



Um estudo sobre drivers de acionamento de máquinas elétricas

A study on electrical machine drivers

Gabriela Esteves Barbosa¹, Tiago Henrique dos Santos², Marcelo Favoretto Castoldi³, Wesley Angelino de Souza⁴, Alessandro Goedtel⁵

RESUMO

Chaves semicondutoras são amplamente difundidas em processos de acionamentos no geral. Esse sistema é acionado por valores de tensões e correntes que microcontroladores não são capazes de fornecer, por essa razão utiliza-se um *gate-driver* visando amplificar tais sinais, mantendo características como a frequência. O objetivo é o funcionamento de diversos modelos de chaves semicondutoras, como o *Insulated Gate Bipolar Transistor* e de *gate-drivers*, e montar circuitos visando observar seu comportamento na prática. Devido às limitações de microcontroladores usuais, foi necessário um estudo sobre um *Digital Signal Processor* devido a suas capacidades de processamento e funcionalidades como *Enhanced Pulse Width Modulation* e *Analog-to-Digital Converter*. Montou-se dois circuitos empregando esses sistemas e analisou-se, com o auxílio de um osciloscópio, os valores de tensão entre coletor emissor e *gate* emissor na chave *High Side* do *gate-driver* durante o acionamento, avaliando, na prática, se os valores dispostos no *datasheet* dos componentes são condizentes com os medidos.

PALAVRAS-CHAVE: Chaves semicondutoras; *Gate driver*; IGBT.

ABSTRACT

Semiconductor switches are widely used in drive processes in general. This system is driven by voltage and current values that microcontrollers are not capable of providing, for this reason a *gate-driver* is used to amplify such signals, maintaining characteristics such as frequency. The objective is to operate various models of semiconductor switches, such as the *Insulated Gate Bipolar Transistor* and *gate drivers*, and to assemble circuits in order to observe their behavior in practice. Due to the limitations of usual microcontrollers, a study on a *Digital Signal Processor* was necessary due to its processing capabilities and features such as *Enhanced Pulse Width Modulation* and *Analog-to-Digital Converter*. Circuits were assembled using these systems and, with the aid of an oscilloscope, the voltage values between emitter collector and emitter gate on the *High Side* switch of the *gate driver* during activation were analyzed, evaluating, in practice, whether the values displayed in the *datasheet* of the components are consistent with those measured.

KEYWORDS: Semiconductor switches; *Gate driver*; IGBT.

INTRODUÇÃO

Entre os anos de 1904 e 1947 houve desenvolvimento tecnológico relacionado a acionamento de circuito. Antes, utilizava-se válvulas eletrônicas, e esse sistema era, até então, o responsável pelo funcionamento de rádios e televisores. Entretanto, esse método apresentava algumas desvantagens na sua aplicação, como aquecimento, além de necessitar de um período de calefação antes de começar a funcionar (BOYLESTAD, 2004).

¹Bolsista do PIVIC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: gabrielaesteves@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 9257116657587968.

²Docente no Curso Técnico em Eletromecânica. Instituto Federal do Paraná, Assis Chateaubriand, Paraná, Brasil. E-mail: tiago.santos@ifpr.edu.br. ID Lattes: 0721099554331575.

³Docente no Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: marcastoldi@utfpr.edu.br. ID Lattes: 6178029384175205.

⁴Docente no Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: wesleyangelino@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8594457321079718.

⁵Docente no Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: agoedtel@utfpr.edu.br. ID Lattes: 1920650157123774.



A fim de resolver essas limitações, William Shockley, John Bardeene e Walter Houser Brattain, criaram o primeiro transistor no dia 23 de dezembro de 1947 (BOYLESTAD, 2004). Até aquele momento, os semicondutores eram apenas utilizados como termistores, fotodiodos e retificadores. A descoberta foi tão importante que eles ganharam o Prêmio Nobel de Física em 1956 (OKA, 2000).

