UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

RAFAEL BONICEN DA SILVA

ESTUDO DOS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA LOCOMOTIVAS DIESEL/ELÉTRICAS HÍBRIDAS

VITÓRIA – ES

SETEMBRO/2014

RAFAEL BONICEN DA SILVA

ESTUDO DOS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA LOCOMOTIVAS DIESEL/ELÉTRICAS HÍBRIDAS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Rafael Bonicen da Silva**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. José Luiz Borba

VITÓRIA – ES

SETEMBRO/2014

RAFAEL BONICEN DA SILVA

ESTUDO DOS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA LOCOMOTIVAS DIESEL/ELÉTRICAS HÍBRIDAS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Rafael Bonicen da Silva**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 17 de setembro de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. José Luiz Borba
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Orientador

Prof.ª Dr.ª Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Coorientadora

Prof. Dr. Antônio Manuel Ferreira Frasson
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Examinador

Prof. Dr. Getúlio Vargas Loureiro
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Examinador

AGRADECIMENTOS

O ano de 2008 foi um verdadeiro divisor de águas em minha vida. Em meio a tantos acontecimentos, tomei uma decisão que mudaria minha vida profissional e pessoal: abandonar o curso de Direito na UFES para retomar um antigo sonho de cursar Engenharia Elétrica.

Ao entregar este trabalho que marca o fim desta bem sucedida jornada, vejo o quanto fui feliz em minha escolha. Foram 5 anos intensos, de imensas dificuldades e grandes desafios.

Seria impossível superar todas estas dificuldades se não tivesse o apoio incondicional da minha família. Durante todo o curso, tive que conciliar a minha vida profissional com a acadêmica. Entretanto, nunca ousei me queixar, pois meus pais, por meio de atitudes, e não somente de palavras, me ensinaram que na vida nunca podemos parar. Minha mãe sempre esteve ao meu lado, me passando confiança e me mostrando o que é ser forte. Meu pai aos 60 anos, ao invés de se aposentar, começou um Mestrado. Há exemplo e lição maior que esse? E meu irmão, que embora mais novo que eu, sempre demonstrou maturidade e esteve ao meu lado nas maiores adversidades que passei. A eles sou eternamente grato. Não há amor maior do que o que eu sinto por eles.

Justo também é agradecer aos meus amigos. Sozinho não somos ninguém. Foram vários os que me apoiaram, mas não posso deixar de agradecer em especial aqueles que considero como irmãos, e sei que sempre torceram por mim e estarão ao meu lado: Marcelo e Christina, Felipe e Marina, Ramon e Ana Paula, Vitão e Mayra, Rodrigo, José Ricardo, Rhener, Paulo Victor, Cesinha e Arthur. Vocês têm um lugar muito grande no meu coração.

E para o sucesso desta história, foi imprescindível a participação dos grandes professores que eu tive. Obrigado é uma palavra pequena para externar o quanto sou grato por eles, afinal são eles os responsáveis por fazer do curso de Engenharia Elétrica da UFES, referência nacional. Por fim, gostaria de materializar toda a gratidão e imensurável carinho que tenho pelo meu Orientador e professor José Borba. Sua participação neste trabalho foi fundamental, e foi ele que me deu o empurrão final que eu precisava para concluir esta jornada.

A todos, muito obrigado. E se foi bom demais, é porque valeu.

RESUMO

Este trabalho tem a finalidade de realizar um estudo sobre técnicas de recuperação da energia gerada em frenagens regenerativas de locomotivas híbridas diesel/elétricas. Nele são abordados temas relacionados a motores CC, motores de indução, inversores, sistemas de armazenamento de energia e técnicas de recuperação de energia. Inicialmente, são analisados diferentes sistemas de armazenamento e técnicas de recuperação de energia. Diante destas análises, foi possível entender o porquê de alguns sistemas estarem sendo desenvolvidos pela indústria automobilística para serem utilizadas em veículos elétricos. A seguir, foi analisado um estudo encomendado pela VALE S.A., e que teve como objetivo verificar a viabilidade de utilização de sistemas de recuperação de energia para o aproveitamento da energia gerada durante a frenagem regenerativa das locomotivas da VALE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama elétrico do motor CC série 13
Figura 2 - Curva conjugado x velocidade de operação motor CC série com carga constante . 14
Figura 3- Representação dos três campos..... 16
Figura 4 - Modos de operação da máquina de indução 17
Figura 5 - Modelo equivalente, por fase, do motor de indução, recomendado pela IEEE 19
Figura 6 - Circuito equivalente de Thévenin de uma fase motor de indução 20
Figura 7 - Circuito de freio dinâmico em motor CC 22
Figura 9 - Circuito básico de um inversor de tensão imposta trifásico em ponte..... 24
Figura 10 - Formas de onda das tensões de linha e de fase na carga em estrela 26
Figura 11 - Sequência de ligação das chaves à uma carga em estrela..... 27
Figura 12 - Forma de onda modulada por largura de pulso..... 27
Figura 13 - Formação dos instantes de disparo para onda modulada por 5 pulsos 28
Figura 14 - Modelo do IGBT..... 30
Figura 15 - Esquemático da ligação de um motor de indução trifásico em estrela a um inversor de tensão imposta..... 31
Figura 16 - Formas de onda da tensão e da corrente na fase “a”..... 32
Figura 17 - Formas de onda das correntes nos diodos, D_1 e D_4, e nas chaves estáticas, S_1 e S_4, supondo correntes senoidais 32
Figura 18 – Formas de onda da tensão e da corrente na fase "a" (gerador) 33
Figura 19 - Formas de onda das correntes nos diodos, D1 e D4, e nas chaves estáticas, S1 e S4, supondo correntes senoidais (gerador) 34
Figura 20- Transferência de energia em uma locomotiva 34
Figura 21 - Estágio das tecnologias de armazenamento de energia 36
Figura 22- Diagrama da Bateria de Fluxo 44
Figura 23 - Diagrama da bateria Beta-Alumina de Sódio 46
Figura 24 - Diagrama da bateria de Sódio Durathon da GE..... 47
Figura 25 - Diagrama da bateria de Metal-Ar 49
Figura 26 - Capacitor híbrido 53
Figura 27 - Partes de um *flywheel* 55
Figura 28 - Exemplo de freio regenerativo no sistema paralelo de um automóvel híbrido 57
Figura 29 - Armazenamento de energia com eletrolisador/célula de combustível de hidrogênio60

Figura 30 - Comparativo das diversas químicas de baterias de Lítio 64
Figura 31 - Locomotiva Dash 9 D9-40BBW 65
Figura 32 - Perfil da rota de Vitória - Laboreau - Vitória 67
Figura 33 - Perfil da rota de Laboreau a Conceição/João Paulo a Laboreau..... 67
Figura 34 - Esquemático do fluxo de potência da locomotiva com a adição de um Sistema de Armazenamento de Energia *Flywheel* (FESS) 80
Figura 35 - Fluxo de potencia e estado de energia no FESS (3° dia), considerando que não há limite para potência máxima e energia máxima no FESS 81

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
2 OBJETIVOS 12
2.1 Objetivo geral 12
2.2 Objetivos específicos 12
3 MÁQUINAS ELÉTRICAS 13
3.1 Máquinas CC 13
3.2 Motor de Indução Trifásico 15
4 Frenagem 21
4.1 Frenagem dinâmica 21
4.2 Frenagem regenerativa 22
4.2.1 Motores CC na frenagem 22
4.2.2 Frenagem regenerativa em motor de indução 23
4.3 Inversores 24
4.3.1 Princípio de funcionamento 24
4.3.2 Modo de comando das chaves estáticas 24
4.3.3 IGBT 29
4.3.4 Motor de indução trifásico alimentado por um inversor 30
4.4 Transferência de energia em uma locomotiva 34
5 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA GERAL 36
5.1 Armazenamento de energia para aplicação tracionaria 37
5.2 Armazenamento de Energia Eletroquímica 38
5.2.1 Baterias Chumbo-Ácidas 38
5.2.2 Baterias baseadas em Níquel 39
5.2.3 Baterias baseadas em Íons de Lítio 41
5.2.4 Baterias de Fluxo 43
5.2.5 Baterias Beta-Alumina de Sódio 45
5.2.6 Baterias de Metal-Ar 49
5.2.7 Capacitor elétrico de dupla camada (EDLC) 50
5.2.8 Capacitor híbrido 52
5.3 Armazenamento de energia mecânica aplicável em tracionarios 54
5.3.1 Flywheel 54

5.4 Hidrogênio como sistema de armazenamento de energia 59
5.4.1 Descrição da tecnologia 59
5.4.2 Produção de Hidrogênio pela Eletrólise da Água 60
5.4.3 Armazenamento de Hidrogênio 61
5.4.4 Conversão em energia elétrica 61
5.4.5 Situação da tecnologia 61
5.4.6 Limitações da tecnologia 62
5.5 Análise comparativa 63
6 ESTUDO DE CASO 65
6.1 Ciclos de trabalho 66
6.2 Configuração do trem 68
6.3 Processamento dos dados 69
6.4 Análises e resultados 69
6.4.1 Perfil de velocidade e altitude 69
6.4.2 Acionamentos da alavanca de controle pelo maquinista 72
6.4.3 Corrente de tração e de frenagem dinâmica 74
6.4.4 Potência na tração e na frenagem dinâmica 77
6.4.5 Consumo de energia 79
6.4.6 Frenagem regenerativa 80
7 Conclusões 85

1 INTRODUÇÃO

Em meio às inúmeras crises por quais passa o setor energético mundial, tem-se o crescimento do ramo de pesquisa referente à eficiência energética. Tal ramo busca a melhora do rendimento de equipamentos por meio de soluções que evitem o desperdício de energia e que proporcionem o seu uso racional.

Em relação aos motores elétricos, diversas pesquisas têm sido realizadas para o desenvolvimento de sistemas de frenagens regenerativas. Neste tipo de frenagem, busca-se devolver a energia dissipada à fonte de alimentação do motor por meio de conversores que adéquem as características da energia gerada de acordo com as particularidades do ponto de entrega desta (geralmente o sistema elétrico onde se encontra). Quando não existe essa possibilidade, faz-se necessário o uso de dispositivos de armazenamento de energia, tais como baterias e *flywheels*.

Em veículos híbridos o nível de consumo de energia elétrica é crucial, sendo que neste setor cresceram os estudos sobre frenagem regenerativa. Como exemplo, os carros da Fórmula 1 já estão usando essa modalidade de frenagem através de um dispositivo chamado KERS (*Kinectic Energy Recovering System*), que funciona como uma bateria eletromecânica que armazena energia cinética durante as frenagens, e, quando o piloto aperta o botão de acionamento do KERS, essa energia é liberada como corrente para um motor elétrico auxiliar que proporciona um pico de potência ao carro por alguns segundos (WILLIAMS, 2013). Existem também diversos estudos da implantação desse princípio em ônibus urbanos, uma vez que os mesmos realizam muitos ciclos de aceleração e frenagem, situação na qual o método é mais eficiente (WILLIAMS, 2013).

A ideia, portanto, é estudar a possibilidade de se utilizar o conceito de frenagem regenerativa para reutilizar a energia produzida durante a frenagem pelas locomotivas empregadas pela empresa VALE S.A. na operação de transporte de carga na ferrovia Estrada de Ferro Vitória a Minas – EFVM. Havendo a possibilidade de recuperação desta energia, será possível a economia do consumo de combustível, o que além da redução de custos, significa um menor nível de poluição.

A questão, entretanto, é que o processo de frenagem não é uma constante no funcionamento da máquina elétrica. O tempo de operação neste ponto é pequeno se comparado ao tempo total de funcionamento do motor. Além disso, a frenagem possui características que dificultam o armazenamento da energia, como a intermitência das frenagens, sem um tempo certo de funcionamento, e a possibilidade de uma frenagem rápida, com alta potência em um curto tempo.

No estudo realizado neste trabalho, é apresentado com detalhes métodos de frenagem regenerativa Além disso, são discutidas vantagens e desvantagens técnicas de diferentes métodos de reaproveitamento de energia em frenagens regenerativas, o que poderá ser bastante útil em uma futura análise econômica direcionada especificamente para implantação de uma nova tecnologia em locomotivas.

Por fim, será exemplificado o uso das tecnologias listadas na operação de frenagem de uma locomotiva e armazenamento da energia recuperada e também vislumbrando possibilidades futuras com o desenvolvimento de novas tecnologias.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do projeto de graduação é:

- Verificar a viabilidade de reutilização de energia produzida durante a frenagem pelas locomotivas empregadas pela empresa VALE S.A. na operação de transporte de carga na ferrovia Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM).

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do projeto de graduação são:

- Estudar a frenagem das máquinas elétricas;
- Estudar os diversos sistemas de armazenamento de energia geral;
- Comparar os diversos sistemas de armazenamento de energia geral;
- Por meio de um estudo de caso, analisar a aplicabilidade dos sistemas de armazenamento de energia para a reutilização de energia produzida durante a frenagem das locomotivas da VALE.

3 MÁQUINAS ELÉTRICAS

Atualmente, as locomotivas da VALE S.A. são movidas por motores híbridos diesel/elétrico. Os motores a diesel funcionam como geradores de energia para os motores elétricos, os quais de fato fazem as locomotivas se moverem.

Os dois principais tipos de motores elétricos utilizados são os de Corrente Contínua (CC) e os de Indução. A análise do funcionamento destes motores é de fundamental importância no estudo aqui proposto.

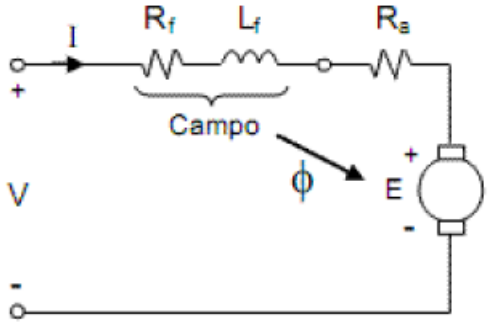
3.1 Máquinas CC

A máquina de corrente contínua se caracteriza por possuir um enrolamento de campo saliente alimentado por corrente contínua (estator) produzindo uma distribuição de fluxo magnético simétrico em relação à linha central dos pólos de campo, criando um norte e um sul magnético, enquanto o rotor ou armadura é alimentado através de escovas com seus enrolamentos criando um fluxo com 90° de defasamento em relação ao fluxo de campo, gerando assim um binário praticamente constante, independente da posição do rotor.

Existem diversas configurações para ligação dos enrolamentos de campo e de armadura do motor. De acordo com estas configurações, pode-se ter motor de corrente contínua de excitação independente, em série, paralela (*shunt*) e composta (série e paralela). Cada configuração possui características próprias de conjugado e corrente.

Pelas suas características de torque alto em baixas velocidades, os motores CC com ligação série são mais apropriados para tração e, portanto, mais utilizados em locomotivas. Na Figura 1, tem-se o diagrama elétrico do motor CC série.

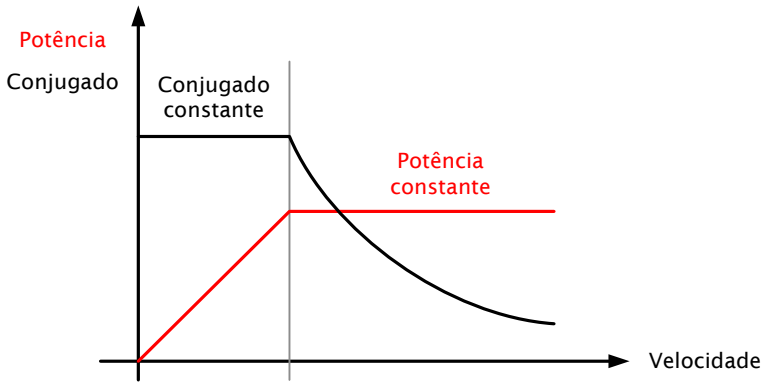
Figura 1 - Diagrama elétrico do motor CC série



Fonte: Borba (2013).

Os motores CC possuem a característica de serem facilmente controlados, atendendo de forma satisfatória operações com carga constante. Na Figura 2, tem-se a curva de operação do motor.

Figura 2 - Curva conjugado x velocidade de operação motor CC série com carga constante



Fonte: Borba (2013).

Para o motor CC série, têm-se as seguintes equações básicas (1), (2) e (3) (SEN, 1997):

$$\boldsymbol{V = (R_a + R_f)I + E} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{E = k_a . \Phi . \omega_{eixo}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{T_{mec} = k_a . \Phi . I} \tag{3}$$

Onde:

k_a : é a constante do motor dada pelas características de fabricação;

Φ : fluxo magnético do motor;

R_a : resistência de armadura;

R_f : resistência de campo;

V : tensão de alimentação do motor;

I : corrente elétrica na armadura;

E : tensão de armadura do motor;

T_{mec} : torque mecânico no eixo do motor;

ω_{eixo} : velocidade do motor.

Considerando que a excitação do motor seja tal que não cause a saturação do ferro, temos que o fluxo magnético do motor (Φ) é diretamente proporcional a corrente na armadura (I), conforme equação (4), na qual temos uma constante de proporcionalidade k (SEN, 1997):

$$\boldsymbol{\Phi = k.I} \tag{4}$$

Substituindo a equação (4) na equação (3), temos a relação entre Torque mecânico (T_{mec}) e a corrente elétrica na armadura (I), conforme equação (5) (SEN, 1997):

$$\boldsymbol{T_{mec} = k_a.k.I^2} \tag{5}$$

As equações apresentadas nesta seção serão utilizadas na análise da frenagem regenerativa do motor CC.

3.2 Motor de Indução Trifásico

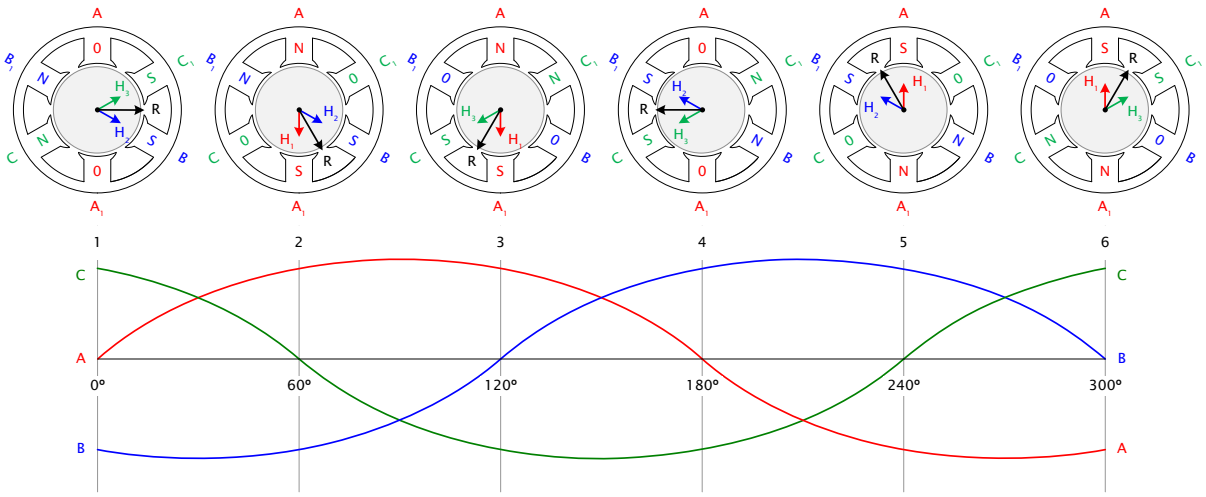
O motor de indução (ou motor assíncrono) vem sendo amplamente utilizado em locomotivas devido ao desenvolvimento dos inversores. Ele é formado por duas partes básicas: o rotor e o estator, sendo que a corrente alternada é fornecida diretamente ao estator, ao passo que o rotor recebe a corrente por indução, como em um transformador, a partir do estator (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2002).

O rotor de uma máquina de indução pode ser de dois tipos: rotor bobinado (ou enrolado), ou rotor gaiola de esquilo. Neste último, o enrolamento do rotor consiste em barras condutoras encaixadas em ranhuras no forro do rotor e curto-circuitadas em cada lado por anéis condutores (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2002). A extrema simplicidade e a robustez da construção em gaiola de esquilo representam vantagens notáveis para esse tipo de motor de indução mais comumente utilizado, indo de motores fracionários aos de grande porte, como os utilizados em locomotivas.

O estator, por sua vez, é formado por uma carcaça, na qual há três enrolamentos distribuídos na periferia interna do núcleo magnético, com os eixos deslocados uns dos outros em 120° mecânicos. Esses enrolamentos devem ser percorridos por correntes de mesma frequência e valor eficaz, porém defasadas em 120° elétricos.

Conforme a Lei de faraday-Neumann-Lenz, quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica, é criado um campo magnético rotacional, direcionado conforme o eixo da bobina e de valor diretamente proporcional a corrente (SEN, 1997). Desta forma, no motor de indução, a circulação de corrente trifásica alternada pelo estator da máquina gera um fluxo magnético no entreferro, sendo este fluxo formado a cada instante pela combinação dos campos magnéticos estabelecidos em cada um dos enrolamentos. Obviamente, o campo magnético no entreferro induz uma corrente no rotor a fim de produzir conjugado (BORBA, 2013).

Figura 3- Representação dos três campos



Fonte: BORBA (2013).

O número de polos magnéticos de um motor de indução trifásico é determinado pelo modo com que os enrolamentos são dispostos no estator, devendo ser sempre par. Em uma máquina de p polos, um ciclo da variação da corrente faz o campo girar uma fração de $2/p$ de uma revolução. A velocidade do campo magnético girante é igual no estator e no rotor, e é chamada velocidade síncrona n_s (RPM). Dessa forma, para uma máquina de p polos, cuja corrente elétrica no estator possui frequência f (Hz), a Equação da velocidade síncrona e é dada pela Equação (6) (SEN, 1997):

$$\boldsymbol{n_s = \frac{2}{p} \cdot f \cdot 60 = \frac{120 \cdot f}{p}} \tag{6}$$

Quanto maior a diferença entre a velocidade de rotação do rotor e a do campo girante, maior é a tensão induzida no circuito do rotor. Esta, por sua vez, causa a circulação de correntes que

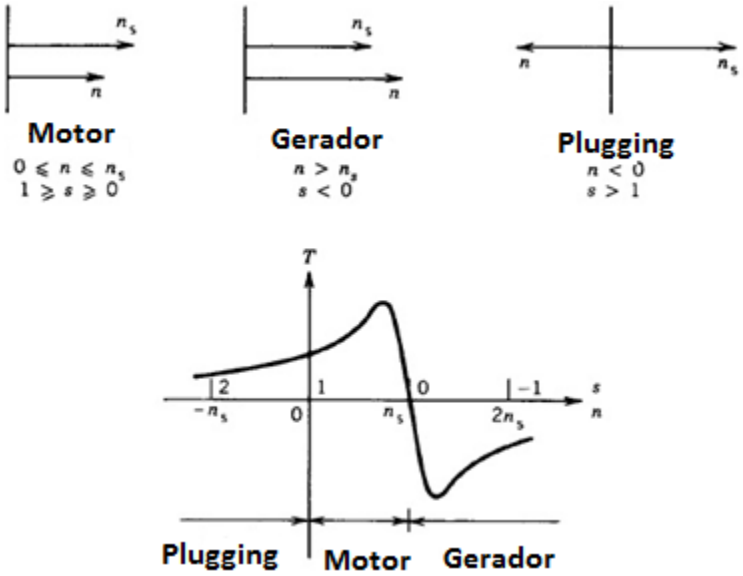
criarão seus próprios campos magnéticos, de polaridades opostas à do campo girante. Como campos opostos se atraem, uma vez que o campo é girante, o rotor tentará acompanhar a rotação do campo, desenvolvendo um conjugado no motor que faz com que o eixo gire e acione a carga.

Quanto maior a carga, maior é o conjugado necessário para acioná-la. Este conjugado é obtido aumentando-se a diferença de velocidade entre o rotor e o campo girante, ao mesmo tempo em que são produzidos campos magnéticos e correntes induzidas mais elevados. Portanto, ao ser aplicado um conjugado externo ao motor, o seu rotor diminuirá de velocidade na proporção necessária para que a corrente induzida passe a produzir um conjugado eletromagnético igual e oposto ao conjugado externamente aplicado. A perda de rotação do rotor, necessária para que seja produzido conjugado eletromagnético, é denominada escorregamento, e pode ser expressa pela Equação (7), onde n é a velocidade de giro do rotor em RPM e s é o escorregamento (BORBA, 2013).

$$\boldsymbol{s = \frac{n_s - n}{n_s}} \tag{7}$$

A forma de operação de uma máquina de indução está diretamente relacionada ao escorregamento do rotor, podendo ser operada como motor, gerador ou plugging. Na Figura 4, pode-se observar a relação entre a forma de operação e o escorregamento do rotor.

Figura 4 - Modos de operação da máquina de indução



Fonte: SEN (1997).

Quando opera como motor, os terminais do estator são conectados a uma fonte trifásica e o rotor gira na mesma direção que o campo magnético do estator. Nesse caso, a velocidade do rotor é menor que a velocidade síncrona, e o escorregamento é positivo e menor que um.

Se o rotor, por ação de um conjugado externo, girar em uma velocidade maior que a do campo do estator, a máquina de indução irá produzir um torque se opondo a rotação do motor. Neste caso, como a velocidade do rotor é maior que a do campo do estator, o escorregamento se torna negativo, e a máquina passa a atuar como um gerador. Esse é o princípio utilizado para realizar frenagens regenerativas, e será amplamente analisado neste trabalho.

Na modalidade *plugging*, o rotor gira em um sentido que se opõe ao campo magnético do estator, o que gera um torque de frenagem. É comum utilizar o *plugging* em aplicações de frenagem nas quais é necessário que o motor pare rapidamente. Entretanto, esse método é ineficiente, pois o torque de frenagem é baixo, e em contrapartida a corrente é bem alta, podendo inclusive danificar o motor, pois toda a energia utilizada na frenagem é dissipada nas resistências dos enrolamentos. Nesse caso o escorregamento é maior do que um.

Por fim, se o escorregamento no motor for zero, a tensão induzida no rotor é nula, logo não há conjugado.

O IEEE recomenda a configuração da Figura 5 como modelo, por fase, do motor de indução trifásico (SEN, 1997), na qual:

R_1 : resistência dos enrolamentos do estator (Ω);

X_1 : dispersão do fluxo magnético no estator (Ω);

X_m : reatância de magnetização do estator (Ω);

X'_2 : dispersão do fluxo magnético no rotor, refletida para o estator (Ω);

V_1 : tensão de fase nos terminais do estator (V);

E_1 : tensão induzida nos enrolamentos do estator (V).

