SÃO PAULO

FACULDADE SENAI DE TECNOLOGIA MECATRÔNICA
REVISTA BRASILEIRA DE MECATRÔNICA

ANÁLISE DE TÉCNICAS DE CHAVEAMENTO BIPOLARES E UNIPOLARES EM CONVERSORES CONFIGURADOS EM PONTE H APLICADOS EM MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

ANALYSIS OF UNIPOLAR AND BIPOLAR SWITCHING TECHNIQUES IN H-BRIDGE CONVERTERS APPLIED TO DC MOTORS

Lucas Felfoldi Santos [1], [i]
Sérgio Luiz Volpiano [2], [ii]
Paulo Sebastião Ladivez [3], [iii]

RESUMO

As técnicas de chaveamento para conversores consistem em modos de acionamentos de uma máquina elétrica de forma eletrônica. Neste caso em específico, os chaveamentos bipolares e unipolares estão focados na comutação de chaves eletrônicas para controle de motores de corrente contínua através de seu enrolamento de armadura. Um sistema de potência configurado em ponte completa, conhecido também como "ponte H" utiliza pares de funcionamento, que podem ser comutados de maneira independente ou complementar. Desta forma, reações eletromecânicas diversas podem ser observadas no motor, que vão desde uma frenagem acelerada ou até estabilidade da velocidade angular. Alguns destes comportamentos podem ser simulados via software. Este artigo traz uma revisão fundamental sobre o motor de corrente contínua de ímãs permanentes e também sobre o princípio de chaveamento dos controladores eletrônicos, o PWM (Pulse Width Modulation, que é traduzido por Modulação por Largura de Pulso). Apoiado por pesquisas, este artigo também detalha a simulação e o resultado prático dos diversos tipos de chaveamentos listados para esta configuração de potência eletrônica.

ABSTRACT

The switching techniques for converters consist of ways to drive an electric machine electronically. In this specific case, the bipolar and unipolar techniques are focused on the activation of electronic switches to control direct current motors through their armature winding. A full bridge power system configured, also known as "H bridge", uses operating

[1] Pós-graduando em Automação Industrial na Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica. E-mail: lucas.felfoldi@hotmail.com
[2] Mestre em Engenharia Elétrica. Professor da Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica. E-mail: sergio.volpiano@sp.senai.br
[3] Especialista em Tecnologias e Sistemas de Informação. Professor da Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica. E-mail: paulo.ladivez@sp.senai.br

pairs, which can be switched independently or complementarily. In this way, different electromechanical reactions can be observed in the motor, ranging from accelerated braking or even angular speed stability. Some of these behaviors can be simulated by software. This article provides a fundamental review on the permanent magnet DC motor and also on the switching principle of electronic controllers, the PWM (Pulse Width Modulation). Through research, this article also details the simulation and the practical result of the various types of switching listed for this electronic power configuration.

1 INTRODUÇÃO

Embora o controle de um motor de corrente contínua possa ser considerado simples para a maioria das aplicações, existem casos na qual se busca o melhor rendimento do circuito de potência empregado no acionamento da máquina, possibilitando frenagens rápidas e controle inercial; ou ainda, exige-se estabilidade de velocidade angular do motor, aplicando circuitos de realimentação que respondam de maneira veloz. Por este motivo, a análise das técnicas de chaveamento e acionamento dos motores de corrente contínua são viáveis. Além disso, a base para qualquer controle eletrônico mais complexo depende destes fundamentos, inclusive, para diversos outros tipos de motores, como é descrito por Gaarlapati (2009) empregando em motores de passo e Ohm (2002), utilizando em motores síncronos de ímãs permanentes e sem escovas.

De acordo com o material de aplicações da Texas Instruments Inc. (2009), um circuito de potência configurado em ponte H permite o controle de circulação de corrente elétrica em ambas as direções através de uma carga indutiva, como por exemplo um motor de corrente contínua. Uma vez que esta máquina possui características eletromecânicas, um efeito gerador acontece no enrolamento de armadura. Portanto, um circuito apropriado é necessário para o acionamento adequado dessas máquinas elétricas.

Um circuito de potência híbrido pode proporcionar diversas maneiras de comutação de uma carga para tração além de conseguir lidar com os momentos geradores da máquina de corrente contínua, como apoia o descritivo de Gaarlapati (2019), detalhando os momentos de descargas indutivas síncronas e assíncronas.

A tensão média mensurada nos terminais de armadura de um motor de corrente contínua é composta por uma tensão externa aplicada por uma fonte de alimentação somada à uma tensão interna gerada pelo motor em movimento. Quando controlamos a tensão externa aplicada, nos referimos ao controle de tração; quanto ao controle da tensão interna gerada pela máquina, estamos nos referindo à frenagem.

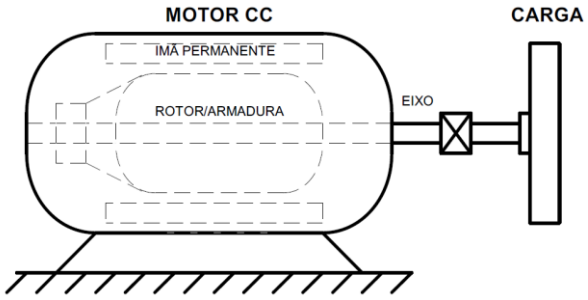
As próximas sessões deste artigo detalham o contexto teórico do motor de corrente contínua, descrevem o princípio da modulação por largura de pulso utilizada em todas as técnicas de comutação eletrônica e representam resultados práticos e simulados dos principais métodos de chaveamento possíveis de serem aplicados em um circuito híbrido em ponte H.

2 CONTEXTO TEÓRICO

2.1 Características eletromecânicas do sistema

A implementação do acionamento eletrônico foca no controle de um conjunto eletromecânico, formado por um motor de corrente contínua de imãs permanentes e uma carga com dimensões conhecidas acoplada em seu eixo, como representado na figura 1:

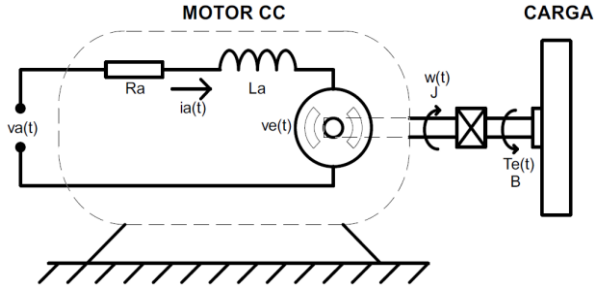
Figura 1 - Representação mecânica do conjunto



Fonte: Elaborado pelo autor

O conjunto eletromecânico acima também pode ser estendido como na figura 2:

Figura 2 - Representação elétrica do conjunto



Fonte: Elaborado pelo autor adaptado de Volpiano (2013, p.222)

2.1.1 Características elétricas

O motor de corrente contínua com ímãs permanentes possui um enrolamento de armadura envolto em uma massa composta de chapas de ferro magnético, representado na Figura 1. Já na figura 2, observa-se que este enrolamento possui resistência (Ra, mensurada em Ohms) e indutância elétrica (La, mensurada em Henry).

Volpiano (2013, p.221) comenta que ao variar tensão elétrica (va(t), mensurada em Volts) nos terminais de armadura, obtém-se rotação variável no eixo do motor de corrente contínua. A parte resistiva irá limitar a intensidade de corrente (ia(t), mensurada em Amperes) que será acumulada na componente indutiva. No instante em que o motor é desconectado da fonte de tensão, o indutor tende a descarregar-se pelo circuito eletrônico que o comuta. Arrabaça (2013, p.24) explica que o comportamento de um indutor ideal “funciona como um bipolo elétrico gerador (fonte de corrente)”.

2.1.2 Características Mecânicas

Uma máquina elétrica rotativa transforma energia elétrica em mecânica quando é alimentada, como sugere Nascimento (2011, p.15). A circulação de corrente pelo rotor gera fluxo magnético, interagindo com os ímãs permanentes alocados na carcaça do motor, promovendo a rotação do eixo, como aponta Condit (2004, p.1). Desta forma, parâmetros como velocidade angular (w(t), mensurada em radianos por segundo, orientada pela Figura 2), torque mecânico (T(t), mensurado em Newton metro), momento de inércia (J, mensurado por quilograma metro quadrado) e atrito (B, mensurado em Newton metro segundo por radianos) serão relevantes como características mecânicas.

O atrito é um atributo que depende da velocidade angular, e restringe a movimentação do eixo. Então, quanto maior o atrito do sistema, maior o torque mecânico que o motor irá solicitar para se movimentar.

O torque mecânico é uma variável proporcionalmente linear à corrente elétrica, relata Condit (2004, p.2). Logo, uma constante de torque (caracterizada pela forma construtiva do motor) é aplicada na conversão. Quanto maior o torque aplicado ao eixo do motor, maior a corrente solicitada pelo enrolamento de armadura.

Ao girar, o rotor arrasta consigo toda a carga acoplada. Portanto, haverá um momento de inércia no sistema no sentido de rotação do eixo que dependerá das massas e das formas geométricas, da carga e do rotor. Havendo momento de inércia, todo o conjunto tenderá a se manter em movimento.

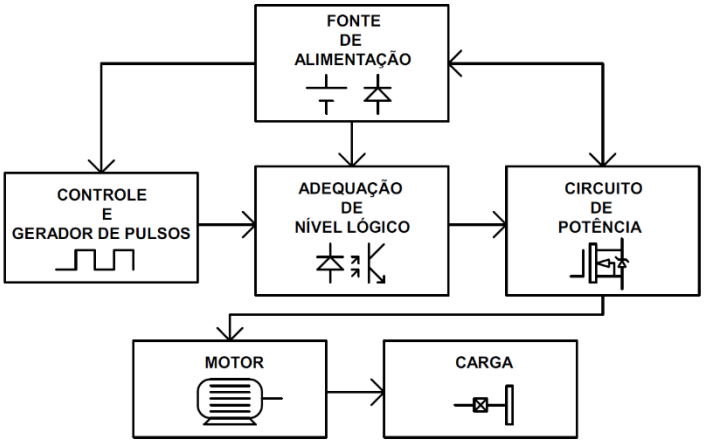
Volpiano (2013, p.227) explica que um motor de corrente contínua pode operar como uma máquina de tração (motor) ou como um gerador. Quando houver movimentação do eixo e o motor for desconectado da fonte de tensão, o motor passará a trabalhar como gerador, induzindo uma força contra eletromotriz (ve(t), mensurada em Volts, referenciada pela Figura 2) em seus terminais de armadura. Neste caso, a máquina estará em estado de geração de energia elétrica. Esta tensão gerada pelo motor é proporcional à velocidade angular do rotor e através de uma constante de força contra eletromotriz (também caracterizada pela construção do motor) é possível realizar a conversão mecânica em elétrica.

O circuito eletrônico precisa ser capaz de fornecer potência elétrica ao motor e também conseguir lidar com qualquer efeito gerador da máquina elétrica, independente do sentido de giro.

2.2 Topologia do circuito eletroeletrônico

O circuito eletroeletrônico capaz de controlar o sistema que envolve motor e carga é representado na Figura 3:

Figura 3 – Diagrama simplificado do conjunto eletroeletrônico



Fonte: Elaborado pelo autor

2.2.1 Fonte de alimentação

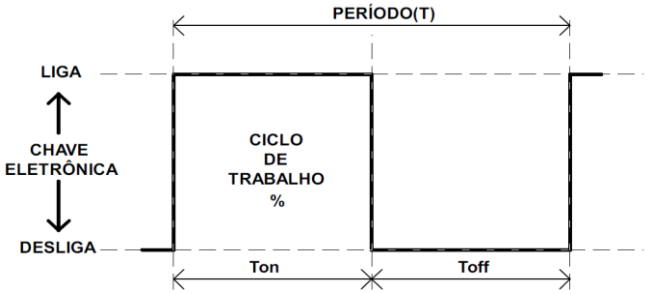
É a parte do circuito que converte tensão alternada da rede em tensão contínua, alimentando todos os demais módulos. É composta por um transformador, circuito retificador em ponte, capacitores de filtragem, reguladores de tensão e circuito de segurança de sobretensão. Alternativamente, utiliza-se baterias; neste caso, o transformador e o retificador não são necessários.

2.2.2 Controle e gerador de pulsos

No controle e gerador de pulsos é possível comutar de diferentes formas o circuito de potência, que por sua vez, responderá aplicando tensão elétrica no motor. É composto por um microcontrolador capaz de gerar canais independentes de modulação por largura de pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*), além de monitorar todo o sistema de acionamentos e sensores.

O PWM é uma técnica de modulação gerada por um circuito integrado dedicado ou um microcontrolador utilizada para fracionar a tensão da fonte de alimentação para a armadura do motor, controlando sua velocidade angular. Assim, é possível variar um valor médio de tensão aplicado, ligando e desligando rapidamente uma ou várias chaves eletrônicas.

Figura 4 - Representação da modulação por largura de pulso



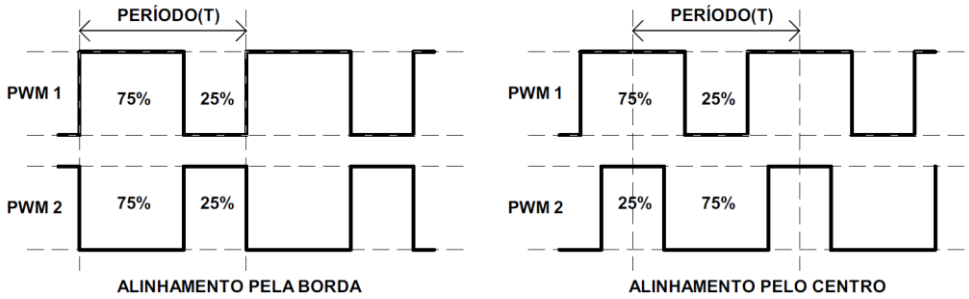
Fonte: Elaborado pelo autor e adaptado de Volpiano (2013, p.242)

A Figura 4 ilustra que o PWM possui um período (e frequência) constante, como explica Ahmed (2000, p.312). Este tempo é dividido entre o período em que a chave eletrônica está

ativa (Ton, mensurado em segundos), e outro na qual ela se desliga (Toff, também mensurado em segundos). A proporção entre o tempo ligado e o período total do PWM determina o ciclo de trabalho ou razão cíclica (em percentual). Aumentar o ciclo de trabalho implicará em um maior valor médio de tensão aplicado à armadura da máquina elétrica.

