

Circuito de Acionamento de Chaves Semicondutoras de Potência Empregando Transformador Piezoelétrico

Fabício G. Fabero, Fábio E. Bisogno, Rafael C. Beltrame

*Universidade Federal de Santa Maria, Grupo de Eletrônica de Potência e Controle
Santa Maria, RS, Brasil, CEP 97105-900
(Tel: (55) 3220-9497; e-mail: beltrame@gepoc.ufsm.br)*

Abstract: This work proposes an isolated gate-driver circuit for semiconductor devices (MOSFET or IGBT) that makes use of a piezoelectric transformer in both power supply circuit and communication channel. The piezoelectric transformer is analyzed to obtain the resonance frequencies and to define its operation point. In conjunction with the application of a Class-E resonant converter, a technique for modulating and demodulating the gate-driver command signal is proposed. Experimental results for a gate-driver circuit with a supply voltage of 30 V and a command signal of -5 V and $+15$ V are presented to validate the proposal.

Resumo: Este artigo apresenta um circuito de acionamento (*gate-driver*) isolado para dispositivos semicondutores (MOSFET ou IGBT) que faz uso de um transformador piezoelétrico nos circuitos de alimentação e no canal de comunicação. Faz-se uma análise do transformador piezoelétrico para se obter as frequências de ressonância e definir seu ponto de operação. Em conjunto com a aplicação de um conversor ressonante Classe-E, é proposta uma técnica de modulação e demodulação do sinal de comando do *gate-driver*. Resultados experimentais para um circuito de *gate-driver* com tensão de alimentação de 30 V e sinal de comando de -5 V e $+15$ V são apresentados para a validação da proposta.

Keywords: Piezoelectric transformer. Class-E resonant converter. Gate-driver.

Palavras-chaves: Transformador piezoelétrico. Conversor ressonante Classe-E. Circuito de acionamento.

1. INTRODUÇÃO

De maneira geral, observa-se que os conversores estáticos com capacidade de controle de fluxo de energia necessitam de, no mínimo, uma chave ativa. Assim, esses conversores requerem, ao menos, um circuito de acionamento (*gate-driver*). Em muitos casos, as chaves estáticas não ficam referenciadas ao mesmo potencial dos circuitos de instrumentação e controle do conversor (e.g., inversores meia-ponte e ponte-completa, entre outros), requerendo circuitos de *gate-driver* com capacidade de isolamento.

Tratando especificamente da interface utilizada na isolamento, segundo Prieto *et al.* (2001), a utilização de transformadores piezoelétricos (PT – *Piezoelectric Transformers*) pode ser uma alternativa em potencial, uma vez que possibilita grande densidade de potência (na ordem 40 W/cm³), alto rendimento (na ordem de 95%) e frequências de ressonância elevadas. Salienta-se, porém, que as aplicações com PTs limitam-se a potências inferiores a 100 W. Já Gaiotto *et al.* (2012) afirmam que, em comparação com os transformadores eletromagnéticos, os PTs apresentam como vantagens o emprego de materiais isolantes (cerâmica), diminuição da possibilidade interferência eletromagnética, reduzidos volume e peso, dentre outras.

Salienta-se que o canal de comunicação de um *gate-driver* é o elo entre os circuitos de controle (ou circuito de entrada) e potência (conectado à chave ativa do conversor a ser acionado). Especificamente nos canais de comunicação isolados, existem diferentes tecnologias que podem ser empregadas, tais como: acoplamento magnético, ótico, *wireless*, capacitivo e piezoelétrico.

A comunicação entre dois dispositivos isolados por meio magnético possibilita a transmissão de energia junto com a informação, alimentando a massa isolada, consistindo em um dispositivo bidirecional. Em casos de falta no conversor acionado pelo *gate-driver*, o meio magnético pode propagar essa falta ao circuito de controle, podendo danificar o processador empregado (microcontrolador ou DSP, por exemplo) (Nguyen, 2012, Anthony *et al.*, 2011, Muhammad *et al.*, 2014).

