

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**RICHARD GONÇALVES CORNELIUS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CARACTERIZADOR PARA  
ARRANJOS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO CONVERSORES  $\dot{C}$ UK  
EM PARALELO**

**ALEGRETE - RS  
FEVEREIRO DE 2021**

**RICHARD GONÇALVES CORNELIUS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CARACTERIZADOR PARA  
ARRANJOS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO CONVERSORES  $\text{ĆUK}$   
EM PARALELO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado a Universidade Federal do  
Pampa (Unipampa) como um dos pré-  
requisitos para a obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Sebastião  
da Silva

**ALEGRETE - RS  
FEVEREIRO DE 2021**



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

**RICHARD GONÇALVES CORNELIUS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CARACTERIZADOR PARA ARRANJOS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO CONVERSORES  $\text{ĆUK}$  EM PARALELO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 18 de março de 2021.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva

Orientador

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Jumar Luís Russi

UNIPAMPA

---

Me. Marnoon Poltozi Vargas

Microgrid Energia Solar



Assinado eletronicamente por **GUILHERME SEBASTIAO DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/03/2021, às 15:25, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARNOON POLTOZI VARGAS, Usuário Externo**, em 18/03/2021, às 15:26, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0485555** e o código CRC **1D1F7636**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete  
Av. Tiarajú, 810 – Bairro: Ibirapuitã – Alegrete – RS CEP: 97.546-550

Telefone: (55) 3422-8400

Criado por [nataliachagas](#), versão 2 por [nataliachagas](#) em 18/03/2021 12:09:54.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu pai e minha mãe, Rubisnei e Niviane, por me incentivarem a essa jornada de estudo e conhecimento, me apoiando em todos momentos da minha graduação.

Aos meus amigos e colegas Amanda, Ana e Leonardo, por compartilharem comigo 4 anos de convivência e experiências, o que tornava os momentos mais leves e menos difíceis de encarar.

Aos meus amigos João, Jair e Fabrício, que me proporcionaram momentos de descontração fora da universidade.

As minhas amigas Andressa, Bruna e Luana, que mesmo de longe, sempre me apoiaram e me motivaram a seguir sempre em frente.

Também agradeço a Unipampa, por dispor de um ambiente capacitado academicamente e que também propôs diversas amizades e conexões que me fez refletir novos conceitos pessoais.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva, por incentivar ao rumo da pesquisa acadêmica, que retornou muitas experiências positivas.

## RESUMO

Com o desenvolvimento tecnológico e a busca por lazer, instalações de sistemas fotovoltaicos (FV) estão com crescimento constante. E instalações FV estão expostas a vários problemas, como aquecimento, sombreamento, danos estruturais, falhas de diodos de bloqueio, entre outros. Desta forma, para verificar tais problemas, ou até mesmo para ações preventivas, pode-se utilizar um caracterizador FV, o qual é capaz de traçar a curva característica de corrente por tensão (I-V) de um módulo FV. Assim sendo, existem várias topologias de caracterizadores FV na literatura, os quais serão brevemente discutidos neste trabalho. Será destacado o caracterizador utilizando conversores estáticos da topologia Ćuk operando em paralelo, no qual tem-se um procedimento de projeto de seus elementos. A partir disso, são apresentados resultados de simulação do sistema, no qual é possível verificar funcionamento do caracterizador.

Palavras-chaves: energias renováveis, energia solar fotovoltaica, eletrônica de potência, conversores estáticos, caracterizador fotovoltaico.

## ABSTRACT

Due the technology development and the search by leisure, installations of photovoltaic systems are in constant increasing. However, photovoltaic installations are exposed to several problems, like heating, shading, structural damage, bypass diode fail, among other. This way, to verify the problems, or to realize prevent actions, it can utilize a photovoltaic characterizer, that is able of to trace a characteristic curve of current by voltage (I-V) of a photovoltaic module. Therefore, there are several characterizer topologies in the literature, that it will be briefly discussed in this work. And will be highlighted the characterizer that to utilize static converters of Ćuk topology operating in parallel, that there is a segment of project of your elements. From that, the simulation results are presented, where is possible to verify the operation of the characterizer.

Keywords: renewable energy, photovoltaic solar energy, power electronic, static converter, photovoltaic characterizer.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo equivalente de um diodo de uma célula solar FV.....	18
Figura 2 - Associação em série de módulos FV.....	19
Figura 3 - Associação em paralelo de módulos FV. ....	19
Figura 4 - Curvas características e um módulo FV sob diferentes níveis de irradiância. .....	21
Figura 5 - Curvas características de um módulo FV sob diferentes condições de temperatura.....	22
Figura 6 - Representação de um módulo FV com células completamente sombreadas. .....	23
Figura 7 - Representação de um módulo FV com células parcialmente sombreadas..	23
Figura 8 - Curvas I-V e P-V para sombreamento parcial de células de um módulo FV. .....	24
Figura 9 – Circuito caracterizador de resistência variável. ....	26
Figura 10 – Circuito caracterizador de carga eletrônica com transistor MOSFET. ...	27
Figura 11 – Circuito caracterizador de carga eletrônica com transistor TBJ.....	27
Figura 12 – Circuito caracterizador de carga capacitiva.....	28
Figura 13 - Circuito caracterizador com conversor CC-CC emulando uma resistência variável.....	29
Figura 14 – Zonas de operação dos conversores estáticos de acordo com o <i>Duty Cycle</i> . .....	31
Figura 15 – Conversor CC-CC <i>Buck-Boost</i> . ....	31
Figura 16 – Conversor CC-CC <i>Ćuk</i> .....	32
Figura 17 - Esquemático de caracterizador FV utilizando conversores estáticos intercalados.....	33
Figura 18 - Esquemático genérico gerador de sinais e <i>Gate Driver</i> .....	34
Figura 19 - Esquema conversor CC-CC com sensores de corrente e tensão.....	34

Figura 20 - Circuito <i>Gate Driver</i> .....	34
Figura 21 - Sensor de Tensão. ....	35
Figura 22 - Caracterizador baseado no conversor Ćuk.....	37
Figura 23 - Resultado da simulação do circuito Gate Driver.....	39
Figura 24 - Simulação do circuito medidor de tensão. ....	40
Figura 25 - Esquema de simulação conversores CC-CC.....	41
Figura 26 - Configuração interna do bloco do conversor Ćuk.....	42
Figura 27 - Tensão extraída do módulo FV.....	42
Figura 28 - Corrente extraída do módulo FV.....	43
Figura 29 - Pontos de tensão obtidos pela varredura do caracterizador. ....	44
Figura 30 - Pontos de corrente obtidos pela varredura do caracterizador.....	44
Figura 31 - Curva I-V resultante.....	45
Figura 32 - Simulação representando um sombreamento parcial.....	45
Figura 33 - Curva I-V resultante do sistema FV sombreado. ....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela I – Ganho estático dos conversores CC-CC no modo de condução contínua..	29
Tabela II – Zonas de operação dos conversores estáticos de acordo com o <i>Duty Cycle</i> . .....	30
Tabela III - Valores de entrada do gerador de sinais.....	39
Tabela IV - Parâmetros para o projeto do conversor.....	40
Tabela V - Elementos armazenadores de energia do conversor Ćuk.....	41
Tabela VI - Valores de tensão e corrente nos componentes do conversor Ćuk. ....	43

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a	Fator de idealidade da célula fotovoltaica
CC-CC	Conversor estático que converte uma entrada em corrente contínua para uma saída em corrente contínua
$D$	<i>Duty Cycle</i> (Razão cíclica)
$D_1$	Diodo
$f_s$	Frequência de chaveamento
FV	Fotovoltaico (mesmo que PV)
$G$	Ganho estático do conversor CC-CC.
I	Corrente
$I_0$	Corrente de saturação reversa
$I_{mp}$	Corrente de máxima potência
$I_{ph}$	Corrente fotogerada da célula fotovoltaica
$I_{pv}$	Corrente nos terminais de saída da célula fotovoltaica
$I_o$	Corrente de saída
$I_{sc}$	Corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico
k	Constante de <i>Boltzmann</i>
P	Potência
$P_{pv}$	Potência do módulo fotovoltaico
$P_o$	Potência de saída
R	Resistência
$R_o$	Resistência de carga
$R_{pv}$	Resistência de máxima potência do módulo fotovoltaico
$R_{série}$	Resistência série da célula fotovoltaica
$R_{shunt}$	Resistência <i>shunt</i> da célula fotovoltaica
STC	<i>Standard test conditions</i> (condições padrões de teste)
T	Temperatura
V	Tensão
$V_{mp}$	Tensão de máxima potência
$V_{pv}$	Tensão nos terminais de saída da célula fotovoltaica
$V_o$	Tensão de saída
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
1.1 Motivação.....	15
1.2 Objetivos .....	16
1.1.1 Objetivos Gerais.....	16
1.1.2 Objetivos Específicos .....	16
1.3 Organização do Trabalho .....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	17
2.1 Energia Solar Fotovoltaica .....	17
2.2 Modelo equivalente para células fotovoltaicas .....	17
2.2.1 Associações.....	18
2.2.2 Variação de parâmetros externos .....	19
2.3 Sistemas fotovoltaicos.....	24
2.4 Caracterizadores de módulos fotovoltaicos .....	25
2.4.1 Carga Resistiva Variável.....	25
2.4.2 Carga Eletrônica .....	26
2.4.3 Carga capacitiva.....	27
2.4.4 Conversor CC-CC como emuladores de resistência variável.....	28
2.5 Conversores CC-CC intercalados.....	32
3. METODOLOGIA .....	34
3.1 Projeto do Caracterizador Fotovoltaico.....	34
3.2 Gate Driver .....	34
3.3 Sensores de Corrente e Tensão .....	35

3.4	Projeto do Conversor Ćuk.....	35
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4.1	Simulação do Gate Driver .....	39
4.2	Simulação do Sensor de Tensão.....	39
4.3	Simulação do Conversor Ćuk.....	40
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
	REFERÊNCIAS .....	48

## 1. INTRODUÇÃO

Devido ao aumento da busca por sustentabilidade ambiental, observam-se estudos sobre energias renováveis e como aplicá-las, visando a redução do uso de combustíveis fósseis e a emissão de dióxido de carbono (EURELECTRIC, 2015). Além disso, o Brasil é um país com grande potencial renovável, tendo abundância em recursos hídricos, eólicos e solares, além da biomassa, entretanto, ainda necessita do melhor gerenciamento dessas fontes.

