



UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Autarquia Municipal de Regime Especial
Reconhecida pelo Dec. Fed. nº 78.924/76
Recredenciada pela Portaria CEE/GP nº 241/2013
CNPJ 45.176.153/0001-22

UNITAU

Departamento de Engenharia Mecânica
R. Daniel Danelli, s/nº, Jardim Morumbi 1
Taubaté - SP
CEP - 12.060.440
Tel.: (12) 3625-4192 - Diretoria (12) 3629-2565
E-mail: engmec@unitau.br

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
HELLYELTON DA SILVA PINHEIRO**

CONCEITOS SOBRE FRENAGEM REGENERATIVA

**Taubaté - SP
2022**

HELLYELTON DA SILVA PINHEIRO

CONCEITOS SOBRE FRENAGEM REGENERATIVA

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica.

Orientador(a): Prof. Me. Sandro Botossi
dos Santos

**Taubaté – SP
2022**


Este trabalho é inteiramente dedicado aos meus pais. Os maiores incentivadores de minhas realizações.

CONCEITOS SOBRE FRENAGEM REGENERATIVA

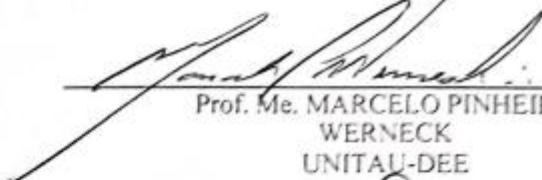
Hellyelton da Silva Pinheiro

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA”


BANCA EXAMINADORA:



Prof. Me. SANDRO BOTOSSÍ DOS
SANTOS
Orientador/UNITAU-DEE



Prof. Me. MARCELO PINHEIRO
WERNECK
UNITAU-DEE



Prof. Me. SEIDE DA CUNHA
FILHO UNITAU-DEE

DEZEMBRO DE 2022

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus que me permitiu concluir o trabalho da melhor maneira possível. Agradeço principalmente a meus pais que puderam me ensinar a ser forte, esforçado e resiliente, sem dúvidas, esses valores foram cruciais para que eu pudesse concluir o curso. Agradeço a Universidade de Taubaté, ao meu professor orientador, que me guiou no caminho certo até a conclusão deste trabalho. Agradeço também a todos os outros professores por todo conhecimento que nos foi transmitido ao longo deste curso.

“Concentre todos os seus pensamentos na tarefa que está realizando. Os raios de sol não queimam até que sejam colocados em foco.”
(ALEXANDER GRAHAM BELL)

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar o conceito de frenagem regenerativa, bem como as aplicações e interferências. A frenagem regenerativa possibilita a recuperação de energia utilizada durante a frenagem dos sistemas, isso traz maior autonomia ao veículo, ao utilizar uma energia que seria dissipada em forma de calor.

Palavras-chave: Frenagem regenerativa, Veículo elétrico, Veículo híbrido.

ABSTRACT

This project aims to evaluate the concepts of regenerative braking as well as the applications and the interferences. The regenerative braking makes it possible the recovery of energy using during the the systems brakings it brings bigger autonomy to the vehicle when using a energy that would be dissipated in the form of heat.

KEYWORDS: Regeneartive braking, Electrical vehicle, hybrid vehicle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Ilustração conceitual de uma estrutura de um EV.....	24
Figura 2 - Correlação da potência e torque em função da velocidade.....	25
Figura 3 - Característica de um perfil de torque/velocidade	26
Figura 4 – Motor CC com estator externo.....	27
Figura 5 – MIT.....	28
Figura 6 – Motor de relutância variável.....	29
Figura 7 – Força de frenagem em relação ao torque.....	30
Figura 8 – Bateria/Pilha eletroquímica.....	34
Figura 9 – Bateria de chumbo ácido.....	35
Figura 10 – Bateria de níquel.....	36
Figura 11 – Bateria de base-lítio.....	37
Figura 12 – Supercapacitor.....	38
Figura 13 – Diagrama de inversor trifásico.....	39
Figura 14 – Sinais de chaveamento PWM.....	40
Figura 15 – Fluxo de corrente elétrica com chaves ligadas.....	41
Figura 16 – Fluxo de corrente elétrica com chaves desligadas.....	42
Figura 17 – Período do acionamento do IGBT.....	44
Figura 18 – Diagrama de proteção contra spikes de tensão.....	45
Figura 19 – Diagrama de proteção contra falso acionamento.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EV's	Veículos elétricos
HEV's	Veículos elétricos híbridos
PWM	<i>Pulse width modulation</i>
CC	Corrente continua
IGBT	<i>Insulated gate bipolar transistor</i>
MOSFET	<i>Metal oxide semiconductor field effect transistor</i>
TVS	<i>Transient voltage supressor</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 Justificativa do Tema	23
1.2 Objetivos Gerais	23
2 REVISÃO DA LITERATURA	24
2.1 Fundamentos da frenagem regenerativa.....	25
2.2 Configurações de um veículo elétrico	25
2.3 Comportamento de um veículo elétrico.....	26
3 TIPOS DE MOTORES UTILIZADOS NA PROPULSÃO	31
3.1 Motores DC	31
3.2 Motores de Indução.....	28
3.3 Motores de Relutância Variável	28
4 SISTEMA DE FREIOS	30
4.1 Força de frenagem.....	30
4.2 Sistema de freios em veículos elétricos e híbridos	31
4.2.1 Sistema em série com ótima sensação de frenagem.....	32
4.2.2 Sistema em série com ótima recuperação de energia	32
4.2.3 Sistema de frenagem em paralelo.....	33
5 ARMAZENAMENTO	34
5.1 Baterias eletroquímicas.....	34
5.2 Baterias de chumbo-ácido.....	35
5.3 Baterias de níquel	36
5.4 Baterias de base-lítio.....	37
5.5 Supercapacitores	38
5.6 Eficiência energética de baterias	39

6 MÉTODOS DE FRENAGEM REGENERATIVA	39
6.1 Frenagem regenerativa Low-Spide PWM	40
7 PROTEÇÃO DE SISTEMAS APLICADO AO CHAVEAMENTO DE IGBTs	43
7.1 Proteção contra spikes de tensão coletor e emissor	45
7.2 Proteção contra falso acionamento	46
8 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

Vivemos em um mundo cada vez mais globalizado, em constante evolução e mudança, por isso há cada vez mais comunicação global. No mundo empresarial, onde a redução de custos e a otimização de recursos são cada vez mais procuradas. No mundo dos veículos automotores nos deparamos com alguns desafios como escassez de recursos, derivados de petróleo, alta demanda devido à qual a população enfrenta um aumento constante nos preços dos combustíveis, por isso essa monografia trata de tais ideias. ganha cada vez mais espaço para otimizar as distâncias percorridas por veículos com motores de combustão interna. No cenário atual sabemos que os carros elétricos têm uma participação de mercado muito pequena e seu preço e duração da bateria (para carros elétricos puros) os tornam ainda menos atrativos. No entanto, ano após ano vemos o desenvolvimento da tecnologia utilizada, por exemplo, nessas arquiteturas elétricas ou híbridas. vida útil da bateria; eficácia da frenagem regenerativa; desempenho, controle e eficiência de motores elétricos. A tendência é que os veículos elétricos (Electric Vehicles) e HEV (Hybrid Electrics) ganhem cada vez mais espaço, o que leva à competição por novas tecnologias. O objetivo deste estudo é descrever o funcionamento do sistema de frenagem regenerativa. A frenagem regenerativa refere-se ao processo de transferência de energia do motor elétrico para a bateria quando o veículo é freado, quando a inércia do veículo combinada com o controle do modo do motor, força o motor a atuar como gerador. Nesse modo, que atua como gerador, é criado um torque para se opor ao movimento, fazendo com que o veículo pare. A energia cinética é convertida em energia elétrica e enviada de volta à bateria para ser usada posteriormente para impulsionar o veículo.

