

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**STEFANIE RECLA SCHWAB**

**CONVERSOR CC-CC *BUCK* EMULANDO PAINEL  
FOTOVOLTAICO**

VITÓRIA – ES  
FEV/2017

STEFANIE RECLA SCHWAB

## CONVERSOR CC-CC *BUCK* EMULANDO PAINEL FOTOVOLTAICO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna **Stefanie Recla Schwab**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti

Coorientador: MSc. Netalianne M. F. Heringer

VITÓRIA – ES  
FEV/2017

STEFANIE RECLA SCHWAB

## **CONVERSOR CC-CC *BUCK* EMULANDO PAINEL FOTOVOLTAICO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna **Stefanie Recla Schwab**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 20 de fevereiro de 2017.

### **COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientador**

---

**MSc. Netalianne M. F. Heringer**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Coorientador**

---

**Prof. MSc. Arthur Eduardo Alves Amorim**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Examinador**

---

**Eng.<sup>a</sup> Dayane Corneau Broedel**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Examinador**

À minha mãe.

Agradeço ao meu orientador, Professor Domingos, por ter compartilhado comigo seu imenso conhecimento ao longo de todos esses anos de graduação. Agradeço à minha coorientadora, Netalianne, por toda a ajuda e dedicação a este projeto.

Agradeço também aos meus professores, amigos, familiares e todos aqueles que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

## RESUMO

Diante da necessidade de ampliação da utilização de fontes renováveis para tornar a matriz energética brasileira mais sustentável, a emulação do funcionamento de um painel fotovoltaico se apresenta como uma contribuição de grande valia para estudos do comportamento dos painéis, e testes de algoritmos MPPT, independentemente das condições climáticas. Assim, este projeto apresenta a simulação e montagem de um conversor *Buck* para imitar um painel solar. Com este propósito, são apresentadas as possíveis modelagens de um painel fotovoltaico e o modelo escolhido, o dimensionamento e montagem do conversor *Buck*, a sintonia do controlador associado e os testes experimentais realizados com o protótipo.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação aproximada do nível de insolação da Alemanha e Brasil. ....	13
Figura 2 - Curvas Características de um PV .....	15
Figura 3 - Curvas características do módulo KC50T. ....	16
Figura 4 - Exemplo do "espelhamento" da curva característica do módulo fotovoltaico KC50T. ....	17
Figura 5 - Conversor <i>Buck</i> .....	20
Figura 6 - Modelo gerado em Simulink/Matlab® para simulação do conversor <i>Buck</i> emulando painel fotovoltaico. ....	22
Figura 7 - Curva Característica da Corrente x Tensão Variando a Temperatura .....	24
Figura 8 - Curva Característica da Corrente x Tensão Variando a Irradiação.....	25
Figura 9 - Curva Característica da Potência x Tensão para as Condições Padrão do Módulo KC50T .....	25
Figura 10 - Conversor <i>Buck</i> selecionado .....	27
Figura 11 - Sisotool do Conversor <i>Buck</i> com Controlador P .....	28
Figura 12- Comparação entre as curvas de Corrente x Tensão do Painel e do Conversor Controlado .....	29
Figura 13 - Comparação entre as curvas de Potência x Tensão do Painel e do Conversor Controlado .....	29
Figura 14 - Ampliação da Comparação entre as curvas de Corrente x Tensão.....	30
Figura 15 - Esquemático da Interface do Arduino com o Conversor.....	31
Figura 16 - Medições de Tensão e Corrente no Circuito do Conversor .....	32
Figura 17 - Circuito de Medição do Sinal de Corrente.....	33
Figura 18- Circuito de Medição do Sinal de Tensão. ....	35
Figura 19 - Conversor <i>Buck</i> Montado .....	37
Figura 20 - Curva de Corrente por Tensão Obtida das Medições do Conversor.....	38
Figura 21 - Comparação entre as curvas de Corrente x Tensão do Modelo do Painel e do Conversor Controlado Montado .....	39
Figura 22 - Comparação entre as curvas de Potência x Tensão do Modelo do Painel e do Conversor Controlado Montado .....	40

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Código referente ao Modelo de Primeira Ordem .....	23
---	----



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros do Painel .....	24
Tabela 2 - Premissas para o projeto do conversor <i>Buck</i> .....	26
Tabela 3 - Componentes do Conversor <i>Buck</i> .....	36

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PV	Painel Fotovoltaico
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
Icc	Corrente de Curto Circuito
Vca	Tensão de Circuito Aberto
IrraRef	Irradiação de Referência
TempRef	Temperatura de Referência
$\alpha$	Coefficiente de temperatura de Icc
$\beta$	Coefficiente de temperatura de Vca
Pm	Potência Máxima
Vpp	Tensão de Potência Máxima
Ipp	Corrente de Potência Máxima

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	Motivação .....	12
1.2	Objetivos.....	14
1.2.1	Objetivo Geral .....	14
1.2.2	Objetivos específicos.....	14
<b>2</b>	<b>MODELAGEM DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS .....</b>	<b>15</b>
2.1	Características elétricas dos módulos fotovoltaicos .....	15
2.2	Modelo do Módulo Fotovoltaico .....	17
<b>3</b>	<b>CONVERSORES CC-CC.....</b>	<b>20</b>
3.1	Conversor <i>Buck</i> .....	20
3.2	Controle do Chaveamento do Conversor .....	21
<b>4</b>	<b>PROJETO E SIMULAÇÃO.....</b>	<b>22</b>
4.1	Modelo do Painel.....	22
4.2	Conversor <i>BUCK</i> .....	26
4.2.1	Projeto do Conversor.....	26
4.3	Controlador P.....	27
4.4	Resultados de Simulação e Conclusões.....	28
<b>5</b>	<b>MONTAGEM DO PROTÓTIPO .....</b>	<b>31</b>
5.1	Programação do <i>Arduino Mega 2560</i> .....	31
5.2	Montagem do Conversor <i>Buck</i> .....	32
5.2.1	Medição de Corrente .....	33
5.2.2	Medição de Tensão.....	34
5.2.3	Componentes Escolhidos .....	36
5.2.4	Conversor <i>Buck</i> .....	36
<b>6</b>	<b>TESTES EXPERIMENTAIS E RESULTADOS .....</b>	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>41</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>43</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>45</b>
	<b>ANEXO A .....</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda de energia elétrica vem crescendo de forma significativa no Brasil e no mundo. De fato, o replanejamento das matrizes energéticas para atender o consumo da população é e será um grande desafio mundial. Mas atender à demanda de energia não é a única preocupação. É preciso também que haja uma minimização do impacto ambiental causado pela geração de energia elétrica. Por isso, é de extrema importância investir em meios de geração de energia com baixo impacto ambiental.

O Sistema elétrico brasileiro possui como principal fonte de energia a hidroeletricidade, que pode ser considerada uma fonte limpa, renovável e barata. Porém, a hidroeletricidade causa um grande impacto ambiental no local onde é instalada. Portanto, a busca por fontes de energia com impacto ambiental ainda menor tem levado vários países a investirem na transformação e complementação dos seus parques energéticos (TERCIOTE, 2002).

Com o colapso na captação de água e riscos no abastecimento e geração de energia elétrica, associado à crescente pressão contra as emissões de gases poluentes provocados pelo uso de combustíveis como petróleo e gás, a necessidade de o país voltar os olhos para as energias alternativas, como a solar, é cada vez mais fundamental.

A energia proveniente do Sol, considerada inesgotável na escala de tempo, é hoje uma das alternativas mais promissoras quanto ao potencial energético. Quando se fala em energia, deve ser lembrado que o Sol é, indiretamente, a principal fonte de energia usada na Terra, e é dela que derivam as diversas fontes de energia que existem no planeta. Um sistema mais direto de transformação de energia solar em energia elétrica é o uso de células fotovoltaicas. A sua utilização é uma solução promissora, especialmente considerando geração distribuída e a situação energética atual do país.

O uso de painéis fotovoltaicos tem aumentado significativamente, assim como as pesquisas associadas, que permitem a otimização da geração. Assim como Enio Bueno Pereira e Sérgio Colle (1997) afirmaram, “o aproveitamento da energia solar é um projeto viável, tanto em termos técnicos quanto econômicos”.

Em ambientes de pesquisa, a dependência do ciclo diurno e de variações aleatórias de insolação para testar topologias ou algoritmos relacionados a geração solar pode não ser viável e gerar custos e atrasos desnecessários. Por isso o interesse em utilizar a emulação para obter resultados compatíveis com a operação de um painel fotovoltaico, já que esta limitação pode ser contornada utilizando uma fonte de energia elétrica devidamente controlada imitando a operação de um painel fotovoltaico.

Neste contexto, objetivando facilitar o estudo da geração de energia elétrica a partir do Sol, foi desenvolvido um protótipo que se mostrou capaz de emular a operação de um painel fotovoltaico. Para isso foi usado um conversor *PWM CC-CC Buck* e um *Arduino Mega*, implementado um algoritmo de controle simples, mas capaz de representar adequadamente o comportamento esperado. Assim, o *Arduino* permite ao conversor imitar o comportamento de um painel fotovoltaico.

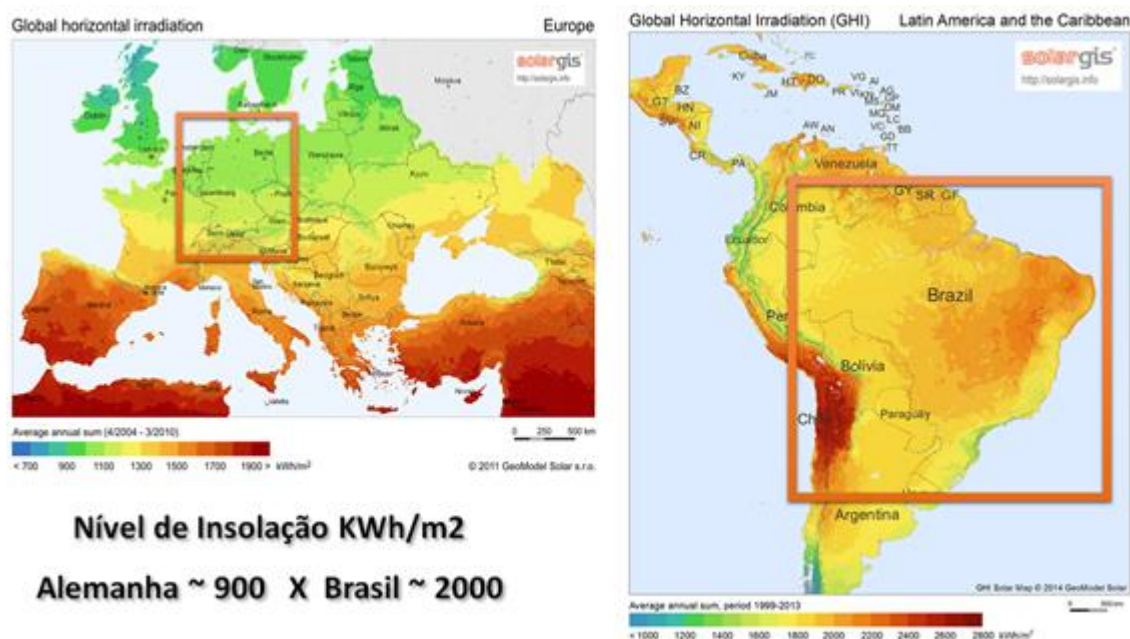
## 1.1 Motivação

O replanejamento das matrizes energéticas para atender o consumo da população é e continuará sendo um grande desafio. Atender a demanda de energia minimizando o impacto ambiental causado pela geração é uma grande preocupação atual. Com isso, o estudo por fontes renováveis de energia vem crescendo em todo o mundo.

A geração solar apresenta inúmeras vantagens, principalmente considerando um país com alto potencial de geração, como o Brasil. Além do baixo impacto ambiental, esse tipo de geração possui baixo custo de manutenção de equipamentos e é uma excelente fonte de energia em locais não atendidos por outras fontes (CRESESB, 2008).

Um país que se destaca quando o assunto é energia solar é a Alemanha. No entanto, é possível notar pela Figura 1 que o potencial de geração solar brasileiro é maior. Esse fato revela a importância e os benefícios que o investimento em estudos sobre geração fotovoltaica pode acarretar à nação.

Figura 1 - Comparação aproximada do nível de insolação da Alemanha e Brasil.



Fonte: COSOL, (2016).

A partir do uso de um conversor *Buck* e de um algoritmo de controle capaz de representar adequadamente o comportamento esperado, a realização de testes de interesse acadêmico se torna mais simples, eliminando completamente a dependência de determinadas condições de tempo para a realização de estudos na área de energia solar, o que propicia um acesso de alunos e professores a esses resultados de forma muito mais fácil e didática.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é a simulação e montagem de um protótipo capaz de emular o comportamento de um painel fotovoltaico e de reproduzir as curvas típicas desse painel. O protótipo é um sistema composto por um conversor *Buck* e um *Arduino Mega*, que é o responsável por integrar toda a parte de eletrônica de potência ao algoritmo de controle.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Estudo da modelagem de um painel solar;
- Estudo dos conversores CC-CC *PWM*, com ênfase no conversor *Buck*;
- Simulação e desenvolvimento do protótipo completo, caracterizando os métodos de dimensionamento e procedimento de montagem do sistema.