A energia solar fotovoltaica, tem sido amplamente abordada, por gerar energia de forma direta através da luz solar, de forma limpa e sem ruído, sendo aplicada tanto de forma centralizada em usinas fotovoltaicas, ou de maneira descentralizada, nos telhados de casas ou prédios, diretamente no ponto de consumo (PEREIRA et al., 2017a). No contexto descentralizado, a maior parte das instalações são feitas conectadas na rede elétrica, por ter menor custo em comparação com os sistemas off-grid, e também pelos incentivos governamentais através da Resolução Normativa 482/2012, que compensa a energia injetada na rede elétrica de distribuição através de créditos (PEREIRA et al., 2017a).

Tendo em vista a atratividade da instalação de sistemas FV, tem-se como consequência o aumento da implementação dos mesmos, assim, outro estudo se torna relevante, que seria o controle da operação desses sistemas durante sua vida útil, sendo realizada por manutenções preditivas, as quais podem ser realizadas por visitas periódicas e verificação manual dos cabos e estruturas, ou com uso de câmeras térmicas ou também através de dispositivos eletrônicos.

Além disso, sabe-se que o comportamento elétrico de um módulo FV é expresso por sua curva de corrente por tensão (I-V), e variações do ambiente ou variações estruturais no painel FV refletem em uma determinada resposta na sua curva característica (CARVALHO, 2014). Essa informação gráfica é disposta na

folha de especificações de cada módulo para condições de testes padrões e outras condições específicas, sendo necessário o uso de um dispositivo para obtê-la em condições reais, dispositivo que já existe comercialmente com um alto custo.

Na literatura, existem diversas topologias de caracterizadores FV, que se baseiam na ideia de variar uma carga nos terminais do módulo FV, afim de operar em diversos pontos do mesmo. Os principais métodos são de carga resistiva, carga eletrônica, carga capacitiva e de carga emulada por conversores estáticos (PEREIRA et al., 2017b). Nesse trabalho será abordado o uso do conversor Ćuk como caracterizador FV.

## 1.1 Motivação

A implantação de sistemas fotovoltaicos está em crescimento no mercado atual, e tendo em vista que os módulos FV ficam expostos às intempéries do ambiente, estando sujeitos a possíveis danos. E levando em consideração a vida útil de módulos FV ser em média de 25 anos, busca-se o seu aproveitamento máximo durante esse período.

Com isso, sistemas FV necessitam de verificação e manutenção, e ao focar nos painéis FV, destacam-se os caracterizadores, dispositivos que extraem as características elétricas do módulo, tendo como resultado a curva característica de corrente por tensão do gerador de energia solar.

O caracterizador FV é um dispositivo de alto custo no mercado, o qual geralmente é utilizado por empresas que trabalham com instalações de sistemas solares, desta forma, busca-se a construção de dispositivo de menor custo, com um nível alto de confiabilidade.

## 1.2 Objetivos

### 1.1.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral dessa pesquisa é o desenvolvimento de um dispositivo caracterizador para verificação e manutenção de sistemas fotovoltaicos, identificando eventuais problemas durante sua vida útil, para que a geração de energia do mesmo se mantenha operando nas melhores condições possíveis.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolvimento de um caracterizador fotovoltaico utilizando conversores CC-CC.
- Validar comportamento do caracterizador por meio de simulações e testes práticos.

## 1.3 Organização do Trabalho

O presente trabalho está dividido em 5 Capítulos, em que no Capítulo 1 se apresenta a introdução ao tema, os objetivos e a motivação do estudo.

Já no Capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica, contextualizando o assunto e abordando os principais conceitos para o seguimento do projeto.

No Capítulo 3 encontra-se a metodologia proposta, com os passos de projeto do conversor estático.

E no Capítulo 4 estão expostas as análises de resultados de simulação do sistema proposto.

Por fim, no Capítulo 5 destaca-se as considerações finais do trabalho realizado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Energia Solar Fotovoltaica

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel, que ao mergulhar duas placas de platina ou prata em um líquido eletrolítico, e expor o aparato à luz, notou uma diferença de potencial, porém, essa descoberta só obteve avanços quando Einstein efetivou a explicação sobre o efeito fotoelétrico (VALLÊRA, 2006).

A energia solar FV é a energia proveniente do sol que é transformada diretamente em energia elétrica, isso ocorre através de dispositivos semicondutores, geralmente silício cristalino, em que após sofrerem o tratamento de fabricação, recebem o nome de célula fotovoltaica (CEPEL et al., 2014).

Estudos para o melhor aproveitamento da energia solar FV são constantes, visto sua baixa eficiência em relação a outros tipos de conversões energéticas, entretanto, a mesma é capaz de tornar o sistema mais descentralizado. E para o estudo do comportamento elétrico de módulos FV, foram desenvolvidos modelos de circuitos equivalentes, que serão abordados a seguir.

### 2.2 Modelo equivalente para células fotovoltaicas

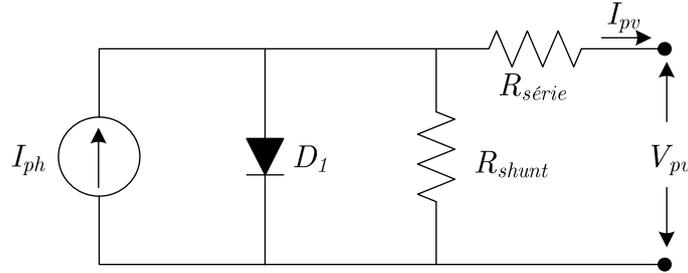
A célula FV é um elemento semicondutor feito geralmente de silício, o qual é capaz de converter a energia luminosa do sol em energia elétrica de forma direta, e a mesma pode ser descrita através de circuitos elétricos equivalentes, que podem ser utilizados para fazer análises computacionais do seu comportamento (CEPEL et al., 2014).

Existem três topologias mais abordadas para representação de uma célula fotovoltaica, a de um diodo, que leva em consideração o efeito de difusão ou efeito térmico, o modelo de dois diodos, que acrescenta o efeito de deriva, e o modelo de

três diodos que é mais complexo, englobando o efeito dos limites do material e da corrente de fuga através das junções (SARKAR, 2016).

Neste trabalho será apresentado somente a representação do circuito com um diodo, exposto na Figura 1.

Figura 1 - Modelo equivalente de um diodo de uma célula solar FV



Fonte: Autor.

O modelo é composto por uma fonte de corrente  $I_{ph}$  que representa a corrente fotogerada da célula FV, também contém um diodo  $D_1$  em antiparalelo, o qual equivale a junção  $pn$  (junção da camada  $p$  e da camada  $n$  do dispositivo semicondutor), além disso, contém uma resistência paralela  $R_{shunt}$  que corresponde a impurezas e defeitos da estrutura da célula, e uma resistência série  $R_{serie}$ , referida a resistência das junções metálicas e da própria célula (CARVALHO, 2014), já  $I_{pv}$  e  $V_{pv}$  são respectivamente a corrente e a tensão nos terminais do dispositivo.

Com isso, aplicando a Lei de *Kirchhoff* das Correntes no circuito da Figura 2, obtêm-se a equação transcendental que representa a célula FV, expressa pela Equação 2.1

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{q \cdot (V_{pv} + I_{pv} \cdot R_{serie})}{a \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_{serie}}{R_{shunt}} \quad (2.1)$$

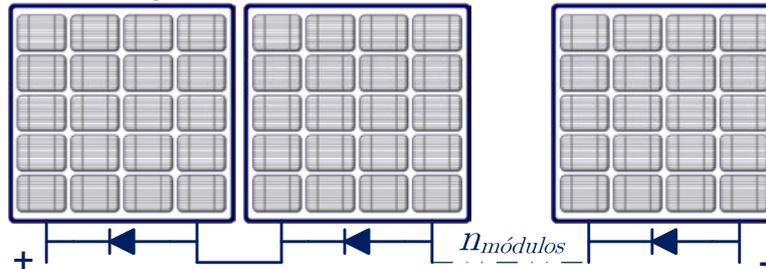
### 2.2.1 Associações

Existem dois tipos de conexões de células ou módulos FV, os quais servem para atingir os níveis de tensão e corrente desejados, sendo elas em série ou em paralelo.

- **Associação em Série**

Na associação série, exposto na Figura 2, o terminal negativo do módulo FV é conectado ao terminal positivo do próximo, sendo assim sucessivamente, desta forma, a corrente é igual em todos módulos. E a tensão resultante é a soma das tensões de cada dispositivo (CEPEL et al., 2014).

Figura 2 - Associação em série de módulos FV.

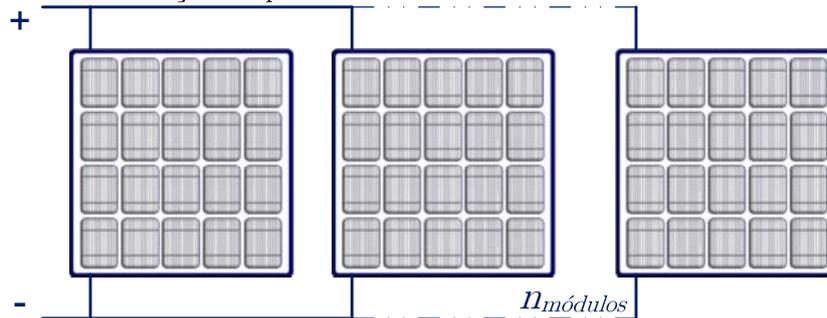


Fonte: Autor.

- **Associação em paralelo**

Na associação paralela, demonstrado na Figura 3, tem-se os terminais positivos e negativos de cada módulo FV interligados entre si. Mantendo assim o nível de tensão igual em todo o conjunto, e somando-se a corrente de cada módulo FV (CEPEL et al., 2014).

Figura 3 - Associação em paralelo de módulos FV.



Fonte: Autor.

### 2.2.2 Variação de parâmetros externos

Módulos FV, quando expostos a situações diversas das condições padrões de teste, que são de irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , sofrem

modificações em seu comportamento elétrico, podendo afetar na sua eficiência de geração, dentre essas condições pode-se citar as variações de irradiância e temperatura, módulos em série com inclinações diferentes, e também sombreamentos ou danos estruturais.