Já no meio óptico, a transmissão da falta não ocorre, pois este canal é unidirecional, porém demanda uma fonte isolada de alimentação. Apesar de algumas limitações, como por exemplo, na banda passante do sinal transmitido, a tecnologia atual em optoacopladores é bem desenvolvida, oferecendo soluções que podem simplificar o circuito de *gate-driver* (Brehaut *et al.*, 2006, Khan, 2010, Rashid, 2011).

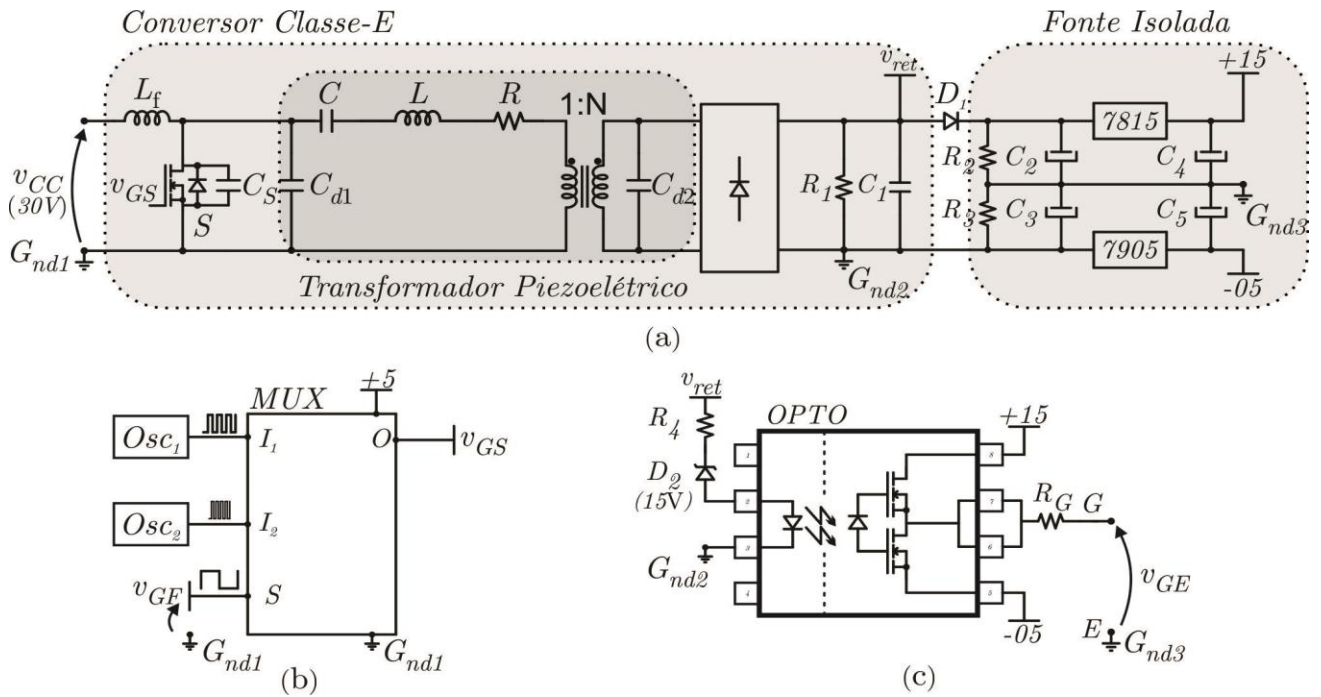


Figura 1: Circuito de *gate-driver* proposto. (a) Circuito de potência. (b) Circuito modulador. (c) Circuito demodulador.

O sistema por meio *wireless* apresenta um alto grau de isolamento entre o circuito de potência e o circuito de controle, porém possui atraso na transmissão devido à limitada banda passante do transmissor/receptor (Brehaut, 2006, Yamamoto *et al.*, 2015, Lin *et al.*, 2018, Pan *et al.*, 2016).

O sistema que emprega acoplamento capacitivo se assemelha ao acoplamento magnético de um transformador. Porém, sua utilização possui certas vantagens em relação ao meio magnético, como por exemplo, a menor dependência de parasitas indutivos no circuito e menor corrente quiescente de operação (Kusaka, 2014, Texas, 2013, Texas, 2014, Zeltner, 2010).

