

## Desenvolvimento de conversor CC-CC com sistema de MPPT

### Development of DC-DC converter with MPPT system

#### RESUMO

**Eduardo Paganini**  
[edupaganini1@hotmail.com](mailto:edupaganini1@hotmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

**Carlos Marcelo de Oliveira Stein**  
[cmstein@utfpr.edu.br](mailto:cmstein@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

Este trabalho tem como objetivo a implementação de um sistema de extração de potência para arranjos fotovoltaicos, ou seja, conversor CC-CC operando em conjunto com o algoritmo de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT). Para a implementação prática do sistema de extração de potência faz-se necessário o projeto do conversor considerando, além das características da fonte de entrada, os requisitos de tensão de saída e ondulação de corrente e tensão nos elementos armazenadores de energia. Em paralelo tem-se o projeto dos circuitos auxiliares, pois são responsáveis por adequar os níveis de corrente e tensão mensurados e realizar o acionamento da chave do conversor, possibilitando a execução do controle do sistema através de um microcontrolador e, por conseguinte, realizar o rastreamento do ponto de máxima potência por meio do algoritmo implementado. Os testes para verificação da operação do sistema foram realizados sob condições controladas, por meio da emulação do painel fotovoltaico. O sistema implementado foi capaz de operar sob condições climáticas variadas, com os percentuais de potência extraída condizentes com o algoritmo implementado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Conversor CC-CC. Algoritmo MPPT. Painel fotovoltaico.

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

#### ABSTRACT

This work aims to implement a power extraction system for photovoltaic arrangements, that is, a DC-DC converter operating in conjunction with the Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm. For the practical implementation of the power extraction system, it is necessary to design the converter considering, in addition to the characteristics of the input source, the requirements of output voltage and current and voltage ripple in the energy storage elements. In parallel, the auxiliary circuits are designed, as they are responsible for adjusting the measured current and voltage levels and for activating the converter switch, allowing the execution of the system control through a microcontroller and, therefore, to perform the tracking of the maximum power point through the implemented algorithm. The tests to verify the operation of the system were carried out under controlled conditions, through the emulation of the photovoltaic panel. The implemented system was able to operate under varied climatic conditions, with the percentages of extracted power consistent with the implemented algorithm.

**KEYWORDS:** DC-DC converter. MPPT algorithm. Photovoltaic panel.



## INTRODUÇÃO

A produção fotovoltaica de energia elétrica possui etapas de processamento de energia, pois as formas de onda e níveis de tensão e corrente necessitam de um tratamento adequado. Este tratamento da energia é feito por meio de sistemas de conversão com base na eletrônica de potência, utilizando-se conversores CC-CC e CC-CA com elevada eficiência de conversão. Porém, estes conversores também são utilizados para garantir que o sistema opere extraindo a máxima potência do conjunto, sendo assim denominados de sistemas rastreadores de máxima potência (COELHO, 2008).

A revisão bibliográfica dos métodos de rastreamento do ponto de máxima potência e dos conversores estáticos tem como referência os trabalhos de (TESTON, 2016) e (COELHO, 2008). Neste trabalho tem-se a apresentação da implementação e projeto dos circuitos de potência e auxiliares do conversor *boost*, juntamente aos resultados práticos obtidos em bancada.

## METODOLOGIA

Para o projeto do conversor *boost* faz-se necessário conhecer as características da fonte de entrada, neste caso, o painel fotovoltaico. O Máximo Ponto de Potência (MPP) do painel é uma das características requeridas, pois define os esforços médios do conversor. Outras duas variáveis de operação necessárias são a corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto, que definem os esforços máximos na entrada do conversor. A Tabela 1 apresenta as características do módulo fotovoltaico, modelo CS6U-325P.

Tabela 1 – Especificações do painel fotovoltaico

Especificação	Valor
Potência no MPP	325W
Corrente no MPP	8,78A
Tensão no MPP	37V
Corrente de Curto-Circuito	9,34A
Tensão de Circuito Aberto	45,5V

Fonte: CANADIAN SOLAR INC. (2016).

A partir das características definidas na Tabela 1 torna-se possível realizar a especificação do conversor *boost*. Define-se parâmetros como a frequência de chaveamento, ondulação de corrente e tensão e a tensão de saída.

