

FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

**GUILHERME NETO TONINI**  
**RAFAEL LOUREIRO ROSALINO**  
**RAFAEL TRASPADINI SILVA**  
**WILLIAN MARTINS SOARES**

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DA FRENAGEM REGENERATIVA EM LOCOMOÇÃO  
FÉRREA**

ARACRUZ

2019

**GUILHERME NETO TONINI**  
**RAFAEL LOUREIRO ROSALINO**  
**RAFAEL TRASPADINI SILVA**  
**WILLIAN MARTINS SOARES**

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DA FRENAGEM REGENERATIVA EM LOCOMOÇÃO  
FÉRREA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Coordenadoria do curso de Engenharia Mecânica  
das Faculdades Integradas de Aracruz como  
requisito parcial para obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Me. Vital Pereira Batista Júnior

ARACRUZ

2019

**GUILHERME NETO TONINI**  
**RAFAEL LOUREIRO ROSALINO**  
**RAFAEL TRASPADINI SILVA**  
**WILLIAN MARTINS SOARES**

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DA FRENAGEM REGENERATIVA EM LOCOMOÇÃO  
FÉRREA**

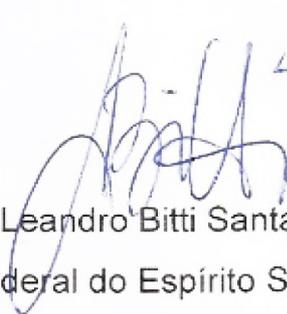
Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
coordenadoria do curso de Engenharia  
Mecânica das Faculdades Integradas de Ara-  
cruz, como requisito parcial para a obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 21 de outubro de 2019

**COMISSÃO EXAMINADORA**

  
Prof. Me. Vital Pereira Batista Júnior  
Faculdades Integradas de Aracruz  
Orientador

  
Prof. Dr. Harenton Oliveira Dourado  
Faculdades Integradas de Aracruz  
Examinador interno

  
Prof. Me. Leandro Bitti Santana  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Examinador externo

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, em primeiro lugar, por além de ter concedido a vida, ter dado inteligência e sabedoria para o enriquecimento e aptidão da real aprendizagem.

Ao professor Vital Pereira Batista Júnior pela orientação, apoio e atenção concedida.

Às nossas famílias e companheiras pelos apoios e incentivos.

A empresa TRENSURB pela atenção e disponibilidade dos dados.

A Camila B. Paolucci pela ajuda nas informações e obtenção de dados referente ao Rio de Janeiro.

Por fim, a todos que de certa forma nos ajudaram a realizar este trabalho.

**MUITO OBRIGADO.**

## RESUMO

Com a busca de veículos cada vez mais eficientes, diversas tecnologias são criadas com o intuito de aproveitar toda e qualquer forma de energia, a partir desse conceito foi criado o Kinect Energy Recovery System (KERS), conhecido nacionalmente como frenagem regenerativa, capaz de reaproveitar a energia cinética de veículos elétricos e híbridos no momento de sua frenagem. Essa tecnologia possui grande potencial, principalmente para transporte de pessoas para veículos elétricos de grande porte, como trens, devido à quantidade de serviço diário e o número de frenagens executadas. Neste contexto, este trabalho apresenta um levantamento de dados sobre a quantidade de energia consumida e recuperada por um trem em um trecho tendo como modelo a distância entre a Estação de Madureira e Olímpica de Engenho de Dentro corresponde ao Ramal Santa Cruz – Central do Brasil no Rio de Janeiro, sendo essas respectivamente 32,52kWh e 1,06kWh. Também foi apresentado três métodos de utilização dessa energia recuperada, lançamento direto na linha de alimentação dos trens, armazenamento em baterias presentes no corpo do trem e redirecionamento para fora da estação, com este último se mostrando o mais eficiente.

Palavras-chave: KERS. frenagem regenerativa. Trem. veículo elétrico.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de frenagem regenerativa operando em paralelo com um motor de combustão interna.....	14
Figura 2 - Sistema de frenagem regenerativa para um veículo elétrico. ....	15
Figura 3 - Tabela sobre consumo de veículos ferroviários .....	22

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Capacidade dos motores do trem .....	17
Tabela 2 - Características dimensionais do trem .....	17
Tabela 3 - Relação de peso dos carros que compõe o trem. ....	18

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação da energia consumida durante todo o trajeto .....	22
Gráfico 2 - Relação entre energia recuperada e as consumidas durante o movimento.....	23
Gráfico 3 - Porcentagem da energia reutilizada – Linha 4E .....	26
Gráfico 4 - Porcentagem da energia reutilizada - Total .....	27

## **LISTA DE SIGLAS**

ANPTrilhos - Associação Nacional dos Transportadores de Passageiros sobre Trilhos

ABB - ASEA Brown Boveri

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

FIA - Federation Internationale de l'Automobile

KERS - Kinetic Energy Recovery Systems

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

SEPTA - Southeastern Pennsylvania Transportation Authority

TRENSURB - Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre S.A.

BF - Bellman-Ford

CBR - Constant Braking Rate (taxa de frenagem constante)

LP - Linear Programming (programação linear)

RBE - Regenerative Braking Energy (energia de frenagem regenerativa)

ESS - Energy Storage System

EDLC - Electrical Double-Layer Capacitors

IC – Combustão interna

## LISTA DE SÍMBOLOS

$E_a$  - Energia de aceleração

$m$  - Massa

$m_a$  - Primeiro carro motor

$m_b$  - Segundo carro motor

$m_v$  - Massa do vagão

$r_a$  - Carro reboque com pantógrafos

$r_b$  - Carro reboque sem pantógrafos

$V$  - Velocidade

$V_f$  - Velocidade final

$V_i$  - Velocidade inicial

$r_{MPT}$  - Coeficiente de resistência geral

$n_v$  - Número de vagões

$g$  - Gravidade

$R_{MPT}$  = Força contrária ao movimento

$E$  = energia de atrito global

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1. OBJETIVO GERAL .....	10
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
2.1. KERS .....	11
2.2. CONSUMO E PERDA .....	11
2.3. ARMAZENAGEM E UTILIZAÇÃO .....	12
2.4. FUNCIONAMENTO BÁSICO .....	13
2.4.1. ALGORITMO DE BELLMAN-FORD.....	13
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>16</b>
3.1. ETAPA 1 .....	16
3.2. ETAPA 2 .....	20
3.3. ETAPA 3 .....	21
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>22</b>
4.1 CONSUMO DO TREM.....	22
4.2 ENERGIA RECUPERADA.....	23
4.3 CAPACIDADE DE PRODUÇÃO .....	24
4.4 APROVEITAMENTO DA PRODUÇÃO.....	25
4.4.1 LINHA DE ALIMENTAÇÃO.....	25
4.4.2 USO AUTÔNOMO .....	27
4.4.3 USO FORA DA ESTAÇÃO .....	28
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>30</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>31</b>
<b>7. APÊNDICE I – TABELA DE CHEGADA E SÁIDA DOS TRENS NA ESTAÇÃO OLÍMPICA DE ENGENHO DE DENTRO .....</b>	<b>34</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Um método desenvolvido no século passado para a recuperação da energia da frenagem em automóveis fomentou a indústria de carros híbridos e elétricos. O Kinetic Energy Recovery Systems (KERS), conhecido nacionalmente sob o nome de frenagem regenerativa, propõe que a energia cinética dissipada na frenagem do veículo possa ser reutilizada de diversas formas (PACHECO, et. al. 2014). Tal tecnologia mostrou um futuro promissor, sendo até mesmo implementada pela Federation Internationale de l'Automobile (FIA), organização responsável pelas competições de fórmula 1, ao qual os carros possuem um sistema de reutilização semelhante, que é utilizado comumente, porém para dar maior potência útil ao carro (MAGNETI MARELLI).

