

MODELAGEM HÍBRIDA DE UM SISTEMA DE REGENERAÇÃO DE ENERGIA DE FREIAGEM EM LOCOMOTIVAS DIESEL-ELÉTRICAS

JUNIO C. DE AMORIM*, JOSÉ L. F. SALLES*, WALBERMARK M. DOS SANTOS*

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo
Av. Fernando Ferrari, 514, Vitória, ES, Brasil, CEP 29075-053

E-mails: junio.amorim@aluno.ufes.br, jleandro@ele.ufes.br,
walbermark.santos@ufes.br

Abstract — In Brazil, the diesel-electric locomotives are used in the majority of railroads, where a diesel engine provides kinetic energy for an electric generator that feed the traction engines. During the braking process, the traction motors operate as generators, and the kinetic energy of the locomotive is dissipated in the form of heat in resistor banks, process known as dynamic braking. However, this energy could be harnessed, for example, to feed the auxiliary loads of the locomotive. Thus, this work developed a computational model for regenerating the energy produced by braking by the locomotive to feed its auxiliary loads, such as air conditioning, air compressor, fans and blowers. For this, were modelled the traction motors as generators, the main loads fed by the auxiliary circuit and an energy regeneration system. The developed models are represented by difference equations and logic, which were simulated using the Hysdel Toolbox of Matlab. Were evaluated three different types of accumulators, one formed by supercapacitors and batteries, another formed exclusively by batteries and a third formed exclusively by supercapacitors, highlighting the model formed exclusively by batteries, that presented an economy of 8,477 L of diesel per year by locomotive.

Keywords — Analysis, batteries, regenerative braking, modelling, engines, hybrid systems, rail transportation.

Resumo — No Brasil, as locomotivas do tipo diesel-elétricas são utilizadas na grande maioria das ferrovias, onde um motor a diesel fornece energia cinética para um gerador elétrico que alimenta os motores de tração. Durante o processo de frenagem, os motores de tração operam como geradores, e a energia cinética da locomotiva é dissipada na forma de calor em bancos de resistores, processo conhecido como frenagem dinâmica. Todavia, esta energia poderia ser aproveitada, por exemplo, para alimentar as cargas auxiliares da locomotiva. Desta forma, neste trabalho foi desenvolvido um modelo computacional de regeneração da energia produzida em frenagem pela locomotiva para alimentar suas cargas auxiliares, tais como ar condicionado, compressor de ar, ventiladores e sopradores. Para isso, foram modelados os motores de tração como geradores, as principais cargas alimentadas pelo circuito auxiliar e um sistema de regeneração de energia. Os modelos desenvolvidos são representados por equações à diferenças e lógicas, as quais foram simuladas utilizando o Toolbox Hysdel do Matlab. Foram avaliados três tipos diferentes de acumuladores, um formado por supercapacitores e baterias, outro formado exclusivamente por baterias e um terceiro formado exclusivamente por supercapacitores, destacando-se o modelo formado exclusivamente por baterias, que apresentou uma economia de 8.477 L de diesel por ano por locomotiva.

Palavras-chave — Análises, baterias, frenagem regenerativa, modelagem, motores, sistemas híbridos, transporte ferroviário

1 Introdução

Sistemas híbridos são sistemas dinâmicos cujo comportamento é determinado pela interação de dinâmicas descritas por equações diferenciais ou à diferenças, e por relações algébricas descritas por variáveis lógicas (Bemporad et al., 2005). Um sistema híbrido contém dois tipos distintos de componentes: um formado por uma coleção de sistemas dinâmicos, cada um representando um modo do sistema; e um componente formado por um autômato ou sistema baseado em regras, cuja a finalidade é o chaveamento entre os sistemas dinâmicos, (Gudwin e Zuben, 1998).

Dentre as várias subclasses de sistemas híbridos, destaca-se o Autômato Híbrido Discreto (DHA) que é a junção de uma máquina de estados finitos com um sistema afim por partes (SAS), apresentado na Figura 1. A conexão entre estes dois blocos é realizada por meio de um gerador de eventos lógicos (EG) e um seletor de modo (MS). O gerador de eventos gera eventos conforme regras pré-estabelecidas, alterando conforme as entradas do sistema e o estado

da máquina de estado. O seletor de modo seleciona a equação diferencial a ser utilizada no sistema afim por partes, de acordo com o estado, as entradas e os eventos.

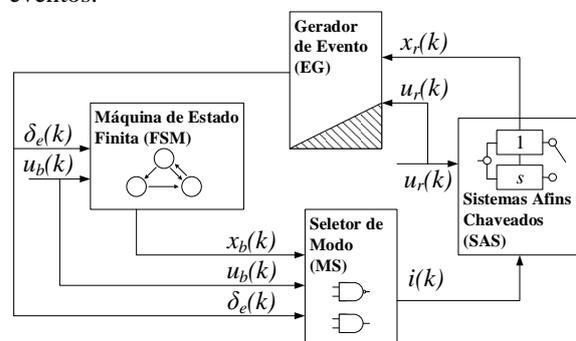


Figura 1. Autômato Híbrido Discreto (Torrissi e Bemporad, 2004)

Sistemas de regeneração de energia de frenagem em veículos elétricos possuem características semelhantes ao DHA, observando-se que a dinâmica da energia elétrica armazenada e do consumo de energia do veículo dependem do mesmo está freando ou não (Lv et al., 2015). Quando o veículo está freando, os motores de tração funcionam como gerador elétrico, alimentando os acumuladores e quando o veículo

acelera, os acumuladores se descarregam alimentando os circuitos elétricos do veículo.