A tensão de saída na carga do conversor *boost* é estimada considerando-se a operação em conjunto com um inversor monofásico conectado a uma rede de tensão de fase de 127V, ou seja, para a conversão CC-CA faz-se necessário, no mínimo, a tensão de pico da onda senoidal, neste caso 179,61V. Porém, devido as oscilações da tensão na rede e considerando as possíveis perdas no inversor de frequência, determina-se que a tensão média de saída do conversor será de 230V.

A determinação da frequência de operação está diretamente relacionada com o tamanho dos elementos armazenadores de energia, a capacitância e indutância

do conversor, pois são inversamente proporcionais à frequência, como é descrito nas equações em (HART, 2011). A escolha da ondulação de corrente é definida de forma a tornar a eficiência do método MPPT condizente com a literatura, em torno de 98% de aproveitamento de energia, de acordo com (DE BRITO et al., 2010), para o método Perturba e Observa modificado, de passo variável. A determinação da ondulação de tensão de saída decorre de forma a garantir baixas oscilações, quase nulas, na saída, proporcionando qualidade de energia na carga. A Tabela 2 apresenta as características de projeto do conversor *boost*.

Tabela 2 – Requisitos de projeto do conversor *boost*

Especificação	Valor
Tensão de saída do conversor	230V
Frequência de chaveamento	40kHz
Ondulação de corrente no indutor	7,5%
Ondulação de tensão no capacitor	1%

Fonte: Autoria Própria (2020).

O cálculo dos elementos passivos ocorre considerando-se os elementos do conversor ideais, por meio das equações propostas em (HART, 2011). Ressalta-se que a carga utilizada no conversor é resistiva, calculada na Eq. (1).

$$R = \frac{V_o^2}{P_{MPP}} = \frac{230^2}{325} = 162,769\Omega \quad (1)$$

A Tabela 3 apresenta os valores dos componentes passivos obtidos, de acordo com os requisitos de projeto.

Tabela 3 – Elementos passivos do conversor *boost*

Elemento	Valor
Capacitor	12,886 $\mu$ F
Indutor	1,178mH
Carga Resistiva	162,769 $\Omega$

Fonte: Autoria Própria (2020).

Os componentes são selecionados de modo a satisfazer os níveis de corrente e tensão e frequência de chaveamento de operação do conversor, garantindo a operacionalidade do sistema. Elementos como o capacitor, chave e diodo são escolhidos respeitando os níveis máximos de corrente e tensão a quais são submetidos. O elemento indutivo é projetado e confeccionado de acordo com os requisitos de ondulação de corrente, utilizando a metodologia de projeto para núcleos de ferrite do tipo E, descrita em detalhes em (IVO; FONT; ALVES, 2002). A Tabela 4 apresenta os componentes escolhidos para a implementação.

Tabela 4 – Componentes escolhidos para a implementação

Componente
Diodo 30ETH6
MOSFET IRFP450
4 Capacitores 3 $\mu$ F
2 Resistores de 354,248 $\Omega$

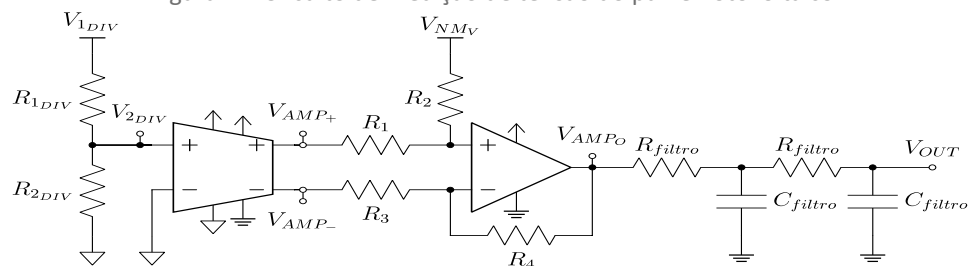
Fonte: Aatoria Própria (2020).