Esse sistema vai além, e já foi realizado implementação do sistema em outras aplicações, como por exemplo, na aplicação do transporte ferroviário de pessoas. A Southeastern Pennsylvania Transportation Authority (SEPTA), que é a responsável pelo transporte público no estado da Pensilvânia nos Estados Unidos, realizou um estudo para inserir o sistema de aproveitamento da frenagem regenerativa, enviando a energia feita pelas frenagens dos trens para 7 bancos de baterias em estações. Esse uso conseguiria captar até 8,75 megawatts-hora, sendo então lançados na rede elétrica e abastecendo a cidade. O programa piloto já concluído em 2014 abastece 1,8 MWh de energia (SEPTA, 2016). Sendo assim, segundo estudo feito pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2018, relacionado ao ano de 2017, o consumo médio brasileiro de energia residencial é de 157,9 kWh, ou seja, os atuais 1,8MWh do projeto, já abasteceriam o equivalente a 11 casas brasileiras durante 1 mês.

Num país, onde o consumo de energia, em 2017, foi de 495 GWh (EPE, 2018), as implementações de sistemas como o da frenagem regenerativa permitiriam uma nova eficiência dos sistemas de transporte ferroviário. Além disso, outro estudo, feito pela FolhaPress em conjunto com a Associação Nacional dos Transportadores de Passageiros sobre Trilhos mostra que o governo teria que compensar as empresas de energia em torno de R\$ 300 a R\$ 400 milhões por ano para reduzir as contas de luz das ferrovias, evidenciando a dimensão dos gastos efetuados com energia elétrica

para a locomoção por trens, e assim justifica inovações tecnológicas que promovam economia energética. (ANPT trilhos, 2014).

No Brasil, devido em sua maioria ao uso de trens antigos, que estão em operação desde 1985, e que segundo a Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre S.A. (TREN SURB) realizam maior consumo de energia, cerca de 30% a mais que os trens de modelos mais novos, mostram que há um imenso potencial desperdiçado ao não utilizar o sistema de frenagem regenerativa. Além disso, a tração dos trens é responsável por quase 90% das despesas com energia elétrica da empresa (PROCEL INFO, 2016).

Segundo Hillmansen e Roberts (2007), o sistema ferroviário é uma das formas mais eficientes de transporte terrestre, desse modo pode-se afirmar que tal meio de locomoção continuará pelos próximos anos dentre os meios para transporte de cargas e pessoas, e os tornar mais eficientes, e mais econômico é benefício para os dois lados do balcão, de quem compra o serviço, e também de quem vende.

### **1.1. OBJETIVO GERAL**

Simular um sistema de frenagem regenerativa para transporte ferroviário, comparando o uso da energia regenerada entre um método de uso autônomo e o de transferência de energia para rede.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Simular o sistema em funcionamento com um transporte ferroviário de alimentação elétrica utilizando o Microsoft Excel;
- Comparar a energia recuperada através de três métodos de utilização;

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A crescente atenção à sustentabilidade ambiental dos sistemas de transporte tornou necessário investigar a possibilidade de otimização energética mesmo em setores tipicamente caracterizados por um nível já elevado de sustentabilidade, como em particular o sistema ferroviário. Uma das oportunidades mais promissoras é a otimização da recuperação de energia cinética de frenagem (CERAOLO et. al. 2018).

### **2.1. KERS**

O sistema de recuperação de energia cinética ou também conhecido como KERS (Kinect Energy Recovery Systems) utiliza o princípio básico da física, a “lei da conservação da energia”, sob que a energia não pode ser criada ou destruída, mas poder ser infinitamente convertida ou transformada (ZACARIAS, 2015).

Quando um veículo elétrico está em movimento ele possui energia cinética, no momento da frenagem a mesma energia é convertida em energia térmica sendo dissipada em forma de calor. Com a introdução do KERS no momento da frenagem, o motor se transforma em um gerador, assim captando a energia cinética que iria ser dissipada como energia térmica e a armazena nas baterias ou supercapacitores (ZACARIAS, 2015).

#### **2.1.1. KERS NO BRASIL**

Os sistemas ferroviários e metroviário nacional apresentam uma grande defasagem tecnológica em relação aos países desenvolvidos e emergentes. Maioria dos trens e metrô utilizados pelas concessionárias de transporte metroviário e ferroviário nacional apresenta sistemas de frenagem reostática, com a ausência do sistema de regeneração, o que aumenta o consumo de energia desse maquinário e eleva o custo operacional (OLIVEIRA, LAROCCHA, 2013).

### **2.2. CONSUMO E PERDA**

Existe um grande e crescente volume de literatura a respeito da otimização da energia de tração, já que o consumo de energia de tração é responsável por cerca de 60-80% do consumo total de energia para a operação ferroviária (DUGLAS et. al. 2015).

De acordo com Ibaiondo, et. al. (2010), estima-se que, em sistemas rodoviários, a quantidade de energia cinética perdida e incapaz de ser reutilizada represente aproximadamente 30% da energia de tração.

### **2.3. ARMAZENAGEM E UTILIZAÇÃO**

Atualmente, grande parte dos veículos ferroviários é capaz de combinar a frenagem pneumática padrão a um sistema de frenagem elétrica, possibilitado pelo sistema de tração elétrica. Desta forma, a energia cinética do trem é convertida em energia elétrica, que pode ser manipulada de maneiras diferentes. Uma maneira de utilizar essa energia é direcioná-la a linha de transmissão de energia ou armazená-la em sistemas de armazenamento de energia de tamanho adequado localizado ao longo da linha de alimentação (CERAOLO et. al. 2018).

Para sistemas de armazenamento a bordo, nos quais a energia de frenagem é armazenada em sistemas instalados a bordo do veículo, temos que a principal vantagem é a redução de perdas, uma vez que a transferência de energia ao longo da linha é reduzida ou totalmente evitada. Como desvantagens, ônus adicionais e peso a bordo do veículo, com a consequente redução da capacidade de carga disponível do trem (CERAOLO et. al. 2018).

Na Filadélfia, a empresa Southeastern Pennsylvania Transit Authority (SEPTA) está utilizando uma solução proposta pela empresa ABB que consiste em armazenar a energia gerada pela frenagem do trem, durante o seu percurso, em baterias para que esta seja devolvida para a rede quando o trem parar em uma estação, ou para que seja utilizada para mover o trem em períodos de pico de consumo, reduzindo o consumo energético em até 10% (ABB, 2016).

Frenagem regenerativa: A energia gerada está disponível para ser utilizada a bordo ou redirecionada a linha.

Dentro das abordagens utilizadas no estudo desenvolvido por Ceraolo et. al. (2018), para o armazenamento da energia produzida na frenagem foram utilizadas baterias de lítio de alta potência e supercapacitores. Isso permitiria a distribuição da energia, gerada e armazenada, de acordo com a necessidade dos veículos ferroviários. A abordagem desse estudo visa também levantar os problemas com esse

armazenamento, como por exemplo o peso agregado pelo conjunto de baterias dentro do corpo do veículo, limitando assim a capacidade de carga.

## **2.4. FUNCIONAMENTO BÁSICO**

Os freios elétricos de trens funcionam, basicamente, invertendo o funcionamento do motor elétrico de indução, que passa a gerar um torque contrário ao movimento, diminuindo a velocidade do motor e, conseqüentemente reduzindo a velocidade do trem. Essa inversão do funcionamento do motor faz com que este passe a atuar como um gerador de energia elétrica que, em freios reostáticos, é transformada em calor por um banco de resistores. Esse tipo de frenagem que utiliza um banco de resistores para dissipar a energia da frenagem em forma de calor é conhecido como frenagem reostática, tecnologia ultrapassada, utilizada pelos trens mais antigos.

Buscando evitar o desperdício, as empresas implantaram o sistema de frenagem regenerativa em trens. Sendo assim, uma parte da energia cinética, no processo de frenagem, é transformada em energia elétrica e, ao invés de ser dissipada em resistores, é recuperada e armazenada em baterias ou devolvida para a linha de alimentação do trem, ajudando a diminuir o consumo. (VASCONCELOS, Igor, 2016).