Em alguns casos, se torna necessário a comutação invertida, utilizando o período de desligamento Toff no acionamento de uma chave complementar. Também é comum ser necessário mais de um sinal PWM para comutação em ponte. Neste caso, existem maneiras de relaciona-los, onde as mais comuns são representadas na Figura 5:

Figura 5 - Alinhamento de pulsos



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 5 mostra duas maneiras mais comuns de alinhar sinais PWM; no primeiro caso, alinha-se os ciclos pela borda, onde o início do período T é o ponto comum entre os sinais. Já na segunda situação, o ciclo PWM é alinhado pelo momento exato onde a metade do período ligado (Ton) dos dois sinais se coincidem, como explica o manual de referência de Microchip Technology Inc (2017).

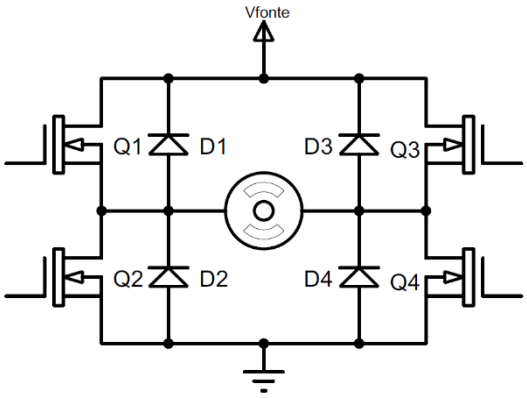
2.2.3 Adequação de nível lógico

O circuito de controle gera pulsos de baixa tensão que precisam ser amplificados para que o circuito de potência comute adequadamente. Então, nesta etapa, além de adequar o sinal para que as chaves eletrônicas possam ser ativadas, ocorre a isolação galvânica, uma vez que o circuito de potência trabalha com tensões e correntes inadequadas para um microcontrolador lidar, protegendo também a interação humana contra qualquer falha perigosa que o sistema possa ter, como explica Sapre (2018, p.3).

2.2.4 Circuito de potência

O circuito de potência possibilita o acionamento bidirecional de um motor de corrente contínua e é chamado por Condit (2004, p.4) e Volpiano (2013, p.252) de “Ponte H”. É constituído por quatro chaves de potência com diodos embutidos em seu corpo configurados em ponte, como demonstrado na Figura 6:

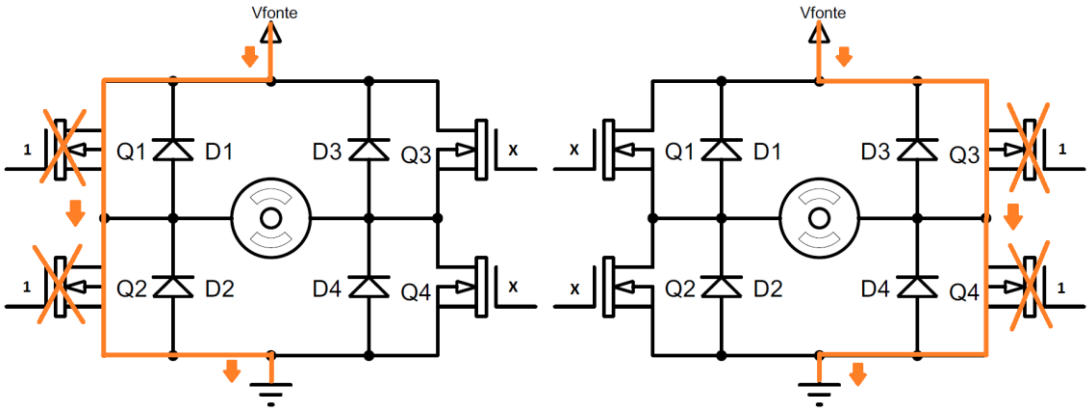
Figura 6 - Configuração do circuito de potência em ponte H



Fonte: Elaborado pelo autor e adaptado de Condit (2004, p.4)

As chaves de potência podem ser transistores bipolares de junção (BJT – *Bipolar Juction Transistor*), transistores de efeito de campo (FET – *Field Effect Transistor*) ou ainda transistores bipolares de porta isolada (IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistor*). São comutadas através de sinais lógicos em seus terminais de gatilho (ou base), e permitem diversos modos de operação. Apesar da versatilidade, existem condições na qual a ponte H pode ser danificada de maneira imediata, como exemplificado na figura 7:

Figura 7 – Condições proibidas de acionamento da ponte H

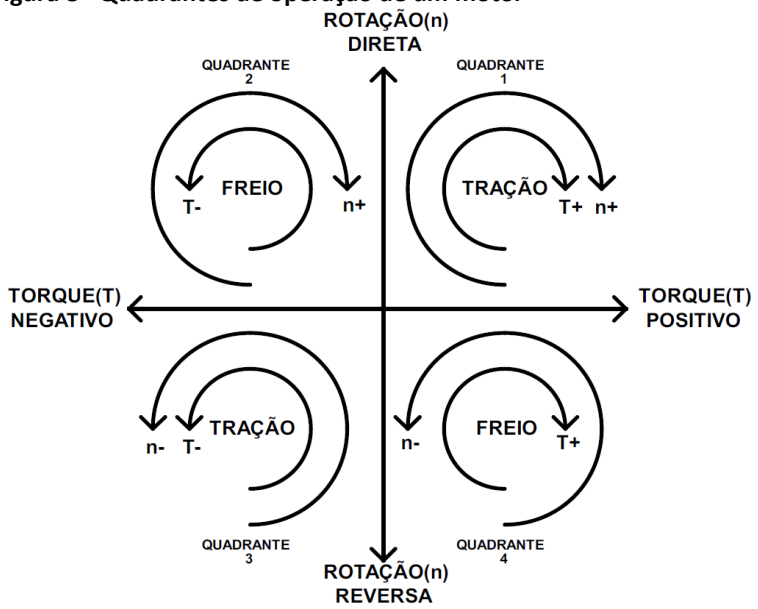


Fonte: Elaborado pelo autor

2.4 Quadrantes de operação do motor de corrente contínua

Os quadrantes de operação do motor definem seu estado de funcionamento. Tendo em vista que o motor de corrente contínua pode ter dois sentidos de giro, podemos definir os seguintes quadrantes possíveis:

Figura 8 - Quadrantes de operação de um motor



Fonte: Elaborado pelo autor e adaptado de Volpiano (2013, p.228)

Embora os motores de corrente contínua funcionem em quatro quadrantes, nem todos os tipos de controladores possibilitam controle absoluto da máquina, como discutido nas próximas subseções.

2.4.1 Um quadrante

Quando o controlador é capaz de tracionar o motor em apenas um sentido de giro e não possibilitam uma frenagem controlada eletronicamente, o circuito de potência opera em um quadrante (representados na Figura 8 pelos quadrantes 1 OU 3), como explica Wilson (2012). Normalmente são controles de baixo custo, uma vez que possuem menos componentes de potência e necessitam de um único sinal PWM para acionamento.

2.4.2 Dois quadrantes

Wilson (2012) também sugere que, de forma semelhante ao controlador operante em um único quadrante, a operação em dois quadrantes também não possibilita a frenagem eletrônica de um motor. Porém, este tipo de controle torna possível a reversão do sentido de giro (quadrantes 1 E 3). Possui circuito de potência de custo mais elevado se compararmos com o circuito de um quadrante, mas ainda assim, depende de um único sinal PWM para acionamento. Trabalhar em um e dois quadrantes não possibilitam parar a rotação do motor de forma instantânea, já que dependem da inércia e do atrito do sistema para reduzirem a velocidade angular da máquina.

2.4.3 Quatro quadrantes

Operar uma máquina em quatro quadrantes possibilita controlar o motor em qualquer sentido de rotação (quadrantes 1 E 3). Em momentos de frenagem (quadrantes 2 E 4), o circuito eletrônico é capaz de auxiliar a parada do motor, uma vez que atuam manipulando a força contra eletromotriz da máquina. São controles de custo mais elevado, comparando com os de um e dois quadrantes, uma vez que necessitam de robustez no circuito de potência,

sensoriamento para monitorar intensidades de frenagem (operação em malha fechada) e, como requisito, precisam ter dois ou quatro sinais PWM (algumas vezes, defasados no tempo, uns em relação aos outros). Para este modo de operação, o circuito eletrônico permite a regeneração de energia para o circuito da fonte. (WILSON, 2012).

2.5 Formas de recirculação de energia

O controlador utiliza um circuito de potência que depende de comandos que ligam e desligam de forma ordenada, dependendo do tipo de resposta que desejamos que o motor tenha. Nos próximos itens desta seção, serão descritos os comportamentos de descarga da parte indutiva do motor, e é apoiado pelo material de aplicações da Texas Instruments Inc. (2009) e por Gaarlapati (2019):

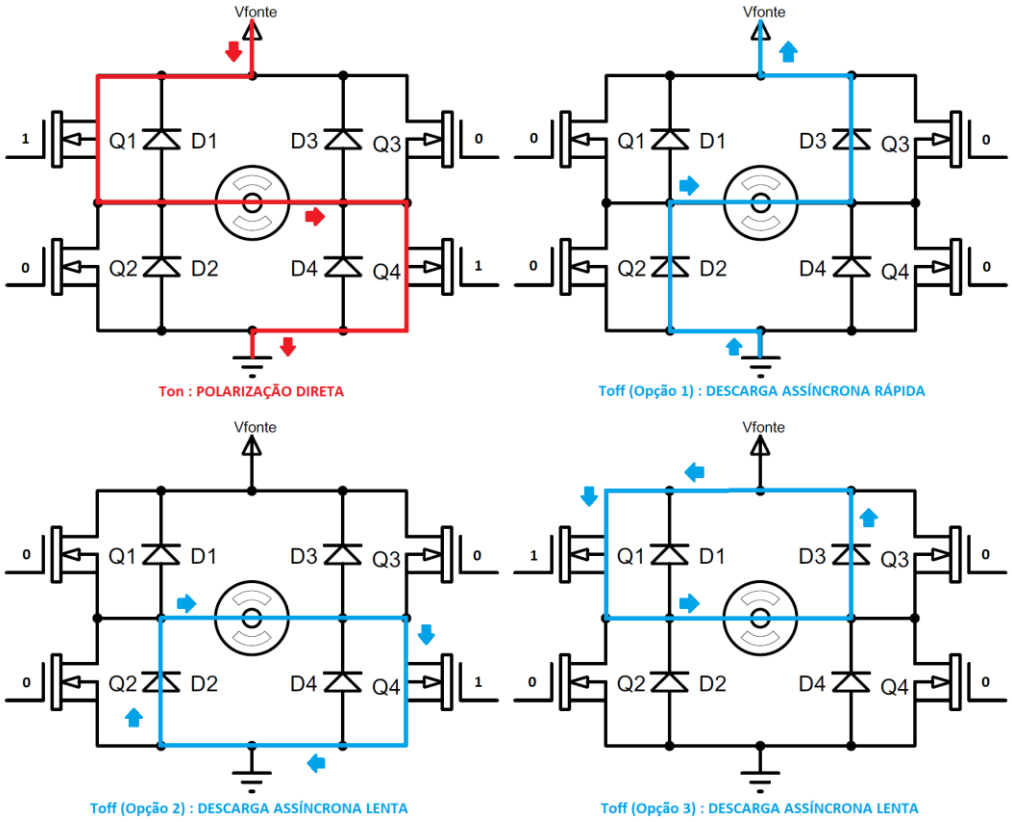
2.5.1 Descarga indutiva assíncrona

Ocorre sempre nos momentos de desligamento Toff e através dos diodos de corpo da chave de potência. (TEXAS INSTRUMENTS INC., 2009, p.3). Depois de ser carregado de corrente no período Ton, ao ser desligado, o indutor reage tentando manter a corrente estável, e para isso, eleva sua tensão instantaneamente. Enquanto essa amplitude for mais alta do que a tensão da fonte, haverá diferença de potencial nos diodos de corpo da chave de potência, tendo um ligeiro retorno de corrente para a fonte. Caso a fonte seja uma bateria, é neste momento que ela recebe carga, aumentando sua autonomia. Quando a armadura possuir tensão inferior à tensão da fonte, não há mais retorno de corrente, e então, o motor permanece girando como roda-livre.

Este momento de descarga é chamado de assíncrono pois atua sempre de forma natural e sem necessidade de comutar qualquer chave de potência para forçar a descarga indutiva. Está presente em todos os tipos de controladores, seja de um, dois ou quatro quadrantes.