Os circuitos auxiliares são responsáveis pelo tratamento dos sinais de entrada, pois os sinais amostrados apresentam ruído e faixas de tensão que não condizem com os valores de tensão máximos do conversor A/D do microcontrolador, necessitando-se adequar estes sinais em magnitude, que satisfaça a tensão máxima suportada por o conversor A/D do microcontrolador, neste caso 3,3V, e faixa de frequência de interesse para o controle do conversor. Não obstante, tem-se o circuito de acionamento da chave semicondutora.

Uma importante característica de implementação dos circuitos auxiliares é a isolamento entre circuito de potência e circuito digital, feita por meio de amplificadores isolados e circuito de comando optoacoplado, preservando a integridade dos circuitos sensíveis a altas correntes e tensões.

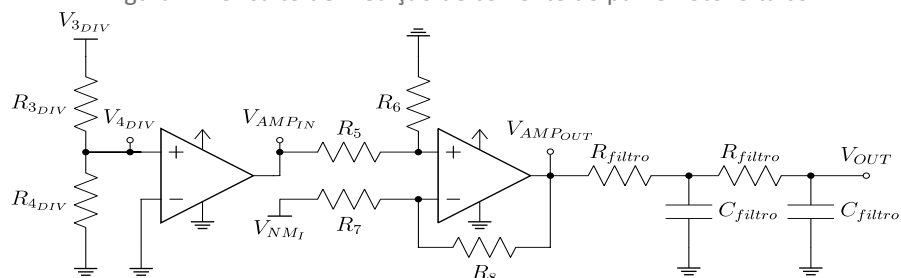
As Figuras 1, 2 e 3 apresentam os circuitos de medição de tensão, corrente e o circuito de acionamento da chave do conversor, respectivamente. Ressalta-se que a corrente foi mensurada por um sensor de corrente de efeito *hall* e, posteriormente, o sinal gerado foi tratado no circuito de condicionamento correspondente. Foram projetados filtros de segunda ordem, compostos por estágios RC em cascata para filtrar os sinais provenientes dos sensores. Os circuitos implementados são baseados em (TEXAS INSTRUMENTS, 2017) e (TEXAS INSTRUMENTS, 2018).

Figura 1 – Circuito de medição de tensão do painel fotovoltaico



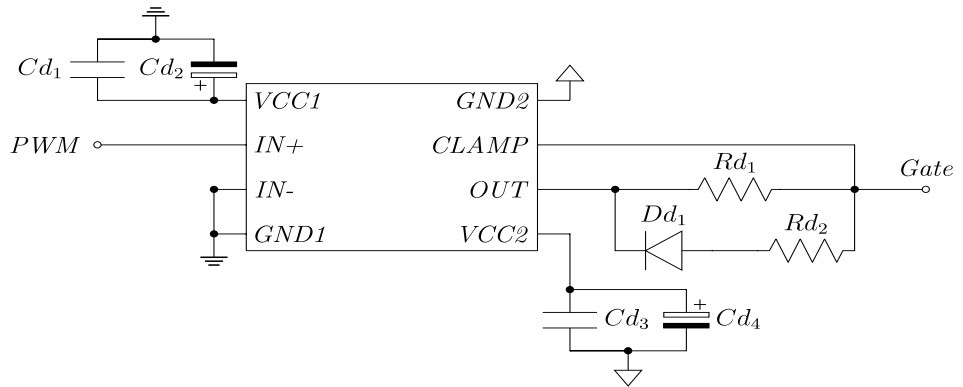
Fonte: Adaptado de TEXAS INSTRUMENTS (2017).

Figura 2 – Circuito de medição de corrente do painel fotovoltaico



Fonte: Adaptado de TEXAS INSTRUMENTS (2017).

