

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL  
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**ELZEÁRIO CAETANO JUNIOR  
JORDAN SANTOS DE ABREU**

**FRENAGEM REGENERATIVA:  
UM ESTUDO SOBRE SEU FUNCIONAMENTO E DIFERENTES APLICAÇÕES**

**JOÃO MONLEVADE  
2019**

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL  
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**ELZEÁRIO CAETANO JUNIOR  
JORDAN SANTOS DE ABREU**

**FRENAGEM REGENERATIVA:  
UM ESTUDO SOBRE SEU FUNCIONAMENTO E DIFERENTES APLICAÇÕES**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação do Curso  
de Engenharia Elétrica da Faculdade  
Doctum de João Monlevade, como  
requisito parcial para a obtenção do  
título de Bacharel  
em Engenharia Elétrica.**

**Professor Orientador: M.Sc José  
Olimpio dos Santos Filho**

**JOÃO MONLEVADE  
2019**

**ELZEÁRIO CAETANO JUNIOR  
JORDAN SANTOS DE ABREU**

**FRENAGEM REGENERATIVA:  
UM ESTUDO SOBRE SEU FUNCIONAMENTO E DIFERENTES APLICAÇÕES**

**Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado e aprovado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, na Faculdade Doctum de João Monlevade, em 2019.**

**Avaliação do Orientador:\_\_\_\_\_**

**Conceito de Metodologia:\_\_\_\_\_**

**Total:\_\_\_\_\_**

**João Monlevade, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ 2019.**

---

**Prof. Msc. JOSE OLÍMPIO DOS SANTOS FILHO  
Orientador**

---

**Prof. Dra. ANA REGINA LARA BRETZ  
Professor de TCC II**

**COMISSÃO AVALIADORA: \_\_\_\_\_**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradecemos a Deus, pela oportunidade concedida durante este processo de aprendizado.

Aos nossos familiares e companheiros, que compartilharam do nosso ideal e o alimentaram, incentivando-nos a prosseguir a jornada, independentemente de quais fossem os obstáculos.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Comportamento do sistema de frenagem regenerativa em modos de aceleração/frenagem de um VE .....	17
Figura 2 : Volante de inércia.....	18
Figura 3 : disposição de um EV com os seguintes componentes eletroeletrônicos ..	21
Figura 4 : Sistema de frenagem regenerativa em paralelo de um EV controlado eletronicamente .....	24
Figura 5 : Representação de uma máquina CC, aplicada a um projeto de um EV ...	26
Figura 6 : Partes principais de uma máquina CC .....	27
Figura 7 : Representação de uma célula típica de uma bateria eletroquímica com os eletrodos positivos e negativos imersos em eletrólito. ....	29
Figura 8 : Características de descarga de uma bateria.....	29
Figura 9 : Representação da resistência interna de um circuito de bateria .....	32
Figura 10 : Representação da Van híbrida de Aachen.....	36
Figura 11 : Ponte rolante .....	38
Figura 12 : resistor ligado ao barramento cc do inversor de frequência .....	39
Figura 13 :Unidade regenerativa de um inversor de frequência unidirecional.....	39
Figura 14 : diagrama típico do acionamento do motor elétrico de uma ponte rolante controlado por um inversor de frequência unidirecional com resistor de frenagem interligado ao barramento CC .....	43
Figura 15 : Diagrama de um inversor de frequência bidirecional geralmente usado em VE ou circuitos realimentados .....	44

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Teste a plena carga, corrente dissipada no resistor de frenagem .....	40
Gráfico 2 - Teste carga máxima, corrente dissipada no resistor de frenagem .....	40
Gráfico 3 - Teste plena carga, tensão no resistor de frenagem.....	41
Gráfico 4 - Teste carga máxima, tensão no resistor de frenagem.....	41
Gráfico 5- Teste plena carga, potência dissipada no resistor de frenagem.....	42
Gráfico 6 - Teste carga máxima, potência dissipada no resistor de frenagem.....	42

## LISTA DE SIGLAS

ASIC	–	Circuito de aplicação específica
BATE	–	Bateria selada de chumbo
CA	–	Corrente alternada
CC	–	Corrente contínua
DC	–	<i>Direct Current</i>
DFOC	–	<i>Direct Field Oriented Control</i>
DSP	–	<i>Digital Signal Processor</i>
DTC	–	<i>Direct Torque Control</i>
VE	–	<i>Electric Vehicle</i>
FLC	–	<i>Feedback Linearization Control</i>
FOC	–	<i>Field Oriented Control</i>
G	–	<i>Energia de Gibbs</i>
HEV	–	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>
IFOC	–	<i>Indirect Field Oriented Control</i>
KERS	–	<i>Kinetic Energy Recovery Systems</i>
MIT	–	Motor de indução trifásica
MRAS	–	<i>Model Reference Adaptive Systems</i>
PWM	–	<i>Pulse Width Modulation</i>
SOC	–	<i>State of Charge</i>
SVM	–	<i>Space-Vector Modulation</i>
SZS	–	<i>Sensorless zero sequence</i>



## LISTA DE EQUAÇÕES

Potência dissipada	(1)
Energia cinética do volante de inércia	(2)
Capacidade de energia de um EV	(3)
Reação de uma bateria Li-Íon	(4)

## RESUMO

Este trabalho acadêmico tem como objetivo estudar o funcionamento do sistema de frenagem regenerativa e, de forma mais específica, examinar o sistema e/ou soluções que utilizam frenagem regenerativa; estudar a utilização de diferentes métodos de sistemas regenerativos; investigar se este tipo de sistema pode ser aplicado com a finalidade na economia do consumo de energia elétrica, assim como a pesquisa, e a aplicação de diferentes métodos regenerativos como é feito em veículos elétricos. O estudo justificou-se pelo interesse do acadêmico em conhecer de forma detalhada como funciona a frenagem regenerativa, que na atualidade é muito usada em veículos elétricos, melhorando a autonomia de percurso. Vários métodos são utilizados para a aplicação deste sistema em veículos de carga e de passageiros, diversos estudos também são realizados em equipamentos industriais como correias transportadoras e guindastes industriais, como métodos da utilização racional e com eficiência no consumo de energia elétrica.

**Palavras-chaves:** Frenagem Regenerativa. Veículo Elétrico. Máquinas Industriais. Economia de Energia.

## **ABSTRACT**

This academic work aims to study the functioning of the regenerative braking system, and more specifically to examine the system and / or solutions that use regenerative braking; study the use of different methods of regenerative systems; To investigate if this type of system can be applied in order to be applied in the economics of electric energy consumption, as well as the research, and the application of different regenerative methods as it is done in electric vehicles. The study was justified by the academic interest in knowing in detail how regenerative braking works, which is currently widely used in electric vehicles, improving the autonomy of travel, various methods are used for the application of this system in freight vehicles and In passenger studies, several studies are also performed on industrial equipment such as conveyor belts, and industrial cranes as methods of rational use and efficient consumption of electricity.

**Keywords:** Regenerative Braking. Electric vehicle. Industrial machines. Energy saving.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1 Justificativa</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>13</b>
1.2.1 Objetivo geral .....	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
<b>2 REFERENCIAL TEORICO</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2 Fundamentos de frenagem regenerativa</b> .....	<b>15</b>
<b>2.3 Tecnologias aplicadas a sistemas de frenagem regenerativa</b> .....	<b>18</b>
2.3.1 Volante de inércia.....	18
2.3.2 Molas de armazenagem de energia .....	19
2.3.3 Princípio do funcionamento do sistema hidráulico .....	20
2.3.4 O sistema eletromagnético.....	20
<b>2.4 Sistemas de frenagem de um veículo elétrico</b> .....	<b>21</b>
2.4.1 Frenagem regenerativa em série.....	22
2.4.2 Frenagem regenerativa em paralelo .....	23
<b>2.5 Sistemas de propulsão elétricos</b> .....	<b>25</b>
2.5.1 Máquinas de corrente contínua .....	26
2.5.2 Componentes de uma máquina CC .....	27
<b>2.6 Armazenamento de energia</b> .....	<b>27</b>
<b>2.7 Baterias eletroquímicas</b> .....	<b>28</b>
2.7.1 Reações eletroquímicas .....	30
2.7.2 Energia específica.....	31
2.7.3 Potência específica .....	31
2.7.4 Eficiência energética de baterias.....	31
2.7.5 Baterias de chumbo-ácido .....	32
2.7.6 Baterias de níquel .....	33
2.7.7 Baterias base-lítio.....	33
2.7.8 Bateria de polímero de lítio (Li-P).....	34
2.7.9 Íons de lítio (Li-Íon).....	34
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>37</b>

<b>4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE DADOS .....</b>	<b>38</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>47</b>
<b><u>6</u> REFERÊNCIAS.....</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As fontes alternativas de energia são atualmente e cada vez mais objetos de pesquisa em todo o mundo, para suprir a crescente demanda ou para atenuar os problemas ambientais decorrentes principalmente do uso de energia de origem fóssil. Não somente fontes alternativas são consideradas, mas também um melhor uso do aproveitamento de recursos energéticos ainda pouco explorados, uma abordagem é o aproveitamento da energia cinética de corpos que apresentam movimento linear, tais como veículos de transporte de carga e de passageiros, entre outros, para produção de energia elétrica durante o processo de frenagem (TAVARES, 2012).

Uma das formas de reaproveitamento de energia utilizadas nos chamados Sistemas de Recuperação de Energia Cinética utiliza a expressão frenagem regenerativa Ehsani Et al. (2005). A frenagem regenerativa aproveita a energia cinética na forma de calor em freios dissipativos e reduz o desgaste do sistema mecânico de frenagem. É utilizada em alguns processos industriais e em alguns sistemas de transporte. Também atua em veículos automotores elétricos e híbridos como forma de aumento de eficiência global e de autonomia afirma TOSHIZAEMON (2009).

Veículos elétricos utilizam, em parte ou completamente para sua propulsão motores elétricos, e o seu combustível é a eletricidade obtida com uma fonte conectada à energia elétrica por meio de plugues ou de cabos aéreos recorrendo ao sistema de indução eletromagnética ou por meio da energia mecânica de frenagem (frenagem regenerativa, ao se frear o veículo), De acordo com Antunes (2018, p. 17), e complementa: “[...] é uma alternativa para um dos maiores problemas ambientais que estamos vivendo, o aquecimento global”, pois para o autor afirma que os carros a combustão são os principais poluidores que afetam a camada de ozônio.

Silva e Souza (2015) afirmam que todo veículo elétrico pode conter em seu sistema construtivo, a frenagem regenerativa, que consiste em absorver a energia cinética da desaceleração para gerar energia e armazenar este potencial em um banco de baterias. Na aceleração, o potencial elétrico é aproveitado através de um motor elétrico para condução do veículo.

Essa saída para a emissão de poluentes ocorre, segundo Silva e Souza (2015), em razão do sistema de regeneração de energia de frenagem ser projetado para recuperar, armazenar e em seguida utilizar esta energia, que seria perdida durante a frenagem. Assim, este sistema reduz a velocidade do veículo, e a energia cinética é convertida em energia elétrica a ser utilizada posteriormente, tanto no sistema de motorização do veículo, quanto em seus sistemas elétricos auxiliares, quando armazenada em baterias.

O objetivo deste estudo é descrever o funcionamento do sistema de frenagem regenerativa, assim como pesquisar a utilização de diferentes métodos regenerativos de energia, e ainda, compreender como ocorre o armazenamento de energia produzida por este sistema. De forma mais específica, pretende-se, investigar se tal sistema pode ser aplicado em um guindaste industrial que contenham dissipação de energia potencial e cinética, como em veículos, para fins de economia de energia elétrica.

Neste sentido, o tipo de pesquisa quanto à coleta de dados será a bibliográfica, através de conteúdos lidos em artigos de repositório em sites e livros sobre o assunto, com a finalidade de colocar os pesquisadores em contato com o material pertinente ao tema, no que tange ao armazenamento de energia, conversores eletromecânicos e acionamentos CA/CC.