1.1 Justificativa do Tema

Um dos mais importantes recursos dos EV's e HEV's são a sua habilidade de recuperar uma quantidade significativa de energia ao acionar os freios. Os veículos que não utilizam combustíveis fósseis podem ser controlados por geradores que convertem energia cinética ou potencial em energia elétrica, que pode ser armazenada em baterias, e posteriormente utilizada.

O interesse acadêmico desta pesquisa visa conhecer o funcionamento da frenagem regenerativa.

1.2 Objetivos Gerais

Estudar o funcionamento do sistema de frenagem regenerativa em veículos elétricos e híbridos.

1.2.1 Objetivos Específicos

Analisar o funcionamento do sistema de frenagem regenerativa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Fundamentos da frenagem regenerativa

Para *EHSANI*. (2005), o primeiro sistema de frenagem regenerativa, foi desenvolvido pelo Francês M. A. Darracq, em 1897, que tinha como objetivo, permitir a recuperação da energia cinética em veículos durante o acionamento dos freios, direcionando essa energia para um sistema de baterias, aumentando a autonomia do veículo.

2.2 Configurações de um veículo elétrico

Antigamente, os EV eram convertidos principalmente de veículos de combustão interna (ICEV), substituindo o motor de combustão interna e o tanque de combustível por um motor elétrico e baterias.

Hoje em dia, os veículos elétricos mais modernos são construídos baseados em uma estrutura pré-definida, visando atender os critérios de desempenho. Sua estrutura pode ser observada conforme ilustra na Figura 1.

Um veículo elétrico consiste em três subsistemas estruturais:

1. Motor elétrico de propulsão: É compreendido como uma unidade de controle, conversor de potência eletrônica, motor elétrico, transmissão mecânica e rodas. (*EHSANI*, 2005)
2. Fonte de energia: Envolve o gerenciamento da unidade de energia e o reabastecimento da unidade. (*EHSANI*, 2005)
3. Subsistema auxiliar: Consiste no direcionamento da unidade de energia, uma unidade de controle de clima e uma unidade de alimentação auxiliar. (*EHSANI*, 2005)

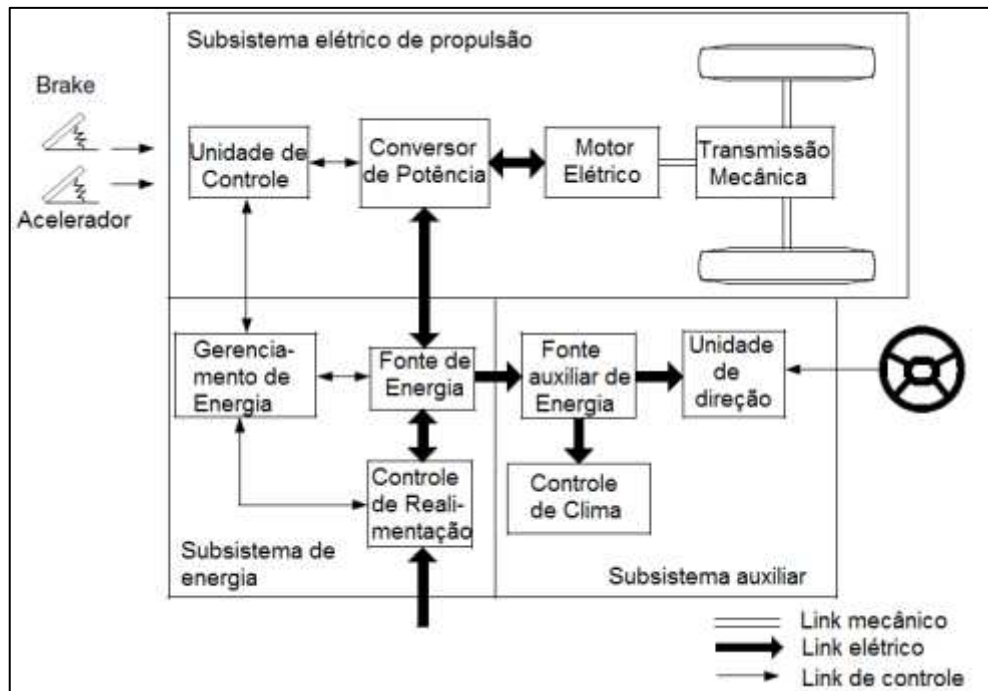


Figura 1 – Ilustração conceitual de uma estrutura de um EV

Fonte: (EHSANI , 2005)

2.3 Comportamento de um veículo elétrico

Um ponto fundamental para analisarmos o comportamento de um motor elétrico em um veículo é correlacionarmos os parâmetros potência e o torque, em função da velocidade como ilustrado na Figura 2.

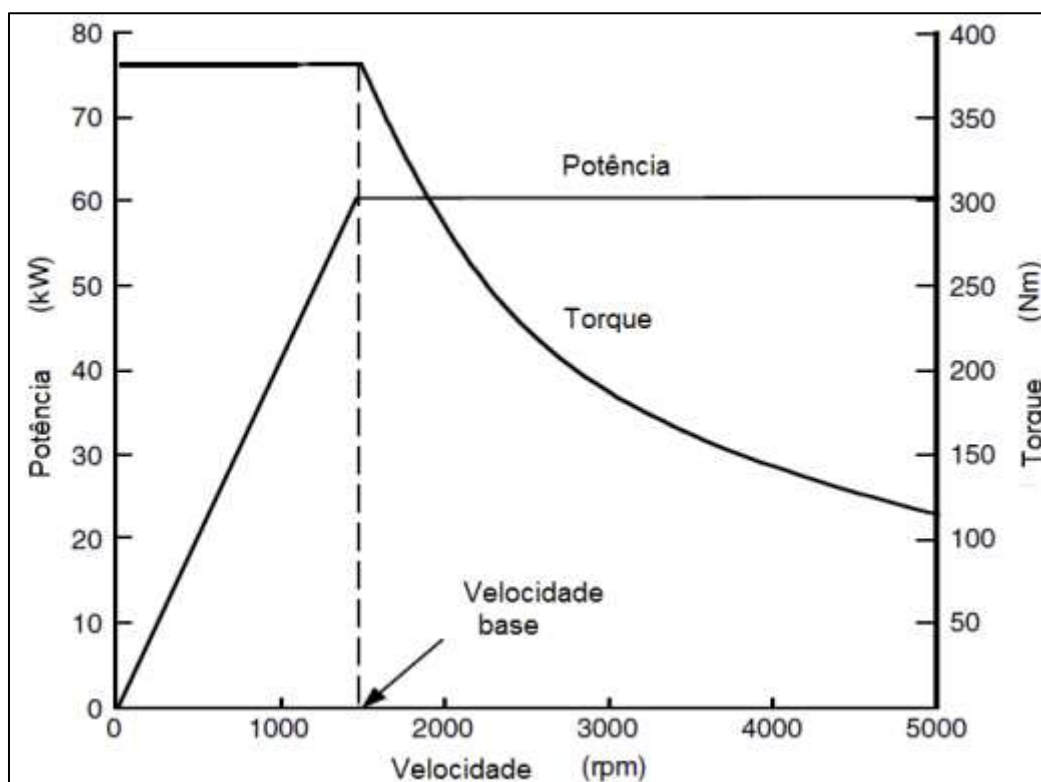


Figura 2 – Correlação da potência e torque em função da velocidade

Fonte: (EHSANI, 2005)

Como podemos analisar na Figura 2, quando o sistema tende a ficar em baixa rotação de base, o torque tende a uma constância, já em momentos de alta rotação, a potência de nosso sistema entra em estabilidade. (EHSANI, 2005).

Operando em baixa velocidade, a tensão fornecida pelo motor aumenta durante o acréscimo da velocidade através do conversor eletrônico. A partir da velocidade base, a tensão do motor atinge a tensão da fonte. Após a velocidade de base, a tensão do motor é mantida constante, e o torque é enfraquecido, caindo de forma hiperbólica enquanto vemos a velocidade aumentar. (EHSANI, 2005).