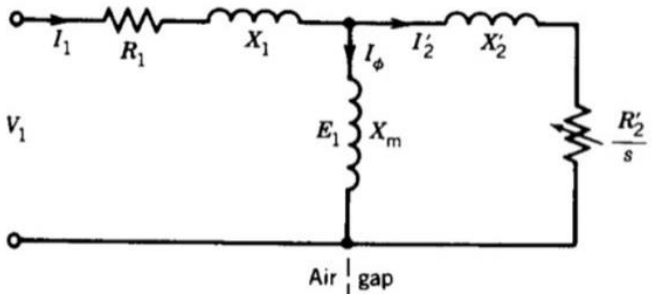
O termo R'_2/s pode ser dividido em duas partes:

R'_2: resistência dos enrolamentos do rotor, refletida para o estator (Ω);

$\frac{(1-s)}{s}R'_2$: representa a potência mecânica desenvolvida na máquina (Ω).

As perdas do núcleo são omitidas, porém, não são desprezadas. Na verdade, elas são incluídas nas perdas rotacionais.

Figura 5 - Modelo equivalente, por fase, do motor de indução, recomendado pela IEEE



Fonte: SEN (1997).

A partir do modelo anterior, pode ser obtido um equivalente de Thévenin, mostrado na Sendo que:

V_{th}: tensão equivalente de Thévenin (V);

R_{th}: resistência equivalente de Thévenin (Ω);

X_{th}: reatância equivalente de Thévenin (Ω).

Figura 6, no qual:

$$\boldsymbol{V_{th} \cong \frac{X_m}{X_1 + X_m} V_1} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{R_{th} \cong \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m}\right)^2 R_1} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{X_{th} \cong X_1} \tag{9}$$

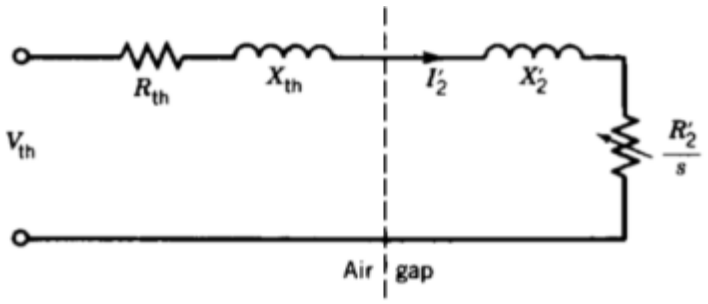
Sendo que:

V_{th}: tensão equivalente de Thévenin (V);

R_{th}: resistência equivalente de Thévenin (Ω);

X_{th}: reatância equivalente de Thévenin (Ω).

Figura 6 - Circuito equivalente de Thévenin de uma fase motor de indução



Fonte: SEN (1997).

Além disso, sabe-se que:

$$\boldsymbol{P_{mec} = T_{mec} \times \omega_{mec} = I_2{}^2 \frac{R_2}{s}(1 - s)} \tag{10}$$

Onde:

P_{mec}: potência mecânica desenvolvida por fase (W).

T_{mec}: torque mecânico desenvolvido por fase (N.m).

ω_{mec}: velocidade angular do rotor (rad/s).

Utilizando o circuito equivalente de Thèvenin, a partir das equações (7), (8), (9) e (10), chega-se ao seguinte resultado:

$$\boldsymbol{T_{mec} = \frac{1}{\omega_s} \frac{V_{th}{}^2}{(R_{th} + R'_2/s)^2 + (X_{th} + X'_2)^2} \frac{R'_2}{s}} \tag{11}$$

4 Frenagem

Durante a frenagem, a máquina elétrica tem o seu modo de funcionamento alterado de motor para gerador, conforme já visto e apresentado na Figura 4. Obviamente, quando está funcionando como motor elétrico, a máquina encontra-se girando. Ao se desligar a alimentação da máquina, a inércia da rotação faz com que a energia cinética e potencial existente sirvam de máquina primária, fazendo com que ela passe a funcionar como gerador. Nesta forma de funcionamento, o torque produzido será contrário à direção do movimento da máquina (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2002).

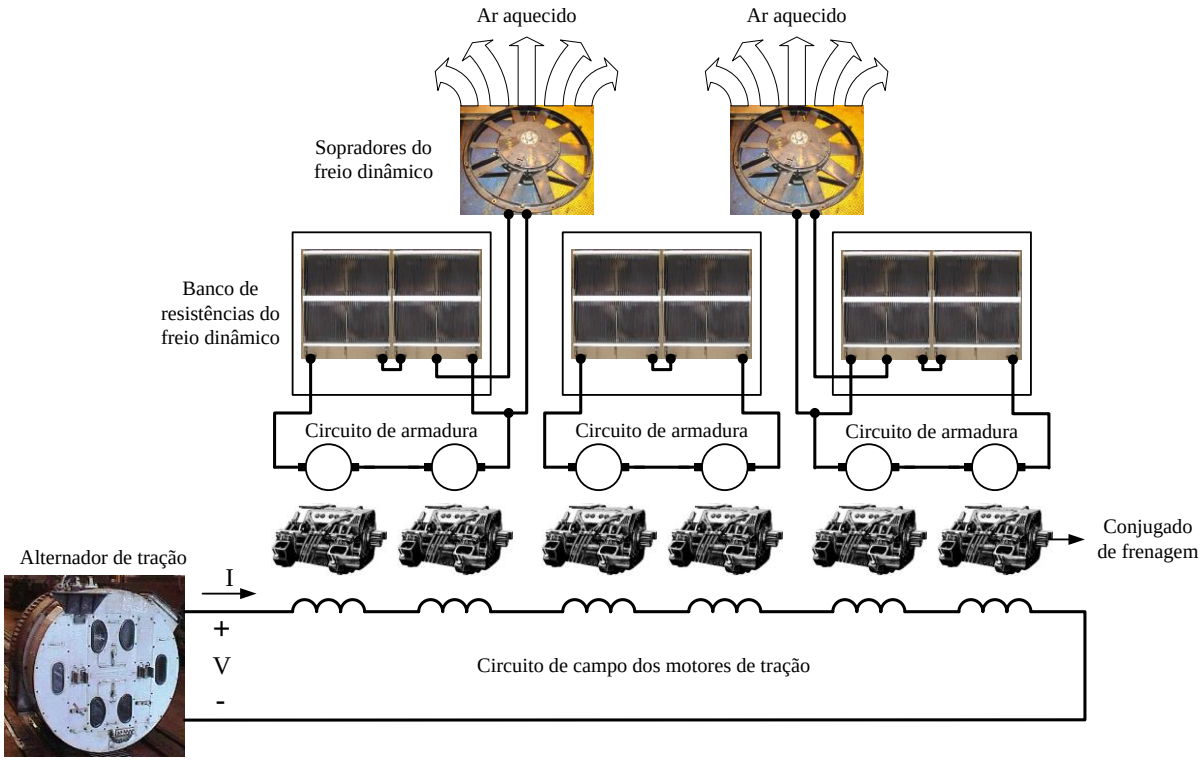
4.1 Frenagem dinâmica

A frenagem dinâmica consiste na dissipação da energia que o motor gera durante a frenagem através de resistências. Esta energia é totalmente dissipada na forma de calor, não possuindo uso prático nenhum.

Este tipo de frenagem é atualmente utilizado nas locomotivas da VALE S.A., uma vez que na operação delas, faz-se necessária uma frenagem elétrica com possibilidade do controle da força da frenagem em certas faixas, o que possibilita o controle da velocidade que a máquina atingirá. Porém, conforme já dito, nesta frenagem há um desperdício de energia.

Na Figura 7 tem-se um esquema de ligação dos motores de uma locomotiva durante a frenagem. A excitação é separada e alimentada pelo gerador, enquanto os motores são ligados a resistências com refrigeração forçada. Na Figura 7 está exemplificada a ligação das armaduras em dupla.

Figura 7 - Circuito de freio dinâmico em motor CC



Fonte: Borba (2009)

4.2 Frenagem regenerativa

O termo regenerativo aqui utilizado significa que a energia produzida durante a frenagem será devolvida a fonte ou, no caso objeto deste estudo, armazenada para uso posterior. Há de se estudar as formas de armazenamento desta energia, o que será feito neste trabalho.

Cada tipo de motor apresenta características próprias durante a frenagem, conforme será aqui demonstrado.

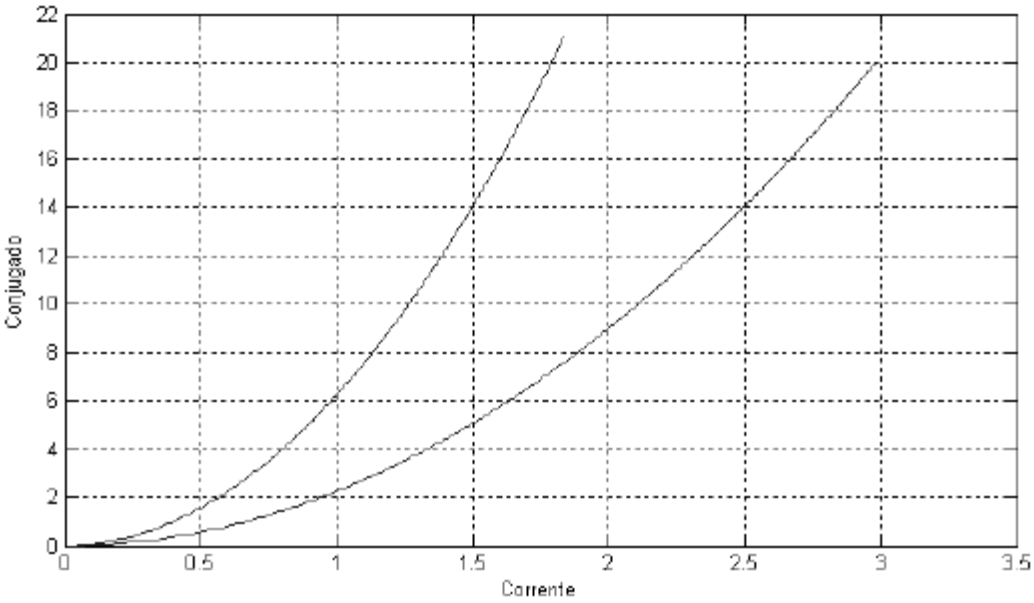
4.2.1 Motores CC na frenagem

Durante a frenagem o motor é ligado de forma independente, com a excitação de campo separada da armadura. Isso permite o controle de fluxo e da tensão gerada na armadura, e, portanto a potência fornecida pela sua ação como gerador.

Funcionando como motor, à medida que a locomotiva entra na região inclinada, seu torque será maior que o atrito com os trilhos, causando uma aceleração a não ser que o ponto de operação da locomotiva seja ajustado, diminuindo a corrente de alimentação. No Gráfico 1

está a relação do conjugado com a corrente, para dois motores com constantes diferentes, considerando que a velocidade seja mantida constante.

Gráfico 1- Relação conjugado x corrente em dois motores CC diferentes



Fonte: FITZGERALD, (2002).

Idealmente, se fosse possível o controle contínuo da corrente, existiria um ponto onde o torque se anularia. A mudança de motor para gerador seria feita nesse ponto. A partir daí o campo do motor seria alimentado pelo gerador e a armadura seria ligada aos dispositivos de armazenamento.

4.2.2 Frenagem regenerativa em motor de indução

Quando um motor de indução gira a uma velocidade maior que a velocidade síncrona, a velocidade relativa entre o campo girante e o rotor é negativa. Isso faz com que a tensão e a corrente induzida no rotor tenham direções opostas àquelas da operação motora, e, consequentemente, o mesmo ocorre com a corrente do estator. Dessa forma a potência passa a fluir do motor para a fonte, e a máquina passa a funcionar como um gerador de indução, tendo escorregamento negativo (DUBEY, 2001).

Este método é bastante explorado no assunto de controle de velocidade de motores por controle de tensão e frequência, utilizando inversores.

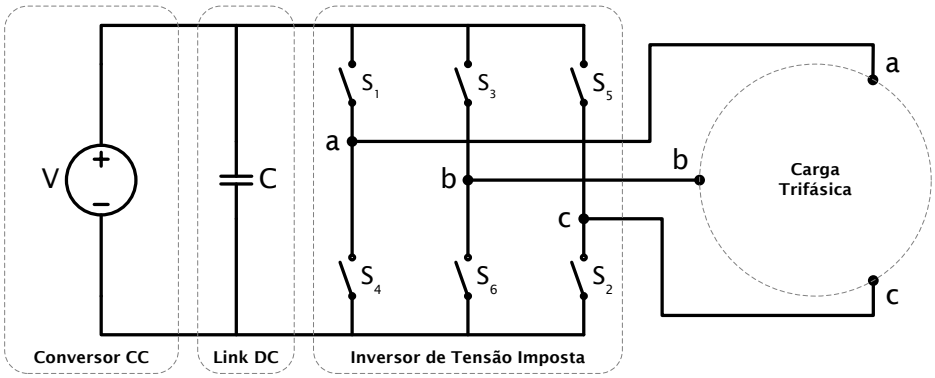
4.3 Inversores

4.3.1 Princípio de funcionamento

Para realizar frenagens regenerativas em cargas ativas, é necessário fazer um controle fino de velocidade. Isso significa que, para qualquer técnica de recuperação de energia a ser analisada, é imprescindível que haja um inversor no processo.

O inversor é um conversor estático de frequência variável constituído de um inversor de ordem de fases acoplado a um conversor de corrente contínua através de um circuito intermediário. O inversor de tensão imposta possui tensão de entrada constante, independente dos eventos que possam ocorrer no inversor, ou seja, no tempo de um ciclo da onda CA de saída, a variação de tensão na entrada do inversor é desprezível. Na prática, o inversor é alimentado por um conversor de corrente contínua através do *link DC*, que é constituído por um capacitor de capacitância elevada a fim de evitar variações rápidas de tensão na entrada. A Figura 8 mostra um inversor de tensão imposta trifásico em ponte alimentando uma carga trifásica, onde as chaves estáticas do inversor estão representadas por contatos elétricos e seus circuitos de comutação foram omitidos (BORBA, 2013).

Figura 8 - Circuito básico de um inversor de tensão imposta trifásico em ponte



Fonte: BORBA (2013).

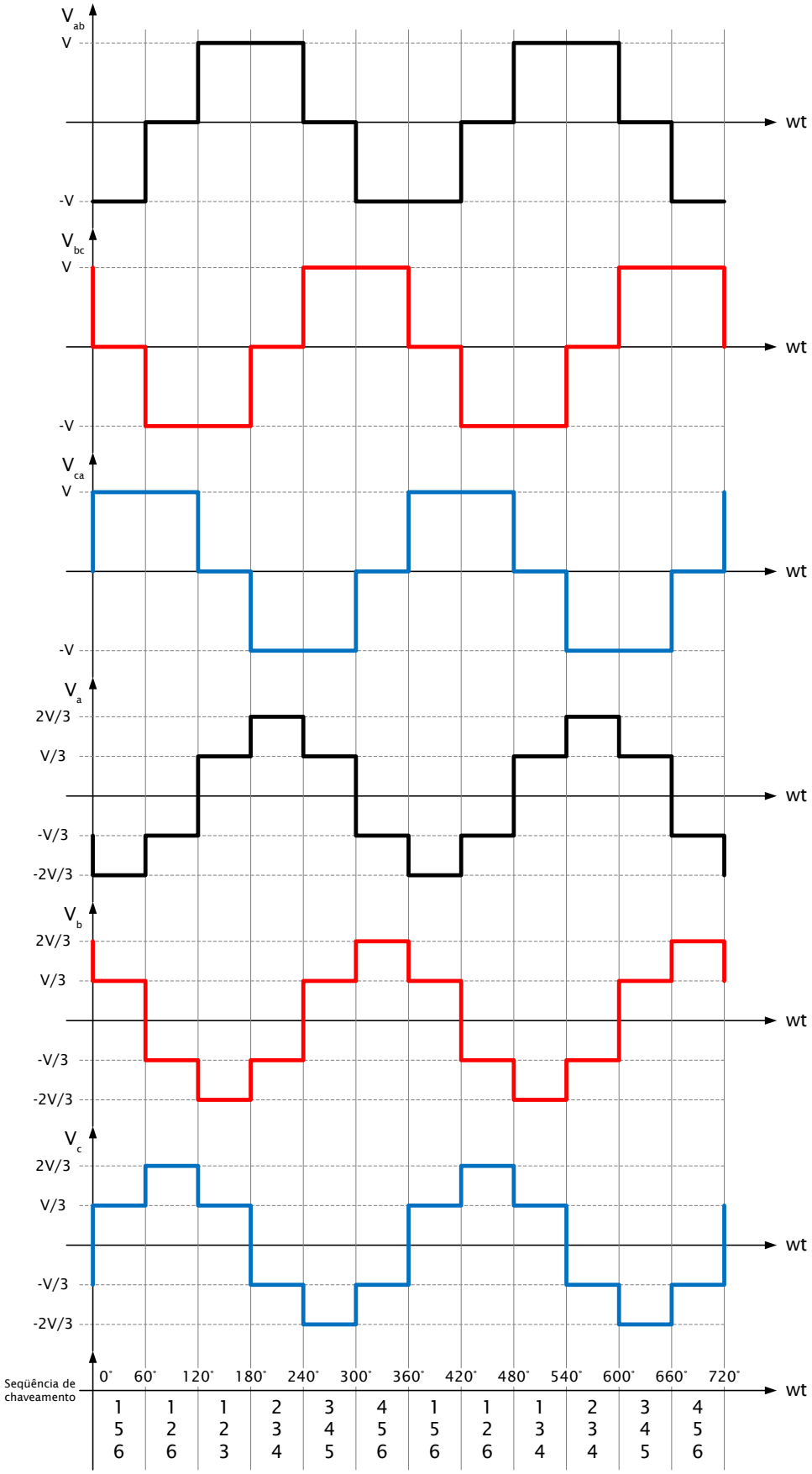
4.3.2 Modo de comando das chaves estáticas

As chaves estáticas do inversor devem ser acionadas de modo que três chaves fiquem ligadas em um mesmo período, pois assim evita-se harmônicos ímpares múltiplos de 3 na onda da tensão de saída. Isso implica que cada chave conduz durante 180° do ciclo de tensão de saída. Naturalmente, não é permitido que chaves que estão conduzindo simultaneamente pertençam

a um mesmo braço do circuito em ponte, uma vez que isso produziria um curto circuito nos terminais do conversor CC.

Nessas condições, diz-se que o inversor opera com tensões de linha em onda quase quadrada (Figura 9), cuja frequência pode ser variada modificando-se o período com que ocorrem os acionamentos das chaves (BORBA, 2013).

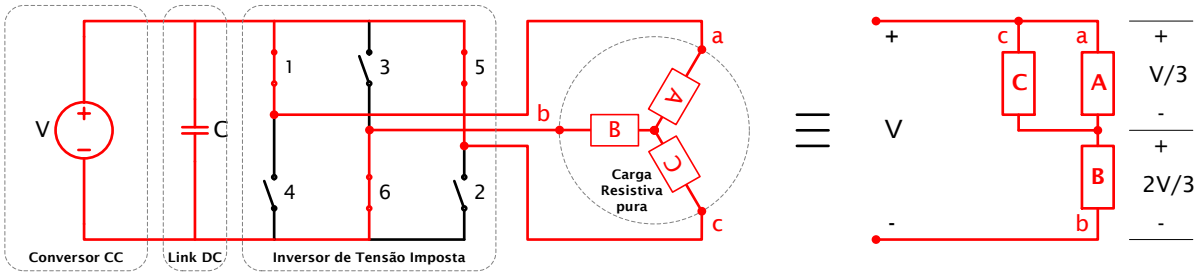
Figura 9 - Formas de onda das tensões de linha e de fase na carga em estrela



Fonte: BORBA (2013).

Essas formas de onda podem ser facilmente verificadas analisando as tensões estabelecidas nos circuitos equivalentes em cada uma das seis etapas de condução das chaves. Por exemplo, quando as chaves 3, 4 e 5 estão conduzindo, de acordo com a figura 8, nota-se que $V_{ab} = -V$, $V_{bc} = 0$ e $V_{ca} = V$. Esses valores correspondem ao primeiro intervalo de tempo da Figura 10.

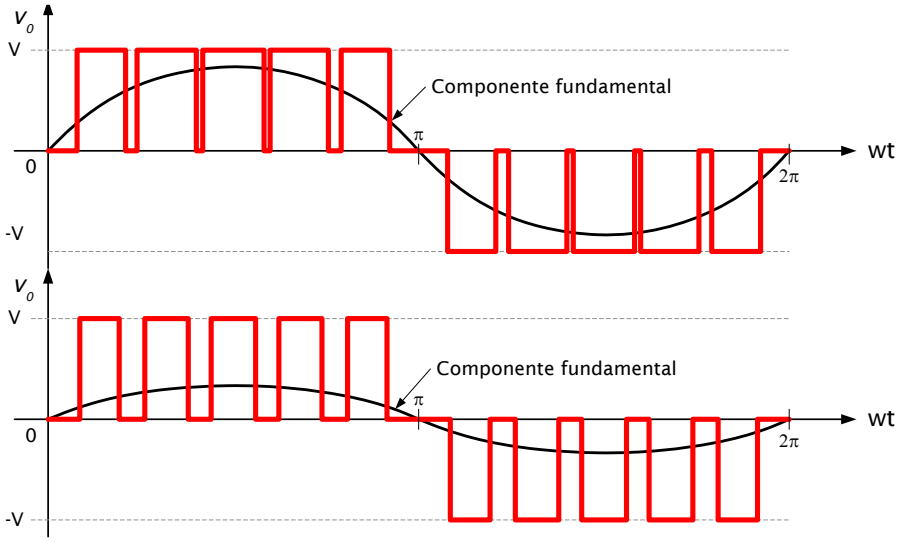
Figura 10 - Sequência de ligação das chaves à uma carga em estrela



Fonte: BORBA (2013).

Entretanto, o índice dos harmônicos presentes pode ser significantemente reduzido recortando-se com diversos pulsos cada meio ciclo da tensão v_0. Além disso, é possível melhorar a forma de onda recortada variando-se os períodos de condução e bloqueio. Variando-se a largura de cada pulso, a onda da tensão resultante ou fundamental da onda pode ser modulada, de maneira que quanto maior a largura dos pulsos, maior é a amplitude da componente fundamental da onda de tensão de saída, como mostra a Figura 11. Essa técnica de controle é conhecida como PWM - *Pulse Width Modulation* (BORBA, 2013).

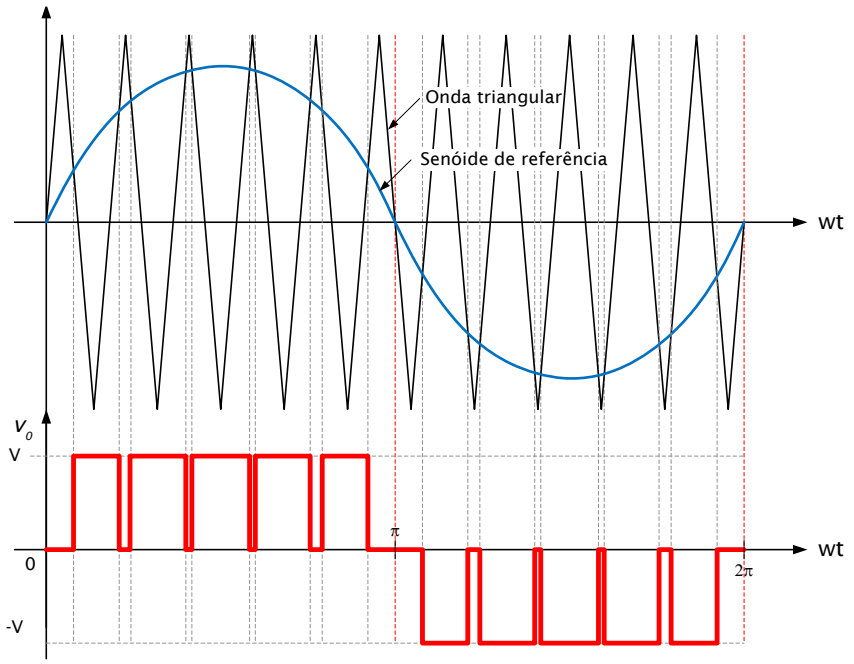
Figura 11 - Forma de onda modulada por largura de pulso



Fonte: BORBA (2013).

Um método que pode ser usado para determinar os instantes de disparo e de bloqueio das chaves estáticas do inversor consiste em gerar uma senóide de referência v_r, que possui a mesma frequência da tensão de saída v_0 desejada, e então compará-la com uma onda triangular v_t de frequência mais elevada, dentro do circuito de controle, como mostra a Figura 12.

Figura 12 - Formação dos instantes de disparo para onda modulada por 5 pulsos



Fonte: BORBA (2013).

A variação da amplitude de v_r ou de v_t permite regular a amplitude da fundamental da tensão de saída do inversor v_0. Observa-se que, para que a tensão sobre a carga do inversor seja mais próxima de uma senóide, é necessária a utilização de um filtro na saída do inversor, eliminando-se assim as harmônicas da tensão v_o. O aumento da frequência da forma de onda triangular V_t aumenta o número de pulsos da tensão de saída v_0. A este número de pulsos está ligado o conteúdo de harmônicas da tensão v_0. Ou seja, com o aumento do número de pulsos, as harmônicas de v_o vão para uma faixa de freqüência de ordem mais elevada, distanciando-se da frequência do termo fundamental. Isto significa que, pelo fato de existir um maior número de pulsos na tensão v_0, fica mais fácil se obter uma onda senoidal. Ou seja, por ter que filtrar harmônicas com frequências mais elevadas, pode-se ganhar quanto aos custos, volume e peso dos elementos passivos que constituem os filtros. Logo, é de se concluir que o ideal seria aumentar infinitamente a frequência da onda triangular, para se obter um número

infinito de pulsos na tensão de saída v_0 antes de uma filtragem. Na prática, porém, este número de pulsos é limitado pela máxima frequência de comutação que podem suportar os semicondutores que constituem os interruptores, além das limitações quantos aos tempos mínimos de condução e de bloqueio passíveis de serem efetivamente realizados. (PERIN, 2013)

A frequência de chaveamento é estabelecida pela relação entre a frequência da onda triangular e a frequência da onda senoidal de referência, conhecida como índice de modulação (m), dada pela Equação (8).

$$\boldsymbol{m = \frac{frequência\ da\ triangular}{frequência\ da\ senóide}} \tag{8}$$

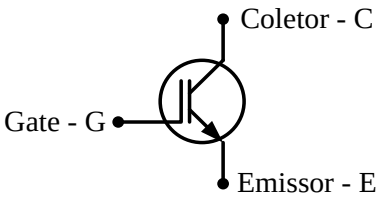
Definidos na unidade do microprocessador, os tempos de condução e corte das chaves estáticas podem ser mínimos, assim como a otimização da amplitude da tensão para o motor (carga), a partida suave e os tempos de aceleração e frenagem.

