

Projeto-Railway-Energy

Rullian Siqueira de Oliveira¹, Vinícius dos Santos Sanches².

¹ *Brado Logística – Engenharia de Máquinas e Equipamentos. Rua Engenheiro Costa Barros, 381, 82950-420, Curitiba, PR, Brasil.*

² *Rumo S.A. – Engenharia de Desenvolvimento. Rua Emílio Bertolini, 100, 82920-030, Curitiba, PR, Brasil.*

e-mail: rullian.oliveira@brado.com.br; vinicius.sanches@rumolog.com

Resumo: O transporte de produtos pelo Brasil é majoritariamente realizado pelo modal rodoviário e dependendo do produto, pode também ser transportado no modal ferroviário como grãos, combustíveis, minério de ferro, entre outros. Chama a atenção um mercado em crescimento, que é o transporte de contêineres pela ferrovia, pois dentro dos contêineres podem ser transportados os mais diversos produtos e até mesmo produtos perecíveis, como os refrigerados. Diante disso, analisou-se a forma que atualmente são transportados os contêineres de produtos congelados pela ferrovia, sendo que esses contêineres ficam desligados durante o trajeto ferroviário, devido a capacidade térmica do produto e o isolamento do contêiner, a carga suporta a viagem mantendo a qualidade exigida pelos órgãos de fiscalização. Então surgiu a oportunidade de desenvolver uma alternativa para que este mercado seja ampliado para produtos que necessitam de refrigeração onde hoje são transportados exclusivamente no modal rodoviário, para isso é necessário buscar uma possibilidade que seja capaz de manter um contêiner energizado durante o trajeto ferroviário, garantindo a qualidade de produtos mais sensíveis à variação da temperatura. Foi desenvolvido, portanto, um protótipo para transformar a energia cinética do movimento do trem em energia elétrica.

Palavras-Chaves: energia; refrigeração; ferrovia.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o Brasil utiliza os modais rodoviário e ferroviário como principais meios de transporte de produtos destinados ao mercado interno e exportação. Também temos os transportes aquaviário e aéreo, porém, o rodoviário é o mais utilizado devido principalmente a sua praticidade, acesso a regiões remotas, velocidade de locomoção e essas características refletem na aderência do transporte brasileiro no modal rodoviário, que representa de 65% a 75% na matriz de transporte. Desde a década de 50, com os investimentos em pavimentações de rodovias a aquecimento do setor automobilístico, este modal é o mais procurado e recomendado para mercadorias de alto valor e perecíveis (Ribeiro e Ferreira, 2002).

Os investimentos no setor ferroviário estão sendo realizados, como pode ser consultado no site da Agência Nacional de Transportes

Terrestres [ANTT], onde é apresentado os investimentos previstos até 2022, como exemplo podemos mencionar os investimentos na Ferrovia Norte Sul, que ultrapassa a casa dos duzentos e cinquenta milhões de reais.

A Confederação Nacional do Transporte [CNT] descreve em seu artigo “Transporte em Números” que ocorreu uma diminuição na produção ferroviária de 11,8% em toneladas uteis transportadas [TU] na comparação com o mesmo período de 2018. A degradação do volume transportado aberto por grupo de mercadoria, mostra que a queda foi puxada principalmente pelo minério de ferro com queda de 16,0% e representou 73,4% do total transportado por ferrovias no período de janeiro a outubro de 2019. Contudo, o desempenho do transporte de mercadorias por contêiner nas ferrovias, registrou um aumento de 17,7% do total de 2018. No período de janeiro a outubro de 2019,

apresentou uma taxa de crescimento de 20,2%. Porém, ainda não é um número significativo. Pesquisas realizadas pelo Instituto de Logística Supply Chain [Ilos] mostram que os custos logísticos ultrapassam os 10% do PIB no Brasil.

Diante deste cenário, percebe-se que existe potencial de crescimento no setor de transporte de contêineres e este projeto consiste no desenvolvimento de uma solução para realizar o transporte de contêineres Reefers energizados no modal ferroviário.