Por fim, segundo Vasic *et al.* (2006), o sistema que utiliza um PT como isolamento para o *gate-driver* apresenta muitas vantagens em relação às outras tecnologias, pois o PT apresenta baixo custo, baixa emissão eletromagnética, alta eficiência, alta densidade de potência, alta frequência de operação, não apresenta enrolamentos, e emprega material de alta rigidez dielétrica.

Deste modo, esse trabalho explora a aplicação de um PT na implementação de um circuito de *gate-driver* com alta classe de isolamento, utilizando-o como elemento de isolamento (para implementar as fontes de alimentação) e como canal de comunicação. Para tanto, será utilizado um conversor ressonante Classe-E. Salienta-se que a solução proposta elimina a necessidade do emprego de uma fonte isolada para a alimentação do circuito de saída do *gate-driver*.

2. CIRCUITO DE GATE-DRIVER PROPOSTO

O circuito de *gate-driver* proposto é apresentado na Figura 1. O circuito é composto por um conversor ressonante Classe-E que faz uso de um PT. No secundário do PT, após o estágio

retificador, implementam-se duas fontes de tensão. Além disso, a Figura 1 também apresenta o circuito modulador, que atua diretamente na frequência de chaveamento do conversor Classe-E, e é alimentado por uma fonte interna de 5 V, e o circuito demodulador, que aplica os níveis de tensão à chave ativa a ser acionada pelo circuito de *gate-driver*. Salienta-se que o opto-acoplador é empregado exclusivamente na demodulação e não requer a mesma classe de isolamento do PT. As sessões a seguir abordam cada estágio separadamente.

2.1. Transformador piezoelétrico

Para a obtenção do ponto de operação do conversor Classe-E (frequência de chaveamento e razão-cíclica), deve-se obter os parâmetros do modelo do PT, o qual é representado na Figura 1 (a) através de seu circuito elétrico equivalente. Para a implementação, empregou-se um PT do tipo toroidal.

Segundo Syed (2001) e Engleitner (2011), os parâmetros do modelo do PT (C , L , R e N) podem ser obtidos através de medidas de resposta em frequência. Para fazer a varredura, utilizou-se o equipamento AP200 *Frequency Response Analyser* na configuração de medida de admitância. Foi realizada uma varredura entre as frequências de 30 e 50 kHz (10.000 pontos). As medidas dos capacitores equivalentes da entrada e da saída do PT (C_{d1} e C_{d2}) foram realizadas com o equipamento LCR *Meter* HP4263B. A frequência e a tensão de saída deste equipamento foram configuradas em 1 kHz e 1 V, respectivamente.

A Figura 2 apresenta a curva de admitância obtida pelo equipamento AP200 e, sobreposta, a curva filtrada (filtro de média móvel), além da resposta do modelo obtido após a otimização dos parâmetros do modelo elétrico.

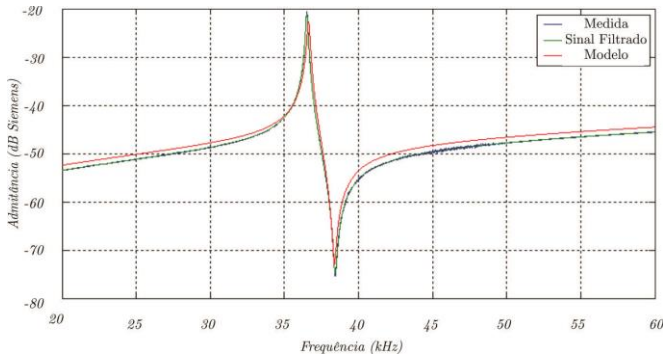


Figura 2: Curva de admitância (em módulo) medida, filtrada e obtida do modelo elétrico do PT.

Deste modo, obtêm-se os parâmetros do modelo elétrico do PT apresentados na Tabela 1.

2.2. Conversor Classe-E

A partir da análise apresentada por Rodgaard (2012), desenvolveu-se um algoritmo para determinar o ganho estático do conversor Classe-E. Basicamente, esse algoritmo executa interações do modelo em espaço de estados do conversor.