4.3.3 IGBT

Os IGBT's são dispositivos semicondutores de potência usados como dispositivos de chaveamento, isto é, como uma chave aberta ou fechada. Eles são capazes de desempenhar a função das chaves estáticas representadas no circuito do inversor de tensão imposta.

A fim de vencer as limitações do BJT e do MOSFET, realizou-se uma integração das características de atuação rápida e de alta capacidade de corrente de coletor do BJT com a característica de controle por tensão aplicado entre o gate e a fonte do MOSFET, num único dispositivo híbrido que se denomina Transistor Bipolar de Porta Isolada – IGBT, cujo símbolo pode ser visto na Figura 13. Em termos mais simples, as características coletor-emissor são similares àquelas dos transistores bipolares, mas as formas de comando são as do MOSFET (BORBA, 2013).

Figura 13 - Modelo do IGBT



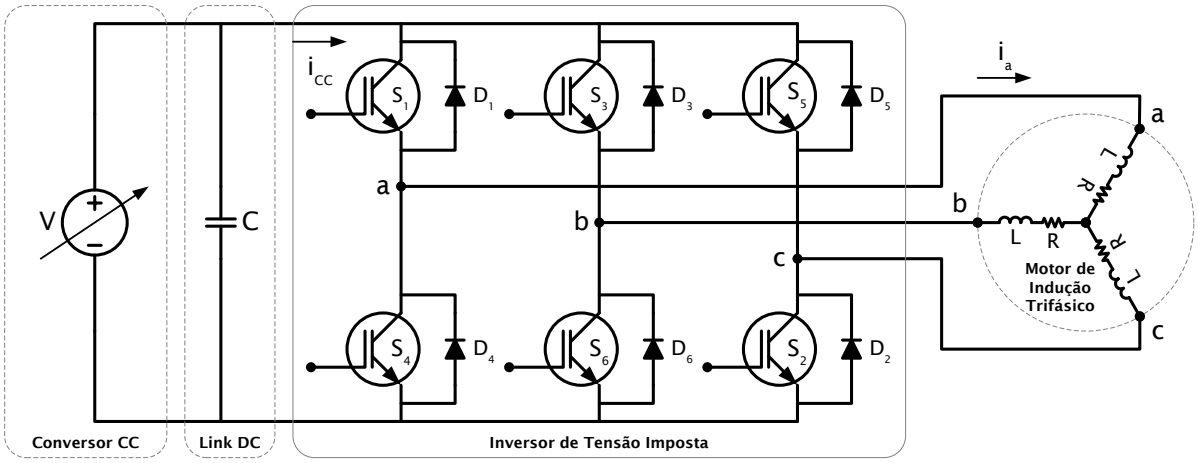
Fonte: BORBA (2013).

As baixas perdas produzidas no IGBT garantem ao circuito uma elevada eficiência. Para aplicações que envolvem a produção de uma tensão alternada a partir de uma fonte de tensão contínua, o requisito é uma taxa de chaveamento rápida, sem a necessidade de bloquear tensões reversas. A utilização desse dispositivo em inversores trifásicos exige a presença de diodos de roda livre, conectados reversamente entre o coletor e o emissor (BORBA, 2013).

4.3.4 Motor de indução trifásico alimentado por um inversor

A habilidade para construir uma fonte de tensão alternada trifásica de frequência controlada imediatamente apresenta a possibilidade de acionamentos com velocidade variável empregando motores de indução com gaiola de esquilo. A única ressalva que deve ser feita a esta indicação é que não somente a frequência, mas também a tensão no Link DC deve ser controlada. Isto é devido ao fato de que, se a frequência da excitação de um motor de indução for reduzida sem uma redução da tensão aplicada, o circuito magnético da máquina entra em saturação. Isto pode ser evitado se a relação entre a tensão e a frequência for mantida constante sobre a faixa de velocidade a ser empregada. O uso de IGBT em tal aplicação (Figura 14) permite a operação com uma ampla faixa de frequência da tensão de saída (BORBA, 2013).

Figura 14 - Esquemático da ligação de um motor de indução trifásico em estrela a um inversor de tensão imposta



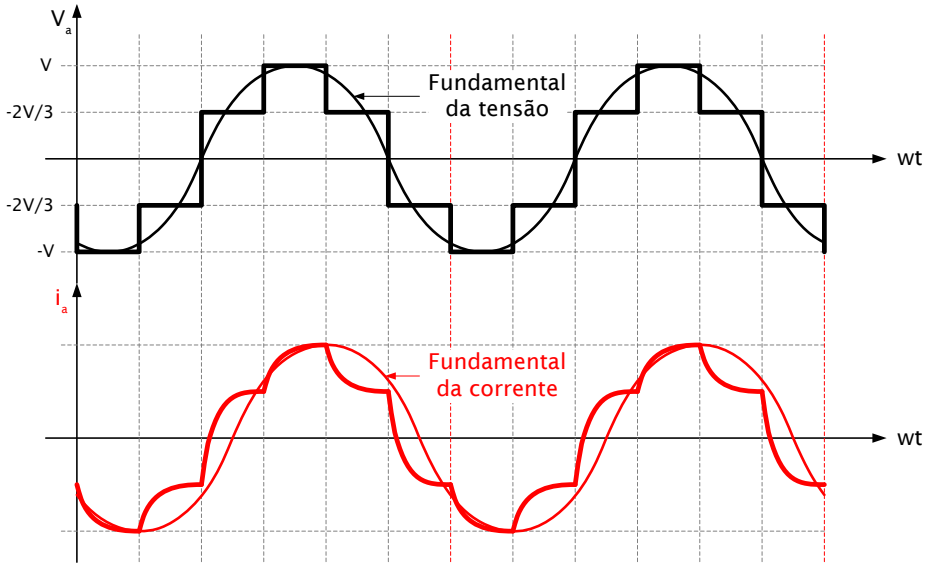
Fonte: BORBA (2013).

Ou seja, a utilização de um inversor de frequência variável permite um amplo controle do motor nos quatro quadrantes, isto é, em todas as combinações de velocidade e conjugado da operação como motor e gerador. Isso implica que o escorregamento do motor de indução está diretamente relacionado à frequência de operação do inversor (BORBA 2013).

Para manter as condições de fluxo magnético ótimo no motor de indução, a relação tensão-frequência tem de ser mantida constante, de modo que qualquer variação na frequência de operação do inversor tem de ser acompanhada por uma variação da tensão aplicada pelo conversor CC da Figura 14. Em função disso, o conversor CC é mostrado como uma fonte variável de tensão para enfatizar que a tensão de entrada do inversor pode variar para atender os requerimentos de velocidade do motor (BORBA 2013).

Os componentes reativos da corrente do motor de indução circulam dentro do inversor, e não afetam a corrente média na entrada do mesmo. O conjugado desenvolvido no eixo do motor de indução está diretamente relacionado com a corrente média de entrada do inversor, de modo que o controle da corrente na entrada do inversor controla diretamente o conjugado do motor (BORBA, 2013). A Figura 15 mostra a forma de onda da tensão e da corrente desenvolvida na fase “a” do motor de indução, onde se observa que a corrente está atrasada em relação a sua tensão de fase correspondente e apresenta nível de harmônicos de baixa ordem bastante elevado.

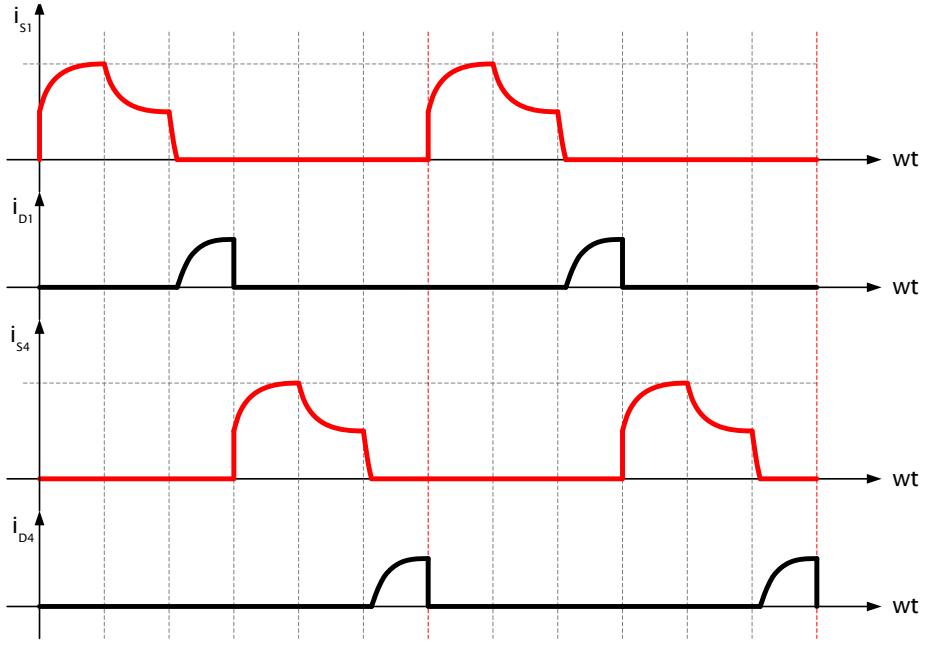
Figura 15 - Formas de onda da tensão e da corrente na fase “a”



Fonte: BORBA (2013).

Na Figura 16 estão representadas as correntes nos IGBT’s e nos diodos de roda livre do módulo de fase “a”. Pode-se observar na mesma Figura que o período de condução nos IGBT’s é maior do que nos diodos de roda livre. Isso se deve ao fato de que o motor de indução está operando como motor, e não como gerador, sendo o fluxo de potência do conversor CC para o motor de indução.

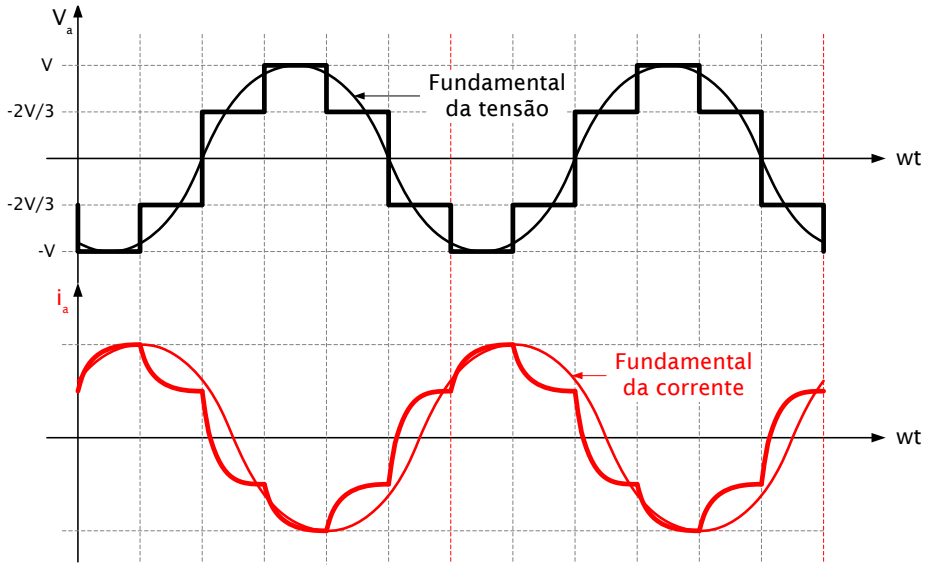
Figura 16 - Formas de onda das correntes nos diodos, D_1 e D_4, e nas chaves estáticas, S_1 e S_4, supondo correntes senoidais



Fonte: BORBA (2013).

Durante a frenagem regenerativa, o sentido do fluxo de potência através do inversor é invertido e a potência gerada pelo motor de indução é entregue ao *link DC* através de um retificador trifásico de onda completa em ponte. Na Figura 17, estão representadas as correntes nos IGBT's e nos diodos de roda livre do módulo de fase "a". É importante notar que, neste caso, a corrente está adiantada em relação à tensão.

Figura 17 – Formas de onda da tensão e da corrente na fase "a" (gerador)

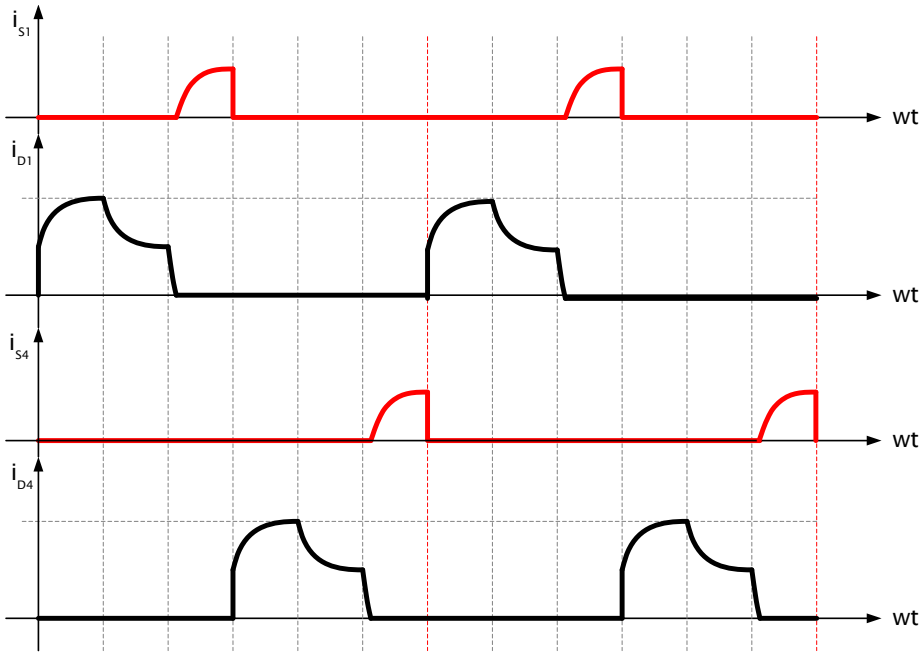


Fonte: BORBA (2013).

Neste caso, os diodos conduzem por um período maior que as chaves estáticas, comprovando que a potência está sendo transferida do motor para o *link DC* através do retificador, como pode ser visto na Figura 18.

Neste caso, os diodos conduzem por um período maior que as chaves estáticas, comprovando que a potência está sendo transferida do motor para o link DC através do retificador, como pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Formas de onda das correntes nos diodos, D1 e D4, e nas chaves estáticas, S1 e S4, supondo correntes senoidais (gerador)



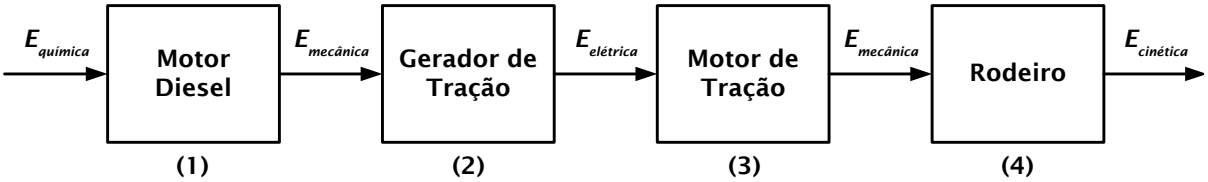
Fonte: BORBA (2013).

4.4 Transferência de energia em uma locomotiva

Para que a energia de frenagem seja recuperada durante o funcionamento como freio regenerativo, deve haver a atuação de dispositivos apropriados que controlem a corrente e tensões geradas.

O esquema básico de transferência de energia da queima do combustível até a criação de movimento é dado pela Figura 19.

Figura 19- Transferência de energia em uma locomotiva

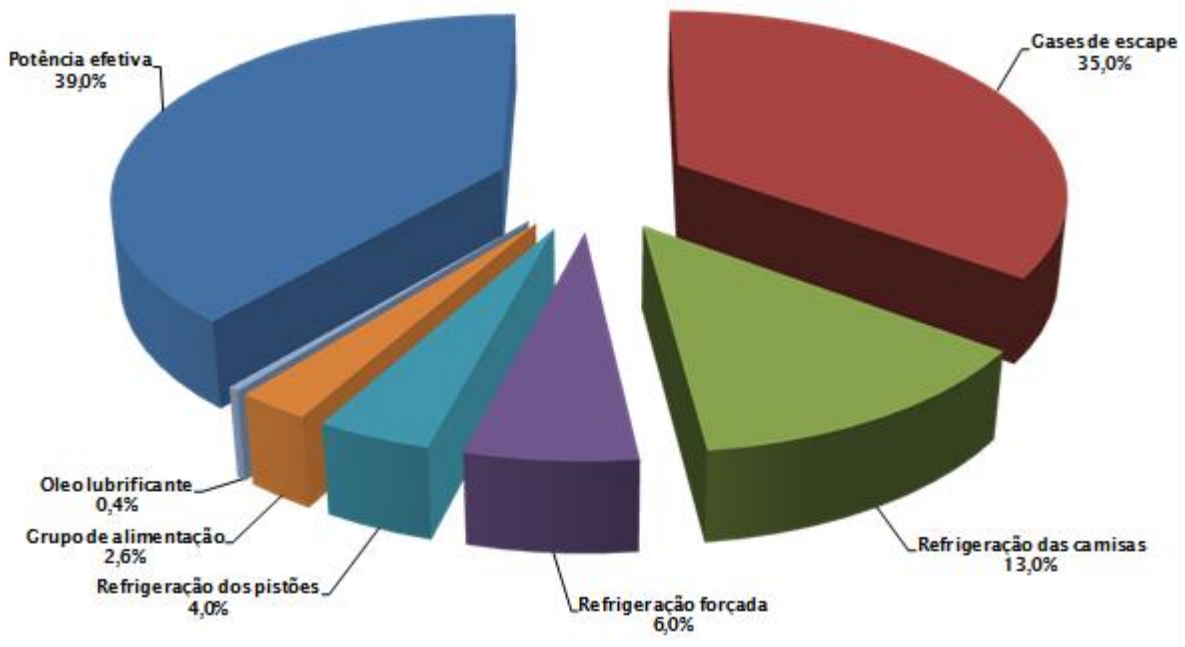


Fonte: BORBA, (2009).

Nenhuma das etapas pode fornecer a energia de entrada na sua saída totalmente.

No ponto (1) da Figura 19, acontece a transformação da energia química contida no combustível em energia mecânica de rotação no eixo motor diesel. Boa parte dessa energia química não é aproveitada. O aproveitamento em trabalho útil é dado pelo gráfico 2, um diagrama de fluxo térmico para um motor diesel de grande cilindrada com turbo alimentador acionado pelos gases de escape e refrigeração forçada.

Gráfico 2- Diagrama de fluxo térmico do motor diesel



Fonte: BORBA, (2009)

Na etapa (2), acontece a transformação da energia mecânica de rotação no eixo motor diesel em energia elétrica pelo gerador de tração, com aproximadamente 90% de rendimento, sendo que nela também está incluída a retificação. Para cada estágio de um bloco inversor ou conversor *Chopper*, tem-se um rendimento de 95%.

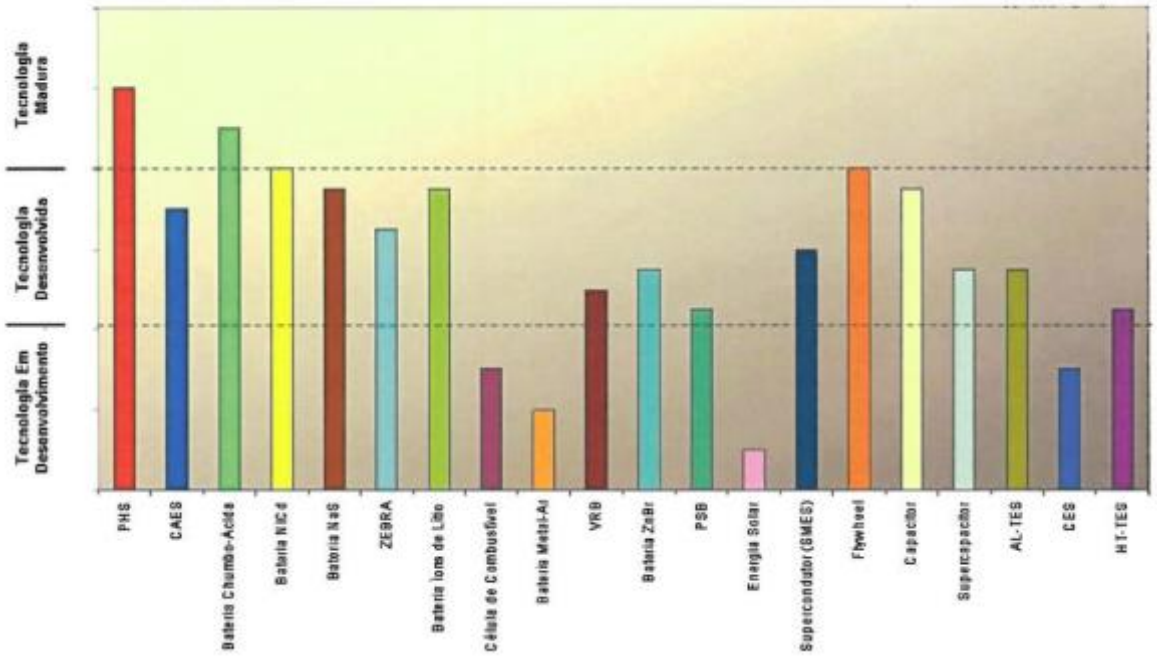
Os componentes para a frenagem diferem dependendo do motor usado.

5 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA GERAL

Para analisar a viabilidade de reutilização de energia produzida durante a frenagem pelas locomotivas empregadas pela empresa VALE S.A., é de fundamental importância estudar as tecnologias existentes de sistemas de armazenamento de energia para locomotivas diesel/elétricas híbridas.

As tecnologias de armazenamento de energia para aplicações estacionárias e tracionarias podem ser vistas na Figura 20. Conforme se observa, as diversas tecnologias estão identificadas quanto ao estágio de desenvolvimento que se encontram, sendo divididas em tecnologias em desenvolvimento, tecnologias desenvolvidas e tecnologias maduras.

Figura 20 - Estágio das tecnologias de armazenamento de energia



Fonte: Tuzuki (2012)

Em relação às tecnologias maduras, têm-se: a) PHS – sistema de geração de energia com água bombeada (hidroelétrica); e b) bateria chumbo-ácida. Há também as tecnologias em transição de desenvolvidas para maduras, tais como: NiCd (baterias de níquel cádimo) e o *Flywheel.*

Como tecnologias desenvolvidas, temos: a) CAES – sistema de geração de energia com ar comprimido; b) NaS – bateria sódio-ácida; c) ZEBRA – bateria de alta temperatura (operação a 260 – 360° C); d) Li-Ion – baterias de ions de lítio; e) VRB – bateria de fluxo; f) ZnBr –

bateria híbrida de zinco-bromo; g) PSB – bateria; h) SMES – armazenamento de energia magnética com supercondutor; h) capacitor; i) super capacitor; AL-TES – sistema de armazenamento térmico; e j) HT-TES – sistema de armazenamento térmico.

Por fim, se apresentam como tecnologias em desenvolvimento: a) células de combustível; b) bateria Meral-Ar; c) energia Solar; e c) CES – s.

5.1 Armazenamento de energia para aplicação tracionaria

Como o objeto deste estudo são as locomotivas da VALE, serão focadas as tecnologias de armazenamento de energia para aplicação tracionaria. Este tipo de armazenamento pode ser dividido em duas categorias principais: a) alta potência com descarga rápida; e b) alta energia com descarga estendida (TUZUKI, 2012).

São exemplos de dispositivos de alta potência com descarga rápida os supercapacitores, os *flywheels* e outros tipos de baterias, como as aquosas de níquel e as de íons de lítio. Estes dispositivos fornecem descargas curtas e rápidas para a partida e a aceleração do veículo. Eles não fornecem descarga contínua para o transporte eletrificado, contudo podem melhorar drasticamente a eficiência energética, como demonstra a atual geração de veículos elétricos híbridos.

Para aplicações de Alta Energia com descarga estendida, onde a energia armazenada é efetivamente utilizada para proporcionar uma significativa fração da energia tracionaria, os esforços da pesquisa e desenvolvimento estão atualmente focados em duas tecnologias: de hidrogênio e de baterias.

A principal alternativa para o armazenamento de energia em veículos híbridos são as baterias de íons de lítio (Li-Ion). Atualmente pesquisas e esforços no desenvolvimento estão focados principalmente na redução de custos e aumento da densidade de energia, bem como a segurança da tecnologia de íons de lítio. Tecnologias anteriormente implantadas, tais como o chumbo-ácido utilizado nos primeiros veículos elétricos e o hidreto de metal de níquel, usado nos veículos híbridos atuais, não são consideradas tecnologias prováveis nos futuros veículos elétricos devido aos limites fundamentais da densidade de energia. Existem preocupações sobre a disponibilidade em larga escala de vários metais utilizados nas baterias de íons de lítio, bem como a sua concentração em poucas regiões geográficas.

Considerando um longo prazo, existem as baterias de lition-metal e metal-ar, que estão atualmente na fase de pesquisa e desenvolvimento, com um potencial de densidade de energia muito maior do que o disponível nas baterias atualmente existentes (TUZUKI, 2012).

5.2 Armazenamento de Energia Eletroquímica

Os pesquisadores classificam os dispositivos de Armazenamento de Energia Eletroquímica (EES), em termos de potência, muitas vezes normalizados em relação ao peso, tal como quilowatts por quilograma (kW/kg), ou em relação ao volume, tal como quilowatts por litro (kW/l). Esta normalização permite comparações de desempenho, e o tempo de descarga em que os dispositivos possam sustentar esta potência. A energia que o dispositivo armazena é o produto da potência e o tempo de descarga.

Nesta seção, serão analisados os principais dispositivos de armazenamento de energia eletroquímica.

