per Module	60	
Cell Technology	multi-crystalline	
Cell Dimensions (Square)	156 x 156	mm
Cell Bonding	3 busbar	

\* Electrical values under standard test conditions (STC) = irradiation of 1000 W/M<sup>2</sup>, airmass AM 1.5, and cell temperature of 25°C.  
 \*\* Electrical values under normal operating test conditions (NOCT) = irradiation of 800 W/M<sup>2</sup>, airmass AM 1.5, wind speed of 1m/s, and ambient temperature of 20°C.  
 KYOCERA reserves the right to modify these specifications without notice.

073113

OUR VALUED PARTNER

## ANEXO B – *Datasheet* Inversor

## 5 - Características de Proteção do Inversor

**Proteção Contra Curto Circuito:** O inversor desligará automaticamente até o curto circuito ser removido.

**Alarme de Baixa Tensão:** Um alarme soará quando a tensão da bateria estiver abaixo de 10,5 + / - 0,5 VDC. Esta é um indicação que a bateria precisa ser recarregada.

**Proteção de Alta Tensão:** A luz indicadora (LED vermelho) acenderá e o inversor desligará automaticamente quando a entrada exceder 16,5 + / - 1 VDC.

**Proteção de Baixa Tensão:** A luz indicadora (LED vermelho) acenderá e o inversor desligará automaticamente quando a entrada for inferior a 10,0 + / - 0,5 VDC.

### ATENÇÃO!

**Antes de ligar o inversor, confira no manual do fabricante de seu equipamento se a potência dissipada por este, é compatível com fornecida pelo inversor**

RECORTE AQUI

## 6 - Termo de Garantia

Hayonik Indústria e Comércio de Produtos Eletrônicos Ltda, garante este produto contra defeitos de fabricação ou componentes, pelo prazo de 90 (noventa) dias a contar da data da nota fiscal.

Nome:	
Cidade:	UF:
Telefone:	
Nota Fiscal:	

Para utilização da garantia, preencha e destaque este campo, encaminhando o produto em sua embalagem original ao estabelecimento onde foi efetuado a compra. Não se esqueça de anexar a nota fiscal do mesmo.

## 7 - Especificações

Modelo	150W	200W	300W	400W	600W	800W	1000W	1200W	1500W	2000W	3000W
Potência Máxima	150W	200W	300W	400W	600W	800W	1000W	1200W	1500W	2000W	3000W
Tensão de Saída AC	220V ± 10% RMS										
Tensão de Entrada DC	11 – 15 V										
Forma de Onda de Saída	Senoide Modificada										
Frequência	60Hz ± 3Hz										
Eficiência	>80%										
Proteção de Temperatura	<65°C										
Alarme de Baixa Tensão	10,5 ± 0,5 V										
Desligamento de Baixa Tensão	10 ± 0,5 V										
Proteção de Alta Tensão	>15V										
Circuito de Proteção para Curto Circuito na Saída	Desligamento Automático										
Cabo de Entrada para Bateria* (Máximo 1,5 metros)	>2,5mm <sup>2</sup>	>2,5mm <sup>2</sup>	>6,0mm <sup>2</sup>	< 6mm <sup>2</sup>	>16,0mm <sup>2</sup>	< 16mm <sup>2</sup>	>35,0mm <sup>2</sup>	< 35mm <sup>2</sup>	>50,0mm <sup>2</sup>	<70mm <sup>2</sup>	<150mm <sup>2</sup>
Dimensões CxLxA	130 x 65 x 235mm	190 x 75 x 240mm	190 x 75 x 240mm	150 x 110 x 60mm	195 x 185 x 85mm	240 x 125 x 75mm	235 x 195 x 120mm	255 x 148 x 80mm	255 x 255 x 120mm	900 x 350 x 105 mm	900 x 625 x 110 mm

\* Recomendado utilizar cabos de bateria de no máximo 1,5 metros seguindo as espessuras apresentadas na tabela, caso contrário poderá haver queda de tensão acionando a proteção de baixa tensão do Inversor. O cabo não acompanha o inversor.

\* No caso da bateria estar com carga baixa, sem carga ou o cabo de entrada não estiver de acordo com a especificação acima, o inversor não irá funcionar.