Os Reefers são contêineres isolados termicamente e com sistema de refrigeração embarcado, podem ser carregados com produtos refrigeradas ou congelados. Quando se utiliza o modal de transporte rodoviário, estes contêineres são transportados com um gerador de energia elétrica plugado para garantir a alimentação do sistema de refrigeração e conseqüentemente manter a temperatura programada do contêiner, assim como a qualidade do produto que está sendo transportado.

Portanto, este projeto consiste em desenvolver um sistema que seja capaz de manter o contêiner energizado, em cima de um vagão ferroviário, onde atualmente é realizado o transporte com o equipamento desligado e por este motivo, são transportados apenas produtos que estejam congelados com temperatura de pelo menos -22°C. Devido a capacidade térmica do produto transportado e do isolamento térmico do contêiner, ele completa uma viagem com duração média de 104 horas chegando ao destino com temperatura de -15°C, respeitando a Portaria do Centro de Vigilância Sanitária [CVS] – 15, de 07/11/1991. Assim, permite-se transportar produtos congelados especiais que necessitam de conservação por meio da temperatura. Desta forma, será possível atingir um mercado que atualmente não é atendido pelo transporte ferroviário devido à necessidade de manutenção de temperatura para a preservação de integridade do produto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Produtos frescos ou refrigerados bovinos, suínos, aves, laticínios, margarinas e gorduras, farmacêuticos. São transportados exclusivamente por caminhões refrigerados devido à necessidade constante de manutenção de tempera que pode variar entre 0°C a +16°C. O contêiner Reefer possui

capacidade para manter a temperatura do produto que está sendo transportado desde que esteja energizado.

Durante o transporte ferroviário o contêiner está desenergizado, pois não existem fontes de alimentação elétrica nos vagões de uma composição ferroviária, diferente do transporte rodoviário, onde os caminhões frigoríficos utilizam um gerador externo acoplado ao baú refrigerado ou a própria energia motriz do veículo para gerar eletricidade e manter o sistema de refrigeração em funcionamento. Diante desta oportunidade de incremento no modal ferroviário de transporte e utilizando como base o guia PMBOK para elaboração e gerenciamento de projetos, deu-se seqüência na estruturação e deste projeto que recebeu o título de “Railway Energy” desenvolvido na empresa Brado Logística.

A Brado Logística é uma empresa multimodal de transporte de cargas alocadas em contêineres tendo como principal meio de transporte a ferrovia. Empresa surgiu em 2011 após a união da estrutura ferroviária com armazenagem e atualmente faz parte do grupo de Cosan Logística. O terminal da Brado Logística em Rondonópolis – MT concentra variedades de produtos regionais como grãos, madeira e carnes, com destino ao abastecimento do mercado interno na região Sudeste e Exportação pelo porto de Santos – SP.

A empresa realiza o transporte de cargas frigoríficas em contêineres Reefer com produtos congelados que devido a capacidade térmica e isolamento do contêiner, chega ao destino com a temperatura atendendo às normas do Serviço de Inspeção Federal [SIF] no caso de exportação e Agência Nacional de Vigilância Sanitária [ANVISA], criada pela Lei 9.782, de 26 de janeiro de 1999, é uma autarquia sob regime especial que tem como área de atuação todos os setores da economia relacionados a produtos que possam afetar a saúde da população brasileira. Seu objetivo principal é manter a qualidade do produto que chega ao consumidor. A Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT] estabelece critério de temperatura e procedimentos para o transporte de produtos alimentícios refrigerados através da norma NBR 14.701 – Produtos Alimentícios Refrigerados – Procedimentos e Critérios de Temperatura.