5.2.1 Baterias Chumbo-Ácidas

5.2.1.1 Descrição da Tecnologia

A tecnologia das baterias chumbo-ácidas é a mais madura de todos os sistemas EES que existem atualmente e oferece uma solução imediata, enquanto outros sistemas EES continuam a ser desenvolvidos. As baterias chumbo-ácidas são particularmente atraentes para a implantação antecipada devido ao seu custo relativamente baixo, facilidade de fabricação, cinética de rápida reação eletroquímica, e bom ciclo de vida em condições controladas.

5.2.1.2 Situação da Tecnologia

Apesar de a bateria chumbo-ácida ser comercialmente a tecnologia recarregável mais madura no mundo, ela está passando por um período de redesenvolvimento em função de um interesse renovado.

A energia específica teórica máxima (a energia por unidade de massa) de uma bateria de chumbo-ácida totalmente ativa é 171 Wh/kg. No entanto estas baterias perdem muito deste potencial devido à necessidade de conectores internos e grades para suportar estruturalmente

o material de chumbo, que é muito pesado. Desta forma, baterias chumbo-ácidas convencionais conseguem tipicamente 20-30 Wh/kg.

Em muitas aplicações, as baterias chumbo-ácidas com válvulas reguladoras (VRLA), também conhecidas como baterias chumbo-ácidas seladas, já substituem as baterias chumbo-ácidas tradicionais. Isto porque, enquanto as tradicionais exigem alta manutenção, as seladas são livres de manutenção.

A vida útil das baterias de chumbo-ácidas varia significativamente dependendo da aplicação, da taxa de descarga e do número de ciclos de descarga profunda. Um sistema com baterias chumbo-ácidas de 1 MW /1,5 MWh, da GNB Industrial Power e EXIDE funciona há 12 anos em um local remoto numa ilha no Alasca. Nesse projeto as baterias mostraram pouquíssima degradação (TUZUKI, 2012).

5.2.1.3 Limitações e oportunidades da Tecnologia

As tradicionais baterias chumbo-ácidas apresentam um ciclo de vida curto e um custo significativo de manutenção. Fabricantes têm buscado melhorias no sistema chumbo-ácido usando eletrodos de carbono. Estes eletrodos aumentam a potência ao reduzir as reações químicas prejudiciais e indesejadas no interior das células da bateria. Além disto, a alteração do material do eletrólito vem surtindo bons resultado na melhoria do desempenho das baterias.

As questões chaves para a implantação de baterias de chumbo-ácidas são:

- Necessidade de gerenciamento térmico cuidadoso, incluindo uma alta probabilidade de arrefecimento ativo;
- Necessidade de projeto personalizado para o sistema de armazenamento usando baterias chumbo-ácidas.

5.2.2 Baterias baseadas em Níquel

5.2.2.1 Descrição da Tecnologia

São baseadas em níquel as baterias de níquel/cádmio (NiCd) e as de hidreto de níquel/metal (NiMH).

A bateria NiCd utiliza hidróxido de óxido de níquel como eletrodo positivo e cádmio metálico como eletrodo negativo. Já a bateria de NiMH usa uma liga contendo hidrogênio para o eletrodo negativo, em vez de cádmio, alterando assim a eletroquímica e aumentando em duas a três vezes a capacidade de armazenamento de energia. As baterias NiMH são mais adequados para aplicações em veículos elétricos híbridos (TUZUKI, 2012).

5.2.2.2 Situação da Tecnologia

As baterias de NiCd são comumente utilizadas em equipamentos eletrônicos portáteis. Se Comparadas com as baterias chumbo-ácidas, as baterias NiCd tem ciclo de vida mais longo, maiores densidades de energia e manutenção mais simples.

Baterias de hidreto de níquel-metal são uma alternativa viável para as baterias NiCd devido ao seu melhor desempenho e benefícios ambientais. Em comparação com as baterias chumbo-ácidas e baterias de NiCd, as baterias de NiMH não contém substâncias tóxicas (cádmio ou chumbo). A densidade de energia das células de NiMH é 25 a 30 % melhor do que as células de NiCd, mas bem abaixo das baterias recarregáveis de íons de lítio.

5.2.2.3 Limitações e oportunidades da tecnologia da bateria de NiCd

Muitos dos avanços em baterias de NiCd foram na arquitetura do dispositivo, utilizando o design "cilindro de gel" que é semelhante as baterias primárias do mesmo tipo. Neste projeto, os fabricantes colocam o material do anodo (eletrodo negativo), aplicam um separador, e colocam o material do catodo (eletrodo positivo). Eles então rolam esta montagem para dentro de um cilindro, levando ao termo "cilindro de gel".

Embora as baterias de NiCd sejam relativamente baratas e bastante confiáveis para uma série de aplicações, especialmente em produtos de consumo, elas enfrentam algumas das mesmas limitações das baterias chumbo-ácidas: a necessidade de grandes volumes, a toxicidade, e a gravidade da auto descarga, um fenômeno em baterias em que as reações químicas internas reduzem a carga armazenada nas baterias sem nenhuma conexão com os eletrodos.

Portanto, enquanto as baterias de NiCd são um substituto potencialmente competitiva para baterias chumbo-ácidas no curto prazo, eles não são uma solução adequada de longo prazo.

5.2.2.4 Limitações e oportunidades da tecnologia da bateria NiMH

As baterias de NiMH, assim como as baterias de NiCd, também sofrem de severa auto descarga, que as tornam ineficazes para armazenamento de energia a longo prazo. Como resultado, as baterias de NiMH representam outra possibilidade para aplicações intermediárias, mas não para soluções de longo prazo.

5.2.3 Baterias baseadas em Íons de Lítio

5.2.3.1 Descrição da tecnologia

O Lítio (Li) é um material atraente para as baterias por ter um alto potencial de redução física e ser leve. Entretanto, ele é também altamente reativo com a água e o oxigénio, o que leva à necessidade de as baterias de Lítio utilizarem eletrólitos não-aquosos, tais como hexafluorofosfato de lítio (LiPF6), tetrafluoroborato de lítio (LiBF4), e perclorato de lítio (LiCI04), que são dissolvidos num solvente orgânico em vez da água (TUZUKI, 2012). Como estes eletrólitos a base de lítio podem reagir explosivamente com a água, as baterias de Li têm que permanecer totalmente seladas em relação ao meio ambiente, durante a fabricação, o uso e o descarte.

Nestas baterias, os íons de lítio se movem do eletrodo negativo para o eletrodo positivo durante a descarga, e então retornam para o eletrodo negativo durante a carga. Numa célula de íons de lítio convencional, os fabricantes produzem o eletrodo negativo de carbono (geralmente de grafite), enquanto que o eletrodo positivo é um óxido metálico de transição que é submetido a reações de oxidação-redução ou redução-oxidação (redox), que são as reações fundamentais de transferência de elétrons entre as espécies nas células eletroquímicas. O eletrólito que separa os dois eletrodos é um sal de Lítio dissolvido em um solvente orgânico.

5.2.3.2 Situação da Tecnologia

As baterias recarregáveis de íons de lítio são comumente encontradas em produtos eletrônicos de consumo, que compõem a maior parte do volume de produção em todo o mundo. Já comercial e madura para aplicações de consumo eletrônicos, de veículos eléctricos híbridos plug-in (PHEV) e veículos elétricos (EV), os fabricantes estão posicionando as baterias de íons de lítio para ser a plataforma de tecnologia de ponta de seus produtos, que usará um

formato maior de células e pacotes com capacidades de 15 a 20 kWh para os PHEV's e até 50 kWh para todos os veículos elétricos (TUZUKI, 2012).

Em comparação com a longa história de baterias chumbo-ácidas, a tecnologia de baterias de íons de lítio é relativamente nova. Existem diversas químicas de íons de lítio, cada uma com características de potência específica versus energia específica. Baterias de íons de lítio de maior capacidade são atualmente objeto de intensa pesquisa, desenvolvimento e avaliação da durabilidade para uso em veículos elétricos híbridos. No entanto, estas células estão disponíveis apenas em quantidades limitadas, para atender a produção de PHEV's e EV's. No entanto, os fabricantes de baterias de íons de lítio estão aumentando as suas capacidades de produção global para atender às necessidades futuras. Analistas antecipam que a escala de produção de baterias de íons de lítio deva atingir algo em torno de 35 GWh em 2015, para resultar em um excedente de capacidade de oferta.

A alta densidade de energia e peso relativamente baixo do sistema com baterias de Íons de lítio, a torna uma opção atraente para os veículos e outras aplicações onde espaço e peso são importantes. Por ser compacto e o seu ciclo de vida atraente, além de uma elevada eficiência energética que excede 85 a 90%, a tecnologia de baterias de íons de lírio mostra ser muito interessante para o armazenamento de energia de sistemas tracionarios.

5.2.3.3 Limitações e oportunidades da tecnologia da bateria de Íons de Lítio

Melhorias recentes na tecnologia de baterias de íons de lítio foram principalmente na concepção de novas arquiteturas tridimensionais e da utilização de materiais em nano escala. Estas abordagens têm sido utilizadas para melhorar a potência. Para melhorar a energia específica, pesquisas e desenvolvimentos estão acontecendo para substituição de grafite por eletrodos feitos de materiais de menor custo e com maior capacidade. A pesquisa está atualmente avaliando ligas de lítio-metal como um substituto para o eletrodo de carbono. Para o eletrodo positivo, compostos baseados em manganês e compostos à base de fosfatos de metal de lítio mostram-se promissores. Todas estas iniciativas atualmente estão em fase de desenvolvimento (TUZUKI, 2012).

Pesquisas também estão avaliando a substituição das soluções de eletrólitos por alternativas mais seguras e mais confiáveis. Preocupações com o eletrólito padrão atual, uma solução de carbonato $LiFP_6$ orgânica, incluem:

- A estabilidade limitada de tensão, impossibilitando o uso de catodos para tensões mais altas;
- A pressão elevada do vapor e a inflamabilidade;
- A toxicidade do $LiFP_6$.

Os esforços para resolver estas questões incluem:

- Aditivos para se construir uma interface estável de eletrólito sólido e/ou aumentar a sua estabilidade térmica;
- Aditivos redox para proteção contra a sobrecarga;
- Separadores de desligamento para evitar fuga térmica;
- Os sais de Ítio, como lima alternativa para $LiPF_6$, para reduzir a toxicidade. A pesquisa mostra que pode também ser desenvolvido um eletrólito de polímero, permitindo uma membrana condutora de íons de lítio livre de solventes.

5.2.4 Baterias de Fluxo

5.2.4.1 Descrição da tecnologia

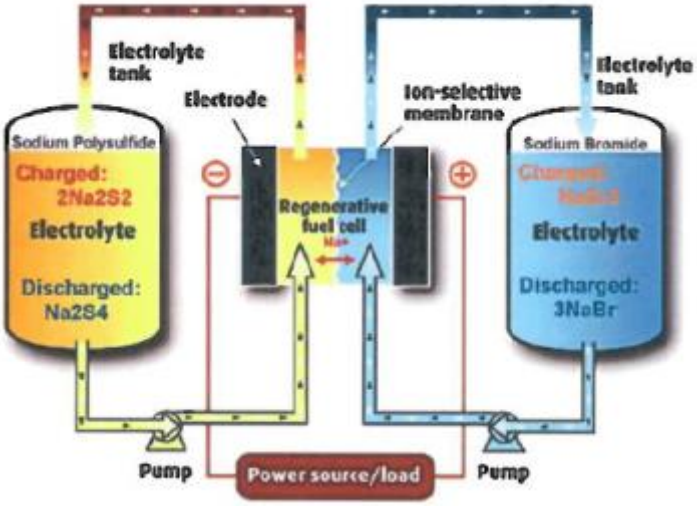
A Bateria de Fluxo é um tipo de bateria recarregável na qual a habilidade de carga é gerada por dois componentes químicos dissolvidos em soluções líquidas, separados por uma membrana.

Construtivamente, a Bateria de Fluxo é uma célula de combustível recarregável na qual o eletrólito contém um ou mais elementos eletroativos dissolvidos e fluindo através de uma célula eletroquímica que reversivelmente converte energia química diretamente em eletricidade. Os eletrólitos adicionais são armazenados externamente, geralmente em tanques e são normalmente bombeados através da célula (ou células), embora versões de alimentação por gravidade também sejam conhecidas.

Em outras palavras, uma bateria de fluxo é similar a uma célula eletroquímica, com a exceção de que a solução iônica (eletrólito) não é armazenada ao redor dos eletrodos e ao invés disto fica armazenada externamente alimentando a célula para gerar eletricidade. O total de quantidade de eletricidade que pode ser gerada depende do tamanho dos tanques de

armazenagem. Um benefício deste conceito é que as células podem ser recarregadas simplesmente abastecendo o conteúdo dos tanques como num veículo a gasolina.

Figura 21- Diagrama da Bateria de Fluxo



Fonte: TUZUKI (2012).

5.2.4.2 Situação da tecnologia

A tecnologia de bateria redox de vanádio é um dos tipos mais maduros de sistemas de baterias de fluxo disponíveis. Baterias de fluxo armazenam a energia como íons carregados em dois tanques separados de eletrólitos, um dos quais aloja eletrólito para a reação do eletrodo positivo, enquanto a outra aloja o eletrólito para a reação do eletrodo negativo. Sistemas redox de vanádio usam um eletrólito comum, que oferece oportunidades potenciais para um maior ciclo de vida. Quando se faz necessário a geração de energia elétrica, o eletrólito flui para uma célula com eletrodos redox, gerando corrente elétrica. A reação eletroquímica pode ser revertida por aplicação de um sobrepotencial, como acontece com as baterias convencionais. Isto permite que o sistema possa descarregar e carregar repetidamente. Como as outras baterias de fluxo, muitas variações da capacidade de potência e armazenamento de energia são possíveis, dependendo do tamanho dos tanques de eletrólitos.

Os fabricantes podem desenvolver sistemas redox de vanádio para fornecer energia para duas horas até mais de oito horas, dependendo da aplicação. Fornecedores de sistemas redox de vanádio estimam um tempo de vida das células de 15 anos ou mais, enquanto o eletrólito pode ter vida útil de mais de 25 anos. Fornecedores de sistemas também dizem ter alcançado a capacidade de ciclagem de 10.000 ou mais ciclos com descarga profunda de 100 %. A escala

física dos sistemas redox de vanádio tende a ser grande, devido ao elevado volume de eletrólito necessário quando dimensionado para projetos de alto megawatt-hora (TUZUKI, 2012).

5.2.4.3 Limitações e oportunidades da tecnologia da bateria de fluxo

A bateria de fluxo pode se tornar uma opção atraente para o armazenamento de energia de sistemas tracionários por causa de sua capacidade de armazenar grandes quantidades de energia, ter um longo ciclo de vida e uma alta eficiência.

No entanto, a tecnologia ainda é jovem, com significativas barreiras de alto custo. Outro problema é que as baterias de fluxo podem sofrer problemas de estabilidade térmica e química nas membranas e eletrólitos, o que pode impactar na faixa de operação e na vida útil. Vazamentos, confiabilidade da bomba, vida útil do selo e da tubulação também são problemas importantes a serem considerados na tecnologia.

Finalmente, o sistema de armazenamento e alimentação dos materiais eletroativos necessita melhorias na robustez e custo. Para resolver estas questões, pesquisas estão acontecendo para conseguir melhorias na membrana, sistemas de monitoramento, novos materiais, novas químicas, e projeto da célula.

A experiência de campo relativamente curto das baterias de fluxo sugere que as reivindicações dos 20 a 30 anos de vida ainda devem ser provadas.

5.2.5 Baterias Beta-Alumina de Sódio

5.2.5.1 Descrição da tecnologia

O sódio (Na) é um ótimo material para baterias porque tem um potencial de redução elevado, é leve, não tóxico, de baixo custo, e relativamente abundante. No entanto, ele é também altamente reativo com a água e oxigênio (TUZUKI, 2012). Como resultado, as baterias de sódio precisam estar hermeticamente seladas em relação ao meio ambiente.

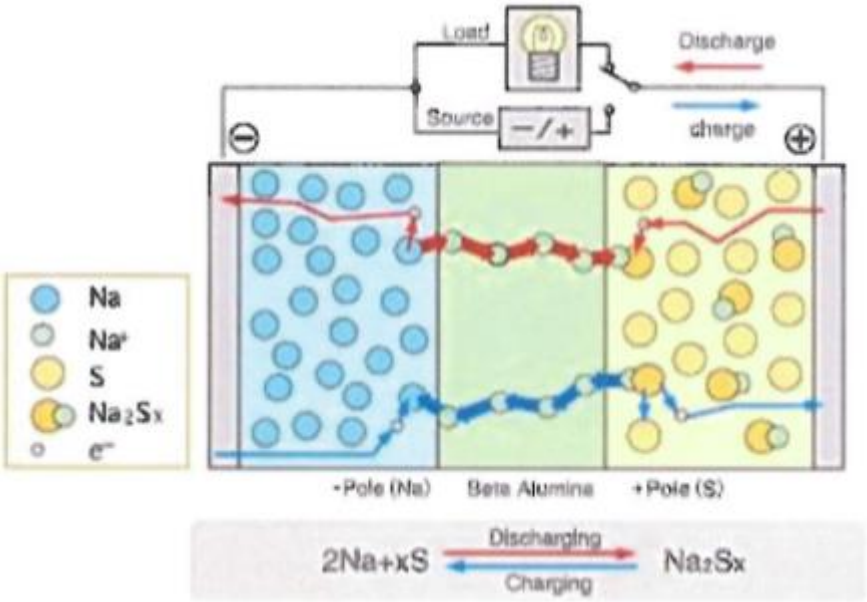
Em comparação com outros sistemas de bateria, a bateria beta-alumina de sódio consiste de eletrodos líquidos e um separador de eletrólito sólido. Estas baterias operam a temperaturas elevadas (300 °C a 350 °C) para assegurar que o eletrólito (beta-alumina de sódio) e os

eletrodos tenham condutividade iônica elevada de sódio, para permitir o fluxo de elétrons e os eletrodos que tem uma baixa viscosidade, facilitem o fluxo dos reagentes que permitem o funcionamento da bateria de sódio.

A bateria beta-alumina de sódio descarrega transportando os íons de sódio a partir do anodo de sódio líquido, para meio de um eletrólito de beta-alumina sólido (BASE), e para dentro do compartimento do catodo. O catodo é de poli sulfureto de sódio (bateria Na-S) ou uma estrutura de metal/metal poroso impregnado com $NaAlCl_4$ fundido como um segundo eletrólito. As mais recentes baterias de sódio-metálico têm uma tensão mais elevada de células em comparação com Na-S (2,58 V a 300 °C versus 2,21 V a 350 °C). As baterias beta-alumina de sódio comercialmente disponíveis têm densidade de energia em torno de 100 Wh/kg.

A Figura 22 mostra os processos de carga e descarga de uma bateria de Na-S. A eficiência total de carga e descarga da bateria é de até 90 %. A BASE é um excelente condutor de íons de sódio em temperaturas elevadas, e a sua baixa condutividade eletrônica evita o curto-circuito elétrico. Como a bateria beta-alumina de sódio deve operar em temperaturas elevadas, 300 °C a 350 °C, o gerenciamento térmico é uma parte integrante de qualquer sistema deste tipo de bateria.

Figura 22 - Diagrama da bateria Beta-Alumina de Sódio



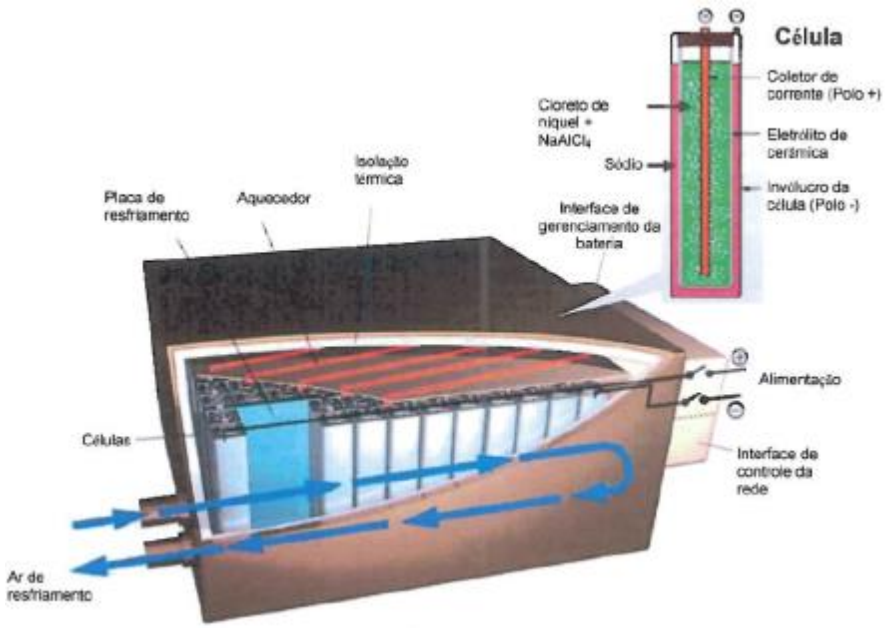
Fonte: TUZUKI (2012).

5.2.5.2 Situação da tecnologia

A NGK comercializou uma bateria de sódio-beta que está na vanguarda no armazenamento de energia. Desde 2002, a empresa japonesa vem fabricando módulos de baterias Na-S capaz de operar a 50 kW por 6 horas. Em abril de 2009, NGK tinha um total de 300 MW distribuídos em 200 locais em todo o mundo (conforme informação da NGK em 2011). As principais aplicações para estas unidades são de nivelamento de carga, manutenção da qual idade de energia e armazenamento de energia renovável (NGK, 2014).

NGK vem enfrentando uma crescente concorrência de General Electric (OE), que em 2007 adquiriu a Beta R&D e em 2010 iniciou a comercialização das baterias de sódio-beta com base em tecnologia de haleto de sódio-metal sob o nome comercial Durathon. A Durathon desenvolveu módulos menores que os da NGK e tem uma capacidade de descarga de 8 kW durante 2 horas (conforme informação da GE). A GE tem como alvo mercados ligeiramente diferentes, incluindo fontes de alimentação de backup para os hospitais, centros de dados e torres de comunicação sem fio. Nessas áreas, eles competem mais diretamente com tecnologia chumbo-ácido. No entanto, os módulos da GE são capazes de armazenamento em grande escala. A GE está desenvolvendo baterias de sódio-metal para atender a necessidade de armazenamento de energia renovável para as locomotivas EVO híbridas que já estão em desenvolvimento há mais de 10 anos.

Figura 23 - Diagrama da bateria de Sódio Durathon da GE



Fonte: TUZUKI (2102).

A competição entre as tecnologias da NGK e da OE, com suas químicas diferentes e os projetos dos módulos, deve ajudar a aumentar o desempenho e reduzir os custos no curto prazo.

5.2.5.3 Limitações e oportunidades da tecnologia da bateria Beta-Alumina de Sódio

Uma das principais limitações das baterias de sódio-beta é a sua elevada temperatura de funcionamento. Como indicado acima, os dois eletrodos devem estar no estado líquido que seja suficientemente fluido, para conduzir eficazmente os íons de sódio, e para garantir que o eletrólito seja bem condutor, minimizando assim as perdas ôhmicas.

Ciclos de congelamento/descongelamento reduzem drasticamente a vida útil das baterias de sódio, exigindo sistemas de gerenciamento térmico que podem aumentar o tamanho das baterias de sódio-beta e assim diminuinr potencialmente a sua eficácia global. Uma bateria de sódio-beta melhorada teria eletrodos com ponto de fusão mais baixo e um eletrólito sólido que seria suficientemente condutivo a baixas temperaturas, o que poderia reduziras perdas térmicas, melhorar a eficiência, reduzir os custos de material e melhorar a durabilidade.

As baterias de sódio também sofrem a redução do volume de líquido no anodo de sódio, durante a descarga, o que resulta em contato reduzido entre a BASE e o sódio líquido, o que pode reduzir a eficiência e potência. Os fabricantes podem melhorar esta interação, utilizando uma variedade de métodos, incluindo a gravidade, a absorção, ou a pressão do gás. A absorção é o método mais prático, e predominantemente usado na fabricação das baterias de sódio beta comerciais.

O catodo de polissulfureto fundido na bateria Na-S é extremamente corrosivo e tende a degradar a BASE. Se a BASE falhar, o catodo e a anodo líquido irão penetrar nas rachaduras, e ao entrar em contato reagem violentamente. O catodo semissólido na bateria de Na-metal tem um modo muito mais seguro de falhas das células, que resulta em uma baixa resistência para que outras células em série possam continuar a funcionar. As baterias de Na-metal também tem o potencial de melhorar o desempenho usando cio retos de metal de transição alternativos, o que pode reduzir a temperatura de operação, melhorar a segurança e aumentar a confiabilidade.

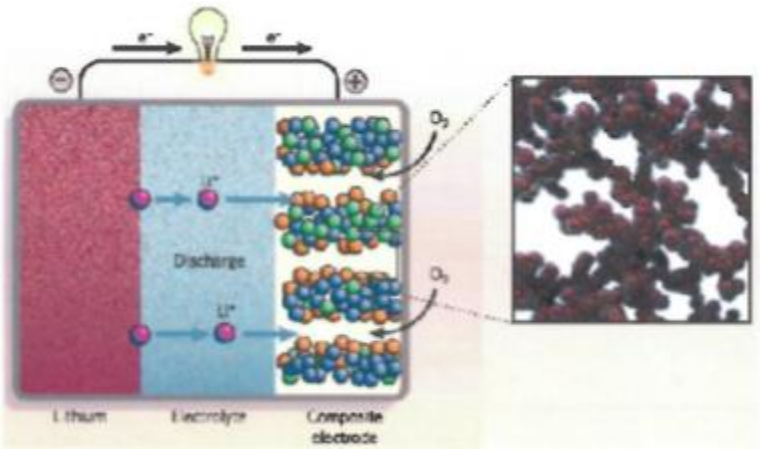
5.2.6 Baterias de Metal-Ar

5.2.6.1 Descrição da tecnologia

As baterias de metal-ar obtiveram este nome a partir dos reagentes que fornecem energia através das reações eletroquímicas. Nas células de zinco-ar, por exemplo, a energia é liberada pela oxidação do zinco (que é mantido dentro da caixa da bateria) com o oxigénio do ar. Na medida em que o oxidante não é armazenado na bateria, mas fornecido continuamente a partir de uma fonte externa (ar) estes tipos de baterias são semelhantes às células de combustível, onde nem o oxidante e nem o combustível ficam armazenados dentro da célula (TUZUKI, 2012).