## **1.1 Justificativa**

O interesse acadêmico desta pesquisa está em conhecer o funcionamento da frenagem regenerativa, e se este tipo de sistema pode ser aplicado com o objetivo de redução no gasto com energia elétrica, com a utilização de métodos racionais no consumo e dispêndio de energia a fim de que se possa obter uma eficiência energética aplicada a estes sistemas.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Estudar o funcionamento do sistema de frenagem regenerativa e diferentes métodos aplicados sobre este assunto.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Examinar sistemas que utilizam frenagem regenerativa;
- Estudar a utilização de diferentes métodos aplicados à frenagem regenerativa;
- Investigar se este tipo de sistema pode ser aplicado com a finalidade de redução no consumo de energia elétrica.

## 2 REFERENCIAL TEÒRICO

Neste capítulo a fundamentação trará conceitos importantes sobre a frenagem regenerativa, sendo que são apresentados os fundamentos da frenagem regenerativa, as tecnologias aplicadas a sistemas de frenagem regenerativa como volante de inércia e mola de armazenagem de energia, o princípio do funcionamento do sistema hidráulico, o sistema eletromagnético, sistema de frenagem do veículo elétrico, a frenagem regenerativa em série e frenagem regenerativa em paralelo.

Para Hoyer (2008), a apresentação dos freios regenerativos tinha como finalidade compensar a eficiência precária das baterias usadas em veículos elétricos, Em 1903 foi produzido o primeiro automóvel híbrido em série, com gerador elétrico alimentado por um motor pequeno de combustão interna e dois motores elétricos menores que davam tração às rodas dianteiras.

Sobre os carros híbridos e elétricos este breve histórico se faz necessário para a compreensão do funcionamento e da evolução das tecnologias ao longo dos anos desde a sua concepção. A seguir passa-se à explicação da frenagem regenerativa, assim como conceitos e explicações para melhor entrosamento com o tema.

### 2.2 Fundamentos de frenagem regenerativa

O primeiro freio regenerativo, segundo EHSANI et al. (2005), foi invenção do Francês M. A. Darracq, em 1897, e tinha como objetivo aumentar a autonomia dos veículos elétricos da época. Assim como um sistema regenerativo moderno, ele alimentou a energia de frenagem em uma bateria para prolongar a autonomia do carro que era cerca de 48 km, mas reivindicou uma economia de energia de 30% muito surpreendente para a época comparado ao que gira em torno de cerca de três vezes menor ao equivalente de um sistema moderno atual.

Para Souza Junior (2019, p. 59) o mecanismo de recuperação de energia:

[...] produz um contra torque no eixo da máquina elétrica (motor) que causa a diminuição da velocidade, convertendo a sua energia cinética em outra forma, geralmente em energia elétrica, que é realimentada de volta para a fonte que inicialmente a forneceu.

Os freios regenerativos, segundo Nunes Junior (2014), são estudados há mais de um século, logo é a patente mais antiga segundo Struben (2006), registrada pelo alemão Martin Kubierschky nos Estados Unidos, para um trem elétrico regenerativo que visava economizar 40% no consumo de energia usual, sendo concedida em 1902.

Segundo Souza Junior (2019, p.59), a frenagem regenerativa provoca a diminuição ou interrompe o movimento do motor elétrico, e complementa: “[...] convertendo a energia cinética da rotação em energia elétrica, sem utilização de freios mecânicos. O restante da energia é perdido na forma de calor nos enrolamentos e nos mancais da máquina elétrica”.

Quando um veículo ou uma máquina industrial aplica seus freios, a energia cinética é convertida em calor por conta do atrito entre o mecanismo de freio e o eixo em rotação. Este calor gerado é normalmente dissipado no ar, efetivamente desperdiçando energia. O total de energia desperdiçada depende da frequência, intensidade e tempo de frenagem. Como a carga de frenagem é gerada pelos freios, a potência dissipada é dada pela equação (NEWCOMBE, 1960).

$$P_w = \int (t) dt = (2 * F_{disco}) V_{disco} (t) dt \quad (1)$$

$P_w$  = potência dissipada

$F_{disco}$  = força exercida pelo disco

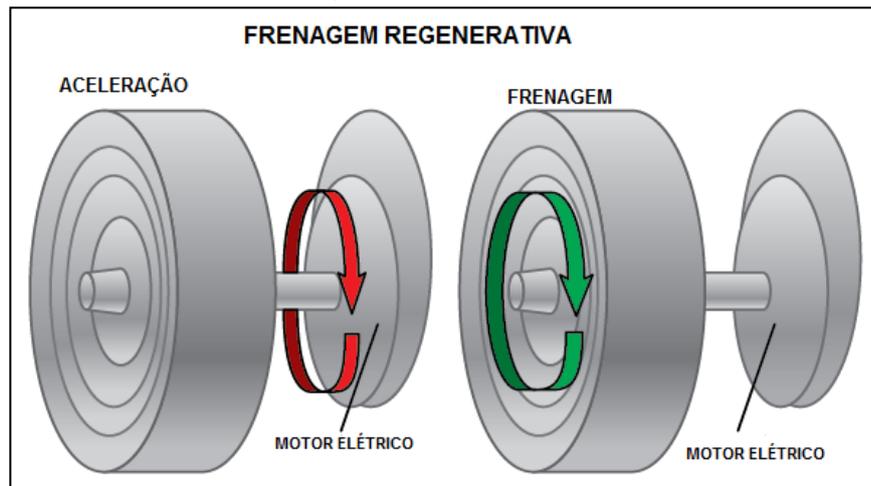
$V_{disco}$  = velocidade do disco

Para mitigar o desperdício, sistemas de freio regenerativo foram criados, também conhecidos pela sigla KERS (Sistema de Recuperação de Energia Cinética, em inglês *Kinect Energy Recovery Systems*). Os mesmos consistem em um processo no qual uma parte da energia cinética da máquina é armazenada em um sistema de armazenamento de energia de curto prazo e/ou devolvida para a fonte. A figura 1 ilustra o funcionamento do sistema. Durante a fase de aceleração, o motor transfere energia para o eixo da máquina e o freio fica desacoplado, ao desligar o motor e acionar o freio, a energia cinética passa a ser armazenada no sistema, ficando disponível para auxiliar a aceleração no próximo ciclo.

A energia que é armazenada através desse sistema pode ser utilizada posteriormente em um processo inverso ao de armazenamento, fornecendo

aceleração e diminuindo a demanda de energia externa para este fim. A quantidade relativa de energia recuperada pelo freio regenerativo depende de fatores, como o tipo de armazenamento, a eficiência do sistema de transmissão e conversão e a força inercial do sistema (CLEGG, 1996).

**Figura 1 - Comportamento do sistema de frenagem regenerativa em modos de aceleração/frenagem de um VE**



Fonte: ABVE (2014)

De acordo com Donev et al (2018), os primeiros protótipos de máquinas que buscavam armazenar a energia cinética durante frenagens foram desenvolvidos no final do século XIV, aplicados em bicicletas e veículos de tração animal. Esses sistemas pioneiros usavam molas circulares e transformavam a energia cinética em energia potencial elástica.

No começo da década de 1930, um sistema com motor/gerador elétrico foi usado em uma ferrovia na Geórgia, que já operava trens elétricos. Vale citar que o uso do sistema diminuiu não só o consumo de energia, mas também o investimento em infraestrutura na linha que operava nas montanhas do Cáucaso.

Nos anos de 1950, a companhia suíça Oerlikon desenvolveu um ônibus chamado Gyrobus. Ele usava um volante de inércia de 3 toneladas que girava a 3000 rotações por minuto, fornecendo energia para um trajeto de até 6 quilômetros.

O volante era recarregado por um motor elétrico, acionado por contatos elétricos instalados em cada ponto de parada.

Alguns protótipos foram construídos nas décadas seguintes, como o veículo elétrico AMC Amitron, mas o primeiro sistema comercialmente disponível em

automóveis foi lançado em 1997 no Toyota Prius. Desde então, sistemas de frenagem regenerativa são usados em quase todos os veículos elétricos e híbridos, assim como em alguns veículos movidos à combustão.

## 2.3 Tecnologias aplicadas a sistemas de frenagem regenerativa

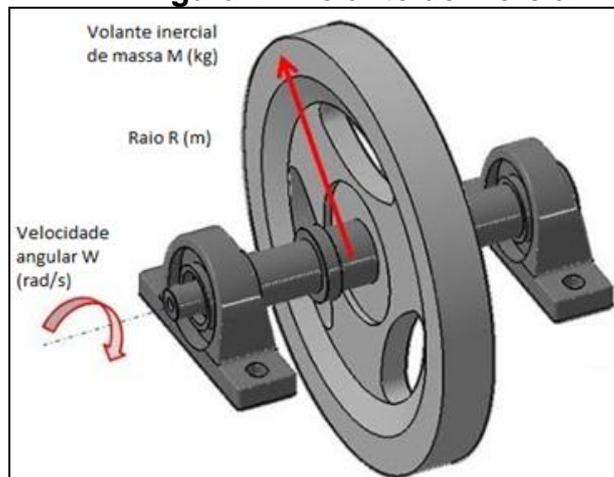
### 2.3.1 Volante de inércia

A energia cinética de um elemento rotativo em desaceleração é usada para acelerar um volante de inércia, o volante é então desconectado do eixo conservando sua energia cinética, e reconectado quando há necessidade de aceleração da máquina (EHSANI et al, 2005). A energia cinética de um volante pode ser expressa pela equação abaixo:

$$E_f = \frac{1}{2} k m r^2 \omega^2 \quad (2)$$

Em que  $E_f$  representa a energia cinética do volante de inércia, dado em Joules;  $k$  é a constante de inércia (depende do formato do volante);  $m$  é a massa em kg;  $r$  é o raio, em metros; e  $\omega$  a velocidade angular (rad/s). A figura 2 ilustra um volante de inércia típico utilizado na indústria que é aplicado em máquinas que exigem frequência de rotação constante com torque variável, como geradores elétricos.

**Figura 2 - Volante de inércia**



Fonte: RPM Media (2018)

O sistema de volante de inércia combinado com motor/gerador elétrico é um sistema híbrido que utiliza como armazenador de energia, a recuperação da energia cinética da máquina primária e o uso posterior da energia acumulada são controlados por um motor/gerador elétrico. É um sistema que apresenta melhor custo benefício para frenagens bruscas e de curta duração, visto que consegue absorver uma potência maior do que baterias, desta forma sendo adequado para veículos de alta performance.

Nas competições automobilísticas, o uso de sistemas de frenagem regenerativa cresceu de forma significativa, dos sistemas apresentados, os mais utilizados nesse meio são o eletromagnético e o híbrido eletromagnético e volante de inércia.

Segundo Paiva (2009) a indústria se aproveita de grandes volantes de inércia em algumas máquinas e de sistemas eletromagnéticos nos motores menores, com a diferença de que, normalmente, a energia recuperada é devolvida para a rede elétrica através de sistemas de inversores de tensão e capacitores e são armazenados em baterias ou volantes como nos automóveis. Neste sentido a seguir apresentam-se as molas de armazenagem de energia usadas nos sistemas regenerativos.

### 2.3.2 Molas de armazenagem de energia

Onaya (2012) afirma que os sistemas regenerativos que usam molas para armazenar energia são tipicamente utilizados em bicicletas, no entanto podem ser adaptados para o uso na indústria, dependendo da necessidade do processo.

O sistema funciona armazenando a energia cinética em forma de energia potencial elástica, normalmente em molas circulares, e quando necessário o operador comanda o acoplamento da mola novamente ao eixo rotativo, devolvendo a energia em forma de torque.

Esse sistema possui baixa complexidade, mas também baixa capacidade de armazenamento e só pode ser utilizado com baixa frequência, do contrário a mola tende a aquecer com o uso constante, diminuindo a eficiência e durabilidade.

### 2.3.3 Sistema hidráulico

O princípio de funcionamento dos sistemas hidráulicos é o armazenamento de energia em forma de pressão. Isso é feito através de uma bomba que transfere o fluido de um reservatório de baixa para um de alta pressão. Ao desacelerar a máquina, a bomba é acoplada ao eixo transferindo o fluido entre os reservatórios, ao acelerar o fluido é liberado no sentido contrário, fornecendo torque ao eixo.

Compreende que a autonomia do sistema depende do tamanho dos reservatórios e capacidade da bomba. É um dos sistemas com maior tempo de armazenamento de energia, pois nenhuma energia é perdida caso não utilizada em um curto espaço de tempo, ao contrário do volante de inércia, por exemplo. As desvantagens se concentram no tamanho, custo e necessidade de manutenção frequente (PEREZ, 2014).