A Figura 3 apresenta o comportamento do valor médio da tensão de saída do conversor (v_{ret}) em função da frequência de chaveamento do conversor Classe-E. Observa-se que o maior ganho ocorre em torno da frequência de ressonância principal (aproximadamente 18 kHz). Salienta-se que se deve operar em uma frequência de chaveamento acima da frequência de ressonância do PT para se garantir comutações sob tensão nula (ZVS – Zero Voltage Switching) na chave ativa do conversor Classe-E. Além disso, a Figura 4 apresenta o rastreamento da razão-cíclica (que garante operação em ZVS) em função frequência de chaveamento.

2.3. Fonte isolada

Conforme se observa na Figura 1 (a), na saída do conversor Classe-E, após a ponte retificadora, implementou-se uma fonte isolada de -5 V e $+15$ V, níveis que serão utilizados para o bloqueio e o disparo, respectivamente, da chave ativa a ser acionada pelo circuito de *gate-driver* (v_{GE}), conforme se observa na Figura 1 (c).

O capacitor C_1 e o resistor R_1 definem a dinâmica da tensão v_{ret} fornecida ao circuito demodulador. Por sua vez, os níveis de

Tabela 1: Parâmetros do transformador piezoelétrico utilizado.

Componente	Descrição	Valor
C_{d1}	Capacitância de entrada	12,9449 pF
C	Capacitância ressonante	1,2549 pF
L	Indutância ressonante	15,0371 mH
R	Resistência mecânica	13,6536 Ω
C_{d2}	Capacitância de saída	24,9317 pF
N	Rel. de transformação	1,0954

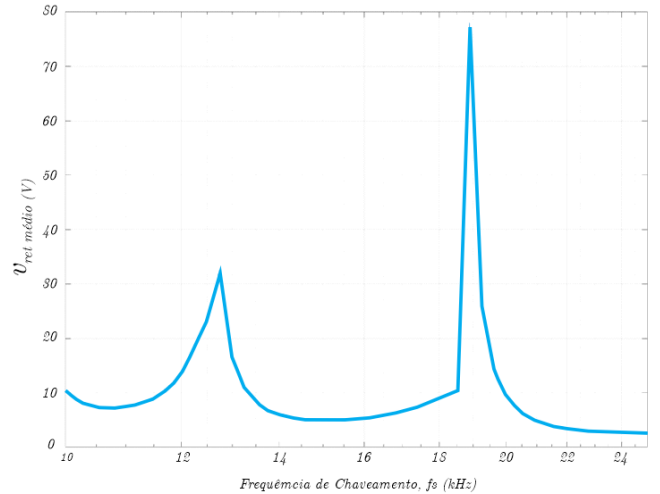


Figura 3: Comportamento do valor médio da tensão de saída em função da frequência de chaveamento.

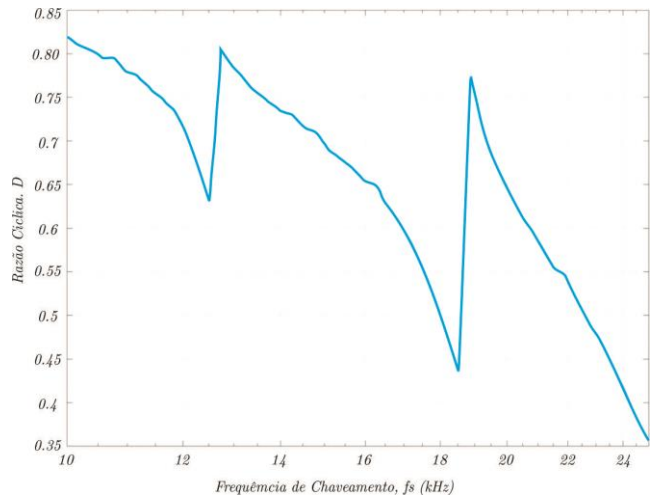


Figura 4: Rastreamento da razão-cíclica que garante ZVS em função da frequência de chaveamento.

tensão -5 V e $+15$ V apresentam menor ondulação devido ao maior barramento capacitivo empregado (capacitores C_2 a C_5).