As baterias de metal-ar utilizam o oxigênio atmosférico para formar os óxidos e/ou peróxidos com diferentes metais. As reações de oxidação dos metais tem alta densidade de energia, e como as baterias utilizam o oxigênio atmosférico como o material ativo do catodo, o peso do reagente do catodo não se inclui no peso de uma bateria de metal-ar. Estes dois fatores se combinam para dar a este tipo de bateria elevadas densidades de energia teóricas, tais como 1300, 8100 e 11100 Wh/kg (zinco, alumínio e lítio respectivamente) (TUZUKI, 2012). Como as baterias atuais de íons de lítio geram 120 Wh/kg, de uma densidade de energia teórica de apenas 450 Wh/kg, existe um grande interesse em baterias de metal-ar. A estrutura geral de uma bateria de lítio-ar é mostrada na Figura 24.

Figura 24 - Diagrama da bateria de Metal-Ar



Fonte: TUZUKI (2012).

Íons de lítio migram para o eletrodo de ar e reagem com O2 para formar Li_2O_2. Esta reação tem uma capacidade específica de 1200 mAh/g.

5.2.6.2 Situação da tecnologia

As primeiras baterias de Zn-Ar já foram comercializadas em 1932, para aplicações como comunicação remota e boias oceânicas. Na década de 1970, a pesquisa da célula de combustível em eletrodos de ar, habilitou o desenvolvimento da célula de Zn-Ar. Células de combustível de Zn-Ar com recarga mecânica foram utilizadas em ônibus e para geração de energia estacionária. A estrutura geral destas células de combustível é um catodo fino de ar composto de um catalisador de metal não precioso sobre um coletor de corrente de carbono, separador de membrana polimérica, o eletrólito alcalino e um anodo de zinco em pó. Os catalisadores de redução de oxigênio utilizados nos catados dessas células de combustível são tipicamente compostos de óxidos de manganês feitos usando a química de sol-gel. A empresa Fluidic Energy no Arizona (EUA) está desenvolvendo baterias de zinco-ar com um eletrólito liquido iônico (TUZUKI, 2012).

Os fabricantes ainda não conseguiram desenvolver outras baterias de metal-ar tão eficientes como as baterias de Zn-ar. As baterias de Al-ar têm uma alta densidade de energia, mas o seu custo é extremamente alto, a vida útil limitada, e pouco confiável, impedido o sucesso no mercado comercial.

5.2.6.3 Limitações e oportunidades da tecnologia da bateria Metal-Ar

Existem inúmeros desafios que impedem a implantação efetiva das baterias de metal-ar. O oxigênio atmosférico é vantajoso do ponto de vista da densidade de energia, mas apresenta muitas dificuldades práticas em dispositivos construídos. Para suportar altas taxas de descarga, os fabricantes precisam aumentar o transporte de oxigênio para o catodo e desenvolver novos catalisadores com baixo sobrepotencial de oxigênio.

5.2.7 Capacitor elétrico de dupla camada (EDLC)

Um capacitor elétrico de dupla camada (EDLC), também conhecido como supercapacitor, supercondensador, pseudocapacitor, condensador de camada dupla eletroquímica ou ultracapacitor, é um capacitor eletroquímico com uma densidade de energia relativamente elevada. Comparado com os capacitores eletrolíticos convencionais, a densidade de energia é da ordem de centenas de vezes maior (TUZUKI, 2012).

Capacitores convencionais armazenam energia através da remoção de portadores de carga, geralmente a partir de elétrons, de uma placa de metal e depositando-os sobre a outra placa. Esta separação de cargas cria um potencial entre as duas placas, que é aproveitado por um circuito externo. A energia total armazenada desta maneira aumenta com a quantidade de carga armazenada e o potencial entre as placas. A quantidade de carga armazenada por unidade de tensão é essencialmente uma função do tamanho, da distância, e das propriedades do material das placas e do material entre as placas (o dielétrico), ao passo que o potencial entre as placas é limitado pela característica do dielétrico. O dielétrico controla a tensão dos capacitores. Otimizando este material leva a uma maior densidade de energia para um determinado tamanho de capacitor (QING-ZHANG, 2012).

EDLCs não tem um dielétrico convencional. Em vez de duas placas separadas por uma substância, estes capacitores utilizam placas que são, na verdade, duas camadas do mesmo substrato, e as suas propriedades elétricas, a chamada camada elétrica dupla, resultam na separação efetiva de carga, apesar da separação física das camadas infimamente fina (da ordem dos nanômetros).

A falta da necessidade de uma camada de dielétrico volumoso permite o empacotamento de placas com uma área de superfície muito maior para um determinado tamanho, resultando em elevadas capacitâncias em pacotes pequenos. EDLC's são aplicáveis para aplicações de potência que exigem tempos de resposta muito rápidos, alta ciclagem e menos densidade de energia do que as baterias. A quantidade de energia armazenada por um capacitor é proporcional à área da superfície ativa do material do eletrodo e ao quadrado da tensão sob a qual a carga é armazenada. Fabricantes tradicionais de EDLC's estão usando um eletrólito aquoso, como o hidróxido de potássio (KOH) ou ácido sulfúrico (H2S04) entre dois eletrodos à base de carbono, normalmente carbono ativado. EDLC's possuem uma enorme vantagem sobre outras tecnologias, devido à sua maior vida útil de até um milhão de ciclos - um marco inigualável para outras formas de armazenamento de energia elétrica (QING-ZHANG, 2012).

5.2.7.1 Situação da tecnologia

A empresa NEC começou a comercializar o supercapacitor eletrólito aquoso em 1971, e usou a tecnologia como energia de reserva para a memória do computador. Em 2011, os EDLC's comerciais utilizavam eletrólitos orgânicos como acetonitrilo que possuem baixa

condutividade, mas tem uma tensão máxima de trabalho tão elevadas quanto 2,7 V. Estas características aumentam drasticamente a densidade de energia dos dispositivos, devido à dependência V2 da densidade de energia em relação à tensão. A partir de 2008 já começaram a estar disponíveis no mercado os EDLC's com densidades de energia entorno de 5 kWh/kg e densidade de potência pico de até 10 kW/kg. Conforme o desempenho dos EDLC's vai melhorando, os consumidores estão usando-os para uma matriz cada vez mais diversificada de aplicações. Os EDLC's podem ser usados para o armazenamento de energia de fontes de alimentação de curto prazo, para frenagem regenerativa de veículos elétricos híbridos, e nivelamento de carga. Eles também podem ser usados junto com dispositivos para outras fontes de energia, incluindo baterias e células de combustível, para aumentar a densidade de potência desses dispositivos.

5.2.7.2 Limitações e oportunidades da tecnologia do EDLC

O controle do tamanho dos poros do eletrodo é uma área muito importante na pesquisa dos EDLC's. A investigação sugere que o tamanho de poro ideal é ligeiramente menor do que o tamanho de íons móveis. Deve também ser considerada a distribuição dos tamanhos dos poros nos eletrodos de carbono, pois o equilíbrio entre os poros grandes e pequenos vai determinar o equilíbrio entre a resistividade e a capacidade específica. Enquanto os poros pequenos armazenam a carga de forma eficiente, os poros maiores são necessários para que os Íons possam migrar rapidamente na direção de e para tange da superfície do eletrodo.

Por causa da relação entre o tamanho do íon e tamanho ideal dos poros, os fabricantes deverão desenvolver materiais para eletrodos em conjunto com eletrólitos, para que os novos EDLC's possam maximizar a densidade de energia através de maior área de superfície ativa e janelas de alta tensão.

5.2.8 Capacitor híbrido

Um novo dispositivo de armazenamento de energia combina a química de um supercapacitor com a de uma bateria de Íons de lítio.

Ao combinar os produtos químicos de supercapacitores e baterias de íons de lítio, uma empresa chamada IOXUS criou um dispositivo de armazenamento de energia híbrido que pode se recarregar em minutos e talvez nunca precise ser substituído. A empresa diz que

futuras gerações poderão ser utilizadas para capturar a energia da frenagem dinâmica dos veículos.

Figura 25 - Capacitor híbrido

Fonte: TUZUKI (2012).

Os supercapacitores capturaram e liberaram a energia em segundos e podem fazer isto milhões de vezes, mas eles armazenam apenas cerca de 5% da energia que é armazenada pelas baterias de íons de lítio. O Supercapacitor + Bateria Híbrido mais conhecido como Capacitor Híbrido, pode armazenar mais do que O dobro da energia por volume do supercapacitor padrão. Isso ainda é muito menos do que uma bateria de íons de lítio, mas o híbrido pode ser recarregado rapidamente mais de 20.000 vezes contra algumas centenas de ciclos de uma bateria típica.

A IOXUS, que fica em Oneont, Nova York, já faz supercapacitores convencionais para ônibus elétricos híbridos e para sistema de parada/partida automática (AESS) de motores que são utilizados para aumentar a economia de combustível em automóveis.

O dispositivo de armazenamento de energia híbrido consiste de um filme de alumínio revestido de um lado com carbono, que é semelhante ao eletrodo encontrado em um supercapacitor. O outro eletrodo, no outro lado do filme de alumínio, é revestido com um material de íons de lítio, proporcionando maior capacidade de armazenamento de energia. O filme é enrolado em um cilindro para finalizar o dispositivo.

Os supercapacitores que estão sendo testados em alguns ônibus híbridos como uma forma de capturar a energia gerada pela frenagem e liberando-a rapidamente para ré-aceleração, é uma abordagem que promete melhorar a eficiência energética. Novos desenvolvimentos levarão ao aumento da capacitância do capacitar de íons de lírio híbrido. Isto permitirá um maior armazenamento de energia, o que melhorará ainda mais a eficiência energética,

proporcionando maior economia de combustível. Mas seu ciclo de vida terá de ser melhorado, pois os sistemas de frenagem têm que permitir recargas de centenas de milhares de vezes.

Esta tecnologia híbrida pode ser ideal para pequenas aplicações leves que poderiam se beneficiar de ter um pouco da vantagem de poder do super capacitor e alguma vantagem da energia de uma bateria.

Apenas mais uma empresa, a JSR Micro, em Tóquio - faz dispositivos híbridos deste tipo, tendo colocado no mercado em 2009. A empresa diz que seu dispositivo tem três vezes a densidade de energia do supercapacitor convencional e um ciclo de vida de 100.000 recargas, Jeff Myron, um gerente de programa da JSR Micro, diz que o dispositivo se destina principalmente como uma fonte de alimentação de backup em Equipamento Médico de Imagem.

5.3 Armazenamento de energia mecânica aplicável em tracionarios

5.3.1 Flywheel

5.3.1.1 Descrição da tecnologia

Flywheels são dispositivos que armazenam energia cinética em uma massa girante. A capacidade deles, em termos de energia armazenada, depende do momento de inércia e da velocidade angular, como mostra a Equação 9:

$$\boldsymbol{K = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2} \tag{9}$$

Onde:

K : energia cinética armazenada na massa girante (J).

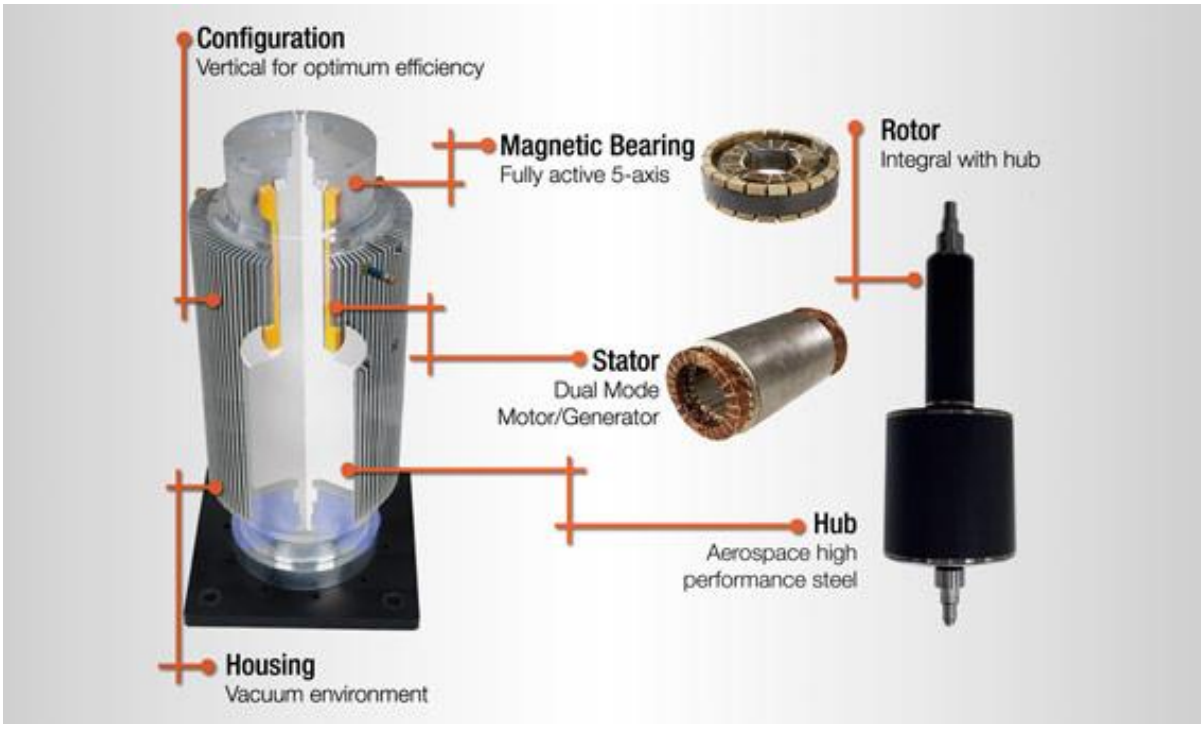
J : momento de inércia (N.m).

ω : velocidade angular (rad/s).

Quando aplicado na conversão entre energia elétrica e energia mecânica, a massa girante corresponde a um rotor, e o *flywheel* pode ser caracterizado basicamente como motor/gerador de imã permanente de alta velocidade. Durante o processo de recarga, a corrente flui do

sistema para o motor, gerando um torque de aceleração que, por sua vez, faz com que o *flywheel* aumente sua velocidade e armazene energia. Durante o processo de descarga, a corrente flui do gerador para sistema, causando um torque de desaceleração que faz com que o rotor reduza sua velocidade ao mesmo tempo em que gera energia. Em função disso, os *flywheel*s também são conhecidos como baterias eletromecânicas. Para diminuir as perdas por fricção com o ar e maximizar a eficiência do dispositivo, o rotor do *flywheel* gira levitando em rolamentos magnéticos de materiais especiais, e fica retido em um compartimento a vácuo ou preenchido com hélio a baixíssima pressão. Além disso, é recomendável que o rotor opere na vertical para máxima eficiência (BOYES e CLARK, 2000); (INVESTIRE-NETWORK, 2013). O esquema de um *flywheel* pode ser visto na Figura 26:

Figura 26 - Partes de um *flywheel*



Fonte: VYCON (2013).

a) Motor/gerador de imã permanente de alta velocidade

Motores de imã permanente são motores síncronos polifásicos similares às máquina síncronas convencionais, exceto o fato que seus enrolamentos de campo são substituídos por imãs permanentes. Dessa forma, eles podem ser analisados assumindo que a máquina é excitada por uma corrente de campo constante (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2002).

Nos flywheels, o motor/gerador é construído a partir de materiais especiais de maneira que o aquecimento do rotor seja minimizado, e a eficiência e a confiabilidade do dispositivo sejam bastante elevadas. Esse fato permite que sistema seja usado em aplicações difíceis com altas taxas de ciclos, e mesmo assim, mantenha uma longa vida útil, em torno de 20 anos. O motor/gerador chega a girar a uma velocidade de 36750 RPM quando o sistema está com carga máxima, e durante a descarga, a velocidade do rotor decresce até uma velocidade mínima de 10000-12000 RPM. Vale ressaltar que o ciclo de carga e descarga pode ser ajustado de acordo com a aplicação, respeitando os valores máximo e mínimo comentados anteriormente (VYCON, 2013).

b) Rolamentos magnéticos

Os rolamentos magnéticos fazem com que o conjunto girante levite através da ação da força de campos magnéticos, permitindo assim que o rotor do motor gire a velocidades bastante elevadas sem que haja contato físico com componentes estacionários, o que contribui ainda mais para a eficiência do flywheel (VYCON, 2013).

O funcionamento do rolamento magnético baseia-se numa combinação de imãs permanentes, os quais fornecem um campo de polarização no entreferro, e eletroímãs controlados que proporcionam o ajustamento e a centralização do conjunto girante. A posição do rotor é obtida a partir de sensores de posição, e é então fornecida a um controlador que, por sua vez, ajusta a corrente de cada bobina para reposicionar o rotor dentro de uma órbita admissível. Usando essa tecnologia, a necessidade de manutenção é praticamente eliminada já que não existem pontos de contato (VYCON, 2013).

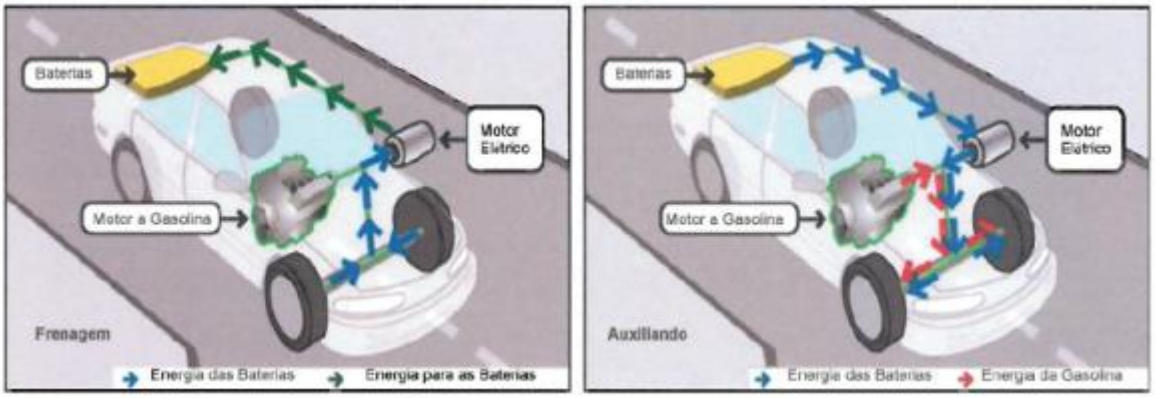
5.3.1.2 Situação da tecnologia para tracionarios

A tecnologia do FLYWHEEL está bem avançada com a utilização de materiais mais leves e mais resistentes, rnicroeletrônica e sistemas de rolamentos magnéticos.

A frenagem regenerativa é um mecanismo de recuperação de energia, que se aplica uma força de oposição ou de torque para um objeto em movimento, convertendo sua variação em energia cinética e/ou energia potencial de outra forma, que pode ser imediatamente utilizada ou armazenada até ser necessária. Esta energia de outra forma seria perdida na forma de calor através de freios de atrito convencionais ou pelos resistores de frenagem dinâmica. A forma

mais comum de frenagem regenerativa utiliza um motor elétrico como um gerador, como mostrado no exemplo do automóvel na Figura 27.

Figura 27 - Exemplo de freio regenerativo no sistema paralelo de um automóvel híbrido



Fonte: BURKE, (2012).

Durante a frenagem uma energia mecânica flui das rodas para o motor elétrico, atuando agora como um gerador, e é convertida em energia elétrica, que é então armazenada em baterias. Na condição de tração, a energia flui da bateria para o motor elétrico e é convertida em energia mecânica para auxiliar o motor primário (motor a gasolina) para mover as rodas. Desta forma se consegue uma redução no consumo de combustível no motor principal, melhorando assim a eficiência energética e reduzindo as emissões de poluentes.

5.3.1.3 Limitações e oportunidades da tecnologia do *Flywheel*

A limitação mais significativa dos FLYWHEELS está em sua capacidade relativamente modesta para o armazenamento de energia. Eles são mais adequados para suprir surtos de potência de carga e descarga frequente, com quantidades de energia modestas e com altas taxas de potência. A quantidade de energia elétrica relativamente pequena que pode armazenar limita as aplicações do FLYWHEEL.

Os flywheels não são tão afetados por variações de temperatura, podem operar em uma faixa de temperatura muito mais ampla, e não estão sujeitos à muitas das falhas que são comuns para as baterias químicas recarregáveis. Ao contrário das baterias de Íons de Iítio que operam por um período finito de aproximadamente 36 meses, um flywheel pode ter, potencialmente, uma vida de trabalho indefinida. Flywheels construídos como parte de motores a vapor de James Watt estão trabalhando continuamente há mais de 200 anos. Exemplos de trabalho de

flywheels antigos usados principalmente na moagem e na olaria, podem ser encontrados em muitos lugares na África, Ásia e Europa. Eles também são potencialmente menos danosos ao meio ambiente, pois grande parte é feito de materiais inertes ou benignos. Outra vantagem é que volantes, por uma simples medição da rotação, é possível conhecer a quantidade exata de energia armazenada. No entanto, o uso de acumuladores de energia com flywheel está dificultado pelo perigo de quebra explosiva da roda maciça, devido a uma sobrecarga.

Um dos limites primários do projeto do flywheel é a resistência à tração do material utilizado para o rotor. De um modo geral quanto mais rígido for o disco, ele pode girar mais rapidamente e mais energia o sistema pode armazenar. Quando a resistência à tração de um f1ywheel é excedido o mesmo irá quebrar, libertando toda a sua energia armazenada de uma só vez, o que é vulgarmente referido como "explosão do flywheel" onde os fragmentos da roda podem atingir a energia cinética comparável à de uma bala. Por isso os sistemas tradicionais do tlywheel exigem invólucros de contenção bem fortes, como uma medida de segurança, o que aumenta a massa total do dispositivo. Felizmente, materiais "composite" tendem a se desintegrar uma vez quebrado, em vez dos grandes pedaços dos estilhaços em alta velocidade. Mesmo assim muitos usuários dos modernos sistemas de armazenamento de energia com flywheels, preferem tê-los enterrado no chão para deter qualquer material que possa escapar do invólucro de contenção.

Uma limitação adicional para alguns tipos de flywheels é o tempo de arrmazenamento de energia. Sistemas de armazenamento de energia com flywheels que utilizam rolamentos mecânicos podem perder 20% a 50% da sua energia em 2 horas. Grande parte do atrito responsável por esta perda de energia resulta da mudança de orientação do flywheel devido à rotação da Terra (um conceito semelhante do pêndulo de Foucault). Esta mudança de orientação se opõe às forças giroscópícas exercidas pelo momento angular do flywheel, assim exercendo uma força contra os rolamentos mecânicos. Esta força aumenta o atrito. Isto pode ser evitado através do alinhamento do eixo rotacional do flywheel paralelo com o eixo rotacional da Terra.

Por outro lado, os flywheels com rolamentos magnéticos e alto vácuo pode manter 97% de eficiência mecânica e 85% de eficiência em viagem completa.

Quando utilizados em veículos, os flywheels também atuam como giroscópios, uma vez que o seu momento angular é normalmente da ordem de grandeza das forças que atuam sobre o veículo em movimento. Esta propriedade pode ser prejudicial para as características do veículo quando estiver fazendo curvas. Mas por outro lado, esta propriedade pode ser utilizada para manter o carro equilibrado de modo a evitar que ele capote durante curvas acentuadas. Por outro lado, o efeito pode ser quase totalmente removido pela montagem do flywheeel em um conjunto de anéis (gimbals), em que O momento angular se conserva sem afetar o veículo.

5.4 Hidrogênio como sistema de armazenamento de energia

5.4.1 Descrição da tecnologia

Analistas consideram o hidrogênio um portador de energia muito importante para o futuro, quando usado como uma alternativa para os combustíveis fósseis, tais como o carvão, o petróleo bruto e o gás natural e os seus derivados. O hidrogênio tem o potencial para ser uma fonte de energia limpa, confiável e acessível, e tem a grande vantagem do subproduto principal da combustão com oxigênio ser a água, em vez de CO2, que é o gás do efeito estufa, A principal desvantagem de hidrogénio é a de que, embora seja o elemento mais abundante, é que predominantemente se encontra quimicamente ligado, tal como na água ou em hidrocarbonetos. Como resultado, os dispositivos devem separar o hidrogênio destes compostos.

O hidrogênio como um sistema de armazenamento de energia é uma proposta complicada que envolve três processos separados. Em primeiro lugar, um dispositivo deve produzir o hidrogênio. Em uma aplicação de armazenamento de rede de energia, a tecnologia de produção mais adequada é a eletrólise da água usando eletricidade. Após a eletrólise que produz o hidrogênio, o mesmo deve ser armazenado na forma gasosa ou líquida. Finalmente, para voltar a energia elétrica, o hidrogênio armazenado deve ser convertido para eletricidade por uma célula de combustível ou uma turbina de combustão a gás.

Para a aplicação de armazenamento da energia elétrica, os sistemas propostos de hidrogênio que compreende uma unidade de eletrólise (também conhecido como um eletrolisador), um compressor e um sistema de armazenamento, e provavelmente uma célula de combustível. O armazenamento de energia usando o sistema eletrolisador/célula de combustível de

hidrogênio é um conceito de armazenamento que utiliza a eletricidade para produzir hidrogênio a partir da água. O hidrogênio funciona como transportador de energia que as tecnologias podem armazenar na forma de líquido ou de gás, e que posteriormente as células de combustível pode usar para produzir energia elétrica. Da mesma forma que as baterias, as células de combustível podem responder rapidamente às flutuações de energia. Analistas esperam que o hidrogênio venha a desempenhar um papel significativo em sistemas de energia no futuro. Pesquisas mostram que é possível utilizar o hidrogênio diretamente nos motores de combustão interna, exigindo modificações relativamente pequenas. A eficiência energética das células de combustível varia de 40 a 60 %, dependendo da tecnologia das células de combustível. Os sistemas baseados em combustão de combustíveis fósseis, por outro lado, tem uma eficiência tipicamente inferior a 40 %. Quando os fabricantes usam células de combustível de alta temperatura, podem gerar eletricidade e de calor útil para fins de aquecimento. Desta forma com esta cogeração, se toma possível atingir eficiências energéticas totais de até 80 %.

Figura 28 - Armazenamento de energia com eletrolisador/célula de combustível de hidrogênio

Fonte: O autor

5.4.2 Produção de Hidrogênio pela Eletrólise da Água

Para a aplicação de armazenamento de energia elétrica, os analistas preveem produção de hidrogênio através de eletrólise da água. A eletrólise da água é um método simples de produzir hidrogênio. Dispositivos fazem fluir uma corrente de baixa tensão através da água, criando oxigênio gasoso no anodo, e hidrogênio gasoso no catodo. Para a produção do hidrogênio para armazenamento, normalmente os fabricantes utilizam catodo de platina ou de outro metal inerte. A eficiência máxima teórica (energia elétrica usada versus o valor energético do hidrogênio produzido) é da ordem de 80 a 94 %. Entretanto na prática, as eficiências estão mais perto de 60 a 70 %, quando analistas incluem as cargas parasitárias.