3. CONSIDERAÇÕES ENERGÉTICAS

3.1 Potência média para o funcionamento de um contêiner reefer

Assume-se que os contêineres reefer sejam equipados com compressor do tipo *scroll*, sem inversor de frequência. Logo, a potência média de operação para cada um dos contêineres reefer é de:

$$P_{c.méd.} = 6,90 \text{ [kW]} \quad (1)$$

$$P_{c.méd.} = \text{Potência méd. unitária reefer [kW]}$$

3.2 Potência média para o funcionamento de 102 contêineres reefer

Com a potência estimada por contêiner reefer, estima-se o consumo total de potência para o trem com 51 vagões ou 102 contêineres reefer.

$$\bar{P}_r = P_{c.méd.} \cdot 2 \cdot n_v \quad (2)$$

$$\bar{P}_r = 6,90 \cdot 2 \cdot 51 = 703,8 \text{ [kW]}$$

$$\bar{P}_r = \text{Potência méd. total reefer [kW]}$$

$$n_v = \text{quantidade de vagões PCT}$$

4. MOTOGERADOR A DIESEL

O motogerador (*genset*) a diesel é o equipamento mais empregado no transporte de perecíveis via contêiner no mundo. É equipado com um motor a combustão de ciclo Diesel de 4 cilindros, capaz de entregar até 15,0 kW de potência elétrica contínua e suprir as demandas de potência de qualquer contêiner reefer disponível no mercado. Conta com tanque de combustível de 473 L de capacidade (no modelo *clip-on*) e mais de seis dias de autonomia contínua.



Fig. 1 Motogerador a diesel Thermoking SGCO-3000 (*clip-on*) [1].

Pode ser facilmente acoplado a um contêiner reefer, e acompanha o contêiner em todo o ciclo de deslocamento, desde a origem, até o destino final. Tem característica intermodal.

5. ENERGIA DISPONÍVEL

5.1 Características do trem analisado

Será analisado o trem formado inteiramente por vagões PCT com as seguintes propriedades:

- a) Ordem de serviço: 1664628
- b) Prefixo: C62
- c) Sentido: exportação
- d) Quantidade de vagões: 51
- e) Período início: 02/09/2019 11:58
- f) Período final: 06/09/2019 19:00

A análise de viagem indica que a jornada teve início às 11:58 do dia 02/09/2019 em TRO – Terminal Rondonópolis, tendo como destino final ZPG (Perequê). Neste momento, havia uma locomotiva AC44i de numeração 8417-1 anexada à cabeça do trem, seguida por 51 vagões do tipo PCT carregados com contêineres da Brado Logística.

O peso bruto total do trem somava 4.625,67 t, sendo 3.044,67 t úteis (de carga). O trem seguiu normalmente viagem, no sentido exportação, até que houve a anexação de uma segunda locomotiva (C30, de numeração 9403-7) ao trem em ZTO (Tutóia), na posição de nº2, às 21:00 do dia 04/09/2019 (ou seja, a partir da 58ª hora de viagem). Esta segunda locomotiva é necessária para vencer as rampas existentes no trecho deste ponto da viagem em diante. O percurso desde a origem até o destino tem uma distância total aproximada de 1.500 km.

A análise de viagem apresenta informações a uma taxa de uma (01) amostragem por segundo, fato que possibilita uma análise precisa do comportamento do trem nos pontos de tração, marcha lenta e dinâmico.

5.2. Geração de energia em freio dinâmico

Entende-se que a energia gerada pela aplicação de freio dinâmico (*DB: dynamic brake*) das locomotivas é uma energia perdida e que poderia ser aproveitada por outros métodos de recuperação de energia cinética, caso eles existissem. Tendo isto como objetivo, fez-se o levantamento de todo o potencial de geração de energia em freio dinâmico durante a viagem. Foi desconsiderada a recuperação de energia a partir da eliminação da necessidade de aplicação de freio automático (pneumático) dos vagões, pois trata-se de item de fundamental segurança para o controle do trem.