Podemos definir as velocidades de base e do motor como x . Utilizando a figura 3 como base para nossa análise, podemos ver a característica torque-velocidade de um motor de 60 KW em relação à sua velocidade ($x=2,4$ e 6). (EHSANI, 2005).

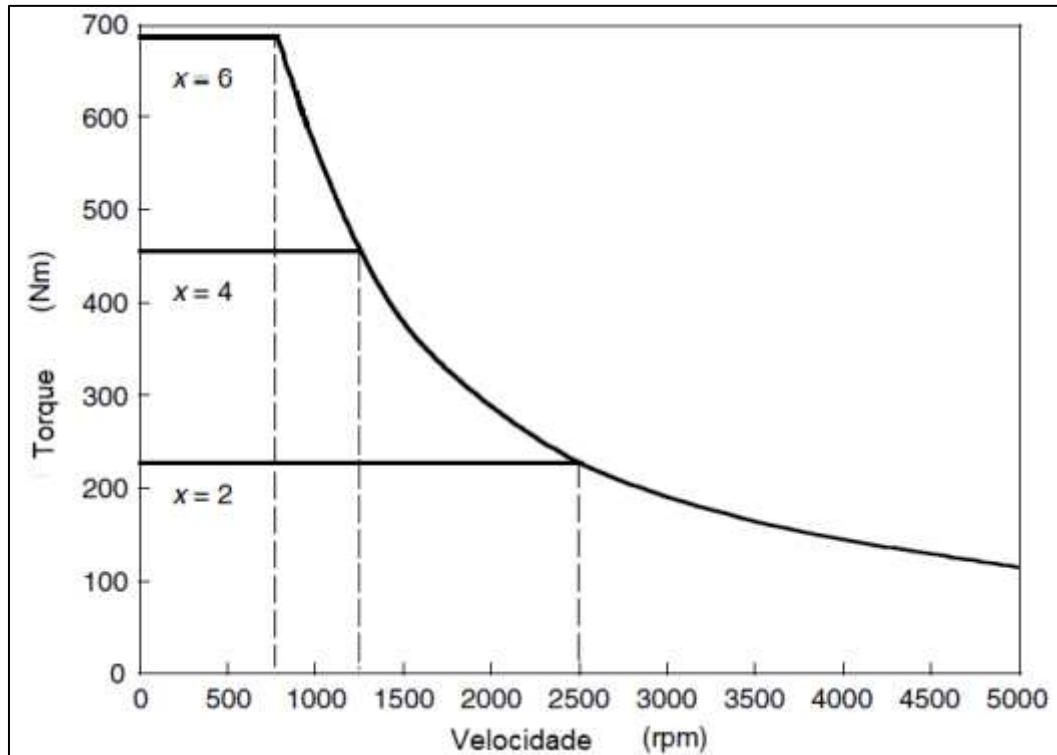


Figura 3 – Característica de um perfil de torque/velocidade para um motor elétrico de 60 KW com $x = 2,4$ e 6

Fonte: (EHSANI, 2005)

3 Tipos de motores utilizados na propulsão

Motores utilizados em veículos elétricos e híbridos, são constantemente submetidos a partidas e paradas, alta aceleração e desaceleração, subidas em aclives com alto torque e baixo torque em velocidade constante. No decorrer deste tópico, o trabalho dissertará e classificará os tipos de motores utilizados.

3.1 Motores CC

Motores CC são largamente utilizados em veículos elétricos devido à simplicidade de controle de velocidade que oferecem. Utilizando a técnica de controle PWM (Pulse Width Modulation) é possível controlar a velocidade de operação do motor de forma simples. (CHEN. 2011).

Quanto ao seu funcionamento, possuem em sua construção, rotores de ímãs permanentes (em número par) e um estator feito de bobinas (enrolamentos ou eletroímãs) e sua carcaça. Os ímãs são posicionados magneticamente inversos entre si e referentes ao estator, o movimento do rotor, em relação ao estator é feito

por meio de forças de atração e repulsão magnética. A Figura 4 nos mostra a representação de um motor CC

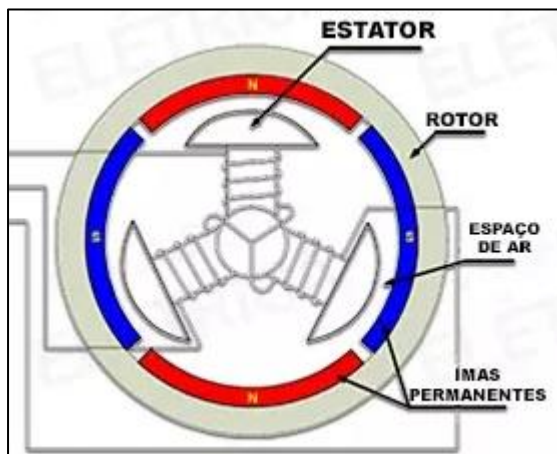


Figura 4 – Motor CC com estator externo

Fonte: (MUNDO ELÉTRICA <https://www.mundodaeletrica.com.br/motor-brushless-caracteristicas-aplicacoes/>)

3.2 Motores de Indução

Os motores de indução giram sob a influência de um campo magnético rotativo. As máquinas trifásicas alcançam esse campo com um estator que consiste em enrolamentos separados por 120° . Esses motores são considerados os candidatos mais possíveis para veículos elétricos e híbridos devido à sua alta confiabilidade, perfil forte, acessibilidade e baixa manutenção. No entanto, controle de velocidade convencional, ou seja, por tensão e frequência, mostra-se defasado para mudanças rápidas e velocidades repetitivas, e sua eficiência ainda é baixa devido ao baixo fator de potência. Devido às suas origens na eletrônica de potência e controle com microcontroladores, o controle vetorial pode superar as desvantagens do controle de tensão e frequência. O controle vetorial visa manter o campo do estator perpendicular ao campo do rotor para obter o torque máximo em todos os momentos, como é o caso dos motores DC, mas eles sofrem de uma faixa operacional limitada em cargas baixas e potência constante. A Figura 5 mostra um exemplo de um motor elétrico de indução utilizados em veículos elétricos.



Figura 5 – MIT

Fonte: (ALIEXPRESS <https://pt.aliexpress.com/item/1005003019507220.html>)

3.3 Motores de Relutância Variável

Motores de relutância variável vêm ganhando espaço e são reconhecidos por potenciais aplicações em veículos elétricos e híbridos.

Dentre suas vantagens:

1. Construção simples e robusta.
2. Ótimo controle de velocidade
3. Podem operar longas e constantes faixas de potência.

Dentre suas desvantagens:

1. Alto ruído.
2. Ondulações no torque, apesar desse motor ter boas características de torque.
3. Interferências eletromagnéticas.

O conceito dessa aplicação consiste em um campo magnético girante aplicado à um material ferromagnético, que tende a se alinhar com o campo magnético resultante gerado. Sua forma é concebida por um estator com um maior

número de fases, sendo a única fonte de excitação, e um rotor construído para apresentar variações bruscas de relutância enquanto for rotacionado. Antes que o alinhamento ocorra, os controladores alteram o campo magnético para que o rotor continue rotacionando. A Figura 6 mostra uma imagem explodida do motor que está sendo tratado neste tópico.