5.4.3 Armazenamento de Hidrogênio

Para um futuro próximo, teremos o hidrogênio armazenado como um gás a alta pressão ou como um líquido sob condições criogênicas. Ao contrário das aplicações móveis, a densidade de hidrogênio não é geralmente um problema para aplicações estacionárias. Nas aplicações móveis podem ser usadas as tecnologias estabelecidas:

- Hidrogênio comprimido em um tanque de hidrogênio (até 700bar);
- Hidrogênio líquido em um tanque de hidrogênio criogênico.

5.4.4 Conversão em energia elétrica

Uma célula de combustível é uma célula eletroquímica que converte a energia de uma fonte de combustível em energia elétrica. A reação entre o combustível e um agente oxidante gera energia elétrica. O fluxo de reagentes para dentro da célula, e os produtos de reação fluem para fora do mesmo, enquanto que o eletrólito permanece dentro dele. As células de combustível podem funcionar continuamente, desde que o reagente necessário mantenha os fluxos oxidantes.

Analistas classificam as células de combustível principalmente pelo tipo de eletrólito que empregam. Esta classificação determina o tipo de reações químicas que têm lugar na célula, o tipo de catalisador requerido, a gama de temperatura na qual a célula funciona, o combustível requerido, e outros fatores.

5.4.5 Situação da tecnologia

Os eletrolisadores e as células de combustível sofreram amplo desenvolvimento nos últimos anos, e várias empresas estão começando agora a comercializar estes dispositivos. Em comparação com outros métodos de armazenamento de energia, estes sistemas com eletrolisadores e células de combustível são ainda relativamente caros. No entanto, os analistas esperam que esses custos diminuam à medida que os avanços tecnológicos aumentem, e também aumente a produção destes sistemas.

Os três subsistemas do sistema de armazenamento de energia de hidrogênio variam em termos de maturidade de tecnologia. O armazenamento e compressão de hidrogênio, por exemplo, são tecnologias maduras e bem estabelecidas para várias aplicações industriais, ainda que não

necessariamente para a aplicação de armazenamento de energia. Recipientes pressurizados de aço e de compósito já estão disponíveis comercialmente para pressões de serviço de até 700 bar.

Do mesmo modo, os compressores compatíveis com o hidrogênio são também comercialmente disponíveis para as aplicações industriais. Para a aplicação específica de um sistema de eletrolisador/célula de combustível, a tecnologia mais adequada seria um compressor de diafragma, usando uma membrana para comprimir o gás, em vez de êmbolos alternativos convencionais, que tem se mostrado muito confiável, Os eletrolisadores também têm encontrado sucesso comercial em aplicações industriais que requerem demanda de hidrogênio.

O avanço tecnológico existente atualmente está concentrado na área industrial. Pesquisas e desenvolvimentos na área de tracionarios ainda estão engatinhando, Falta muito para chegar a uma maturidade tecnológica na área dos tracionarios.

5.4.6 Limitações da tecnologia

Quando se consideram os sistemas de armazenamento de energia de hidrogênio, as limitações principais incluem a maturidade da tecnologia das células de combustível, a durabilidade das células de combustível e eletrolisadores, o custo das células de combustível, dos eletrolisadores, e em menor extensão, os recipientes de armazenamento. A eficiência das células de combustível e dos eletrolisadores e a falta de maturidade das células de combustível e eletrolisadores com relação a aplicações de armazenamento em tracionarios, também limitam a tecnologia.

As características de eficiência e de custo do sistema deeletrolisador/célula de combustível dependem do tipo de tecnologia utilizado, a forma que os sistemas utilizam a carga, e o período de tempo considerado. Os custos são relativamente altos no momento, mas analistas preveem que vai reduzir (em um ritmo incerto).

Uma grande desvantagem deste tipo de sistema é ainda uma eficiência muito baixa, relatado em cerca 40 %. Com base nas especificações dos fabricantes um sistema de armazenamento de hidrogênio comprimido de com eletrolisador/célula de combustível, hoje teria uma eficiência total de 31 a 35 %.

5.5 Análise comparativa

Dentro das diversas possibilidades de hibridização, as baterias se mostram mais promissoras a curto e médio prazo, pois apresentam uma tecnologia num estágio mais avançado do que outras alternativas como os supercapacitores, capacitares híbridos, FLYWHEELS e células de combustível.

Há um grande número de diferentes tipos de baterias, em vários estágios de desenvolvimento e comercialização. Vários projetos têm demonstrado que são economicamente competitivos para aplicações de armazenamento de energia. Em função da resposta rápida das baterias, são adequadas para aplicações de hibridização de locomotivas. Entretanto estas baterias precisam mostrar que atendem à necessidade de um longo ciclo de vida, o que é ainda um desafio para muitas tecnologias de bateria disponíveis.

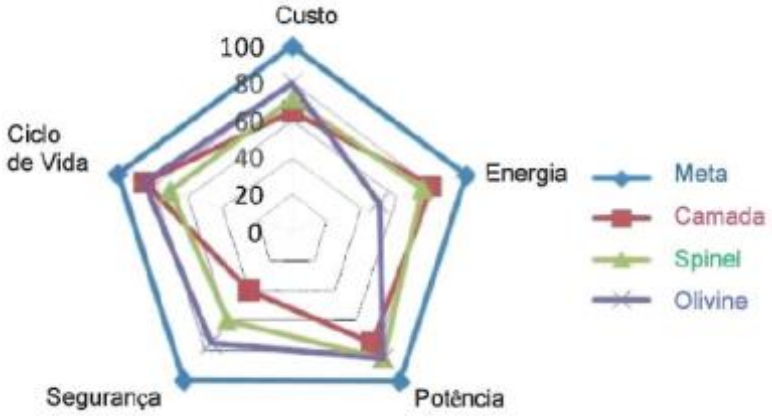
Baterias irão competir com outras tecnologias recém-comercializadas como FLYWHEELS para modelos de curta duração. Para aplicações com maiores durações, um custo reduzido é o principal requisito. A tecnologia de uma bateria única ainda está para surgir, para se tomar provavelmente um líder de mercado para muitas aplicações potenciais para o armazenamento de energia. Pesquisas e desenvolvimentos provavelmente irão melhorar ainda mais o desempenho das baterias e reduzir os custos de diversas tecnologias.

Atualmente as baterias mais evoluídas são as baterias de lítio. Conforme os dados de 2011 do National Renewable Energy Laboratory nos EUA existem três classes de material do catodo que prevalecem atualmente:

- camadas de óxidos de metais de transição (por exemplo, óxido de cobalto e vários óxidos mistos, tais como o óxido de niquel-cobalto-alumínio, etc);
- spinel (por exemplo, o óxido de manganês);
- olivine (por exemplo, fosfato de ferro).

A principal diferença entre estas classes de catodos está na sua estrutura do cristal. Cada um oferece várias vantagens e desvantagens, como mostrado na Figura 29.

Figura 29 - Comparativo das diversas químicas de baterias de Lítio



Fonte: TUZUKI, (2012).

Atualmente existe um grande número de esforços de pesquisa para preencher as lacunas da tecnologia de lítio atual, assim como para prosseguir com a pesquisa de novos tipos de baterias que possam fornecer um desempenho ainda maior.

6 ESTUDO DE CASO

Nos anos de 2011/2012, a VALE S.A. contratou uma consultoria com o objetivo de realizar um estudo a fim de determinar os potenciais benefícios da utilização de sistemas de armazenamento de energia para a economia no consumo de combustível das locomotivas. Este estudo, intitulado Project Phoenix Final Report (BURKE, 2012) será utilizado para a realização do estudo de caso neste trabalho.

No estudo, foram analisadas a locomotiva GE Dash-9, que é uma locomotiva diesel-elétrica. Para a análise de viabilidade da utilização de sistemas de armazenamento de energia nestas locomotivas, foram instalados equipamentos para aquisição de dados a fim de se levantar o seu ciclo de trabalho durante operação na Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM). As informações recolhidas foram utilizadas para calcular oportunidades de economia de combustível através da aplicação da frenagem regenerativa com armazenamento de energia por meio de flywheel embarcado, bem como determinar a dimensão do sistema de armazenamento de energia necessária.

A locomotiva D9-40BBW é equipada com um sistema de frenagem dinâmica, que utiliza os motores de tração como geradores durante a frenagem, dissipando a energia gerada através de um conjunto de resistores de grade. O maquinista, na cabina, controla a frenagem por meio da alavanca do freio dinâmico. Há de se considerar, neste sistema, a utilização de flywheel com o objetivo de armazenar a energia que é dissipada no conjunto de resistores, a fim de reaproveita-la na tração da locomotiva.

Figura 30 - Locomotiva Dash 9 D9-40BBW

Fonte: BURKE, (2012).

A empresa contratada pela VALE realizou no mês de outubro de 2011 medições na locomotiva D9-40BBW por três dias consecutivos. Nestas medições, a locomotiva puxou, no primeiro dia, conjuntamente 168 vagões vazios de Vitória a Laboreau. No segundo dia, fez viagens as minas de Conceição e João Paulo (MG) puxando 84 vagões carregados. No terceiro dia, retornou a Vitória puxando 252 vagões carregados, em um arranjo de 3 locomotivas. A locomotiva operou por mais de 40 horas durante os 3 dias de medição, percorrendo uma distância de mais de 1.100 km, subindo quase 900 m de altitude e consumindo mais de 10.000 l de combustível diesel (BURKE, 2012).

Nas medições, registrou-se que a frenagem dinâmica representou 12% da duração total do ciclo de trabalho. No primeiro dia, a frenagem dinâmica não foi utilizada, tendo em vista que a locomotiva estava subindo mais de 600 m. Nos segundo e terceiro dia, a locomotiva realizou descidas, sendo necessário utilizar a frenagem regenerativa principalmente para regulação de velocidade. Consequentemente, os eventos de frenagem dinâmica foram de longa duração, sendo o menor evento registrado com o tempo de 3,8 minutos, enquanto o mais duradouro teve 72,2 minutos. A potência de frenagem dinâmica foi tipicamente entre 500 e 1.000 kW, chegando no pico de 1.375 kW. Para efeito de frenagem regenerativa, um máximo de 6,5% do total da energia pode ser regenerada (BURKE, 2012).

O estudo de viabilidade foi então dividido em três fases:

i. Ciclo de coleta de dados – nesta fase, foram definidos e instalados a instrumentação e os equipamentos de aquisição de dados em uma locomotiva D9-40BBW, bem como realizadas as medições dos dados do ciclo de trabalho ao longo de um perfil representativo da rota de operação da locomotiva;

ii. Ciclo de processamento de dados e cálculos – nesta fase, foi realizado o processamento e a formatação dos dados do ciclo de trabalho, além da determinação dos perfis de utilização de energia pela locomotiva;

iii. Analises dos resultados.

6.1 Ciclos de trabalho

O perfil da rota registrado pode ser dividido em quatro partes:

i. Vitória a Laboreau (Itabira-MG);

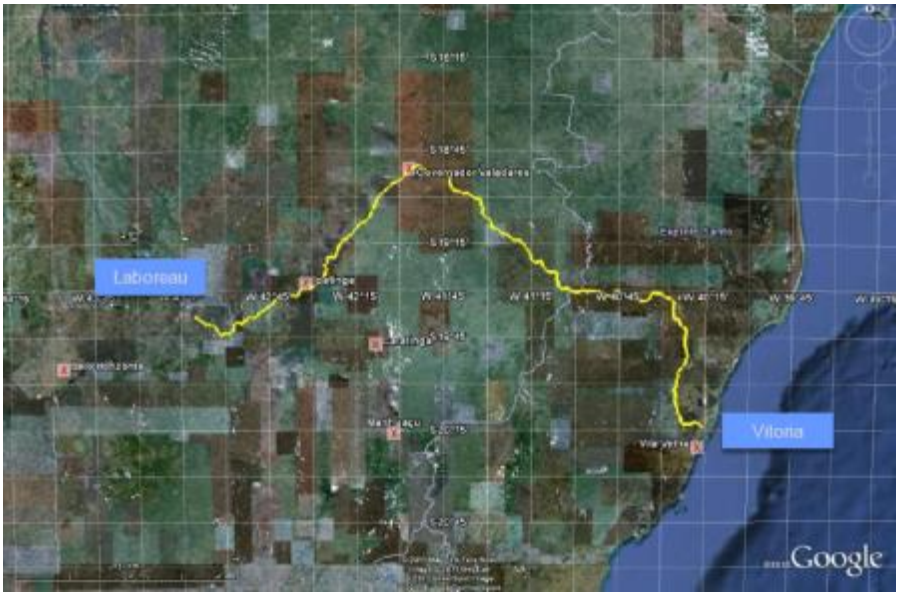
ii. Laboreau a mina de Conceição (Itabira-MG) e retorno a Laboreau;

iii. Laboreau a mina de João Paulo (MG), e retorno a Laboreau;

iv. Laboreau a Vitória.

As medições foram realizadas entre os dias 13 e 16 de outubro de 2011. A Figura 31 mostra os perfis das rotas retirados das imagens de satélite do Google Earth.

Figura 31 - Perfil da rota de Vitória - Laboreau - Vitória



Fonte: Burke, (2012).

Figura 32 - Perfil da rota de Laboreau a Conceição/João Paulo a Laboreau

Fonte: BURKE, (2012).

6.2 Configuração do trem

O Quadro 1 mostra a configuração e operação do trem ao longo das rotas do ciclo de trabalho. O número de locomotivas utilizadas sofreram alterações dependendo do número de vagões e se eles estavam ou não carregados. Além disso, as locomotivas podem operar tracionando ou sendo rebocada (com ou sem freio dinâmico). Quando é rebocada, a locomotiva fica em modo passivo, ou seja, não realiza frenagem.

Quadro 1 - Configuração do trem durante as medições do ciclo de trabalho

			Locomotivas						Vagões		
Data	**Hora**	**ID Trem**	**ID #1**		**ID #2**		**ID #3**		**#**	**Status**	**Peso (ton)**
13/out	09:57	M13	1154	tração	1225	rebocada	n/a	n/a	168	vazio	3.024
	15:02					tração					
	15:45			rebocada							
	20:20			tração							
	23:50										
14/out	08:51	M245	1154	tração	1190	tração	n/a	n/a	84	vazio	1.512
	09:25										
	14:35	M246								cheio	8.572
	15:00										
	15:40	n/a		rebocada					0	n/a	0
	16:05										
	16:32	M206		tração					84	cheio	8.794
	17:08										
15/out	10:35	M02	1154	tração	1269	tração	1170	tração	252	cheio	26.361
	14:10										
	19:50										
16/out	00:15										
	05:00										

Fonte: Burke, (2012).

Duas locomotivas (#1154 e #1225) foram utilizadas para transportar 168 vagões vazios de Vitória para Laboreau (1º dia). De Laboreau, as locomotivas #1154 e #1190 foram utilizadas na viagem de retorno para as minas de Conceição e João Paulo (2° dia). A terceira viagem foi para a mina de Conceição, levando 84 vagões vazios, e retornando com 84 vagões carregados.

O trem retornou à Vitória sendo composto por três locomotivas (#1154, #1269 e #1170) levando 252 vagões carregados.

6.3 Processamento dos dados

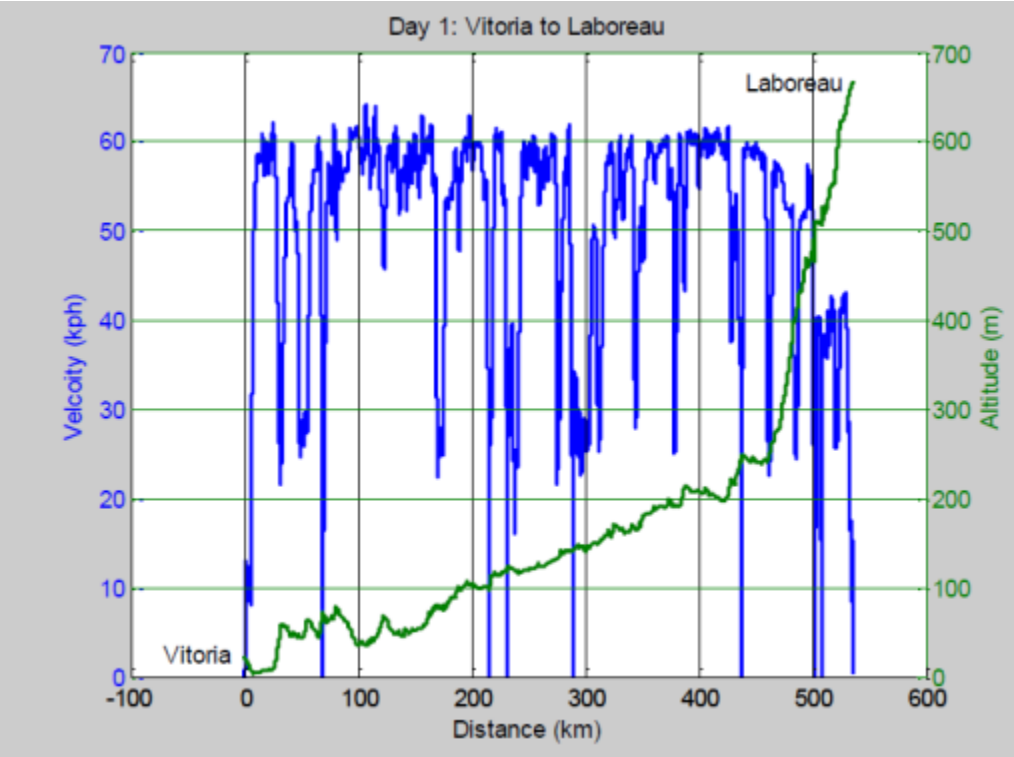
Os dados dos ciclos de trabalho foram medidos utilizando-se uma combinação de instrumentos, sendo todos processados por meio de softwares específicos. A análise das rotinas por meio das quais os dados foram processados foge ao escopo deste trabalho.

6.4 Análises e resultados

6.4.1 Perfil de velocidade e altitude

O gráfico 3, o gráfico 4 e o gráfico 5 mostram o perfil das velocidades (km/h) e das altitudes (m) medidas da locomotiva em função da distância (km) em cada dia.

Gráfico 3- Velocidade (km/h) e altitude (m) em função da distância (1° dia)

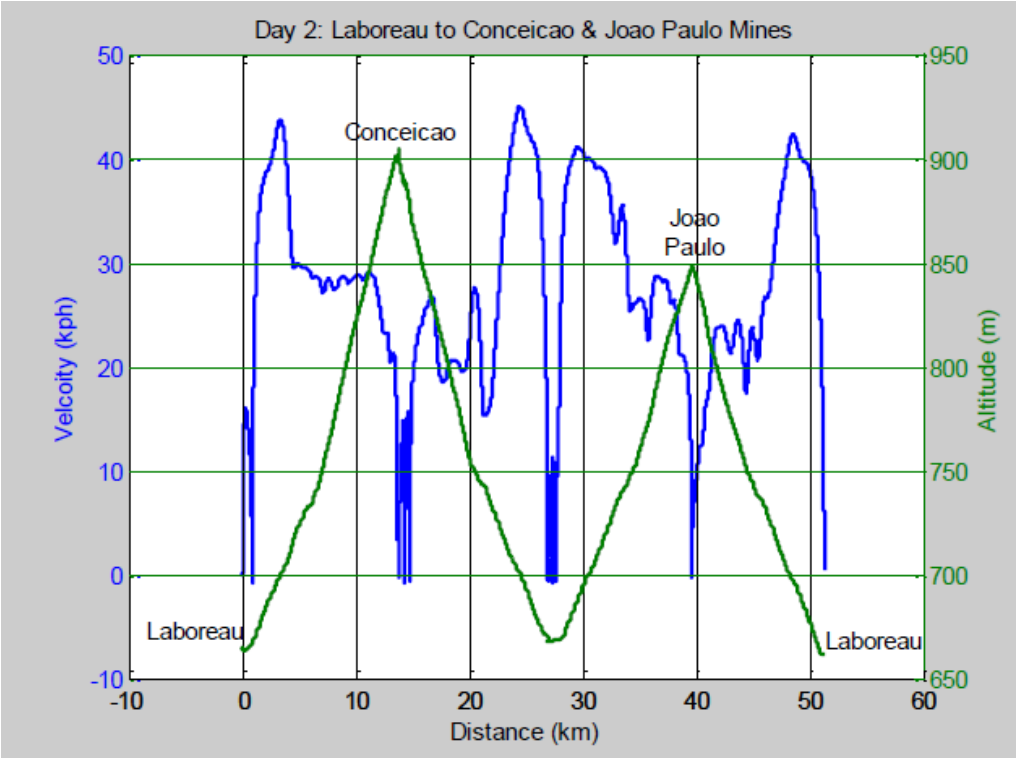


Fonte: Burke, (2012)

A velocidade média da locomotiva nas operações do primeiro dia foi de 43 km/h, incluindo-se sete paradas na rota para Laboreau. A velocidade máxima foi de 60 km/h, mas para o trecho

final para Laboreau, ela foi reduzida para 44 km/h, conforme se observa no Gráfico 3. A locomotiva subiu um total de 647 m de Vitória a Laboreau.

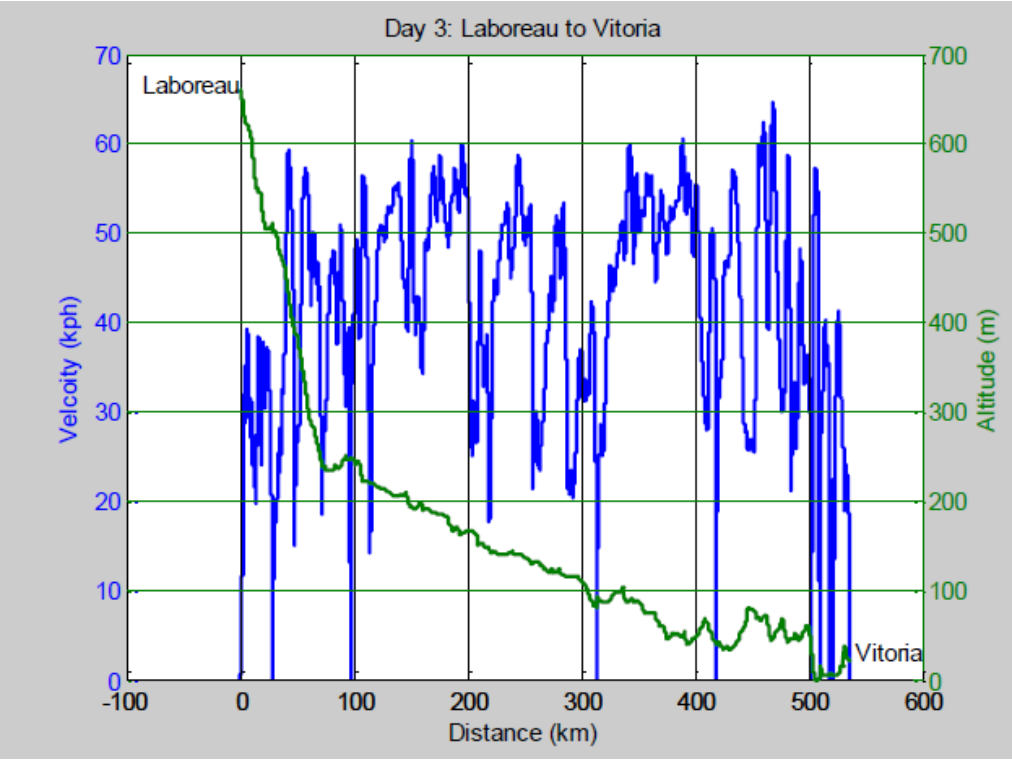
Gráfico 4 – Velocidade (km/h) e altitude (m) da locomotiva em função da distância (2º dia)



Fonte: BURKE, (2012).

A velocidade média da locomotiva no segundo dia foi de 21 km/h. A velocidade máxima atingida pela locomotiva foi de 44 km/h. Entretanto, nos pontos de maior altitude, a velocidade máxima esteve limitada a 15 km/h. A locomotiva subiu 240 m na Mina de Conceição, e 184 m na mina de João Paulo.

Gráfico 5 - Velocidade (km/h) e altitude (m) da locomotiva em função da distância (3° dia)



Fonte: BURKE, (2012).

A velocidade média da locomotiva no terceiro dia foi de 36 km/h, incluindo 8 paradas durante o percurso para Laboreau. A velocidade máxima foi restringida a 60 km/h, sendo reduzida para 44 km/h na descida inicial de Laboreau. A locomotiva desceu um total de 639 m de Laboreau para Vitória.

Na Tabela 1, tem-se o resumo das medições do ciclo de trabalho.