Dessa forma, várias pesquisas foram financiadas e outros componentes, com aplicabilidades semelhantes, foram sendo desenvolvidos. Entre eles, o *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT), sendo amplamente utilizado em acionamento de motores e fontes chaveadas (SOARES, 2003).

O acionamento dessas chaves semicondutoras é realizado aplicando uma diferença de potencial em dois terminais, geralmente, esse chaveamento for controlado por microcontroladores é preciso de um dispositivo que amplifique a tensão e a corrente, entretanto, mantendo o formato dos sinais. O sistema que desempenha essa função é denominado *gate-driver* (BALOGH, 2017).

Com isso, visando compreender o funcionamento de circuitos acionadores de motores elétricos e suas aplicações, objetiva-se estudar sobre os componentes utilizados para esse processo e montar um circuito a fim de aferir e observar, na prática, o comportamento estudado.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho foi baseada na análise bibliográfica, modelagem e validação experimental com abordagem predominantemente qualitativa, a fim de compreender o funcionamento e aplicação de drivers de acionamento e de chaves semicondutoras como o IGBT. Dessa forma, essa pesquisa se divide em duas principais etapas, sendo elas: estudo teórico e montagem e análise de circuitos de testes. Inicialmente, pesquisou-se na literatura sobre o funcionamento, aplicação e características das chaves semicondutoras e dos *gate drivers*. Diante disso, escolheu-se chave semicondutora modelo IRGB15B60KD e um *gate driver*, o IR2112, para ser utilizado nos testes.

A partir dos dados obtidos, foi possível montar um circuito. Com o objetivo de verificar o funcionamento descrito na teoria, foram realizados dois experimentos. Todos utilizaram cargas resistivas. No primeiro, apenas um IGBT acionado, propósito era o acionamento correto e analisar a tensão de saturação da chave semicondutora para verificar se os dados obtidos no osciloscópio eram condizentes com o *datasheet*.

E, por fim, visando utilizar as duas saídas do *driver* e, conseqüentemente, acionar dois IGBTs, calculou-se os componentes que integram um circuito *Half-bridge*, fundamentando-se matematicamente em artigos da empresa *Texas Instruments*. Com essa configuração devidamente projetada, o sistema operou com dois sinais de chaveamento complementares, ambos sinais advindos do *Digital Signal Processor* (DSP).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

TESTE 1

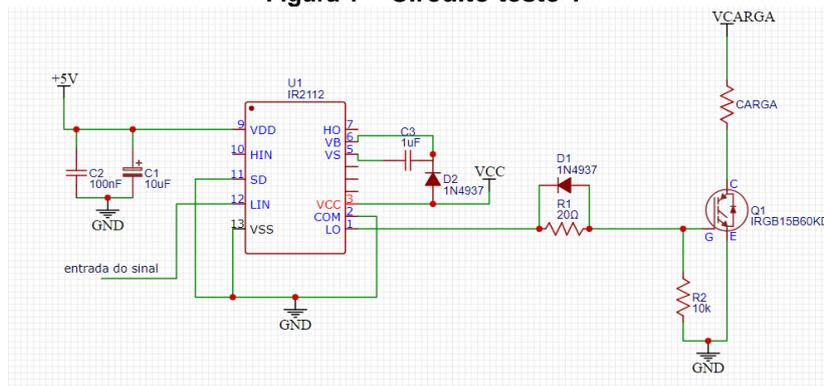
Inicialmente, com o auxílio de uma protoboard montou-se o circuito apresentado na Figura 1. O sinal de controle advindo do microcontrolador apresentava uma frequência de

980Hz, com *duty cycle* de acordo com a leitura do valor analógico de um potenciômetro. A tensão na carga foi de 60V e a tensão entre coletor e emissor (VCE) aplicado pelo *gate-driver* foi de 15V esses valores fornecidos por uma fonte de tensão de bancada. O IR2112 não funciona sem um capacitor no terminal *High side floating supply return* (VS), por este motivo utilizou-se um capacitor conectado, entretanto ele não tem função no funcionamento do dispositivo.