### 2.3.4 O sistema eletromagnético

Segundo Ehsani et al (2005) o sistema eletromagnético é um dos mais utilizados em veículos automotores, principalmente VEs e HEVs. Esses veículos utilizam motor elétrico como propulsor, e ao desacelerar esse mesmo motor funciona como gerador, devolvendo energia para a bateria.

Ehsani et al (2005) afirma que nos últimos anos o sistema eletromagnético vem sendo adotado também em veículos com motores à combustão, em que o alternador só funciona quando o motor não está sendo acelerado, essa energia gerada é utilizada para alimentar o sistema elétrico do veículo, não sendo devolvida ao eixo durante acelerações. Mesmo assim, há um ganho de potência nas acelerações, por conta da ausência da carga do alternador sobre o motor, e um melhor aproveitamento da energia nas desacelerações.

As limitações residem principalmente na potência do gerador e na velocidade de carregamento da bateria. A maior eficiência é atingida em frenagens suaves, portanto o estilo de direção influencia enormemente no funcionamento adequado do sistema.

Na indústria, o crescente uso de motores elétricos com inversor de frequência facilita a adoção deste sistema, uma vez que motores de indução passam a gerar energia quando a taxa de escorregamento é negativa, ou seja, a rotação é maior do

que a rotação nominal definida pela frequência da corrente alternada que o alimenta. Inversores de frequência bidirecionais podem devolver essa energia gerada em frenagens para a rede elétrica afirma WEG (2008).

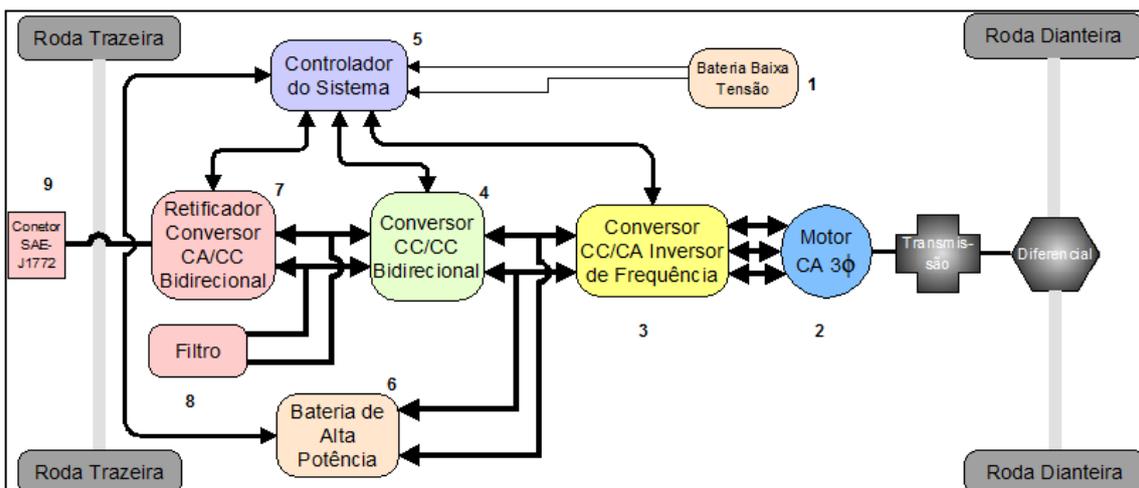
## 2.4 Sistemas de frenagem de um veículo elétrico

Ehsani et al (2005) apresenta que a frenagem regenerativa em VEs e HEVs em seu sistema é necessário distribuir a força de frenagem aplicada, necessária ao funcionamento do freio regenerativo e o freio mecânico de forma que possa recuperar a energia cinética do veículo, e alcançar um freio suave.

A frenagem regenerativa em VE é aplicada apenas para impulsionar o motor de tração, o freio mecânico deve ser controlado para atender o comando de força de frenagem exercida pelo condutor.

Existem dois tipos de controle de frenagem mecânica e regenerativa: frenagem em série e paralela. A figura 3 ilustra o diagrama de blocos de um VE, dotado de um sistema de frenagem em série, em que o motor CA (corrente alternada) funciona tanto para impulsionar o veículo como para recuperar energia nas desacelerações.

**Figura 3: disposição de um VE com os seguintes componentes eletroeletrônicos**



Fonte: ABVE (2014)

O sistema do EV acima é composto por:

- (1)**- bateria de baixa tensão responsável pelo controle do sistema;
- (2)**- máquina elétrica CA que pode atuar como gerador/motor;
- (3)**- inversor/conversor cc/ca de frequência atua no controle de torque e velocidade da máquina elétrica;
- (4)**- atua na bidirecionalidade do sistema em modo de aceleração/desaceleração direcionada para a máquina elétrica.
- (5)**- responsável pelo controle do sistema
- (6)**- bateria de alta potência responsável por armazenar toda carga recuperada;
- (7)**- responsável pela retificação de energia armazenada e utilizada para a alimentação da máquina elétrica em CA.
- (8)**- filtro ativo de ruído de energia;
- (9)**- conector para recarga em rede elétrica doméstica;

#### 2.4.1 Frenagem regenerativa em série

Segundo Ehsani et al (2005) o sistema de frenagem em série consiste em um controlador que atua nas forças de frenagem das rodas dianteiras e traseiras. O objetivo de controle é minimizar a distância de frenagem e otimizar sensação de frenagem do motorista. Uma menor distância de frenagem exige as forças de frenagem nas rodas dianteiras e traseiras para uma distribuição ideal de força.

O princípio desta estratégia de (EHSANI et al., 2005) no controle adotado é que quando a desaceleração comandada é inferior a 0,2 Gibbs a energia na totalidade de um sistema termodinâmico, somente a frenagem regenerativa nas rodas dianteiras é aplicada, quando a desaceleração comandada é superior a 0,2 Gibbs é aplicada a frenagem regenerativa e mecânica.

As forças de frenagem nas rodas dianteiras e traseiras seguem a uma curva ideal de distribuição de forças de frenagem nas rodas dianteiras em que geralmente está aplicado ao eixo motriz.

Ainda segundo (EHSANI et al., 2005) quando a força de frenagem exigida é menor do que a força de frenagem máxima que o motor elétrico pode produzir apenas a frenagem regenerativa elétrica será aplicada. Quando a força de frenagem atuada é maior do que a força de frenagem regenerativa disponível, o motor elétrico

irá operar para produzir o seu máximo de frenagem, e a força de frenagem restante é cumprida pelo sistema de frenagem mecânica, deve notar-se que a força de frenagem regenerativa máxima produzida por um motor elétrico está relacionada com a velocidade do motor elétrico.

#### 2.4.2 Frenagem regenerativa em paralelo

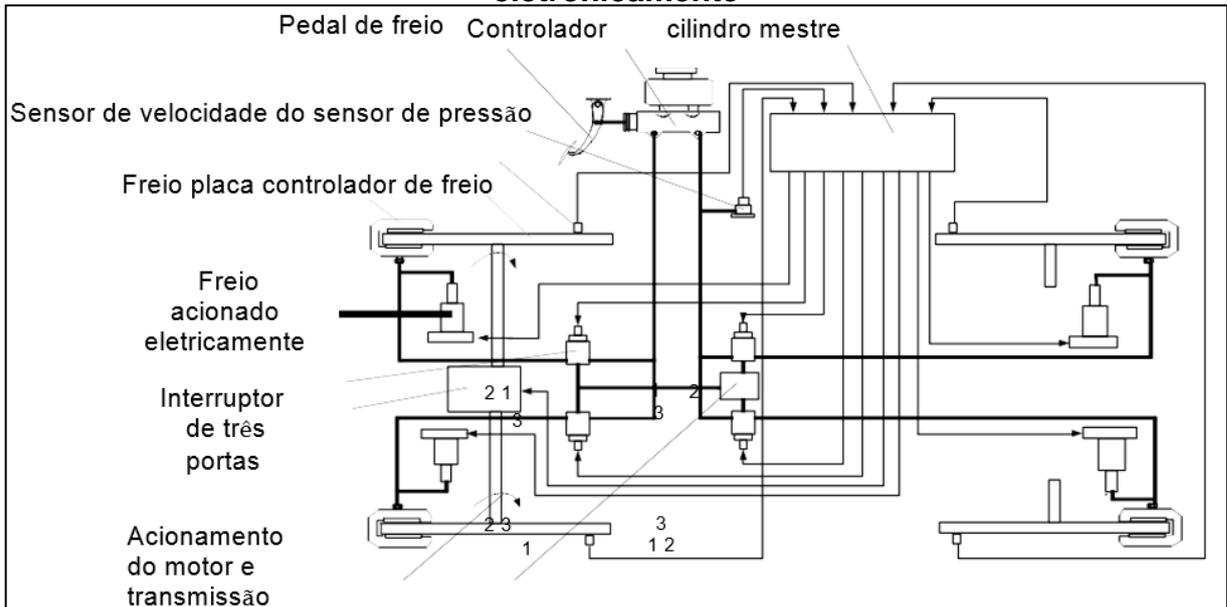
Para que produzam forças de frenagem em paralelo, sugere-se que o sistema de frenagem em paralelo inclua tanto o freio elétrico regenerativo quanto um freio mecânico, para que produzam forças de frenagem em paralelo (EHSANI et al, 2005).

Esta proposta apresentada por Ehsani et al (2005) consiste de um sistema de que tem um freio mecânico convencional, o qual tem uma força de distribuição de força de frenagem sobre as rodas dianteiras e traseiras. A frenagem regenerativa acrescenta força de frenagem adicional para as rodas dianteiras, resultando na curva total de distribuição da força aplicada a frenagem. As forças nos eixos dianteiro e traseiro são proporcionais à força hidráulica no cilindro de freio mecânico. A força de frenagem regenerativa desenvolvida pelo motor elétrico é uma função da pressão hidráulica do cilindro, e, portanto, uma função de desaceleração proporcional do veículo.

O sistema de frenagem em paralelo necessita de um sistema de freio mecânico controlado eletronicamente publicou (EHSANI, 2005). Na figura 4 um sensor de pressão detecta a pressão hidráulica no cilindro de freio, que representa a procura de desaceleração. O sinal de pressão é regulado e enviado para o controlador do motor elétrico para controlar e produzir o torque de frenagem exigido. Em comparação com frenagem em série, este modo tem uma construção e controle do sistema muito mais simples.

No entanto, a sensação de frenagem do condutor, e a quantidade de energia recuperada na frenagem regenerativa são comprometidas.

**Figura 4: Sistema de frenagem regenerativa em paralelo de um EV controlado eletronicamente**



Fonte: (EHSANI et al, 2005)

A figura 4 representa a força de frenagem aplicada desejável. O fluido é descarregado para dentro do acumulador de fluido através dos interruptores controlados eletronicamente Ehsani et al (2005). Este simula a sensação de frenagem de um sistema de frenagem convencional, depois de receber um sinal de pressão de frenagem dado pelo condutor ao acionar o pedal de freio.

A unidade de controle determina os sinais de frenagem para as rodas dianteiras e traseiras, o sinal de frenagem regenerativa e mecânica é dado de acordo com as características do motor de tração e sua regra de controle adotada de fábrica, o controlador comanda o motor para produzir torque de frenagem correta, e comanda o controlador de frenagem mecânica ao seu respectivo atuador de frenagem para produzir sinais de frenagem com a correção para cada roda.

Os atuadores de frenagem, também são controlados para funcionar como um sistema de antibloqueio ABS para evitar que as rodas sejam bloqueadas completamente. A estratégia de controle é crucial para a recuperação de energia e desempenho de frenagem (EHSANI et al. , 2005).

Para então que este desempenho seja eficiente é essencial que os sistemas de propulsão elétricos também o sejam, e para entendê-los passa-se a abordá-los a seguir.

## 2.5 Sistemas de propulsão elétricos

A abordagem inicial aos componentes dos sistemas de propulsão elétrica se faz necessária porque é essencial para projetos de frenagem regenerativa de diferentes aplicações, que consistem basicamente em motores elétricos, acumuladores de energia, e controladores eletrônicos de motores.