### **2.4.1. ALGORITMO DE BELLMAN-FORD**

Em Hillmansen et. al. (2014), é proposto o uso do algoritmo de Bellman-Ford (BF) para procurar a trajetória de velocidade de frenagem do trem para aumentar a energia de frenagem regenerativa total (RBE – Regenerative Braking Energy) em um modo de frenagem combinada com forças de frenagem elétrica e mecânica disponíveis. O algoritmo BF é aplicado em um modelo de estado de trem discretizado.

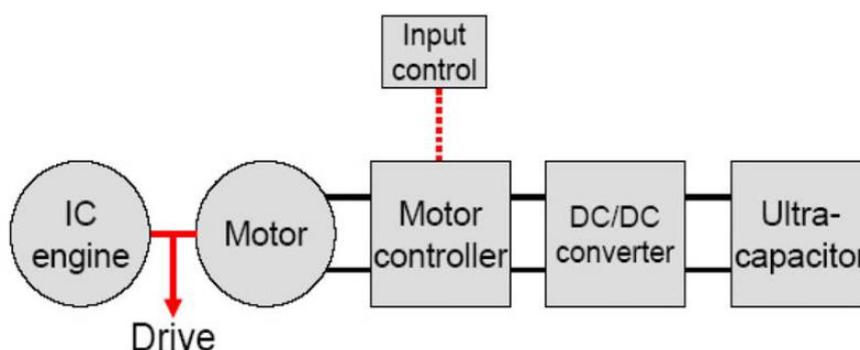
Um trem suburbano típico foi modelado e estudado em cenários reais de engenharia envolvendo mudanças de gradiente, tempo de viagem e limites de velocidade.

Verifica-se que a trajetória de velocidade de frenagem estudada é capaz de alcançar um aumento significativo na RBE, em comparação com o método de taxa de frenagem constante (CBR - Constant-braking-rate), com apenas uma pequena diferença no tempo total de frenagem.

Uma taxa de incremento de RBE de 17. 23% foi alcançado. A verificação do método proposto utilizando o BF foi realizada em um cenário simplificado com gradiente zero e sem considerar as restrições de tempo de frenagem e limites de velocidade. A programação linear (LP – Linear Programming) é aplicada para procurar uma trajetória de trem com o RBE máximo e atinge soluções que podem ser usadas para verificar o método proposto usando BF (HILLMANSEN et. al. 2014).

Em Clarke et. al. (2010) um software de simulação, desenvolvido para calcular as exigências de potência e energia para um veículo durante a condução, também foi projetado para calcular a economia de energia obtida do sistema de frenagem regenerativa. As simulações levam em conta a energia consumida durante os modos de cruzeiro de nível, aceleração e escalada em gradiente. A frenagem regenerativa é incorporada ao modelo, conforme detalhado na Figura 4 e Figura 5 com a análise de energia aqui amplamente baseada no trabalho de Rubin (2001).

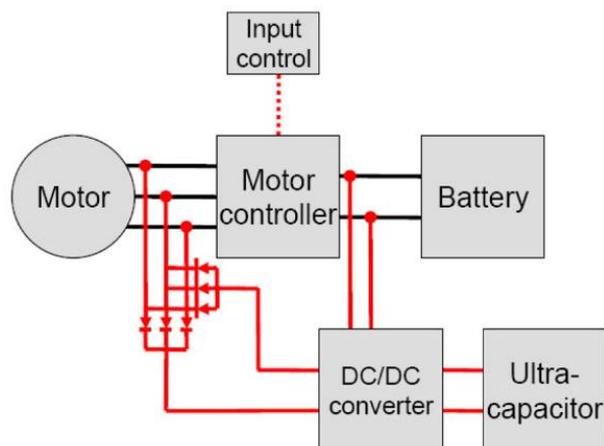
Figura 1 - Sistema de frenagem regenerativa operando em paralelo com um motor de combustão interna.



Fonte: Clarke (2010)

É necessário um conversor de corrente ou CC/CC, e um sistema de controle para controlar o estado de carga do ultracapacitor, já que isso depende da velocidade do veículo. Por exemplo, em baixas velocidades, o estado de carga deve permanecer alto, possibilitando o aumento da aceleração. Em velocidades mais altas, o ultracapacitor deve permanecer em estado de descarga, permitindo energia regenerativa a ser armazenada quando o veículo desacelera. O layout geral de um sistema de frenagem regenerativa para um motor de combustão interna (IC) é mostrado na Fig. 4, enquanto que para um veículo elétrico é mostrado na Fig. 5.

Figura 2 - Sistema de frenagem regenerativa para um veículo elétrico.



Fonte: Clarke (2010)

Além disso, para otimizar a conversão de energia entre o motor / gerador e o ultracapacitor, é necessário um conversor DCDC para acomodar a variabilidade de tensão do ultracapacitor e do motor / gerador. Um controle numericamente controlador do motor é usado para controlar a potência do motor durante a aceleração, bem como controlar poder de travagem para garantir uma travagem suave.

O aumento da eficiência energética geral do sistema ferroviário através do sistema de frenagem regenerativa não é a única consequência positiva no sistema e isso pode constatado em Nascimento (2012) sobre sistema de Controle de frenagem para trens metropolitanos de tração elétrica, aonde este sistema auxilia no controle e estabilidade das frenagens, visando segurança e maior comodidade aos passageiros.

Com base nas teorias dispostas nos documentos acima citados, é possível o estudo de desenvolvimento do sistema de frenagem regenerativa, visando a utilização da energia gerada e armazenada a bordo do veículo, sendo utilizada para fins do próprio veículo através das disposições espaciais das baterias e supercapacitores.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. ETAPA 1**

A primeira parte deste trabalho consiste em um estudo de caso. Nele foi analisado um modelo de trem específico, em um trecho com distância de 5,28km, distância essa igual a existente entre as estações de Madureira e Olímpica de Engenho de Dentro, no ramal Santa Cruz- Central do Brasil, no Rio de Janeiro. Trajeto esse, escolhido pela possibilidade de medição das velocidades dos trens, utilizando aplicativos indicadores de velocidade com base no gps de smartphones. Foi considerado um trajeto com condições ideais, retilíneo, plano e seco, com um alto coeficiente de aderência. O trem partirá do repouso, com uma aceleração constante de  $0,9 \text{ m/s}^2$ , a maior aceleração permitida para o modelo utilizado, até atingir a velocidade de 80 km/h, sendo essa, a velocidade padronizada do trecho e confirmada pelos aplicativos indicadores de velocidade, onde manterá a velocidade constante durante parte do percurso e então frear com uma desaceleração de  $1,0 \text{ m/s}^2$ , a frenagem de serviço máxima permitida para o modelo.

Só foi analisado o consumo de energia necessário para a condução do veículo, excluindo completamente o consumo dos componentes internos do trem como iluminação interna dos vagões, letreiros, ar condicionado, entre outros. No momento da frenagem, foi calculada a quantidade de energia regenerada de 80 km/h até 5 km/h, esses valores foram estipulados para que a máxima energia de frenagem seja obtida, já que, para velocidades menores que 5 km/h a frenagem elétrica é complementada pelos freios por atrito, reduzindo a capacidade regenerativa, conforme dito em sua especificação (TRENSURB, 2012).

##### **3.1.1. VEÍCULO**

O modelo de trem contido na simulação é o da série 200, especificado pela empresa TRENSURB (2012), com capacidade dos motores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Capacidade dos motores do trem

<b>motor</b>	
Tensão mínima	2.000 Volts
Tensão nominal	3.000 Volts
Tensão máxima	3.600 Volts
Potência	275 kW
Números de motores	8
Potência total	2200 a 2500 rpm

Fonte: TRENSURB (2018), adaptada pelos autores.