## 2 MODELAGEM DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A geração de energia elétrica a partir da utilização de painéis fotovoltaicos cresceu consideravelmente nos últimos anos, assim como os estudos a respeito. Portanto, já existem diversos modelos representativos capazes de modelar com certa precisão os painéis. Todos esses modelos se baseiam, principalmente, nas principais características de funcionamento conhecidas, que serão abordadas a seguir.

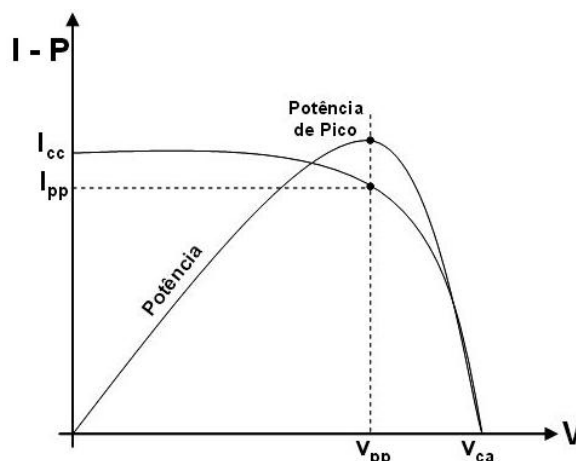
### 2.1 Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

Geralmente, a potência dos módulos é dada pela potência de pico, ou seja, a potência máxima que o equipamento é capaz de fornecer para uma determinada condição de irradiação e temperatura. Outras características elétricas importantes para caracterizar o funcionamento dos módulos fotovoltaicos são as seguintes:

- Tensão de Circuito Aberto ( $V_{ca}$ )
- Corrente de Curto Circuito ( $I_{cc}$ )
- Potência Máxima ou Potência de Pico
- Tensão de Potência Máxima ( $V_{pp}$ )
- Corrente de Potência Máxima ( $I_{pp}$ )

Essas características são ilustradas pela Figura 2, que apresenta as curvas características de corrente e potência pela tensão de um painel fotovoltaico genérico.

Figura 2 - Curvas Características de um PV



Fonte: ITASAT, (2006).

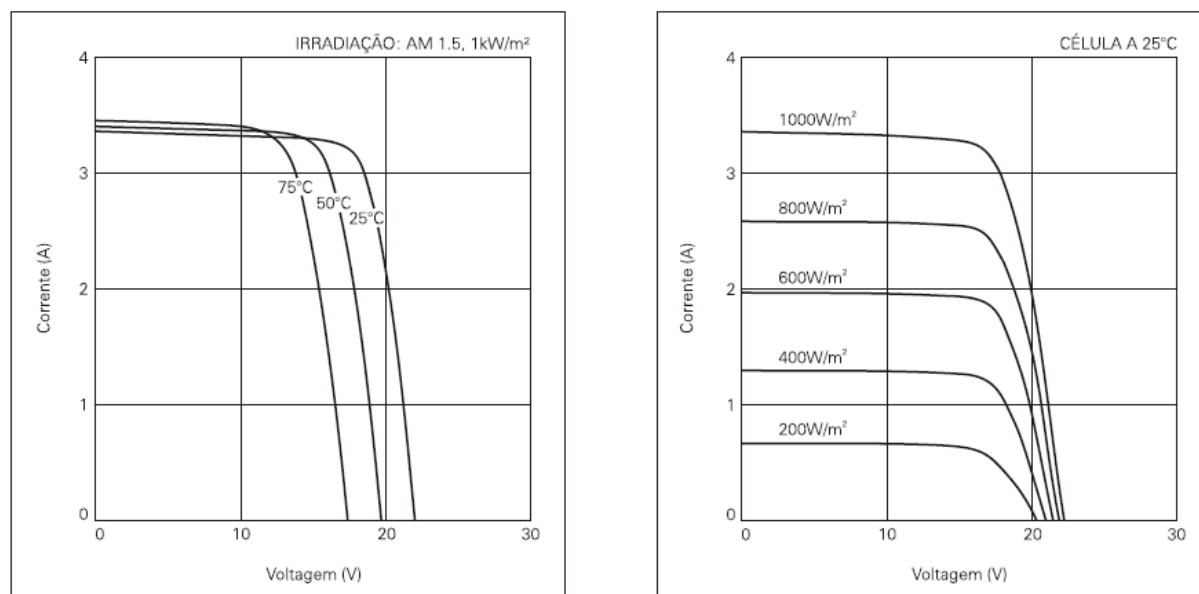


A condição padrão para se obter as curvas características dos módulos é definida para radiação de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia), e temperatura de  $25^\circ\text{C}$  (a eficiência da célula é reduzida com o aumento da temperatura).

Os principais fatores que influenciam nas características elétricas de um painel são a irradiação e a temperatura das células. A corrente gerada nos módulos aumenta com o aumento da irradiação. Por outro lado, o aumento da temperatura na célula faz com que a eficiência do módulo diminua, abaixando assim os pontos de operação para potência máxima gerada (CRESESB, 2008).

A Figura 3 mostra as curvas características do módulo KC50T, retiradas do *datasheet* do fabricante. Essas curvas retratam adequadamente o comportamento da corrente de um painel fotovoltaico quando a irradiação varia e quando a temperatura varia, respectivamente.

Figura 3 - Curvas características do módulo KC50T.



Fonte: KYOCERA, (2008).

A partir dessas curvas pode-se começar a compreender melhor o funcionamento dos painéis fotovoltaicos e seguir para a sua modelagem.

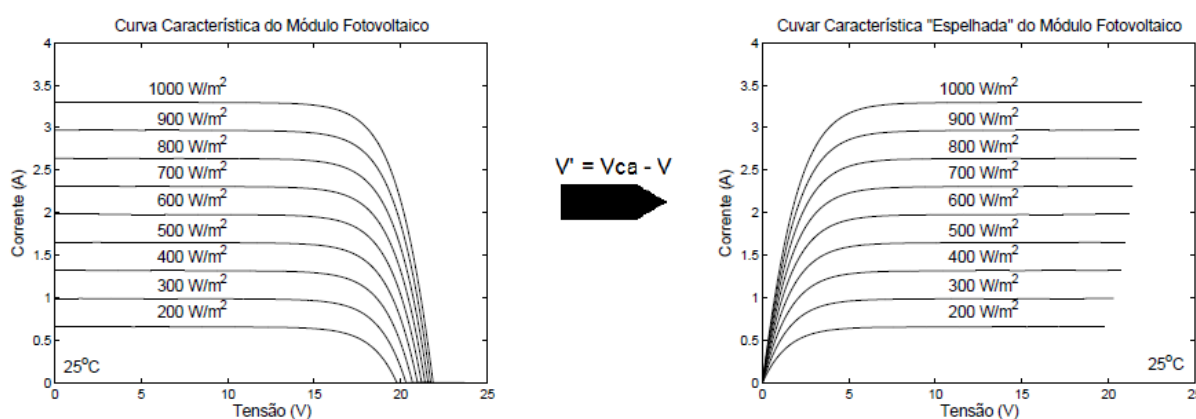
## 2.2 Modelo do Módulo Fotovoltaico

Os modelos dos módulos fotovoltaicos podem ser representados por quatro circuitos elétricos equivalentes, que, segundo Costa (2010), são os seguintes:

- Modelo ideal
- Modelo com resistência em série
- Modelo com resistência em paralelo
- Modelo com dois diodos

Esses modelos dependem de estimação de parâmetros e não são tão simples de serem implementados computacionalmente. Por isso, para a modelagem utilizada nesse projeto foi escolhido um modelo matemático baseado em um sistema linear de primeira ordem, ao invés de circuitos elétricos equivalentes. Esse modelo foi desenvolvido e testado por Wagner Teixeira da Costa em 2010, e teve sua eficiência na emulação de painéis fotovoltaicos comprovada. A modelagem do módulo fotovoltaico e todo o seu equacionamento foram feitos através da idealização do "espelhamento" da curva característica, como pode ser visto na Figura 4. Pode-se observar que a curva espelhada se assemelha à resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem.

Figura 4 - Exemplo do "espelhamento" da curva característica do módulo fotovoltaico KC50T.



Fonte: COSTA, (2010).

Considerando o modelo de primeira ordem, a corrente no módulo fotovoltaico é dada pela Equação 1 (COSTA, 2010):

$$I = K \left\{ 1 - \exp \left[ - \frac{V'}{(V_{ca} - V)} / \tau \right] \right\} \quad (1)$$

O termo  $(V_{ca} - V)$  é referente ao "espelhamento" da curva característica. O módulo fotovoltaico depende das condições de irradiação e temperatura, ou seja, o ganho  $K$  e a constante  $\tau$  são dinâmicos e variam de acordo com estas condições.

Observa-se que o ganho  $K$  é a própria corrente de curto-circuito, que pode ser expressa pela Equação 2 (COSTA, 2010):

$$K = I_{cc} = \frac{Irra}{Irra_{Ref}} \cdot (I_{cc_{Ref}} + \alpha \cdot (Temp - Temp_{Ref})) \quad (2)$$

Na qual:

- $Irra$  irradiação do módulo (W/ m<sup>2</sup>);
- $Irra_{Ref}$  irradiação de referência (= 1000W/ m<sup>2</sup>);
- $Temp$  temperatura do módulo (K)
- $Temp_{Ref}$  temperatura de referência (= 278K);
- $I_{cc_{Ref}}$  corrente de curto-circuito em condição padrão de teste (A);
- $\alpha$  coeficiente de temperatura para corrente de curto-circuito (A/K).

A tensão de circuito aberto também pode ser calculada a partir das condições de irradiação e temperatura, e da Equação 3 (COSTA, 2010):

$$V_{ca} = V_{ca_{Ref}} + \beta \cdot (Temp - Temp_{Ref}) + \log \left( \frac{Irra}{Irra_{Ref}} \right) \quad (3)$$

Onde:

- $V_{ca_{Ref}}$  tensão de circuito aberto em condição padrão de teste (V);
- $\beta$  coeficiente de temperatura para tensão de circuito aberto (V/K).

A constante  $\tau$  é dada pela Equação 4 (COSTA, 2010):

$$\tau = c1 \cdot \frac{Irra}{Irra_{Ref}} + c2 \cdot \frac{Temp}{Temp_{Ref}} + c3 \cdot \frac{Irra}{Irra_{Ref}} \cdot \frac{Temp}{Temp_{Ref}} + c4 \quad (4)$$

Na Equação 3 as constantes  $c1$ ,  $c2$ ,  $c3$  e  $c4$  variam para cada tipo de módulo e podem ser calculadas. Levantando valores de  $\tau$  para diferentes valores de irradiação e temperatura é possível montar um sistema de equações baseado na Equação 4 e solucioná-lo usando o conceito de pseudoinversa (HERINGER, 2016).

Com o uso das Equações 2, 3 e 4 é possível obter todos os valores necessários para o cálculo da corrente do módulo fotovoltaico, através da Equação 1. A partir da modelagem do painel, pode-se obter um referencial de comparação para o conversor.

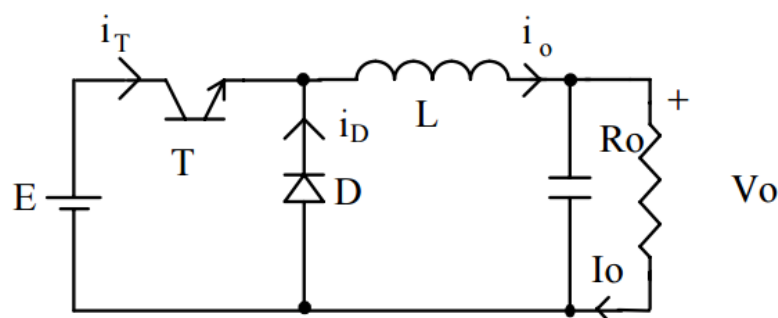
### 3 CONVERSORES CC-CC

O uso de um conversor CC-CC *PWM* cujo comportamento seja o mais próximo possível do desejado é um dos pontos fundamentais deste trabalho.

#### 3.1 Conversor *Buck*

O escolhido para utilização na montagem foi o conversor *Buck*, que pode ser visualizado na Figura 5. Essa escolha se baseou na necessidade de atender às características dos painéis solares usuais, como possuir uma tensão de circuito aberto de, aproximadamente, 21V, e uma tensão de máxima potência de, aproximadamente, 17V. O conversor abaixador de tensão, quando devidamente controlado, atende bem a essas condições. Este conversor também se destacou pela sua simplicidade construtiva. Especialmente, possui um indutor na saída, cuja corrente pode ser controlada em condução contínua para imitar o PV.