O motor elétrico converte a energia elétrica em energia mecânica para impulsionar o veículo, ou vice-versa, para que possa permitir a frenagem regenerativa e/ou para gerar eletricidade com a finalidade de utilizar-se de armazenamento de energia (EHSANI et al, 2005).

O acumulador de energia é usado para fornecer ao motor elétrico a tensão e a corrente adequada para o seu sistema. O controlador eletrônico comanda o conversor de energia, fornecendo sinais de controle para ele e, em seguida, controla o funcionamento do motor elétrico para produzir torque e velocidade necessária ao comando da unidade (EHSANI et al, 2005).

O controlador eletrônico pode ser dividido em três unidades funcionais: sensor, circuito de potência, e processador de sinais. O sensor é usado para traduzir quantidades mensuráveis como corrente, tensão, temperatura, velocidade, torque e fluxo em sinais através do circuito de interface. Estes sinais são condicionados a um nível apropriado antes de ser alimentado no processador. A saída de um processador de sinais geralmente é amplificada através do circuito de potência para alimentar semicondutores de potência e dispositivos do acumulador de energia (EHSANI et al, 2005).

A escolha de sistemas de propulsão elétrica para EVs e HEVs principalmente depende de fatores, incluindo restrições de perfil de direção, projeto do veículo, e fonte de energia. Restrições de projeto de veículos, incluindo volume e peso, dependem do tipo de veículo, peso do veículo e carga útil (EHSANI et al, 2005). A fonte de energia está relacionada a baterias, células de combustível, ultracapacitores e fontes híbridas. Então, o processo de identificação do recurso preferido e das opções para a propulsão tem que ser realizado para um determinado nível do sistema. A interação dos subsistemas e os impactos prováveis devem ser examinados (EHSANI et al, 2005).

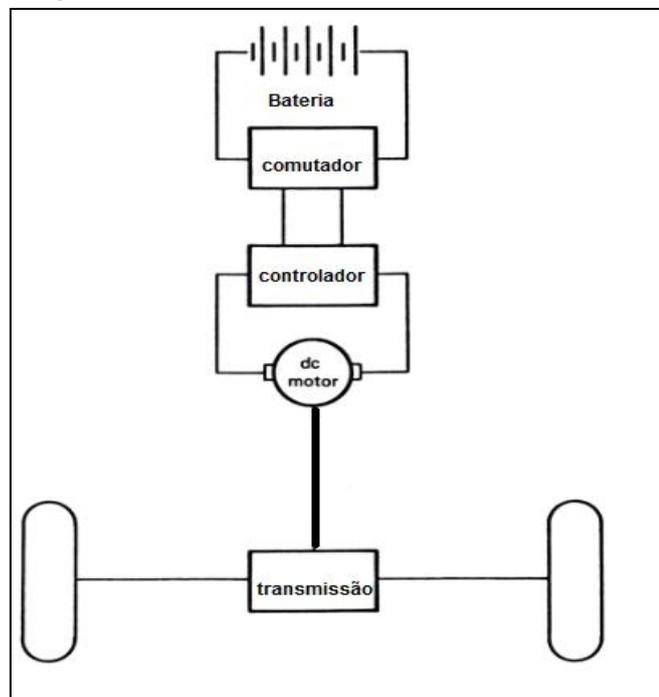
Diferentemente das aplicações industriais de motores elétricos, os motores usados em VEs e HEVs geralmente requerem partidas e paradas frequentes, altas

taxas de aceleração e desaceleração, alto torque e subida a baixa velocidade, baixo torque e uma faixa de velocidade muito ampla de (EHSANI, 2005, p.142). A figura 5 ilustra o esquema de um VE com motor CC. A seguir explica-se como funcionam as máquinas de corrente contínua.

### 2.5.1 Máquinas de corrente contínua

O motor elétrico é item fundamental para condição de tração e torque para um sistema de frenagem regenerativa, principalmente quando aplicado a um VE, (MARTIGNONI, 1987) publicou que um motor é uma máquina que converte energia elétrica em energia mecânica de rotação. Os motores são os responsáveis pelo funcionamento da grande maioria das máquinas encontradas nas indústrias. O gerador, por sua vez, é uma máquina que converte energia mecânica de rotação em energia elétrica. A energia mecânica pode ser fornecida por uma queda-d'água, vapor, vento, gasolina, óleo diesel ou por um motor elétrico.

**Figura 5: Representação de uma máquina CC, aplicada a um projeto de um VE**

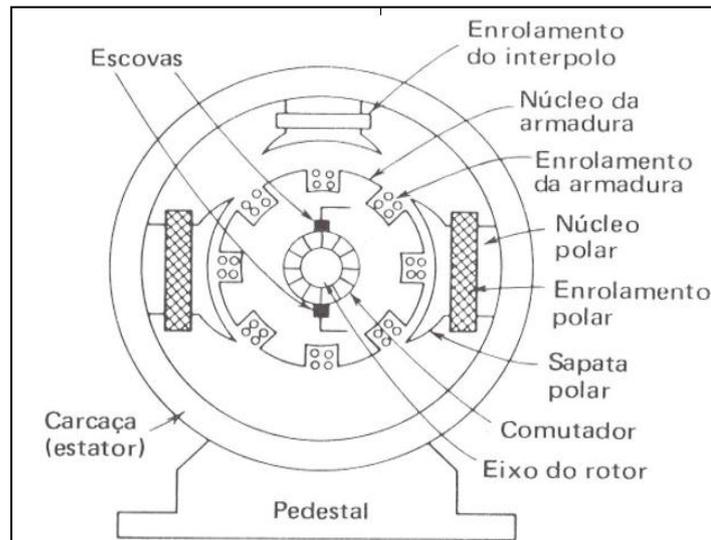


Fonte: (EHSANI et al, 2005)

### 2.5.2 Componentes de uma máquina CC

A Figura 6 mostra um corte de uma máquina CC comercial típica, simplificada para dar ênfase às partes principais.

**Figura 6: Partes principais de uma máquina CC**



Fonte: Martignoni (1987)

As partes principais dos motores de corrente contínua são detalhadas na figura 6. O armazenamento e a fonte de energia para o sistema, no qual é responsável principalmente na autonomia do sistema, o levantamento de dados e cálculo para o sistema torna-se fundamental principalmente no quesito segurança, item abordado no próximos parágrafos

## 2.6 Armazenamento de energia

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, ultracapacitores, 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 et al, 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 et al, 2005). Diante disto tem-se no próximo item a explicação de como funcionam as baterias que fazem a conversão da energia.

## **2.7 Baterias eletroquímicas**

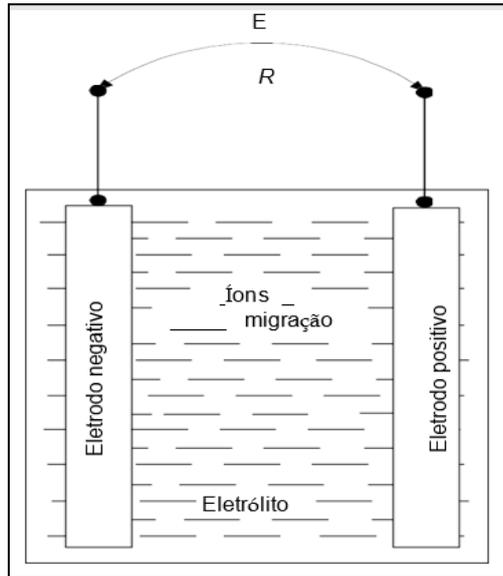
As Baterias eletroquímicas são dispositivos eletroquímicos que convertem energia elétrica em energia química a um determinado potencial durante o seu carregamento, e convertem energia química em energia elétrica durante ao seu processo de descarga (EHSANI et al, 2005).

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 como apresentado na figura 7.

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, a capacidade de se tornar menor, com uma velocidade de corrente de descarga grande (EHSANI et al, 2005).

Uma bateria é especificada com um número de ampères-hora, juntamente com a taxa atual. Por exemplo, uma bateria marcada em 100 Ah em C5 taxa tem uma capacidade de 100 AMP-hora a 5 horas taxa de descarga (descarga de corrente =  $100/5 = 20$  A (EHSANI et al, 2005, p.305).

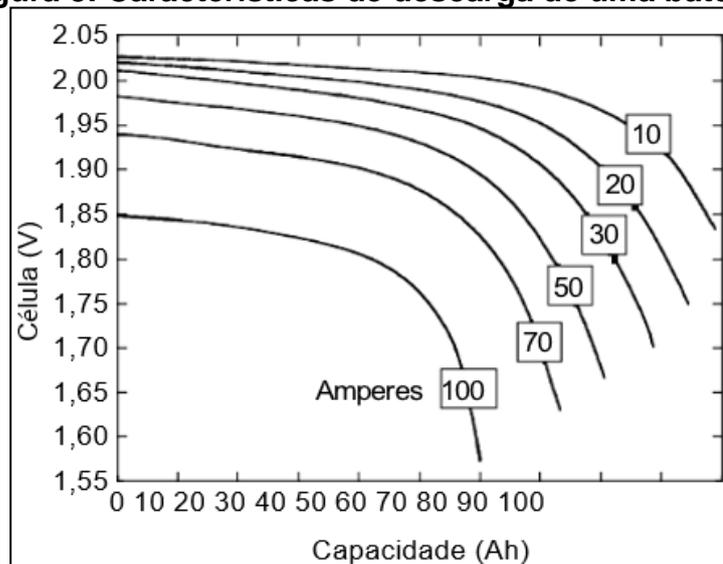
**Figura 7: Representação de uma célula típica de uma bateria eletroquímica com os eletrodos positivos e negativos imersos em eletrólito.**



Fonte: (EHSANI et al, 2005)

Outro parâmetro de uma bateria é a de estado de carga SOC no qual é definido como a razão entre a capacidade restante para a capacidade de carga total. Uma bateria totalmente carregada tem um SOC de 100% e uma bateria totalmente descarregada tem um SOC de 0% (EHSANI et al, 2005, p.306). No entanto, o termo, “totalmente descarregadas” pode provocar confusão, por motivo de diferentes capacidades de descarga e de tensão de corte diferente, apresentado na figura 8.

**Figura 8: Características de descarga de uma bateria.**



Fonte: (EHSANI et al, 2005)

Em determinados projetos a capacidade de armazenamento de energia está diretamente ligada ao funcionamento de um EV, a capacidade de energia pode ser expressa conforme (EHSANI et al, 2005):

$$EC = \frac{(1 - SOC)I(t) dt}{V} \quad (3)$$

Onde  $V (1 - SOC)$  é a voltagem nos terminais das baterias, onde  $I$  é uma função da corrente, e  $SOC$  da bateria (EHSANI et al, 2005, p. 306).

E para compreensão de como ocorre a geração da energia elétrica por meio destas baterias, tem-se a seguir em cada um dos itens abordados a explicação e exemplificação do seu funcionamento.

### 2.7.1 Reações eletroquímicas

As aplicações das reações eletroquímicas são importantes, pois são elas que geram energia elétrica por meio de baterias e pilhas, estas últimas constituídas unicamente de dois eletrodos e um eletrólito organizados para produzir a energia (EHSANI et al, 2005).

Portanto, tem-se que os elétrodos são feitos de chumbo poroso (Pb, ânodo, eletricamente negativo) e óxido de chumbo poroso (PbO<sub>2</sub>, cátodo, eletricamente positivo). Os processos que ocorrem durante a descarga onde são consumidos chumbo e sulfato de chumbo e é formado a reação química no ânodo (EHSANI et al, 2005, p.316).

Esta reação liberta dois eletrólitos e, deste modo, dá origem a um excesso de carga ativa no elétrodo que é aliviada por um fluxo de eletrólise através do circuito externo para o elétrodo positivo.

Assim, nas reações eletroquímicas, os íons se movimentam através de eletrólito líquido e aquoso. Porém, em reações de oxidação (reação a temperatura elevada entre o metal e o oxigênio atmosférico) não há eletrólito líquido e o movimento dos íons ocorre por meio da película de óxido metálico que se forma na superfície do metal, que funciona como um eletrólito sólido e garante a natureza eletroquímica da reação (EHSANI et al, 2005).