O veículo utilizado como base para o trabalho pode ser integrado a linha possuindo 4 ou 6 carros, com uma capacidade nominal de no mínimo 270 passageiros por carro, buscando uma densidade de 6 pessoas por m<sup>2</sup>, suportando até 10 pessoas por m<sup>2</sup>. Com base nesses dados, o dimensionamento de cada vagão do trem, pode ser visto na tabela 2:

Tabela 2 - Características dimensionais do trem

<b>Dimensões</b>	
Carros cabine (entre faces dos engates) – permitindo cabine alongada (dimensão aproximada)	22.150 mm
Carros intermediários entre faces dos engates (dimensão aproximada)	22.100 mm
Comprimento total do trem entre faces dos engates (dimensão aproximada)	132.700 mm (6 carros) 88.500 mm (4 carros)
Largura externa	2.980 mm
Largura mínima da passagem entre carros (Open Wide Gangway)	1.600 mm
Altura do trem	2.200 mm

Fonte: TRENSURB (2012), adaptada pelos autores.

No trabalho foi utilizado 4 carros sendo 2 deles motorizados ( $m_a$ ,  $m_b$ ) e 2 de reboque ( $r_a$ ,  $r_b$ ) com a carga total, onde o trem possui o máximo de passageiros permitido. Com relação entre os pesos utilizados mostrados na Tabela 3:

Tabela 3 - Relação de peso dos carros que compõe o trem.

	<b>Peso</b>
Carros motores ( $m_a$ e $m_b$ )	44,12 toneladas
Carro reboque $r_a$ (tem pantógrafos)	37,23 toneladas
Carro reboque $r_b$ (não possui pantógrafos)	36,36 tonelada
Peso total em vazio	161,83 toneladas
Peso com carga total	230,15 toneladas

Fonte: TRENURB (2018), adaptada pelos autores.

### 3.1.2. EQUAÇÕES

Inicialmente para a fase de aceleração, foi utilizado o balanceamento da energia cinética, dada pela Equação (1):

$$E_a = \frac{m \cdot V_f^2 - m \cdot V_i^2}{2} \quad [\text{J}] \quad (1)$$

Onde:

$$E_a = \text{Energia de aceleração} \quad [\text{J}]$$

$$m = \text{massa} \quad [\text{kg}]$$

$$V_f = \text{velocidade final} \quad [\text{m} \cdot [\text{s}]^{-1}]$$

$$V_i = \text{velocidade inicial} \quad [\text{m} \cdot [\text{s}]^{-1}]$$

No entanto, é necessária uma energia adicional devido ao atrito e o arrasto aerodinâmico, para isso é utilizada a expressão criada por Bairyeva e Shevchenko (1996) citado por Pires (2013) que resulta em um coeficiente de resistência geral para cada vagão, mostrado na Equação (2):

$$r_{MPT} = 1,1 + (0,09 + 0,022n_v) \frac{v^2}{m_v \cdot g} \quad [\text{N}] \cdot [\text{kN}]^{-1} \quad (2)$$

Sendo:

$r_{MPT}$  = coeficiente de resistência geral [N].[kN]<sup>-1</sup>

$n_v$  = número de vagões

$m_v$  = massa do vagão [kg]

$g$  = gravidade [m].[s]<sup>-2</sup>

$V$  = Velocidade [m].[s]<sup>-1</sup>

A partir do coeficiente achado na Equação (2) é possível obter a força contrária ao movimento do trem aplicando seu resultado na Equação (3):

$$R_{MPT} = \sum_{j=1}^{n_v} r_{MPT_j} \cdot (m_v \cdot g) \cdot 10^{-3} \quad [\text{N}] \quad (3)$$

Sendo:

$R_{MPT}$  = Força contrária ao movimento [N]

Com o resultado da Equação (3) é possível achar a energia adicional na aceleração multiplicando o resultado pela distância, porém, como na Equação (2) é utilizada a velocidade momentânea é necessário utilizar de um método de somatória semelhante a Walt Blake (2009), onde o trecho de aceleração é dividido em várias partes e é utilizada a velocidade média de cada parte para achar a energia referente. O trecho é dividido suficientemente para que a diferença do valor achado na somatória e o valor real da energia seja insignificante. Essa resolução pode ser vista na Equação (4):

$$E = \sum_{j=1}^i R_{MPT_j} \cdot d_j \quad [\text{J}] \quad (4)$$

Sendo:

$E$  = energia de atrito global [J]

$R_{MPT_j}$  = Força de atrito global do trecho específico [N]

$d_j$ = distância percorrida do trecho específico [m]

Por fim, adequando a Equação (1) com a Equação (4), tem-se a Equação (5) utilizada para o movimento de aceleração:

$$E_a = \frac{m \cdot v_f^2 - m \cdot v_i^2}{2} + \sum_{j=1}^i R_{MPT_j} \cdot d_j \quad [\text{J}] \quad (5)$$

Logo após a aceleração, é calculada a energia necessária para que o trem se desloque em velocidade constante. É utilizada a Equação (4) com um pequeno diferencial, como a velocidade neste trecho é considerada constante, não é necessária uma somatória, já que, há somente uma velocidade, resultando na Equação (6):

$$E = R_{MPT} \cdot d \quad [\text{J}] \quad (6)$$

Para a etapa da frenagem, novamente utiliza-se a Equação (5), porém assumindo o resultado como a energia de potencial regenerativo, esta variando de acordo com a eficiência do motor, a eficiência do motor funcionando como gerador, eficiência da unidade de acionamento final e a eficiência da caixa de engrenagens.

O veículo utilizado neste trabalho apresenta em sua especificação (TRENSURB, 2012), um coeficiente de no mínimo 30% de capacidade de regeneração da energia de potencial regenerativo, para velocidades acima de 30 km/h. Assumindo que 100% seja toda a energia de potencial regenerativo.

### 3.2. ETAPA 2

A partir dos dados obtidos com a chegada e saída dos veículos ferroviários na estação Olímpica de Engenho de Dentro, foi montada uma tabela, mostrando as chegadas que coincidem com as saídas, para assim, estabelecer encontros em que um trem poderia utilizar a energia gerada por outro. A tabela foi dividida em três intervalos de tempo, em alguns casos, há mais de uma marcação no mesmo horário, em diferentes linhas, porém, isso não significa que os trens chegaram exatamente juntos a estação, nem que a chegada de um coincidiu com a saída de outro, e sim, que naquele intervalo de minuto marcado, foi identificado a passagem desses trens. A amostra utilizada para a criação da tabela foi feita em um único dia, no qual não ocorreu nenhuma adversidade

que impactasse no tráfego de transporte ferroviário. Os horários foram estipulados a partir da disponibilidade que integrante do grupo teve de permanecer na estação sem maiores problemas, como risco de furto, etc.

### **3.3. ETAPA 3**

Foram comparadas três formas de utilização da energia recuperada, sendo elas:

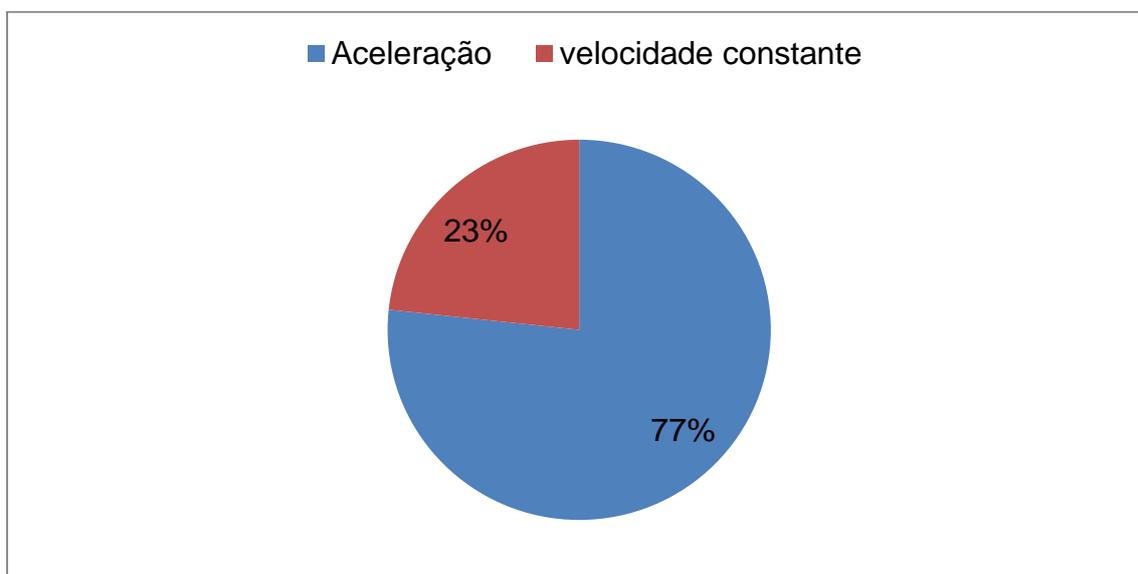
1. A transmissão de energia entre trens, onde a energia na frenagem é transmitida pela linha de alimentação até a subestação e logo em seguida direcionada para algum trem que esteja acelerando na mesma estação que o primeiro.
2. Uso autônomo, com a energia sendo armazenada em baterias dentro do corpo do trem.
3. A energia sendo utilizada por terceiros, isto é, a energia recuperada é voltada para alimentar a rede urbana da cidade e não propriamente os trens.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CONSUMO DO TREM