A Figura 9 ilustra a situação de descarga assíncrona:

Figura 9 – Possibilidades de descargas assíncronas no sentido direto de giro



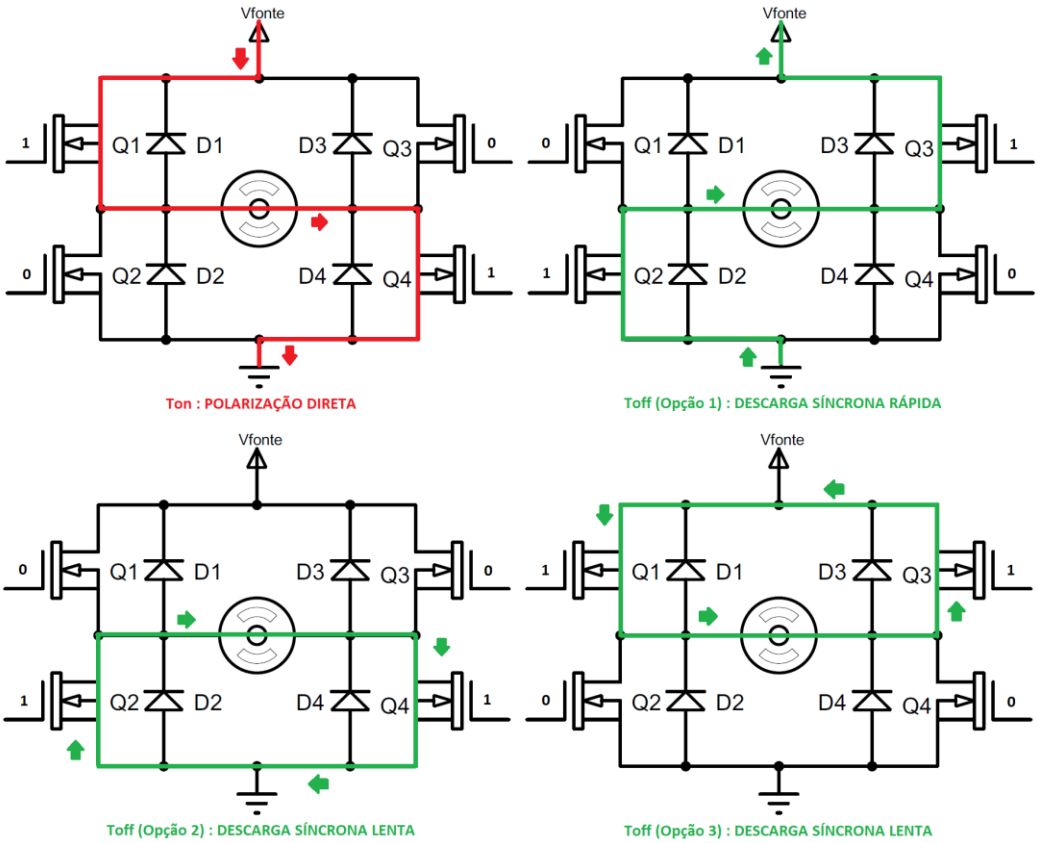
Fonte: Elaborado pelo autor

2.5.2 Descarga indutiva síncrona

Ainda no momento desligado e após a atuação da descarga assíncrona pelos diodos de corpo da chave de potência, haverá carga no indutor, proveniente da força contra eletromotriz gerada na movimentação do rotor. Como opção, podemos forçar a descarga indutiva através das chaves de potência. Quando isso ocorre, o rotor recebe uma frenagem, possibilitando respostas mais imediatas ao controle e variação de velocidade. É impossível dizer que um acionamento possui puramente descargas síncronas, uma vez que é necessário um "tempo morto" entra a troca de estados dos chaveamentos para garantir que as chaves de potência se desliguem completamente e não colidam, causando uma condição proibida. Portanto, todo acionamento com descarga síncrona possui um tempo de descarga assíncrona. (TEXAS INSTRUMENTS INC., 2009, p.3).

A descarga síncrona é característica dos controladores operantes em dois e quatro quadrantes, e está associada à frenagem do motor. Recebe este nome pois atua de maneira controlada e em sincronismo no período do PWM, forçando sempre a condução contrária de pelo menos uma das chaves de potência. A Figura 10 ilustra como é possível haver descargas síncronas:

Figura 10 - Possibilidades de descargas síncronas no sentido direto de giro

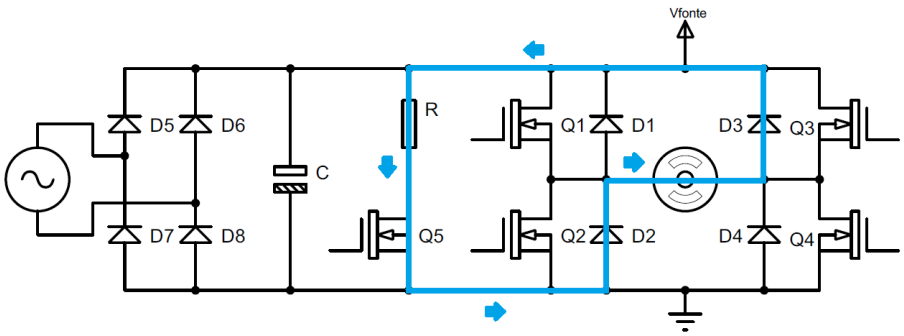


Fonte: Elaborado pelo autor

2.5.3 Descarga por excesso de nível da fonte

Conforme as descargas indutivas providenciam o retorno de corrente para a fonte de alimentação, o capacitor de filtro irá armazenar carga em forma de tensão. (VOLPIANO, 2013, p.252). Pode ocorrer tanto em um ou dois quadrantes (uma vez que o motor pode ser arrastado e pegar velocidade maior do que seu nominal) ou em quatro quadrantes. Com isso, haverá situações onde a fonte se encontrará em condições perigosas e indesejadas. Para este caso, uma resistência deve ser acionada até que a tensão do barramento se estabilize. A Figura 11 ilustra o diagrama básico do circuito:

Figura 11 - Descarga por elevação de tensão da fonte

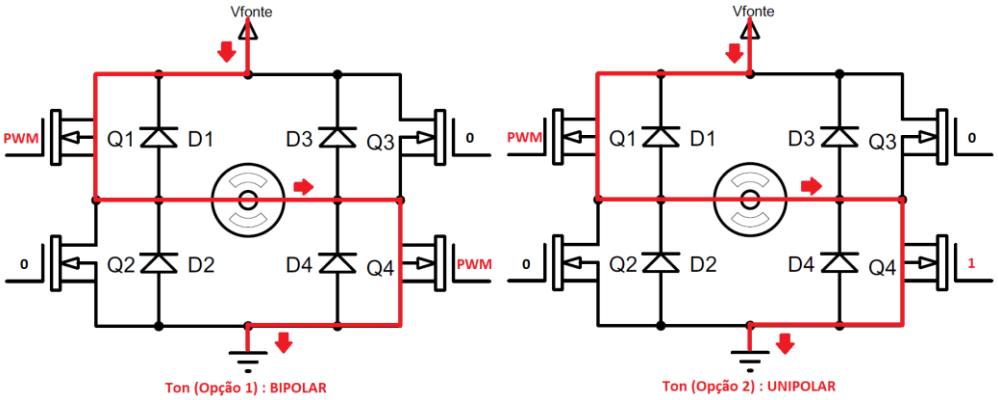


Fonte: Elaborado pelo autor e adaptado de Volpiano (2013, p.253)

2.6 Polarização do chaveamento

Ohm (2002, p.3) descreve diferentes formas de comutar as chaves de potência, incluindo formas bipolares e unipolares; a polarização do chaveamento determina a amplitude na qual a tensão de armadura irá trabalhar. Com o mesmo circuito eletrônico, é possível obter dois tipos de polarização, como ilustra a Figura 12:

Figura 12 - Polarização no sentido direto de giro nos tipos bipolar e unipolar



Fonte: Elaborado pelo autor

2.6.1 Chaveamento bipolar

No chaveamento bipolar, o sinal de PWM é conduzido para duas chaves opostas simultaneamente; desta forma, a armadura recebe a tensão da fonte positiva Vfonte no momento em que está ligado; quando desligado, o indutor inverte sua polaridade, e é possível mensurar uma tensão negativa. Portanto, a tensão média aplicada ao motor estará entre Vfonte e –Vfonte, como relata Wilson (2012). Um detalhe importante é que, para fins de dimensionamento, a tensão suportada pelas chaves de potência precisam ser de no mínimo duas vezes a tensão da fonte. Este método permite retorno de corrente para fonte, aumentando a autonomia do sistema caso uma bateria esteja instalada.

2.6.2 Chaveamento unipolar

No chaveamento unipolar, o sinal PWM é conduzido apenas à uma das chaves, enquanto a oposta fica ativa permanentemente. Com isso, o indutor mantém sua referência ao ponto zero da fonte, evitando a inversão de polaridade. Este método só se torna regenerativo caso o motor gire em uma velocidade suficiente para gerar uma força contra eletromotriz maior do que ele é alimentado. Portanto, a amplitude máxima da tensão de armadura estará sempre entre terra e Vfonte, reduzindo custos de dimensionamento do módulo de potência.

2.7 Pares de comutação

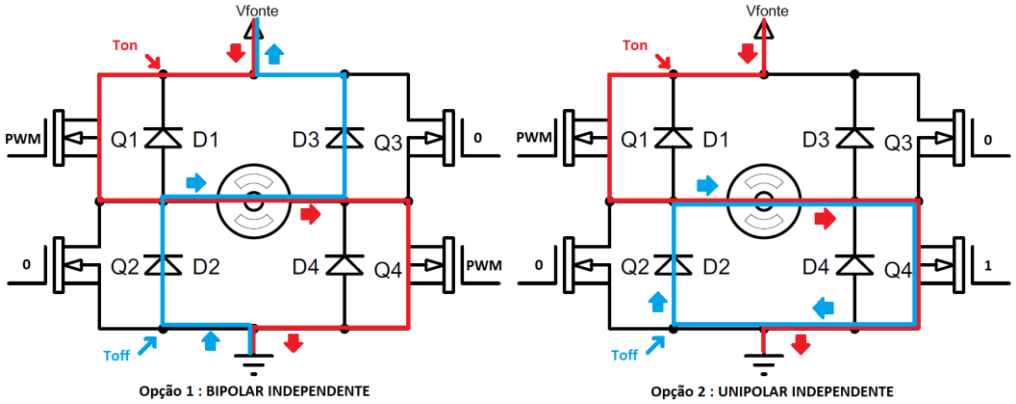
As chaves de potência Q1 e Q2 formam um par complementar, assim como as chaves Q3 e Q4 formam outro. Como regra essencial, as chaves pertencentes ao mesmo par nunca devem ser ativadas ao mesmo tempo, caso contrário, um curto circuito será formado entre Vfonte e o terra. Diferentes maneiras de comutação podem ser aplicadas, e o manual de referência da Microchip Technology Inc (2017 p.70) exemplifica a criação das principais em

microcontroladores de 16 bits. Para a aplicação em controle de motores de corrente contínua, são usuais duas maneiras de comutação do par de potência, como descrito nas próximas subseções.

2.7.1 Comutação independente

Está associada ao tipo de operação em um e dois quadrantes (sem frenagem), pois não possibilita o controle de frenagem do rotor, a menos que o excesso de tensão da fonte force uma comutação de segurança, como mostrado na figura 11. A comutação é realizada em apenas uma das chaves de um par de potência, como mostra a Figura 13:

Figura 13 - Comutação independente bipolar e unipolar, no sentido direto de giro

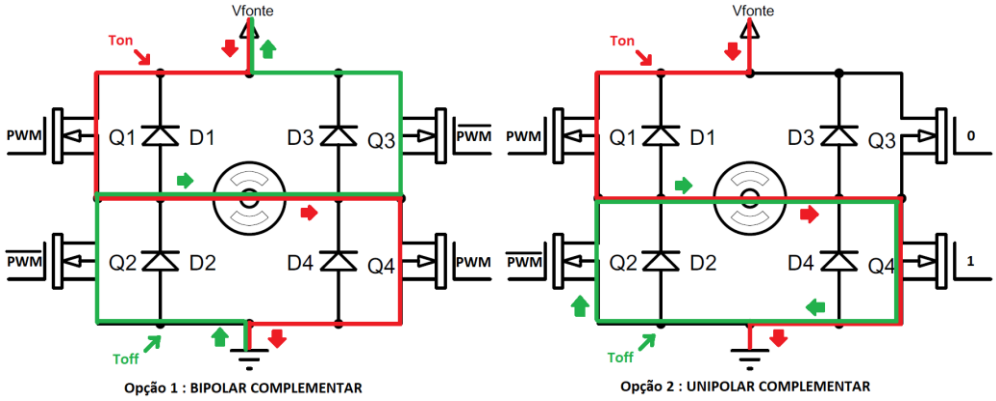


Fonte: Elaborado pelo autor e adaptado de Gaarlapati (2019, p.22)

2.7.2 Comutação complementar

É característico dos conversores de controle em quatro quadrantes, uma vez que o par complementar estará ativo sempre em tempos opostos. A comutação complementar promove controle de força contra eletromotriz e como consequência, frenagem no rotor. Este tipo de comutação pode ser representado na Figura 14:

Figura 14 - Comutação complementar bipolar e unipolar, no sentido direto de giro



Fonte: Elaborado pelo autor e adaptado de Gaarlapati (2019, p.23 e p.24)

3 ANÁLISE FUNCIONAL DAS TÉCNICAS DE CHAVEAMENTO

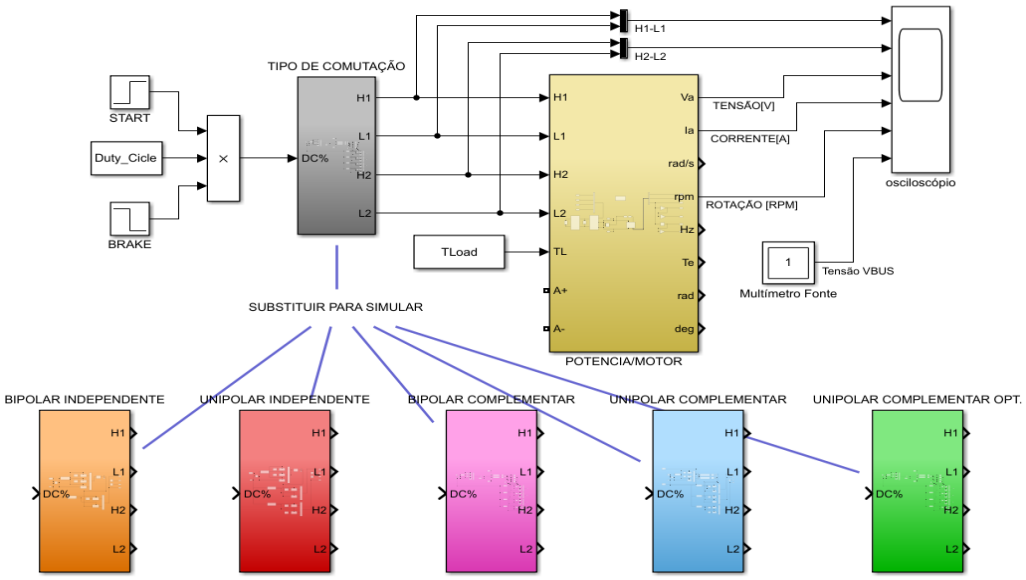
Esta seção destina-se ao detalhamento das características de cinco formas diferentes de controle para motores de corrente contínua em ponte H. Cada tipo de chaveamento foi

modelado e simulado no software Matlab & Simulink R2018a. A simulação padrão consiste em aplicar sinal PWM aos controladores com 50% de ciclo de trabalho; após 15 segundos, o controlador aplica 0,1% de ciclo de trabalho, forçando o motor ao desligamento (ou frenagem, para os conversores de quatro quadrantes). As simulações são realizadas aplicando torque nominal (à 50% da rotação nominal) do motor escolhido. Além dos valores simulados, serão apresentados os resultados de uma aplicação real construída para este estudo.