Figura 5 - Conversor *Buck*



Fonte: Produção de POMILIO, J. A. Fontes Chaveadas, (2014).

O professor José Antenor Pomilio explicou o funcionamento desse conversor da seguinte forma (2014):

“A tensão de entrada ( $E$ ) é recortada pela chave  $T$ . Considere-se  $V_o$  praticamente constante, por uma ação de filtragem suficientemente eficaz do capacitor de saída. Assim, a corrente pela carga ( $R_o$ ) tem ondulação desprezível, possuindo apenas um nível contínuo.

Com o transistor conduzindo (diodo cortado), transfere-se energia da fonte para o indutor (cresce  $i_o$ ) e para o capacitor (quando  $i_o > V_o/R$ ).

Quando T desliga, o diodo conduz, dando continuidade à corrente do indutor. A energia armazenada em L é entregue ao capacitor e à carga. Enquanto o valor instantâneo da corrente pelo indutor for maior do que a corrente da carga, a diferença carrega o capacitor. Quando a corrente for menor, o capacitor se descarrega, suprindo a diferença a fim de manter constante a corrente da carga (já que estamos supondo constante a tensão  $V_o$ ). A tensão a ser suportada, tanto pelo transistor quanto pelo diodo, é igual à tensão de entrada,  $E''$

O conversor *Buck*, também conhecido como Step-Down, nada mais é do que um abaixador de tensão.

### 3.2 Controle do Chaveamento do Conversor

A partir da modelagem do painel, tem-se um referencial de comparação para o conversor. Mas para que o conversor imite adequadamente o painel, é essencial controlar o sinal de chaveamento do *Buck*.

Dentre os controladores clássicos, o controlador mais simples e que teve melhor resposta foi o controlador P. O controlador proporcional é basicamente um amplificador com ganho ajustável. Seu objetivo é acelerar a resposta do sistema.

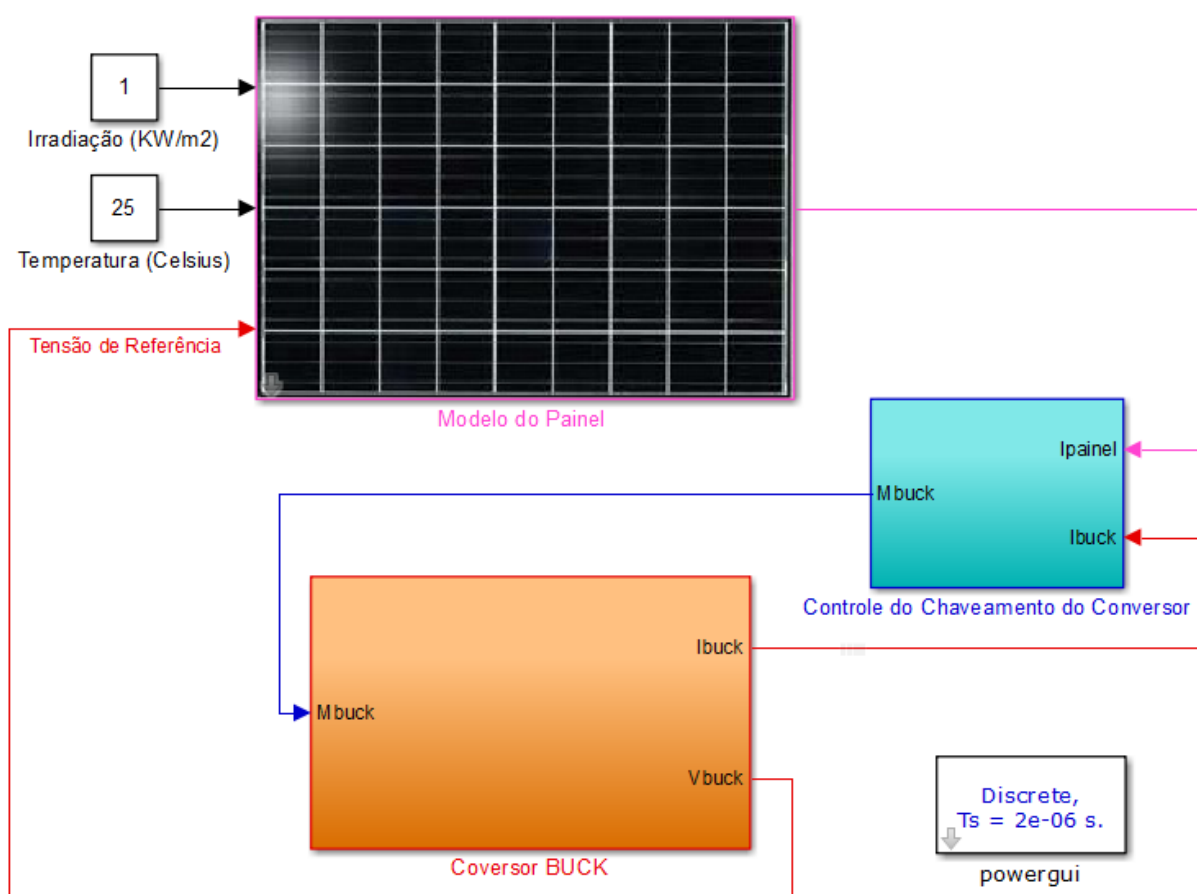
Na síntese do controlador P, escolhe-se um determinado valor de ganho  $K_p$  que atenda às especificações do projeto. O controlador P tem por característica aumentar a frequência de cruzamento de ganho ( $\omega_g$ ) e a banda passante (BP) do sistema, tornando a resposta do sistema geralmente mais rápida. Não altera tipo, nem fases inicial e final.

A partir da modelagem e simulação do painel e do conversor controlado, foi possível testar a capacidade do sistema proposto de emular o comportamento de um PV e garantir seu funcionamento antes mesmo da montagem do protótipo.

## 4 PROJETO E SIMULAÇÃO

A simulação do sistema proposto foi realizada no software *Matlab/Simulink 2016b*® com o objetivo de gerar as curvas características do painel a partir do uso do modelo de primeira ordem, assim como testar o dimensionamento e comprovar a eficácia de emulação do conversor *Buck*. O modelo construído pode ser observado na Figura 6, e será detalhado em seguida.

Figura 6 - Modelo gerado em Simulink/Matlab® para simulação do conversor *Buck* emulando painel fotovoltaico.



Fonte: Produção do próprio autor.

### 4.1 Modelo do Painel

A princípio foi abordado o problema relacionado à emulação de um painel fotovoltaico. O seguinte código, mostrado no quadro 1, foi implementado no *Matlab* para simular o

comportamento do painel, e representa as Equações (1), (2), (3) e (4), apresentadas no capítulo 2.

Quadro 1 - Código referente ao Modelo de Primeira Ordem

```
function Ip =
m1ord(Irra,Temp,IccRef,VcaRef,IrraRef,TempRef,alfa,beta,c1,c2,c3,c4,V)

% Calculo da corrente de curto circuito em funcao da irradiancia e da temperatura
Icc = (Irra/IrraRef)*(IccRef+alfa*(Temp-TempRef));

% Calculo da tensao de circuito aberto em funcao da irradiancia e da temperatura
Vca = VcaRef+beta*(Temp-TempRef)+log(Irra/IrraRef);

% Calculo de tau
tau = c1*Irra/IrraRef + c2*(Temp+273.15)/(TempRef+273.15) +
c3*(Irra/IrraRef)*(Temp+273.15)/(TempRef+273.15) + c4;

% Calculo de da corrente estimada do painel
Ip = Icc*(1-exp((V-Vca)/tau));

if Ip < 0
Ip = 0;

end
```

Fonte: Produção do próprio autor.

Os parâmetros utilizados no modelo, como a corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto em condição padrão de teste ( $I_{CC_{Ref}}$  e  $V_{ca_{Ref}}$ ), irradiação e temperatura de referência ( $Irra_{Ref}$  e  $Temp_{Ref}$ ), coeficientes de temperatura ( $\alpha$  e  $\beta$ ), são obtidos dos dados do módulo KC50T (KYOCERA, 2008b).

O *datasheet* do módulo se encontra no Anexo A. Os parâmetros  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  e  $c_4$  usados foram os encontrados por meio de evolução diferencial por Heringer em 2016. A parametrização do modelo do painel está detalhada na Tabela 1.

A partir do painel construído em ambiente de simulação, usando o código mostrado anteriormente no quadro 1 e o modelo apresentado na Figura 6, foi possível levantar as curvas características do módulo KC50T.



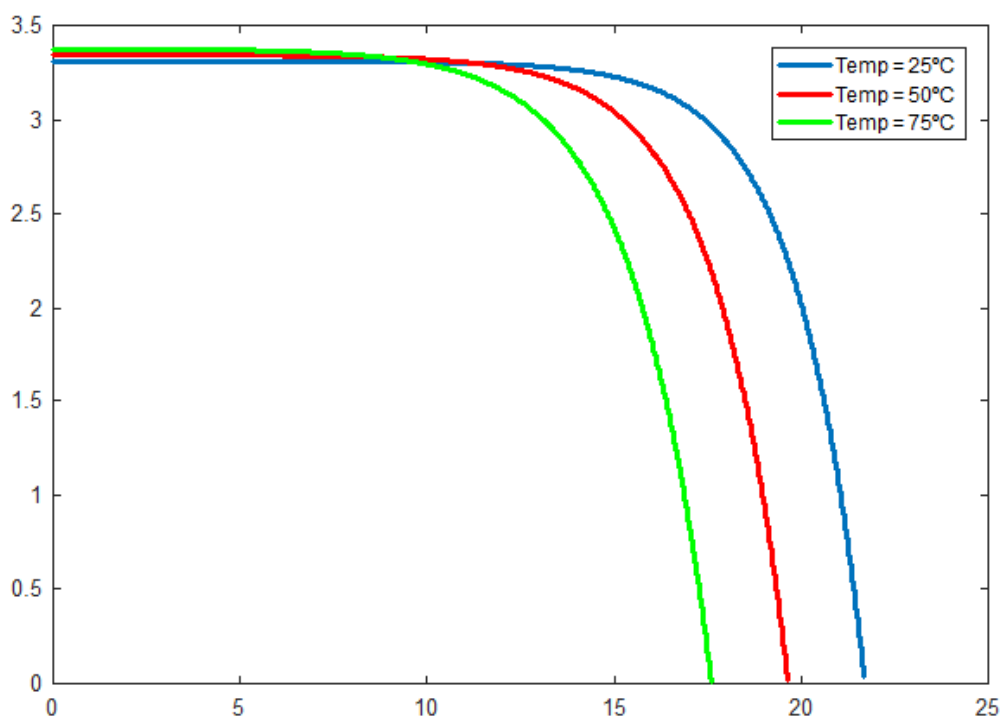
Tabela 1 - Parâmetros do Pannel

Corrente de Curto Circuito	3,31 A
Tensão de Circuito Aberto	21,7 V
Irradiação de Referência	1 kW/m <sup>2</sup>
Temperatura de Referência	25°C
Coeficiente de temperatura de Icc	$1,33 \times 10^{-3} \text{ A/}^\circ\text{C}$
Coeficiente de temperatura de Vca	$-8,21 \times 10^{-2} \text{ V/}^\circ\text{C}$
c1	0,2586
c2	0,3677
c3	0,4447
c4	0,3407

Fonte: Produção do próprio autor.

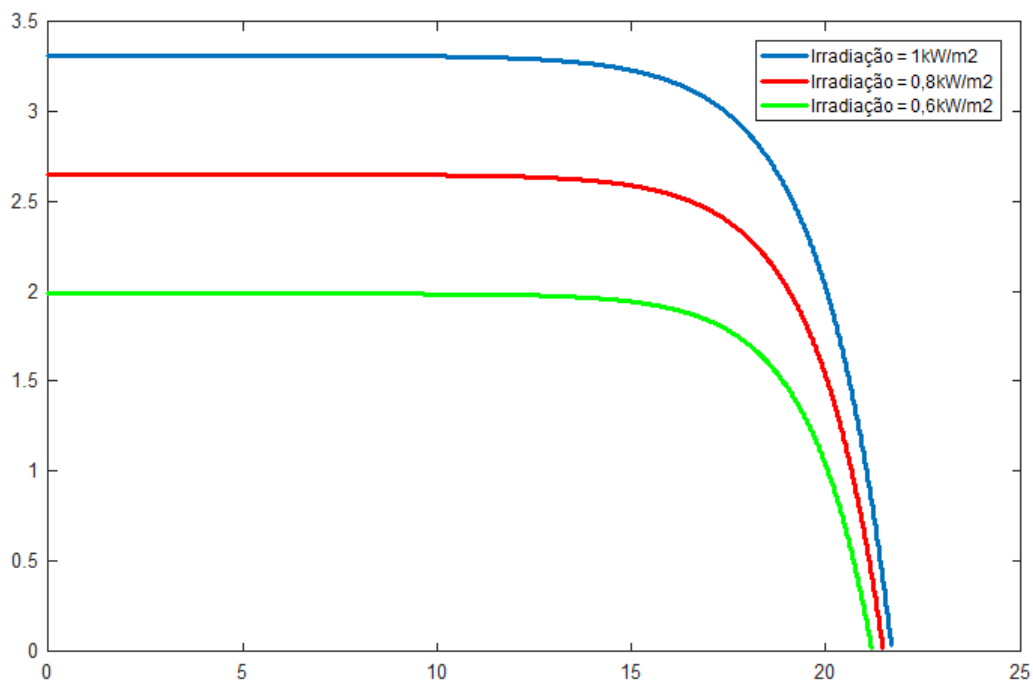
As curvas características do módulo KC50T reproduzidas pelo modelo do pannel estão apresentadas nas Figuras 7, 8 e 9.