### 2.7.2 Energia específica

A energia específica é definida como a capacidade de energia por peso da bateria (Wh / kg). A energia específica teórica é a energia máxima que pode ser gerada por unidade de massa total do reagente da célula, a energia de uma célula de bateria pode ser expressa por G. No que diz respeito à energia específica teórica, apenas os pesos eficazes peso molecular de reagentes e produtos são envolvidos (EHSANI et al, 2005).

O hidrogênio, lítio ou sódio seria a melhor escolha para os negativos, e os halogêneos mais leves, oxigênio, ou enxofre seria a melhor escolha para o lado positivo. Para colocar tais pares juntos em uma bateria, seria necessário a utilização eficaz dos materiais ativos, bem como eletrólitos de alta condutividade em ambos os eletrodos (EHSANI et al, 2005).

Os eletrólitos aquosos são vantajosos devido à sua elevada condutividade. Os metais alcalinos não podem ser utilizados como eletrodos uma vez que estes elementos tendem a reagir com a água sofrer corrosão se faz necessário escolher outros metais, que têm um grau razoável de eletropositividade, como zinco ou alumínio (EHSANI et al, 2005).

### 2.7.3 Potência específica

A potência específica é definida como a potência máxima da bateria por unidade de peso, em que a bateria pode produzir em um curto período de tempo, potência específica é importante na redução do peso da bateria, especialmente em aplicações de demanda de alta potência, como HEVs (EHSANI et al, 2005).

A potência específica de uma bateria química depende principalmente da resistência interna da bateria (EHSANI et al, 2005, p. 309).

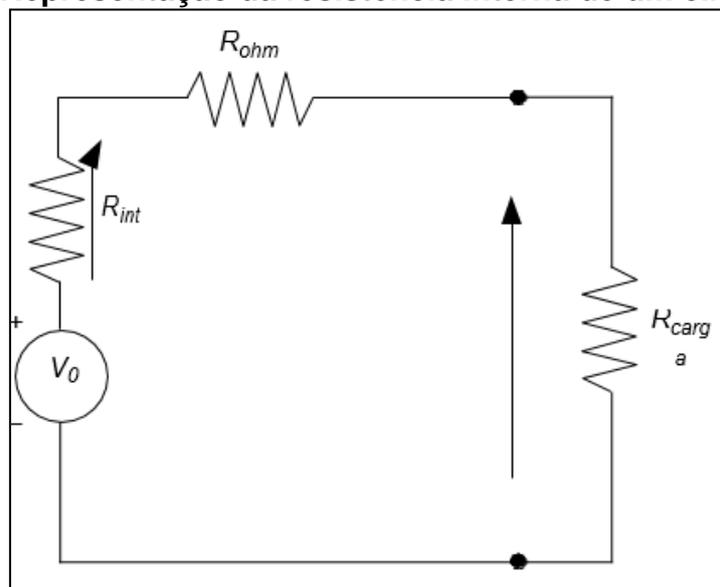
### 2.7.4 Eficiência energética de baterias

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 possa ocorrer incêndio ou 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 et al, 2005, p. 310).

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 et al, 2005).

**Figura 9: Representação da resistência interna de um circuito de bateria**



Fonte: (EHSANI et al, 2005)

A eficiência da bateria de chumbo-ácido durante a descarga e o carregamento sua pilha tem uma eficiência elevada de descarga com alta SOC e uma elevada eficiência de carga com baixo SOC, por conseguinte, a unidade de controle de um HEV em operação de uso da bateria deve controlar o SOC da bateria, de modo a melhorar a eficiência de funcionamento e diminuir o aumento de temperatura causado por uma perda de energia, a alta temperatura danifica a bateria (EHSANI et al, 2005).

### 2.7.5 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 et al, 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 homólogos mais avançados. As baterias de chumbo-ácido também têm várias desvantagens (EHSANI et al, 2005).

#### 2.7.6 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 et al, 2005, p. 302).

O sistema de níquel / ferro foi comercializado durante os primeiros anos do século 20. O sistema compreende um níquel ( $\text{NiOOH}$ ) elétrodo positivo e um elétrodo negativo de ferro metálico (EHSANI et al, 2005, p. 302).

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 et al, 2005).

#### 2.7.7 Baterias 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 e poder específico. Existem duas principais tecnologias de baterias de lítio à base de: lítio-polímero e de íons de lítio (EHSANI et al, 2005).

### 2.7.8 Bateria de polímero de lítio (Li-P)

As baterias de lítio-polímero usam lítio metálico e um óxido de metal de transição para os eletrodos negativos e positivos, respectivamente. Este possui uma estrutura em camadas na qual os íons de lítio podem ser inseridos, ou a partir de onde podem ser removidos em descarga e carga, respectivamente (EHSANI et al, 2005). Um eletrólito sólido de polímero é usado, o que oferece as vantagens de uma maior segurança e flexibilidade no design.

. As vantagens correspondentes são uma taxa muito baixa de auto descarga cerca de 0,5% por mês, a capacidade de fabricação de uma variedade de formas e tamanhos, e design seguro. No entanto, isso tem o inconveniente de uma baixa temperatura devido à dependência da temperatura de condutividade (EHSANI et al, 2005).

### 2.7.9 Íons de lítio (Li-Íon)

Desde o primeiro anúncio da bateria Li-íon, em 1991, a tecnologia de bateria Li-íon tem visto um aumento sem precedentes ao que hoje é considerada a bateria recarregável mais promissora do futuro. Embora ainda na fase de desenvolvimento, a bateria Li-íon já ganhou aceitação para aplicações de VE e HEV (EHSANI et al, 2005).

A bateria de íons de lítio utiliza um material intercalado de carbono  $\text{Li}_x\text{C}$  para o eletrodo negativo, em vez de lítio metálico, um óxido de metal de transição intercalado ( $\text{Li}_{1-x}\text{M}_y\text{O}_z$ ) para o eletrodo positivo, e uma solução orgânica ou um sólido polímero para o eletrólito, os íons de lítio podem oscilar através do eletrólito entre os eletrodos positivos e negativos (EHSANI et al, 2005).

Durante a descarga e carga. A reação eletroquímica geral é descrita como



Muitos fabricantes de baterias, tais como SAFT, GS Hitachi, Panasonic, Sony e VARTA se envolveram ativamente no desenvolvimento da bateria Li-íon. A SAFT focado na bateria Li-íon à base de níquel.

Por causa da frenagem/aceleração a operação de VE e HEVs, a descarga e o carregamento para o perfil de armazenamento de energia são muito variados. A potência média requerida a partir do armazenamento de energia é muito mais baixa do que a potência de pico que tem duração relativamente curta necessária para a aceleração (EHSANI et al, 2005).

A energia envolvida na aceleração e desaceleração pode ser cerca de dois terços da quantidade total de energia absorvida ao longo de todo o percurso de um veículo. No projeto de um HEV, a capacidade de potência de pico no armazenamento de energia é mais importante do que a sua capacidade de energia, e, geralmente, restringe a sua redução de tamanho. Com base de tecnologia atual de bateria que tem a capacidade de absorver o pico de energia específica (EHSANI et al, 2005).

A dificuldade em obter simultaneamente valores elevados de energia específica e potência específica há sugestões em Ehsani et al (2005) que o sistema de armazenamento de energia de VE e HEV deve ser uma hibridação de uma fonte de energia. A fonte de energia, principalmente baterias e células de combustível, tem alta potência específica. As fontes de energia podem ser recarregadas durante a condução na desaceleração ou de frenagem regenerativa. A fonte de energia que tem recebido grande atenção na atualidade é o ultracapacitor.

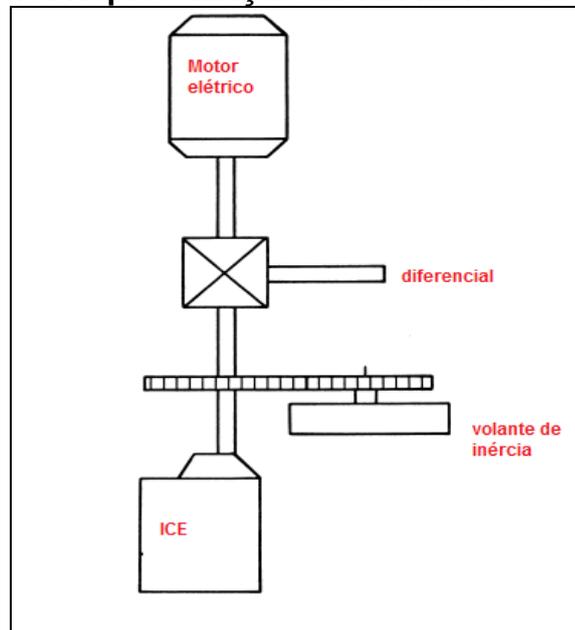
Um método de frenagem regenerativa é usado pelo automóvel Nissan March II e desenvolvido pela *Electric Propulsion, Inc de Michigan*. O automóvel tem um gerador, dedicado apenas à função de frenagem regenerativa, ligado ao eixo que aciona o motor de tração. Quando ocorre a frenagem regenerativa o gerador é comutado para o circuito, dados do March II relativos à frenagem e à corrente de carga no gerador dedicado obtém dados de 37v e 200 A, é acionado através do motor elétrico e obtém um nível de potência de frenagem de até 11,2 kW (NISSAN,2016)

Uma equipe de pesquisadores da Escola Técnica de Aachen, Alemanha, converteu uma van Volkswagen em unidade híbrida. Essa unidade híbrida usa uma combinação de motor de combustão interna (ICE), um volante inercial e um motor elétrico acionado por uma bateria. Esses elementos de acionamento são acoplados a uma engrenagem diferencial. Originalmente, um motor Fichtel e Sachs foi instalado como ICE, mas mais tarde foi substituído por um motor Fiat. O volante inercial fornece aumento de desempenho em curto prazo. O motor elétrico é usado

principalmente para controle, o motor atua como um motor de "polarização" e, de fato, faz do diferencial planetário uma transmissão continuamente variável CVT. A energia é alimentada através das quatro velocidades originais do veículo (EHSANI et al, 2005).

A eficiência de regeneração de energia deste sistema tem um potencial de economia de combustível de 45% para este sistema num ciclo de condução urbana, a maioria dos quais é contribuída pelas condições favoráveis do uso de ICE em um sistema híbrido. A frenagem regenerativa é creditada uma economia de energia de 14 % (EHSANI et al, 2005).

**Figura 10: Representação da van híbrida de Aachen**



Fonte: EMADI (2005)

### 3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste estudo foi a pesquisa bibliográfica considerando os materiais como artigos publicados depositados em repositórios como Scielo, Google Acadêmico e repositórios de teses, dissertações e monografias, com uso dos seguintes descritores para filtrar a pesquisa: “Frenagem regenerativa, veículo elétrico, veículo híbrido, redução de energia, inovação, tecnologia”. O aporte teórico contou ainda com o auxílio de livros sobre o assunto para que desta forma fosse possível compor o embasamento, e assim favorecer os conhecimentos e possibilitar acesso a informações importantes sobre o tema.

Segundo Gil (1996, p. 50): “A principal vantagem da pesquisa bibliográfica reside no fato de permitir ao investigador a cobertura de uma gama de fenômenos muito mais ampla do que aquela que poderia pesquisar diretamente”. Para Lakatos e Marconi (1987, p. 66) a pesquisa bibliográfica é o levantamento, seleção e documentação de toda bibliografia já publicada sobre o tema com o objetivo de colocar o pesquisador em contato direto com este material.

Assim, o material bibliográfico foi lido para formar a fundamentação teórica, para que se extraíssem as informações importantes que compoñham os objetivos geral e específicos. Portanto, essa monografia foi escrita de maneira a contemplar todas as etapas necessárias, e que correspondesse ao proposto, tendo em vista a complexidade do tema.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE DADOS

Diante do levantamento realizado neste trabalho acadêmico, notou-se a possibilidade de implementação de um sistema de freio regenerativo em equipamento industrial para fins de economia ou redução no uso de energia, porém deve ser levado em conta que o equipamento a ser aplicado a este sistema possua características em sua utilização de aceleração/desaceleração, energia potencial e cinética.

Dados os conceitos observados para a possibilidade desta aplicação em um equipamento, observa-se a ponte rolante um equipamento da categoria de guindaste utilizado em áreas industriais diversas, ponte rolante é utilizada no içamento e translação de cargas diversas, se movem sobre trilhos, apoiados em vigas de rolamento, a carga de içamento da ponte rolante é movimentada tridimensionalmente, limitada apenas pelo vão do equipamento, pelo comprimento do caminho de rolamento e pela altura de elevação.