3.1 O modelo de simulação

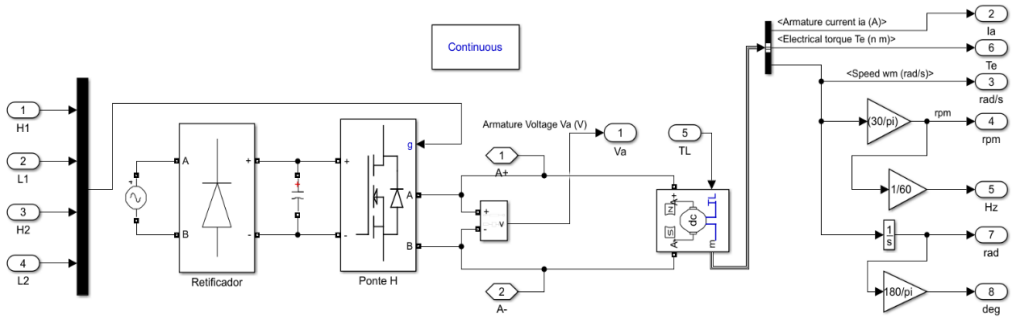
Consiste em um diagrama de blocos funcionais com modelos matemáticos embutidos, que ao aplicar valores de entrada reagem com valores de saída. A Figura 15 representa a simulação geral, enquanto a Figura 16 detalha o módulo de potência:

Figura 15 - Blocos funcionais da simulação geral



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 16 - Blocos funcionais do módulo de potência/motor



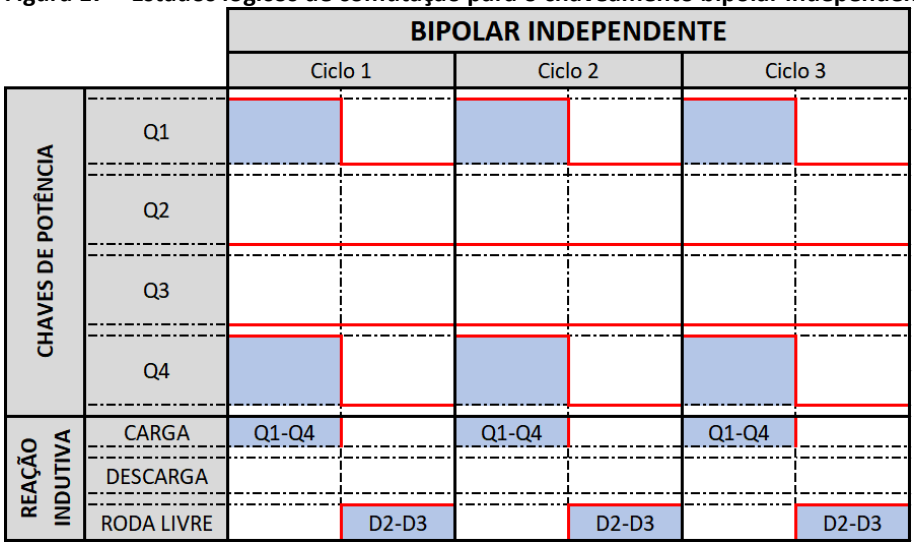
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 Chaveamento bipolar com comutação independente

Neste primeiro caso, um único sinal de chaveamento PWM é aplicado nas chaves de potência Q1 e Q4 simultaneamente e as chaves Q2 e Q3 permanecem sempre desligadas (para movimentação no sentido direto de rotação), e é detalhado por Gaarlapati (2019. P.22). Por utilizar uma comutação do tipo independente, não ocorre controle de força contra eletromotriz (não possibilitando frenagem), a menos que a tensão gerada seja maior do que

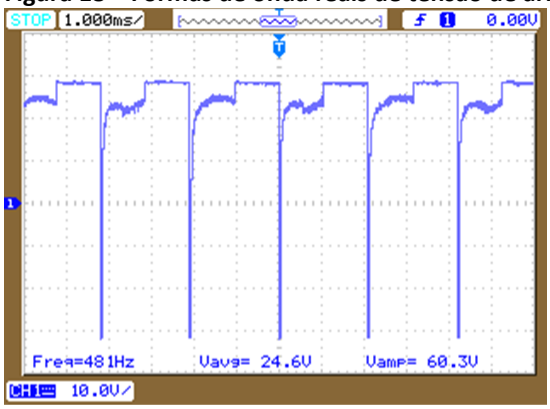
a fonte de alimentação. Este controle opera em dois quadrantes e a tensão média aplicada à armadura do motor estará sempre entre Vfonte e -Vfonte. A Figura 17 representa os estados lógicos das chaves de potência para o chaveamento bipolar independente; a Figura 18 expõe a captura de um controlador real em regime permanente; as Figuras 19 e 20 são resultados simulados:

Figura 17 – Estados lógicos de comutação para o chaveamento bipolar independente

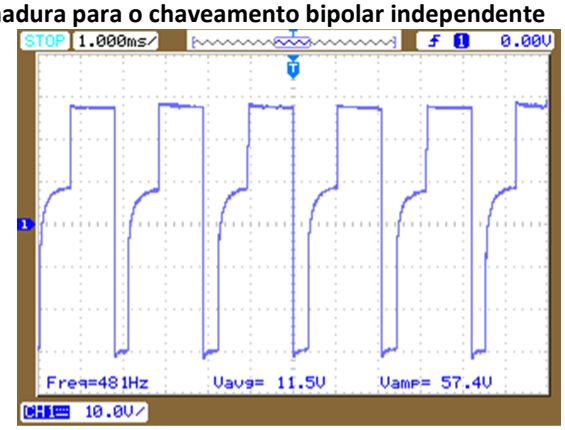


Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 18 – Formas de onda reais de tensão de armadura para o chaveamento bipolar independente



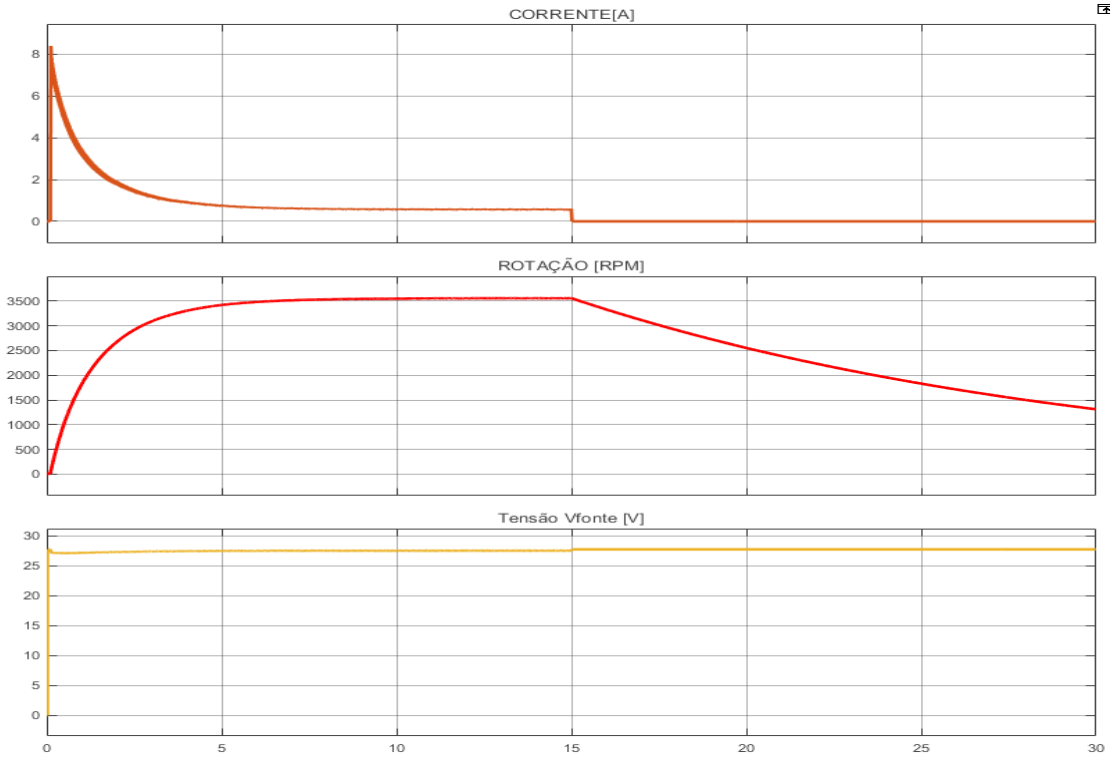
BIPOLAR INDEPENDENTE
CICLO : 50%
SEM CARGA
ROTAÇÃO DO MOTOR: 3560 rpm



BIPOLAR INDEPENDENTE
CICLO : 50%
COM CARGA
ROTAÇÃO DO MOTOR: 1150 rpm

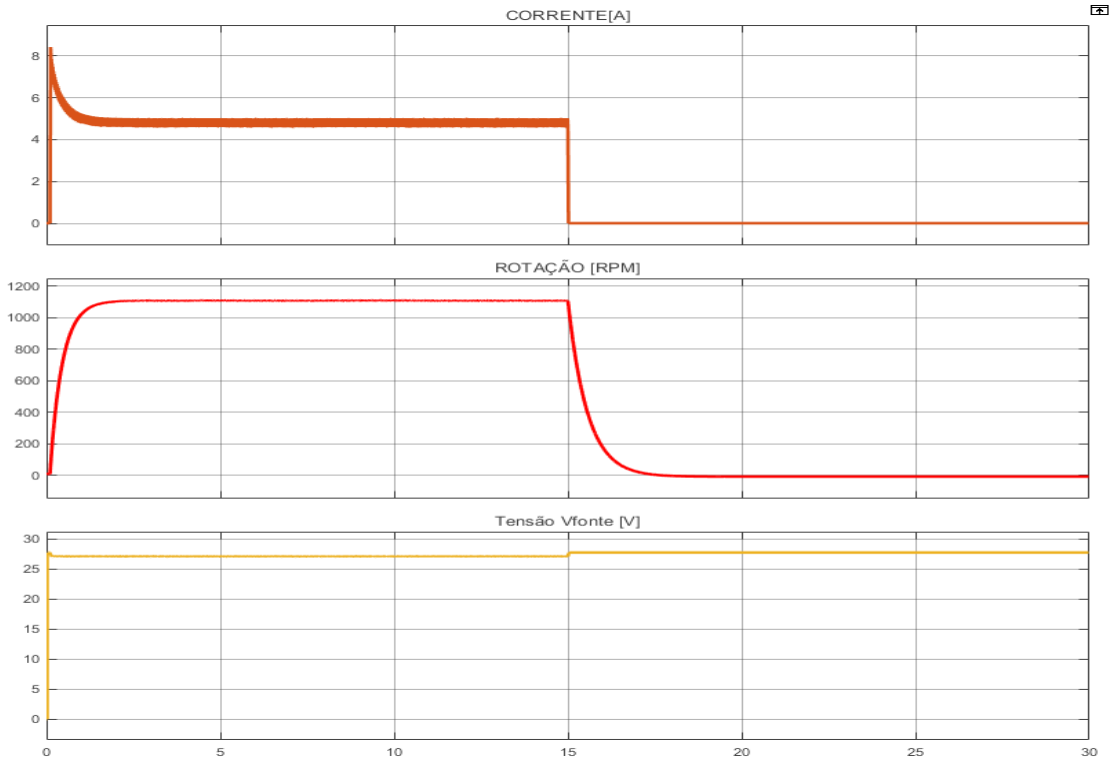
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 – Simulação de resposta do chaveamento bipolar independente, motor em vazio (tempo em segundos)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20 – Simulação de resposta do chaveamento bipolar independente, motor com carga nominal (tempo em segundos)



Fonte: Elaborado pelo autor

O chaveamento bipolar independente possui tensão média de armadura composta pela tensão chaveada positiva da fonte, tensão negativa da descarga do indutor e pela tensão gerada (contra eletromotriz). Portanto, quando a razão cíclica está por volta de 50% de trabalho, a tensão positiva tende a se anular com a negativa, sobrando então a força contra eletromotriz como saldo positivo de tensão média. Conforme aplicamos torque no eixo do motor, a tensão contra eletromotriz se consome.

Por depender demais da força contra eletromotriz, este tipo de chaveamento mostra grande perda de rotação quando a carga é aplicada. Todavia, as correntes de partida e de travamento são bem reduzidas. A vantagem deste controlador é que o circuito eletrônico de potência e controle são bem simplificados. O resultado da simulação nos confirma a baixa resposta a variações de velocidade, uma vez que a operação atua em dois quadrantes (sem frenagem). A devolução de energia para a fonte é muito baixa (e só ocorrerá efetivamente quando houver arraste da carga, onde o motor irá gerar mais tensão do que a aplicada pela fonte).

Figura 21 – Resumo das características do chaveamento bipolar independente

CHAVEAMENTO BIPOLAR INDEPENDENTE	
Polaridade	Bipolar
Comutação	Independente, PWM em duas chaves
Quadrantes de Operação	2 quadrantes
Descarga Indutiva	Assíncrona Rápida
Resposta a Frenagem	Inercial (Não possui frenagem)
Autonomia da Fonte	Alta (Efeito Regenerativo do motor Auxilia Tração)
Regeneração na Desaceleração	Baixa (Depende da inércia do rotor)
Vantagens	1) Alta eficiência energética (reaproveita grande parte da energia gerada);
	2) Acionamento muito simples de implementar
	3) Por não oferecer frenagem, exige pouco das chaves de potência
Desvantagens	1) Exige dimensionamento das chaves com no mínimo o dobro da capacidade de tensão da fonte, elevando o custo;
	2) Não possui sistema de frenagem (parada lenta depende da inércia e atrito da carga)
	3) Baixo rendimento em razão cíclica inferior à 50%

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 Chaveamento unipolar com comutação independente

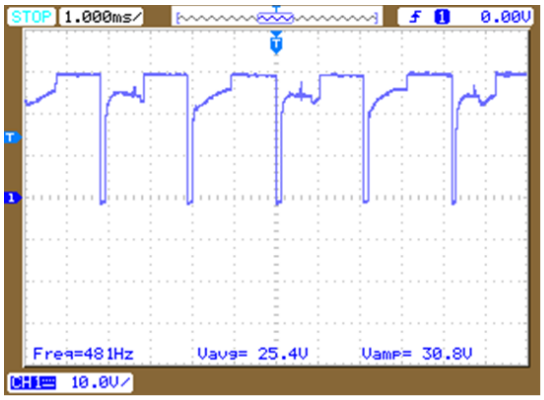
A segunda forma de chaveamento utiliza um único sinal PWM aplicado em Q1, enquanto Q4 permanece ligado. Como no caso anterior, Q2 e Q3 devem estar permanentemente desligados (em sentido direto de rotação), e é detalhado por Gaarlapati (2019. P.22). A tensão média de armadura estará sempre entre Vfonte e terra, e a operação desta maneira de chaveamento limita-se em dois quadrantes (sem frenagem), sem possibilidade de controle de força contra eletromotriz.