Figura 6 – Motor de Relutância Variável

Fonte: (INSIDE EVS <https://insideevs.com/photo/4508856/volkswagen-app-310-electric-drive-meb-platform/>)

4 SISTEMA DE FREIOS

Uma característica fundamental, que afeta a segurança em veículo, é a desempenho de seu sistema de frenagem. Com sistemas elétricos e eletrônicos, é possível recuperar, mesmo que parcial, a energia dissipada pelos freios dos veículos. Este capítulo tem como objetivo, apresentar modelamentos de veículos elétricos, o desempenho da frenagem e também mostrar condições seguras para a frenagem regenerativa. (EHSANI, 2005)

4.1 Força de frenagem

A figura 7 nos mostra uma roda durante uma frenagem. Quando o pedal do freio é acionado contra o disco (rd), é desenvolvido um torque de fricção (T_b). Esse torque, resulta em uma parada forçada (F_b) no contato entre pneu e solo. A parada forçada pode ser expressada como (EHSANI, 2005):

$$F_b = \frac{T_b}{r_d}$$

F_b = Força da parada forçada

T_b = Torque de fricção

r_d = Distância do centro ao ponto de contato entre a roda e o solo

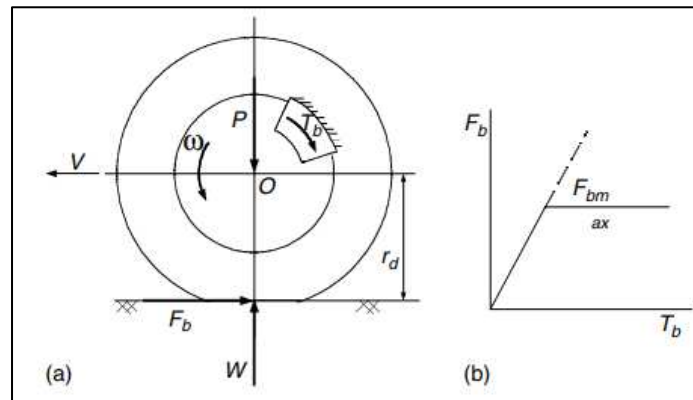


Figura 7 – (a) Força de frenagem e torque de frenagem, e (b) relação entre torque de frenagem e força de frenagem

Fonte: (EHSANI, 2005, p 55)

A força de frenagem cresce de forma proporcional à medida em que o torque cresce, todavia, quando F_b atinge a máxima força de frenagem que a adesão entre pneu e solo pode suportar, a tendência é que a força de frenagem pare de crescer, contudo, T_b continua a crescer, como expressado na figura 4. A expressão que compreende a máxima força de frenagem (F_{bmax}), limitada pela adesão, pode ser dada como (EHSANI, 2005):

$$F_{bmax} = \mu_b W$$

F_{bmax} = Máxima força de frenagem

w = Força normal

μ_b = Coeficiente de aderência do contato entre pneu e solo (para pistas secas utilizam-se valores entre 0,8 a 0,9. Num pior cenário, utilizam-se valores de 0,1 a 0,2 para pistas com lâmina de gelo).

4.2 Sistema de freios em veículos elétricos e híbridos

O sistema de frenagem regenerativa adiciona uma certa complexidade ao projeto. O primeiro ponto a ser verificado é se as forças estão bem distribuídas nos eixos do veículo, atendendo aos pré-requisitos de estabilidade. Para isso, existem três sistemas: frenagem em série com ótima sensação de frenagem; frenagem em série com ótima recuperação de energia e frenagem em paralelo. (EHSANI, 2005)

4.2.1 Sistema em série com ótima sensação de frenagem

Esse sistema é caracterizado por distribuir a força de frenagem entre os eixos traseiro e dianteiro do veículo. Com esse tipo de sistema, temos como objetivo, melhorar a sensação de frenagem a partir de uma boa distribuição das forças.

No eixo de tração (dianteiro), o sistema é composto pela frenagem regenerativa e pelo freio convencional. Se a demanda no eixo de tração for menor do que a máxima frenagem que o motor elétrico suporta, haverá apenas frenagem regenerativa no eixo, caso contrário, o freio convencional atuará complementando a força de frenagem. (EHSANI, 2005)

4.2.2 Sistema em série com ótima recuperação de energia

Esse sistema é caracterizado por recuperar a energia de frenagem ao máximo possível, atendendo à demanda de frenagem para uma dada aceleração.

Quando o veículo aciona o sistema de freios com uma desaceleração $\frac{J}{g} = \mu$, as forças de frenagem nas rodas dianteiras e traseiras podem variar dentro de uma certa faixa, desde que $F_{bf} + F_{br} = MvJ$ seja satisfeita. (EHSANI, 2005)

$\frac{J}{g}$ = Taxa de desaceleração requerida

F_{bf} = Força de frenagem no eixo dianteiro

F_{br} = Força de frenagem no eixo traseiro

Onde $\mu = 0,9$ e $\frac{J}{g} = 0,7$. Nesta situação, frenagem regenerativa deve ser utilizada a priori. Se a potência regenerativa máxima está nesta faixa, a força de frenagem das rodas dianteiras deve ser apenas frenagem regenerativa. A força de

frenagem das rodas traseiras deve atuar de forma a completar a força de frenagem necessária. Se a potência regenerativa for menor que o valor correspondente ao ponto, o motor elétrico deve ser controlado para que produza a máxima força de frenagem regenerativa. Para otimizar a sensação de frenagem, as forças de frenagem dos eixos devem ser ajustadas. Nesse caso, os freios convencionais também afetam o eixo dianteiro e o eixo traseiro. Se a desaceleração necessária for muito menor que o fator de estabilidade (ou seja, 0,3) e a força de frenagem regenerativa puder satisfazê-la, somente a frenagem regenerativa é usada, sem frenagem mecânica dos eixos dianteiro e traseiro. A força de frenagem regenerativa máxima é aplicada e o resto é amortecido pelo freio mecânico. Se a desaceleração necessária for maior que o fator de estabilidade, essa desaceleração necessária não será alcançada devido à estabilidade limitada. A desaceleração máxima do veículo é nesta situação, o ponto de atuação da força de frenagem deve estar na curva. (EHSANI, 2005)

4.2.3 Sistema de frenagem em paralelo

O sistema paralelo inclui frenagem elétrica (regenerativa) e mecânica, que produzem simultaneamente forças de frenagem paralelas, com o princípio de frenagem regenerativa aplicado apenas à roda dianteira. O sistema de frenagem paralela possui um freio mecânico tradicional com distribuição fixa da força de frenagem entre as rodas dianteiras e traseiras. A frenagem regenerativa aumenta a força de frenagem das rodas dianteiras. A força de frenagem regenerativa gerada pelo motor elétrico é diretamente proporcional à frenagem mecânica e, portanto, à desaceleração do veículo. Como a força de frenagem regenerativa disponível depende da rotação do motor e nenhuma energia é recuperada em baixas rotações, a força de frenagem regenerativa é projetada para ser zero em marcha lenta alta (e.g. $\frac{J}{g} = 0,9$) para manter um bom equilíbrio. Quando a demanda de frenagem for menor que este valor, a frenagem regenerativa será efetiva. A frenagem regenerativa só será aplicada quando a demanda de frenagem estiver abaixo de um determinado valor (por exemplo, 0,15g), apenas frenagem regenerativa será aplicada. (EHSANI, 2005)

5 ARMAZENAMENTO

Em aplicações em sistemas de frenagem regenerativa, principalmente na sua implementação em VE, o armazenamento de energia é dado como um fator condicional, visto que contribui para eficiência e autonomia de um projeto deste nível e que inclui principalmente baterias químicas, ultra capacitores, que é essencialmente um tipo de acumulador/conversor de energia. Há uma série de requisitos para o armazenamento de energia, como a energia e potência específicas, a eficiência, a exigência de manutenção, gestão de custos, adequação ambiental, seguro para a sua utilização, a energia específica é importante ser considerado, uma vez que ela limita o alcance de um veículo dotado de um projeto puramente elétrico (EHSANI, 2005). Por outro lado, em uma aplicação de um HEV a potência específica é a primeira consideração levantada, porque toda a energia é oriunda de sua fonte de energia para que possa garantir o desempenho de um veículo, particularmente durante a aceleração em aclives, portanto na implementação de um armazenamento de energia em um sistema de frenagem regenerativa estes são requisitos que devem ser considerados no desenvolvimento (EHSANI, 2005). Diante disto tem-se no próximo item a explicação de como funcionam as baterias que fazem a conversão da energia.

5.1 Baterias eletroquímicas

As Baterias eletroquímicas são dispositivos eletroquímicos que convertem energia elétrica em energia química a um determinado potencial durante o seu carregamento, e convertem energia química em energia elétrica durante ao seu processo de descarga (EHSANI, 2005). Uma bateria é composta de células empilhadas que formam uma unidade independente e completa que, possui todas as propriedades eletroquímicas.