Nas locomotivas diesel-elétricas, a tração nas rodas é realizada por motores de corrente contínua, que funcionam também como gerador durante a frenagem da composição.

Durante a frenagem, os motores de tração operam como geradores elétricos e a energia produzida é dissipada em um banco de resistores (processo conhecido como frenagem dinâmica), conforme ilustra a Figura 2. Nesta configuração, os enrolamentos de campos dos motores de tração são ligados em série e alimentados pelo gerador principal. As armaduras são agrupadas em pares, estes pares são ligados em série e são utilizadas para alimentar uma resistência da grade de freio dinâmico, dissipando a energia produzida pelos motores de tração. Esta energia dissipada nos resistores se opõe à energia cinética de movimentação da locomotiva, ocasionando o freio motor.

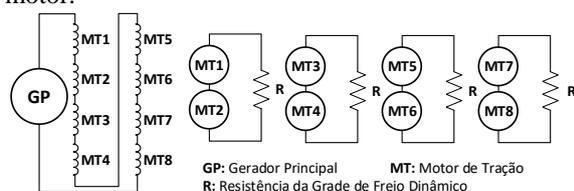


Figura 2. Ligação dos Motores de Tração em Frenagem Dinâmica

A eficiência energética nas locomotivas diesel-elétricas é um fator importante, mas, ao contrário das locomotivas exclusivamente elétricas, as opções para regeneração da energia produzida pelas frenagens são limitadas, (Boora et al., 2007). Todavia, a não regeneração da energia produzida na frenagem dinâmica, reduz a eficiência energética destas locomotivas de 10 a 20%, (Agenjos et al., 2009).

Há na literatura diversos estudos sobre regeneração da energia produzida na frenagem dinâmica em locomotivas diesel-elétricas, merecendo destaque o realizado por Lawson e Cook (1979), que conclui ser viável a regeneração de energia produzida em frenagem dinâmica utilizando catenárias.

Em Agenjos et al. (2009) é realizado a comparação entre a quantidade de energia utilizada pela locomotiva com a quantidade de energia produzida pela frenagem dinâmica, sendo avaliado o consumo de uma locomotiva em uma ferrovia específica, examinado o comportamento em dois trechos distintos. Entretanto, não é proposto nenhum modelo, além de desconsiderar as limitações de tamanho dos acumuladores na locomotiva.

Em Shukla, Burse e Shrivastava (2012) foi montado um protótipo de regeneração de energia de frenagem dinâmica em uma locomotiva de pequeno porte. No trabalho, a energia regenerada é utilizada a posteriori nos próprios motores de tração. Contudo, não foi apresentada a eficiência alcançada com a regeneração de energia.

Moraes et al. (2019) propôs um sistema de regeneração de energia de frenagem dinâmica utilizando conversores em conjunto com baterias e supercapaci-

tores. Neste trabalho, é proposto a regeneração da energia de frenagem e posterior utilização para alimentar o circuito auxiliar da locomotiva, sendo o circuito de baixa potência. Conclui-se no trabalho que é possível a regeneração da energia de frenagem dinâmica. Contudo, não foi realizado nenhum estudo sobre a eficiência do sistema proposto e também não foi realizado a avaliação da melhor configuração de acumuladores para o sistema.

Destarte, este artigo tem como objetivo apresentar a modelagem de um sistema de regeneração de energia de frenagem dinâmica de locomotivas diesel-elétricas, similar ao proposto por Moraes et al. (2019) por meio de um sistema híbrido. A eficiência de tal sistema será analisada com dados reais de viagens, e comparado com outras formas de acumuladores, propondo aquele de melhor capacidade. Na seção 2 apresentam-se três tipos de modelos de sistemas de regeneração de energia: um constituído por um banco de baterias mais supercapacitores, o outro formado somente por supercapacitores, e outro constituído só de baterias. Na Seção 2 são modelados os motores de tração e as principais cargas do circuito auxiliar da locomotiva modelo Dash 9. Resultados de simulação e a discussão da eficiência dos acumuladores são apresentados na Seção 3. Na Seção 4 é feita a conclusão do artigo.

2 Modelagem do Sistema de Regeneração de Energia de Frenagem Dinâmica

Para estudo do processo de regeneração de energia, primeiramente é necessário modelar a fonte de energia, ou seja, os motores de tração operando como geradores, os acumuladores de energia e também as cargas alimentadas por tal sistema.