Figura 7 - Curva Característica da Corrente x Tensão Variando a Temperatura



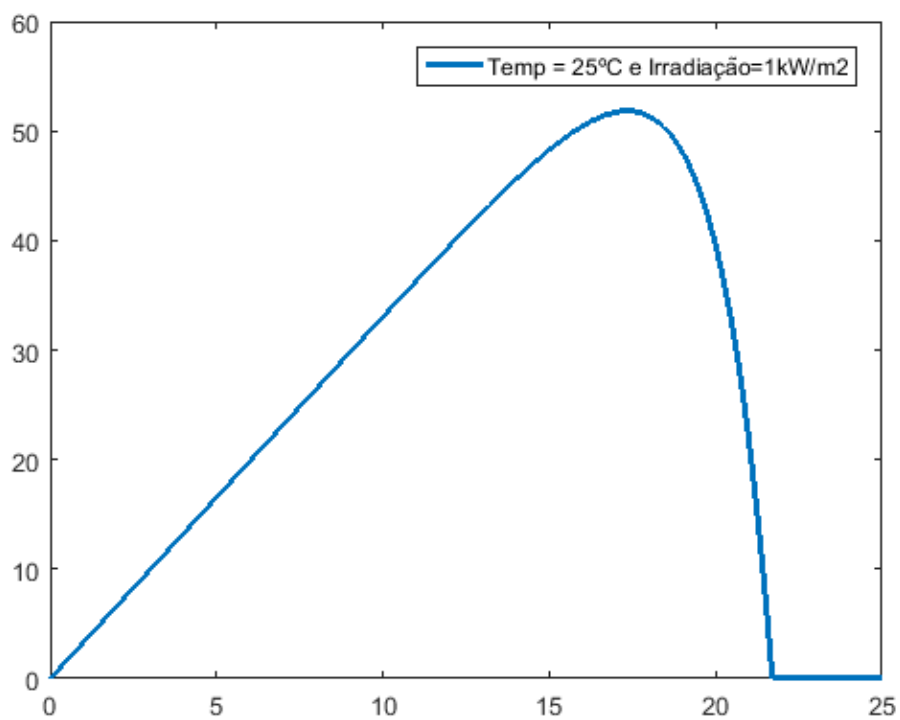
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 8 - Curva Característica da Corrente x Tensão Variando a Irradiação



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 9 - Curva Característica da Potência x Tensão para as Condições Padrão do Módulo KC50T



Fonte: Produção do próprio autor.

## 4.2 Conversor *BUCK*

### 4.2.1 Projeto do Conversor

O conversor *Buck* foi dimensionado considerando as características do módulo KC50T, da Kyocera, já que as características elétricas na saída do conversor devem se igualar às desse painel. Essas características estão apresentadas na Tabela 2. No entanto, vários outros módulos poderiam ser emulados adequadamente com este conversor, pois as características levadas em consideração são comuns a uma grande gama de painéis fotovoltaicos.

Tabela 2 - Premissas para o projeto do conversor *Buck*.

Tensão de Potência Máxima (Tensão de Saída do Conversor) - $V_o$	17,4 V
Corrente de Potência Máxima (Corrente na Saída do Conversor) - $I_o$	3,11 A
Potência Máxima (Potência do Conversor)	54 W
Tensão de Entrada do Conversor- E	30 V
Frequência de Chaveamento - f	31250 Hz

Fonte: Produção do próprio autor.

O ciclo de trabalho  $d$  é dado pela Equação 5 (HERINGER, 2016):

$$d = \frac{V_o}{E} \quad (5)$$

As Equações 6 e 7 (HERINGER, 2016) foram usadas a fim de obter os valores de capacitância e indutância ideais para o conversor, definindo a ondulação de corrente do indutor e ondulação de tensão do capacitor, respectivamente, em 5% de  $I_o$  e 1% de  $V_o$ .

$$\Delta_{iL} = \frac{E \cdot d \cdot (1 - d)}{f \cdot L} \quad (6)$$

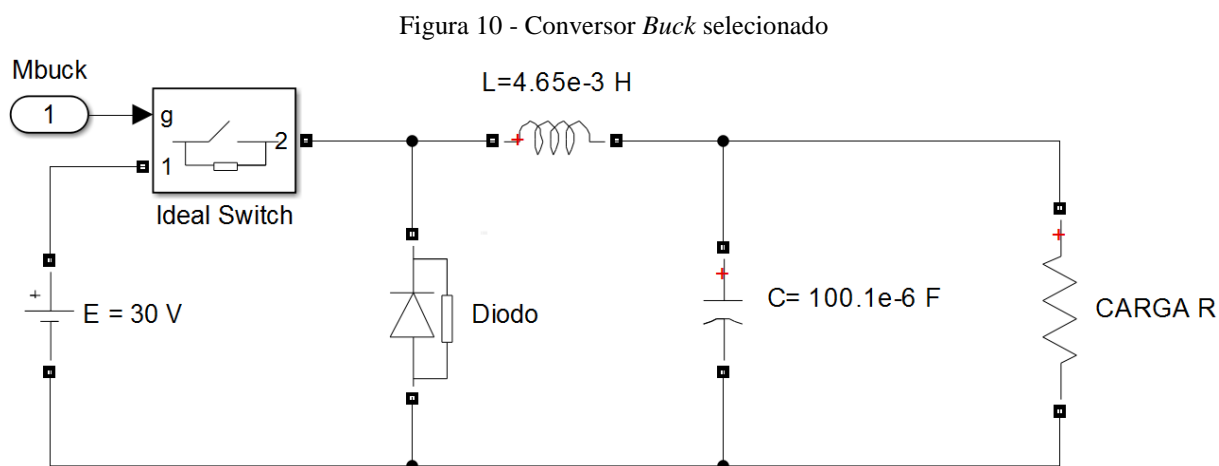
$$\Delta_{vC} = \frac{\Delta_{vC}}{8 \cdot f \cdot C} \quad (7)$$

Assim, os valores C e L adotados para o conversor são, respectivamente:

$$C = 100,1 \mu\text{F}$$

$$L = 4,65 \text{mH}$$

E o conversor *Buck* simulado pode ser analisado na figura seguinte.



Fonte: Produção do próprio autor.

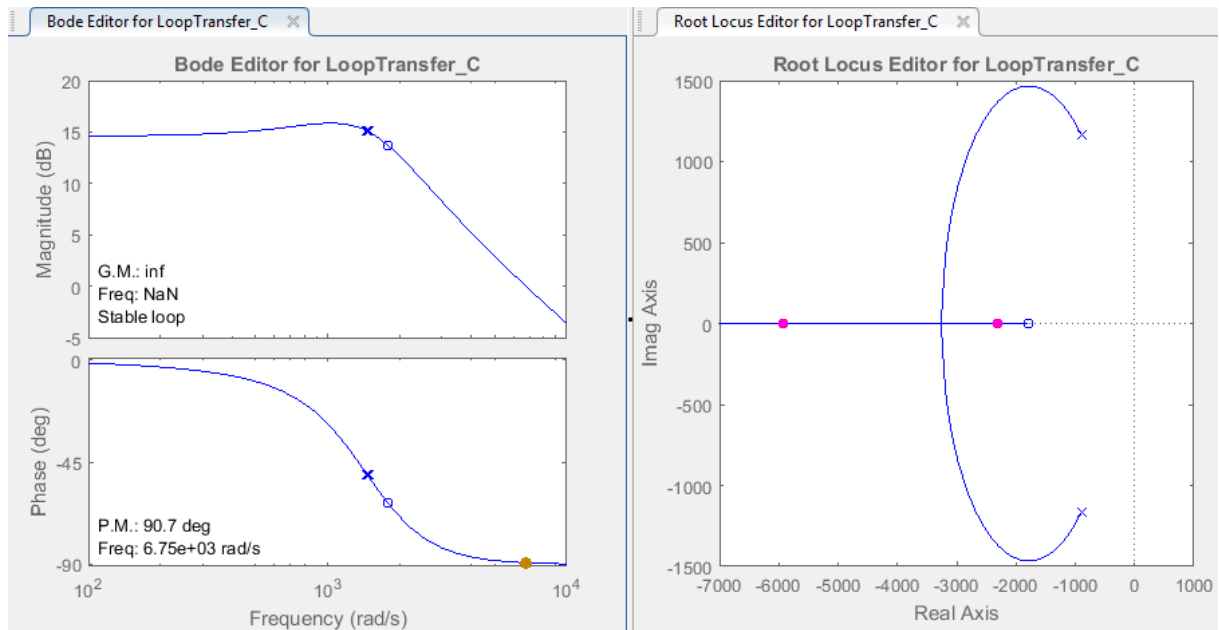
Após a construção deste modelo foram realizados diversos testes para avaliar o seu funcionamento. Através de simulação, foram obtidas novamente as curvas características e foi possível avaliar a qualidade da emulação, comparando a saída do painel com a do conversor *Buck*.

### 4.3 Controlador P

A fim de controlar o sinal de chaveamento do conversor, foi projetado um controlador P usando a ferramenta *Sisotool* do *Matlab2016b*®. A função de transferência do conversor ( $G_{BUCK}$ ) é representada pela Equação 8 (HERINGER, 2016), sendo que o resistor considerado foi o resultado de  $\frac{V_{pp}}{I_{pp}}$  no ponto de máxima potência.

$$G_{BUCK} = \frac{E \cdot R \cdot C \cdot s + E}{R \cdot L \cdot C \cdot s^2 + L \cdot s + R} = \frac{0,0168 s + 30}{(2,604 \cdot 10^{-6})s^2 + 0,00465 s + 5,595} \quad (8)$$

O diagrama de Bode, assim como o lugar geométrico das raízes, do sistema compensado pode ser analisado através da Figura 11.

Figura 11 - Sisotool do Conversor *Buck* com Controlador P

Fonte: Produção do próprio autor.

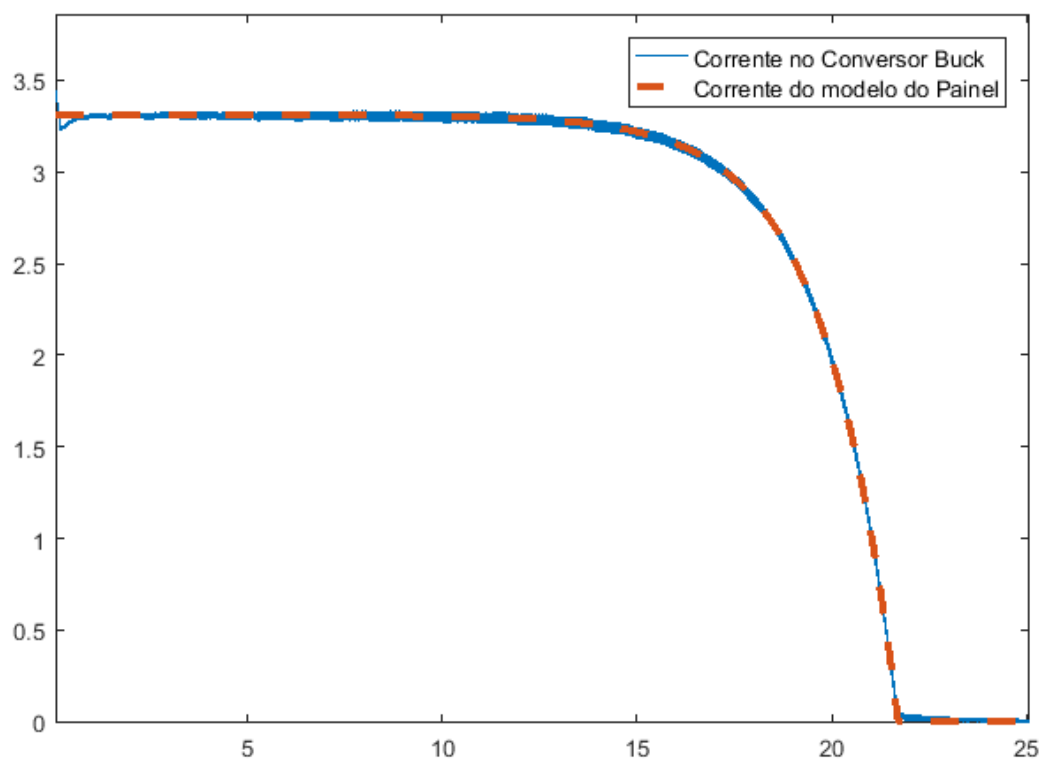
A sintonia desse controlador P resultou no seguinte valor para o ganho  $K_p$ :