Figura 22 – Estados lógicos de comutação para o chaveamento unipolar independente

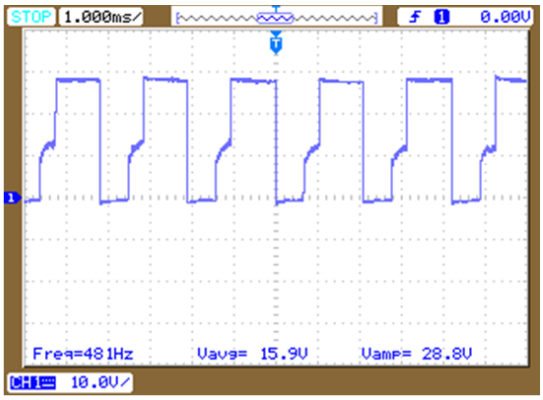
		UNIPOLAR INDEPENDENTE					
		Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
CHAVES DE POTÊNCIA	Q1	■		■		■	
	Q2						
	Q3						
	Q4	■	■	■	■	■	■
REAÇÃO INDUTIVA	CARGA	Q1-Q4		Q1-Q4		Q1-Q4	
	DESCARGA						
	RODA LIVRE		D2-Q4		D2-Q4		D2-Q4

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23 – Formas de onda reais de tensão de armadura para o chaveamento unipolar independente



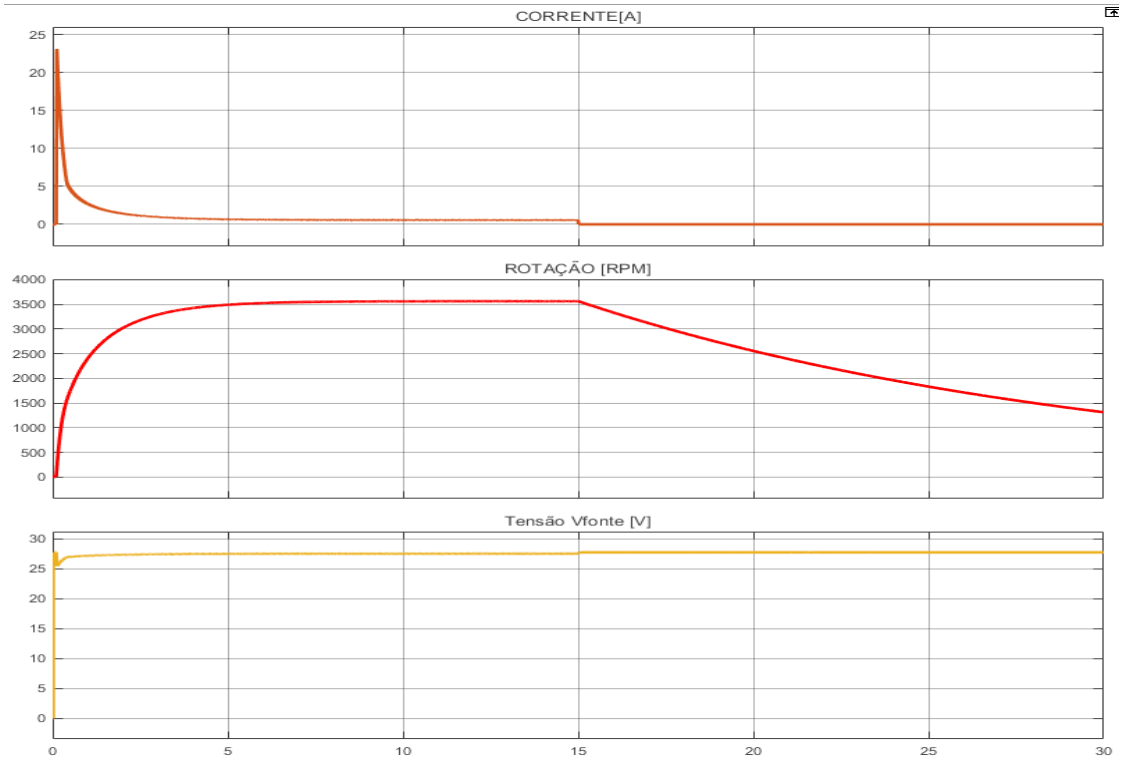
UNIPOLAR INDEPENDENTE
CICLO: 50%
SEM CARGA
ROTAÇÃO DO MOTOR: 3650 rpm



UNIPOLAR INDEPENDENTE
CICLO: 50%
COM CARGA
ROTAÇÃO DO MOTOR: 2140 rpm

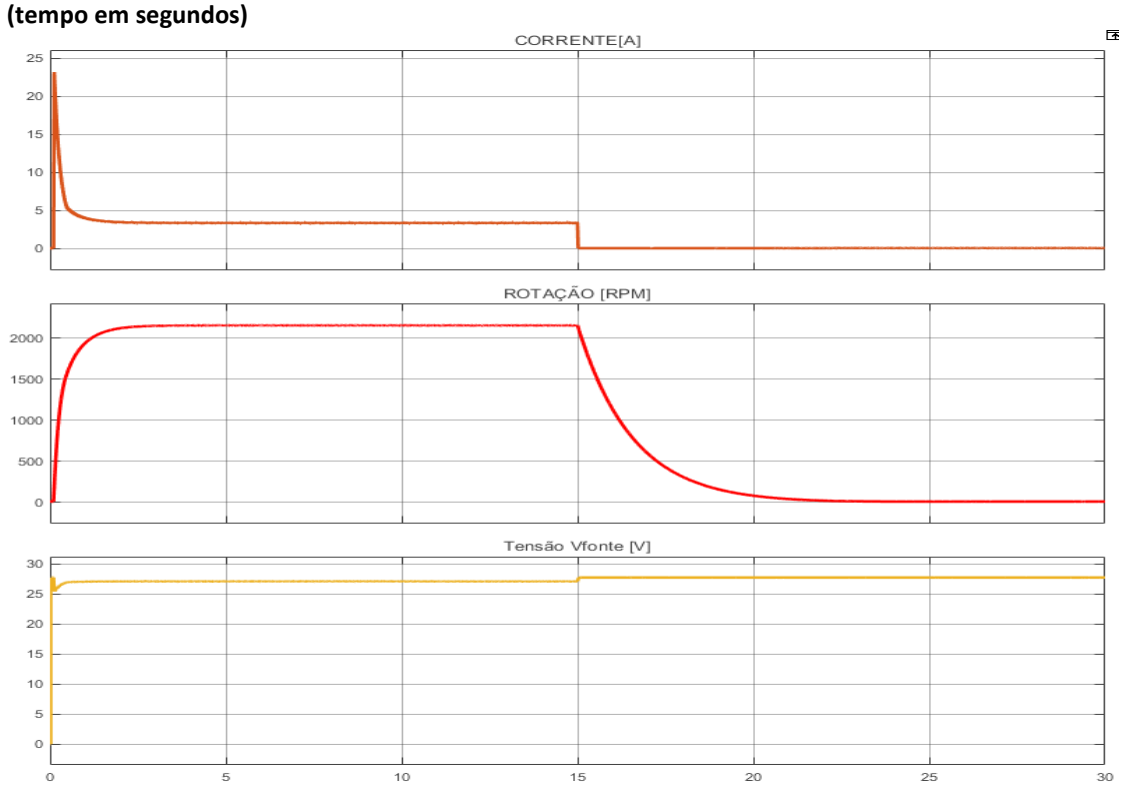
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 – Simulação de resposta do chaveamento unipolar independente, motor em vazio (tempo em segundos)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 25 – Simulação de resposta do chaveamento unipolar independente, motor com carga nominal (tempo em segundos)



Fonte: Elaborado pelo autor

A tensão média de armadura do chaveamento unipolar independente é composta pela tensão positiva chaveada da fonte e pela tensão contra eletromotriz do motor (diferente do modelo bipolar independente, que há tensão negativa proveniente da descarga do indutor); portanto, por mais que o torque seja aplicado no eixo do motor e a força contra eletromotriz seja consumida, ainda haverá uma parcela positiva de tensão média considerável, e a perda de rotação não será tão grande como no chaveamento bipolar independente. Uma vez que não há tensão negativa, a corrente de partida se torna praticamente o dobro, se compararmos com o modelo bipolar independente. O circuito eletrônico tende a ser simples e econômico, uma vez que o dimensionamento das chaves de potência não requer tensão muito maior do que a aplicada pela fonte de alimentação. Podemos considerar que este modelo de chaveamento também possui uma resposta lenta a variações de velocidade, pois opera em dois quadrantes sem frenagem (e como consequência, possui baixa devolução de energia à fonte).

Figura 26 – Resumo das características do chaveamento unipolar independente

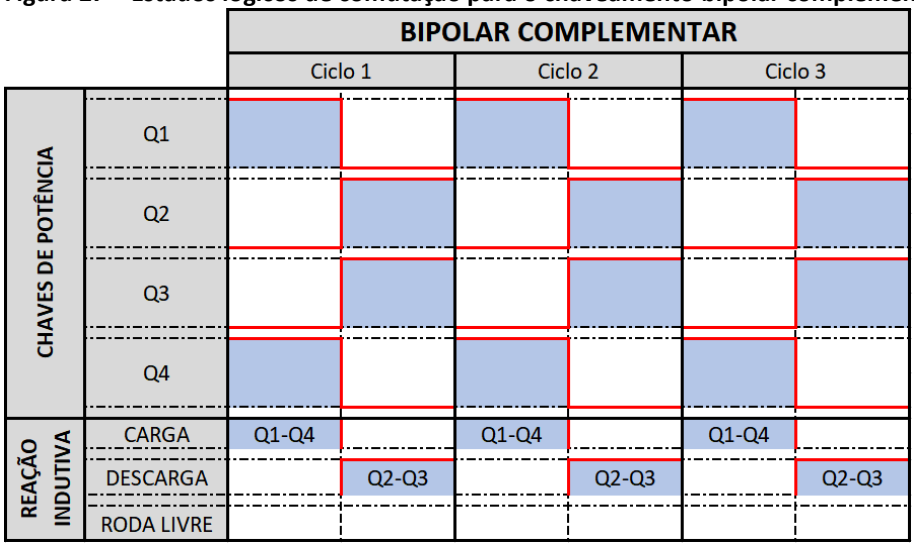
CHAVEAMENTO UNIPOLAR INDEPENDENTE	
Polaridade	Unipolar
Comutação	Independente, PWM em uma chave
Quadrantes de Operação	2 quadrantes
Descarga Indutiva	Assíncrona Lenta
Resposta a Frenagem	Inercial (Não possui frenagem)
Autonomia da Fonte	Alta (Efeito Regenerativo do motor Auxilia Tração)
Regeneração na Desaceleração	Baixa (Depende da inércia do rotor)
Vantagens	1) Alta eficiência energética (reaproveita grande parte da energia gerada);
	2) Acionamento muito simples de implementar
	3) Por não oferecer frenagem, exige pouco das chaves de potência
	4) Baixo ripple de corrente, evitando aquecimento do motor
	5) Baixo custo de dimensionamento das chaves de potência
Desvantagens	1) Regeneração praticamente nula, portanto, não recarrega baterias;
	2) Não possui sistema de frenagem (parada lenta depende da inércia e atrito da carga)

Fonte: Elaborado pelo autor

3.4 Chaveamento bipolar com comutação complementar

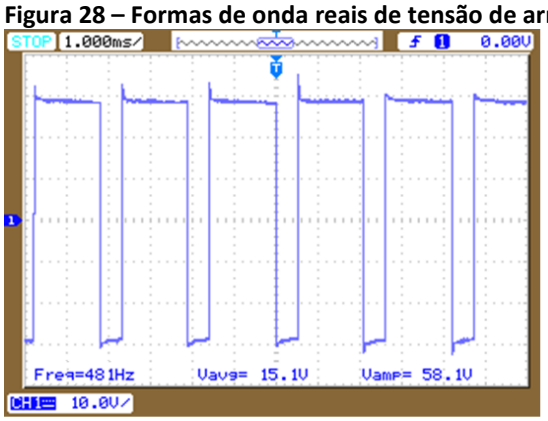
No terceiro caso, dois sinais PWM são aplicados com alinhamento pela borda; Q1 e Q4 pulsam simultaneamente, assim como na primeira forma. Porém, aplica-se o PWM invertido em Q2 e Q4, em períodos opostos (esta sequência se aplica no sentido direto de rotação), detalhados por Gaarlapati (2019. P.24). A tensão média de armadura estará entre Vfonte e -Vfonte, mas desta vez, haverá a descarga da força contra eletromotriz, possibilitando a operação em quatro quadrantes. O ciclo de trabalho precisa ser de 50 a 100% para operação em sentido direto e de 50 a 0% para sentido de giro reverso.