O circuito auxiliar da locomotiva alimenta todos os seus dispositivos de controle, tais como computadores, contadores, relés, lâmpadas, ventiladores, etc. Muitas destas cargas podem ser representadas por uma única carga com potência constante, pois demandam baixa potência e pouca variação do consumo quando agrupadas. Porém, uma análise individualizada deve ser feita para as principais cargas, que são: o ventilador do radiador, o compressor de ar, o soprador do alternador, os sopradores dos motores de tração e o ar condicionado.

No modelo híbrido desenvolvido no presente trabalho foram modeladas todas as principais cargas, mas por restrição de espaço, neste artigo é detalhado apenas uma das cargas. Optou-se pelo detalhamento do compressor de ar do sistema de freio, pois esta carga demanda grande potência (46,9 kW) e é muito requisitada. Portanto, esta é uma das cargas que mais contribui na variação de consumo de energia do circuito auxiliar. Os modelos e simulações foram desenvolvidos utilizando o toolbox do Matlab chamado Hysdel 2.0.6 (Bemporad, 2005). Esta ferramenta é utilizada para desenvolvimento de modelos para sistemas híbridos descritos por desigualdades matriciais

Os possíveis estados descritos nos três autômatos anteriores e os modos de operação são listados na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos Estados dos Autômatos do Sistema de Regeneração

Estado	Modo	Descrição
<i>TrCB</i>	Tração	Descarregando Supercapacitores e Carregando Baterias
<i>TrB</i>	Tração	Descarregando Baterias
<i>FrCB</i>	Freio	Carregando Baterias e Supercapacitores
<i>FrC</i>	Freio	Carregando Supercapacitores
<i>FrB</i>	Freio	Carregando Baterias
<i>Fr</i>	Freio	Dissipando energia excedente nas resistências de freio

2.2 Modelagem dos Motores de Tração em Frenagem Dinâmica

Em frenagem dinâmica, a potência de frenagem é diretamente proporcional à potência produzida pelos motores de tração. Caso não exista regeneração de energia, toda energia produzida na frenagem dinâmica é dissipada nas suas resistências. Contudo, esta resistência é variável, sendo alterada conforme atinge-se os limites de corrente de campo ou armadura dos motores de tração. A energia produzida na frenagem dinâmica também é alterada pelo potenciômetro de controle, que altera a corrente nos enrolamentos de campo dos motores de tração.

O freio dinâmico das locomotivas Dash 9 possui três valores de resistência: $0,7 \Omega$, $1,4 \Omega$ e $2,1 \Omega$. A resistência é alterada de acordo com a velocidade da locomotiva, definida pela variável v , e o sentido da variação da própria resistência, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Valor da Resistência de Freio Dinâmico

Resistência	Resistência aumentando.	Resistência diminuindo.
$0,7 \Omega$	$v \leq 18,3$	$v \leq 15,9$
$1,4 \Omega$	$18,3 < v \leq 29,7$	$15,9 < v \leq 27,3$
$2,1 \Omega$	$v > 29,7$	$v > 27,3$

A Equação (A1) do Apêndice A representa a equação de transição de estados do autômato da resistência de freio dinâmico, também conhecida como função de atualização de estados booleanos. Nesta equação, o estado 0 corresponde ao estado sem freio dinâmico e resistência de Freio Dinâmico, R_{FD} , infinita. Nos estados 1, 2 e 3, o freio dinâmico é aplicado com a Resistência R_{FD} iguais aos valores $0,7 \Omega$, $1,4 \Omega$ e $2,1 \Omega$ respectivamente.

No modelo desenvolvido, é necessário informar a velocidade, a resistência de freio dinâmico e a posição do potenciômetro de freio dinâmico, além do estado atual do autômato.

A mudança do valor da resistência ocorre com a mudança dos eventos e do freio dinâmico, F_D , que é uma entrada do modelo. Por exemplo, quando a entrada F_D é alterada do modo tração para freio dinâmico, a lógica do modelo avalia o vetor de eventos de velocidade δ_{GFD} e altera a resistência de freio dinâmico conforme tais eventos; se a velocidade neste instante for 20 km/h , por exemplo, a resistência de freio dinâmico será $1,4 \Omega$.

A potência máxima produzida pelos motores de tração em frenagem dinâmica é representada na Figura 7. Uma curva corresponde ao sentido crescente e a outra ao decrescente da resistência de freio dinâmico. Na Figura 8, a resistência decrescente foi deslocada em $2,5 \Omega$ para permitir melhor visualização.