Tabela 1 - Resumos dos dados do Ciclo de trabalho

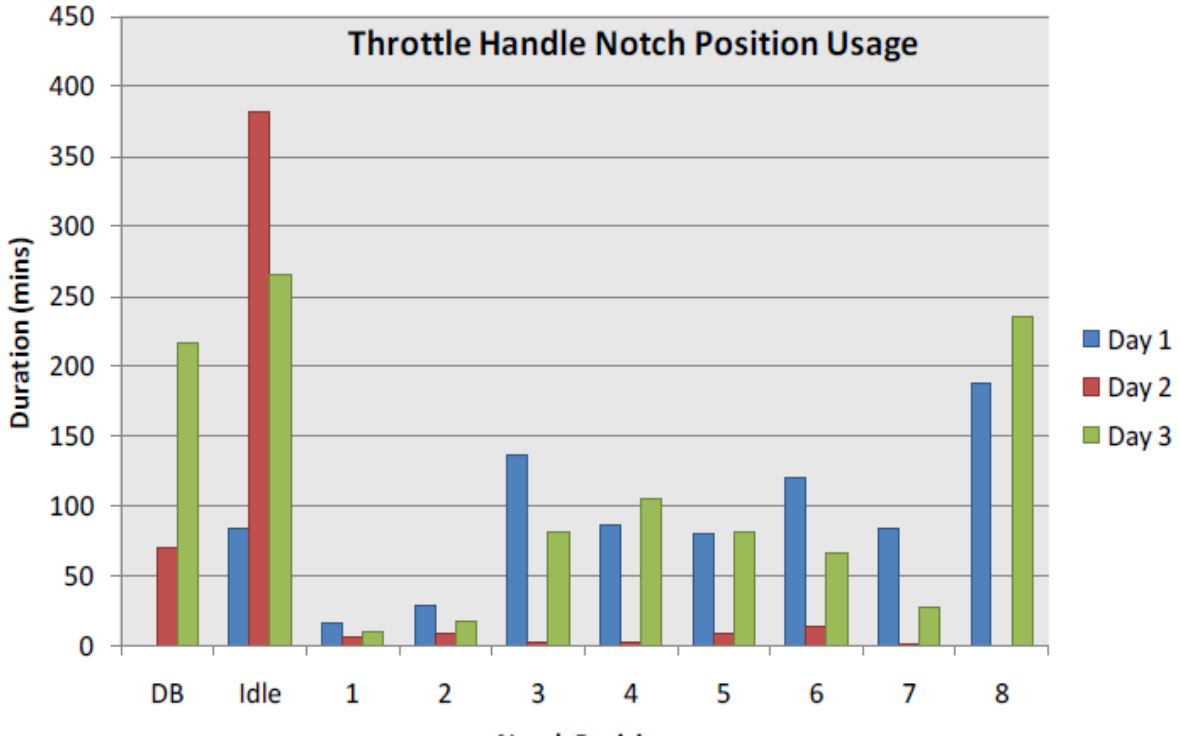
		dia 1	dia 2	dia 3	Total
Tempo	**h**	13,7	8,3	18,4	40,4
Distância	**km**	528	51	536	1.116
subida/descida	**m**	647	240/180	-639	n/a
Consumo de combustível	**litros**	3.985	463	5.858	10.306

Fonte: BURKE, (2012).

6.4.2 Acionamentos da alavanca de controle pelo maquinista

O Gráfico 6 apresenta um histograma do tempo de acionamento da alavanca de controle por parte do maquinista durante o ciclo de trabalho. Conforme se observa, a alavanca possui 8 posições de aceleração, uma de frenagem dinâmica (DB) e uma em modo ocioso (Idle).

Gráfico 6 - Histograma de utilização da alavanca de controle



Fonte: BURKE, (2012).

6.4.2.1 Modo ocioso

O período em modo ocioso para os dias 2 e 3 é significativo, o que se deu, segundo o relatório da Williams (BURKE, 2012) devido a atrasos e imprevistos na mina de Conceição. No total, o modo ocioso foi utilizado em 30% do ciclo de trabalho.

6.4.2.2 Posições 1 a 8

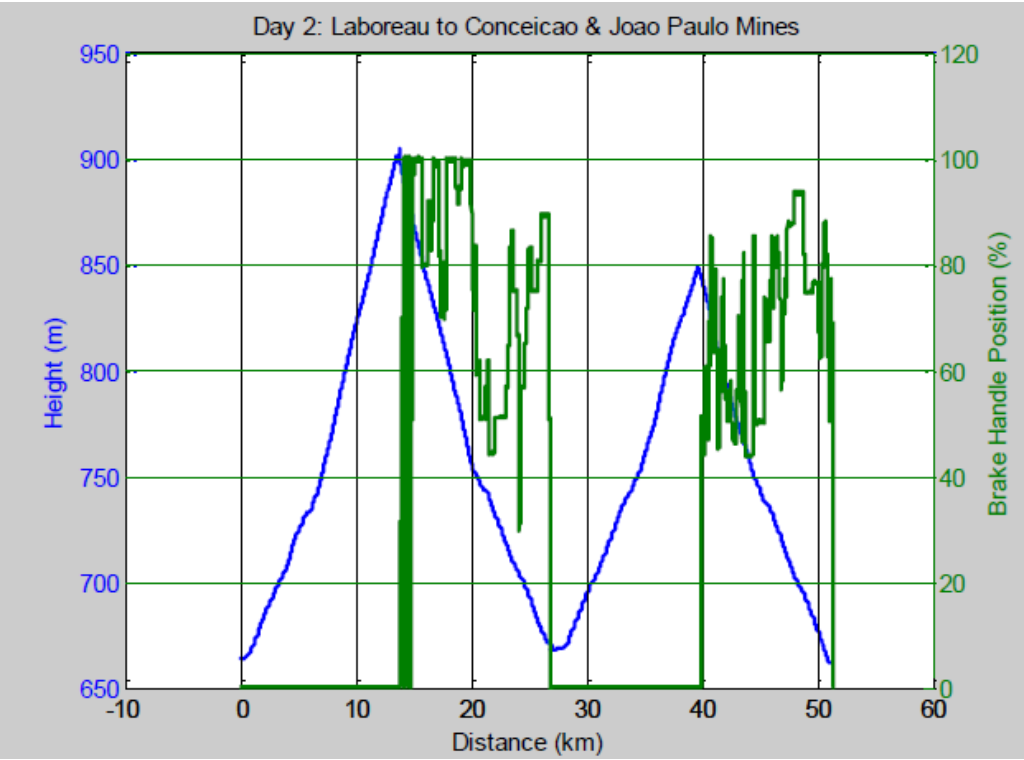
O uso prolongado da posição 8 para os primeiro e terceiro dia é evidente, sendo que nestes dias os requisitos de potência de tração da locomotiva foram maiores. Em contraste, neste mesmo período, pouco uso se fez das posições 1 e 2.

No segundo dia, quando a exigência de energia de tração foi menor, houve pouco ou nenhum uso das posições 7 e 8.

6.4.2.3 Frenagem dinâmica

Observando-se o Gráfico 6, percebe-se que a frenagem dinâmica somente foi utilizada nos dias 2 e 3. Nestes dias, a locomotiva se deslocou grande parte do seu percurso em descida, sendo necessária a regulação da velocidade através da frenagem constante. A duração da frenagem dinâmica é responsável por 12% do tempo total do ciclo de trabalho.

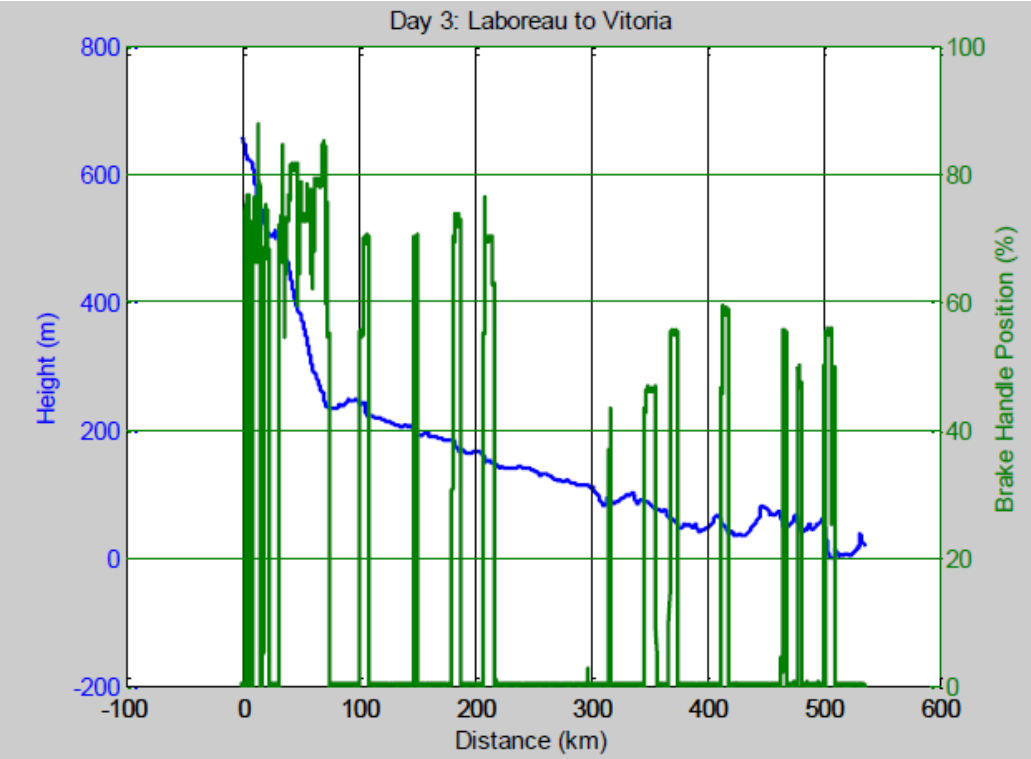
Gráfico 7 - Utilização da frenagem dinâmica (2° dia)



Fonte: BURKE, (2012).

O Gráfico 7 mostra o uso contínuo da frenagem dinâmica durante as descidas das minas de Conceição e João Paulo (segundo dia). Nestes casos, o freio dinâmico é aplicado continuamente por mais de 33,7 e 30,3 minutos respectivamente.

Gráfico 8 - Utilização da frenagem dinâmica (3° dia)



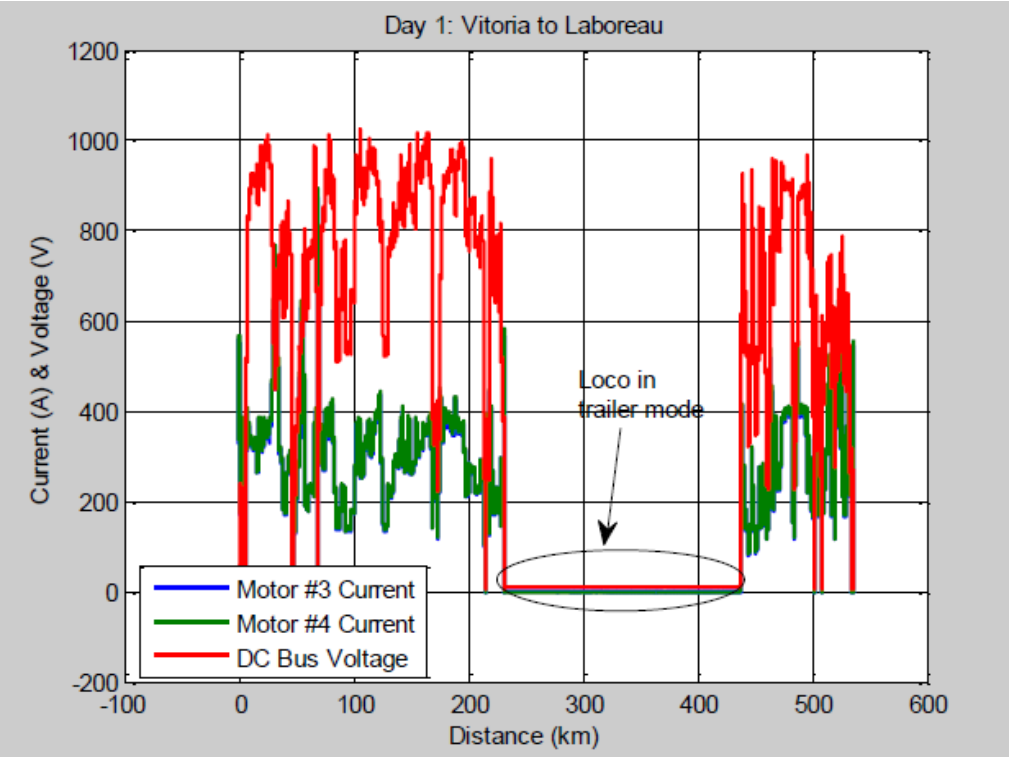
Fonte: BURKE, (2012).

Conforme mostrado no Gráfico 8, há um total de 16 casos de frenagem dinâmica no terceiro dia.

6.4.3 Corrente de tração e de frenagem dinâmica

Conforme relatado nos itens 3 e 4, em locomotivas, pelas características de torque alto em baixas velocidades, os motores com ligação série são mais apropriados e, portanto, mais utilizados. Durante a frenagem, o motor é ligado de forma independente, com a excitação de campo separada da armadura.

Gráfico 9 - Corrente e tensão no motor de tração (1° dia)

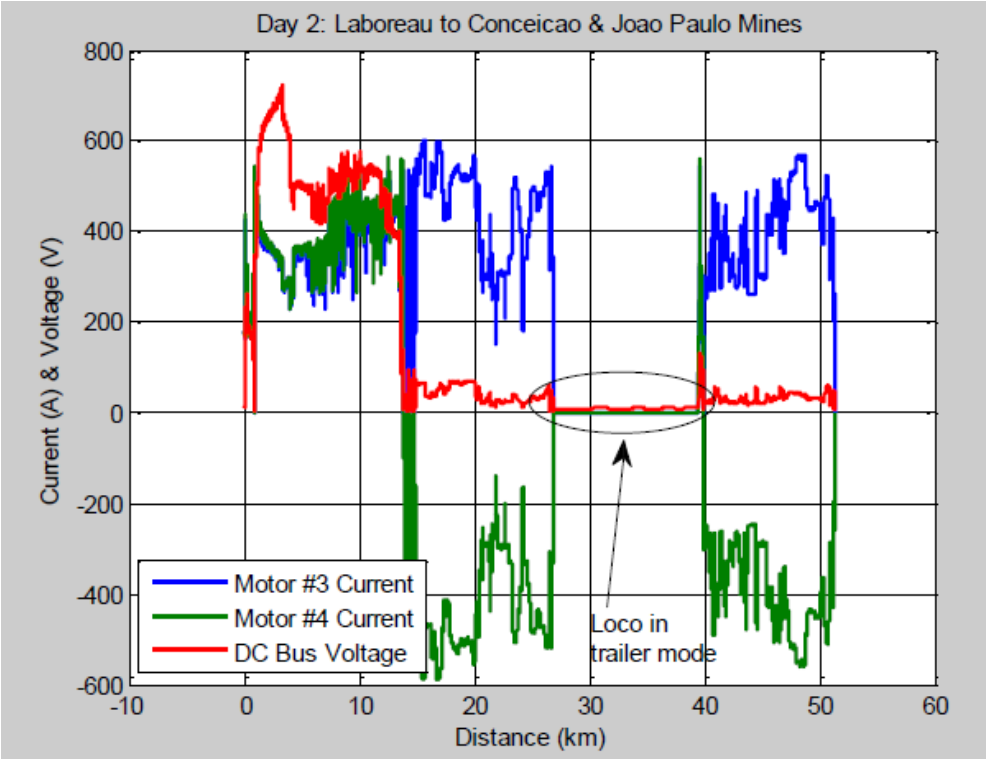


Fonte: BURKE, (2012).

O Gráfico 9 mostra o perfil de corrente no motor de corrente contínua e tensão no primeiro dia. Têm-se dois motores (motor #3 e motor #4), os quais funcionam como um par (em série) durante a frenagem dinâmica, enquanto na tração, operam em paralelo. Isto significa que a direção do fluxo de corrente é a mesma em condições de tração e revertida no motor #4 durante a frenagem.

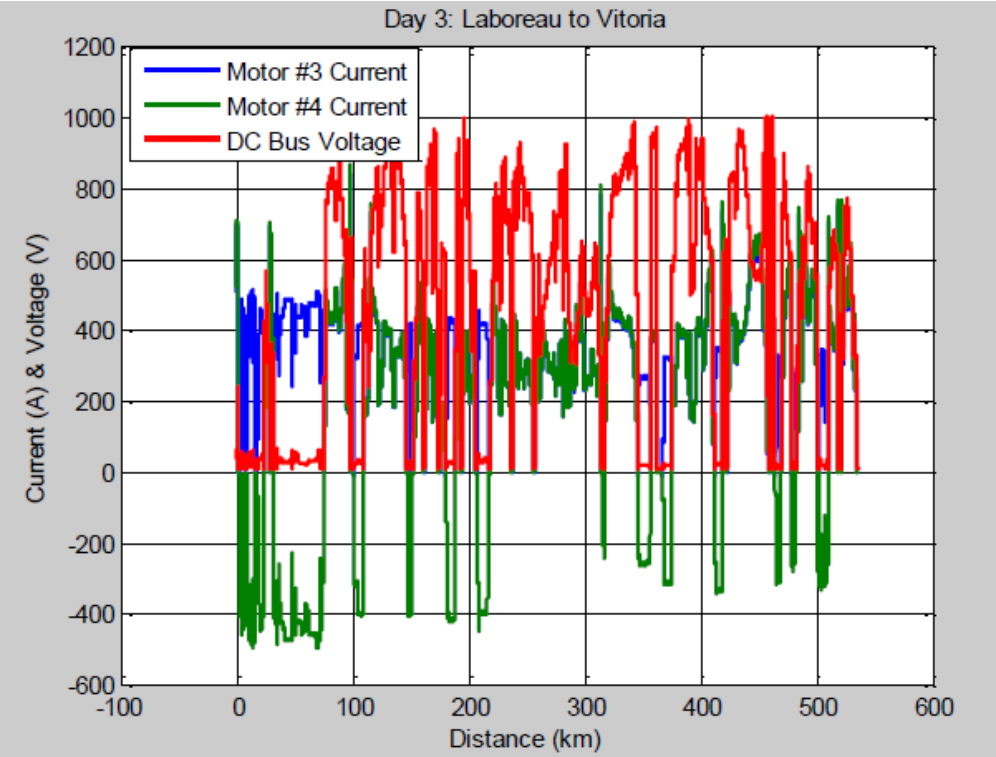
Pode-se observar no Gráfico 9 que a corrente através do motor # 3 e # 4 são praticamente idênticas, conforme esperado. O Gráfico 9 e o Gráfico 10 apresentam os mesmos sinais para os dias 2 e 3. Os casos de frenagem dinâmica podem ser visto claramente quando as correntes do motor de tração bifurcam devido a uma reversão de corrente através do motor de tração # 4. No entanto as correntes absolutas são quase idênticas em condições de frenagem dinâmica, o que é de se esperar, uma vez que os motores # 3 e # 4 são ligados em série nestas condições.

Gráfico 10 - Corrente e tensão no motor de tração (2° dia)



Fonte: BURKE, (2012).

Gráfico 11 - Corrente e tensão no motor de tração (3° dia)



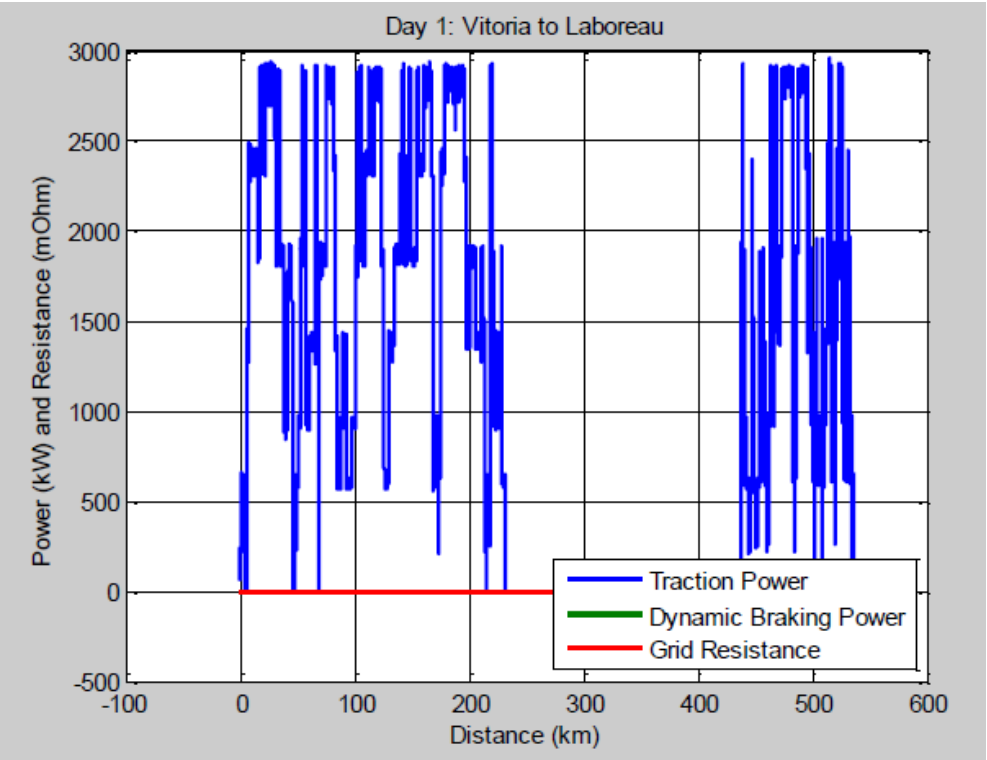
Fonte: BURKE, (2012).

Outro fato a se observar é que, durante a frenagem dinâmica, estando o motor funcionando como gerador, é a tensão por ele gerada que impulsiona a corrente pela grade de resistores, e não a tensão do barramento DC. Sob estas condições, a tensão CC é regulada para controlar a corrente na bobina de excitação do motor. Isto é evidente nos Gráfico 10 e Gráfico 11, nos quais se pode observar uma baixa tensão do barramento CC durante as frenagens dinâmicas.

6.4.4 Potência na tração e na frenagem dinâmica

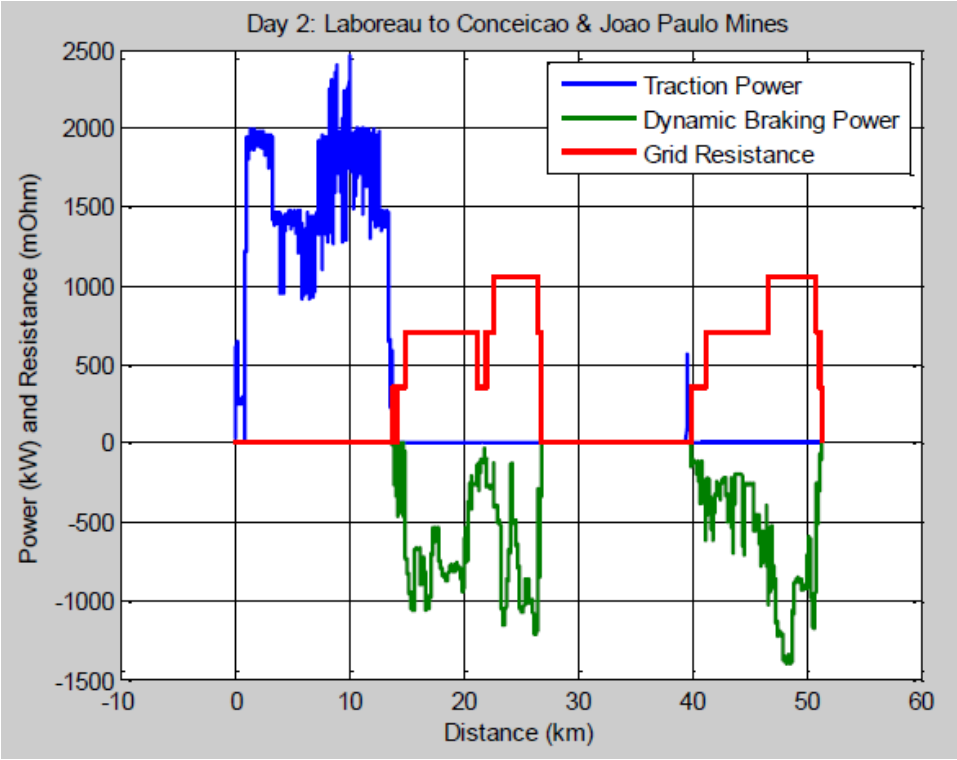
As potências de tração e de frenagem dinâmica foram calculadas a partir da corrente e da tensão do barramento CC. Nos gráficos 12 a 14, são mostradas estas potências, além do valor dinâmico instantâneo da grade de resistência.

Gráfico 12 - Potência de tração e de frenagem dinâmica (1° dia)



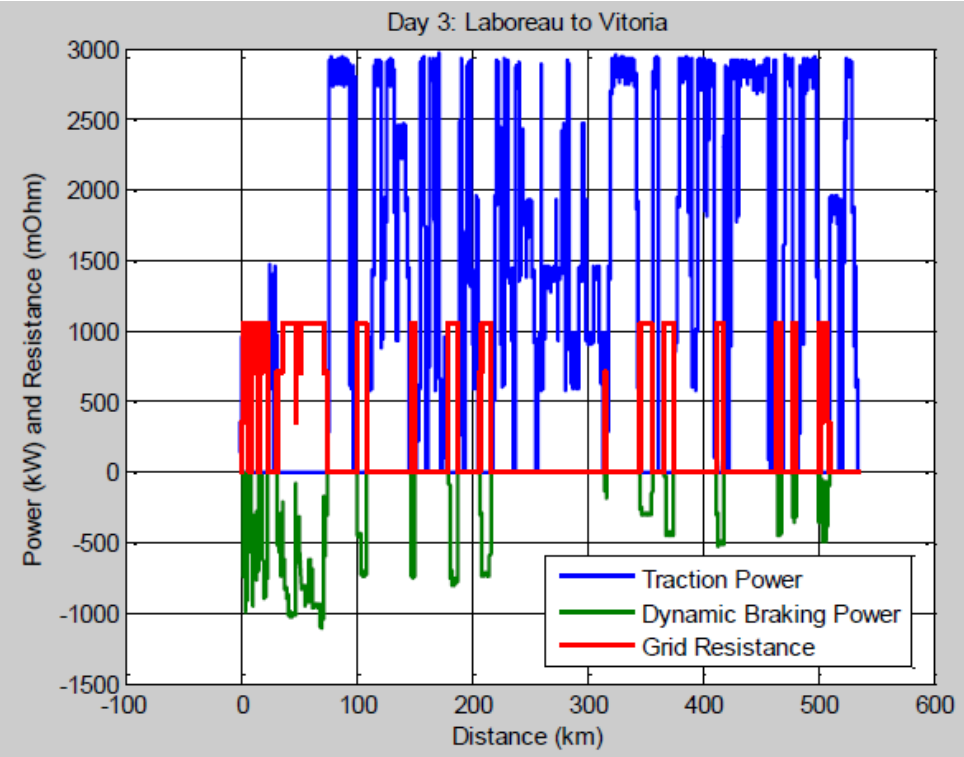
Fonte: BURKE, (2012).

Gráfico 13 - Potência de tração e de frenagem dinâmica (2° dia)



Fonte: BURKE, (2012).

Gráfico 14 - Potência de tração e de frenagem dinâmica (3° dia)



Fonte: BURKE, (2012).