$$K_p = 3,0835$$

#### 4.4 Resultados de Simulação e Conclusões

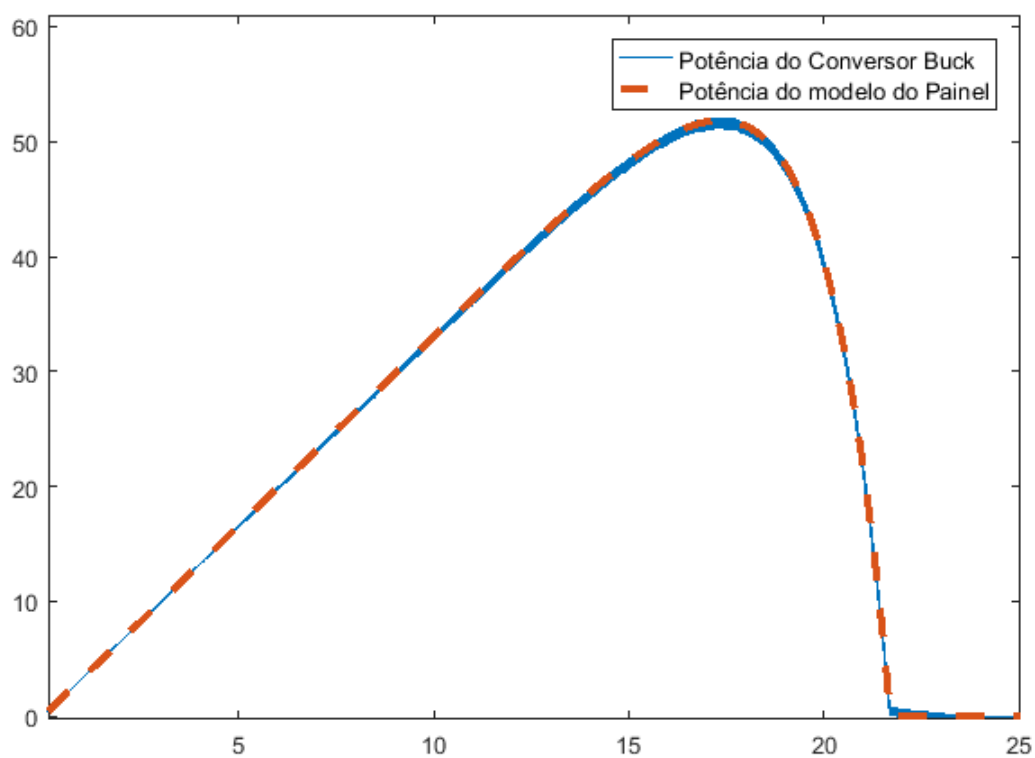
As Figuras 12 e 13 mostram uma comparação entre as respostas do modelo do painel fotovoltaico e do conversor *Buck*. Os testes apresentados nessas figuras foram feitos para uma temperatura de 25°C e irradiação de 1kW/m<sup>2</sup>. Os mesmos testes foram repetidos para diversas condições de temperatura e irradiação e apresentaram resultados semelhantes. Para obtenção das curvas, foi imposta à saída do conversor uma fonte de tensão em rampa.

Figura 12- Comparação entre as curvas de Corrente x Tensão do Painel e do Conversor Controlado



Fonte: Produção do próprio autor.

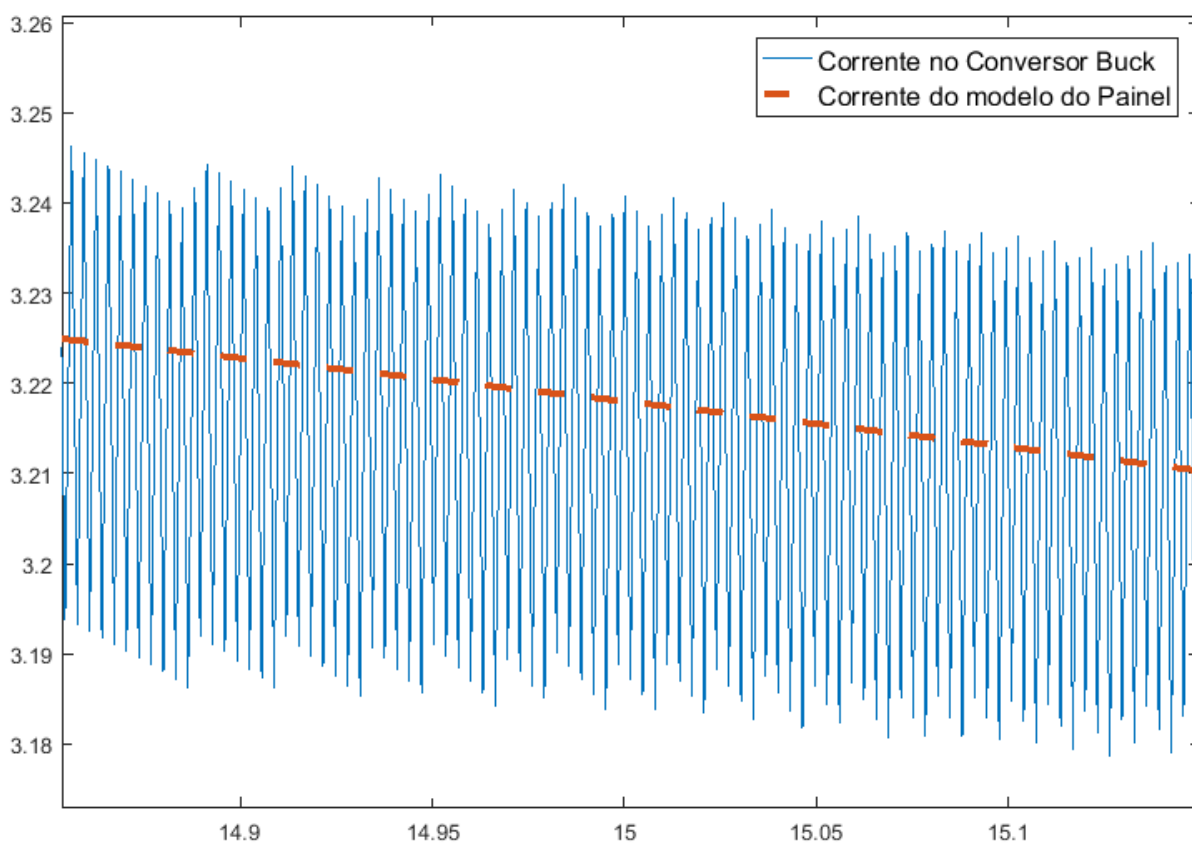
Figura 13 - Comparação entre as curvas de Potência x Tensão do Painel e do Conversor Controlado



Fonte: Produção do próprio autor.

Observando as Figuras 12 e 13 é possível chegar à conclusão de que o conversor simulado está bem dimensionado, já que as suas curvas foram semelhantes às obtidas com o modelo do PV, sendo que suas oscilações se devem apenas ao chaveamento do conversor, que podem ser melhor visualizadas na Figura 14, em que uma ampliação em uma região da curva IxV é apresentada.

Figura 14 - Ampliação da Comparação entre as curvas de Corrente x Tensão



Fonte: Produção do próprio autor.

## 5 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

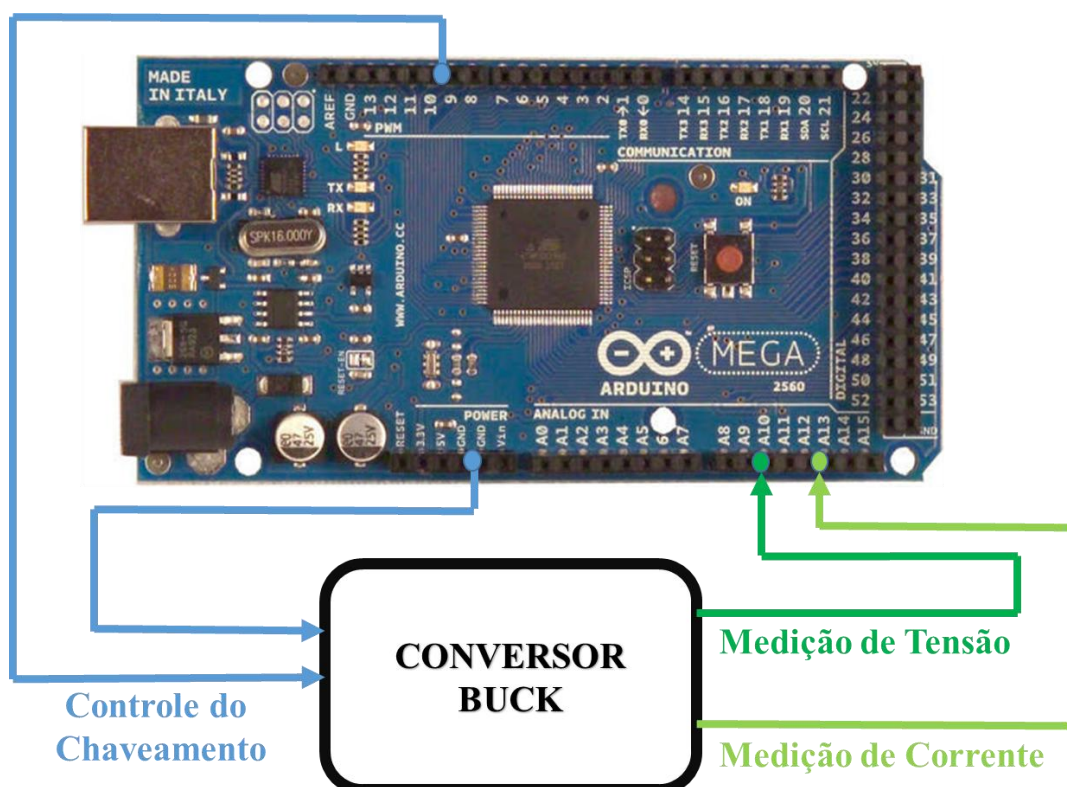
A montagem do protótipo pode ser resumida em duas etapas: Programação do *Arduino Mega 2560* e Montagem do Conversor *Buck* selecionado.

### 5.1 Programação do *Arduino Mega 2560*

A modelagem do painel fotovoltaico usando o modelo de primeira ordem, bem como o controle do chaveamento do conversor, foram feitos utilizando o *Arduino Mega 2560*. Este microcontrolador foi o escolhido por sua interface amigável, facilidade de programação, adequação à aplicação e disponibilidade.

Na figura seguinte é possível notar quais são os sinais de entrada e saída do *Arduino*, sendo que o código usado pode ser visto no Apêndice A.

Figura 15 - Esquemático da Interface do Arduino com o Conversor.



Fonte: Produção do próprio autor.

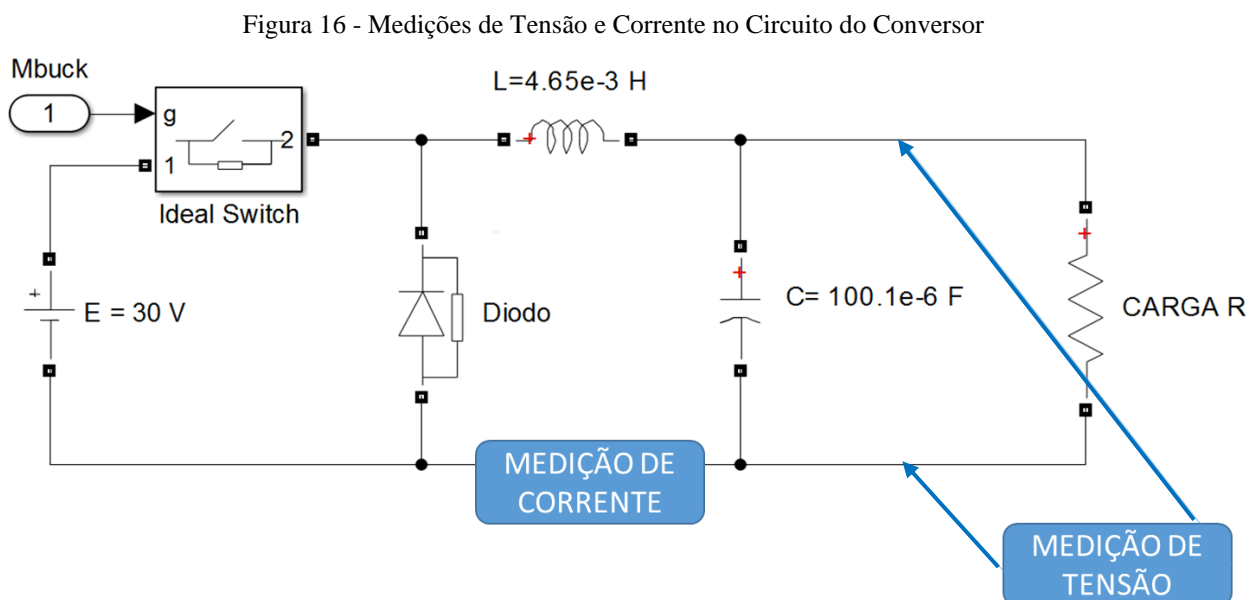


A entrada analógica do *Arduino* suporta, no máximo, 5V e 40mA em cada porta. No entanto havia a necessidade de medir tensões de até 21,7V e correntes de até 3,31A. Esse problema foi resolvido implementando no conversor etapas de condicionamento de sinal, no caso, medições de tensão e de corrente.