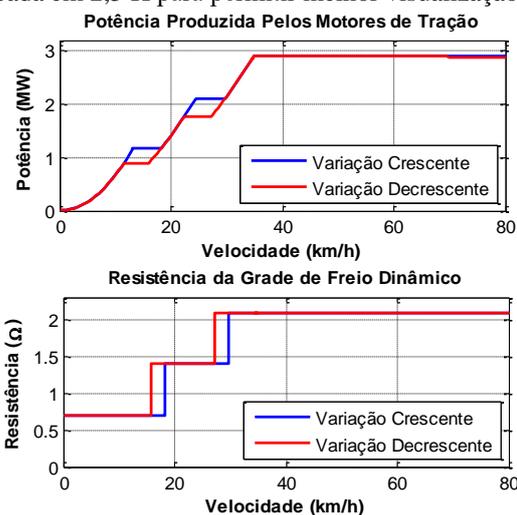


Figura 7. Potência Máxima de Frenagem Dinâmica e Resistência de Freio Dinâmico de Acordo com a Velocidade

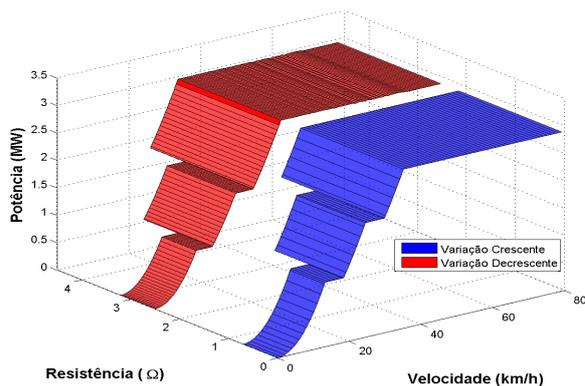


Figura 8. Potência Máxima de Frenagem Dinâmica e Resistência de Grade de Freio Dinâmico

Uma das saídas do modelo desenvolvido é a potência do freio dinâmico produzida pelos motores de tração, P_{FD} , que é representada pela Equação (1).

$$P_{FD}(t) = P_{FDM}(t) \cdot \frac{i_A(t)}{i_{AM}(t)} \quad (1)$$

Nesta equação, a corrente de armadura i_A dos motores de tração é uma das entradas e a corrente máxima de armadura dos motores de tração i_{AM} é alterada conforme a resistência da grade. i_{AM} correspondendo à 625 A para a resistência de $0,7 \Omega$, 599 A para $1,4 \Omega$ e 580 A para $2,1 \Omega$. A potência máxima

do freio dinâmico produzida pelos motores de tração, P_{FDM} , para uma determinada velocidade é definida pela Equação (2).

$$P_{FDM}(t) = \begin{cases} P_{FDC}(t) & , \text{ se } (x_{FD}(t)) \\ P_{FDD}(t) & , \text{ se } (\overline{x_{FD}(t)}) \end{cases} \quad (2)$$

Nesta equação, o estado de freio dinâmico x_{FD} é definido por (A2), veja Apêndice A. P_{FDC} e P_{FDD} representam respectivamente a potência máxima para variação crescente e decrescente da resistência de freio dinâmico, sendo descritas pelas Equações (A3) e (A4) do Apêndice A.

2.3 Modelagem da Carga Compressor de Ar

No sistema de freio pneumático da locomotiva, o ar utilizado é armazenado no reservatório principal. Este reservatório possui capacidade de 918 L e é abastecido por um compressor que mantém a pressão entre 125 Psi e 140 Psi.

A equação de mudança de estado do compressor de ar é definida em (3), onde x_c é o estado do compressor de ar, δ_{PB} corresponde a pressão do reservatório abaixo de 125 Psi e δ_{PA} a pressão acima de 140 Psi.

$$x_c(t+1) = \begin{cases} 0 & , \text{ se } (\overline{x_c(t)} \wedge \overline{\delta_{PB}}) \vee (x_c(t) \wedge \overline{\delta_{PA}}) \\ 1 & , \text{ se } (\overline{x_c(t)} \wedge \overline{\delta_{PB}}) \vee (x_c(t) \wedge \overline{\delta_{PA}}) \end{cases} \quad (3)$$

A equação que determina a variação de pressão no reservatório de ar principal, ΔP_{RP} , é dado por (4) para valores maiores ou iguais à 90 Psi.

$$\Delta P_{RP} = \left((N_{Vag} \cdot V_{RA}) / (2V_{RA}) \right) AF \quad (4)$$

Contudo, utiliza-se (5) para o cálculo da variação de pressão caso esta seja inferior à 90 Psi.

$$\Delta P_{RP} = \frac{2P_{RP} \cdot V_{RP} + N_{Vag} \cdot V_{RA} \cdot P_{RAAF}}{2V_{RP} + N_{Vag} \cdot V_{RP}} - \frac{N_{Vag} \cdot V_{RA} \cdot AF}{2V_{RP} + N_{Vag} \cdot V_{RP}} \quad (5)$$

Nas Equações (4) e (5) N_{Vag} é o número de vagões do trem, V_{RA} o volume do reservatório auxiliar dos vagões em litros, V_{RP} o volume do reservatório principal da locomotiva em litros, AF é a pressão de freio em Psi e P_{RAAF} a pressão em Psi nos reservatórios auxiliares dos vagões antes da aplicação de freio.