Figura 27 – Estados lógicos de comutação para o chaveamento bipolar complementar

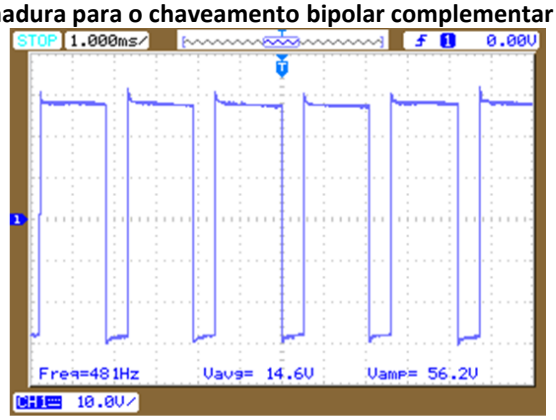


Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 28 – Formas de onda reais de tensão de armadura para o chaveamento bipolar complementar



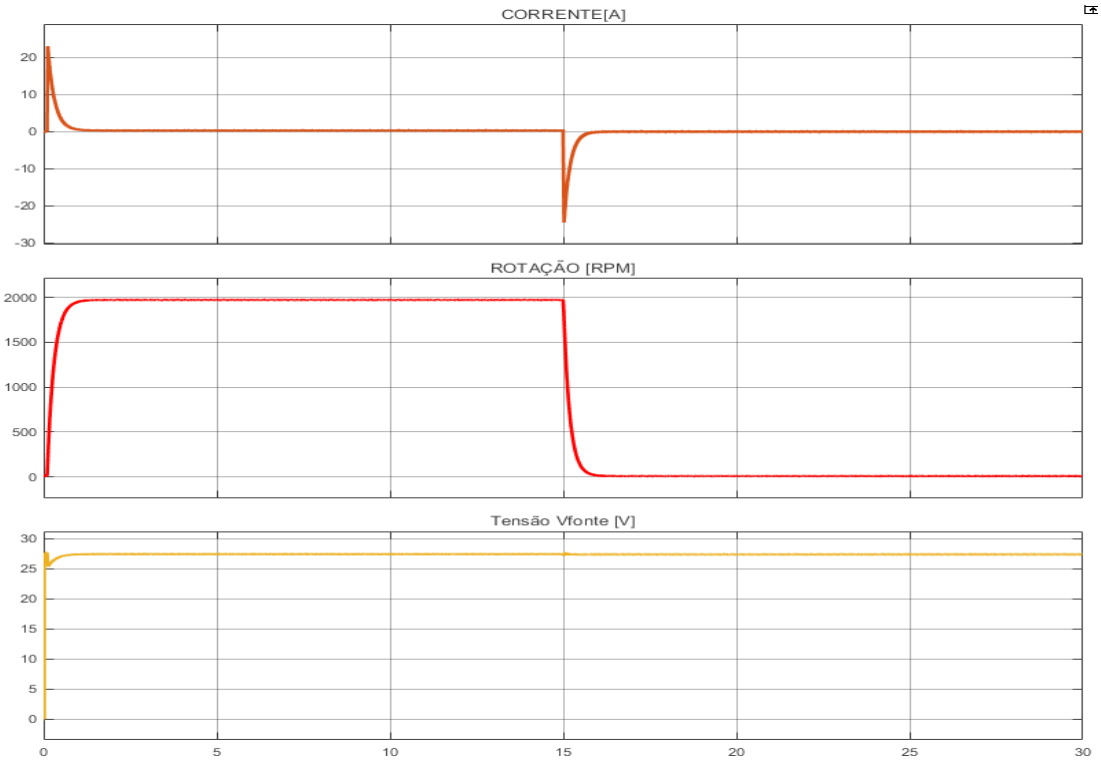
BIPOLAR COMPLEMENTAR
CICLO : 75%
SEM CARGA
ROTAÇÃO DO MOTOR: 2080 rpm



BIPOLAR COMPLEMENTAR
CICLO : 75%
COM CARGA
ROTAÇÃO DO MOTOR: 1830 rpm

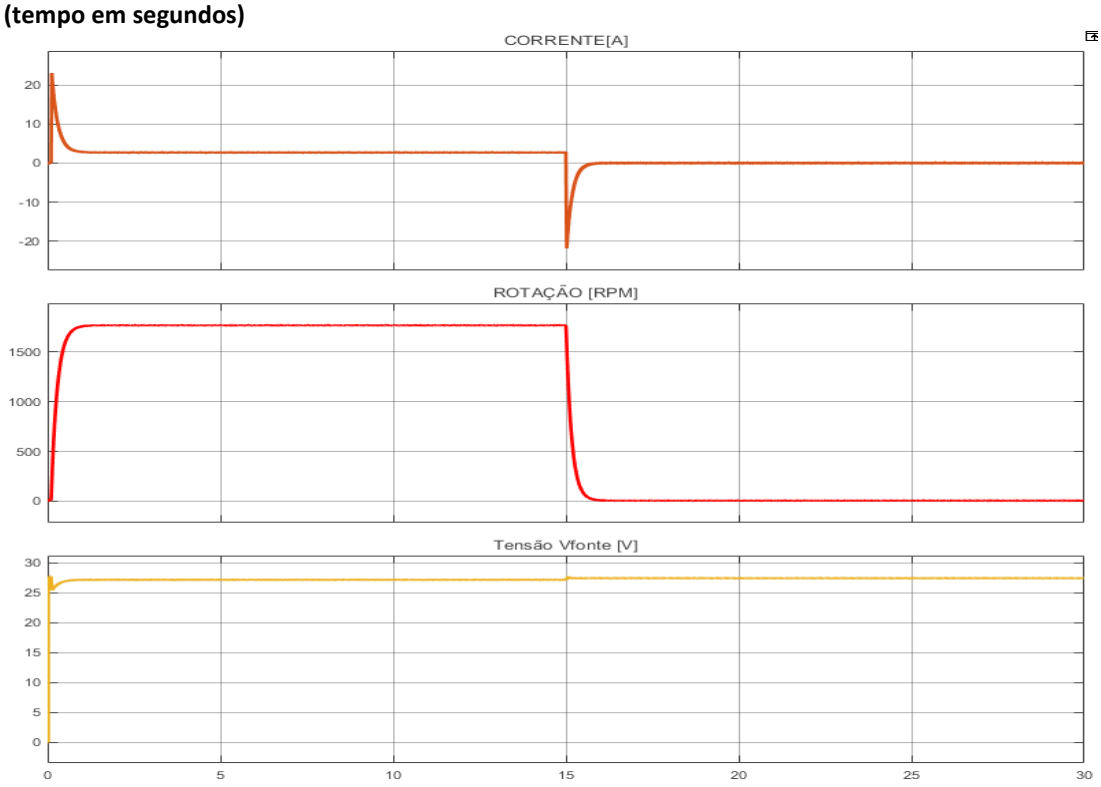
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29 – Simulação de resposta do chaveamento bipolar complementar, motor em vazio (tempo em segundos)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 30 – Simulação de resposta do chaveamento bipolar complementar, motor com carga nominal (tempo em segundos)



Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo de chaveamento bipolar complementar possui uma tensão média de armadura composta pela tensão positiva chaveada da fonte e pela tensão negativa de descarga do indutor. A força contra eletromotriz é eliminada no momento de desligamento e, portanto, a tensão média de armadura varia muito pouco em função da carga aplicada. Como resultado, temos ainda menos perda de rotação quando há torque solicitado (comparando com qualquer modelo do tipo independente), e um controle de arraste significante, uma vez que há frenagem involuntária. Um detalhe importante é que este controle pode alterar o sentido de rotação do motor apenas em função da razão cíclica; para sentido horário, varia-se de 50 à 100% da razão cíclica e para anti-horário, de 50 à 0%. Note que em 50% de ciclo de trabalho, há o mesmo tempo de tração e frenagem, e então, o motor estará parado (porém, mantém-se energizado). Este tipo de chaveamento faz com que o motor se aqueça mais, uma vez que a variação de corrente em regime permanente tem o dobro da amplitude de um modelo unipolar). Dentre os modelos comparados, é o que apresentou melhor tempo de resposta a variações de velocidade (frenagem, por exemplo), trabalhando em quatro quadrantes. Existe uma devolução de energia para a fonte considerável em momentos de desaceleração.

Figura 31 – Resumo das características do chaveamento bipolar complementar

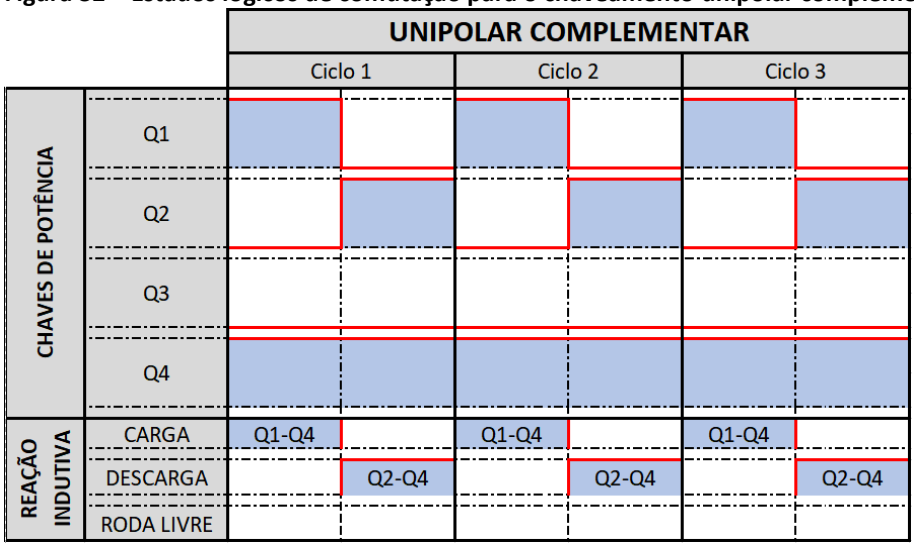
CHAVEAMENTO BIPOLAR COMPLEMENTAR	
Polaridade	Bipolar
Comutação	Complementar, PWM em quatro chaves
Quadrantes de Operação	4 quadrantes
Descarga Indutiva	Síncrona Rápida
Resposta a Frenagem	Rápida (Tração no sentido oposto de giro)
Autonomia da Fonte	Baixa (Carga do indutor a cada ciclo PWM)
Regeneração na Desaceleração	Alta (Desaceleração promove grande ddp entre motor e fonte)
Vantagens	1) Possui controle de frenagem, tornando mais rápido qualquer variação de ajuste de velocidade
	2) Cada desaceleração promove ligeira carga de baterias
	3) Promove descarga indutiva muito rapidamente, requisito indispensável para drivers do tipo micropasso , para motores de passo
	4) A tensão média na armadura é mais previsível, uma vez que a força contra eletromotriz é eliminada
Desvantagens	1) Exige dimensionamento das chaves com no mínimo o dobro da capacidade de tensão da fonte, elevando o custo;
	2) Alto ripple de corrente, aumentando o aquecimento do motor;
	3) Exige maior resolução de PWM (de 50 a 100% o motor gira horário; de 50 a 0% o motor gira anti-horário)
	4) A condição de 50% de PWM não gira o motor, mas mantem as chaves comutando e o rotor energizando.

Fonte: Elaborado pelo autor

3.5 Chaveamento unipolar com comutação complementar

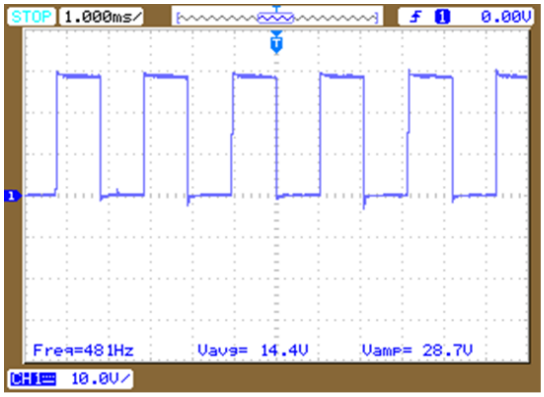
A quarta maneira estudada também necessita de dois sinais PWM trabalhando alinhados pela borda e de maneira invertida; consiste em manter Q4 acionado, Q3 desligado, aplicar o PWM em Q1 e utilizar o PWM invertido em Q2 em períodos opostos (isso para sentido direto de rotação), e é detalhado por Gaarlapati (2019. P.23). A comutação complementar permite a descarga da força contraeletromotriz, operando em quatro quadrantes. O chaveamento unipolar evita a inversão de polaridade do indutor, portanto, sua tensão média de armadura estará sempre entre Vfonte e terra.