Em seu controle de acionamento do motor possui inversores de frequência dedicados para a movimentação de cargas, e que possuem um controle preciso da abertura e do fechamento do freio da elevação que evita o escorregamento de cargas suspensas e controle de aceleração e desaceleração no motor, como mostrado na figura 11 , a ponte rolante é um equipamento utilizado nos setores de mineração, siderurgia, metalúrgicas e outros setores produtivos, pois tem importância para facilitar os processos produtivos.

**Figura 11: Ponte rolante**

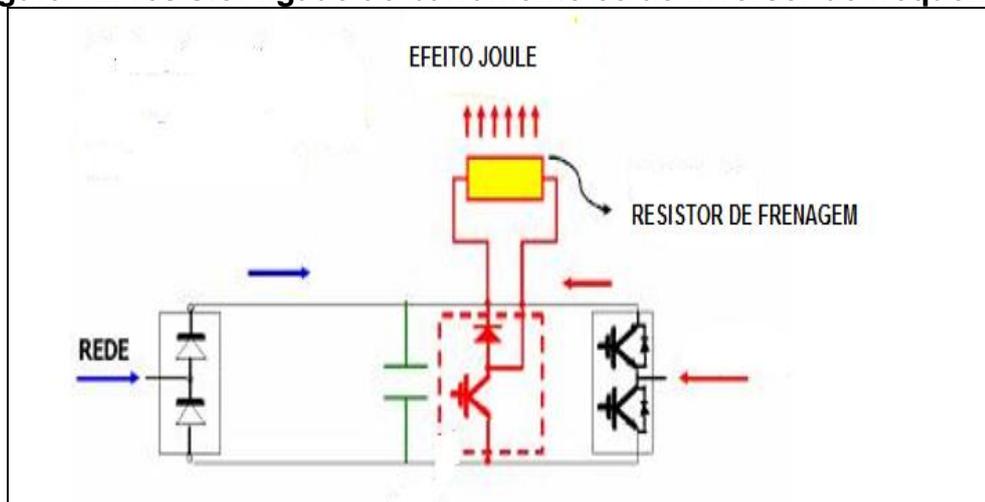


Fonte: Demag cranes (2019)

Em um circuito típico do acionamento do motor para elevação de cargas de uma ponte rolante com inversor de frequência unidirecional, sua energia potencial e cinética é dissipada na forma de calor em um resistor de frenagem quando ocorre a desaceleração e fechamento de freio do motor elétrico responsável pelo içamento de carga, por sua vez a inércia e a gravidade estão sempre atuando na ação da carga suspensa.

O motor elétrico nestas condições de paradas e desacelerações frequentes atua como um gerador, ocasionando sobretensão no barramento CC do inversor de frequência, para não ocorrer falhas ou queima do inversor de frequência um resistor de frenagem é calculado para dissipar este potencial conforme ilustrado na figura 12.

**Figura 12: resistor ligado ao barramento cc do inversor de frequência**



Fonte : Yaskawa (2019)

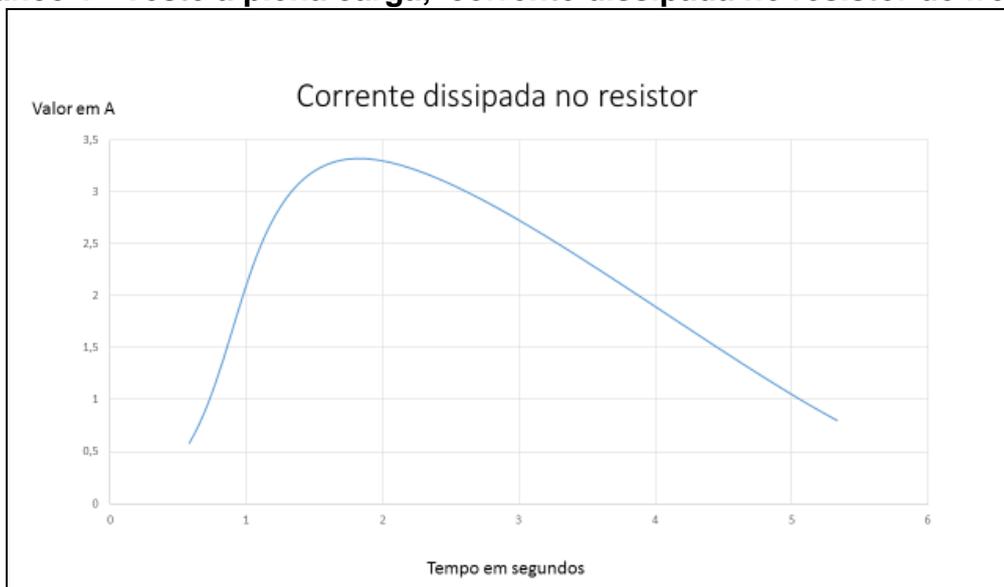
**Figura 13: Unidade regenerativa de um inversor de frequência unidirecional**



Fonte: ROMI (2019)

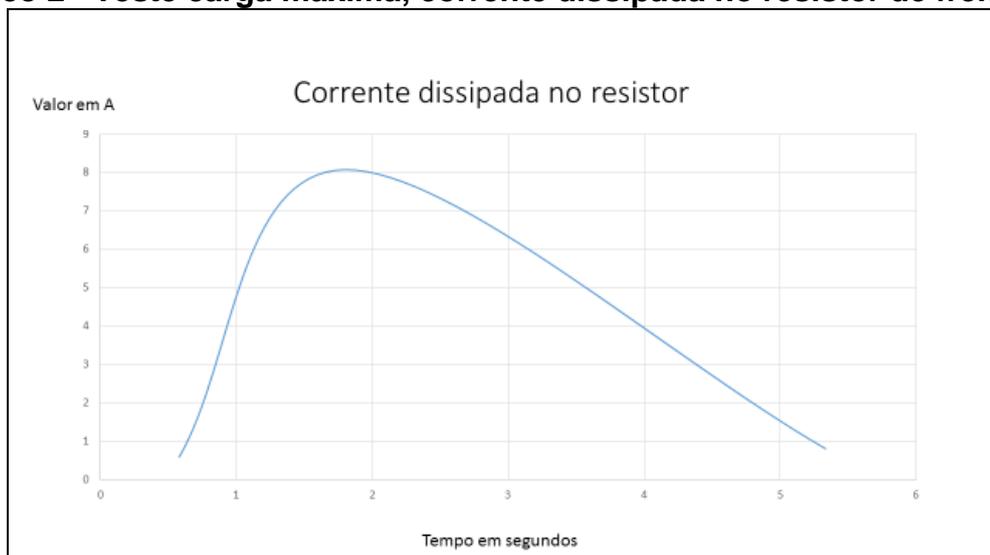
Dados de medição em uma ponte rolante que pertence a uma empresa no setor metalúrgico, localizada em João Monlevade, com capacidade de carga nominal a plena carga de 10 toneladas, foram realizadas medições com a finalidade de verificar o potencial de energia dissipada em uma unidade regenerativa dotada de resistor de frenagem, os testes foram realizados com o içamento de uma carga de 5,8 toneladas e 10,2 toneladas em um instante de medição de 5 segundos obtiveram os seguintes resultados:

**Gráfico 1 - Teste a plena carga, corrente dissipada no resistor de frenagem**

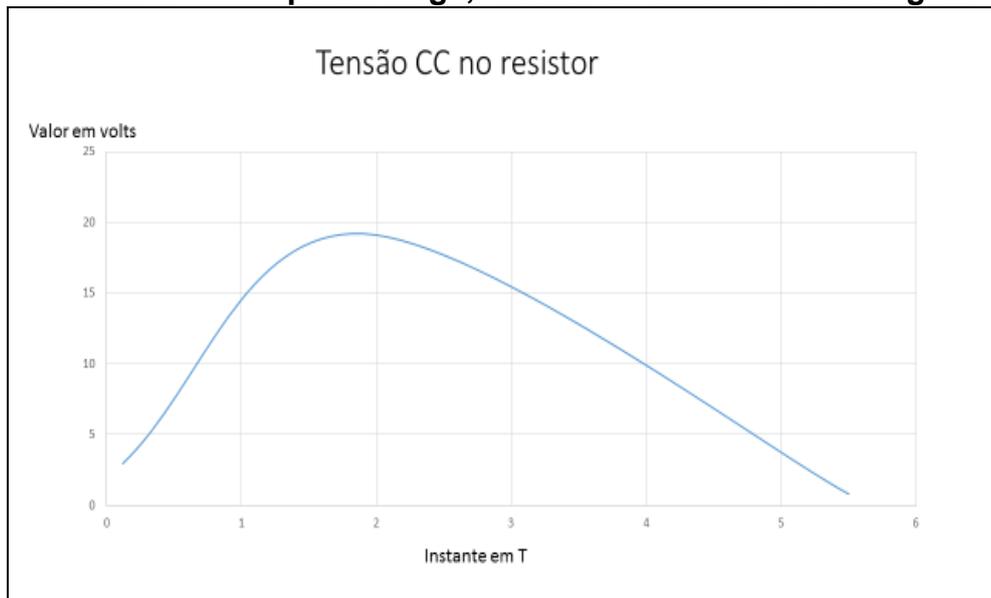


Fonte: Elaborado pelo autor

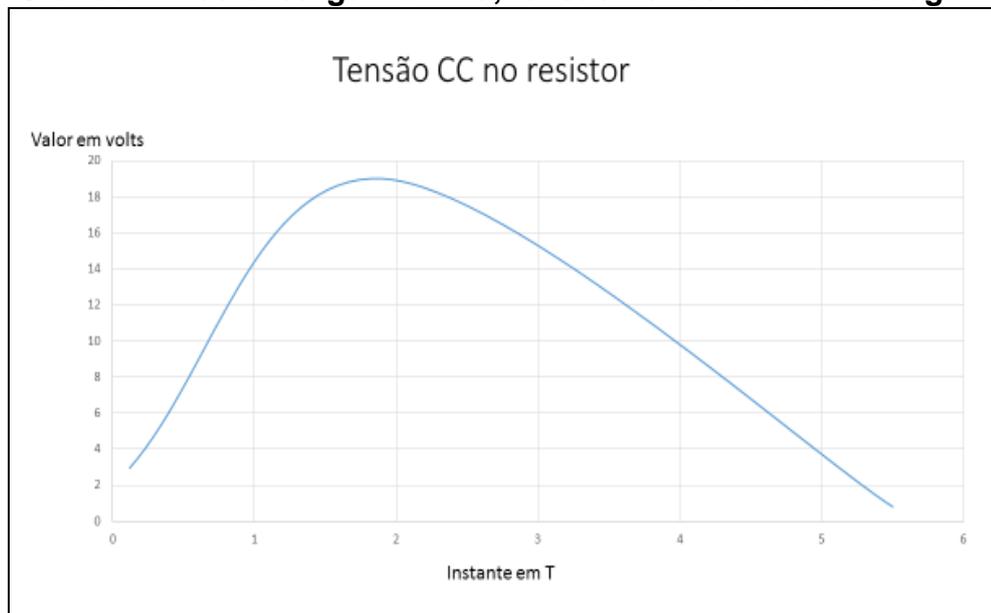
**Gráfico 2 - Teste carga máxima, corrente dissipada no resistor de frenagem**



Fonte: Elaborado pelo autor

**Gráfico 3 - teste plena carga, tensão no resistor de frenagem**

Fonte: Elaborado pelo autor

**Gráfico 4 - teste carga máxima, tensão no resistor de frenagem**

Fonte: Elaborado pelo autor

**Gráfico 5- teste plena carga, potência dissipada no resistor de frenagem**

Fonte: Elaborado pelo autor

**Gráfico 6 - teste carga máxima, potência dissipada no resistor de frenagem**

Fonte: Elaborado pelo autor

Testes e medições realizados na ponte rolante com capacidade de 10 toneladas.