Utilizando o modelo desenvolvido para um trem típico com 1 locomotiva, 84 vagões, taxa de vazamento de 0,5 Psi/min e, aplicando o freio total de serviço que corresponde à 27 Psi de freio no instante 4500 s e liberando o freio no instante 5000 s, o sistema de freio apresentou o comportamento da Figura 9. O consumo do compressor ar da locomotiva é de 46,9 kW (63 hp), quando ligado.

Simulações com outras formações de trens e taxa de vazamento não são apresentadas neste artigo por limitação de espaço. O instante da aplicação do freio e o período deste aplicado não interfere no con-

sumo do compressor. Apenas o instante de alívio do freio, onde ocorre a redução de pressão do reservatório principal que altera o funcionamento do compressor de ar.

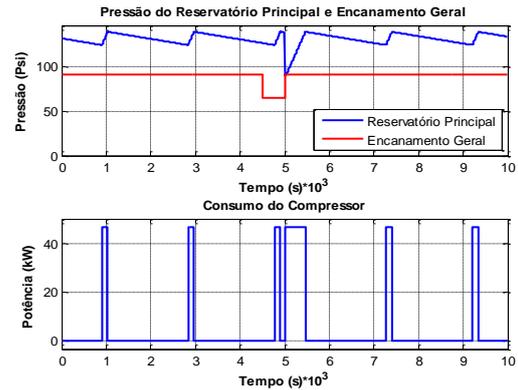


Figura 9. Simulação do Compressor de Ar para um Trem com 84 Vagões

3. Simulação dos Modelos

3.1 Energia Média Dissipada na Frota de Locomotivas sem Regeneração de Energia

Para calcular a média da energia dissipada em frenagem dinâmica pela frota de locomotivas em um 1 ano, primeiramente levantou-se a quantidade de energia produzida por cada uma das 95 locomotivas neste intervalo, por meio dos registros de eventos, conforme mostra a Figura 10.

Energia Produzida em Frenagem Dinâmica (GWh)

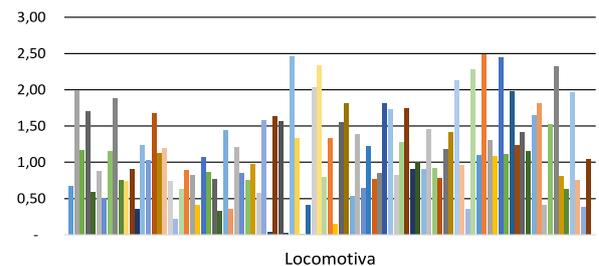


Figura 10. Energia em GWh Produzida pelos Motores de Tração em Frenagem Dinâmica por 95 Locomotivas no Intervalo de 1 ano

Em seguida calcula-se a energia média dissipada durante a frenagem dinâmica da frota de locomotivas no intervalo de 1 ano, considerando a regeneração de 100% da energia produzida em frenagem dinâmica. Neste cálculo adota-se o melhor rendimento da locomotiva, sendo aproximadamente 40,36%, obtido no ponto máximo de aceleração. Considerando o poder calórico do diesel brasileiro de 9,16 kcal/L (Petrobras, 2018), conclui-se por meio da Equação (6) que a economia de combustível por locomotiva no intervalo de 1 ano é de 105.618,51 L, caso seja regenerada 100% da energia produzida nas frenagens dinâmicas, onde Q_{LD} é a quantidade de litros e E_{kWh} é a energia em kWh.

$$Q_{LD} = \frac{E_{kcal}}{9,16 \cdot 10^3 \cdot 0,4036} = \frac{E_{kWh}}{10,6457 \cdot 0,4036} \quad (6)$$

3.2 Média da Energia Regenerada pelo Sistema

Foi desenvolvido na ferrovia em estudo um protótipo de 200 kW. Este protótipo é formado por um acumulador com 12 baterias de 64 V/260 Ah e 4 supercapacitores de 63 F/125 V, a simulação do modelo demonstrou que a energia média regenerada foi de 6,82%. Apresenta-se na Figura 11 uma amostra desta simulação.

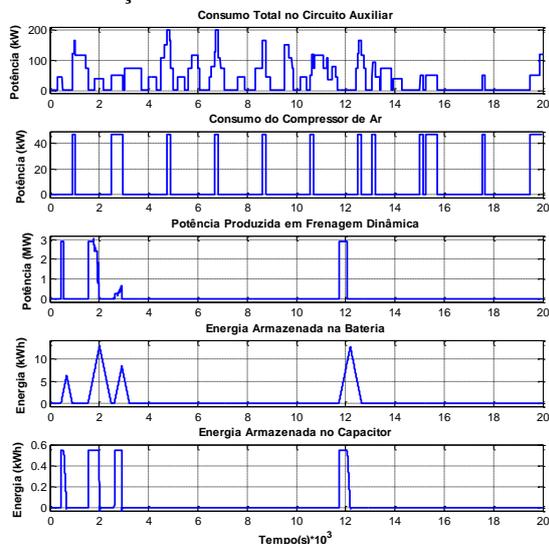


Figura 11. Simulação com Banco de Baterias e Supercapacitores

O acumulador formado pelo agrupamento de 12 baterias possui a capacidade de armazenamento de 199,68 kWh. Entretanto, a energia máxima acumulada durante as simulações realizadas foi 13,03 kWh, correspondendo à apenas 6,53% da capacidade. Contudo, a redução do banco de baterias diminui ainda mais a capacidade de armazenar energia para o mesmo intervalo de tempo. Caso sejam substituídas as 12 baterias por uma única bateria com corrente de carga 12 vezes maior, isto é, uma única bateria de 64 V/260 Ah, mas com corrente de carga de 600%, o resultado obtido será o mesmo.