Figura 32 – Estados lógicos de comutação para o chaveamento unipolar complementar

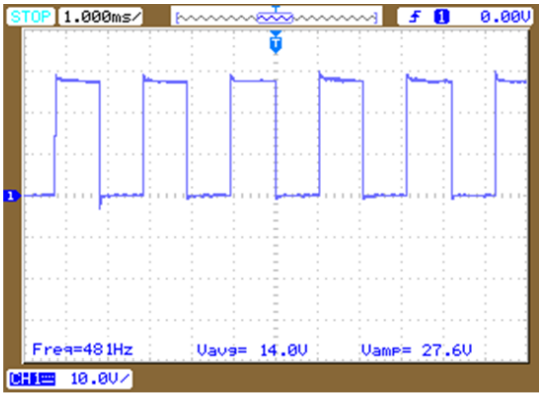


Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33 – Formas de onda reais de tensão de armadura para o chaveamento unipolar complementar



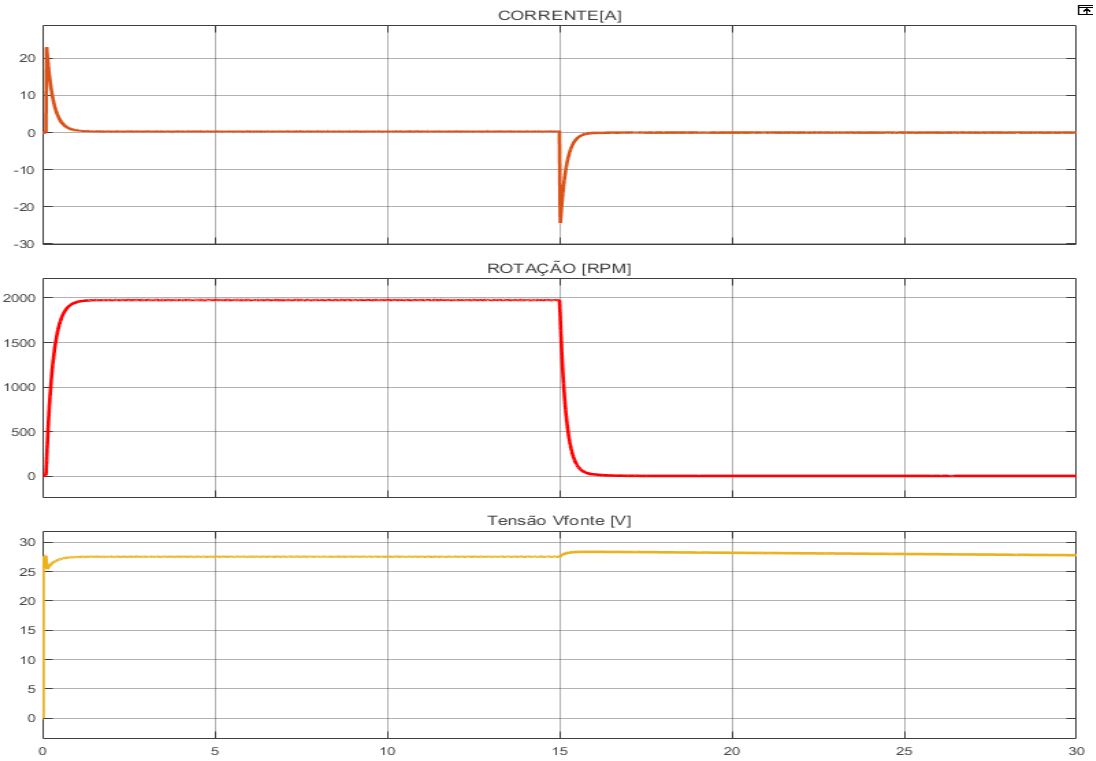
UNIPOLAR COMPLEMENTAR
CICLO : 50%
SEM CARGA
ROTAÇÃO DO MOTOR : 2080 rpm



UNIPOLAR COMPLEMENTAR
CICLO : 50%
COM CARGA
ROTAÇÃO DO MOTOR : 1830 rpm

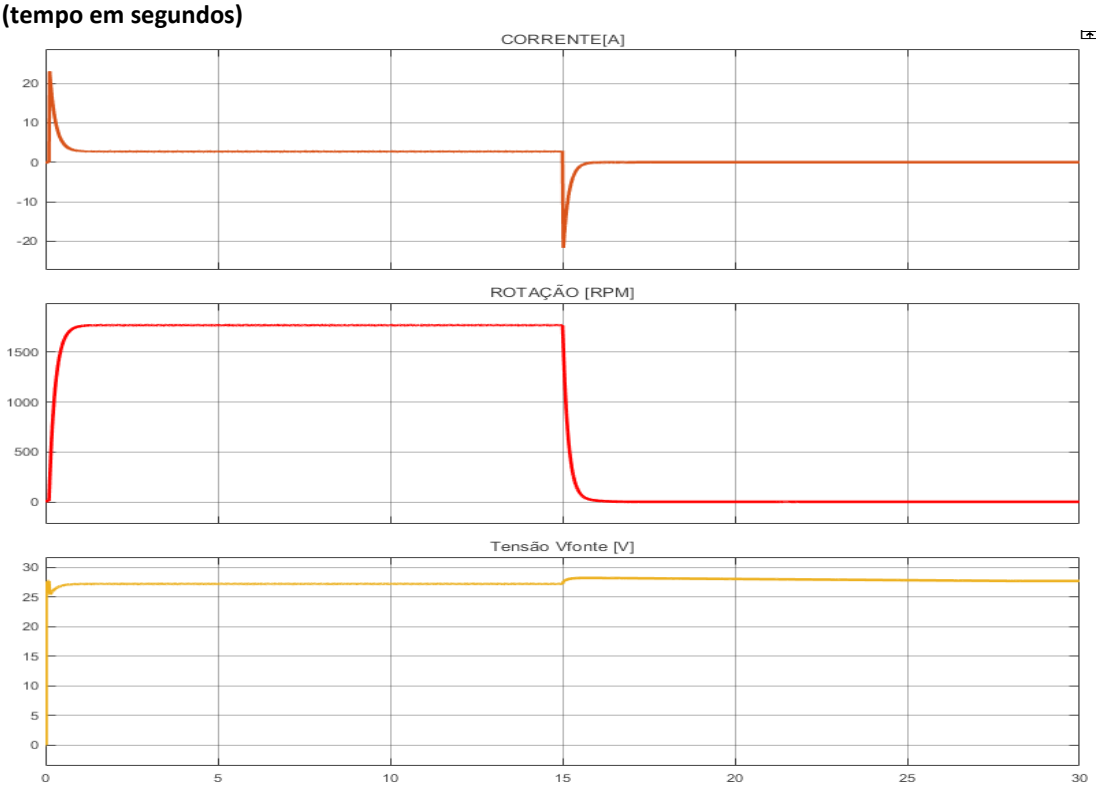
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34 – Simulação de resposta do chaveamento unipolar complementar, motor em vazio (tempo em segundos)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35 – Simulação de resposta do chaveamento unipolar complementar, motor com carga nominal (tempo em segundos)



Fonte: Elaborado pelo autor

Este modelo de chaveamento depende apenas da tensão positiva da fonte e de sua razão cíclica para compor a tensão média de armadura; a inversão de polaridade do indutor é evitada, e a descarga da força contra eletromotriz é realizada nos momentos de desligamento. Portanto, a queda de tensão de armadura em função da carga é tão baixa quanto no chaveamento bipolar complementar, o que reduz quedas de rotação. O fato da tensão contra eletromotriz ser descarregada e não haver momentos de tensão negativa faz com que o controlador controle uma carga indutiva como se fosse puramente resistiva, entregando um chaveamento linear proporcional à razão cíclica.

Neste tipo de chaveamento há controle do arraste da carga, uma vez que os momentos de desligamento controlam a força contra eletromotriz e, portanto, opera em quatro quadrantes. Este controlador responde rapidamente a variações de rotação (tão rápido quanto o bipolar complementar).

Figura 36 – Resumo das características do chaveamento unipolar complementar

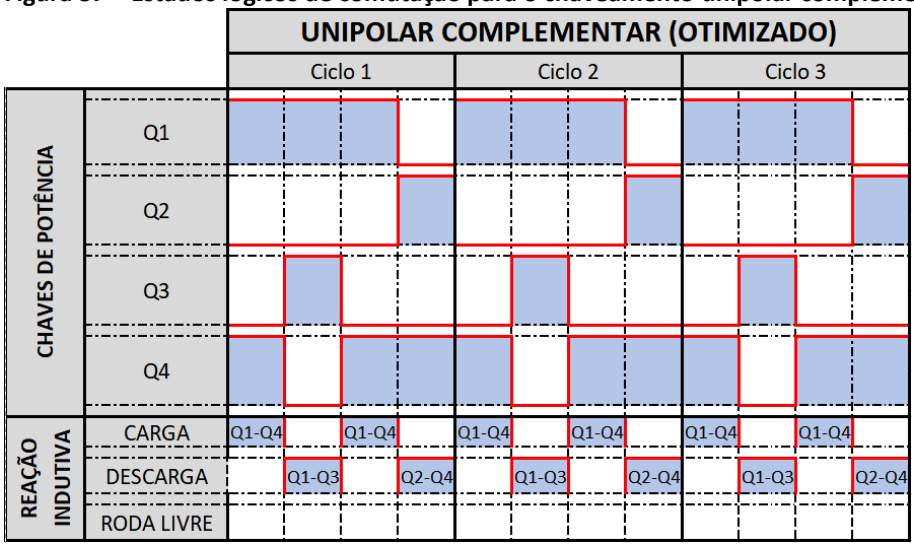
CHAVEAMENTO UNIPOLAR COMPLEMENTAR	
Polaridade	Unipolar
Comutação	Complementar, PWM em duas chaves
Quadrantes de Operação	4 quadrantes
Descarga Indutiva	Síncrona Lenta
Resposta a Frenagem	Rápida (Descarga de força contra eletromotriz)
Autonomia da Fonte	Baixa (Carga do indutor a cada ciclo PWM)
Regeneração na Desaceleração	Alta (Desaceleração promove grande ddp entre motor e fonte)
Vantagens	1) Possui controle de frenagem, tornando mais rápido qualquer variação de ajuste de velocidade
	2) Cada desaceleração promove grande carga de baterias
	3) Baixo ripple de corrente, reduzindo o aquecimento do motor
	4) A tensão média na armadura é mais previsível, uma vez que a força contra eletromotriz é eliminada
Desvantagens	1) A frenagem se torna ineficiente em baixas rotações.
	2) O Circuito de potência deve ser superdimensionado em função das altas exigências na frenagem

Fonte: Elaborado pelo autor

3.6 Chaveamento unipolar com comutação complementar e otimização de frequência

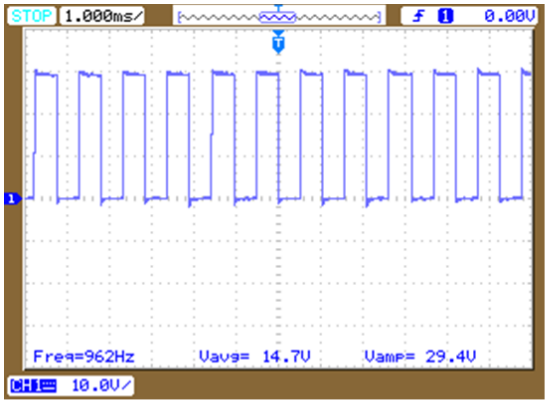
O quinto método de chaveamento é uma otimização do quarto caso estudado e necessita de dois sinais PWM, mas desta vez, operando em alinhamento pelo centro do pulso. Quanto à tração, continua sendo feita de Q1 para Q4 (em sentido direto de giro), e é detalhada por Ohm (2002, p.6). Porém, os momentos de descarga contra eletromotriz se intercala, ora acionando Q2 e Q4, ora comutando Q1 e Q3. Como resultado, temos a metade da frequência de chaveamento nas chaves de potência em relação à armadura; com isso, reduz-se a potência dissipada em cada chave, além de dividir a potência de condução nos momentos de alívio da força contra eletromotriz para todas as chaves, resultando em menor aquecimento no conjunto.

Figura 37 – Estados lógicos de comutação para o chaveamento unipolar complementar otimizado

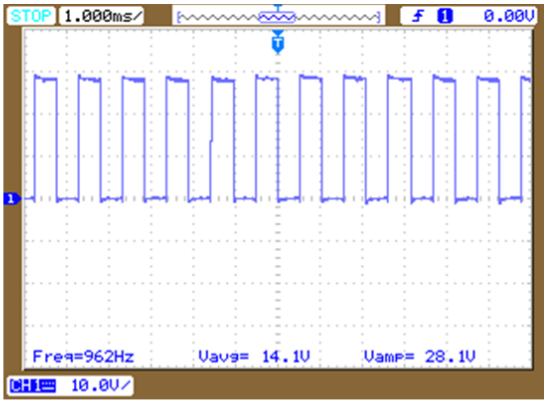


Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 38 – Formas de onda reais de tensão de armadura para o chaveamento unipolar complementar otimizado



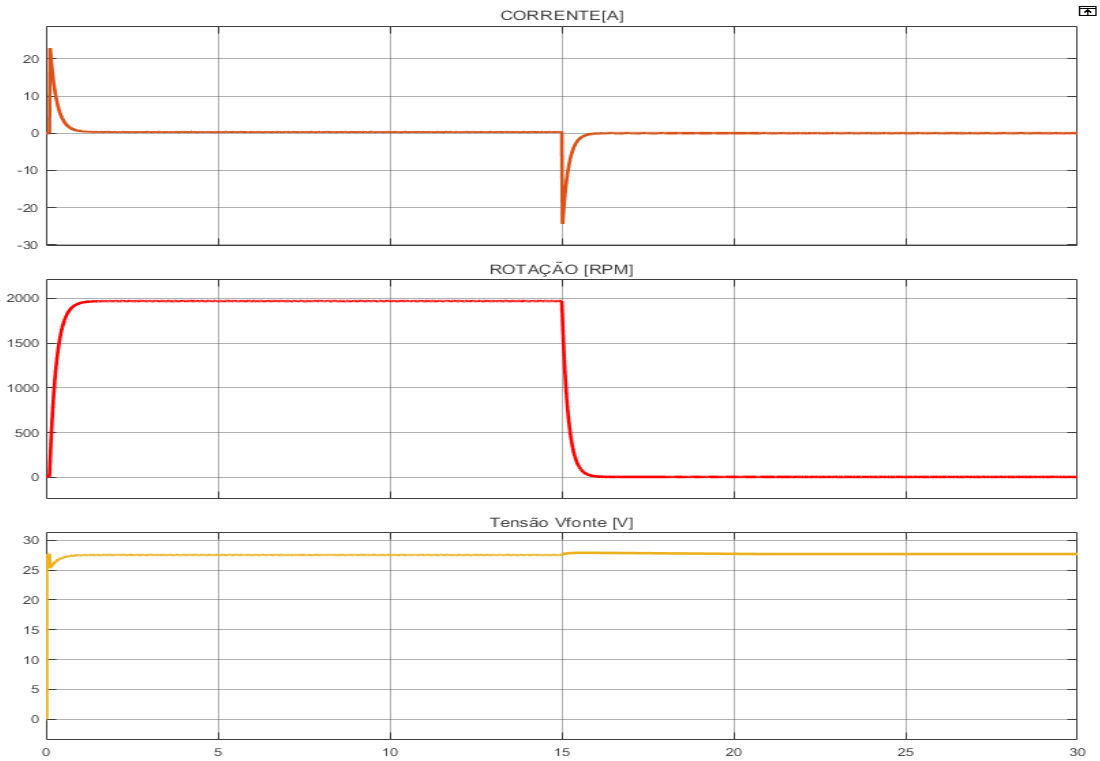
UNIPOLAR COMPLEMENTAR OTIMIZADO
CICLO : 50%
SEM CARGA
ROTAÇÃO DO MOTOR: 2120 rpm