- **Variação da irradiância**

A corrente elétrica da célula FV segue uma relação direta com a irradiância solar incidente em seu plano, descrita pela Equação 2.2, o que afeta a potência gerada, tornando-se um parâmetro relevante, tendo em vista que a irradiância local varia com o perfil geográfico de cada região, necessitando atenção em projetos de sistemas FV (CEPEL et al., 2014).

$$I_{sc}^j = I_{sc_{STC}} \cdot \frac{I_{rr}}{1000} \quad (2.2)$$

Onde:

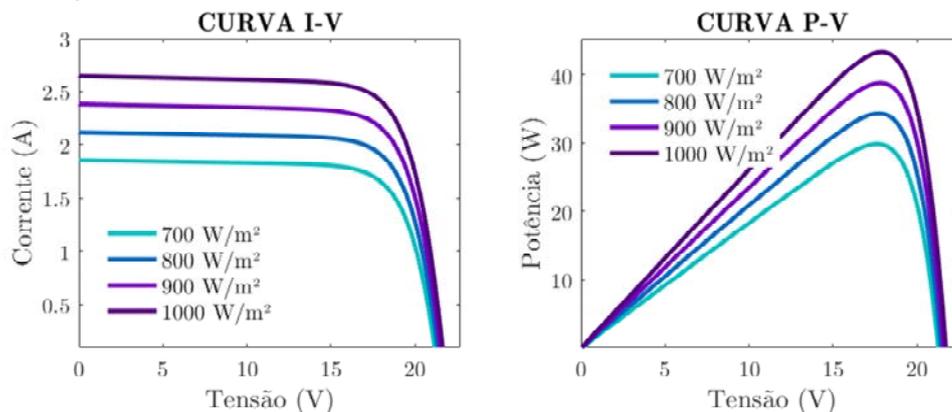
$I_{sc}^j$  – corrente de curto-circuito para uma irradiância  $I_{rr}$ , a uma temperatura de 25°C;

$I_{sc_{STC}}$  – corrente de curto-circuito para condições padrões de teste;

$I_{rr}$  – irradiância incidente sobre o módulo.

Na Figura 4 observa-se o comportamento elétrico de um módulo FV sob diferentes níveis de irradiância, afetando a Curva I-V e a Curva P-V (potência por tensão).

Figura 4 - Curvas características e um módulo FV sob diferentes níveis de irradiância.



Fonte: Autor.

### ▪ Variação da temperatura

A temperatura da célula FV é outro parâmetro de grande importância, pois reduz significativamente a tensão do conjunto, sendo representada pela Equação 2.3, e dependendo dos níveis de aquecimento, pode fadigar o dispositivo, reduzindo sua vida útil. A Figura 5 apresenta a alteração ocorrida nas curvas características sobre diferentes condições de temperatura.

$$V_{oc}^j = V_{oc_{STC}} + T_{coef_V} \cdot (T - T_{STC}) \quad (2.3)$$

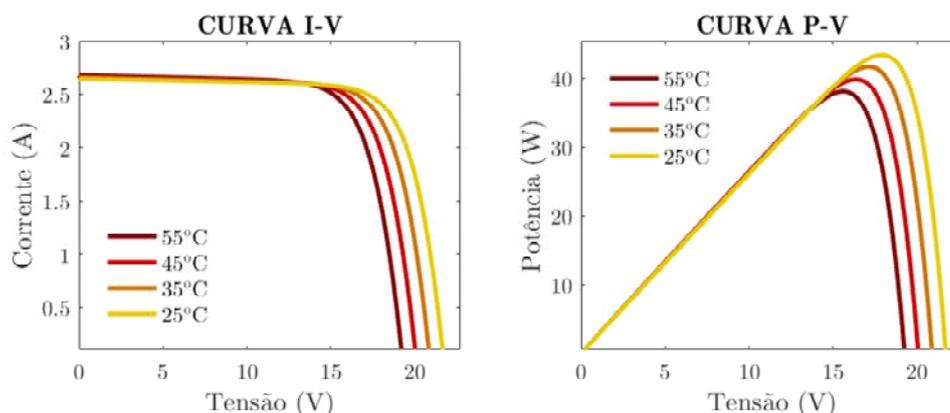
Onde:

$V_{oc}^j$  – tensão de circuito aberto para uma temperatura  $T$ , a uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>;

$V_{oc_{STC}}$  – tensão de circuito aberto para condições padrões de teste;

$T$  – temperatura do módulo ou célula FV.

Figura 5 - Curvas características de um módulo FV sob diferentes condições de temperatura.



Fonte: Autor.

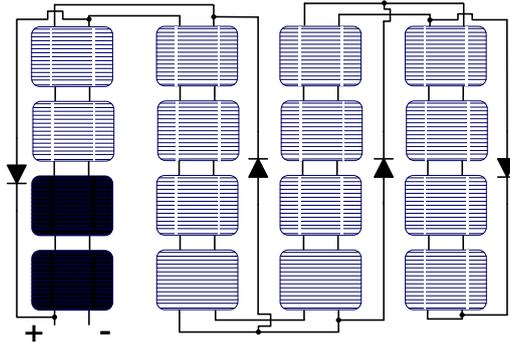
### ▪ Sombreamentos

Módulos FV podem estar expostos a sombreamentos após instalados, devido a depósito de sujeira, ou até mesmo devido a planejamento indevido para sua instalação, e também crescimento de vegetação ao seu redor durante o decorrer de sua vida útil. Com isso, destaca-se dois tipos de sombreamentos, o parcial e o total (MENDONÇA, 2017).

Sombreamento total é quando uma célula ou um conjunto de células é totalmente sombreado, isso faz com que essa célula comece a consumir potência, comportando-se como uma carga e produzindo *hotspots* (pontos quentes) no módulo FV, efeito que é prejudicial por danificar o dispositivo.

Entretanto, considerando as novas tecnologias de painéis FV, com representação genérica na Figura 6, que incluem diodos de *bypass* para proteção, em caso de sombreamento total de uma célula do módulo FV, o diodo de *bypass* será polarizado diretamente, criando um caminho alternativo para a corrente, tendo como consequência somente a redução da tensão do conjunto (PEDRO, 2016).

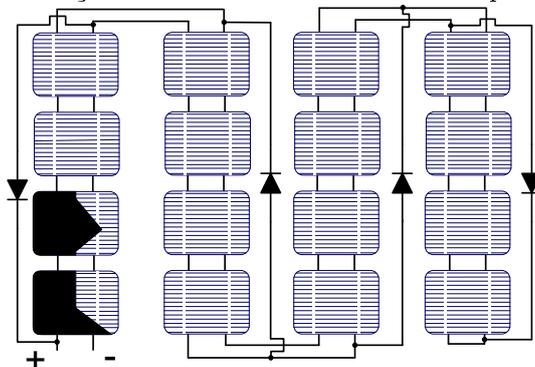
Figura 6 - Representação de um módulo FV com células completamente sombreadas.



Fonte: Autor.

E sombreamento parcial é quando as células estão parcialmente sombreadas, representado na Figura 7, neste caso, a corrente do módulo é limitada pela corrente da célula sombreada, criando pontos de inflexão, os quais resultam em diferentes pontos de máxima potência locais que acometem a geração. Além disso, células danificadas apresentam comportamento idêntico ao de células parcialmente sombreadas, contudo, a magnitude do *hotspot* tende a ser maior (COUTINHO, 2016).

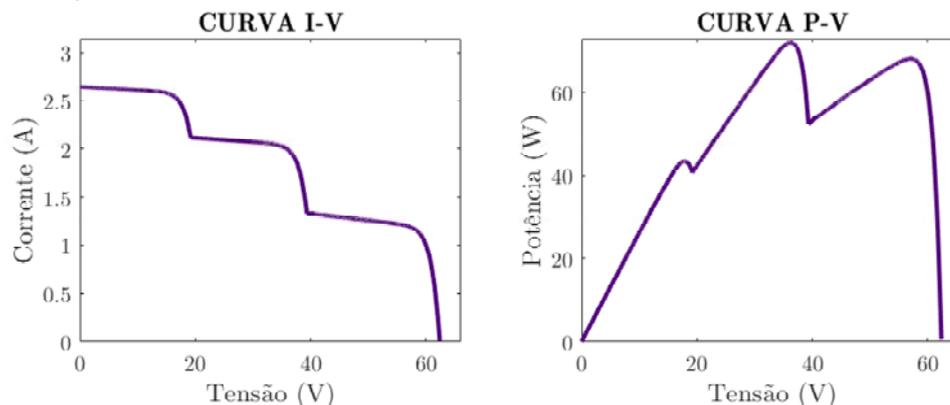
Figura 7 - Representação de um módulo FV com células parcialmente sombreadas.



Fonte: Autor.

Na Figura 8 tem-se o comportamento das curvas características I-V e P-V para um caso genérico de sombreamento parcial.

Figura 8 - Curvas I-V e P-V para sombreamento parcial de células de um módulo FV.



Fonte: Autor.

### 2.3 Sistemas fotovoltaicos

Sistemas FV podem ser expressos basicamente da conexão entre os módulos FV, o inversor e a carga, em que se subdividem principalmente em sistemas autônomos e sistemas conectados à rede elétrica no contexto residencial.

Sistemas autônomos são aqueles que independem de outra fonte de energia elétrica, adequados para locais isolados, de maneira geral composto pelos módulos FV, um controlador de carga, banco de baterias e o inversor. E devido a presença do banco de baterias, o custo do sistema se torna elevado, além disso, caso tenham muitos dias chuvosos seguidos, poderia resultar em falta de energia elétrica. Entretanto, há evoluções nas tecnologias de baterias, o que podem trazer maior atratividade para o sistema, e é uma opção interessante para quem deseja continuidade de energia além de economia (FUSANO, 2013).

Já sistemas conectados à rede elétrica dispensam o uso de baterias e utilizam um meio de armazenamento de energia mais limpo, sendo a própria rede elétrica, e desta forma, a confiabilidade do sistema depende da própria rede, visto que se o sistema de distribuição interromper, o sistema FV também deverá parar seu funcionamento. Esse é o meio mais utilizado atualmente pelo custo atrativo em relação aos outros, e é constituído dos módulos FV, inversor,, proteções, quadro de distribuição e a rede de distribuição (ROMÁN et al., 2006).

## 2.4 Caracterizadores de módulos fotovoltaicos

Caracterizadores fotovoltaicos são dispositivos que extraem o comportamento elétrico de módulos FV, afim de verificar seu funcionamento, e essa análise é feita através da curva I-V do painel solar.

Deste modo, pode-se traçar a curva característica de um módulo FV ao aplicar uma carga que varie de zero até infinito em seus terminais, e idealmente, utilizando um potenciômetro com essas características, obter-se-ia uma curva I-V perfeita, sendo essa a base de funcionamento de um caracterizador.