A partir das equações estabelecidas na etapa 1, foi descoberto que o consumo do trem foi num total de 32,52 kWh, com valores bem discrepantes entre as etapas de aceleração e de velocidade constante, como pode ser visto no Gráfico 1:

Gráfico 1 - Relação da energia consumida durante todo o trajeto



Fonte: Autores

A aceleração consumiu 24,94kWh de energia, enquanto o trecho com velocidade constante consumiu 7,58kWh. T tamanha diferença é explicada pelo conjunto de forças contrárias existentes nos dois momentos. No momento da aceleração, existe a força necessária para retirar o trem da inércia, além de diferentes valores de coeficientes de resistências encontrados na Equação (2), enquanto no movimento de velocidade constante só apresenta um valor de resistência. O consumo do trem coincide com a tabela estipulada em Pires (2013), mostrado na Fig.6:

Figura 3 - Tabela sobre consumo de veículos ferroviários

Tipo	Energia específica consumida	
	[Wh/t-km]	[kJ/t-km]
Metrô	50 a 110	180 a 396
TAV	40 a 70	144 a 252
Tramway	40 a 90	144 a 324
Trens interurbanos	50 a 75	180 a 270
Trens em linhas de montanhas	30 a 65	108 a 234
Trens em linhas planas	20 a 30	72 a 108
<b>Trem regional</b>	<b>25 a 75</b>	<b>90 a 270</b>
Trólebus e monotrilho	90 a 130	324 a 468
VLT	60 a 80	216 a 288

Fonte: Pires (2013), adaptada pelos autores

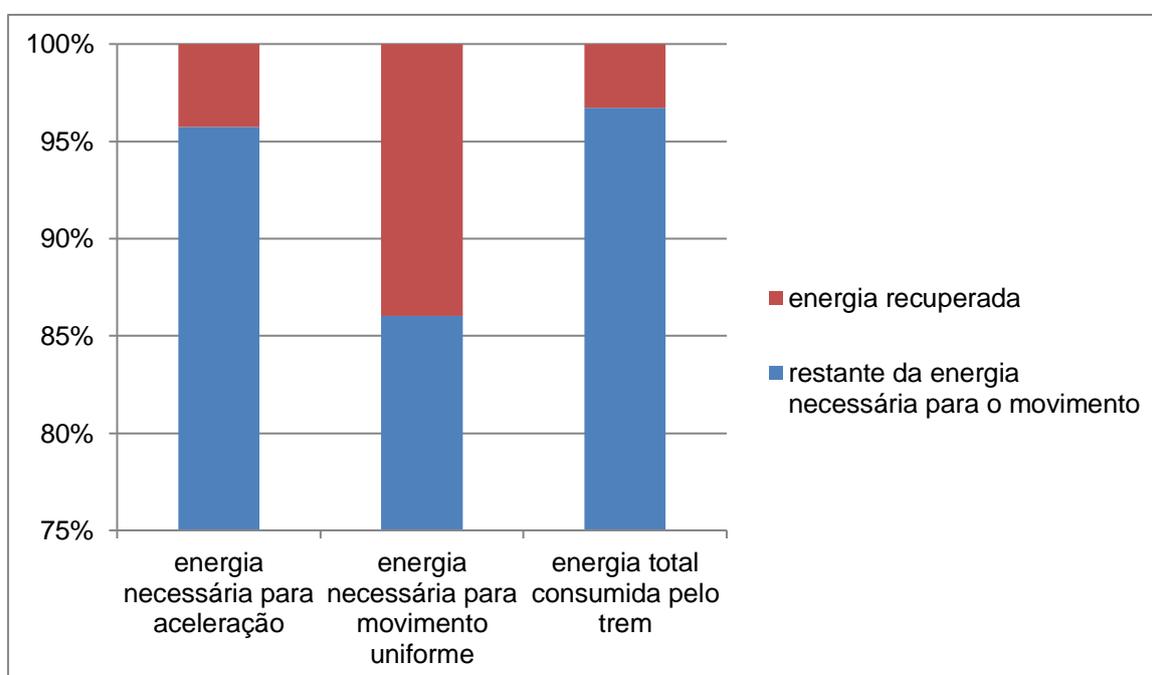
Para acharmos o valor correspondente, foi necessário um pequeno fator de conversão, que transformasse o consumo total do trem de kWh para Wh, e em seguida, esse valor foi dividido pelo peso do trem (t), junto da distância percorrida (km), obtendo assim a unidade estipulada pela tabela. O veículo utilizado neste estudo apresentou um consumo específico de 35,6 Wh/t.km, valor este cabível dentro do parâmetro de trem regional.

## 4.2 ENERGIA RECUPERADA

O veículo apresentou como energia de potencial regenerativo um total de 3,5kWh. Porém, como estipulado anteriormente, somente 30% dessa energia seria de fato recuperada, resultando em 1,06kWh de energia para cada trem ao realizar este trajeto.

A partir do Gráfico 2, é possível ver uma comparação entre energia recuperada e as energias necessárias para cada etapa do movimento do trem, junto da energia necessária para o todo:

Gráfico 2 - Relação entre energia recuperada e as consumidas durante o movimento.



Fonte: Autores

Como o Gráfico 2 mostra, a energia recuperada corresponde a quase 5% da energia utilizada na aceleração, pouco menos de 15% da necessária para o movimento

uniforme, porém quando comparada a energia total do percurso, a porcentagem recuperada pelo sistema KERS corresponde a aproximadamente 3%.

### 4.3 CAPACIDADE DE PRODUÇÃO

Mesmo que a capacidade de recuperação de um caso isolado tenha mostrado uma baixa quantidade em relação à energia necessária para todo transporte, é interessante cruzar esse dado com a quantidade de trens que passam pela estação num intervalo de tempo, como mostrado na tabela de chegada e saída presente no APÊNDICE I, onde apresenta 4E, como a identificação da linha utilizada como modelo neste trabalho.

No primeiro intervalo de tempo, de 10:45 até 11:30, houve a passagem de 6 trens da linha 4E, totalizando 6,36kWh de energia recuperada. No segundo intervalo, de 14:05 até 15:05, novamente houve a passagem de 6 trens, dando um total de 6,36kWh. Já no terceiro intervalo, de 15:05 até 16:08, período em que foi notado um crescimento no número de transeuntes na estação, houve a passagem de 12 trens, recuperando 12,72kWh. Durante todo o período em que foi feito o levantamento de dados, foi possível recuperar um total de 25,44kWh de energia, com uma média de  $8,48 \pm 2,83$ kWh.

Foram levados em consideração apenas os trens da linha 4E, pois corresponde ao trecho utilizado como modelo para este estudo, porém, como a velocidade utilizada pelo trem é padrão, é possível estipular que os demais trens das outras linhas também se comportem de maneira similar ao estipulado, possibilitando quantificar a quantidade de energia de todas as linhas nos períodos averiguados.