UNIPOLAR COMPLEMENTAR OTIMIZADO
CICLO : 50%
COM CARGA
ROTAÇÃO DO MOTOR: 1880 rpm

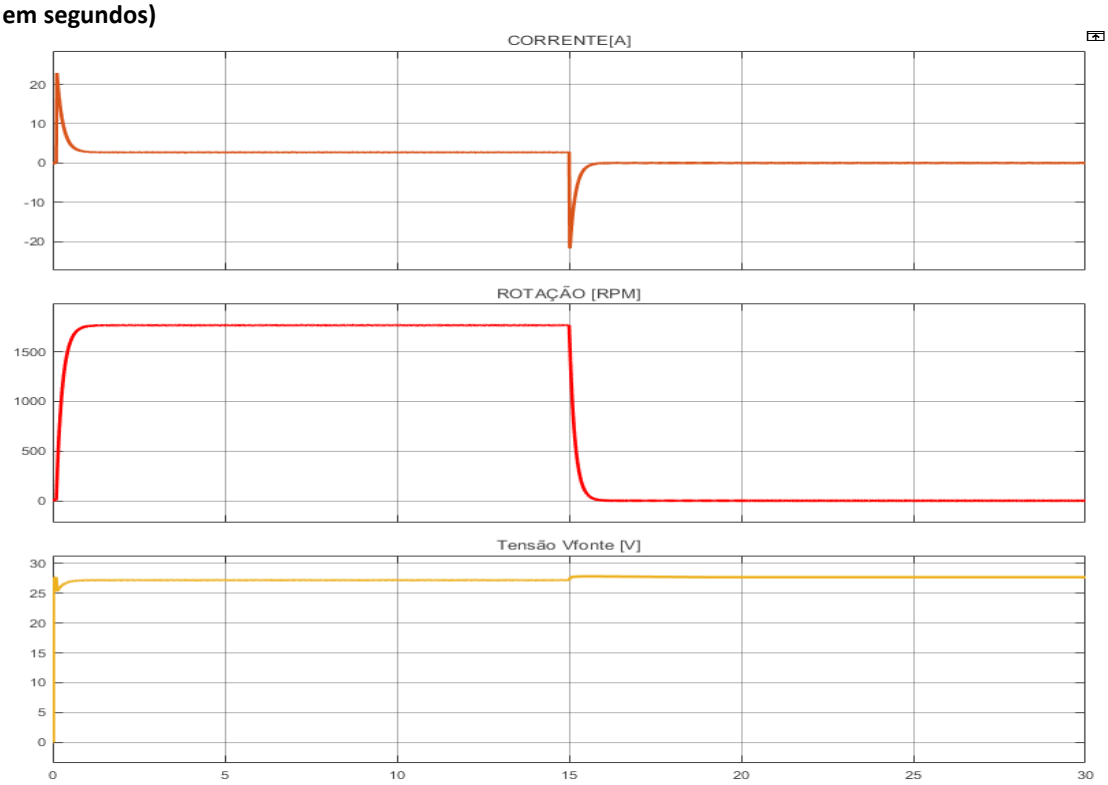
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 39 – Simulação de resposta do chaveamento unipolar otimizado, motor em vazio (tempo em segundos)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 40 – Simulação de resposta do chaveamento unipolar otimizado, motor com carga nominal (tempo em segundos)



Fonte: Elaborado pelo autor

Este modo possui as mesmas características do modo unipolar complementar comum, como a composição da tensão de armadura, velocidade de resposta a variações de velocidade,

e comportamento linear do motor em função da carga. Porém, a execução do chaveamento otimizado permite que as chaves de potência recebam a metade da frequência de chaveamento em relação à carga, reduzindo a potência dissipada pelas comutações. Este modo permite também distribuir entre as chaves a energia dissipada em frenagens, reduzindo aquecimentos. O chaveamento unipolar complementar otimizado possui diversas qualidades, mas possui um chaveamento bem complexo, não sendo possível realizar em qualquer microcontrolador, exigindo imprescindivelmente que seu circuito de disparo compare sinais PWM alinhados pelo centro.

Figura 41 – Resumo das características do chaveamento unipolar complementar otimizado

CHAVEAMENTO UNIPOLAR COMPLEMENTAR (OTIMIZADO)	
Polaridade	Unipolar
Comutação	Complementar, PWM em duas chaves
Quadrantes de Operação	4 quadrantes
Descarga Indutiva	Síncrona Lenta
Resposta a Frenagem	Rápida (Descarga de força contra eletromotriz)
Autonomia da Fonte	Baixa (Carga do indutor a cada ciclo PWM)
Regeneração na Desaceleração	Alta (Desaceleração promove grande ddp entre motor e fonte)
Vantagens	1) Possui controle de frenagem, tornando mais rápido qualquer variação de ajuste de velocidade
	2) Cada desaceleração promove grande carga de baterias
	3) Baixo ripple de corrente, reduzindo o aquecimento do motor
	4) A tensão média na armadura é mais previsível, uma vez que a força contra eletromotriz é eliminada
	5) A frequência de chaveamento das chaves de potência é a metade da frequência enxergada pelo motor. Portanto, há uma redução da potência dissipada no chaveamento, reduzindo aquecimentos;
Desvantagens	1) A frenagem se torna ineficiente em baixas rotações.
	2) O Circuito de potência deve ser superdimensionado em função das altas exigências na frenagem

Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Existem muitas maneiras de controlar um motor de corrente contínua. O trabalho focou no acionamento eletrônico pela armadura da máquina, considerando um motor de campo fixo e um circuito de potência híbrido configurado em ponte H. Escolher a maneira mais adequada de comutação envolve considerações eletromecânicas na qual devemos saber interpretar, como por exemplo, os parâmetros de indutância e momento de inércia; deve-se levar em consideração o efeito gerador da máquina, onde a fonte de alimentação deve estar preparada para lidar com a energia devolvida.

As análises comparativas comprovam que os modelos de comutação independentes são bem pouco regenerativos, adequado para controladores de um e dois quadrantes (sem frenagem), por serem simples de serem aplicados; já os modelos complementares são praticamente obrigatórios em situações que exigem manobra de frenagem e controle de movimento (operação em dois e quadro quadrantes). Embora sejam mais complexos e exigirem sistemas com sensores de corrente e rotação com a finalidade de proteção, são os que fazem com que a máquina responda com maior imediatismo.

As comutações unipolares e bipolares possuem branda aplicação não somente para motores de corrente contínua, mas também para motores de indução de corrente alternada, motores trifásicos sem escovas e motores de passo; todos estes possuem ampla aplicação industrial e comercial, e por este motivo, o trabalho pode incentivar futuras pesquisas na área

de acionamentos eletrônicos de máquinas elétricas. Este trabalho também possibilita a ampliação do detalhamento do sistema embarcado responsável pela geração de pulsos em sincronismo, que deve ser dedicado para este tipo de aplicação.

REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de potência:** tecnologia e linguística. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000.

ARRABAÇA, Devair Aparecido; GIMENEZ, Salvador Pinillos. **Conversores de energia elétrica CC/CC para aplicações em eletrônica de potência**: metodologia de análise e simulação. 1 ed. São Paulo: Érica, 2013.

CONDIT, Reston. **Brushed DC motor fundamentals**. Microchip Technology Inc, 2004. Disponível em: http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00905a.pdf. Acesso em: 31 out. 2019.

GAARLAPATI, Srisairam; MANEA, Sorin. **Stepper motor control with dsPIC DSCs**. 2019. Disponível em: http://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/AN1307-Stepper-Motor-Control-with-dsPIC-DSCs-DS00001307B.pdf. Acesso em: 01 nov. 2019.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **dsPIC33/PIC24 Family reference manual** . 2017. Disponível em: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70000323h.pdf . Acesso em : 01 nov. 2019.

NASCIMENTO, G. **Comandos elétricos**: teoria e atividades.1 ed. São Paulo: Érica, 2011.

OHM, Dal Y.; OLEKSUK, Richard J. **Influence of PWM schemes and commutation methods for DC and brushless motors and drives.** 2002. Disponível em: https://pdfs.semanticscholar.org/3bbe/84421f59593d013c97839887240ef6759d79.pdf. Acesso em: 06 nov. 2019

SAPRE, Sanket. **Isolated gate drivers**: what, why, and how? Analog Devices. 2018. Disponível em: https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-52/number-2/isolated-gate-drivers-what-why-and-how.pdf. Acesso em: 06 nov. 2019.

TEXAS INSTRUMENTS INC. **Current recirculation and decay modes**. 2009. Disponível em: http://www.ti.com/lit/an/slva321/slva321.pdf. Acesso em: 01 nov.2019.

VOLPIANO, Sérgio Luiz. **Eletrônica de potência aplicada ao acionamento de máquinas elétricas**. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2013.

WILSON, Dave. **So, which PWM technique is best?** Part 1. 2012. Disponível em: https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/archive/2012/03/19/so-which-pwm-technique-is-best-part-1. Acesso em: 01 nov. 2019.

WILSON, Dave. **So, which PWM technique is best?** Part 2. 2012. Disponível em: https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/archive/2012/03/19/so-which-pwm-technique-is-best-part-2 . Acesso em: 01 nov. 2019.

WILSON, Dave. **So, which PWM technique is best?** Part 3. 2012. Disponível em: https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/archive/2012/03/19/so-which-pwm-technique-is-best-part-3 . Acesso em: 01 nov. 2019.

WILSON, Dave. **So, which PWM technique is best?** Part 4. 2012. Disponível em: https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/archive/2012/03/19/so-which-pwm-technique-is-best-part-4 . Acesso em: 01 nov. 2019.

WILSON, Dave. **So, which PWM technique is best?** Part 5. 2012. Disponível em: https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/archive/2012/03/19/so-which-pwm-technique-is-best-part-5 . Acesso em: 01 nov. 2019.

AGRADECIMENTOS

Ao Me. Sérgio Luiz Volpiano, por ter tratado sempre com propriedade todas as dúvidas que por mim foram geradas sobre a eletrônica de potência e também sobre acionamentos eletrônicos, neste e em outros trabalhos realizados ao longo dos anos; também, por ter criado uma das obras na qual este trabalho se referenciou; por um dia ter assinado um dos exemplares do livro de sua autoria que adquiri, desejando que em alguma oportunidade sua obra fosse complementada; ainda a ele, agradeço por ter moldado o perfil profissional na qual desenvolvi.

Ao Professor Paulo Sebastião Ladivez, a quem devo todo o meu conhecimento em projetos, sistemas embarcados e controle; ainda a ele, agradeço por ter dedicado seu conhecimento sem limites por muitos anos ao desenvolvimento de profissionais com capacidades de tornar ideias complexas em realizações completamente possíveis, como aconteceu no meu caso.

Ao meu encarregado, Ricardo Koitsi Goya, por regar diariamente a semente do conhecimento plantada por todos os professores que já tive, por sempre apostar todas as fichas que tem (e as vezes as que não tem) no meu desenvolvimento profissional e pessoal.

À empresa em que trabalho, Motron Indústria de Motores Eireli, por me dar a oportunidade de estudar e desenvolver produtos robustos destinados à acionamentos e eletrônica de potência; ainda, a todos os meus colegas de trabalho, que sempre confiaram e me apoiaram a cada ideia desenvolvida;

À minha mãe, Marli Felfoldi, e à minha namorada, Valéria da Silva Lima, pelo carinho, amor e principalmente paciência com aquilo que elas denominam de “bagunça e fiozinhos”, que foram imprescindíveis para realização deste e de outros trabalhos;

Dedico este artigo ao meu avô, José Felfoldi, e à minha avó, Angelina Volpini Felfoldi, que me ensinaram desde cedo que uma maleta de ferramentas pode valer mais do que qualquer preço que o ouro possa custar quando se trabalha por aquilo que ama; segundo meu avô, “toda evolução depende de um ciclo, a lei da natureza”.

Sobre os autores:

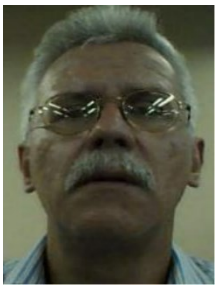
[1] **Lucas Felfoldi Santos**

Lucas Felfoldi Santos é Tecnólogo em Mecatrônica Industrial e pós-graduando em Automação Industrial (Lato Sensu) pela Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica, em São Caetano do Sul-SP; tem experiência em engenharia de projetos eletroeletrônicos e sistemas embarcados; atualmente é colaborador de uma fábrica de motores elétricos, onde adquiriu ampla experiência no dimensionamento de drivers inteligentes para controle de potência; anteriormente, se formou como Técnico em Mecatrônica na Escola SENAI Armando de Arruda Pereira, em São Caetano do Sul-SP e adquiriu experiências profissionais com sistemas automatizados por microcontroladores, na qual se aplicam nos dias atuais.
CV: http://lattes.cnpq.br/4553304615456371

[2] **Sérgio Luiz Volpiano**

Graduado em Engenharia Industrial Elétrica pela Sociedade Universitária de Santos (UNICEB-Univ. Sta. Cecilia dos Bandeirantes, é Pós-Graduado (Lato Sensu) em Eletrônica Industrial pela Universidade São Judas Tadeu, é Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistema de Potência pela Universidade de São Paulo. Atualmente atua como docente da Faculdade Senai de Tecnologia em Mecatrônica Industrial e na Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo (FATEC) em São Bernardo do Campo ministrando aulas de Eletrônica de Potência, Máquinas Elétricas, Acionamento Eletrônico de Máquinas Elétricas, Eletrônica Digital, Instalações Elétricas Industriais, Eletrônica Geral e Análise de Circuitos em Corrente Contínua e Corrente Alternada para o curso superior e de pós graduação. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Máquinas Elétricas, Conversão Eletromecânica de Energia, Sistemas de Potência e Eletrônica Industrial.
CV: http://lattes.cnpq.br/8600069416756468

[3] **Paulo Sebastião Ladivez**



Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Mogi das Cruzes (1984) com especialização em Tecnologias e Sistemas de Informação pela Universidade Federal do ABC (2013). Atualmente é professor da Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica, lecionando as disciplinas Projetos, Microcontroladores, Linguagem de Programação no curso Tecnológico em Mecatrônica Industrial e na Pós-Graduação em Automação Industrial. Tem experiência na área de Engenharia Eletrônica, com ênfase em Automação Industrial e Mecatrônica, atuando principalmente nos seguintes temas: Mecatrônica, Manufatura Digital, Redes Industriais, Automação Industrial, Microcontroladores e Controle.
CV: http://lattes.cnpq.br/7235073442326291