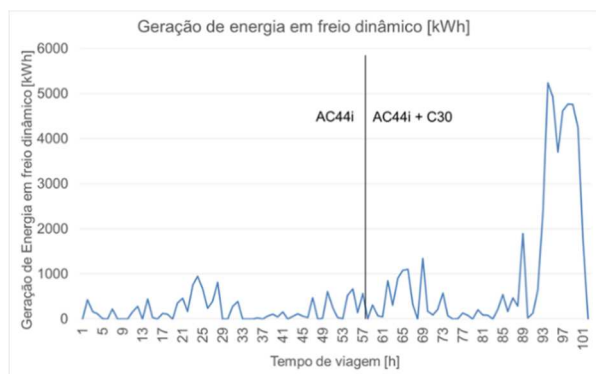


Gráfico 1. Geração de energia em freio dinâmico no trem, em função do tempo.

$$E_{DB} = \text{geração de energia em DB [kWh]}$$

$$E_{DB} \geq 0 \text{ (para qualquer condição)}$$

A partir da observação do Gráfico 1, verifica-se que, do início até a 90ª hora, há uma geração de energia mal distribuída, resultado da sequência de rampas ascendentes e descendentes percorridas pelo trem. Somente a partir da 93ª hora é que há uma forte geração de energia, resultado do processo de descida da Serra do Mar até o porto de Santos. Estes picos de grande geração de energia são mantidos até a 102ª hora.

Assim, faz-se o levantamento da energia consumida pelo trem em função do tempo. Assume-se que os contêineres reefer sejam equipados com compressor do tipo scroll, sem inversor de frequência. Logo, a energia média

de operação para todos um dos contêineres reefer é de:

$$\bar{E}_r = P_{c\text{méd.}} \cdot 2 \cdot n_v \cdot t = 703,8 \cdot 1 \quad (3)$$

$$\bar{E}_r = 703,8 \text{ [kWh]}$$

$$\bar{E}_r = \text{energia média consumida [kWh]}$$

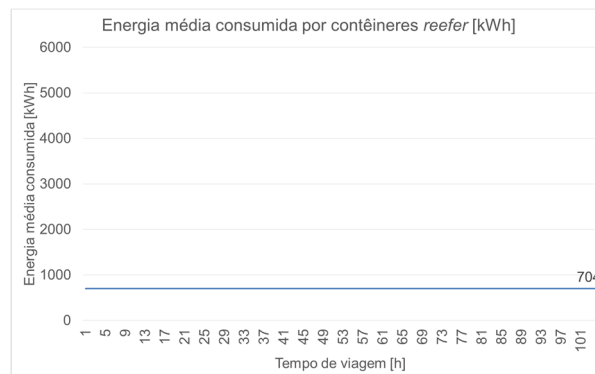


Gráfico 2. Energia media consumida por todos os 102 contêineres reefer.

Tomando-se a demanda de energia dos contêineres reefer (Gráfico 2) (\bar{E}_r) e subtraindo-se da curva de geração de energia em freio dinâmico calculada (Gráfico 1) (E_{DB}), tem-se a curva de energia deficitária líquida (E_{DL}).

$$E_{DL} = \bar{E}_r - E_{DB} \quad (4)$$

$$E_{DL} = \text{energia deficitária líquida [kWh]}$$

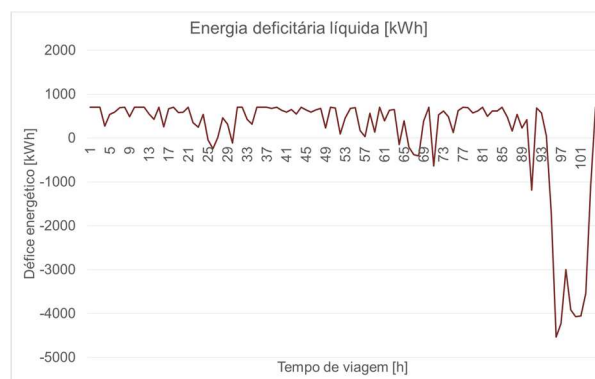


Gráfico 3. Déficit energético líquido para um sistema de reaproveitamento de energia cinética.

Todo equipamento, no entanto, apresenta uma dada eficiência. Na equação anterior, é impossível que o equipamento apresente eficiência de 100%. Logo, este índice deve ser incorporado à equação matemática, na forma:

$$E_{Db} = \frac{\bar{E}_r}{\eta_t} - E_{DB} \quad (5)$$

E_{Db} = energia deficitária bruta [kWh]

η_t = rendimento da transmissão

Se $E_{Db} > 0 \rightarrow$ locomotiva deverá suprir

Se $E_{Db} = 0 \rightarrow$ energia prod. atende demanda

Se $E_{Db} < 0 \rightarrow$ atende demanda, há excedente

Para o caso de $E_{Db} < 0$, o excedente de energia de freio dinâmico não será aproveitável, devendo ser dissipado na forma de calor nas resistências de freio dinâmico da locomotiva.