Uma célula de bateria é constituída por três elementos primários: dois eletrodos positivos e negativos imersos num eletrólito.

Os fabricantes de baterias especificam a bateria com capacidade de (ampères-hora), a qual é definida como o número de ampères-hora obtidos quando há descarga da bateria, a partir de um estado totalmente carregado, até que a tensão no terminal cai para a sua tensão de corte. Desta maneira a mesma bateria tem um número diferente de ampères-hora em diferentes taxas atuais de descarga.

De um modo geral, com uma velocidade de corrente de descarga grande (EHSANI, 2005). A Figura 8 ilustra uma bateria tratada neste tópico.

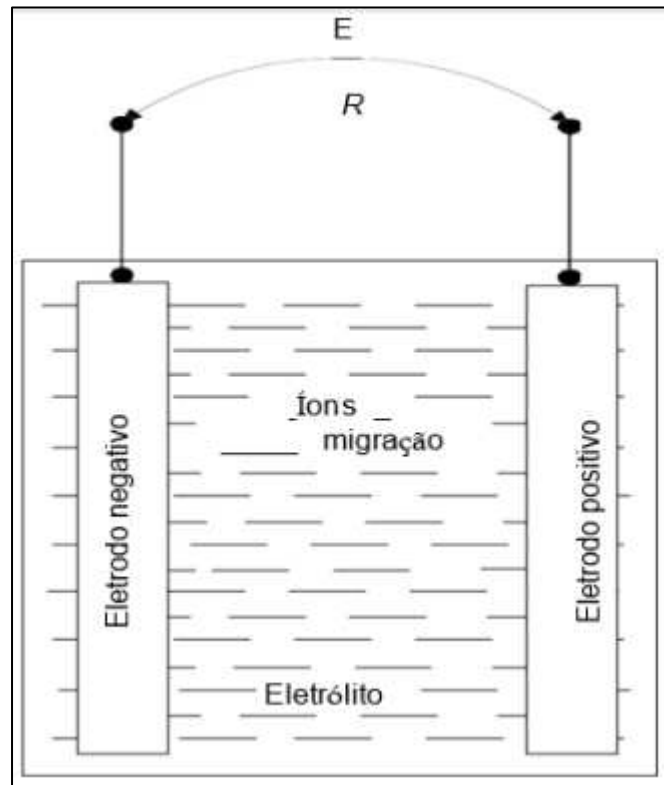


Figura 8 – Bateria/Pilha eletroquímica

Fonte: (MUNDO EDUCACAO <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/eletroquimica.htm>)

5.2 Baterias de chumbo-ácido

A bateria de chumbo-ácido tem sido um produto de sucesso comercial há mais de um século e ainda é largamente utilizado como armazenamento de energia elétrica no campo automotivo e outras aplicações. Suas vantagens são o baixo custo, tecnologia prospera a alta capacidade de potência relativo, e bom ciclo (EHSANI, 2005). Estas vantagens são atraentes para a sua aplicação em HEVs onde alta potência é a primeira consideração. Os materiais envolvidos (chumbo, óxido de chumbo, ácido sulfúrico) são de baixo custo quando comparados com os seus semelhantes mais avançados. As baterias de chumbo-ácido também têm várias desvantagens, como por exemplo, o seu peso. (EHSANI, 2005). A Figura 9 ilustra uma bateria de chumbo ácido tratada neste tópico.



Figura 9 – Bateria de chumbo ácido.

Fonte: (NEO CHARGE <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/bateria-veiculo-eletrico#tipos-de-bateria>)

5.3 Baterias de níquel

O níquel é um metal mais leve do que o chumbo e tem muito boas propriedades eletroquímicas que são desejáveis para aplicações de bateria. Existem quatro tecnologias de bateria diferentes à base de níquel: níquel-ferro, níquel-zinco, de níquel-cádmio, e níquel-hidreto metálico (EHSANI, 2005). O sistema de níquel / ferro foi comercializado durante os primeiros anos do século 20. O sistema compreende um níquel (NiOOH) elétrodo positivo e um elétrodo negativo de ferro metálico (EHSANI, 2005). Baterias de níquel / ferro sofrem de gaseamento, corrosão e problemas de autodescarga. Estes problemas foram parciais ou totalmente resolvidos em protótipos que ainda têm de chegar ao mercado. Essas baterias são complexas devido à necessidade de manter o nível da água e a eliminação segura do hidrogênio e oxigênio libertado durante o processo de descarga (EHSANI, 2005). A Figura 10 ilustra uma bateria discutida neste tópico.



Figura 10 – Bateria de Níquel

Fonte: (NEO CHARGE <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/bateria-veiculo-eletrico#tipos-de-bateria>)

5.4 Baterias de base-lítio

O lítio é o mais leve de todos os metais e apresenta características muito interessantes do ponto de vista na eletroquímica. Na verdade, ele permite uma alta tensão termodinâmica, o que resulta em uma energia específica muito elevada. Existem duas principais tecnologias de baterias de lítio à base de: lítio-polímero e de íons de lítio (EHSANI, 2005). A Figura 11 ilustra uma bateria discutida neste tópico.



Figura 11 – Bateria de base-lítio

Fonte: (NEO CHARGE <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/bateria-veiculo-eletrico#tipos-de-bateria>)

5.5 Supercapacitores

Uma possível solução para o problema de picos de corrente é a utilização de supercapacitores. Tais dispositivos são capazes de suportar uma corrente elevada em relação a bateria e podem armazenar energia durante uma frenagem para ser utilizada posteriormente em momentos de elevada demanda de potência, como na reaceleração do veículo (KERNNS, 2017). Além disso, os supercapacitores possuem elevada vida útil, acima de 1.000.000 de ciclos de vida (LIBICH, 2018), quando comparado com baterias de chumbo-ácido, em torno de 1000 ciclos, ou Li-ion, em torno de 2000 a 5000 ciclos (WANG; COLLINS; LI, 2011). A Figura 12 nos ilustra um exemplo de um supercapacitor utilizado em veículos elétricos.



Figura 12 – Supercapacitor

Fonte: (NEO CHARGE <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/bateria-veiculo-eletrico#tipos-de-bateria>)

5.6 Eficiência energética de baterias

As perdas de energia durante a descarga da bateria e carregamento pode aparecer na forma de perda de tensão, mas interfere também no fator segurança sendo este fator caso não seja bem projetado podem ocorrer incêndios ou diminuição da durabilidade de uma bateria do sistema. Assim, a eficiência do carregamento da bateria durante o carregamento pode ser definida, em qualquer ponto de operação como a razão da tensão de operação da célula para a tensão termodinâmica (EHSANI, 2005).

A tensão nos terminais, como função de corrente da bateria e de energia armazenada, é mais baixa na descarga e mais elevada no carregamento do que o potencial elétrico produzido por uma reação química devido a sua resistência interna dos componentes (EHSANI, 2005).

6 Métodos de frenagem regenerativa

De acordo com Chen (2007), no caso de um veículo movido a propulsão elétrica, no momento em que um comando de aceleração é executado a máquina elétrica atua como motor, provendo movimento e energia ao veículo nas diversas condições dinâmicas necessárias, como a aceleração ou até a manutenção da velocidade. Ao contrário, quando recebido um comando apropriado para desaceleração, a máquina elétrica atua como gerador, isto é, a energia dinâmica do

movimento do veículo é transferida para a bateria ou para outra fonte armazenadora de energia do veículo por meio de um conversor bidirecional, fenômeno denominado de frenagem regenerativa.

6.1 Frenagem regenerativa *Low-Side* PWM

Esse método consiste em controlar somente as chaves *low-side* do inversor (chaves Q4, Q6 e Q2 na Figura 13), enquanto as chaves *high-side* (Q1, Q3 e Q5) são mantidas fechadas durante todo o tempo (ADIB, 2018).