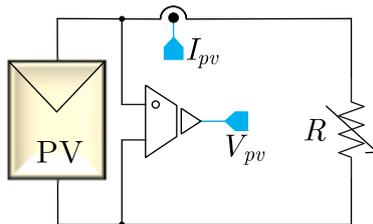
### 2.4.1 Carga Resistiva Variável

O método da carga resistiva baseia-se no exposto acima, que através de um potenciômetro, varia-se gradualmente a resistência de um valor muito alto,  $R \approx \infty$ , partindo da condição de circuito aberto  $V_{OC}$ , até um valor muito pequeno,  $R \approx 0$ , próximo ao ponto de curto-circuito  $I_{SC}$  (CAMPOS et al., 2018), na Figura 9 apresenta-se o circuito simplificado da metodologia descrita.

Em (VAN DYK; GXASHEKA; MEYER, 2005) é proposto um sistema que engloba um conjunto de resistores conectados em paralelo acionados por chaves eletrônicas. Os resistores são chaveados em várias combinações de modo a varrer toda a curva I-V.

Em suma, um dispositivo com carga resistiva apresenta baixo custo e baixa complexidade, entretanto a confiabilidade é baixa devido a variação da resistência ser manual, e no caso dos resistores acionados por chaves eletrônicas, a qualidade do resultado dependerá do número de combinações de resistências que resultará na quantidade de pontos da curva I-V.

Figura 9 – Circuito caracterizador de resistência variável.



Fonte: Autor.

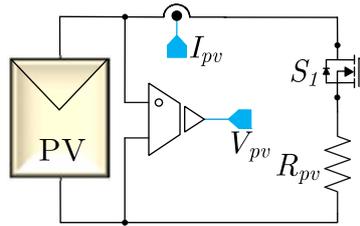
### 2.4.2 Carga Eletrônica

A topologia de carga eletrônica, baseia-se na emulação de uma resistência variável, o dispositivo é composto de componentes como transistores, geralmente MOSFETS, em que a resistência entre o dreno e o *source* é modulada para variar a corrente do módulo FV de zero até a condição de curto-circuito (DURAN et al., 2008), o seu esquemático está representado na Figura 10. Outra topologia similar utiliza amplificadores e transistores bipolares (PEREIRA et al., 2017b), e esta é composta por três estágios, de geração de sinal, estágio de amplificação e o estágio de potência, o qual tem seu esquemático na Figura 11.

No estágio de geração de sinal, um sinal em formato de rampa é aplicado, para assim variar os pontos de operação do transistor, o segundo estágio amplifica e inverte o sinal e o impõem na base do transistor. Com a variação gradual da tensão na base do dispositivo semiconductor, a corrente entre o coletor e o emissor varia proporcionalmente (CARVALHO, 2014). Em (SANTOS; PETRY; LIMA, 2010) e (CORNELIUS et al., 2018) são apresentados projetos desses dispositivos eletrônicos, os quais passaram por testes experimentais.

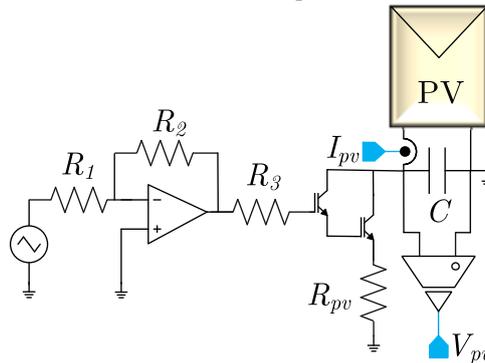
Este dispositivo apresenta considerável flexibilidade e média complexidade, além de não ter elementos de alto custo, ele é indicado para caracterizações de baixa potência.

Figura 10 – Circuito caracterizador de carga eletrônica com transistor MOSFET.



Fonte: Autor.

Figura 11 – Circuito caracterizador de carga eletrônica com transistor TBJ.



Fonte: Autor.

### 2.4.3 Carga capacitiva

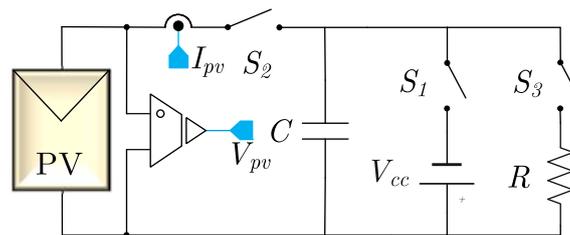
No método capacitivo, o capacitor é conectado nos terminais do módulo FV, e então é carregado gradualmente, aumentando sua tensão e então diminuindo a corrente do circuito, deste modo, com o armazenamento das grandezas de corrente e tensão durante o processo de carga ou descarga, é possível traçar a curva característica deste módulo (PEREIRA et al., 2017b).

No funcionamento básico do sistema, o capacitor é carregado com tensão negativa, logo após, é chaveado em paralelo com o módulo FV, nos instantes iniciais, os pontos cruzam o eixo da corrente, adquirindo o ponto  $(0, I_{SC})$ . No seguimento, o capacitor é alimentado pelo módulo e quando estiver totalmente carregado, a corrente do circuito será zero, desta maneira alcançando a condição de circuito aberto e o ponto  $(V_{OC}, 0)$  (DURAN et al., 2008), a Figura 12 representa o circuito equivalente do sistema.

Ademais, um ponto importante é que a precisão da caracterização depende do tempo de carga ou descarga do capacitor, por isso, o correto dimensionamento do mesmo indicará a confiabilidade da curva I-V resultante, em (DA SILVEIRA BRITO, 2014) é disposto uma metodologia de projeto do capacitor para o caracterizador FV. Além disso, sendo que o processo de caracterização necessita carga e descarga total do elemento armazenador de energia cada vez que utilizado, tal fato torna relevante o estudo de vida útil do dispositivo.

Logo, esta topologia apresenta complexidade moderada, e é aplicável para sistemas de alta potência, porém, quanto maior o sistema ao qual for destinado, maior será seu custo devido a capacidade dos capacitores a serem utilizados.

Figura 12 – Circuito caracterizador de carga capacitiva.



Fonte: Autor

#### 2.4.4 Conversor CC-CC como emuladores de resistência variável

Conversores CC-CC são amplamente usados em sistemas fotovoltaicos, geralmente para obtenção do ponto de máxima potência, em que através da variação do *Duty Cycle* ( $D$ ) do conversor, é possível variar o ponto de operação do painel FV. Esses circuitos eletrônicos tem alta eficiência, conseguindo transferir grande parte da potência de entrada para a saída (DURÁN et al., 2008).

Há várias topologias de conversores estáticos na literatura, entre elas, *Buck*, *Boost*, *Buck-Boost*, *Zeta*, *SEPIC* e *Ćuk*, esses dispositivos são compostos por interruptores ativos e passivos, capacitores e indutores, o que possibilita o controle do fluxo de energia entre seus terminais (PEREIRA et al., 2017b).

Em geral, conversores CC-CC podem ser compreendidos como uma resistência variável, que dependem da resistência de carga conectada em sua saída e do *Duty Cycle*, que varia de 0 a 1. Além disso, a relação entre a saída e entrada do conversor é definida pelo ganho estático de cada um, neste caso será considerado o ganho estático no modo de condução contínua, os quais então dispostos na Tabela I.

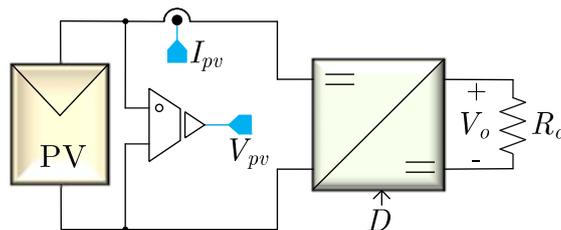
Tabela I – Ganho estático dos conversores CC-CC no modo de condução contínua.

Conversor CC-CC	Ganho estático
<i>Buck</i>	$D$
<i>Boost</i>	$\frac{1}{1-D}$
<i>Buck-Boost</i> , <i>Ćuk</i> , <i>SEPIC</i> e <i>Zeta</i>	$\frac{D}{1-D}$

Fonte: Adaptado de PEREIRA et al.,(2017).

Assim sendo, pode-se utilizar esse dispositivo como um emulador de resistência variável através da alteração do *Duty Cycle*, a Figura 13 apresenta o traçador FV com uso de um conversor estático.

Figura 13 - Circuito caracterizador com conversor CC-CC emulando uma resistência variável.



Fonte: Autor.

Levando em consideração o exposto acima, e que o ponto de operação do painel FV é relacionado diretamente com a resistência de carga ( $R_{pv}$ ) conectada em seus terminais. Então, pode-se estabelecer uma relação entre o ganho estático ( $G$ ) do conversor e a resistência ( $R_o$ ) no seu terminal de saída. Com isso, sabendo que a potência de entrada do conversor é igual a potência de saída ( $P_o$ ), ignorando

perdas, e que a potência de entrada do mesmo será a potência do módulo FV ( $P_{pv}$ ), chega-se nas Equações 2.4 e 2.5.

$$P_{pv} = P_o \quad (2.4)$$

$$V_{pv} \cdot I_{pv} = V_o \cdot I_o \quad (2.5)$$

Então, rearranjando os termos da Equação 2.5, obtém-se relações entre as tensões e correntes de entrada e saída, nas Equações 2.6 e 2.7, que representam o ganho do conversor.

$$G = \frac{V_o}{V_{pv}} \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{G} = \frac{I_o}{I_{pv}} \quad (2.7)$$

Logo, rearranja-se as equações 2.6 e 2.7 deixando a tensão e a corrente de saída em evidência, e substituindo na Equação 2.8, a qual descreve a tensão de saída do sistema, e pode-se chegar na relação da resistência de carga ( $R_{pv}$ ) do módulo FV, descrito na Equação 2.9.

$$V_o = R_o \cdot I_o \quad (2.8)$$

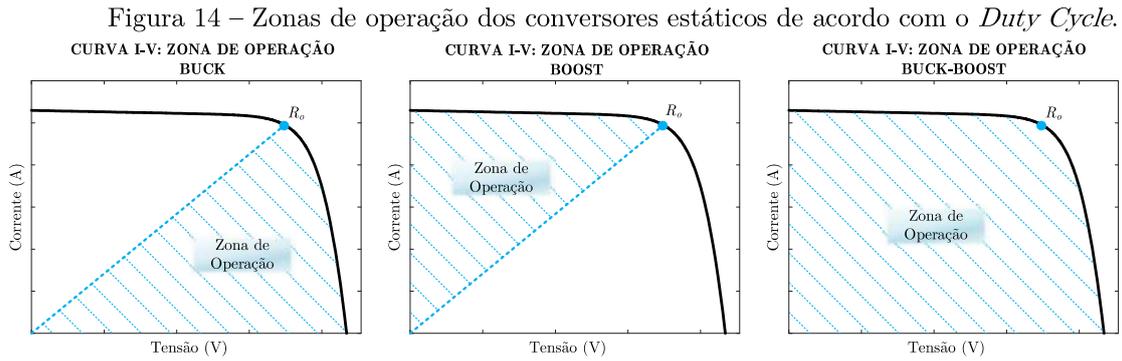
$$R_{pv} = \frac{V_{pv}}{I_{pv}} = \frac{R_o}{G^2} \quad (2.9)$$

Dessa forma, se estabelece as zonas de operação dos conversores com relação ao seu ganho estático e a resistência ( $R_o$ ), estando expresso na Tabela II e graficamente exposto na Figura 14.