O rendimento da transmissão (η_t) é definido [2] por:

$$\eta_t = 61 \% \quad (6)$$

Coloca-se a seguir, portanto, o gráfico de energia deficitária bruta em função do tempo de viagem.

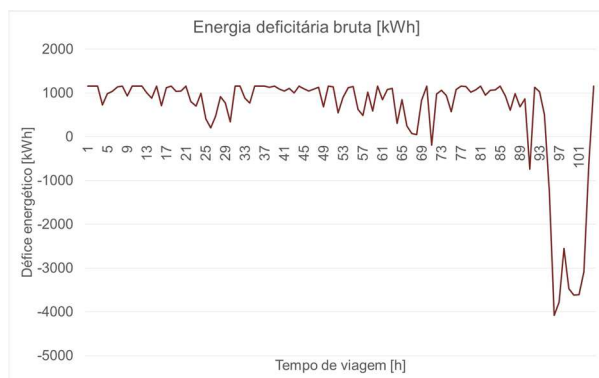


Gráfico 4. Déficit energético bruto para um sistema de reaproveitamento de energia cinética.

A partir do conhecimento da energia deficitária bruta para a alimentação dos contêineres reefer e do consumo específico de combustível da locomotiva em função da energia produzida no contato roda-trilho, pode-se calcular o consumo horário de combustível diesel S500 B11 para o motor Diesel da locomotiva AC44i. O conceito de energia deficitária bruta também pode ser estendido à potência. Definindo a potência deficitária bruta:

$$P_{Db} = \frac{\bar{P}_r}{\eta_t} - P_{DB} \quad (7)$$

P_{DB} = potência resist. grade (DB) [kW]

P_{Db} = potência deficitária bruta [kW]

Tabela 1. Consumo específico de combustível S500 B11 correspondente às potências líquidas no contato roda-trilho [2].

Loco	Notch	$c_{L_{t_i}}$ [L/kWh]	Potência líquida rodas [kW]
AC44i	Idle	0,3010*	37*
	DB	0,3568*	81*
	1	0,3882	115
	2	0,3265	313
	3	0,3204	651
	4	0,3066	984
	5	0,2969	1414
	6	0,2841	1888
	7	0,2755	2362
C30	Idle	0,3279*	51*
	DB	0,3279*	51*
	1	0,5500	64
	2	0,3335	178
	3	0,3173	413
	4	0,2997	633
	5	0,3192	935
	6	0,3328	1272
	7	0,3361	1605
8	0,3603	1825	

Para cada valor de potência deficitária bruta em [kW] corresponderá a uma potência líquida entregue às rodas pela locomotiva em [kW]. O consumo horário de combustível pode ser obtido através da multiplicação do consumo específico no contato roda-trilho ($c_{L_{t_i}}$) pela potência deficitária bruta (P_{Db}). Como a taxa de amostragem é de 1 [s], para calcular o consumo horário médio é necessário somar-se as 3600 parcelas (referente a 3600 segundos ou 1 hora) e dividir pelo mesmo número de parcelas.

$$\bar{c}_{dLh} = \frac{\sum_{i=1}^{3600} [c_{L_{t_i}} \cdot (\frac{\bar{P}_r}{\eta_t} - P_{DB_{t_i}})]}{3600} \left[\frac{L}{h} \right] \quad (8)$$

\bar{c}_{dLh} = consumo médio de diesel em 1 hora $\left[\frac{L}{h} \right]$

$c_{L_{t_i}}$ = consumo específico de diesel em t_i $\left[\frac{L}{kWh} \right]$

$P_{DB_{t_i}}$ = Potência dissip. resist. grade em t_i [kW]

Em forma gráfica, tem-se:

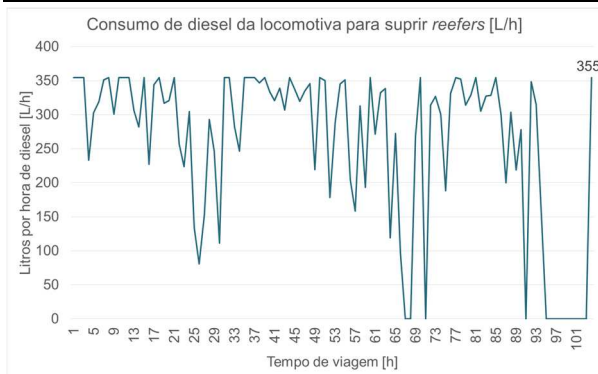


Gráfico 5. Consumo de diesel da locomotiva para suprir a demanda energética dos contêineres reefer.

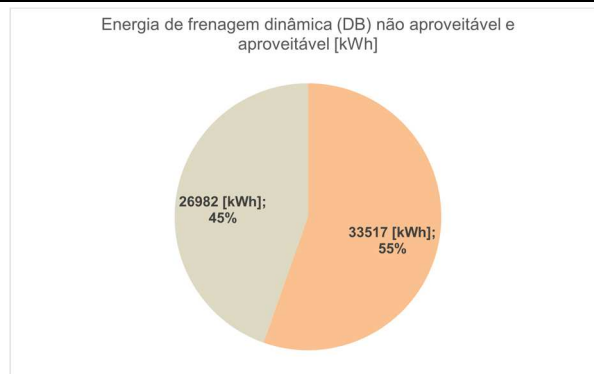


Gráfico 7. Energia de frenagem dinâmica (DB) não aproveitável (45%) e aproveitável (55%).

De forma gráfica e cumulativa, tem-se:

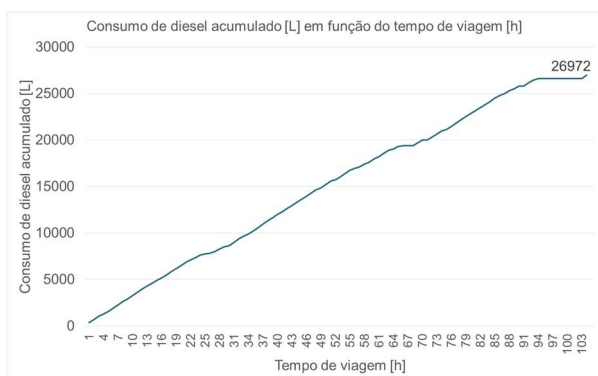


Gráfico 6. Consumo acumulado (extra) de diesel da locomotiva para alimentar os contêineres reefer.

Logo, conclui-se para o sistema de reaproveitamento de energia cinética:

- Seriam consumidos 26.972 L de diesel S500 B11 na locomotiva AC44i adicional para um total de 51 vagões, durante as 104 horas em trânsito;
- A energia gerada em frenagem dinâmica somente tem valor representativo na descida da Serra do Mar para o Porto de Santos. Nos demais trechos, ela está mal distribuída e tem valores modestos;
- Nem toda a energia gerada na frenagem dinâmica poderia ser aproveitada. Quando houver grande geração de energia, a exemplo do que ocorre na descida para o Porto de Santos, boa parte desta energia seria perdida em forma de calor nas resistências de grade da locomotiva, mesmo que o sistema de recuperação de energia cinética estivesse atuando.

6. VAGÃO EQUIPADO COM BATERIAS E SISTEMA DE FREIO REGENERATIVO

Diante dos resultados obtidos pelo balanço energético realizado no capítulo 5 surge a necessidade de melhorar o sistema de geração de energia através do aproveitamento do freio dinâmico. Uma alternativa é o desenvolvimento e implementação de um sistema que seja capaz de gerar e armazenar a energia proveniente do trem em movimento nos trechos onde for possível esta captação, armazenando a energia em um pack de baterias para que mantenha o contêiner Reefer energizado nos trechos onde a geração é deficitária, como por exemplo nos aclives. Nos trechos de declive, o sistema deverá funcionar como um freio regenerativo utilizando a resistência elétrica do gerador para auxiliar na frenagem do trem e conseqüentemente geração de energia elétrica para os contêineres e para recuperar a carga do pack de baterias.