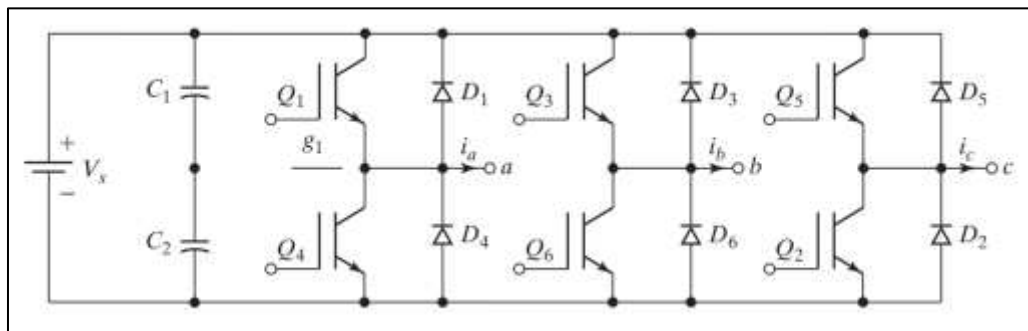


Figura 13 – Diagrama esquemático de um inversor trifásico

Fonte: (Adaptado de Rashid 2014)

Existem variações na utilização desse método, mas geralmente o mesmo sinal PWM é aplicado às chaves *low-side*, como exhibe a Figura 14. Ao combinar as indutâncias presentes nas fases da máquina síncrona com o chaveamento das chaves *low-side* do inversor e com os diodos em paralelo com a carga, cria-se um conversor elevador de tensão, permitindo que a corrente flua da máquina síncrona para os elementos armazenadores de energia (ADIB, 2018).

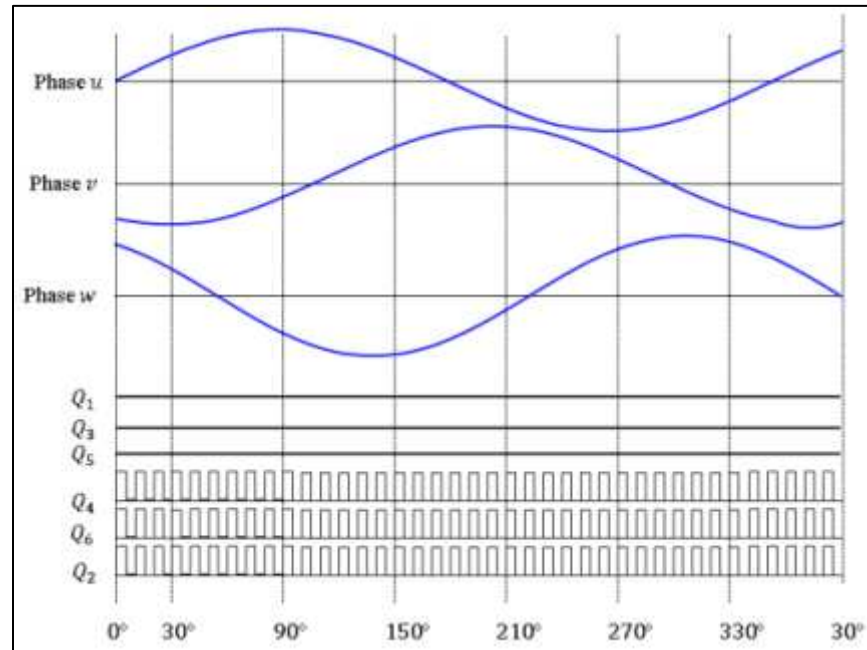


Figura 14 – Sinais de chaveamento da frenagem *low-side* PWM

Fonte: (Adib 2018)

A Figura 15 representa o fluxo das correntes no inversor e na máquina síncrona durante o período de 0° a 30° (correspondente aos referidos ângulos na Figura 13). Repare que durante esse período um caminho galvânico é formado e os terminais do motor acabam por ser conectados em Y, isto é, nenhuma corrente elétrica é retornada à fonte, mas sim direcionada às indutâncias das fases restantes do motor. Entretanto, durante o período em que as chaves *low-side* permanecem desligadas há fluxo de corrente elétrica pelos diodos de roda livre superiores, retornando corrente elétrica à fonte e atingindo a condição de frenagem regenerativa, como exibe a Figura 16.

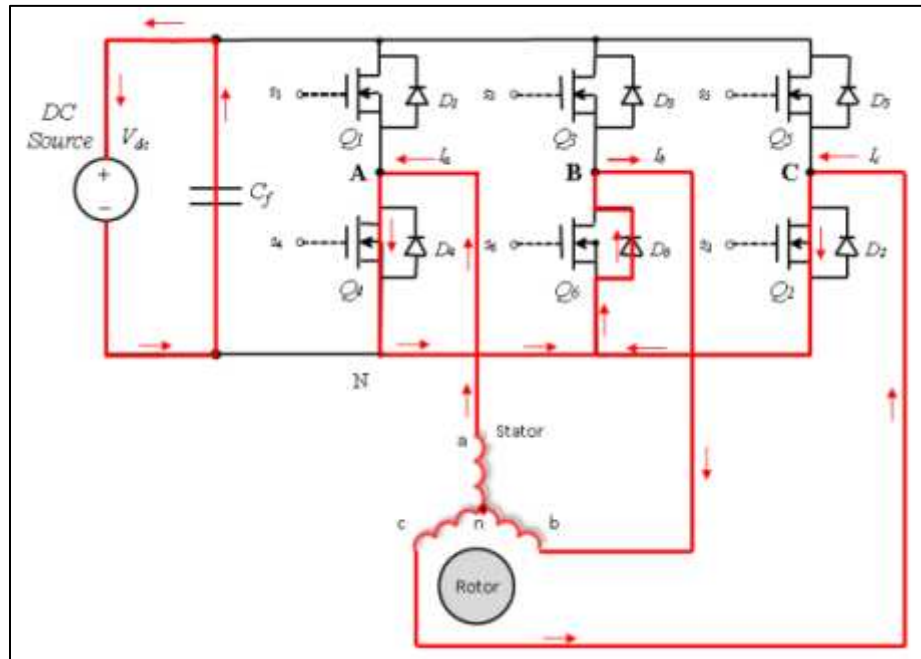


Figura 14 – Sinais de chaveamento da frenagem *low-side* PWM

Fonte: (Adib 2018)

A alteração do *duty-cycle* do chaveamento das chaves *low-side* aumenta ou diminui o tempo que essa permanecem ligadas ou desligadas em um período de chaveamento. Ao aumentar o *duty-cycle* (isto é, chaves *low-side* permanecerão ligadas por tempo maior) as indutâncias do motor serão carregadas por um período maior, o que aumenta a posterior quantidade de energia regenerada (ADIB, 2018). Por outro lado, se houver um *duty-cycle* maior do que o necessário, as chaves permanecerão desligadas por um tempo menor, isso resulta em uma maior dissipação de energia em forma de calor.