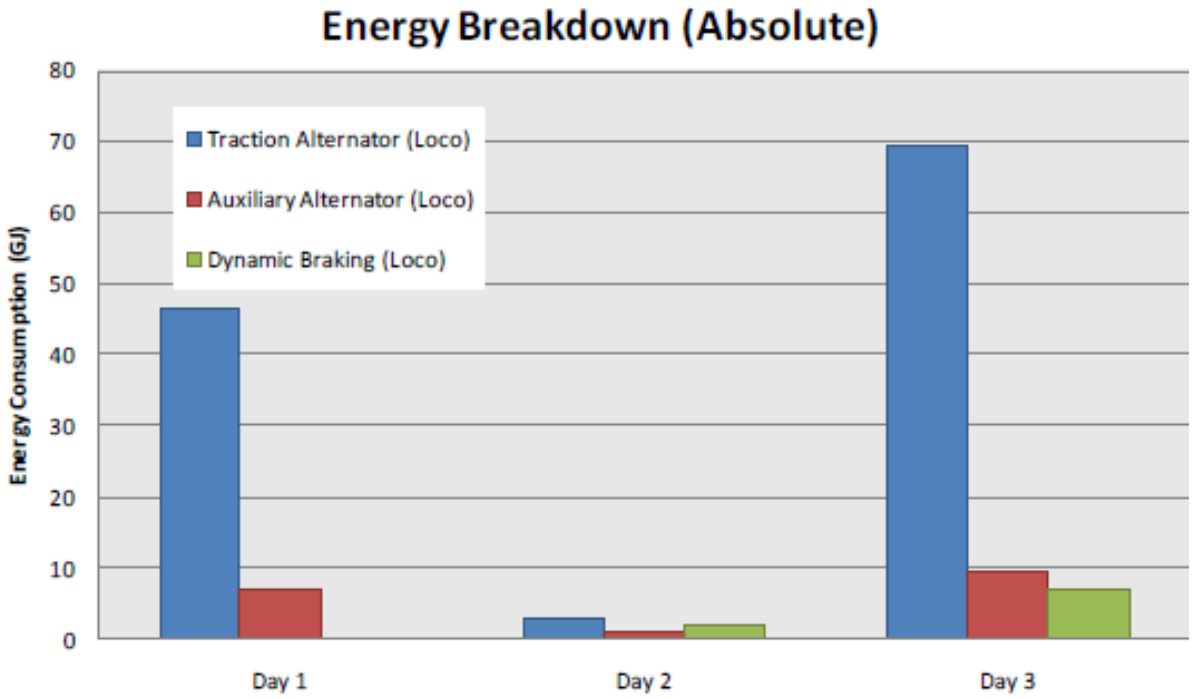
A potência máxima de tração é cerca de 2.900 kW, estando a alavanca do acelerador na posição 8 (Gráfico 12 ao Gráfico 14). Isto vai ao encontro com as especificações dos motores de corrente contínua, que possuem potência nominal de 360 kW cada. Como a locomotiva possui um total de 8 motores, tem-se 2880 kW.

A potência máxima de frenagem é de aproximadamente 1.365 kW no segundo dia, e de 1.100 kW no terceiro dia. Em ambos os casos, a potência máxima de frenagem dinâmica ocorreu quando a resistência da rede estava em seu máximo, que é de 1.050 mΩ. É evidente que não está sendo utilizada a capacidade de potência nominal do motor CC durante a frenagem dinâmica.

6.4.5 Consumo de energia

Ao realizar a integração numérica do fluxo de potência calculado, pode-se determinar o consumo total de energia pela locomotiva. O Gráfico 15 mostra o total de consumo de energia na entrada do alternador de tração, na entrada do alternador auxiliar e no freio dinâmico. Para maior clareza, as condições de modo ocioso foram removidas antes de se calcular o consumo de energia.

Gráfico 15 - Consumo de energia pela locomotiva



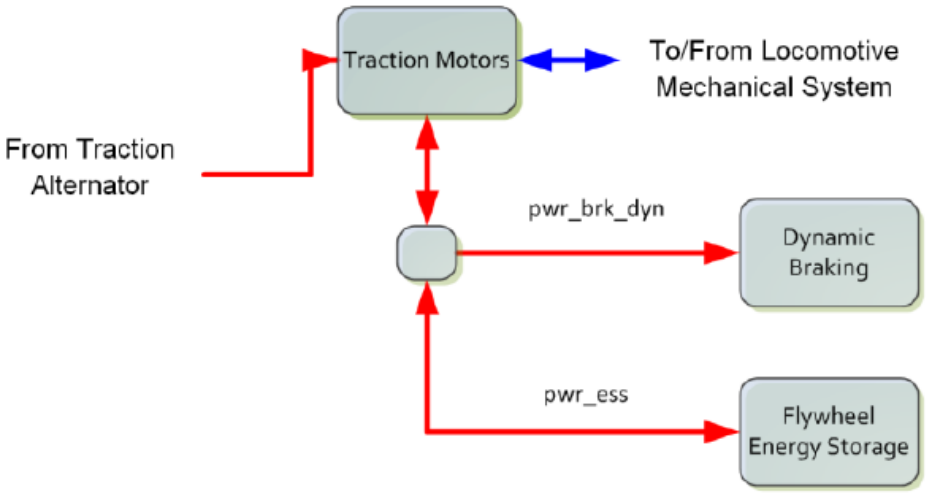
Fonte: BURKE, (2012).

A proporção da quantidade de energia da frenagem dinâmica em relação ao total de energia para a tração e alternador auxiliar é de 6,5%. Isto significa que, para os efeitos de frenagem regenerativa, um máximo de 6,5% do total de energia fornecida pode ser regenerada.

6.4.6 Frenagem regenerativa

Para analisar os efeitos da frenagem regenerativa na economia de energia, foi considerado a adição de um Flywheel (FESS1) no esquema de fluxo de potência da locomotiva, conforme demonstrado na Figura 33.

Figura 33 - Esquemático do fluxo de potência da locomotiva com a adição de um Sistema de Armazenamento de Energia *Flywheel* (FESS)



Fonte: BURKE, (2012).

No esquemático da Figura 33, a potência da frenagem dinâmica é direcionada para a FESS ao invés da grade de resistores, a menos que: a) a potência é maior do que o FESS suporta no caso dele estar saturado, sendo assim a parcela da potência que o FESS não suporta é redirecionada para a grade de resistores; ou b) o estado de carga do FESS é de 100%, de forma que toda a potência será direcionada para os resistores.

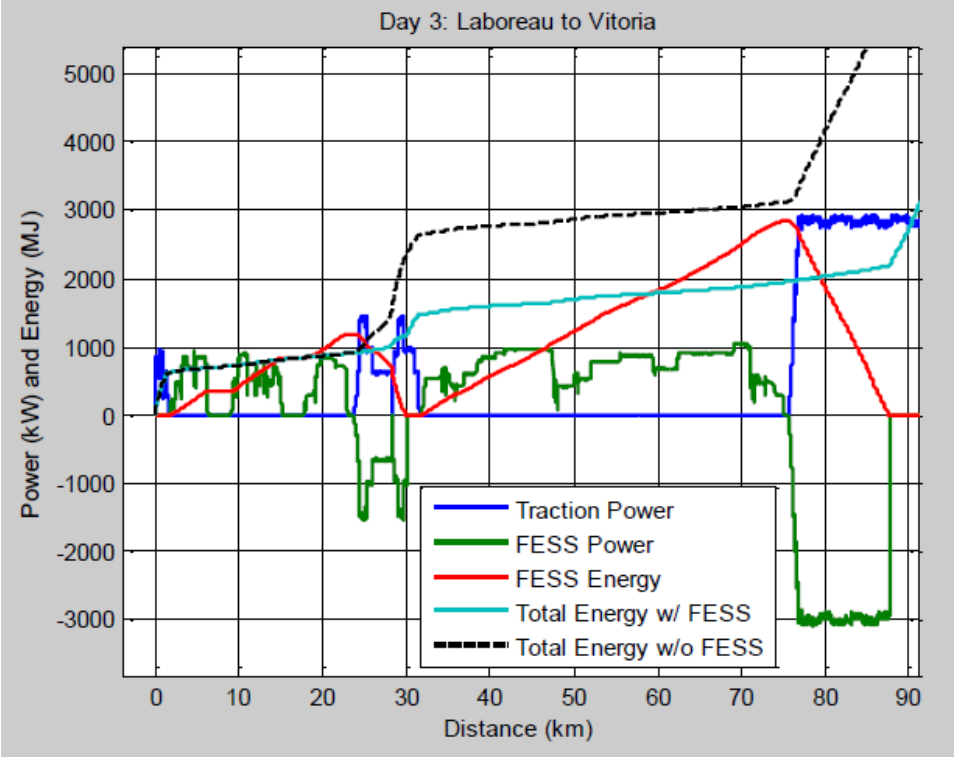
Durante as condições de tração, o FESS fornece energia para suportar a demanda e tração do motor até que sua carga esteja em 0%., caso em que toda a potência para a tração deverá ser fornecida pelo alternador de tração. Para efeitos deste estudo de viabilidade, será assumida uma eficiência de 95% para o FESS.

---

[1] FESS, do inglês *Flywheel Energy Storage System*

A análise inicial foi feita considerando-se que não há limites no FESS em termos de potência máxima e capacidade de armazenamento de energia (BURKE, 2012). O Gráfico 15 mostra a potência e a energia armazenada nos 90 primeiros quilômetros do terceiro dia. Uma potência positiva no FESS indica que a potência flui para a FESS durante a frenagem dinâmica (regeneração). Uma potência negativa no FESS indica que ela flui para fora do FESS durante a tração.

Figura 34 - Fluxo de potencia e estado de energia no FESS (3° dia), considerando que não há limite para potência máxima e energia máxima no FESS



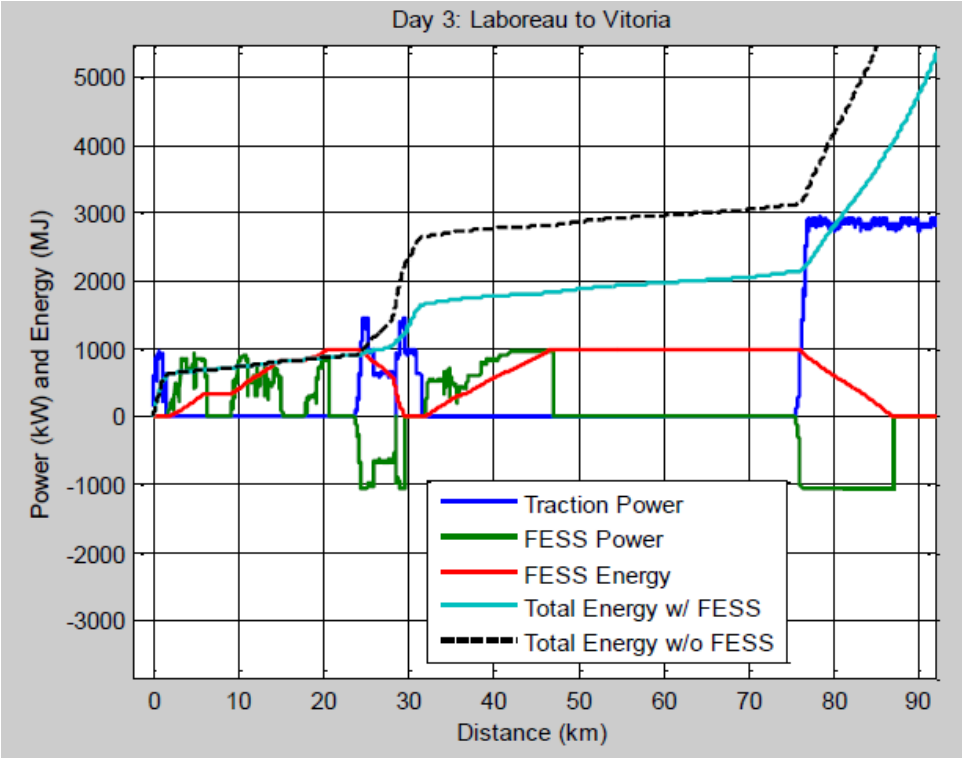
Fonte: BURKE, (2012).

Observa-se que o aumento e a diminuição da energia do FESS variam conforme se realiza a frenagem regenerativa ou o FESS passa a atuar auxiliando na tração. A energia total fornecida pelo motor de tração e os alternadores auxiliares também está representada graficamente no Gráfico 15, podendo-se comparar a energia total que seria fornecida sem o FESS e com o FESS. Observa-se que a energia total que o motor de tração e os alternadores auxiliares precisam fornecer sem o FESS (Total Energy w/o FESS) é significativamente maior do que a energia fornecida por eles quando se incorpora ao sistema o FESS (Total Energy FESS).

Inserindo-se limites máximos de armazenamento de potência e de energia no FESS, têm-se os resultados mostrados no Gráfico 16. Observa-se que, comparando os resultados do Gráfico 16 com os do Gráfico 15, ao se considerar a saturação do FESS, observa-se que a redução do Total de Energia com o FESS em relação ao Total de Energia sem o FESS é menor quando há a saturação deste. A partir do quilômetro 50, fica claro no Gráfico 16 que a energia total sem o FESS é maior do que o observado no Gráfico 15.

Gráfico 16 - Fluxo de potencia e estado de energia no FESS (3° dia), considerando no FESS:

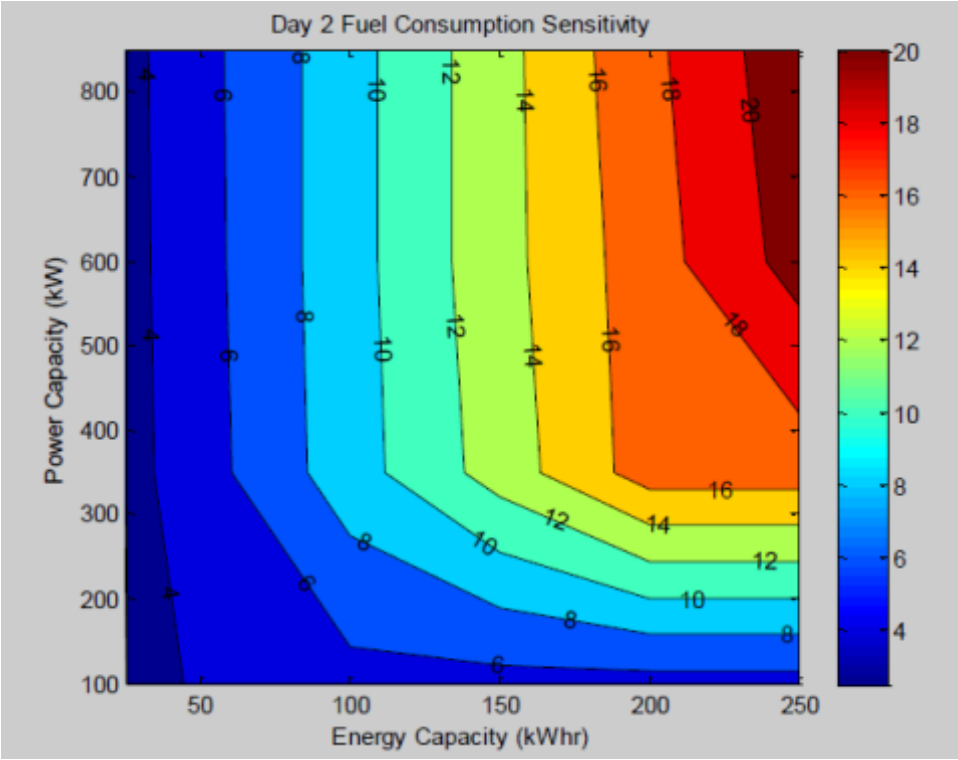
P_{max} = 1000 kW; e E_{max} = 1000 MJ



Fonte: BURKE, (2012).

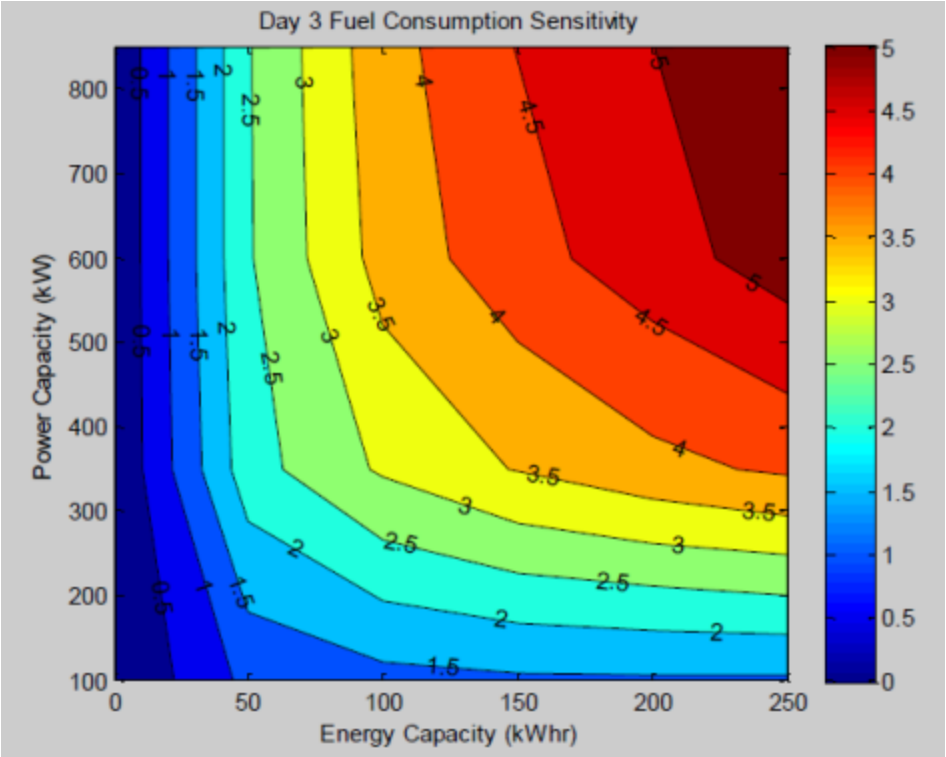
Por fim, foi analisado o efeito sobre o consumo de combustível da utilização da frenagem regenerativa com o FESS (BURKE, 2012). Os resultados foram apresentados em gráficos de contorno (Gráfico 17 e Gráfico 18) para os segundo e terceiro dias respectivamente (o primeiro dia não foi considerado por não ter ocorrido frenagem dinâmica). Os contornos representam a redução no consumo de combustível como uma porcentagem do total de combustível consumido pela locomotiva no dia em análise.

Gráfico 17 - Porcentagem de combustível economizado com o FESS (2° dia)



Fonte: BURKE, (2012).

Gráfico 18 - Porcentagem de combustível economizado com o FESS (3° dia)



Fonte: BURKE, (2012).

Em ambos os gráficos, a redução no consumo de combustível foi proporcional ao aumento da capacidade de armazenamento de energia e de potência do FESS. Entretanto, no segundo dia (Gráfico 17) pode-se observar que há pouco benefício quando a capacidade de potência supera 400 kW, a menos que a capacidade de armazenamento de energia seja superior a 200 kWh.

No terceiro dia, os benefícios do consumo de combustível são em grande parte independente da capacidade de potência quando os níveis de capacidade de armazenamento de energia são menores que 50 kWhr.

No terceiro dia, a porcentagem de redução no consumo de combustível foi muito menor que no segundo dia. Tal fato se dá devido ao maior número de acionamento da frenagem dinâmica no segundo dia. Entretanto, em termos absolutos, a economia foi maior no terceiro dia, conforme demonstrado na Tabela 2 (BURKE, 2012).

Tabela 2 – Economia de combustível para locomotiva com FESS de 100 kWhr e 500 kW

Consumo de Combustível (l)	**Dia 1**	**Dia 2**	**Dia 3**	**Total**
Padrão	3.932	297	5.742	9.970
com FESS	3.932	270	5,537	9.738
Economia absoluta (l)	0	27	205	233
Economia percentual (%)	0	9,20%	3,60%	2,30%

Fonte: BURKE, (2012).

A Tabela 2 mostra a economia de combustível prevista quando se utiliza um FESS capacidade de 100 kWh / 500 kW na locomotiva. Pode-se observar que o total de combustível economizado durante o ciclo de trabalho completo é de 233 litros, que equivale a 2,3% do total de combustível consumido.

7 Conclusões

Analisando-se as tecnologias existentes para armazenamento de energia geral, verifica-se que as baterias se mostram promissoras, pois apresentam uma tecnologia num estágio mais avançado do que alternativas como os supercapacitores, capacitares híbridos, FLYWHEELS e células de combustível.

Entretanto, há um grande número de diferentes tipos de baterias, em vários estágios de desenvolvimento e comercialização. Vários projetos têm demonstrado que são economicamente competitivos para aplicações de armazenamento de energia. Em função da resposta rápida das baterias, são adequadas para aplicações de hibridização de locomotivas.

Entretanto estas baterias precisam mostrar que atendem à necessidade de um longo ciclo de vida, o que é ainda um desafio para muitas tecnologias de bateria disponíveis.

Baterias irão competir com outras tecnologias recém-comercializadas como FLYWHEELS para modelos de curta duração. Para aplicações com maiores durações, um custo reduzido é o principal requisito. A tecnologia de uma bateria única ainda está para surgir, para se tomar provavelmente um líder de mercado para muitas aplicações potenciais para o armazenamento de energia. Pesquisas e desenvolvimentos provavelmente irão melhorar ainda mais o desempenho das baterias e reduzir os custos de diversas tecnologias.

Apesar de ser uma tecnologia ainda cara, o Flywheel desponta como uma solução bastante adequada para hibridização de veículos, sendo atualmente utilizado por diversas montadoras. Seus baixos custos de manutenção e operação podem compensar o alto preço da implantação. Além disso, possuem estruturas compactas, o que permite sua colocação em locais de pouco espaço, e pode ser carregado e descarregado rapidamente.

No estudo de caso realizado pela empresa Williams (DUBEY, 2001), foi considerado a instalação na locomotiva de um Sistema de Armazenamento de Energia por meio do Flywheel. Uma proposta para trabalhos futuros seria estender esta análise para outras soluções de armazenamento de energia.

Para uma análise ampla da viabilidade de se implantar um sistema Flywheel nas locomotivas da VALE com o intuito de se aproveitar a energia gerada na frenagem dinâmica para a tração,

fez-se um estudo do ciclo de trabalho da locomotiva D9-40BBW. A operação desta locomotiva na Estrada de Ferro Vitória a Minas foi mensurada com sucesso durante três dias consecutivos, nos quais ela percorreu um total de 1.110 km durante 40 horas de trabalho. Os dados adquiridos permitiram uma análise detalhada do fluxo de potência e da energia utilizada pela locomotiva.

O principal objetivo do estudo foi determinar o efeito do Flywheel na economia de energia de tração e consequentemente no consumo de combustível da locomotiva.

O total de energia utilizada (ou dissipada) durante a frenagem dinâmica representa uma pequena parcela da energia total fornecida ao motor de tração e auxiliares. Além disso, há menos de 20 casos de frenagem dinâmica com durações relativamente pequenas. Como conclusão, pode-se observar que o ciclo de trabalho das locomotivas requer um sistema de armazenamento de energia muito grande. Para um Sistema de Armazenamento de Energia Flywheel de 100 kWh / 500 kW, foi prevista uma economia de energia de 233 litros, o que representa uma redução de 2,3% no consumo total de combustível.

O desafio agora é mensurar economicamente a viabilidade de implantação deste sistema, realizando os cálculos de custo de oportunidade.

REFERÊNCIAS

BORBA, J. L. Tração Ferroviária: Sistemas de transmissão elétrica. **Notas de aula**, Vitória, 2009.

BORBA, J. L. **Baterias Tracionárias**. Vitória: [s.n.], 2010.

BORBA, J. L. **Motores Elétricos de Tração**. [S.l.]: [s.n.], 2013.

BOYES, J. D.; CLARK, N. H. **Technologies for Energy Storage. Flywheels and Super Conducting Magnetic Energy Storage**. Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle: IEEE. 2000. p. 1548 - 1550.

BURKE, M. **Project Phoenix Final Report**. Williams Advanced Engineering. Vitória, p. 32. 2012. (TR004-01).

DUBEY, G. K. **Fundamentals of Electrical Drives**. 2nd. ed. Pangbourne: Alpha Science International Limited, 2001.

EMPORIS. **Vitória**, 2013. Disponivel em: <http://www.emporis.com/city/vitoria-brazil>. Acesso em: 25 jul. 2013.

EMPORIS. **São Paulo**, 2013. Disponivel em: <http://www.emporis.com/city/saopaulo-brazil>. Acesso em: 25 jul. 2013.

FITZGERALD, A. . E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. **Electric Machinery**. 6th. ed. New York: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2002.

HUTT, L.; VOLLRATH, D.; CARREY, C. **Modern VVVF Drives**, 2014. Disponivel em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=11&cad=rja&ved=0CHwQFjAK&url=http%3A%2F%2Fwww.elevatordrives.com%2F~%2Fmedia%2FElevat

or%2FEV%2520additional%2520materials%2Fmodern_vvvf_drives.pdf&ei=LH_uUrKLNYi2kAeb-4GAAg&usg=AFQjCNHtajity>. Acesso em: 02 fev. 2014.

INVESTIRE-NETWORK. **Investigation on Storage Technologiesfor Intermittent Renewable Energies:** Evaluation and recommended R&D strategy, 2013. Disponivel em: <http://pt.scribd.com/doc/52889434/flywheel-report>. Acesso em: 22 Out. 2013.

NGK. **NGK**, 2014. Disponivel em: <http://www.ngkntk.com.br/automotivo/en/>. Acesso em: 20 julho 2014.

PERIN, A. J. Modulação PWM, Florianópolis, 2013. Disponivel em: <http://pt.scribd.com/doc/157303269/PWM-apostila-UFSC>. Acesso em: 2013 jul. 25.

QING-ZHANG, C. **Research on the lead-acid battery and Ultra-capacitor Energy Storing System of Motor Vehicles Regenerative Braking**. IEEE International Conference. Zhangjiajie: IEEE. 2012. p. 59 - 62.

SEN, P. C. **Principles of Electrical Machines**. 2nd. ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.

TUZUKI, L. T. **Sistema de Armazenamento de Energia para Locomotivas Diesel/Elétrica Híbrida**. VALE S.A. Vitória, p. 25. 2012. (13322).

VYCON. **Flywheel Technology**, 2013. Disponivel em: <http://vyconenergy.com/pages/flywheeltech.htm>. Acesso em: 25 Jul. 2013.

WILLIAMS. **Williams Hybrid Power Flywheel - How It Works**, 2013. Disponivel em: <http://www.williamsf1.com/Advanced-Engineering/Media/Videos/Williams-Hybrid-Power-Flywheel---How-it-Works/>. Acesso em: 25 jul. 2013.

YOONG, M. K. et al. **Studies of Regenerative Braking in Electric Vehicle**. IEEE Conference. Petaling Jaya: IEEE. 2010. p. 40 - 45.