Durante esse experimento, houve preocupação em relação a parte de potência do circuito ser integrada a uma protoboard, pois a corrente máxima na carga seria maior que a corrente suportada pelo equipamento de montagem. Com a finalidade de resolver esse problema, uma placa de fenolite e cobre para a unidade de potência do circuito e os componentes foram, por fim, soldados. Devido a potência dissipada ser maior, usou-se um recipiente com água envolvendo a resistência.

Devido a taxa de chaveamento, utilizou-se um IGBT, IRGB15B60KD, em antiparalelo à carga, devido ao fato do modelo apresentar um diodo ultrarrápido de recuperação suave acoplado aos terminais coletor e emissor, contornando possíveis problemas relacionados a características indutivas da resistência.

Figura 1 – Circuito teste 1



Fonte: O autor (2023).

Contudo, durante o experimento, observou-se que a fonte empregada não suportava manter a tensão e a corrente necessária, por isso, identificou-se que a tensão caía conforme o *duty cycle* aumentava. Com o objetivo de contornar essa situação, o sistema operou com duas resistências em série, totalizando 30 Ω .

Durante os testes, como esperado, no instante que o sinal lógico de controle era baixo, a tensão da fonte estava sobre o IGBT. Assim, quando o sinal lógico mudava para alto, o VCE era de aproximadamente 1,8 V. Esse valor estava condizente com o previsto, apresentado no *datasheet*. Outra informação importante é que, como previsto, a tensão de saída do IR2112 foi amplificada em relação à tensão lógica de entrada, mas a frequência e formato do sinal foram mantidos.

TESTE 2

Com o propósito de realizar esse teste, foi necessária uma mudança na programação. O objetivo é utilizar duas saídas digitais do microcontrolador, visando controlar o *High* e o *Low* do *gate-driver*, acionando dois IGBTs. Esses sinais de comando operariam complementarmente, com frequência de 10 kHz, e, também, variariam o *duty cycle* do sinal do *Pulse Width Modulation* (PWM) por meio da leitura de um sinal analógico advindo de um potenciômetro, resultando, dessa maneira, em um *Half-bridge*.



Entretanto, com o microcontrolador empregado anteriormente, não foi possível desempenhar tais funcionalidades por causa das limitações na velocidade de processamento. Por isso, buscou-se alternativas para contornar esse problema. Devido a capacidade de processamento, versatilidade e disponibilidade optou-se por trabalhar com um DSP, o modelo LAUNCHXL-F28379D fornecido pela *Texas Instruments* era a melhor opção, tendo em vista o preço e a funcionalidade *Enhanced Pulse Width Modulation* (EPWM) e *Analog-to-Digital Converter* (ADC) do equipamento.

Em seguida, devido ao fato de o dispositivo novo possuir uma programação diferente comparado com o sistema utilizado anteriormente, percebeu-se a necessidade de estudar a nova interface e funcionalidades do equipamento. Com o propósito de entender o funcionamento, utilizou-se o *Technical Reference Manual* e o *Workshop* ofertado pela empresa para estudar.

De início, visou-se compreender como o sistema operava, os comandos básicos necessários em todos os projetos, tais como habilitações de interrupções e inicialização da matriz de interrupções. Todos os comandos e funções usadas eram testadas no DSP e anotadas para eventuais consultas. As principais funcionalidades abordadas foram acionamento e configuração de MUX do *General Purpose Input/Output* (GPIO), leitura ADC, interrupções e acionamento do EPWM.

Logo após estudos sobre como utilizar os registradores, iniciou-se a etapa de elaboração do protótipo e do código com os sinais complementares, gerando assim dois formatos de onda com *duty cycle* variável.

Em razão do esquemático do *Half-bridge* e, também, devido ao tempo que a capacitância interna do IGBT demora para carregar, deve-se utilizar um tempo entre os acionamentos das chaves semicondutoras, assim evitando um curto-circuito. Esse tempo é denominado *dead time*. Logo, baseado nos valores de tempo de chaveamento fornecido no *datasheet* do IGBT e a fim de evitar problemas devido a características indutivas da carga, programou-se duas vezes maior que o especificado.