Teste 1 dados em  $T = 5$  segundos com carga plena, capacidade de carga a 5,8 toneladas :

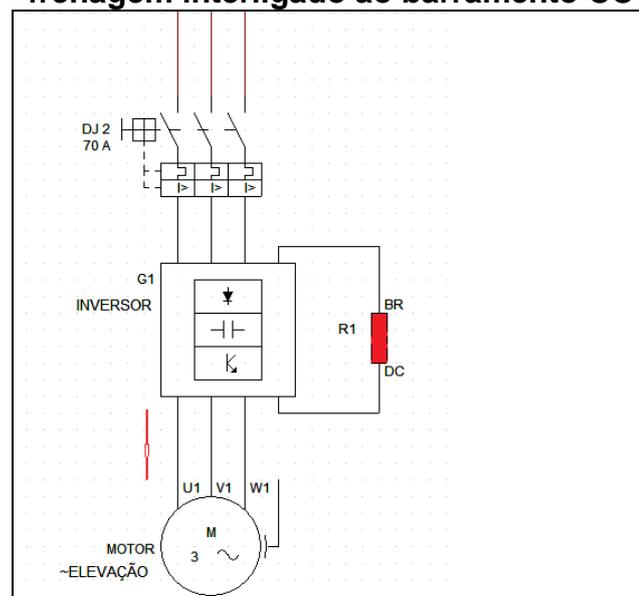
- 19,6 volts CC
- 3,34 ampères
- 63,34 watts

Teste 2 dados em  $T = 5$  segundos com carga capacidade maxima suportada de 10,2 toneladas

- 19,4 volts CC
- 8,073 ampères
- 156,61 watts

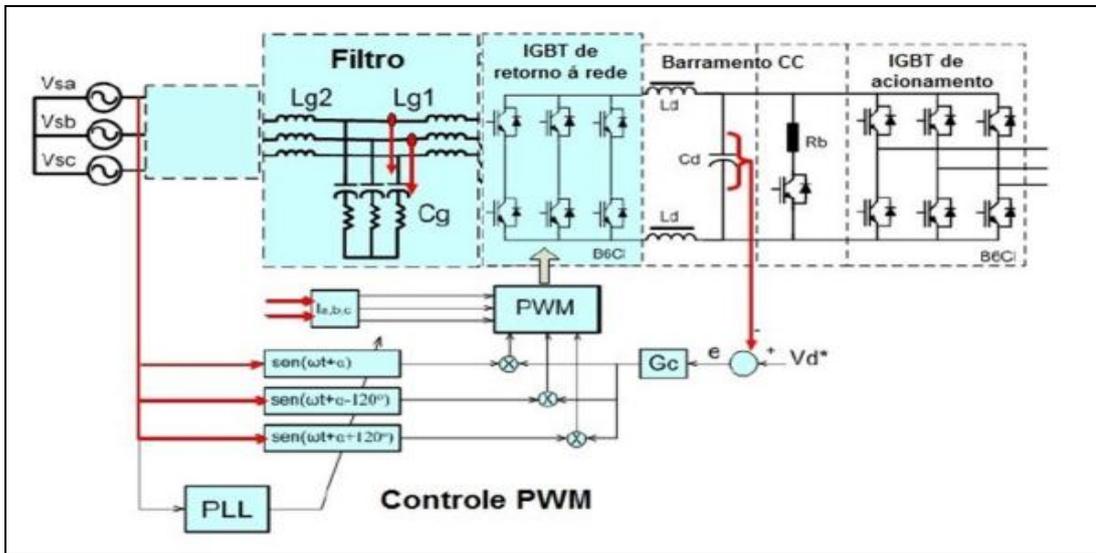
O circuito de acionamento da maquina elétrica de um veículo elétrico e de uma ponte rolante nota-se a semelhança dos componentes utilizados nas figuras 14 e 15, a diferença está nos inversores de frequência utilizados nas duas aplicações como mostrado a seguir nos respectivos diagramas de acionamentos.

**Figura 14 : diagrama típico do acionamento do motor elétrico de uma ponte rolante controlado por um inversor de frequência unidirecional com resistor de frenagem interligado ao barramento CC**



Fonte: ABVE (2014)

**Figura 15: Diagrama de um inversor de frequência bidirecional geralmente usado em VE ou circuitos realimentados**



Fonte: ABVE (2014)

Circuitos realimentados são utilizados em regime contínuo, onde o excedente regenerado pelo sistema é comparado ao nível de tensão fornecido a alimentação do sistema, isto pode ocorrer em um determinado processo que funcione 24 horas por dia ininterruptamente, por exemplo, um inversor bidirecional através de sua configuração pode regenerar a realimentação do seu sistema para fins de armazenamento de energia como é o caso de VE's que utilizam o potencial de sua unidade regenerativa em bancos de baterias, para fins aumento de autonomia de um veículo ,ou seja o alcance e consumo de um VE fica atrativo em comparação a um veículo convencional ICE, a viabilidade da implementação de um sistema de frenagem regenerativa de VE's em uma ponte rolante trata-se da semelhança do acionamento da máquina elétrica responsável pela elevação de carga , e na característica do sistema onde ocorre aceleração e desaceleração com ou sem carga, e rampa lineares de controle de velocidade e torque.

Segundo Weg (2008), várias soluções que têm sido propostas para utilização de conversores e inversores bidirecionais e tecnologias de armazenamento de energia apropriadas ligadas ao barramento DC, de modo que a energia em excesso pode ser recuperada e utilizada de novo. Um desses casos é a utilização de inversores para a configuração de sistemas regenerativos, onde uma unidade retificadora regenerativa é ligada diretamente ao barramento CC do inversor que irá

alimentar a rede elétrica, esta solução permite aproveitamento total da energia gerada na frenagem regenerativa, proporcionando ao sistema um fator de potência igual a 1, além de eliminar os harmônicos na entrada do inversor, melhorando o seu rendimento do necessário, fato que em algumas destas situações torna-se necessário o armazenamento do potencial excedente no qual pode ser realizado por uma bateria .

Uma bateria possui terminais metálicos que estão podem estar carregados, e são denominados de polos positivo e negativo. Nesses polos existem cargas acumuladas quer eles estejam ligados a circuitos ou não. Através desses polos, onde as cargas se acumulam, é produzida uma tensão cujo valor vem impresso no corpo desses acumuladores, que é a maneira pela qual identificamos o uso adequado de cada um deles ex: baterias de automóveis 12 V (LINO, 2018). Com a produção dessa tensão, uma corrente elétrica poderá ser estabelecida num quando um fio condutor for conectado aos pólos desse circuito elétrico, entretanto, a separação de cargas e sua acumulação nos pólos positivo e negativo produz um campo elétrico.

#### Cálculo do dimensionamento de baterias

O cálculo para o dimensionamento de um sistema de baterias se faz basicamente em duas partes, Parte 1, Cálculo do número de elementos e Parte 2, dimensionamento da capacidade de baterias (PELEGRINO, 2006).

Parte 1, a quantidade de elementos é o primeiro estágio no dimensionamento de uma bateria, é a determinação da quantidade de elementos necessários para operar, dentro de tensões definidas pelo consumidor, em condições adequadas de carga e descarga, todos os sistemas elétricos, em particular os sistemas associados a baterias, apresentam uma tolerância para mais e para menos em relação à tensão nominal  $V_N$  , entre as quais o sistema opera satisfatoriamente. Comumente utilizam-se tolerâncias de +10% e -15% (PELEGRINO, 2006).

Para atender as tolerâncias do sistema consumidor, as tensões dos carregadores de baterias podem ser ajustadas dentro de uma faixa para atender as condições de tensão de carga e tensão de flutuação das baterias, seu primeiro passo, então, é definir através das curvas da bateria qual a tensão de descarga que dê um melhor aproveitamento de sua capacidade nominal (PELEGRINO, 2006).

Para o caso de baterias terá um valor igual a constante de 1,75 VP, o número de elementos N será:

Para um sistema consumidor de 12 volts (+10% -15%) pode ser atendido por um com as seguintes faixas:

\* tensão de flutuação:  $V_{\min} = 10,2V$  ;  $V_{\max} = 13,4V$

\* tensão de carga:  $V_{\min} = 10,7V$  ;  $V_{\max} = 14,4V$

$$N = \frac{\text{tensão final de descarga}}{\text{tensão final de descarga do elemento}} = \frac{10,2}{1,75} = 5,82$$

utiliza-se o valor de 6 elementos

A parte 2 no dimensionamento da capacidade da bateria sobre esta parte é apresentado uma equação básica para cálculo da capacidade da bateria sem entrar nos detalhes de seu equacionamento matemático que tem como base o processo descrito na norma (NBR15254, 2005) a qual fornece as diretrizes para dimensionamento de baterias estacionárias de chumbo-ácidas e descrito pela equação abaixo (PELEGRINO, 2006).

$$Ah/H = \frac{(V \text{ carga máx}) \times (Ah / P \times \text{instante})}{60} =$$

$$Ah/H = \frac{(14,4) \times (8,073 \times 5 \text{ segundos})}{60} = 10,82 \text{ ou } 12 \text{ Ah}$$

6 elementos de 12 Ah ou 2 elementos 36 Ah

## 5 CONCLUSÃO

Conforme proposto neste estudo, que foi descrever o funcionamento do sistema de frenagem regenerativa assim como analisar diferentes tecnologias, conseqüentemente fazer pesquisas sobre a utilização de diferentes métodos regenerativos de energia, e ainda, compreender como ocorre o armazenamento de energia produzida por este sistema. Observou também quais as melhores tecnologias usadas atualmente em sistemas automotivos e industriais.

Com base nos estudos mencionados acima, vimos a necessidade de fazer uma coleta de dados em uma ponte rolante do setor metalúrgico como é citado no capítulo 4, que usa o sistema regenerativo. Com os dados coletados pelos autores comprovou-se que há uma grande perda de energia no momento da frenagem da ponte, fizemos medições em  $T = 5$  segundos com carga capacidade máxima suportada de 10,2 toneladas que gerou uma potencia de 156,61 Watts, em um mês 5000watts, ou seja, essa energia perdida no momento da frenagem com estudos mais aprofundados futuramente, essa energia perdida pode ser reutilizada para vários segmentos dentro do setor industrial, por exemplo, na parte de iluminação da ponte.

Por outro lado, analisando a economia brasileira, a frenagem regenerativa para sistemas de elevação ou que usa o freio como regenerativo, ainda é uma tecnologia bastante onerosa. Porém como ela é uma tecnologia que apresenta avanços na eficiência energética de um sistema, a tendência é que entre em produção para novos conjuntos de acionamento que utiliza sistemas de frenagem, com isso, tende a diminuir o custo e, em um futuro próximo, ficar acessível para ser instalada no setor industrial.

Desta forma concluímos que há varias tecnologias de frenagem regenerativa que são implementadas no setor automotivo e industrial, que por sua vez cada inovação tem sua particularidade. Portanto sugere-se direcionar os investimentos em pesquisa para essa tecnologia frente a outras

## 6 REFERÊNCIAS

ABVE. Associação Brasileira dos Veículos Elétricos. *Frenagem Regenerativa*. 18 ago. 2014. Disponível em: <http://www.abve.org.br/PF/ExibePF.asp?codigo=0009>. Acesso em: 18 nov. 2019.

ABNT NBR 15254 – 2005. *Acumulador chumbo-ácido estacionário – Diretrizes para dimensionamento*. 2005. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=2>. Acesso em: 16 nov. 2019.

ANDRADE, Carlos Eduardo Sanches de. *Avaliação da emissão de dióxido de carbono e do uso de energia no ciclo de vida de sistemas metroferroviários de passageiros: aplicação na linha 4 do metrô do Rio de Janeiro*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2016. Disponível em: [http://146.164.5.73:30080/tempsite/PET/images/documentos/teses/Tese\\_Carlos\\_\\_Andrade\\_08-07-2016.pdf](http://146.164.5.73:30080/tempsite/PET/images/documentos/teses/Tese_Carlos__Andrade_08-07-2016.pdf). Acesso em: 09 out. 2019.

ANTUNES, Paulo Donizete Ribeiro. *Veículos elétricos, funcionamento e seus benefícios*. Trabalho de Graduação. UUNIFACVEST. Lages/SC. 2018. 73f. disponível em: [https://www.unifacvest.net/assets/uploads/files/arquivos/7af59-22\\_paulo\\_donizete.pdf](https://www.unifacvest.net/assets/uploads/files/arquivos/7af59-22_paulo_donizete.pdf). Acesso em: 11 out. 2019.