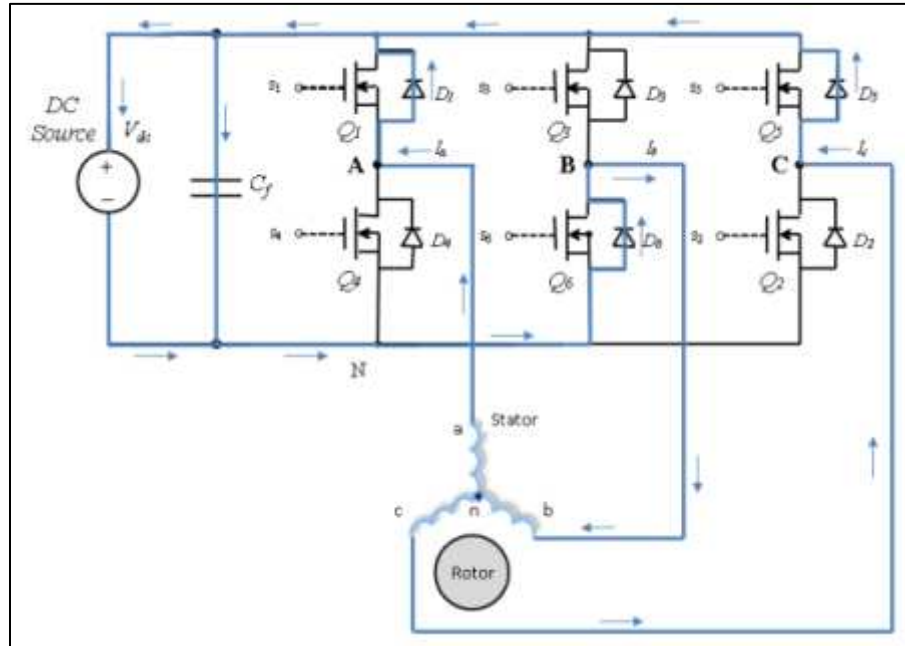


Figura 16 – Fluxo de corrente elétrica com as chaves *low-side* desligadas

Fonte: (Adib 2018)

Na frenagem regenerativa *Low-Side* PWM não é possível controlar o conjugado eletromagnético diretamente como é realizado na frenagem por controle vetorial, dessa maneira, esse método de frenagem tende a apresentar um desempenho dinâmico pior em relação à frenagem regenerativa por controle por campo orientado. Entretanto, o método *Low-Side* PWM tem implementação mais simples em relação à frenagem FOC.

7 Proteção de sistemas aplicado ao chaveamento de IGBTs

Os IGBTs combinam as vantagens dos transistores de junção bipolar com os MOSFETs, sendo dispositivos controlados por tensão (RASHID, 2014). Essencialmente, o IGBT possui resistência de entrada infinita, entretanto, devido a capacitância de entrada, o rápido chaveamento de IGBTs pode exigir uma grande quantidade de corrente elétrica de entrada em seu *gate* (HOROWITZ, 2015). Em termos práticos, para alcançar velocidade de chaveamento da ordem de 100 nanosegundos ou menos, os *gate drivers* utilizados devem apresentar baixa impedância de saída, e ainda possuir a capacidade de fornecer, e drenar altas correntes do *gate* do IGBT (RASHID, 2014). O comportamento em chaveamento de

um IGBT é determinado por suas capacitâncias internas bem como pela resistência interna de *gate* (SEMIKRON, 2017).

Devido às capacitâncias internas, o IGBT não entra em condução instantaneamente (RASHID, 2014). O IGBT pode ser chaveado entre os estados de alta impedância entre coletor e emissor e de baixa impedância entre coletor e emissor em quatro intervalos de tempo. As durações de cada intervalo são dependentes das capacitâncias parasitas presentes, das tensões elétricas entre os terminais do IGBT e da corrente elétrica de *gate*. O primeiro período corresponde ao tempo de carga da capacitância de entrada até a tensão de *threshold* (V_{TH}), essa definida como a mínima tensão entre *gate* e emissor requerida para criar um canal de condução entre os terminais do coletor e do emissor (SEMIKRON, 2017), em que a maior parte da corrente elétrica de *gate* carrega a capacitância entre *gate* e emissor e o restante a capacitância entre *gate* e coletor. O segundo período corresponde ao período de tempo em que o valor da tensão V_{GE} parte da tensão de *threshold* e atinge a tensão de Miller. Nesse período de tempo, é criado um canal de condução entre o coletor e o emissor e o IGBT passa a conduzir corrente elétrica, entretanto, nesse período o IGBT ainda não opera na região de saturação, mas sim na região linear, já que a corrente elétrica de coletor é proporcional à tensão *gate*-emissor. No terceiro período, a tensão *gate*-emissor permanece constante, enquanto a tensão coletor-emissor começa a diminuir e o IGBT já opera na região de saturação. No quarto período, a tensão coletor-emissor é próxima de zero e a tensão *gate*-emissor atinge o valor final, determinada pela tensão de alimentação utilizada para acionar o IGBT (TEXAS INSTRUMENTS, 2018). A Figura 17 ilustra o comportamento deste tópico.

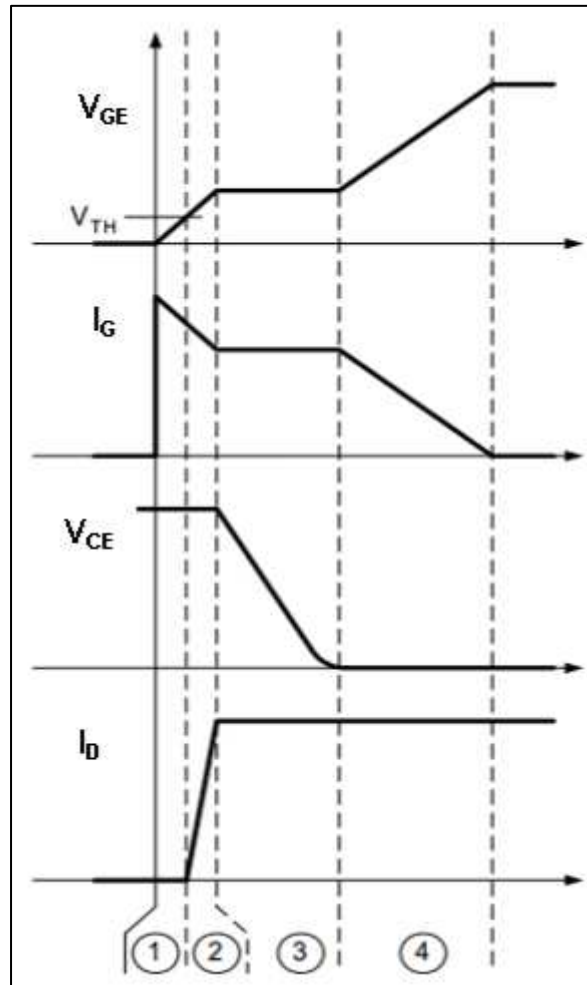


Figura 17 – Período do acionamento do IGBT
 Fonte: (Adaptado de Texas Instruments 2018)

7.1 Proteção contra *spikes* de tensão coletor e emissor

Essa proteção é utilizada para monitorar os *spikes* de sobretensão coletor-emissor durante o período de desligamento do IGBT (STMICROELECTRONICS, 2018). O *feedback* direto da tensão coletor-emissor acontece, nessa topologia, por um diodo TVS (*Transient Voltage Supressor*). Caso a tensão coletor-emissor exceda a tensão de ruptura do diodo TVS, esse entra em condução. Um valor de tensão limite para comparação é programado no *gate driver* e quando excedido ações para proteção são tomadas. Nesse caso, geralmente o *gate driver* reduz a frequência de chaveamento do semicondutor de potência para mantê-lo em uma condição de operação segura (STMICROELECTRONICS, 2018). Cuidados também devem ser tomados em relação às condições de operação do diodo TVS, como corrente

máxima de operação e potência máxima. A maioria dos *gate* drivers que dispõe da proteção integrada contra *spikes* de tensão também apresentam artifícios para controle da corrente elétrica passante pelo diodo TVS (XIONG LI, 2018). A Figura 18 ilustra um diagrama para essa aplicação.