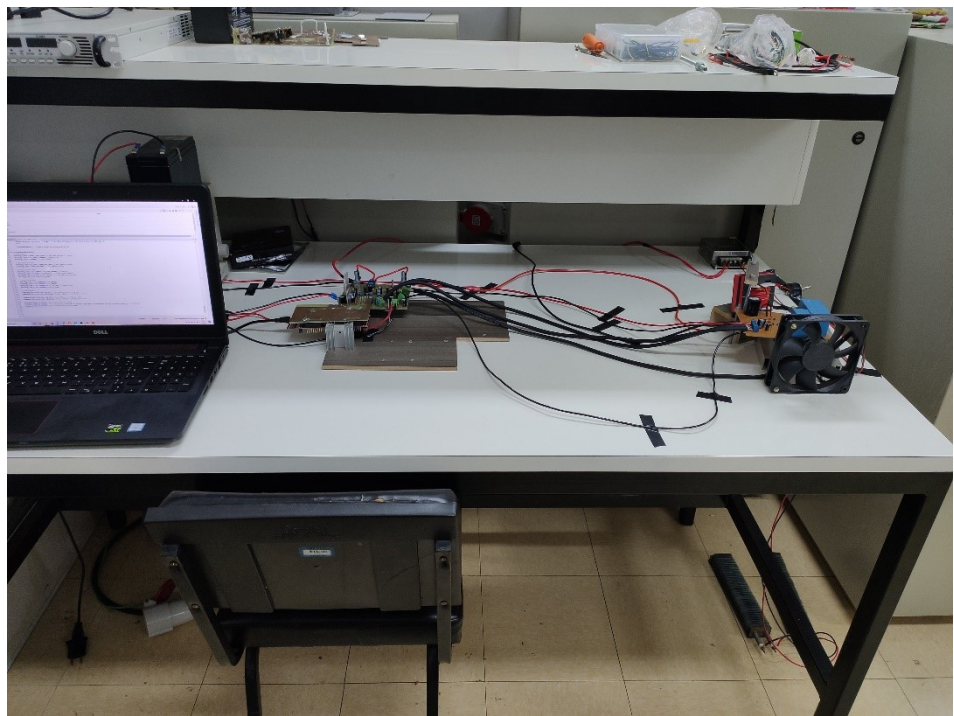
Figura 3 – Circuito de comando da chave semicondutora



Fonte: Adaptado de TEXAS INSTRUMENTS (2018).

A Figura 4 apresenta os circuitos de potência e auxiliares implementados para os testes em bancada.

Figura 4 – Bancada de testes implementada para a execução do trabalho



Fonte: Autoria Própria (2020).

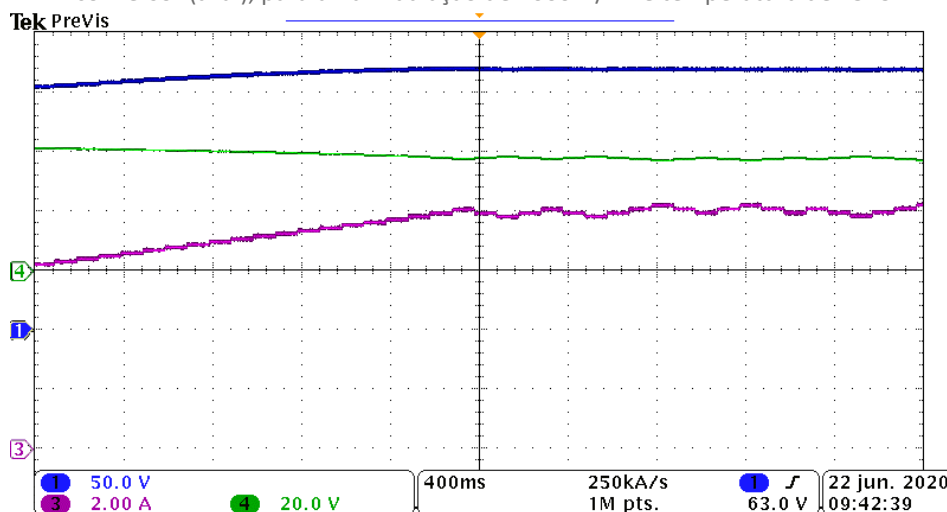
## RESULTADOS

Os resultados experimentais foram obtidos por meio do ensaio em bancada utilizando a fonte ITECH IT6018C-800-60, que possui um software para a simulação de painéis fotovoltaicos, possibilitando o controle da irradiação e temperatura incidentes sobre o painel simulado, e ainda permite a visualização em tempo real da curva de potência do painel, e conseqüentemente em qual ponto de operação o painel se encontra. Pode-se assim comprovar a operação do sistema rastreador de máxima potência.