Este sistema deverá contar com um monitoramento por GPS sensores de posicionamento, inclinação, giroscópio e demais tecnologias que tornem possível a identificação do local pelo qual o trem esteja passando, rampas ascendentes, rampas descendentes ou tangentes e com o tratamento desses dados através de um software o sistema teria autonomia para desligar e ligar apenas nos intervalos onde a geração de energia não prejudicasse o deslocamento do trem, ou seja, sem aumentar o consumo de combustível da locomotiva. Para seguirmos com essa configuração, precisaríamos considerar algumas premissas conforme segue:

- a) Carregamento máximo 50% de contêineres Reefer em uma composição com 102 contêineres.
- b) Um pack de baterias para cada contêiner a fim de mantê-lo energizado durante o período de não geração de energia.
- c) Pack de baterias suficiente para manter os contêineres energizados por 24 horas.
- d) Sistema inteligente de gerenciamento de geração de energia com acionamento exclusivo trechos de rampas descendentes, mesmo que por um curto período de tempo.
- e) Sistema de carregamento rápido das baterias.
- f) Sistema de controle e monitoramento da carga das baterias.
- g) Adequação dos vagões para que possam receber em sua estrutura o conjunto completo contendo a tomada de força oriunda do vagão, o sistema de geração (gerador) sistema de armazenamento (baterias) sistema de controle (softwares de gerenciamento) e saída para o contêiner (tomadas para ligação).

queima de combustíveis fósseis como o Diesel, que atualmente é a solução mais economicamente viável e confiável para manter um sistema de refrigeração energizado durante um longo período de tempo, apesar de ainda apresentarem um considerável consumo de combustível. O balanço energético realizado através da análise do trecho de deslocamento do trem em questão, mostra que apesar do potencial de geração de energia ser mal distribuído até a 90ª hora de viagem ele é existente e com as premissas bem definidas, é possível desenvolver um sistema de aproveitamento do freio regenerativo em conjunto com um pack de baterias para que o sistema seja suprido nos momentos em que não existir geração de energia. A solução conceitual seria significativamente melhor do que o modelo desenvolvido em protótipo e abre uma gama de possibilidades para aprimoramento das tecnologias envolvidas. A utilização de sistema híbridos de geração de energia atualmente é uma realidade podendo ser compostos por motores a combustão, geradores por reação química, regeneradores de energia, tudo combinado com a possibilidade do armazenamento para utilização posterior, entre outras soluções. A combinação entre elas poderá trazer resultados satisfatórios de alta tecnologia, eficiência e futuramente com custo reduzido eliminando a necessidade da queima de combustíveis fósseis que prejudicam o meio ambiente. Como sugestão de trabalhos futuros, é possível estudar a empregabilidade de células de combustível na geração de eletricidade, suas características, benefícios rendimentos e confiabilidade, uma vez que o desenvolvimento tecnológico aumenta a capacidade criativa do indivíduo na busca pela solução de problemas do cotidiano.

7. CONCLUSÃO

O conteúdo deste artigo deixa muito claro a necessidade de se realizar o transporte de contêineres que permaneçam energizados durante o trajeto ferroviário, os benefícios são inúmeros e o potencial de desenvolvimento também é grande. Com as tecnologias disponíveis hoje no mercado, é possível desenvolver este conceito inclusive submetendo protótipos a testes para analisar em campo a sua eficiência e pontos de melhoria. As tecnologias mundialmente utilizadas para este fim funcionam através da

8. REFERÊNCIAS

- [1] *Thermoking SGC0-3000 Genset.* <https://www.thermoking.com/na/en/marine/genset-units.html>. Acesso em jul. 2021.
- [2] SANCHES, Vinícius dos Santos. **Relatório de visita técnica à Frigoking.** ENG-DSV-VG-RT-061.2019 v1.0. Rumo S.A., 2019.