O IGBT aciona se houver uma diferença de potencial entre os terminais *gate* e emissor. No *Low Out* (LO), a diferença de potencial acontece entre o sinal digital de 15V e o GND. Entretanto, no IGBT do *High Out* (HO) é preciso conectar um terminal negativo de um capacitor no emissor para alcançar a diferença de potencial para acionamento. Esse capacitor é denominado como capacitor de *Bootstrap*, calculou-se limites máximos e mínimos para esse componente, de acordo com ONSEMI (2021) e Skyworks (2021), seguindo a Eq. (1) para máximo e Eq. (2) para mínimo.

$$CB_{max} = \left(QG_{total} + (IQBS) \left(\frac{D_{max}}{FSW} + TDT \right) \right) / (1\% \cdot VG) \quad (1)$$

onde,

CB_{max} é o valor máximo de capacitor de *Bootstrap*;

QG_{total} é a carga total no *gate*;

$IQBS$ é a corrente de quiescente do *gate-driver*;

D_{max} é a razão cíclica máxima;

FSW é a frequência de chaveamento;

TDT é o tempo de *dead time*;

VG é a tensão de *gate*.

$$CB_{min} = \left(QG_{total} + (IQBS) \left(\frac{D_{max}}{FSW} + TDT \right) \right) / (VG - VG_{min}) \quad (2)$$

onde,

CB_{min} é o valor mínimo de capacitor de *Bootstrap*;
 VG_{min} é a tensão de *gate* mínima aceitável.

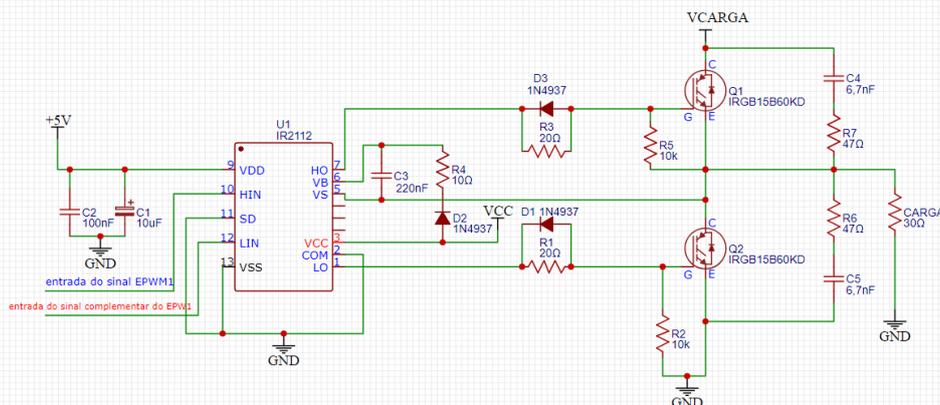
Dessa maneira, executando as contas de acordo com os valores disponíveis no *datasheet*, resultou-se em CB_{min} de 20nF e CB_{max} de 596nF, esse intervalo resultou em várias opções disponíveis no laboratório, a escolhida foi um capacitor (CB) de 220nF por ser um valor mediano entre os extremos calculados. Ainda, em série com esse capacitor é necessário um resistor, a resistência máxima é calculada pela Eq. (3).

$$RB_{max} = \left(\frac{1-D_{max}}{FSW} - TDT \right) / (3 \cdot CB) \quad (3)$$

Assim, o valor de resistor calculado foi de 14 Ω , o modelo disponível dentro desse limite era uma resistência de 10 Ω . Em seguida, foi necessário calcular um circuito *snubber* para atenuar as oscilações geradas por indutâncias parasitas do circuito, uma vez que essas oscilações podem sobrecarregar e danificar os componentes. Um circuito *snubber* é um circuito RC série em paralelo com a chave semicondutora. Os procedimentos foram realizados seguindo os métodos fornecidos pela *Texas Instruments* (TEXAS INSTRUMENTS, 2017).