Utilizando acumulador formado exclusivamente por supercapacitores, são necessários o emprego de 119 unidades de 63 F/125 V para armazenar o pico de energia de 13,03 kWh da simulação anterior. Entretanto, a energia média armazenada por frenagem na simulação anterior foi de 9,25 kWh, sendo necessário neste caso 68 unidades.

Caso sejam substituídas as 12 baterias por 12 supercapacitores, o acumulador será formado por 16 supercapacitores. Apresenta-se na Figura 12 o resultado da simulação para tal configuração. Nesta configuração foram obtidos bons resultados para frenagens com tempos inferiores a 62 segundos. Contudo, para frenagens com tempo superiores a 62 segundos, as baterias apresentam melhor desempenho que os supercapacitores.

Uma terceira possibilidade de acumulador é o formado exclusivamente por baterias. Neste caso, são substituídos os 4 supercapacitores por 4 baterias, totalizando 16. Nas simulações, a média da energia acumulada por frenagem foi de 12,33 kWh, superan-

do os 9,79 kWh obtidos na configuração com baterias e supercapacitores. Apresenta-se na Figura 13 o resultado de parte desta simulação.

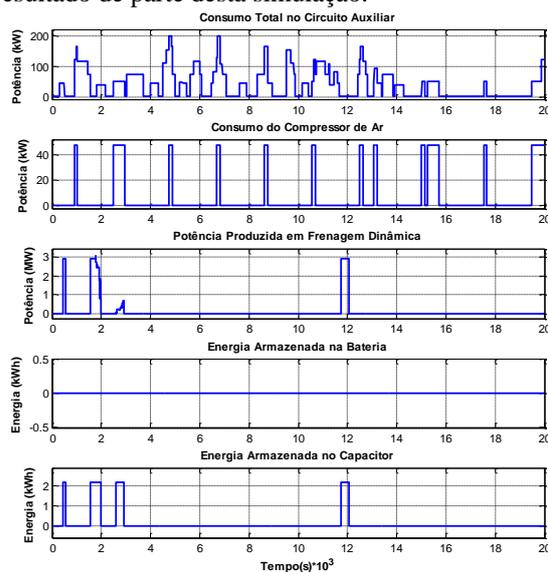


Figura 12. Simulação Utilizando Acumulador Formado por 16 Supercapacitores

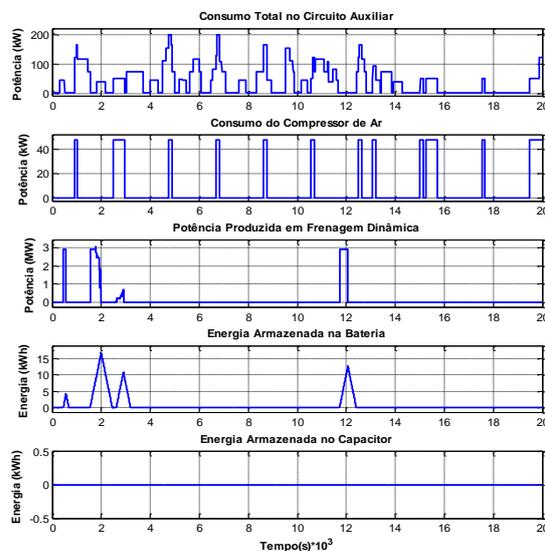


Figura 13. Simulação Utilizando Acumulador Formado por 16 Baterias

Comparando o resultado das três configurações propostas, o acumulador formado exclusivamente por baterias foi o que obteve melhor resultado. A Figura 14 apresenta a energia armazenadas nos três acumuladores no mesmo intervalo de simulação.