Os valores do primeiro intervalo, com a passagem total de 21 trens, aumentam para 22,26kWh, um aumento de 350% da energia obtida em relação à somente na linha 4E. O segundo intervalo, no qual passaram 23 veículos, aumenta para 24,38kWh, representando 383,33% da energia obtida na linha 4E. Por fim, no terceiro intervalo, com a passagem de 32 trens, há um total de 33,92kWh, correspondente a 139,24% da linha 4E, totalizando 80,56kWh de energia recuperada, esse valor corresponde a 316,67% da energia obtida na linha 4E, com uma média de  $26,85 \pm 4,71$ kWh.

## **4.4 APROVEITAMENTO DA PRODUÇÃO**

A partir dos valores de recuperação de energia obtidos, é possível pensar em formas de aproveitamento dessa energia. No uso direto nos trens, tem-se a opção de a energia ser lançada na linha de alimentação dos veículos ferroviários, sendo aproveitada quando a frenagem de um trem coincide com a aceleração de outro na mesma estação, ou, esta ser armazenada em baterias. Além dessas duas opções, existe a utilização para um cunho mais social, semelhante ao utilizado pela SEPTA, onde essa energia seria transferida para casas e/ou estabelecimentos.

### **4.4.1 LINHA DE ALIMENTAÇÃO**

Novamente, tomando-se como base o APÊNDICE I é possível identificar todos os encontros entre os veículos ferroviários em que a energia produzida por um poderia ser aproveitada por outro.

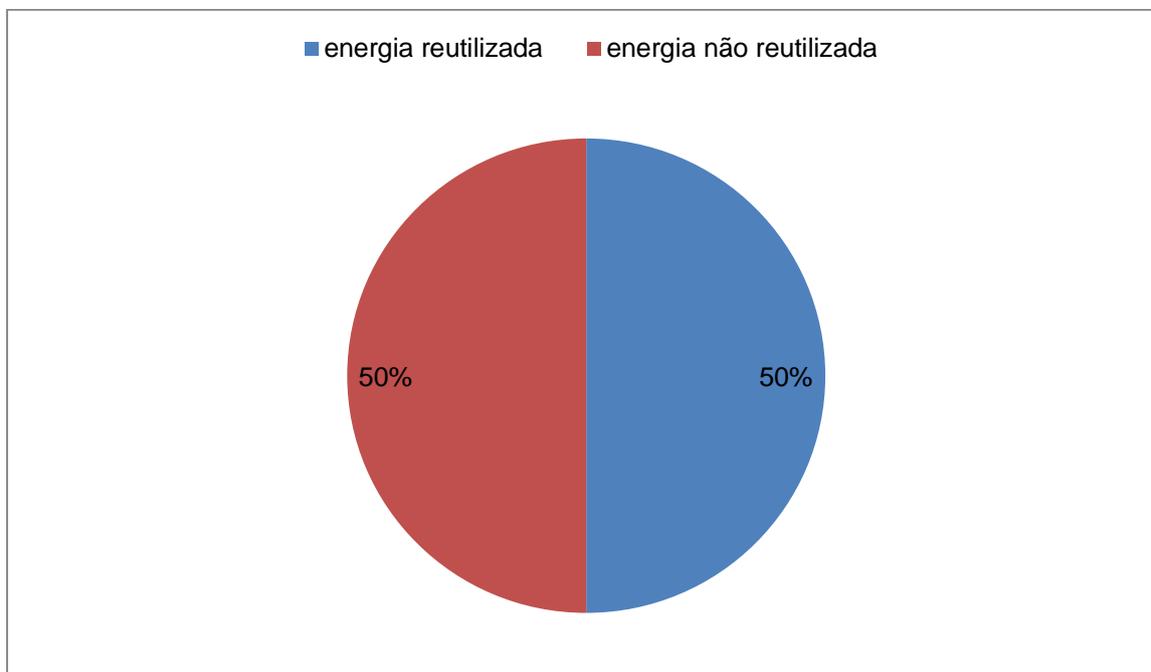
No primeiro intervalo, de 6 passagens de trens da linha 4E, ocorrem 4 encontros que aproveitam a energia produzida, estes sendo a primeira passagem de 10:45 (4E-1A), a segunda as 11:12 (2B-4E), a terceira as 11:18 (2B-4E), e a quarta as 11:29 (4E-4D). Sendo assim dos 6,36kWh, 4,24kWh seriam aproveitados, cerca de 66,67% da energia. A passagem de 10:56 (4E-1A) mesmo apresentando horários próximos não coincidiu a chegada de um com a saída de outro, já o trem das 11:21 foi o único que passou nesse horário.

No segundo intervalo ocorre uma drástica diminuição, com apenas 2 encontros de 6 passagens de trens na linha 4E, o primeiro as 14:19 (4E-2B) e o segundo as 14:30 (2B-4E), apresentando apenas 33,33% de aproveitamento da energia produzida, cerca de 2,12kWh. Na tabela do APÊNDICE I é possível observar momentos em que dois trens compartilham o mesmo horário, porém, eles chegaram e partiram em conjunto, não conseguindo aproveitar a energia gerada de suas frenagens.

No último intervalo de 12 passagens, houve 6 encontros, 15:18 (4E,1A-2B), 15:29 (4D-2B,4E), as 15:43 (4E-2C-1A), 15:45 (2B-4E), 15:59 (4E-4D), 16:07 (1A,2B-4E), isso corresponde a 50% da utilização da energia gerada, 6,36kWh.

No total, a energia reutilizada está descrita no gráfico 3:

Gráfico 3 - Porcentagem da energia reutilizada – Linha 4E



Fonte: Autores

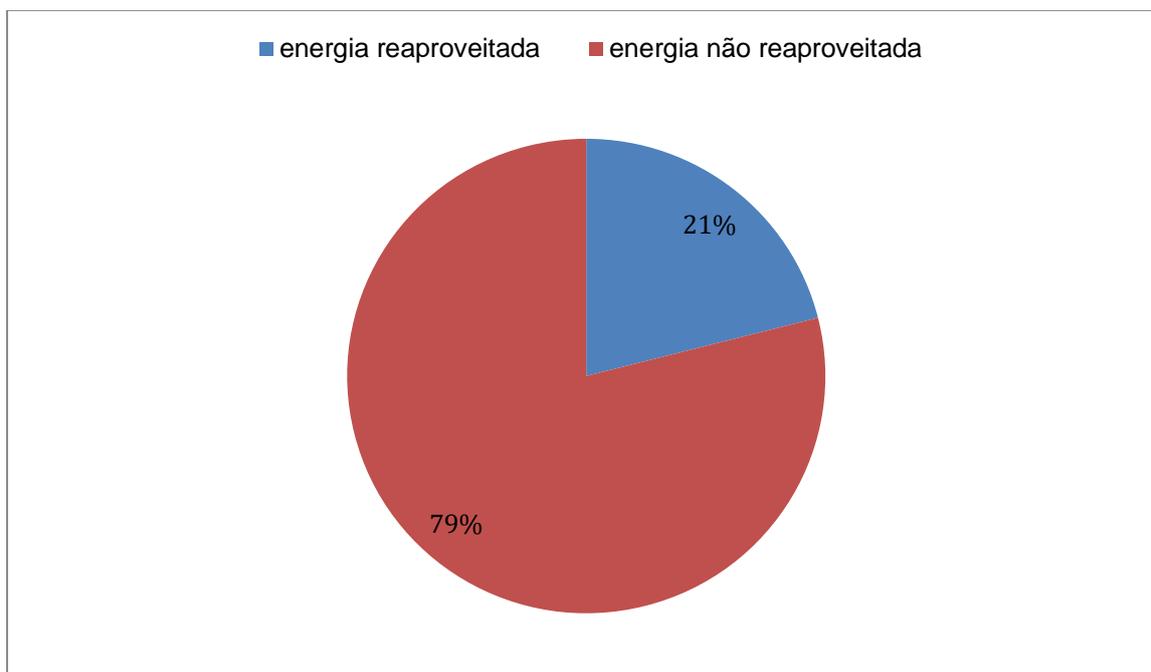
Dos 25,44kWh produzidos pela linha 4E, 12,72kWh seriam perdidos, correspondentes a 50% da energia produzida.