De acordo com a sua programação, o *Arduino* recebe as medições de tensão e corrente já convertidas de 0 a 5V. A medição de tensão é usada para calcular a corrente de referência, segundo o modelo de primeira ordem. A medição de corrente é comparada à essa corrente de referência e é aplicado o controle P. Desta forma é gerado e enviado ao conversor, o sinal de chaveamento, propiciando a emulação do painel fotovoltaico.

## 5.2 Montagem do Conversor *Buck*

Para que fosse feito devidamente o controle do conversor, era necessário amostrar a tensão na carga e a corrente no indutor, por isso além dos seus componentes básicos já dimensionados para o conversor, foram empregados circuitos para a amostragem de tensão e corrente, implementadas de acordo com a Figura 16.



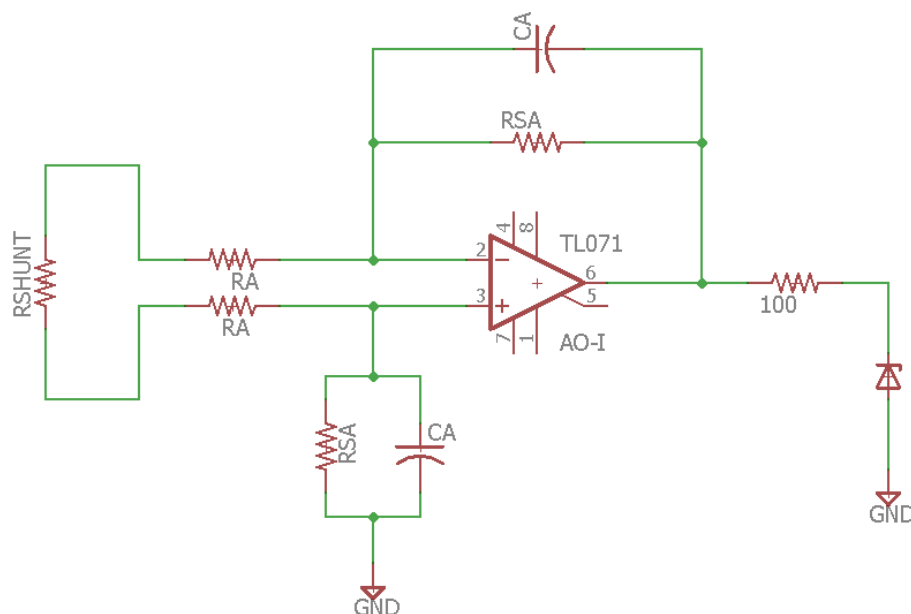
Fonte: Produção do próprio autor.

### 5.2.1 Medição de Corrente

Na malha de medição de corrente foi usado um resistor de pequeno valor ( $R_{SHUNT}=0,01\Omega$ ), com a finalidade de medir a corrente do conversor, juntamente a um amplificador operacional (TL071), cujo propósito era transformar a medição de corrente em um valor de tensão entre 0 e 5V (NASCIMENTO, 2006).

Foram inseridos ainda capacitores para filtrar sinais de alta frequência do sinal medido. O esquemático do circuito, construído no *Eagle* e posteriormente implementado na placa de circuito impresso, pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 - Circuito de Medição do Sinal de Corrente.



Fonte: Produção do próprio autor.

O cálculo dos componentes desse circuito foi feito levando em consideração que a corrente máxima a ser medida jamais excederia 6A e que a frequência de corte desejada para o filtro passa-baixa era de cerca de 10Hz. Dessa forma tem-se:

$$I_{MÁX} = 6A$$

$$R_{SHUNT} = 0,01\Omega$$

$$f_C = 10Hz$$

Segundo a Lei de Ohm, tem-se as Equações 9 e 10:

$$V_{SHUNT} = R_{SHUNT} \cdot I \quad (9)$$

$$V_{SHUNT} = 6 \cdot 0,01 = 0,06V \quad (10)$$

Desta forma, o ganho CC do amplificador operacional deverá ser igual ao apresentado na Equação 11 (NASCIMENTO, 2006):

$$Ganho = \frac{V_o}{V_i} = \frac{5}{0,06} = 83,33 \quad (11)$$

Para obter um ganho o mais próximo possível do calculado foram usados os seguintes resistores:

$$R_A = 3,3 \text{ k}\Omega$$

$$R_{SA} = 287 \text{ k}\Omega$$

A partir disso, foi possível calcular o valor ideal para os capacitores, tendo em vista que,

$$f_c = \frac{1}{R_{SA} \cdot C_A} \quad (9)$$

O valor escolhido para os capacitores foi de,

$$C_A = 470 \text{ nF}$$

Por último, foi inserido um diodo zener de 5,1V no circuito, garantindo que a medição de tensão não ultrapassaria o limite de tensão de entrada do *Arduino*.

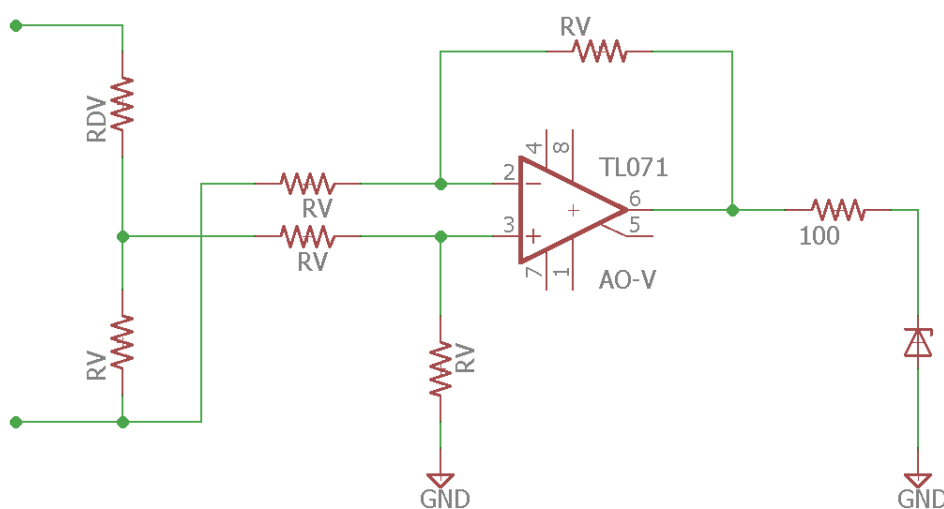
## 5.2.2 Medição de Tensão

A malha de medição de tensão foi dimensionada de modo a adequar os valores de tensão na saída do conversor aos suportados pelo *Arduino*. Para isso bastou a inserção de um divisor de tensão em paralelo com a carga.

No entanto, foi inserido também um amplificador operacional de ganho unitário, cuja função é referenciar o valor de tensão do divisor ao terra, já que a inclusão do  $R_{SHUNT}$  fez com que a carga não estivesse mais ligada diretamente ao terra.

O esquemático do circuito, construído no *Eagle* e também implementado na placa de circuito impresso, pode ser visto na Figura 18.

Figura 18- Circuito de Medição do Sinal de Tensão.



Fonte: Produção do próprio autor.

O cálculo do divisor de tensão foi feito objetivando converter uma tensão de, no máximo, 23V, em uma tensão de, no máximo, 5V. Os resistores  $R_v$  escolhidos foram,

$$R_v = 9,53k\Omega$$

O que resulta numa resistência equivalente de aproximadamente,

$$R_{v_{eq}} = 6,35k\Omega$$

Tendo que a relação numérica das resistências equivalentes do divisor de tensão deve ser de aproximadamente 1/5, o valor de resistência escolhido para  $R_{dv}$  foi de:

$$R_{dv} = 24k\Omega$$

Assim como no circuito de medição de corrente, foi inserido um diodo zener de 5,1V no circuito de modo a garantir que a medição de tensão não ultrapassasse o limite de tensão de entrada do *Arduino*.

### 5.2.3 Componentes Escolhidos

Além dos componentes projetados anteriormente, era necessário escolher o MOSFET e os diodos, imprescindíveis para o funcionamento do conversor. Esses e alguns outros componentes foram escolhidos com base em sua disponibilidade e estão listados na Tabela 3.

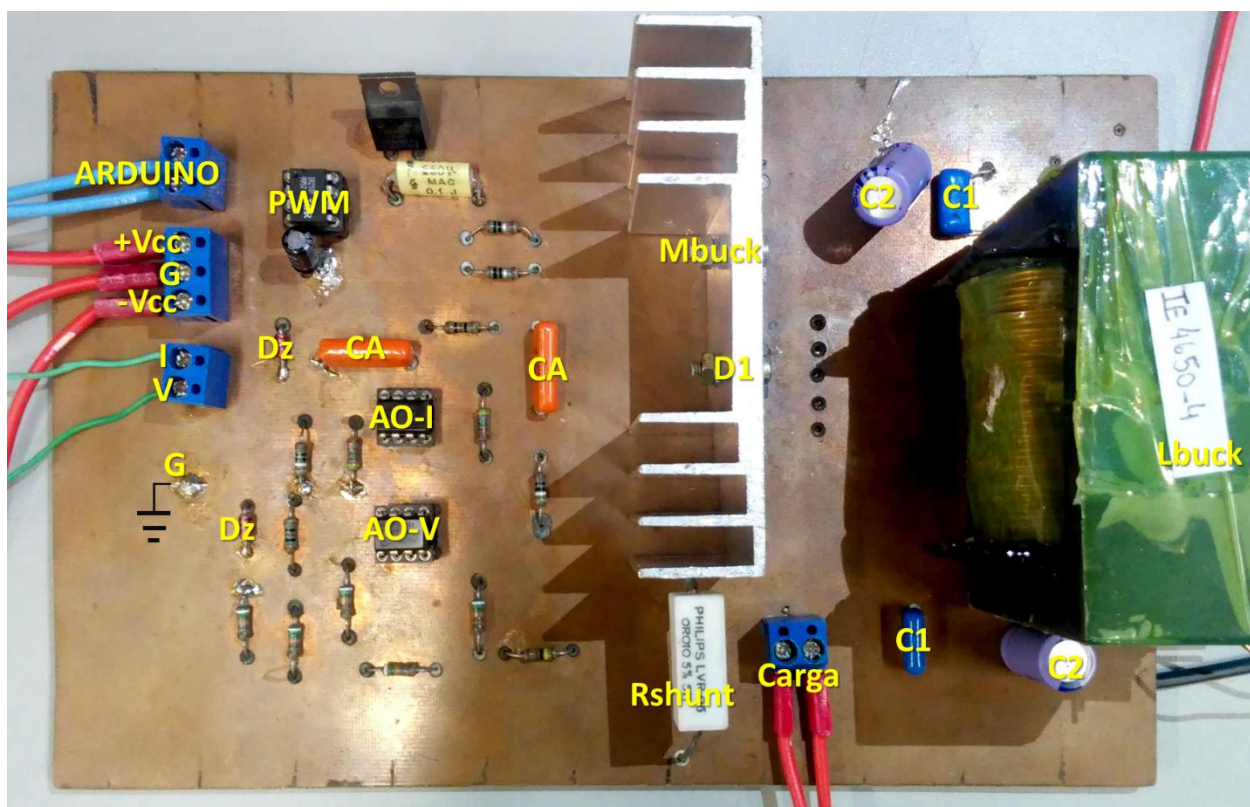
Tabela 3 - Componentes do Conversor *Buck*

Capacitores	$C2 = 100\mu\text{F}$
Indutor	$L_{\text{buck}} = 4,65\text{mH}$
MOSFET	$M_{\text{buck}} = \text{IRFZ48}$
Diodos	$D1 = \text{BYW29-200}$
Gate Drive	$\text{PWM} = \text{IR2101}$
Amplificadores Operacionais	$\text{AO-I e AO-V} = \text{TL071}$
Resistores de Precisão	$100\Omega$ , $R_A = 3,3\text{ k}\Omega$ , $R_{SA} = 287\text{ k}\Omega$ , $R_V = 9,53\text{ k}\Omega$ , $R_{dv} = 24\text{ k}\Omega$ e $R_{SHUNT} = 0,01\Omega$
Capacitores de Filtro	$C1=0,1\mu\text{F}$ e $CA=470\mu\text{F}$
Diodos Zener	$D_Z=5,1\text{V}$

Fonte: Produção do próprio autor.