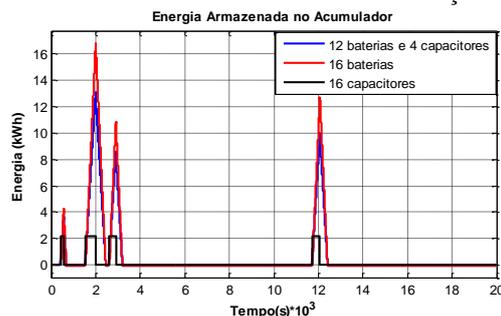


Figura 14. Comparação da Energia Armazenada Utilizando 3 Tipos Diferentes de Acumuladores de Energia

4. Conclusão

Conclui-se que a utilização do modelo de acumulador proposto por Moraes et al. (2019), sendo o acumulador formado por 12 baterias e 4 supercapacitores, na ferrovia estudada apresentaria uma porcentagem de regeneração de 6,82% da energia produzida pela frenagem dinâmica. Observou-se a subutilização das baterias com apenas 6,53% da sua capacidade. Contudo, a redução no número de baterias acarretaria na redução da quantidade de energia regenerada devido à limitação de corrente de carga. Observou-se também durante as simulações que os supercapacitores foram demandados na sua capacidade máxima de armazenamento em praticamente todas as frenagens, fato compreensível devido à baixa capacidade de armazenamento destes. Estima-se que a implementação deste sistema de regeneração na ferrovia estudada reduziria o consumo de 7199,21 L de diesel por locomotiva por ano.

A solução utilizando supercapacitores foi a que apresentou menor regeneração, com apenas 3,17% da quantidade produzida, reduzindo em 3346,84 L o consumo de diesel por locomotiva por ano. Este acumulador apresentou melhores resultados em frenagens de curta duração, principalmente em frenagens com tempos inferiores a 62 segundos.

Optando pela utilização do acumulador formado por apenas baterias, estima-se que a quantidade de energia regenerada em frenagem dinâmica seja de 8,03%, resultando uma redução de 8477,98 L de diesel por locomotiva por ano, sendo a solução mais adequada para utilização na ferrovia estudada. Esta solução apresentou melhor desempenho em frenagens mais longas, cuja os tempos de frenagens foram superiores a 62 segundos. Apresenta-se na Tabela 3 a comparação da energia média regenerada por frenagem de acordo com o acumulador utilizado.

Tabela 3. Energia Média Regenerada por Frenagem

Acumulador	Energia Regenerada por Frenagem
<i>Bateria e Capacitor</i>	9,79 kWh
<i>Capacitor</i>	2,17 kWh
<i>Bateria</i>	12,33 kWh

Para ferrovias cujo o traçado e a formação dos trens resultam na utilização do freio dinâmico com tempos entre 50 a 110 segundos, a solução mista com supercapacitores e baterias pode ser uma boa solução, sendo necessário simulações para tal comprovação. Contudo, em ferrovias cujo o tempo de utilização do freio dinâmico seja inferior a 62 segundos, a solução utilizando apenas supercapacitores talvez apresente o melhor resultado.

Referências Bibliográficas

- Agenjos, E., Gabaldón, A., Franco, F.G., Molina, R., Valero, S., Ortiz, M. and Gabaldón, R.J. (2009). "Energy efficiency in railways: energy storage and electric generation in diesel electric locomotives". 20th International Conference on Electricity Distribution. n.0402.
- Bemporad, A., Cairano, S. and Giorgetti, N. (2005). "Model Predictive Control of Hybrid Systems with Applications to Supply Chain Management". Congresso Nacional ANIPLA, Universidade de Siena, Siena.
- Boora, A.A., Zare, F., Ghosh, A., and Ledwich, G. (2007). "Applications of Power Electronics". In Proceedings Australasian Universities Power Engineering Conference, p. 113-121, Perth.
- Gudwin, R. and Zuben, V. (1998). "Sistemas híbridos: Aula 13". available at: https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewi82a6ngprlAhWgILkGHTkYC_HMQFjAAegQIBhAC&url=ftp%3A%2F%2Fftp.p.dca.fee.unicamp.br%2Fpub%2Fdocs%2Fia707%2Faula13.pdf&usg=AOvVaw388vwiNVebhnVQtNly08nj. Unicamp (accessed 13 outubro 2019).
- Lawson, L.J., and Cook, L.M. (1979). "Waysideenergy Storage Study". Federal Railroad Administration, California, V.4.
- Lv, C.; Zhang J., Li ,Y, Yuan, Y. (2015). "Novel control algorithm of braking energy regeneration system for an electric vehicle during safety-critical driving maneuvers". Energy Conversion and Management, v. 26, p. 520-529.
- Moraes, C.G.S, Junior, S.L.B., Cavilha, P.P., Heldwein, M.L., Waltrich, G. (2019). "Multi-Port System for Storage and Management of Regenerative Braking Energy in Diesel-Electric Locomotives". 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC).
- Petrobras (2018). "Fórmulas de Conversão", available at: <http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/destaques-operacionais/formulas-de-conversao> (accessed 23 September 2018).
- Shukla, S.; Burse, K.; Shrivastava, A. (2012). "Energy Saving Through Regenerative Braking in Diesel Locomotive with Super-capacitors". International Journal on Emerging Technologies, Oriental College of Technology, Bhopal, p.109-114.
- Torrissi, F.D., Bemporad, A. (2004). "A Tool for Generating Computational Hybrid Models for Analysis and Synthesis Problems". IEEE Transactions On Control Systems Technology, v.12, n.2, p.235-249/2004.