Novamente estipulando que os trens das demais linhas se comportem de maneira similar aos da linha 4E, tem-se:

No primeiro intervalo, houve um encontro a mais, além dos da linha 4E, as 11:01 (2B-2C), portanto das 21 passagens de trens, houveram 5 encontros, aproveitando 5,3kWh de totais 22,26kWh, isso equivale a 23,8%. No segundo intervalo, novamente, houve apenas um encontro a mais, além dos da linha 4E, as 14:55 (1A,2B-2C), totalizando 3,18 kWh de 24,38kWh recuperados, apenas 13%. Já no último intervalo foi constatado dois encontros a mais, além dos da linha 4E, as 15:55 (2B-1A,2C) e as 16:06 (2C-1A,2B), sendo assim, de 33,92kWh produzidos pelos 32 trens, 8,48kWh seriam aproveitados nos 8 encontros, cerca de 25%.

A energia reaproveitada na estação por todas as linhas pode ser vista no Gráfico 4:

Gráfico 4 - Porcentagem da energia reutilizada - Total



Fonte: Autores

Conforme o Gráfico 4, apenas 21% da energia produzida durante todo o período seria devidamente utilizada, isso corresponde a 16,96kWh de um total de 80,56kWh. Desses 21%, os trens da linha 4E correspondem a 75% dos encontros, sendo a linha com o maior coeficiente de aproveitamento.

Além do baixo aproveitamento da energia produzida, foi constatado com usuários desse sistema de transporte, uma lentidão recorrente nos trens, que segundo informações dos próprios usuários, tendem a ocorrer devido a um excesso de tráfego, ou o veículo apresentar algum defeito, impossibilitando a recuperação da energia apresentada nos cálculos, diminuindo ainda mais a quantidade reutilizada no período que algo assim ocorre.

#### 4.4.2 USO AUTÔNOMO

De acordo com Souza (2015), com o uso de armazenadores de energia, ESS (Energy Storage System), os trens podem armazenar temporariamente a própria energia produzida pela frenagem para reutilizá-la na próxima aceleração ou até fornecer um grau de autonomia em momentos de velocidade uniforme. Para essa aplicação, o sistema metroviário necessita atender as características de grande número de ciclos

de carga e descarga, alta capacidade de dissipar potência, alta capacidade de armazenamento de energia e peso e volume reduzidos.

Segundo Vazquez, et. al., (2010) citado por Souza (2015), as principais tecnologias que satisfazem estes requisitos são capacitores de dupla camada elétrica EDLCs (Electrical Double-Layer Capacitors) e as baterias de Lítio e Níquel. Como foi mostrado neste trabalho, a energia recuperada corresponde a um pouco menos de 5% da energia necessária para a aceleração, além disso, conforme (GONZALES-GIL, et. al. 2012) citado por Souza (2015), o ESS ajuda a minimizar os picos de potência durante a aceleração dos trens, resultando em redução de custos de energia e menos perdas resistivas na linha de distribuição.

No entanto Souza (2015) aborda que ESSs, geralmente, exigem grandes espaços no veículo com um aumento considerável de peso, sendo assim recomendado para projetos totalmente novos e não para adaptações de trens em uso. Souza (2015), ainda diz que no Brasil, atualmente, não existem projetos para aplicação desta tecnologia, devido a um custo maior de projeto do trem para manter a mesma quantidade de cidadãos transportados, além do acréscimo de custos de manutenção da via devido ao acréscimo de peso e em condições de sobretensões aumenta a probabilidade de explosões dos capacitores, acarretando o aumento de riscos de acidentes com cidadãos.

#### **4.4.3 USO FORA DA ESTAÇÃO**

Esse modelo funciona de maneira semelhante ao mostrado no subtópico 4.4.1, com a diferença de que a energia não retorna para a linha de alimentação dos trens, e sim transportada para a subestação mais próxima responsável pela empresa de energia, e em seguida redirecionada para uso público, como postes de iluminação, semáforos e casas. Com esse método, mesmo que a energia não fosse utilizada diretamente pela empresa de transporte, o retorno para a empresa de energia resultaria num alívio dos custos relacionados à energia, portanto dos 80,56kWh totais produzidos, aproximadamente 2,48 viagens dentro do trecho utilizado neste trabalho seriam economizadas.

Segundo a EPE o consumo médio residencial, baseado no ano de 2017, é de 157,9kWh/mês, considerando mês como 30 dias, equivalendo a aproximadamente 5,26kWh/dia, portanto, com o total de energia produzido pelos trens analisados neste trabalho, seria possível alimentar 15,32 residências por dia.

Por esse modelo ser parecido com o abordado no subtópico 4.4.1, apresenta as mesmas carências, a falta de produção da energia quando os ramais apresentam grande tráfego, ou algum defeito, fazendo com que os trens percorram os trilhos com velocidades bem abaixo do padrão.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho possibilitou uma análise sobre a capacidade de produção de energia proveniente da frenagem do veículo, abordando formas de serem utilizadas e como essas diferentes formas se comportariam no que diz respeito ao aproveitamento da energia e integração.

Tendo como modelo um trecho do ramal Santa Cruz-Central do Brasil, foi possível realizar uma simulação com um modelo de trem atualmente utilizado, com as relações da energia necessária para o movimento e a energia recuperada presentes no Gráfico 2. Também foi possível obter dados sobre quantidade e horários dos trens e como esses dados impactam no aproveitamento da energia, permitindo assim, que os objetivos propostos fossem alcançados.

O estudo das formas de aproveitamento permitiu averiguar que a forma de reaproveitamento de energia mais proveitosa, presente no trabalho, foi transmitir a energia para fora da estação. O aproveitamento, caso mandado direto para linha, se mostrou baixo, conforme o Gráfico 4, e o uso de baterias dentro do corpo do trem é recomendado para modelos novos e não para adaptações, além de apresentar certos riscos ao usuários, enquanto o modelo de transmissão para fora da estação, consegue aliviar os custos de consumo de energia, arrebatando parte a partir dessa energia devolvida para a empresa de energia. Além do valor social existente advindo da capacidade dessa energia alimentar por volta de 16 residências domésticas por dia.

Dada as circunstâncias envolvendo o modelo com baterias dentro do corpo do trem, torna-se necessário um estudo sobre um modelo de baterias fora do veículo ferroviário, como ele se comportaria, onde poderia ser instalado, e se provaria ser melhor do que o estipulado neste trabalho. Também é necessário um estudo com uma amostra maior da movimentação dos trens pela estação, envolvendo mais de um dia, para que seja possível a comparação da quantidade de energia recuperada entre dias da semana, finais de semana e feriados.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB (Pensilvânia). SEPTA stays focused on energy efficiency with second energy storage and unique hybrid system from ABB. 2014. Disponível em: <<http://www.abb.com/cawp/seitp202/186379817a2df9b6c1257d57004c026e.aspx>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

CANADÁ. UNIVERSITY OF CALGARY. . Regenerative braking. Disponível em: <[https://energyeducation.ca/encyclopedia/Regenerative\\_braking](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Regenerative_braking)>. Acesso em: 28 nov. 2018.

CERAOLO, M. et. al. Energy storage systems to exploit regenerative braking in DC railway systems: Different approaches to improve efficiency of modern high-speed trains. Elsevier , Firenze, v. 16, n. 10, p.269-279, 01 abr. 2018. Disponível em: <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>. Acesso em: 17 set. 2018.

CLARKE, Peter; MUNEER, Tariq; CULLINANE, Kevin. Cutting vehicle emissions with regenerative braking. Elsevier, Edinburgh, v. 15, n. , p.160-167, 13 mar. 2010. Disponível em: <[https://www-sciencedirect.ez120.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1361920910000039](https://www.sciencedirect.ez120.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1361920910000039)>. Acesso em: 28 nov. 2018.