Tabela II – Zonas de operação dos conversores estáticos de acordo com o *Duty Cycle*.

Conversor CC-CC	$R_{pv}$	$R_{pv} (D=0)$	$R_{pv} (D=1)$
<i>Buck</i>	$\frac{R_o}{D^2}$	$\infty$	$R_o$
<i>Boost</i>	$R_o \cdot (1-D)^2$	$R_o$	0
<i>Buck-Boost, Ćuk, SEPIC e Zeta</i>	$R_o \cdot \left(\frac{1-D}{D}\right)^2$	$\infty$	0

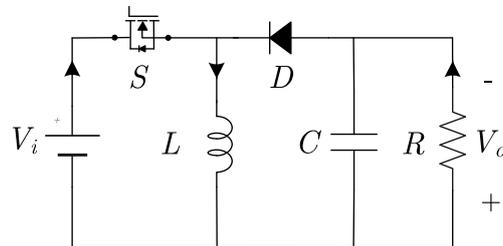
Fonte: Adaptado de PEREIRA et al.,(2017).



Fonte: Autor.

Em suma, observa-se que os conversores *Buck* e *Boost* apresentam limitações para traçar toda a curva característica FV, sendo necessário o uso das topologias abaixadoras-elevadoras de tensão, um dos dispositivos mais tradicionais utilizados é o *Buck-Boost*, representado na Figura 15, o mesmo tem uma chave ativa em série com a fonte de entrada, o que resulta em uma entrada de corrente pulsante e consideráveis ondulações de corrente.

Figura 15 – Conversor CC-CC *Buck-Boost*.



Fonte: Autor.

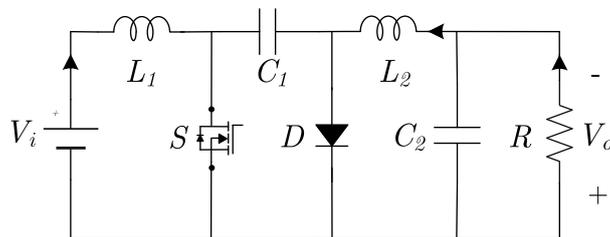
Uma topologia para solucionar tais situações é o conversor *Ćuk*, apresentado na Figura 16, o qual apresenta um indutor de entrada e um de saída, tornando a corrente de entrada e saída contínuas, reduzindo a ondulação da mesma em comparação com o conversor *Buck-Boost*, além de o *source* do transistor ser aterrado, facilitando o acionamento (POMILIO, 2016).

E também, esse conversor tem pequena corrente de partida devido à posição do capacitor de acoplamento, e segundo (WEINERT, 2017) a topologia

do conversor Ćuk o torna auto grampeado, o que reduz os altos picos de tensão na comutação do transistor.

Contudo, essa topologia necessita de um maior número de componentes, e dois indutores, os quais aumentam o volume do dispositivo, mesmo os dois podendo ser acoplados no mesmo núcleo. Além disso, a tensão que as chaves devem suportar é a soma das tensões de entrada e saída, igualmente ao do conversor *Buck-Boost*.

Figura 16 – Conversor CC-CC Ćuk.



Fonte: Autor.

Desta forma, caracterizadores FV utilizando conversores estáticos apresentam alta confiabilidade, níveis médios de complexidade e custo, além disso, apresentam alta flexibilidade e são indicados para sistemas de baixa potência, entretanto em (DURÁN et al., 2008) propõem-se uma estratégia de conversores intercalados para traçar a curva I-V de arranjos fotovoltaicos, em que os mesmos operam com defasagem entre si para eliminar o *ripple* de corrente.

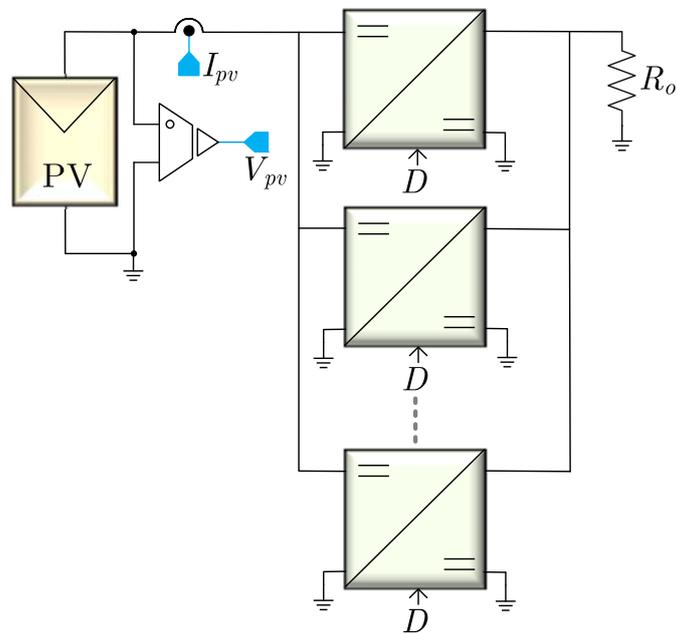
## 2.5 Conversores CC-CC intercalados

Em (DURÁN et al., 2008) é aplicada uma metodologia de implementação de caracterizadores FV, em que se utilizou conversores operando em paralelo, com uma defasagem entre os dispositivos para eliminar a ondulação em cima do indutor de entrada. Ademais, o método aumenta a capacidade de potência do sistema, sendo possível caracterizar também arranjos de módulos FV.

Nesse trabalho, será adotada sua técnica de conversores intercalados, inicialmente sem a defasagem entre o controle do *Duty-Cycle*, tendo em vista a

complexidade do sistema. Na Figura 17 está o esquemático que será adotado para o caracterizador, utilizando o conversor Ćuk.

Figura 17 - Esquemático de caracterizador FV utilizando conversores estáticos intercalados.



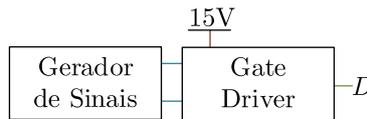
Fonte: Autor.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Projeto do Caracterizador Fotovoltaico

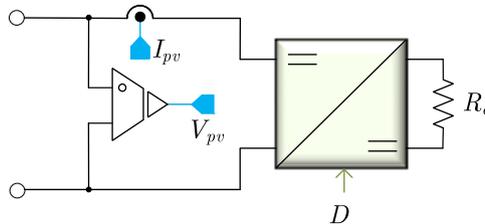
O caracterizador FV pode ser dividido inicialmente em três partes principais, sendo elas, o *Gate Driver*, o conversor estático e os sensores de corrente e tensão, de acordo com os esquemáticos da Figura 18 e Figura 19.

Figura 18 - Esquemático genérico gerador de sinais e *Gate Driver*.



Fonte: Autor.

Figura 19 - Esquema conversor CC-CC com sensores de corrente e tensão.

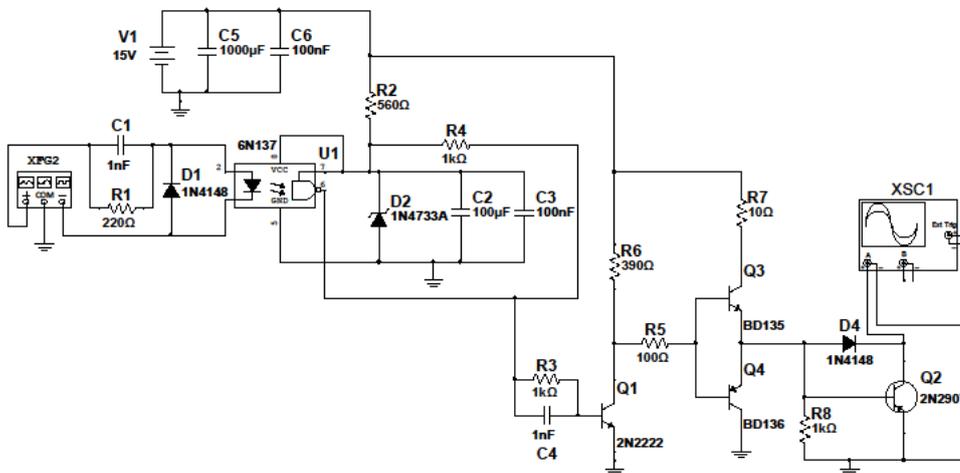


Fonte: Autor.

#### 3.2 Gate Driver

Para a proteção do módulo de geração de sinais e do circuito de potência é necessário a utilização de um circuito intermediário para proteção. Escolheu-se um circuito optoacoplado para o *Gate Driver*, sendo representado na Figura 20.

Figura 20 - Circuito *Gate Driver*.



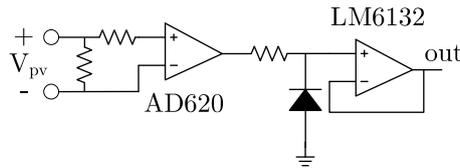
Fonte: Autor, *software* Multisim.

### 3.3 Sensores de Corrente e Tensão

Para extrair os pontos de corrente do módulo FV a ser caracterizado será utilizado o sensor de corrente ACS712, com capacidade de 30A.

Para obter os pontos de tensão será utilizado o circuito da Figura 21, com os CIs AD620 e LM6132, definiu-se uma relação de saída do LM6132 de 1V.

Figura 21 - Sensor de Tensão.



Fonte: Autor.

Além disso, devido à alta frequência de operação do dispositivo, é indicado o uso de um filtro passa-baixa, para bloquear sinais de alta frequência que podem surgir como ruídos na obtenção de pontos.