Apêndice A – Equações de Transição e Potência

A Equação (A1) corresponde à mudança de estado do autômato do freio dinâmico. Este autômato possui 1 entrada e 4 eventos, onde $U_{GFD} = [F_D]$ é o vetor de entrada e $\delta_{GFD} = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4]$ é o vetor de eventos, onde F_D corresponde ao freio dinâmico aplicado, F_{D1} corresponde à resistência de freio dinâmico de 0,7 Ω , F_{D2} à 1,4 Ω e F_{D3} à 2,1 Ω .

$$x(t+1) = \begin{cases} 0 & , \text{se } (\overline{F_D}) \\ 1 & , \text{se } (F_D \wedge (((x(t)=0) \vee (x(t)=1)) \wedge v_2) \vee v_1) \\ 2 & , \text{se } \left(F_D \wedge \left(\left((x(t)=2) \wedge \overline{v_1} \wedge v_4 \right) \vee \left((x(t)=0) \vee (x(t)=1) \right) \wedge \overline{v_2} \wedge v_4 \right) \vee \left((x(t)=3) \wedge \overline{v_1} \wedge v_3 \right) \right) \\ 3 & , \text{se } (F_D \wedge (((x(t)=3) \wedge \overline{v_3}) \vee v_4)) \end{cases} \quad (\text{A1})$$

A equação de transição de estado do autômato de seleção do modo do freio dinâmico, x_{FD} , é definida em (A2). Caso $x_{FD}(t+1)$ seja igual à 0, significa que houve a redução do valor da resistência de freio dinâmico com relação à $x_{FD}(t)$. Entretanto, caso seja igual à 1, significa que ocorreu um aumento da resistência com relação à $x_{FD}(t)$. Se não houver alteração do valor da resistência de freio dinâmico, o estado $x_{FD}(t+1)$ será igual à $x_{FD}(t)$.

$$x_{FD}(t+1) = \begin{cases} 0 & , \text{se } ((\overline{x_{FD}(t)} \wedge (x(t+1) = x(t))) \vee (x(t+1) < x(t))) \\ 1 & , \text{se } ((x_{FD}(t) \wedge (x(t+1) = x(t))) \vee (x(t+1) > x(t))) \end{cases} \quad (\text{A2})$$

Para o estado x_{FD} igual à 1, a potência máxima produzida pelos motores de tração será igual a Potência Máxima de Freio Dinâmico Crescente, P_{FDC} , ver Equação (A3). Caso x_{FD} seja igual à 0, a potência máxima de frenagem será definida conforme a Potência Máxima de Frenagem Decrescente, P_{FDD} , ver

$$P_{FDC}(t) = \begin{cases} 6776v(t)^2 - 8 \cdot 10^{-10}v(t) + 5 \cdot 10^{-9} & , \text{se } v(t) \leq 13,2 \\ 1173733 & , \text{se } 13,2 < v(t) \leq 18,3 \\ 3504,8v(t)^2 - 4 \cdot 10^{-9}v(t) + 7 \cdot 10^{-9} & , \text{se } 18,3 < v(t) \leq 24,4 \\ 2085016 & , \text{se } 24,4 < v(t) \leq 29,7 \\ 152489v(t) - 2457090 & , \text{se } 29,7 < v(t) \leq 35 \\ 2895560 & , \text{se } v(t) > 35 \end{cases} \quad (\text{A3})$$

$$P_{FDD}(t) = \begin{cases} 6776v(t)^2 - 3 \cdot 10^{-10}v(t) + 2 \cdot 10^{-9} & , \text{se } v(t) \leq 11,4 \\ 886346 & , \text{se } 11,4 < v(t) \leq 15,9 \\ 3504,8v(t)^2 - 7 \cdot 10^{-10}v(t) + 10^{-10} & , \text{se } 15,9 < v(t) \leq 22,4 \\ 1760085 & , \text{se } 22,4 < v(t) \leq 27,3 \\ 2363,7v(t)^2 - 3 \cdot 10^{-8}v(t) + 4 \cdot 10^{-7} & , \text{se } 27,3 < v(t) \leq 35 \\ 2894826 & , \text{se } v(t) > 35 \end{cases} \quad (\text{A4})$$

Na Equação (A1), o evento v_1 é igual a 1 para velocidade abaixo de 15,9 km/h, v_2 é igual a 1 para velocidade abaixo de 18,3 km/h, v_3 é igual a 1 para velocidade abaixo de 27,3 km/h, v_4 é igual a 1 para velocidade abaixo de 29,7 km/h e F_D é igual a 1 se a entrada freio dinâmico estiver no modo de frenagem dinâmica.

O estado x_{FD} define qual das curvas de frenagem a ser utilizada para cálculo da potência máxima produzida pelos motores de tração, ver Figura 7 e Figura 8. Sempre que aplicado o freio dinâmico, o estado é iniciado com 1, representando o modo crescente da resistência de freio dinâmico.

Equação (A4), ambas equações foram obtidas por meio de regressão linear da Figura 7 e Figura 8. Em ambas equações é necessário informar a velocidade da locomotiva.