Os testes do sistema de extração de potência foram realizados utilizando-se o algoritmo MPPT Perturba e Observa modificado, de passo variável. Uma das características intrínsecas do método, desde o Perturba e Observa clássico, são as perturbações constantes no sistema, de acordo com (TESTON, 2016).

O primeiro ensaio ocorreu sob condições climáticas constantes (irradiação de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura de 25°C). A Figura 5 apresenta o resultado obtido.

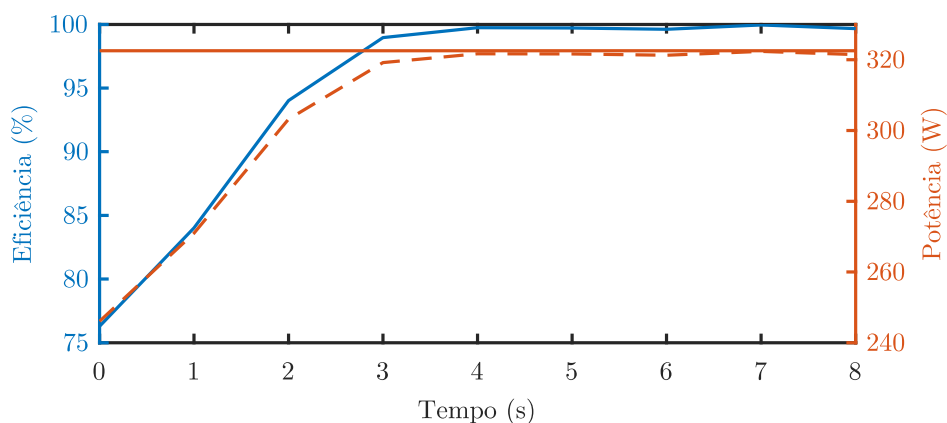
Figura 5 – Curvas de corrente (rosa) e tensão (verde) do painel e tensão de saída do conversor (azul), para uma irradiação de 1000W/m<sup>2</sup> e temperatura de 25°C



Fonte: A autoria Própria (2020).

Pode-se analisar que nos primeiros instantes tem-se o transitório, qual o algoritmo está fazendo a operação de rastreamento, desde o ponto inicial até o MPP. O passo de atualização de referência do algoritmo é de 0,1A, que pode ser visualizado em cada transição do período do MPPT, que é de 10Hz. A fonte fornece dados de eficiência do algoritmo MPPT com base na curva característica emulada e nos níveis de corrente e tensão de saída da fonte. Para verificar se o sistema está operando no MPP, estes pontos foram adquiridos, em períodos de 1s definidos automaticamente pela própria fonte, e plotados na Figura 6.

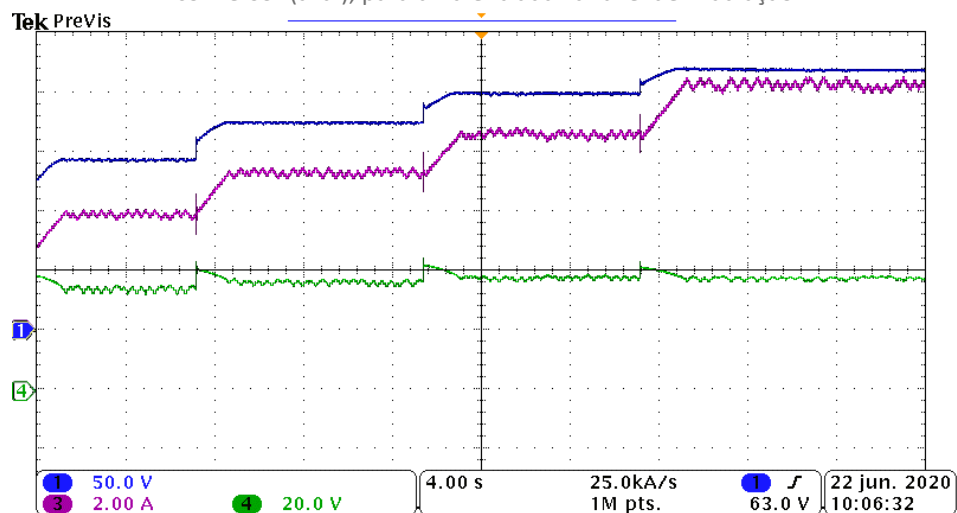
Figura 6 – Curvas da eficiência (azul) do MPPT, potência de referência (laranja contínua) e potência extraída da fonte (laranja tracejada) de acordo com as medições da fonte emuladora, para uma entrada 1000W/m<sup>2</sup> e temperatura de 25°C



Fonte: A autoria Própria (2020).