BARAN, Renato. LEGEY, Luiz Fernando Loureiro. *Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil*. Biblioteca Digital do BNDES. XIII Congresso Brasileiro de energia. Novembro de 2010. Publicado em 2011. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1489/3/A%20BS%2033%20Ve%C3%ADculos%20el%C3%A9tricos%20-%20hist%C3%B3ria%20e%20perspectivas%20no%20Brasil\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1489/3/A%20BS%2033%20Ve%C3%ADculos%20el%C3%A9tricos%20-%20hist%C3%B3ria%20e%20perspectivas%20no%20Brasil_P.pdf). acesso em: 25 out. 2019.

CANTWELL, Katie, 2002. *Regeneration Overview*. Rockwell Automation Allen-Bradley, 2002.

CLEGG, S. J. *A review regenerative braking*. Institute of Transport Studies, University of Leeds, Leeds, Inglaterra. 1996. Disponível em: [http://eprints.whiterose.ac.uk/2118/1/ITS105\\_WP471\\_uploadable.pdf](http://eprints.whiterose.ac.uk/2118/1/ITS105_WP471_uploadable.pdf). Acesso em: 09 out. 2019.

CHRISPIM, Mariana Cardoso; SOUZA, Jhonathan Fernandes Torres de; SIMÕES, André Felipe. Avaliação comparativa entre veículos elétricos e veículos convencionais no contexto de mitigação das mudanças climáticas. *Rev. Gestão & Sustentabilidade*. Florianópolis. v. 8, n. 1, p. 127-148, jan/mar. 2019. Disponível em: [http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao\\_ambiental/article/view/6723/4317](http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/6723/4317). Acesso em: 11 out. 2019.

DEMAG CRANES. *Pontes Rolantes*. Disponível em: <https://www.demagcranes.com/pt-br/produtos/pontes-rolantes>. Acesso em: 23 nov. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. DENATRAN. *Frota de veículos 2019*. Agosto. Disponível em: [https://infraestrutura.gov.br/images/Estatistica/RENAVAM/2019/Agosto/Frota\\_Reg\\_UF-Tipo\\_Modelo\\_Agosto\\_2019.xls](https://infraestrutura.gov.br/images/Estatistica/RENAVAM/2019/Agosto/Frota_Reg_UF-Tipo_Modelo_Agosto_2019.xls). Acesso em: 11 out. 2019.

DONEV, Evgeniy; GANDLA, Madhavi Latha; JONSSON, Leif J.; MELLEROWICZ, Ewa J. **engineering** *Non-cellulosic Polysaccharides of Wood for the biorefinery*. 23 oct. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01537>. Acesso em: 10 out. 2019.

ERBER, Pietro. *Veículo elétrico: vantagens e equívocos*. 06 de fevereiro de 2012. Disponível em: <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2012/02/carro-eletrico-vantagens-e-equivocos/17145>. Acesso em 04 out. 2019.

EHSANI, Mehrad; EMADI, Ali; SEBASTIEN, Gai ,GAO yimin et al. *Modern Electric, Hybrid electric, and Fuel Cell Vehicles*. Fundamentals, Theory and Design. 2005.

ENOSHITA, Evandro. *Gurgel Itaipu E-400: o primeiro carro elétrico produzido em série no Brasil*. 24 mai. 2018. *In: Motor Show*. Disponível em: <https://motorshow.com.br/gurgel-itaipu-e-400-o-primeiro>. Acesso em: 18 nov. 2019.

ESTADO DE SÃO PAULO. *Na paralisação dos caminhões, poluição na capital caiu pela metade*. 03 de junho de 2016. Portal do Governo Estadual. Disponível em: <http://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias/na-paralisacao-dos-caminhoes-poluicao-em-sao-paulo-caiu-pela-metade/>. Acesso em 09 out. 2019.

ESTADO DE SÃO PAULO. *Qualidade do ar no Estado de São Paulo*. 2018. Disponível em: [https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2019/07/Cetesb\\_QualidadeAr\\_2018R.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2019/07/Cetesb_QualidadeAr_2018R.pdf). Acesso em: 11 out. 2019.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 1996.

HYPENESS. *Itaipu E-400: o primeiro carro elétrico brasileiro lançado pela Gurgel nos anos 1980*. Janeiro de 2019. Disponível em: <https://www.hypeness.com.br/2019/01/itaipu-e-400-o-primeiro-carro-eletrico-brasileiro-lancado-pela-gurgel-nos-anos-1980/>. Acesso em: 28 out. 2019.

HOYER, Karl Georg. *The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars*, Elsevier, vol. 16(2), p- 63-71, Jun.2008. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/juipol/v16y2008i2p63-71.html>. Acesso em: 29 out. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO E TRIBUTAÇÃO. IBPT. *Real frota circulante no Brasil é de 65,8 milhões, diz estudo*. 20 de março de 2018. Disponível em: <https://ibpt.com.br/noticia/2640/REAL-FROTA-CIRCULANTE-NO-BRASIL-E-DE-65-8-MILHOES-DE-VEICULOS-INDICA-ESTUDO>. Acesso em: 04 out.. 2019.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. *Metodologia científica*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1987.

LENZ, André Luis. *Automóveis elétricos*. 13 de julho de 2012. Disponível em: <http://automoveiseletricos.blogspot.com/2012/07/baterias-de-ions-de-litio-tecnologias-e.html>. Acesso em: 10 out. 2019.

LINO, Viviane Teixeira. *Pilhas e baterias*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2018. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20032/Viviane/comofuncionam.htm>. Acesso em: 18 nov. 2019.

MANZOLI, Anderson. *Análise das emissões veiculares em trajetos urbanos curtos com localização de GPS*. Tese. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos/SP, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-26052009-170127/publico/Manzoli.pdf>. Acesso em: 11 out. 2019.

MARTIGNONI, Alfonso. *Ensaio de máquinas elétricas*. Editora Globo. 2 ed. 1987.

NEWCOMBE, T. P. Temperatures reached in disc brakes. *Journal Mechanical Engineering Science*. 1960. Disponível em: [https://journals.sagepub.com/doi/10.1243/JMES\\_JOUR\\_1960\\_002\\_026\\_02](https://journals.sagepub.com/doi/10.1243/JMES_JOUR_1960_002_026_02). Acesso em: 23 nov. 2019

NISSAN, Nissan Leaf Technology FAQ, Charging & Range 2016 : Acesso em: 08 nov. 2019.

NUNES JUNIOR, Vicente. *Estudo das principais vantagens do uso da frenagem regenerativa em veículos híbridos*. Monografia. Escola de Engenharia Mauá. 2014. Disponível em: <https://maua.br/files/monografias/completo-estudo-das-principais-vantagens-uso-frenagem-regenerativa-veiculos-hibridos-280732.pdf>. Acesso em: 28 out. 2019.

ONAYA, Atila Felipe. *Modelagem dinâmica de bicicleta elétrica*. São Paulo. Trabalho de Conclusão. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. 2012. Disponível em: [http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2011/Trabalhos%20 finais/TCC\\_008\\_2011.pdf](http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2011/Trabalhos%20 finais/TCC_008_2011.pdf). Acesso em: 23 nov. 2019.

PAIVA, M. V. *Supercapacitores no controle de tensão e corrente proveniente de frenagem regenerativa*. Cefet, p. 104. Jul/2009.

PEDROSO, Fernando. *Leaf e March: Nissan mostra elétrico, mas vender popular*. Disponível em: <https://www.icarros.com.br/noticias/testes-e-comparativos/leaf-e-march:-nissan-mostra-eletrico,-mas-quer-vender-popular/10088.html>. Acesso em: 18 nov. 2019.

PEREZ, N. P. *Sistemas fluidomecânicos regenerativos*. v. 01. São Paulo: Feg Unesp. 2014.

PELEGRINO, P. E. *Cálculo de dimensionamento de Baterias*. p. 15. 2006. Acesso em: 11 out. 2019. Disponível em: [http://www.centralmat.com.br/Artigos/Mais/art5\\_baterias.PDF](http://www.centralmat.com.br/Artigos/Mais/art5_baterias.PDF). Acesso em 18 nov. 2019.

REVISTA MECATRÔNICA ATUAL. *Frenagem Regenerativa*. Reaproveitamento de energia elétrica. Ano 4, Edição 25. Dezembro 2005. Disponível em: <http://www.mecatronicsatual.com.br/educacao/1395-frenagem-regenerativa-reaproveitamento-de-energia-eltrica>. Acesso em: 18 nov. 2019.

ROMI peças. Unidade regenerativa. Figura ilustrativa. Disponível em: <https://pecas.romi.com/p/unidade-regenerativa-440v/R48634>. Acesso em: 23 nov. 2019.

RPM MEDIA. *Flywheel free energy generator. Basic Point flywheel generator. Without diesel and battery*. Vídeo. 4m 59s. Imagem retirada de frame em 03 min 50s. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=57TVCIL06ws>. Acesso em: 23 nov. 2019.

SANTOS, Célia aparecida Lino dos. Baterias de íons lítio para veículos elétricos. *Laboratório de Corrosão e Proteção*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. S.A. São Paulo, SP. v.2, n.9, dez/2018. Disponível em: <http://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/download/71/81>. Acesso em: 18 nov. 2019.

SILVA, Matheus Barros; SOUZA, Victor Hugo de. *Sistemas híbrido-hidráulicos e híbrido-elétricos para geração de potência mecânica: Recuperação parcial da energia de frenagem*. Monografia. Curso de Graduação em Engenharia Automotiva. Universidade de Brasília. Faculdade Gama. Brasília/DF. Julho de 2015. Disponível em: [https://fga.unb.br/articles/0001/0359/TCC1\\_oficial\\_victorhugo\\_matheusbarros.pdf](https://fga.unb.br/articles/0001/0359/TCC1_oficial_victorhugo_matheusbarros.pdf). Acesso em: 04 out. 2019.

SOBRE o carro elétrico. *In: Verde sobre rodas*. Disponível em: <http://www.verdesobrerodas.com.br/p/sobre-o-carro-eletrico.html>. Acesso em: 18 nov. 2019.

SOUZA JUNIOR, Paulo Antonio de Souza. Frenagem dinâmica e regenerativa da máquina de corrente contínua. ***Dissertação de Pós-Graduação em Ciências em Engenharia de Energia***. Universidade Federal de Itajubá. v. 1. 85 p. 2019. Disponível em: [https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1986/dissertacao\\_2019092.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1986/dissertacao_2019092.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 09 out. 2019.

STRUBEN, J.; Sterman, J. D. *Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems*, 2006. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1068/b33022t>. Acesso em: 26 out. 2019.

TAVARES, A. M. (2012). tese de doutorado. *Estudo teórico e experimental da frenagem regenerativa de maquinas de indução linear*, p. 186. Fonte: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/197158/000883453.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

TOSHIZAEMON, N. Estudo de funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento. *Pós graduação*, p. 129. 2009.

TUR, Okan. *Application Note on Regenerative Braking of Electric Vehicles as Anti-Lock Braking System*. Ansoft, LLC. Abril 11, 2006.

XU, Guoqing; LI, Weinin; XU, Kun; SONG, Zhibin. *Nan inteligente regenerative braking strategy for eletric vehicles*. 2011. v.4. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/277674118\\_An\\_Intelligent\\_Regenerative\\_Braking\\_Strategy\\_for\\_Electric\\_Vehicles](https://www.researchgate.net/publication/277674118_An_Intelligent_Regenerative_Braking_Strategy_for_Electric_Vehicles). Acesso em: 18 nov. 2019.

YASKAWSA. Resistor ligado ao barramento cc do inversor de frequência. *Imagem*. Disponível em: <https://www.yaskawa.com/home>. Acesso em: 23 nov. 2019.

YIMIN, GAO. *Modern Electric, Hibrid electric, and Fuel Cell Vehicles*. Fundamentals, Theory, and Design. 2005.

WEG. *Inversores de frequência*. 2008. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Inversores-de-Frequ%C3%Aancia/Drives-para-Sistemas-Industriais/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW11/INVERSOR-BRCFW110003T4OFAZ/p/11411783>. Acesso em: 18 nov. 2019.