Portanto, será utilizado um filtro passa-baixa do tipo RC, e sua frequência de corte ( $f_c$ ) é dada pela Equação 3.1.

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_f \cdot C_f} \quad (3.1)$$

### 3.4 Projeto do Conversor Ćuk

Para a construção do caracterizador, deve-se projetar os elementos passivos e ativos do conversor CC-CC, o qual será o conversor Ćuk. E como o dispositivo tem objetivo de obter pontos de corrente e tensão de um módulo ou de um conjunto dos mesmos, opta-se por escolher os parâmetros de entrada como os de um painel FV.

Sendo assim, inicia-se com a manipulação da Equação 2.9 discutida no Capítulo 2, e define-se o valor do ganho estático ( $G$ ) do caracterizador em função

da corrente ( $I_{mp}$ ) e tensão ( $V_{mp}$ ) de máxima potência do módulo FV e da resistência de carga ( $R_o$ ), exposto na Equação 3.2 (PEREIRA et al., 2017b).

$$G = \sqrt{\frac{I_{mp}}{V_{mp}} \cdot R_o} \quad (3.2)$$

Com o valor do ganho, define-se o *Duty Cycle* médio de operação através da Equação 3.3 (WEINERT, 2017), para que se possa estimar a tensão ( $V_o$ ) e a corrente ( $I_o$ ) de saída do conversor por meio das Equações 3.4 e 3.5, onde dependem da corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) e da tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ).

$$D = \frac{G}{1 + G} \quad (3.3)$$

$$V_o = \frac{D}{1 - D} \cdot V_{oc} \quad (3.4)$$

$$I_o = \frac{1 - D}{D} \cdot I_{sc} \quad (3.5)$$

Além disso, pode-se calcular a tensão que o capacitor intermediário deve suportar, que é a soma das tensões de entrada e saída, expresso pela Equação 3.6 (WEINERT, 2017).

$$V_{\text{int}} = V_{mp} + V_o \quad (3.6)$$

Desta forma, com parâmetros iniciais calculados, define-se as oscilações máximas permitidas de corrente e tensão para a sequência dos cálculos, as quais variam de acordo com cada projeto, e interferem diretamente na dimensão dos elementos armazenadores de energia. No caso do caracterizador FV, os parâmetros de interesse são a corrente e a tensão de entrada, sem necessitar de grande cautela com a saída.

Assim sendo, calcula-se a capacitância ( $C_i$ ) de entrada, a qual acopla o painel FV com o conversor, através da Equação 3.7, onde  $f_s$  é a frequência de chaveamento e  $\Delta V_{mp}$  é a ondulação da tensão de entrada (PEREIRA et al., 2017b).

$$C_i = \frac{4 \cdot \Delta I_{mp}}{\pi^3 \cdot f_s \cdot \Delta V_{mp}} \quad (3.7)$$

Logo após, por meio da Equação 3.8 define-se a indutância de entrada ( $L_i$ ), que no projeto do caracterizador deverá ter um valor maior do que a de saída, devido o requerimento de baixa ondulação na entrada, definida por ( $\Delta I_{mp}$ ).

$$L_i = \frac{V_{mp}}{f_s \cdot \Delta I_{mp}} \cdot D \quad (3.8)$$

Em seguida, a partir da Equação 3.9 (WEINERT, 2017), obtém-se o valor da capacitância intermediária, a qual faz o acoplamento da entrada e da saída do conversor, onde  $\Delta V_{int}$  é a ondulação de tensão em cima do capacitor  $C_{int}$ .

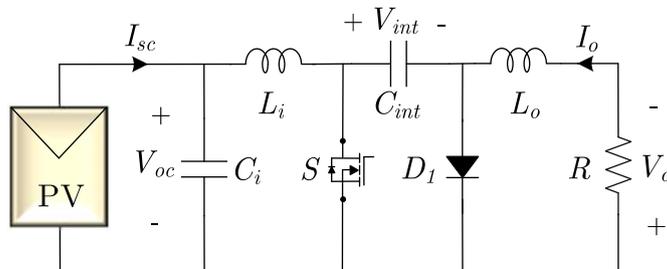
$$C_{int} = \frac{I_{mp}}{f_s \cdot \Delta V_{int}} \cdot (1 - D) \quad (3.9)$$

E por fim, mediante a Equação 3.10 se estabelece a indutância de saída ( $L_o$ ) do conversor (WEINERT, 2017). É importante ressaltar que no caso em estudo não se faz necessário a capacitância de saída, devido a não ser exigido um controle de tensão sobre a carga ( $R_o$ ).

$$L_o = \frac{V_{mp}}{f_s \cdot \Delta I_o} \cdot D \quad (3.10)$$

Assim sendo, com as equações acima, define-se os parâmetros do conversor Ćuk, representado na Figura 22.

Figura 22 - Caracterizador baseado no conversor Ćuk.



Fonte: Autor.

Além disso, para ser feito o dimensionamento físico dos componentes, é preciso saber as tensões e correntes que eles devem suportar.

Para o indutor de entrada  $L_i$ , a tensão máxima depende do valor da razão cíclica e é definida pela Equação 3.11 e a corrente média sobre ele é a corrente ( $I_{mp}$ ) de entrada é dada pela Equação 3.12, e a ondulação é calculada a partir da Equação 3.13.

$$\begin{aligned} V_{L_i_{máx}} &= V_{mp} \rightarrow D < 0,5 \\ V_{L_i_{máx}} &= -V_o \rightarrow D > 0,5 \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$I_{L_i_{med}} = I_{mp} \quad (3.12)$$

$$\Delta I_{L_i} = \frac{V_{mp} \cdot D}{L_i \cdot f_s} \quad (3.13)$$

E para o indutor  $L_o$ , a tensão máxima sobre ele segue a mesma lógica do indutor  $L_i$ , regido pela Equação 3.14 e a corrente média é adquirida através da Equação 3.15. E a ondulação da corrente no indutor é obtida pela Equação 3.16.

$$V_{L_o_{máx}} = V_{L_i_{máx}} \quad (3.14)$$

$$I_{L_o_{med}} = \frac{V_o}{R_o} \quad (3.15)$$

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_{mp} \cdot D}{L_o \cdot f_s} \quad (3.16)$$

A chave  $S$  deve suportar a soma das tensões de entrada e saída, dada pela equação 3.17, como também a soma das correntes de entrada e saída, calculada pela Equação 3.18, e sua corrente média é calculada pela Equação 3.19.

$$V_{S_{máx}} = V_{int} \quad (3.17)$$

$$I_{S_{máx}} = \left( I_{L_i_{med}} + \frac{\Delta I_{L_i}}{2} \right) + \left( I_{L_o_{med}} + \frac{\Delta I_{L_o}}{2} \right) \quad (3.18)$$

$$I_{S_{med}} = I_{S_{máx}} \cdot D \quad (3.19)$$

E no diodo  $D$ , a tensão e a corrente máxima são as mesmas que a chave  $S$  deve suportar, entretanto, sua corrente média é dada pela Equação 3.20.

$$I_{D_{med}} = I_{D_{máx}} \cdot (1 - D) \quad (3.20)$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Simulação do Gate Driver

Para a verificação do circuito *Gate Driver* utilizou-se o *software* Multisim para simular o esquemático da Figura 20. E os valores de entrada do gerador de sinais são os expostos na Tabela III.

Tabela III - Valores de entrada do gerador de sinais.

DESCRIÇÃO	VALOR
Frequência	30 kHz
Razão Cíclica	0.54
Amplitude	10 V <sub>p</sub>
Offset	0 V

A simulação obteve como resultado a onda da Figura 23.

Figura 23 - Resultado da simulação do circuito Gate Driver.

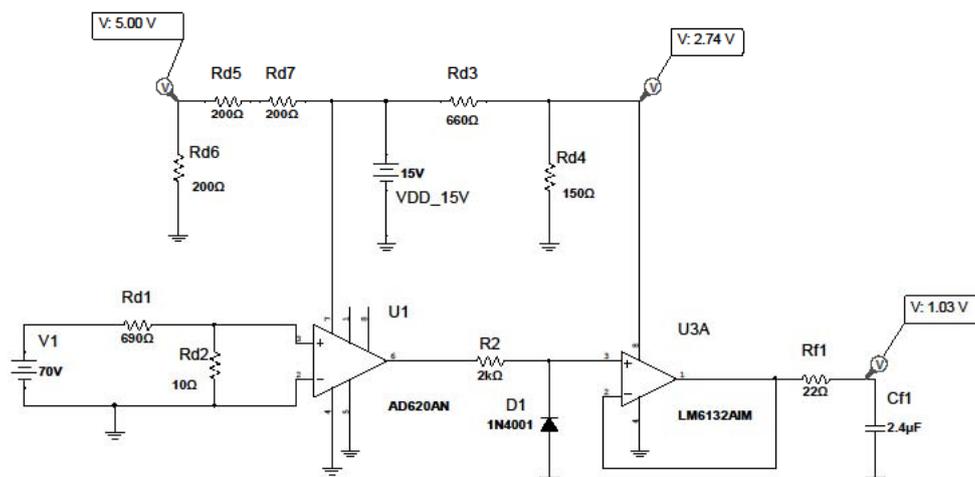


Fonte: Autor.

### 4.2 Simulação do Sensor de Tensão

A simulação do sensor de tensão também se realizou no *software* Multisim, através do esquemático da Figura 24.

Figura 24 - Simulação do circuito medidor de tensão.



Fonte: Autor.

Prevendo uma entrada máxima de 70V no sensor de tensão, se fez necessário um divisor de tensão, no qual foi definido com uma saída de 1V, além disso, utilizou-se divisores de tensão para a alimentação do LM6132 que é de 2,8V, e para alimentação do ACS712 com tensão de 5V.

### 4.3 Simulação do Conversor Čuk

Para a simulação do conversor estático utilizou-se o software Simulink MATLAB. Os parâmetros utilizados estão dispostos na Tabela IV, os quais foram estabelecidos de forma específica para o módulo da *Kyocera Solar KC200GT*.

Além disso, utilizou-se dois conversores em paralelo para dividir a corrente que deve ser suportada pelas chaves ativas e passivas.

Tabela IV - Parâmetros para o projeto do conversor.