Assim, com os cálculos feitos, o valor do capacitor e do Resistor mínimo é, respectivamente, 1,74nF e 27,54 Ω . Portanto, o capacitor próximo desse valor disponível é de 6,8nF e o resistor de 47 Ω . Por fim, realizando o teste final com o circuito disposto como na Figura 2.

Figura 2 – Circuito teste 2

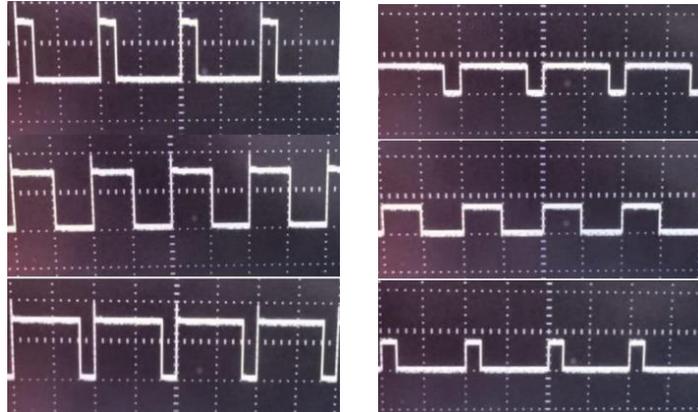


Fonte: O autor (2023).

Para esse circuito, aplicou-se uma tensão na carga de 30V. O teste foi realizado e mediu-se, com auxílio do osciloscópio, a tensão entre coletor e emissor e a tensão entre *gate* e emissor do IGBT *high*, respectivamente representados na Figura 3, variando o *duty cycle* para as seguintes porcentagens: 20%, 50% e 80%.

Os resultados obtidos foram condizentes, uma vez que se pode perceber que quando a tensão entre coletor e emissor está próxima de 30V, a chave não está acionada, ou seja, a tensão entre *gate* e emissor é 0V. Nessa situação, a tensão da fonte está sobre o IGBT. E nos momentos em que a tensão entre *gate* e emissor é 15V, a tensão VCE é de aproximadamente 1,8V. Pelo fato do osciloscópio estar graduado para 20V por divisão não é possível ver essa tensão, entretanto, como mencionado no teste anterior, os valores mensurados estavam de acordo com o previsto.

Figura 3 – Medições do teste 2



Fonte: O autor (2023).

Agradecimentos

Agradeço aos professores que me ajudaram e à UTFPR.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

BALOGH, Laszlo. **Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits**. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível

em: https://www.ti.com/lit/ml/slva618a/slva618a.pdf?ts=1694928362103&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. Acesso em: 16 set. 2023.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos: teoria de circuitos**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. ISBN 978-85-87918-22-2.

OKA, Mauricio Massazumi. **História da Eletricidade**. [S. l.], 2000. Disponível em: <https://www.lsi.usp.br/~dmi/manuais/HistoriaDaEletricidade.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2023.

ONSEMI. **Design and Application Guide of Bootstrap Circuit for High-Voltage Gate-Drive IC**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://www.onsemi.com/pub/collateral/and9674-d.pdf>. Acesso em: 25 out. 2023.

SKYWORKS. **AN486: High-Side Bootstrap Design Using ISODrivers in Power Delivery Systems**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/SL/documents/public/application-notes/AN486.pdf>. Acesso em: 25 out. 2023.

SOARES, C. F. T. et al. **O IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)**. [S. l.], 2003. Disponível em: https://www.gta.ufrj.br/grad/01_1/igtb/Pagina_IGBT.htm. Acesso em: 9 abr. 2023.

TEXAS INSTRUMENTS. **User's Guide Power Stage Designer**. [S. l.], 2017. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ug/slvubb4b/slvubb4b.pdf?ts=1695074280314&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. Acesso em: 17 set. 2023.