A Figura 6 apresenta os resultados da extração de potência por meio de medição obtidas da fonte emuladora. Tem-se que os níveis de eficiência se apresentam, em regime permanente, acima dos 98%. A Figura 7 apresenta um teste para mudanças crescentes em degraus de 200W/m<sup>2</sup> de irradiação e temperatura constante de 25°C.

Figura 7 – Curvas de corrente (rosa) e tensão (verde) do painel e tensão de saída do conversor (azul), para uma entrada variável de irradiação



Fonte: Autoria Própria (2020).

Observa-se que, por mais que as variações possuam característica bruscas de alteração de irradiação, o algoritmo é capaz de rastrear o MPP e manter-se sob o mesmo.

## CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi apresentar um sistema de extração de potência de painéis fotovoltaicos de forma prática, implementado em bancada e com operacionalidade em diferentes condições climáticas e com eficiência do algoritmo de MPPT condizente com a literatura.

A implementação dos circuitos de potência e auxiliares, de acordo com as especificações calculadas no projeto, foi satisfatório e condizente com o estimado, além de apresentar os desafios da eletrônica de potência.

Analisando-se os resultados obtidos, verifica-se que o método de MPPT Perturba e Observa modificado possui uma ótima eficiência, considerando a simplicidade de implementação do método, rastreando o MPP e proporcionando estabilidade em regime permanente.

## AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho foi possível graças ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) e Fundação Araucária. Agradeço também a meu orientador, Carlos Marcelo de Oliveira Stein, por sempre me dar suporte e orientar da melhor forma o desenvolvimento do trabalho.

## REFERÊNCIAS

CANADIAN SOLAR INC. **Folha de dados: maxpower CS6U-315|320|325|330P.**  
Disponível em: <https://download.aldoc.com.br/pdfprodutos/Produto342231dArquivo4478.pdf>. Acessado em: 12 jul. 2020.

COELHO, R. F. **Estudo dos conversores buck e boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos.** 2008. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

DE BRITO, M. A. et al. Avaliação das principais técnicas para obtenção de MPPT de painéis fotovoltaicos. *In: IEEE/IAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS-INDUSCON 2010, 9., 2010, São Paulo. Anais...* São Paulo: IEEE, 2010. p. 1-6.

HART, D.W. **Power electronics.** New York: Tata McGraw-Hill, 2011. ISBN 9780071321204.

IVO, B.; FONT, C.H.I.; ALVES, R.L. **Projeto físico de indutores e transformadores.**  
Disponível em: [https://www.professorpetry.com.br/Bases\\_Dados/Apostilas\\_Tutoriais/Apostila\\_Projeto\\_Fisico\\_De\\_Magneticos.pdf](https://www.professorpetry.com.br/Bases_Dados/Apostilas_Tutoriais/Apostila_Projeto_Fisico_De_Magneticos.pdf). Acessado em: 06 out. 2020.

TESTON, S.A. **Projeto, implementação e análise de um conversor CC-CC de alto ganho e alto rendimento para aplicações fotovoltaicas.** 2016. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.

TEXAS INSTRUMENTS. **Interfacing a differential-output (isolated) amplifier to a single-ended input ADC.** Disponível em: [https://www.ti.com/lit/an/sbaa229/sbaa229.pdf?ts=1597016194363&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FAMC1301](https://www.ti.com/lit/an/sbaa229/sbaa229.pdf?ts=1597016194363&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FAMC1301). Acessado em: 12 jul. 2020.

TEXAS INSTRUMENTS. **UCC5390ECDWV isolated gate driver evaluation module user's guide.** Disponível em: [https://www.ti.com/lit/ug/sllu295/sllu295.pdf?ts=1596506815652&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FUCC5350](https://www.ti.com/lit/ug/sllu295/sllu295.pdf?ts=1596506815652&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FUCC5350). Acessado em: 12 jul. 2020.