DESCRIÇÃO	VALOR
Potência	$P = 200 \text{ W}$
Tensão de entrada	$V_{oc} = 32,9 \text{ V}$
Corrente de entrada	$I_{sc} = 8,21 \text{ A}$
Tensão de máxima potência	$V_{mp} = 23,6 \text{ V}$
Corrente de máxima potência	$I_{mp} = 7,61 \text{ A}$
Resistência de carga	$R_o = 5 \text{ ohms}$
Frequência	$f_s = 30 \text{ kHz}$
Ondulação na corrente de entrada	$\Delta I_{mp} = 15\% I_{mp}$
Ondulação na tensão de entrada	$\Delta V_{mp} = 0,1\% V_{mp}$

Ondulação na corrente de saída	$\Delta I_o = 15\%I_o$
Ondulação no capacitor intermediário	$\Delta V_{int} = 1\%V_{int}$

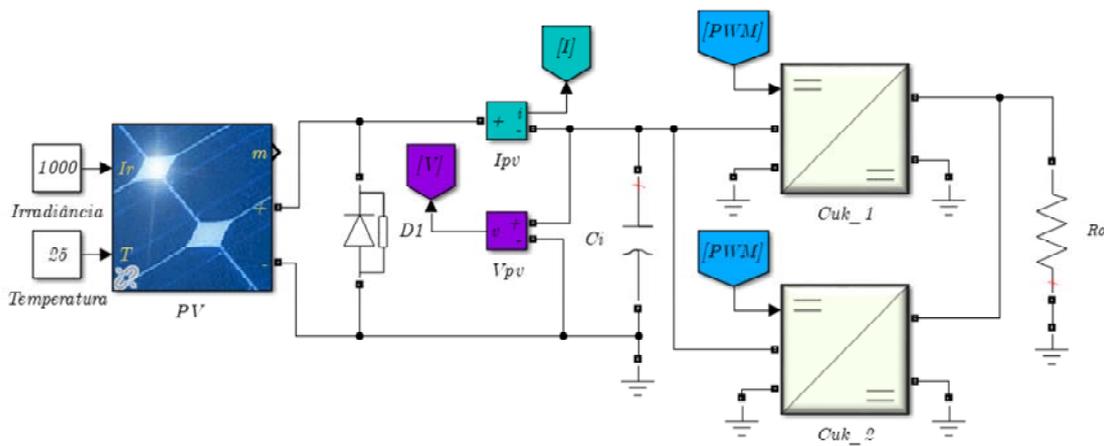
Então, utilizando as equações descritas no tópico do projeto do conversor CC-CC e os dados da Tabela IV, chega-se aos valores da Tabela V referentes aos elementos armazenadores de energia do conversor estático.

Tabela V - Elementos armazenadores de energia do conversor Ćuk.

DESCRIÇÃO	VALOR
Razão Cíclica ( <i>Duty Cycle</i> )	$D = 0,54$
Capacitor de acoplamento	$C_i = 93,3 \mu\text{F}$
Indutor de entrada	$L_i = 838,7 \mu\text{H}$
Capacitor Intermediário	$C_{int} = 99,4 \mu\text{F}$
Indutor de saída	$L_o = 1 \text{ mH}$

Logo, com os parâmetros dos dois conversores Ćuk definidos, simulou-se o sistema com 1 módulo FV *Kyocera Solar KC200GT* e dois conversores operando em paralelo, com irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , buscando operar no ponto de máxima potência, o qual foi utilizado como entrada para os cálculos, como representado na Figura 25.

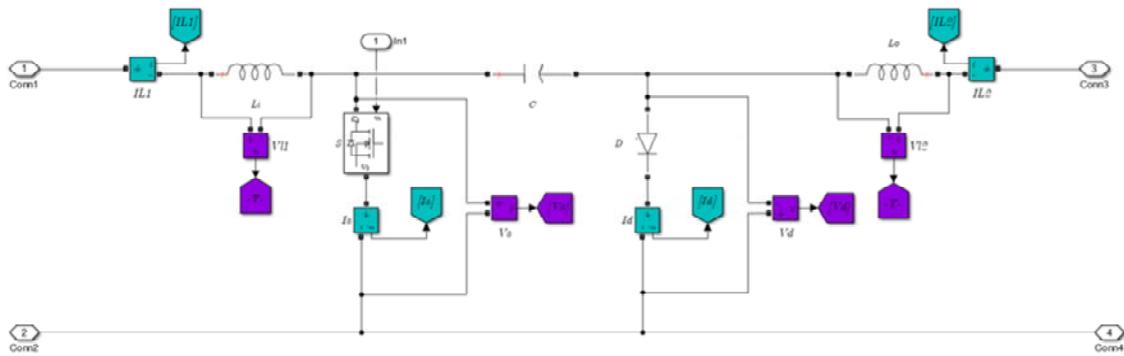
Figura 25 - Esquema de simulação conversores CC-CC.



Fonte: Autor.

O bloco do conversor Ćuk tem a configuração da Figura 26.

Figura 26 - Configuração interna do bloco do conversor Ćuk.



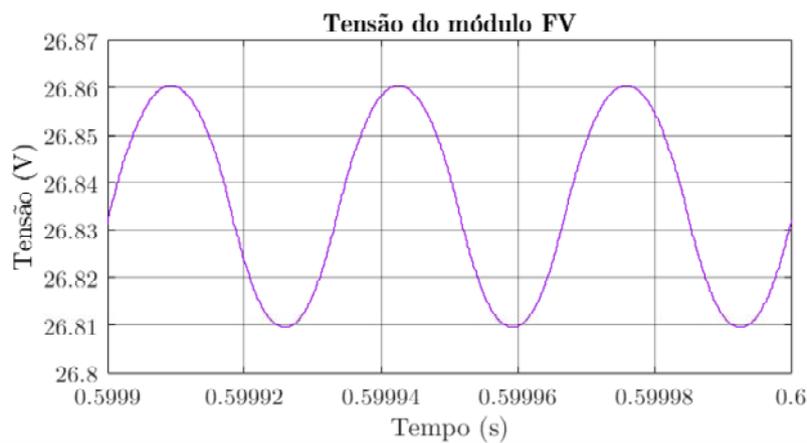
Fonte: Autor.

Executou-se a simulação para um período de 0,6s, o *sample time* de execução de cálculo foi de 111,11ns. Também se utilizou o *Rate Transition* para amostragem, no qual definiu-se seu período a partir de duas vezes a frequência de operação do conversor, resultando em 16,67µs.

Desta forma, a simulação tem um total de 36000 pontos.

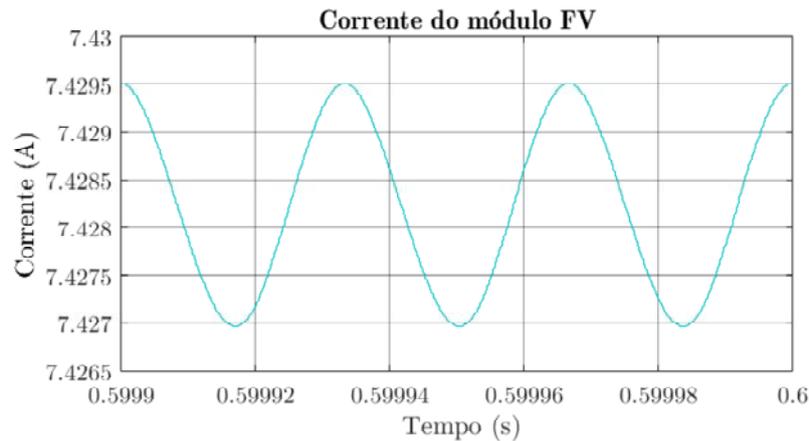
Como resultado, obteve-se a tensão e a corrente extraída do módulo FV expostos nas Figura 27 e Figura 28.

Figura 27 - Tensão extraída do módulo FV.



Fonte: Autor.

Figura 28 - Corrente extraída do módulo FV.



Fonte: Autor.

Observa-se que o ponto de operação no módulo FV ficou divergente do ponto de máxima potência, tem-se como hipótese o fato da razão cíclica ser calculada a partir da resistência de carga como exposto na Equação (3.2), entretanto não foi considerada a resistência imposta pelos elementos do conversor estático.

Para verificar a veracidade da hipótese, simulou-se o sistema com somente um conversor CC-CC operando, e obteve-se um resultado de divergência de corrente duas vezes maior que o da Figura 28, o que indica que ao retirar um conversor conectado em paralelo, foi equivalente a retirar uma impedância de mesmo valor do sistema.

Além disso, calculou-se e mediu-se as tensões e correntes nos elementos dos conversores, tais valores estão apresentados na Tabela VI.

Tabela VI - Valores de tensão e corrente nos componentes do conversor  $\acute{C}uk$ .

DESCRIÇÃO	CALCULADO	MEDIDO	ERRO %
Tensão de entrada (V)	26,3000	26,8350	1,9937%
Corrente de entrada (A)	7,6100	7,4285	2,4433%
Potência de entrada (W)	200,1430	199,3438	0,4009%
Tensão de saída (V)	31,6341	30,7200	2,9756%
Corrente de saída (A)	6,3268	6,1435	2,9836%
Potência de saída	200,1426	188,7283	6,0480%
Tensão máxima no Indutor $L_i$ (V)	31,6341	31,2600	1,1967%
Corrente média no indutor $L_i$ (A)	3,8050	3,7135	2,4640%

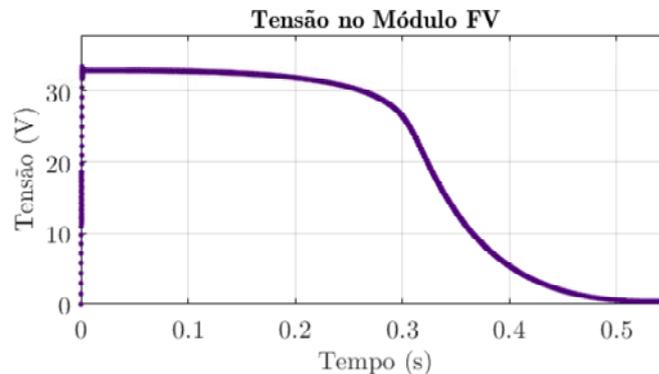
Ondulação de corrente no indutor $L_i$ (A)	0,5708	0,5648	1,0623%
Tensão máxima no Indutor $L_o$ (V)	31,6341	33,8300	6,4910%
Corrente média no indutor $L_o$ (A)	3,1634	3,0720	2,9753%
Ondulação de corrente no indutor $L_o$ (A)	0,4745	0,4684	1,3023%
Tensão máxima direta na Chave $S$ (V)	57,9341	58,6500	1,2206%
Corrente máxima na Chave $S$ (A)	7,4910	7,3020	2,5883%
Corrente média na Chave $S$ (A)	4,0904	3,9868	2,5986%
Tensão máxima direta no Diodo $D$ (V)	57,9341	57,2100	1,2657%
Corrente máxima no Diodo $D$ (A)	7,4910	7,2970	2,6586%
Corrente média no Diodo $D$ (A)	3,4007	3,3128	2,6533%

Devido a não estar sendo extraído exatamente os valores de corrente e tensão estabelecidos nos cálculos, há divergências entre os valores calculados e medidos.