2.4. Circuito modulador

O circuito modulador proposto, apresentado na Figura 1 (b), permite o emprego de duas frequências de chaveamento distintas no conversor Classe-E (obtidas a partir dos circuitos osciladores Osc_1 e Osc_2). Desse modo, pela escolha da frequência de chaveamento, pode-se variar o ganho estático do conversor e, por consequência, sua tensão média de saída. Essa variação será, então, empregada pelo circuito demodulador para identificar o comando de acionamento/bloqueio da chave ativa comandada pelo circuito de *gate-driver*. Os circuitos osciladores representados na Figura 1 (b) empregam resistores, capacitores e portas lógicas *Schmitt Trigger* (74HC14).

Na sequência, um circuito multiplexador (*MUX*) é empregado para, em conjunto com o sinal proveniente de um gerador de funções ou de um microcontrolador/DSP (v_{GF}), selecionar qual

dos sinais provenientes dos osciladores será aplicado ao sinal de comando (v_{GS}) da chave ativa do conversor Classe-E.

2.5. Circuito demodulador

Para o circuito demodulador, apresentado na Figura 1 (c), propõe-se o emprego de um optoacoplador (*OPTO*), o qual é acionado/bloqueado através da variação da tensão v_{ret} . Adicionalmente, o optoacoplador selecionado (HCPL3120) também faz o papel de *buffer* de corrente, para injetar a corrente requerida pelo terminal de *gate* da chave ativa comandada pelo circuito de *gate-driver*.

Conforme já informado, v_{ret} é utilizada como sinal de controle do *OPTO* para seleção das tensões de -5 V e $+15\text{ V}$ para v_{GE} . Quando v_{ret} assume nível alto (acima da tensão zener do diodo D_2), o *buffer* aplica $v_{GE} = +15\text{ V}$ no terminal de *gate* da chave ativa, colocando-a em condução. Quando v_{ret} assume nível lógico baixo (inferior à tensão zener de D_2), o *buffer* aplica $v_{GE} = -5\text{ V}$, bloqueando-a.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os componentes e especificações empregados na implementação prática do circuito de *gate-driver* completo (conversor Classe-E e circuitos modulador/demodulador) são sumarizados na Tabela 2.

A Figura 5 mostra o protótipo do circuito de *gate-driver* implementado. Salienta-se que, para o indutor de entrada (L_f) do conversor, empregou um núcleo toroidal de ferrite. O valor da indutância foi medido e ajustado com o equipamento LCR Meter HP4263B.

Com referência à Figura 1 (b), a Figura 6 apresenta o oscilograma do sinal de comando v_{GS} da chave ativa do conversor Classe-E. Nesse caso, o sinal de entrada v_{GF} é proveniente de um gerador de funções. Salienta-se que o ajuste das frequências dos osciladores é realizado através de potenciômetros, cuja precisão gera uma variação nas frequências ajustadas na ordem de 500 Hz.

A Figura 7 apresenta o oscilograma das formas de onda do sinal de comando (v_{GS}) e da tensão sobre a chave ativa (v_S) do conversor Classe-E. Observa-se que o sinal de v_{GS} atinge nível

Tabela 2: Componentes empregados na implementação prática do circuito de *gate-driver*.

Componente	Valor
C_1	1 μF
C_2 a C_5	10 μF
D_1	Retificador 1N4148
D_2	Zenner 15 V
L_f	2,3 mH
R_1	10 k Ω
R_2	18 k Ω
R_3	3,3 k Ω
R_4	1,8 k Ω
R_G	18 Ω
v_{CC}	30 V

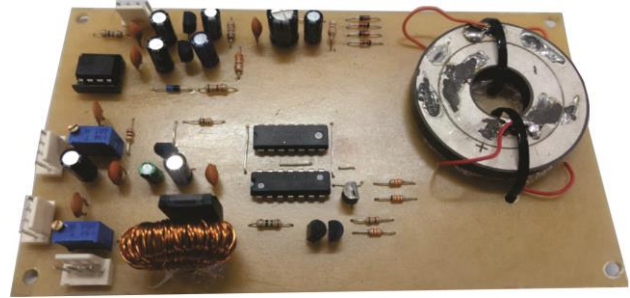


Figura 5: Protótipo do circuito de *gate-driver*.