### 5.2.4 Conversor *Buck*

O conversor montado pode ser observado na Figura 19. Este conversor foi adaptado da montagem realizada por (NASCIMENTO, 2006).

Figura 19 - Conversor *Buck* Montado

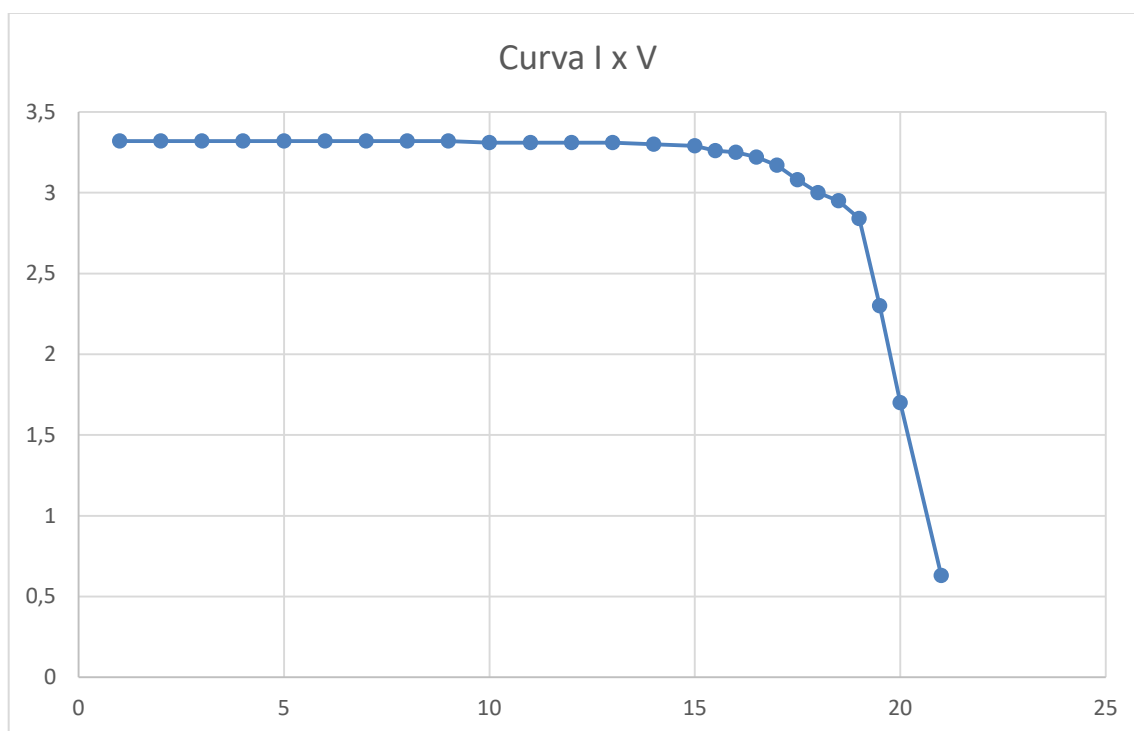
Fonte: Produção do próprio autor.

## 6 TESTES EXPERIMENTAIS E RESULTADOS

A capacidade de emulação do sistema foi testada variando a carga do conversor e reproduzindo as curvas características do módulo KC50T. Através do uso de um reostato de 100W, que pode variar de 0 a  $20\Omega$ , foi possível excursionar boa parte da curva de corrente em função da tensão.

Devido ao uso do reostato, foi necessário realizar as medições de ponto a ponto, alterando a carga, e assim verificando os valores de tensão e corrente. As medições realizadas podem ser vistas na Figura 20.

Figura 20 - Curva de Corrente por Tensão Obtida das Medições do Conversor

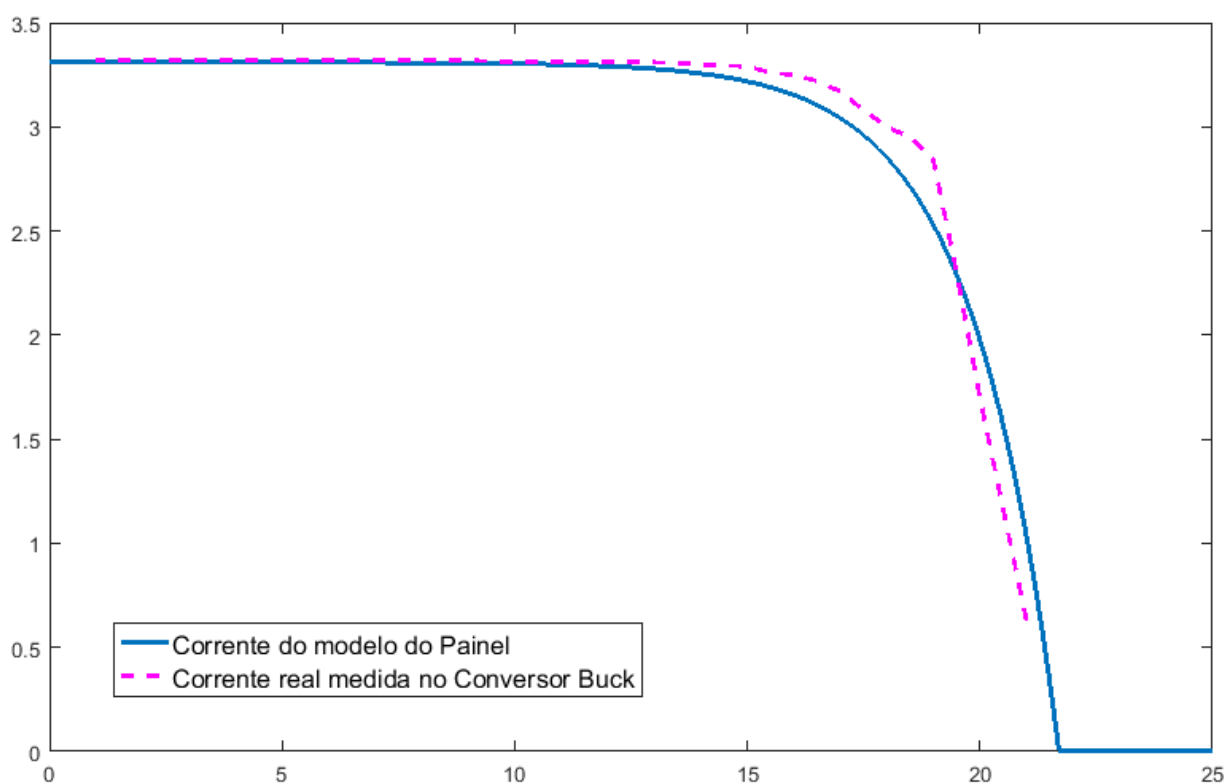


Fonte: Produção do próprio autor.

A partir desse resultado é possível comparar a curva obtida experimentalmente com a obtida do modelo de painel fotovoltaico. Tendo assim uma noção real da qualidade da capacidade de emulação do conversor *Buck* controlado. As Figuras 21 e 22 mostram essa comparação.

Vale ressaltar que os testes apresentados nesse capítulo foram feitos para uma temperatura de 25°C e irradiação de 1kW/m<sup>2</sup>. Esses testes foram escolhidos pela sua boa representatividade e por serem semelhantes ao teste explorado na simulação mostrada ao final do capítulo 4. Mas, diferentemente da forma como ali foi explorado, na prática não foi imposta uma tensão na saída, mas sim, como já dito, utilizou-se uma resistência variável para obter a variação de tensão.

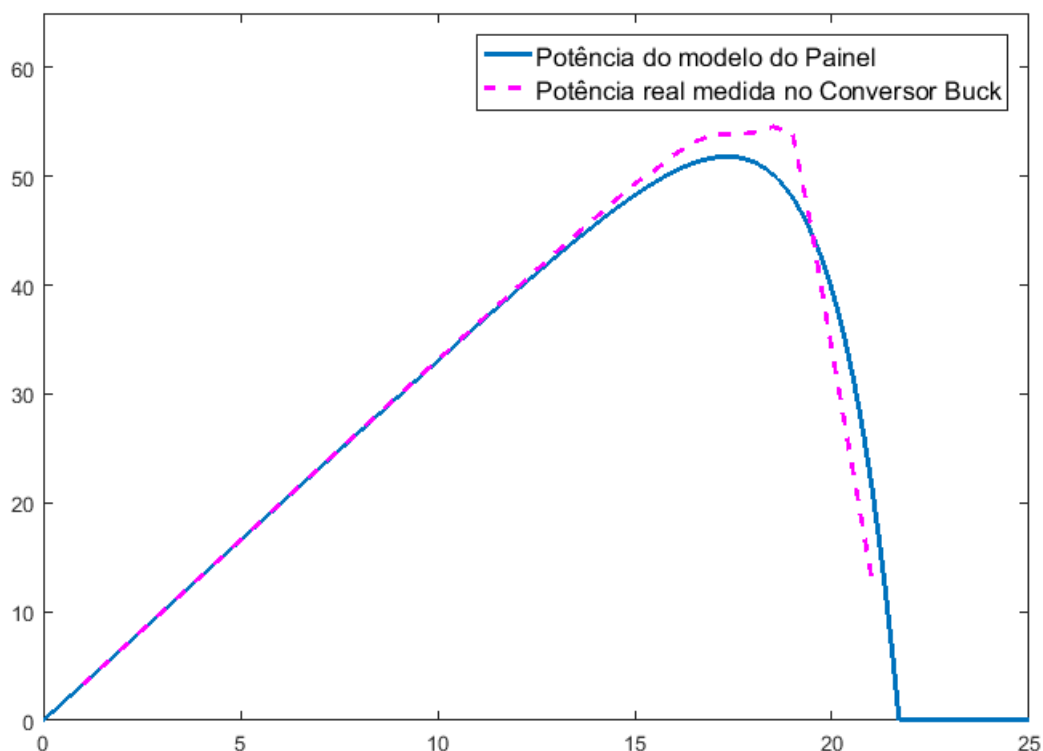
Figura 21 - Comparação entre as curvas de Corrente x Tensão do Modelo do Painel e do Conversor Controlado Montado



Fonte: Produção do próprio autor.



Figura 22 - Comparação entre as curvas de Potência x Tensão do Modelo do Painel e do Conversor Controlado Montado



Fonte: Produção do próprio autor.

O erro máximo das curvas plotadas a partir das medições (em relação às curvas obtidas do modelo do PV) foi calculado. Para a curva de tensão por corrente, o maior valor de erro encontrado foi de 9,26% e esse erro máximo ocorreu no ponto  $V = 18,6$  V. Para a curva de tensão por potência, o valor máximo do erro foi de 9,04% e esse erro ocorreu próximo ao ponto  $V=18,55$  V. Ambos os pontos foram próximos ao ponto de MPPT.

Esses valores se encontram dentro do limite de variação especificado pelo fabricante, que é de +10% e -5%.

Como as medições de tensão foram obtidas com o uso de um multímetro, encontrou-se sempre um valor médio de tensão. No entanto, observando o comportamento da tensão no osciloscópio foi possível notar que a forma da tensão quando esta excedia 15V não era lisa e contínua, mas sim oscilatória. Esse fato explica os valores relativamente grandes de erro próximo ao ponto de MPPT.

## 7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou a emulação de um painel fotovoltaico por um conversor *PWM CC-CC Buck*. Os principais pontos de atenção durante a construção do sistema foram garantir que o controle fosse o mais preciso possível, principalmente no ponto de MPPT, bem como garantir que o conversor *Buck* estivesse adequadamente dimensionado e que o modelo de primeira ordem, descrito em Costa (2010) emulasse adequadamente o painel.

Todos esses pontos foram cobertos de forma satisfatória na análise, projeto e simulação do emulador.

Também, o principal objetivo do trabalho, que era a montagem de um protótipo capaz de emular o comportamento de um painel fotovoltaico e de reproduzir suas curvas típicas, foi atingido, mas com pior desempenho.

O protótipo composto por um conversor *Buck* e um *Arduino Mega*, cuja responsabilidade foi integrar toda a parte de eletrônica de potência ao algoritmo de controle, reagiu bem em todos os testes realizados em laço aberto.

Os resultados apresentados pelo conversor controlado foram parecidos com aqueles esperados, e comprovaram a capacidade do conversor *Buck* de emular um painel fotovoltaico em diversas condições climáticas. No entanto, foi perceptível que a pior emulação feita pelo conversor, ou seja, o maior erro do resultado em relação àquele apresentado pelo modelo de painel fotovoltaico escolhido, ocorreu a partir de um valor de tensão próximo ao ponto de máxima potência. Isso significa que o controle implementado deve ser mais bem avaliado de forma a apresentar resultados compatíveis em toda a região de operação do painel solar.

A placa de desenvolvimento *Arduino* mostrou-se perfeitamente adequada à realização das funções necessárias para emular um painel solar através do modelo de primeira ordem.