DOUGLAS, Heather et. al. An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks. Energy Conversion And Management, Edgbaston, v. 106, p.1149-1165, dez. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415009759>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Consumo Anual de Energia Elétrica por classe (nacional). 2018. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica/consumo-anual-de-energia-eletrica-por-classe-\(nacional\)](http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica/consumo-anual-de-energia-eletrica-por-classe-(nacional))>. Acesso em: 28 nov. 2018.

FREITAS, Daniel Zacarias. Análise de Eficiência e Controle de um Sistema Integrado Roda-Motor Elétrico. 2015. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <[http://meggi.usuarios.rdc.puc-rio.br/teses/MSc15\\_Daniel\\_Zacarias\\_Freitas.pdf](http://meggi.usuarios.rdc.puc-rio.br/teses/MSc15_Daniel_Zacarias_Freitas.pdf)>. Acesso em: 28 nov. 2018.

HILLMANSEN, S. et. al. Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways. IEEE, Stevenage, v. 1, p.675-682, 27 ago. 2007. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4295937>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

HILLMANSEN, S. et. al. Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways. IEEE, Stevenage, v. 1, p.675-682, 27 ago. 2007. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4295937>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

HILLMANSEN, Stuart et. al. Increasing the Regenerative Braking Energy for Railway Vehicles. IEEE, Edgbaston, v. 15, p.2506-2515, 14 maio 2014. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6818443>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

IBAIONDO, Harkaitz; ROMO, Asier. Kinetic energy recovery on railway systems with feedback to the grid. IEEE, Ohrid, v. 9, p.94-97, out. 2010. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5606545/citations#citations>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

LAROCCA, Ana Paula Camargo; OLIVEIRA, Luís Henrique Sales. Controle da demanda de energia para melhor aproveitamento da frenagem regenerativa dos trens. Anais.. São Paulo: USP/Pró-Reitoria de Pesquisa, 2013. Disponível em: [http://www.anpet.org.br/ssat/interface/content/autor/trabalhos/publicacao/2013/4\\_RIC.pdf](http://www.anpet.org.br/ssat/interface/content/autor/trabalhos/publicacao/2013/4_RIC.pdf). Acesso em: 28 nov. 2018.

MAGNETI MARELLI (Itália). KERS. [20--]. Disponível em: <[https://www.magnetimarelli.com/pt/business\\_areas/motorsport/excel%C3%A4ncias-tecnol%C3%B3gicas/kers](https://www.magnetimarelli.com/pt/business_areas/motorsport/excel%C3%A4ncias-tecnol%C3%B3gicas/kers)>. Acesso em: 28 nov. 2018.

NASCIMENTO, Paulo César do. Sistema de Controle de Frenagem para Trens Metropolitanos de Tração Elétrica. 2012. 167 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

PIRES, Cassiano Lobo. Engenharia Elétrica Ferroviária e Metroviária: Do trólebus ao trem de alta velocidade. Rio de Janeiro: Ltc, 2013. 432 p.

RIO GRANDE DO SUL. PROCEL. . Com renovação de frota, Trensurb reduz em 10% consumo de energia. 2016. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B8D1AC2E8-F790-4B7E-8DDD-CAF4CDD2BC34%7D&Team=¶ms=itemID=%7B28A6DB46-474B-44F3-AA17-351A9CF97A0D%7D;&ServiceInstUID=%7BA9D6BC0A-4FEF-4175-8A84-0C9BE1FDF0DE%7D>>. Acesso em: 28 nov.2018.

ROCHA, Bárbara Pacheco da; ALBERTON, Henrique Benicio de Souza; OLIVEIRA, Luisa Batista de. FRENAGEM REGENERATIVA. 2014. 5 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2014.

RUBIN, Edward S.. INTRODUCTION TO ENGINEERING AND THE ENVIRONMENT. New York: Mcgraw - Hill, 2001. 33 p. Disponível em: <[https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/40447725/Introduction\\_to\\_engineering\\_and\\_the\\_environment.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1543443466&Signature=BxrmY%2Fjlb8of8UuOpVDolGviekk%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DIntroduction\\_to\\_engineering\\_and\\_the\\_envi.pdf](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/40447725/Introduction_to_engineering_and_the_environment.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1543443466&Signature=BxrmY%2Fjlb8of8UuOpVDolGviekk%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DIntroduction_to_engineering_and_the_envi.pdf)>. Acesso em: 28 nov. 2018.

SEPTA (Pensilvânia). Will Brake For Batteries: SEPTA, Constellation, and Viridity Energy Announce 8.75-Megawatt Energy Storage Project. 2016. Disponível em: <<http://septa.org/media/releases/2016/1-21-16.html>>. Acesso em: 17 set. 2018.

SOUZA, Carlos Alberto de. Desenvolvimento de Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária: ACTREM: Melhoria da eficiência energética de sistemas de tração metroviária. 2015. 180 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

VASCONCELOS, Igor. Sistema de Regeneração para Elevadores. 2016. Projeto de graduação. Disponível em: <[http://bdm.unb.br/bitstream/10483/16654/1/2016\\_IgorVasconcelosCavalcante\\_tcc.pdf](http://bdm.unb.br/bitstream/10483/16654/1/2016_IgorVasconcelosCavalcante_tcc.pdf)>. Acesso em: 18 set. 2018.

TRENSURB. Especificação dos novos trens. Porto Alegre: Trensurb, 2012. 275 p. Disponível em: <<http://www.trensurb.gov.br/paginas/upload/files/Especificacao%20A7%A3o%20Novos%20Trens%202012%20Final%20-%202017-07-2012.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2018.

WALT BLAKE. JET TRANSPORT PERFORMANCE METHODS. Seattle: The Boeing Company, 2009.

## 7. APÊNDICE I – TABELA DE CHEGADA E SÁIDA DOS TRENS NA ESTAÇÃO OLÍMPICA DE ENGENHO DE DENTRO

1A	2B	2C	4D	4E	Saída	Chegada
				x	10:45	10:45
x					10:46	10:46
		x			10:47	10:47
x					10:51	10:51
		x			10:54	10:54
				x	10:56	10:55
x					10:57	10:56
	x				11:01	11:01
		x			11:02	11:02
	x				11:03	11:03
	x				11:11	11:11
				x	11:12	11:12
		x			11:17	11:16
	x				11:17	11:17
				x	11:18	11:18
		x		x	11:21	11:21
x	x	x			11:25	11:24
	x			x	11:29	11:28
		x			11:30	11:29
	x				14:05	14:05
		x			14:11	14:10
x					14:11	14:11
		x		x	14:14	14:14
				x	14:19	14:17
	x				14:20	14:19
		x			14:26	14:26
	x				14:30	14:30
				x	14:32	14:31
x		x			14:35	14:34
		x		x	14:39	14:38
	x				14:43	14:42
x					14:45	14:44
		x		x	14:48	14:47
				x	14:53	14:52
x	x				14:55	14:54
		x			14:56	14:55
		x			15:01	15:02
x	x			x	15:07	15:06
		x	x		15:09	15:08
				x	15:15	15:15

x				x	15:18	15:17
	x				15:19	15:18
				x	15:23	15:22
				x	15:24	15:24
			x		15:29	15:28
	x			x	15:30	15:29
		x			15:35	15:34
x		x		x	15:43	15:42
	x				15:45	15:44
				x	15:45	15:45
			x	x	15:50	15:49
	x				15:55	15:54
x		x			15:56	15:55
				x	15:59	15:58
			x		16:00	15:59
				x	16:01	16:01
		x			16:06	16:05
x	x				16:07	16:06
				x	16:08	16:08
Legenda						
	A saída e chegada de trens coincidem.					
	A saída e chegada de trens não coincidem.					
15:56	Existe saída coincidindo com chegada, porém também existe encontro que não coincide.					
1A-2B- 2C-4D- 4E	Respectivas linhas.					
x	Trem.					