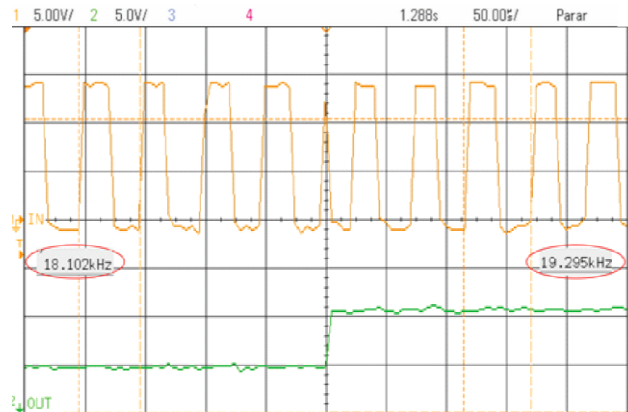


Figura 6: Sinal de comando aplicado à chave ativa do conversor (v_{GS}) e sinal de controle proveniente do gerador de funções (v_{GF}).

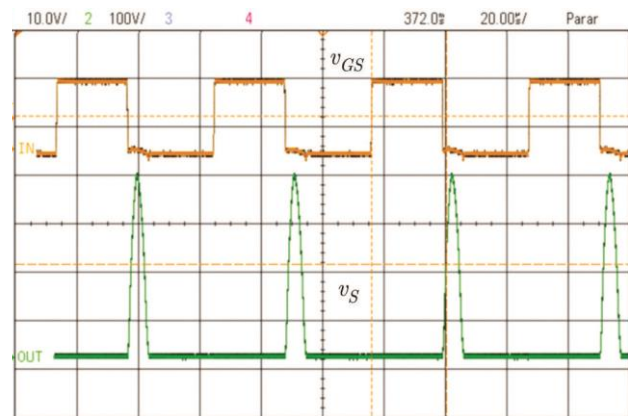


Figura 7: Tensão na chave (v_S) e sinal de comando (v_{GS}) para a frequência de operação de 18,102 kHz.

lógico alto apenas após a tensão sobre a chave (v_S) reduzir-se à zero, caracterizando a operação sob ZVS. Salienta-se que a condição ZVS é obtida para ambas frequências de chaveamento.

As formas de onda do oscilograma da Figura 8 visam validar a operação do circuito modulador. Na medida em que o gerador de funções varia o sinal de controle na entrada do *gate-driver* (v_{GF}), o valor instantâneo da tensão de saída do conversor Classe-E (v_{ret}) também varia.

O oscilograma da Figura 9 apresenta as formas de onda necessárias para validar a operação do circuito demodulador. Conforme já demonstrado, na medida em que o gerador de

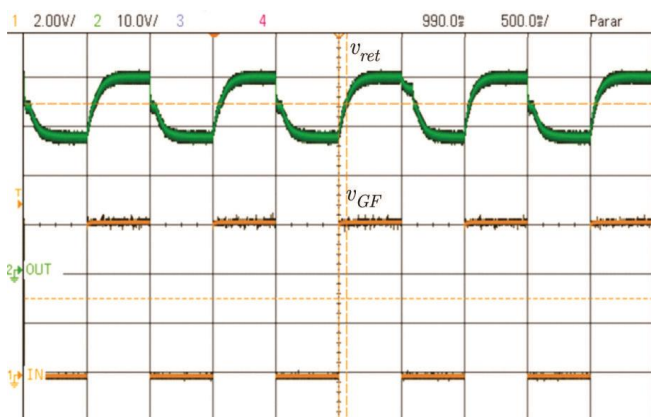


Figura 8: Tensão na saída (v_{ret}) e forma de onda proveniente do gerador de funções (v_{GF}).