Como trabalhos futuros, sugere-se testar a eficácia de controladores mais modernos, afinal foi usado neste trabalho um simples controlador P. Sugere-se também testar a capacidade de emulação do conversor para um número  $n$  de painéis, ligados tanto em série, como em paralelo. Ainda, poderiam ser utilizadas características de painéis de marcas e tipos diferentes, contabilizando o esforço de controle e a capacidade de emulação do sistema. E, principalmente, melhorar a técnica de controle para que o emulador apresente o mesmo e alto desempenho em toda a faixa de atuação de um painel solar.

Outro trabalho futuro interessante seria implementar um algoritmo de MPPT, juntamente ao algoritmo de controle e observar o comportamento do conversor.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TERCIOTE, Ricardo. **Eficiência energética de um sistema eólico isolado**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000100056&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100056&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em: 19 Dec. 2015.

PEREIRA, E. B. ; COLLE, S. . **A Energia que vem do Sol**. Ciência Hoje , Rio de Janeiro, v. 22, n.130, p. 24-35, 1997

CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br/principal.php>>. Acesso em: 4 nov. 2015.

ITASAT; XII ENCITA/2006. **Proposta de Arquitetura para a Unidade de Controle de Potência do Subsistema de Suprimento de Energia do Satélite Universitário**. Disponível em: < <http://slideplayer.com.br/slide/366892/>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

COSTA, W. T. ; FARDIN, J. F. ; NETO, L. V. B. M. . **Modelagem de um Gerador Fotovoltaico em um Sistema de Primeira Ordem**. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2008, Juiz de Fora. CBA 2008, 2008.

POMILIO, J. A. **Topologias básicas de conversores CC-CC não-isolados**. Fontes Chaveadas. FEEC – UNICAMP. Rio de Janeiro, p. 1-17, 2014.

KYOCERA. KC85T - **Módulo Policristalino de Alta Eficiência**. Datasheet, 2008.

HERINGER, N. M. F. ; **Modelagem de Arranjo Fotovoltaico com Sombreamento Parcial para Referência de Emuladores Estáticos**. Dissertação de mestrado acadêmico. UFES. Vitória, 2016.

NASCIMENTO, H. L.; **Conversor Buck como Interface entre Painéis Solares e Banco de Baterias**. Projeto de graduação. UFES. Vitória, 2006.

## APÊNDICE A

*Código implementado no Arduino Mega 2560:*

```
#include <SoftwareSerial.h>

// As medições do conversor são entradas e o chaveamento do conversor será saída
#define pTENSAO 10
#define pCORRENTE 13

//gg é a irradiação a ser simulada
float gg = 1;
//float gg = 0,8;
//float gg = 0,6;
//tg é a temperatura a ser simulada
float tg = 25;
//float tg = 50;
//float tg = 75;

float Icc = 3.31;
float Vca = 21.7;
float Gr = 1;
float Tr = 25;
float alfa = 0.00133;
float beta = -0.0821;
float c1 = 0.2586;
float c2 = 0.3677;
float c3 = 0.4447;
float c4 = 0.3407;

float V;
float I;
```

```
float d;  
float prop;  
  
double f= 31250;  
float dt = 1/f;  
float Ic;  
float Ierro;  
  
float Icc_c;  
float Vca_c;  
float tau;  
float Iph;  
  
float Kp=3.0835;  
  
void setup() {  
  
    Serial.begin(38400);  
  
    pinMode(pTENSAO, INPUT);  
    pinMode(pCORRENTE, INPUT);  
  
    TCCR2B=TCCR2B&0b11111000 | 0x01;  
  
}  
  
void loop() {  
  
    double V = 23.8976*analogRead(pTENSAO)/1024;  
    double I = 3.4*analogRead(pCORRENTE)/1024 -0.06;  
    if(I>3.1) I=I+((I-3.1)*0.5);
```

```

// Modelo Matemático

Icc_c = (gg/Gr)*(Icc+alfa*(tg-Tr));
  //Calculo de Voc em funcao de G e de T
Vca_c = Vca+beta*(tg-Tr)+log(gg/Gr);
  //Calculo de tau
tau = c1*gg/Gr + c2*(tg+273.15)/(Tr+273.15) + c3*(gg/Gr)*(tg+273.15)/(Tr+273.15) +
c4;
  //Calculo de Iph
Iph = Icc_c*(1-exp((V-Vca_c)/tau));

  if (Iph < 0){
    Iph = 0;
  }

// Controle P

Ierro= Iph-I;
prop = (Kp *(Ierro));
Ic = prop;

if (Ic < 0) Ic=0.1;
if (Ic > 0.7233) Ic=0.7233;

d=Ic*255;
analogWrite(9,d);
Serial.println(I);
Serial.println(V);

}

```



## ANEXO A

Especificações técnicas do módulo KC50T da Kyocera® :



MODEL  
KC50T

THE NEW VALUE FRONTIER



## KC50T

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL  
PHOTOVOLTAIC MODULE



### HIGHLIGHTS OF KYOCERA PHOTOVOLTAIC MODULES

Kyocera's advanced cell processing technology and automated production facilities produce a highly efficient multicrystal photovoltaic modules.

The conversion efficiency of the Kyocera solar cell is over 16%.

These cells are encapsulated between a tempered glass cover

and a pottant with back sheet to provide efficient protection from the severest environmental conditions.

The entire laminate is installed in an anodized aluminum frame to provide structural strength and ease of installation.



### APPLICATIONS

- Microwave / Radio repeater stations
- Electrification of villages in remote areas
- Medical facilities in rural areas
- Power source for summer vacation homes
- Emergency communication systems
- Water quality and environmental data monitoring systems
- Navigation lighthouses, and ocean buoys
- Pumping systems for irrigation, rural water supplies and livestock watering
- Aviation obstruction lights
- Cathodic protection systems
- Desalination systems
- Recreational vehicles
- Railroad signals
- Sailboat charging systems
- etc.

### QUALIFICATIONS

● **MODULE** : UL 1703 certified  
Hazardous Locations Class I, Div 2, Groups A, B, C and D

● **FACTORY** : ISO9001 and ISO 14001

### QUALITY ASSURANCE

Kyocera multicrystal photovoltaic modules have passed the following tests.

- Thermal cycling test
- Thermal shock test
- Thermal / Freezing and high humidity cycling test
- Electrical isolation test
- Hail impact test
- Mechanical, wind and twist loading test
- Salt mist test
- Light and water-exposure test
- Field exposure test

### LIMITED WARRANTY

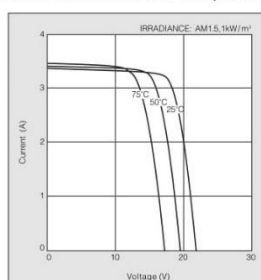
※ 1 year limited warranty on material and workmanship

※ 20 years limited warranty on power output: For detail, please refer to "category IV" in Warranty issued by Kyocera

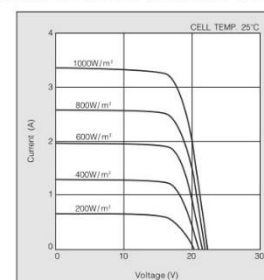
(Long term output warranty shall warrant if PV Module(s) exhibits power output of less than 90% of the original minimum rated power specified at the time of sale within 10 years and less than 80% within 20 years after the date of sale to the Customer. The power output values shall be those measured under Kyocera's standard measurement conditions. Regarding the warranty conditions in detail, please refer to Warranty issued by Kyocera)

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic  
Module KC50T at various cell temperatures



Current-Voltage characteristics of Photovoltaic  
Module KC50T at various irradiance levels

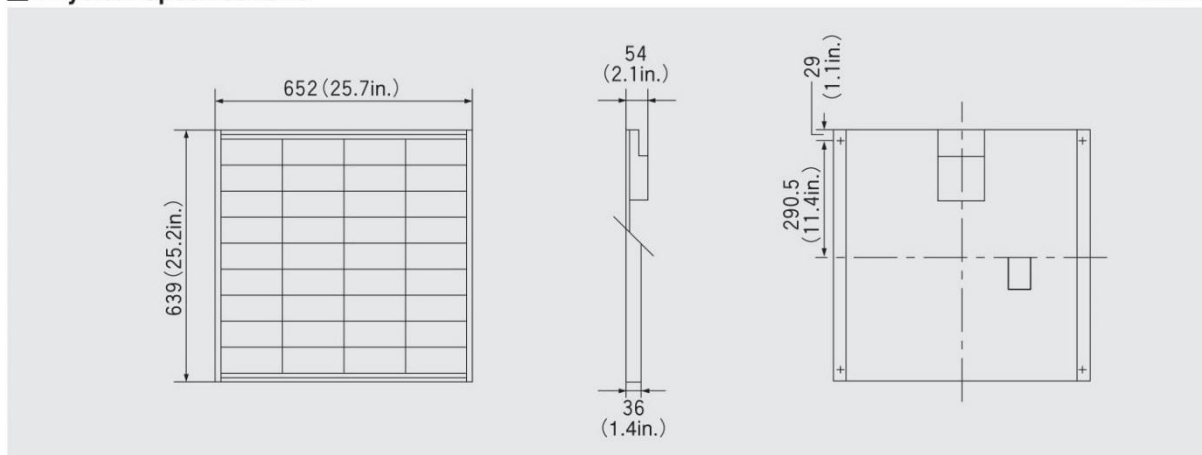


## SPECIFICATIONS

KC50T

## Physical Specifications

Unit : mm (in.)



## Specifications

Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)	
Maximum Power (Pmax)	54W (+10%/−5%)
Maximum Power Voltage (Vmpp)	17.4V
Maximum Power Current (Impp)	3.11A
Open Circuit Voltage (Voc)	21.7V
Short Circuit Current (Isc)	3.31A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of Voc	−8.21×10 <sup>-2</sup> V/°C
Temperature Coefficient of Isc	1.33×10 <sup>-3</sup> A/°C

\*STC : Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, AM1.5 spectrum, module temperature 25°C

Electrical Performance at 800W/m <sup>2</sup> , NOCT, AM1.5	
Maximum Power (Pmax)	38W
Maximum Power Voltage (Vmpp)	15.3V
Maximum Power Current (Impp)	2.49A
Open Circuit Voltage (Voc)	19.7V
Short Circuit Current (Isc)	2.67A

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) : 47°C

Cells	
Number per Module	36

Module Characteristics	
Length × Width × Depth	639mm(25.2in.)×652mm(25.7in.)×54mm(2.1in.)
Weight	5.0kg(11.0lbs.)

Junction Box Characteristics	
Length × Width × Depth	120mm(4.7in.)×180mm(7.1in.)×46mm(1.8in.)
IP Code	IP65

Reduction of Efficiency under Low Irradiance	
Reduction	6.2%

Reduction of efficiency from an irradiance of 1000W/m<sup>2</sup> to 200W/m<sup>2</sup> (module temperature 25°C)

Please contact our office for further information



## KYOCERA Corporation

## KYOCERA Corporation Headquarters

CORPORATE SOLAR ENERGY DIVISION  
6 Takeda Tobadono-cho  
Fushimi-ku, Kyoto  
612-8501, Japan  
TEL:(81)75-604-3476 FAX:(81)75-604-3475  
http://www.kyocera.com

## KYOCERA Solar, Inc.

7812 East Acoma Drive  
Scottsdale, AZ 85260, USA  
TEL:(1)480-948-8003 or (800)223-9580 FAX:(1)480-483-6431  
http://www.kyocerasolar.com

## KYOCERA Solar do Brasil Ltda.

Av. Guignard 661, Loja A  
22790-200, Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro, Brazil  
TEL:(55)21-2437-8525 FAX:(55)21-2437-2338  
http://www.kyocerasolar.com.br

## KYOCERA Solar Pty Ltd.

Level 3, 6-10 Talavera Road, North Ryde  
N.S.W. 2113, Australia  
TEL:(61)2-9870-3948 FAX:(61)2-9888-9588  
http://www.kyocerasolar.com.au/

## KYOCERA Fineceramics GmbH

Fritz-Mueller-Strasse 107, 73730 Esslingen, Germany  
TEL:(49)711-93934-999 FAX:(49)711-93934-950  
http://www.kyocerasolar.eu

## KYOCERA Asia Pacific Pte. Ltd.

298 Tiong Bahru Road, #13-03/05  
Central Plaza, Singapore 168730  
TEL:(65)6271-0500 FAX:(65)6271-0600

## KYOCERA Asia Pacific Ltd.

Room 801-802, Tower 1 South Seas Centre, 75 Mody Road,  
Tsimshatsui East, Kowloon, Hong Kong  
TEL:(852)2-7237183 FAX:(852)2-7244501

## KYOCERA Asia Pacific Ltd. Taipei Office

10 Fl., No.66, Nanking West Road, Taipei, Taiwan  
TEL:(886)2-2555-3609 FAX:(886)2-2559-4131

## KYOCERA(Tianjin) Sales &amp; Trading Corporation

19F, Tower C HeQiao Building 8A GuangHua Rd.,  
Chao Yang District, Beijing 100026, China  
TEL:(86)10-6583-2270 FAX:(86)10-6583-2250