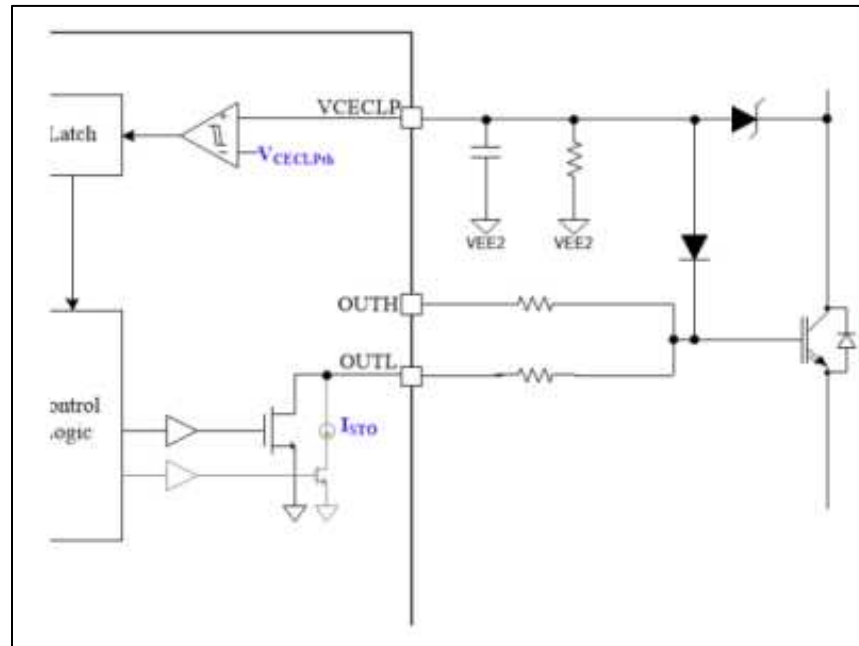


Figura 18 – Diagrama da proteção contra *spikes* de tensão coletor-emissor

Fonte: (Adaptado de Texas Instruments 2018)

7.2 Proteção contra falso acionamento

O falso acionamento do IGBT pode ocorrer devido a descarga da capacitância CGC, também conhecida como capacitância de Miller. Para tal, muitos integrados utilizados como drivers de IGBTs implementam um caminho de baixíssima impedância entre o terminal do *gate* e a referência da alimentação do lado de alta tensão. Geralmente, o transistor responsável pela ativação da função (transistor circulado na Figura 19) é ativado quando a tensão *gate*-emissor do IGBT fica menor que sua tensão de *threshold*, por isso, muitas vezes essa proteção é denominada *Active Miller Clamp* (proteção ativa contra capacitância parasita de Miller).

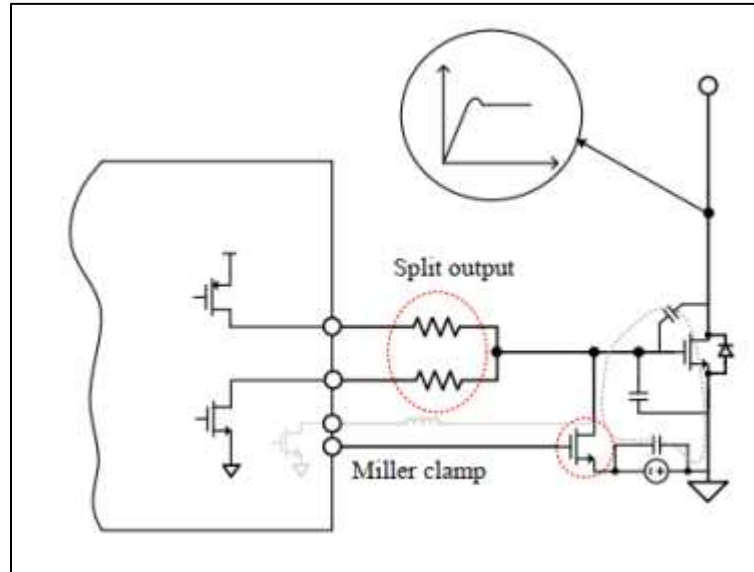


Figura 19 – Diagrama da proteção contra falso acionamento

Fonte: (Xiong Li 2018)

8 Conclusão

O trabalho focou-se em apresentar um conceito básico sobre frenagem regenerativa em veículos elétricos e híbridos, assim mostrando, os conceitos dos cálculos e as interferências no decorrer de um dimensionamento, como por exemplo, o atrito da pista e até mesmo os tipos de baterias, cada uma com suas vantagens e desvantagens. Contudo, é inegável que a utilização de sistemas, que possibilitam a conversão da energia dissipada por freios em energia elétrica, é algo extremamente válido, pois se trata de uma maior autonomia dos veículos e menos dependência da utilização de combustíveis fósseis.

REFERÊNCIAS

Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles - Mehrdad Ehsani.pdf

WANG, L.; COLLINS, E. G.; LI, H. Optimal design and real-time control for energy management in electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 60, n. 4, p. 1419–1429, May 2011. ISSN 0018-9545.

LIBICH, J. et al. Supercapacitors: Properties and applications. *Journal of Energy Storage*, v. 17, p. 224 – 227, 2018. ISSN 2352-152X.

KERNS, B. et al. A control algorithm to reduce electric vehicle battery pack rms currents enabling a minimally sized supercapacitor pack. In: 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). [S.l.: s.n.], 2017. p. 376–380.

CHEN, C. et al. Regenerative Braking Control For Light Electric Vehicles. *IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems (IEEE - PEDS 2011)*. Singapura, 2011. p. 631 - 636.

SIQUEIRA, D. S.; ANDRADE, D. A. Projeto e Simulação da Operação de um Motor de Corrente Contínua Sem Escovas. In: XII Seminário de Iniciação Científica. Uberlândia, 2008. Universidade Federal de Uberlândia.

RASHID, M.H. *Eletrônica de potência, dispositivos, circuitos e aplicações*. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

ADIB, A.; DHAOUADI, R. Desempenho analysis of regenerative braking in permanent magnet synchronous motor drives. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, Sharjah, Emirados Árabes Unidos, 2018. Vol. 3 n° 1. P. 460-466.

XIONG LI. Designing with isolated gate drivers for HEV/EV applications. 2018. 45 p. Notas de aula.

TEXAS INSTRUMENTS. *Fundamentals of MOSFET and IGBT gate drivers circuits*. 2018. 48 p. Nota de aplicação. Código SLUA618A.

STMICROELECTRONICS. STGAP1AS Automotive galvanically isolated advanced single gate driver. 2018. 70 p. Folha de dados. Código DocID029344.

HOROWITZ, P; HILL, WINFIELD. *The art of electronics*. 3. ed. New York: Cambridge University Press, 2015.

SEMIKRON. SKM75GB12T4. 2017. 6 p. Folha de dados. Revisão 4.

NEO CHARGE <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/bateria-veiculo-eletrico#tipos-de-bateria>

INSIDE EVS <https://insideevs.com/photo/4508856/volkswagen-app-310-electric-drive-meb-platform/>



UNITAU

Termo de compromisso - RI

SIBi

Sistema Integrado de Bibliotecas

1. Identificação

Autor: Helyelton da Silva Pinheiro
 RG: 39.392.057-4 CPF: 438.185.048-30 e-mail: helyelton.s.pinheiro@gmail.com
 Fone: (12) 98123-8742 Vínculo na Unitau: 10043515
 Título do documento: Conceitos sobre Frenagem Regenerativa

- Trabalho Acadêmico Trabalho de Conclusão de Curso
 Monografia – Especialização Dissertação de Mestrado
 Tese de Doutorado Artigos de Periódico
 Outros: _____

Orientador: Me. Sandro Botossi dos Santos
 RG: 19211685-X CPF: 057.886.108-93
 e-mail: sandrobotossi@yahoo.com.br

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O referido autor

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade, estando assim livre de plágio.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à Universidade de Taubaté os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade de Taubaté, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Termo de autorização

Na qualidade de titular dos direitos de autor do conteúdo supracitado, autorizo a Unitau a disponibilizar em seu Repositório Institucional, sem ressarcimento dos direitos autorais, conforme permissões assinadas abaixo, a título de divulgação da produção científica gerada pela Universidade de Taubaté.

Permitir a publicação total do trabalho?

Sim Não – Por que? _____

Autorizo ainda o SIBi-Unitau a disponibilizar a obra gratuitamente, de acordo com a licença pública Creative Commons por mim declarada sob as seguintes condições:

Permitir uso comercial de sua obra?

Sim Não

Permitir modificações em sua obra?

Sim
 Sim, contanto que outros compartilhem pela mesma licença
 Não

A obra continua protegida por Direito Autoral e/ou por outras leis aplicáveis. Qualquer uso da obra que não o autorizado sob esta licença ou pela legislação autoral é proibido.

Sando 29/11/2020
 Local, Data

Assinatura do Autor/ e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Assinatura do Orientador