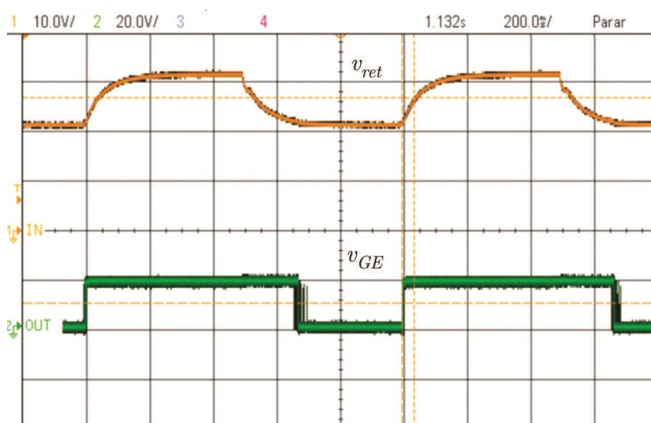


Figura 9: Tensão instantânea de saída do conversor Classe-E (v_{ret}) e tensão de saída do *buffer* (v_{GE}).

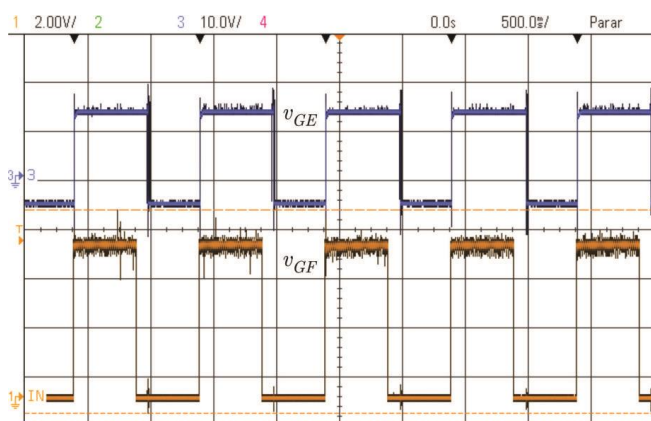


Figura 10: Forma de onda proveniente do gerador de funções (v_{GF}) e forma de onda na saída do *buffer* (v_{GE}).

funções varia o comando de entrada do *gate-driver* (v_{GF}), a tensão instantânea na saída do conversor Classe-E (v_{ret}) também varia. Então, o circuito demodulador detecta essa variação de tensão e, por consequência, o sinal de saída do *buffer* (v_{GE}) alterna-se entre os valores de -5 V e $+15$ V.

Para a validação do circuito de *gate-driver* completo, tem-se o oscilograma da Figura 10, o qual apresenta o sinal de controle do *gate-driver* (v_{GF}), proveniente do gerador de funções, e a tensão de saída do *buffer* (v_{GE}). Conforme se observa, a forma de onda aplicada à chave ativa acionada pelo *gate-driver* segue

o sinal de comando após passar pelos estágios de modulação, isolamento e demodulação.

Destaca-se, na Figura 10, um pequeno atraso na transmissão do sinal de controle: a diferença de tempo entre as subidas de v_{GF} e v_{GE} (*turn-on delay time*) e a diferença de tempo entre as descidas de v_{GF} e v_{GE} (*turn-off delay time*). Salienta-se que esses atrasos podem ser minimizados a partir da otimização do projeto de R_1 e C_1 do circuito apresentado na Figura 1 (a), respeitando o consumo de potência permitido ao conversor Classe-E (o que impacta no ganho).

4. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a proposta de um circuito de *gate-driver* isolado para o acionamento de chaves semicondutoras ativas do tipo MOSFET ou IGBT, o qual faz uso de um PT como canal alimentação e de comunicação.

Inicialmente, foi realizada uma revisão de técnicas de implementação de *gate-drivers*, focando principalmente no canal de comunicação (considerou-se apenas circuitos de *gate-driver* isolados). Identificou-se a potencialidade de emprego de um PT na aplicação. Desse modo, empregou-se um conversor Classe-E, devido às características de simplicidade e possibilidade de operação sob altas frequências de chaveamento devido à comutação ZVS, o que pode contribuir à elevação da densidade de potência do circuito.

Na sequência, apresentou-se o modelo do transformador, fazendo o levantamento dos parâmetros a partir da varredura em frequência. Para tanto, foi desenvolvido um algoritmo para estimar os parâmetros do modelo a partir das medições realizadas. Desse modo, foi possível determinar os pontos de operação do conversor Classe-E (que proporcionam os dois ganhos requeridos aos circuitos de modulação/demodulação propostos). Os resultados experimentais foram promissores, comprovando o funcionamento do circuito proposto.