Logo após, utilizou-se uma razão cíclica variável em forma de rampa no valor de 0,05 até 0,95 para fazer uma varredura da Curva I-V do módulo FV.

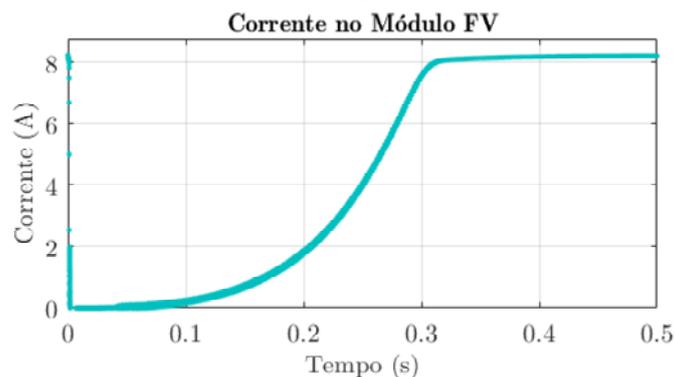
Assim obteve-se as tensões e correntes das Figura 29 e Figura 30, e também a curva característica do módulo, como apresentado na Figura 31.

Figura 29 - Pontos de tensão obtidos pela varredura do caracterizador.



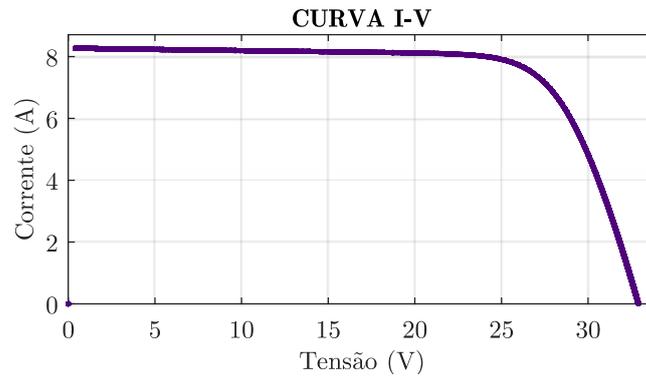
Fonte: Autor.

Figura 30 - Pontos de corrente obtidos pela varredura do caracterizador.



Fonte: Autor.

Figura 31 - Curva I-V resultante.



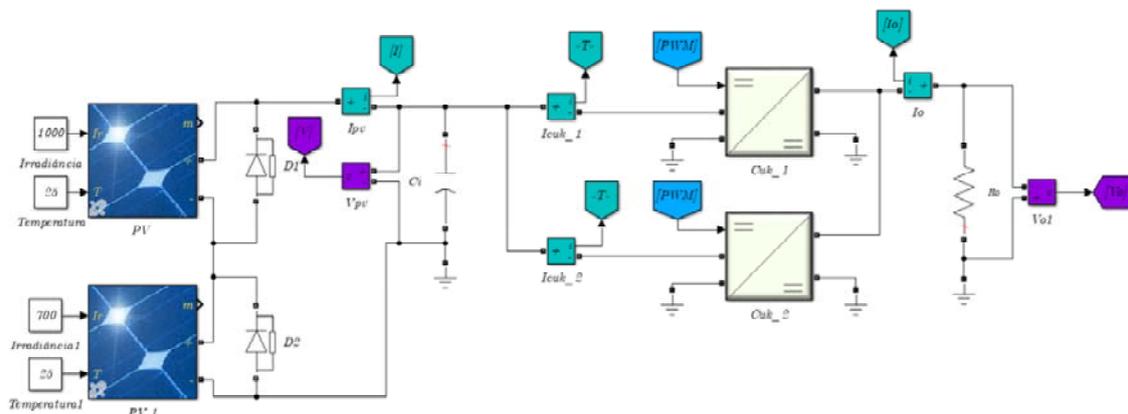
Fonte: Autor.

Observa-se nos resultados da caracterização, que mesmo ocorrendo divergência anteriormente na operação no ponto de máxima potência estabelecido no projeto, a varredura do caracterizador apresenta um comportamento adequado na simulação.

Logo após, fez-se uma simulação com dois módulos FV Shanghai Solar Energy S&T S-90C-1 de 90W, e um deles representando um sombreamento parcial, afim de verificar a curva I-V com seu ponto de inflexão.

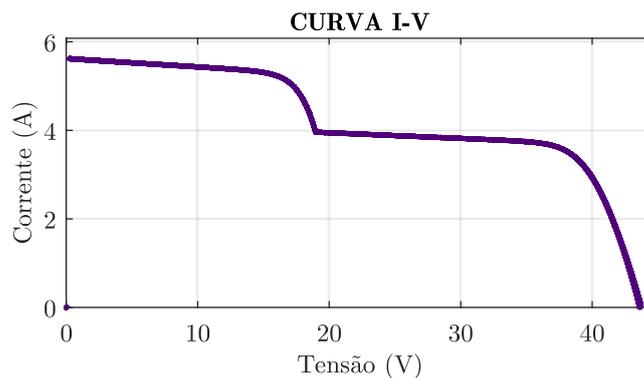
O esquema da simulação está exposto na Figura 32, e a curva I-V resultante apresentada na Figura 33.

Figura 32 - Simulação representando um sombreamento parcial.



Fonte: Autor.

Figura 33 - Curva I-V resultante do sistema FV sombreado.



Fonte: Autor.

Nas simulações dos módulos do projeto, obteve-se o comportamento esperado e adequado para o circuito do *Gate Driver*. Na simulação do conversor estático, verificou-se o funcionamento próximo ao ponto de máxima potência, no qual projetou-se para ser utilizado inicialmente.

Além disso, comparou-se os valores de corrente e tensão medidos dos elementos do conversor com os valores calculados, em que se obteve resultados coerentes.

Por fim, simulou-se a caracterização de um módulo em condições padrões de teste e outro em uma condição de sombreamento parcial, obtendo como resultado suas curvas I-V resultantes.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho realizado constituiu de desenvolver um caracterizador fotovoltaico através de conversores Ćuk em paralelo, definindo seus parâmetros de projeto e verificando seu comportamento.

Com esse trabalho, foi possível obter a curva característica de módulos FV por meio de simulações computacionais, e também auferir as capacidades de corrente e tensão que os elementos ativos e passivos do conversor devem suportar.

Com isso, o trabalho concluiu parcialmente seus objetivos, conseguindo determinar um projeto de um conversor baseado em conversores estáticos, no qual apresentou resultados eficazes nas simulações. Entretanto não se concluiu a construção prática do aparato.

Para trabalhos futuros, almeja-se a construção prática do caracterizador para validação de resultados. Pretende-se utilizar um microcontrolador para gerar o sinal de razão cíclica da chave, e também utilizá-lo para receber os valores de corrente e tensão da caracterização do módulo FV.

## REFERÊNCIAS

- CAMPOS, R. E. et al. A Review of the Main Methods to trace the I-V Characteristic Curve of PV Sources. **2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2018 - Proceedings**, p. 24–30, 2018.
- CARVALHO, A. L. C. DE. **Metodologia para análise , caracterização e simulação de células fotovoltaicas**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.
- CEPEL et al. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- CORNELIUS, R. G. et al. DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO ELETRÔNICO PARA CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS. **Sepoc**, p. 6, 2018.
- COUTINHO, C. R. **O EFEITO DO SOMBREAMENTO E DIODOS DE BYPASS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**. [s.l.] Centro Universitário Norte do Espírito Santo, 2016.
- DA SILVEIRA BRITO, E. M. **Construção de um caracterizador solar baseado em carga capacitiva**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2014.
- DURAN, E. et al. Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review. **Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, 2008.
- DURÁN, E. et al. An application of interleaved dc-dc converters to obtain I-V characteristic curves of photovoltaic modules. **IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)**, p. 2284–2289, 2008.
- EURELECTRIC. Power Statistics and Trends : The five dimensions of the energy union. n. December, p. 28, 2015.
- FUSANO, R. H. **Análise Dos Índices De Mérito Do Sistema Fotovoltaico Conectado à rede do Escritório Verde da UTFPR**. [s.l.] UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA/ELETROTÉCNICA, 2013.
- MENDONÇA, C. **Análise de Rendimento de um Painel Fotovoltaico com o Vidro Danificado**. [s.l.] UNIPAMPA, 2017.
- PEDRO, M. C. M. **Modelling of Shading Effects in Photovoltaic Optimization**. [s.l.] Universidade Nova de Lisboa, 2016.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2<sup>a</sup> ed. São José dos Campos: [s.n.].

PEREIRA, T. A. et al. Design of a Pv Tracer Based on the Dc/Dc Ćuk Converter. 2017b.

POMILIO, J. A. **6. Conversores Cuk, Sepic E Zeta Como PfpPré Reguladores de Fator de Potência**, 2016. Disponível em: <<http://www.fee.unicamp.br/dse/antenor/pfp>>

ROMÁN, E. et al. Intelligent PV Module for Grid-Connected PV Systems. **21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**, v. 53, n. 4, p. 8, 2006.

SANTOS, B. R.; PETRY, C. A.; LIMA, C. B. Desenvolvimento de um traçador de curvas VxI para painéis fotovoltaicos. **Revista Técnico Científica (IFSC)**, v. 2, n. 1, p. 17–23, 2010.

SARKAR, N. I. Effect of various model parameters on solar photovoltaic cell simulation : a SPICE analysis. **Renewables: Wind, Water, and Solar**, 2016.

VALLÊRA, A. M. Meio Século De História Fotovoltaica. **Gazeta da Física**, p. 6, 2006.

VAN DYK, E. E.; GXASHEKA, A. R.; MEYER, E. L. Monitoring current-voltage characteristics and energy output of silicon photovoltaic modules. **Renewable Energy**, v. 30, n. 3, p. 399–411, 2005.

WEINERT, C. C. **Aplicação do Conversor CC-CC Topologia Cuk para o Carregamento de Baterias de Sistemas Fotovoltaicos**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.