AGRADECIMENTO

O presente trabalho foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001, e pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída de Energia Elétrica (INCT-GD).

REFERÊNCIAS

- Muhammad, K. S.; LU, D. D. C. Magnetically Isolated Gate Driver With Leakage Inductance Immunity. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 29, n. 4, p. 1567-1572, 2014.
- Prieto, M. J.; Días, J.; Martín, J. A. e Nuño, F. A very Simple DC/DC Converter Using Piezoelectric Transformer, *IEEE*, 2001, p-1755-1761.
- Rashid, M. H. *Power Electronics Handbook* (Third Edition). Boston: *Butterworth-Heinemann*, 2011.
- Vasic, D.; Costa, F.; Sarraute, E. A new Mosfet & IGBT gate drive insulated by a piezoelectric transformer. In *Proceedings of the 32nd Annual IEEE Power Electronics*

- Specialists Conference*, Vancouver, BC, Canada, 17–21 June 2001; Volume 3, pp. 1479–1484.
- Vasic, D.; Costa, F.; Sarraute, E. Piezoelectric Transformer for Complementary MOSFET & IGBT Gate Drive Circuits. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 21, n. 1, p. 1-9, 2006.
- Brehaut, S.; Costa, F. Gate driving of high power IGBT by wireless transmission. Conference Proceedings – IPEMC 2006: *CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2006, p.92-96.
- Brehaut, S.; Costa, F. Gate driving of high power IGBT through a Double Galvanic Insulation Transformer. *32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics (IECON)*, 2006, 6-10 Nov. 2006. p.2505-2510.
- Lin, J.J.; Lin, J.L.; Shen, W.T. Implementation of a wireless controlled gate driver. *2018 IEEE 2nd International Conference on Circuits, System and Simulation, ICCSS 2018*, 2018, p. 17-21.
- Pan, J.; et al. Efficiency and electromagnetic interference analysis of wireless power transfer for high voltage gate driver application. *ECCE 2016 - IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Proceedings. 2016. P. 1-5.
- Anthony, P.; et al. A magnetically isolated gate driver for high-speed voltage sharing in series-connected MOSFETs. *14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 2011, Aug. 30 2011-Sept. 1 2011. p.1-10.
- Kusaka, K.; et al. Isolation system with wireless power transfer for multiple gate driver supplies of a medium voltage inverter. *International Power Electronics Conference (IPEC)*, 2014, 18-21 May 2014. p.191-198.
- Nguyen, T. V.; Crebier, J. C.; Jeannin, P. Design and control of a demagnetization circuit for permanent ON OFF operation in pulse transformer gate driver. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2012, 5-9 Feb. 2012. p.2472-2479.
- Zeltner, S. Insulating IGBT driver with PCB integrated capacitive coupling elements. *6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*, 2010. p.1-6.
- Yamamoto, K.; et al. 60 GHz wireless signal transmitting gate driver for IGBT. *Proceedings of the International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*, 2015, June-2015. p. 133-136.
- Engleitner, R. “Análise estatística normalizada com variação de frequência e carga para o conversor de classe E baseado em transformadores piezoelétricos” P.573-584. *Revista Controle & Automação/vol.22*, 2011.
- Gaiotto, F. J Design de Transformadores Cerâmicos Piezoelétricos e Aplicações. *Universidade Estadual de Maringa*. 1-90, 2012.
- Rødgaard, M. S., Andersen, M. A. E., & Bruun, E. (2012). Piezoelectric transformer based power converters; design and control. *Technical University of Denmark, Department of Electrical Engineering*
- Syed, E.M.,” Analysis and Modelling of Piezoelectric Transformers,” Ph.D. *Dissertation, University of Toronto*, 2001
- Khan, J. N. Design Considerations in Using the Inverter Gate Driver Optocouplers for Variable Speed Motor Drives. *Avago Technologies*, p.1-11. 2010.
- Texas. ISO5500 - 2.5 A Isolated IGBT MOSFET Gate Driver. *Texas Instruments Inc.*, p.1-41. 2013.
- Texas. Digital Isolator Design Guide. *Texas Instruments Inc.*, p.1-19. 2014.