

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA EM AMBIENTE
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENERGIA E AMBIENTE

KARDILSON PEREIRA RODRIGUES

**ANÁLISE DE MODELOS DE GESTÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO
TRANSPORTE FERROVIÁRIO HEAVY HAUL**

São Luís

2018

KARDILSON PEREIRA RODRIGUES

**ANÁLISE DE MODELOS DE GESTÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO
TRANSPORTE FERROVIÁRIO HEAVY HAUL.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão, para a obtenção do título de Mestre em Energia e Ambiente.

Orientador: Dr. Shigeaki L. de Lima

São Luís

2018

Rodrigues, Kardilson Pereira.

Análise de modelos de gestão da eficiência energética no transporte ferroviário heavy haul / Kardilson Pereira Rodrigues. - 2018.

116 f.

Orientador(a): Shigeaki Leite de Lima.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Energia e Ambiente/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luis, 2018.

1. Eficiência Energética. 2. Ferrovias Heavy Haul. 3. Transporte de Cargas. I. Lima, Shigeaki Leite de. II. Título.

KARDILSON PEREIRA RODRIGUES

**ANÁLISE DE MODELOS DE GESTÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO
TRANSPORTE FERROVIÁRIO HEAVY HAUL.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão, para a obtenção do título de Mestre em Energia e Ambiente.

Aprovada em: ___ / ___ / ___

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Shigeaki Leite de Lima (Orientador)

Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente (PPGEA/UFMA)

Prof. Dr. Sergio Sampaio Cutrim

Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente (PPGEA/UFMA)

Prof. Dr. Stefan Hubertus Dörner

Instituto Federal do Maranhão (IFMA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que sempre está me abençoando e gerando oportunidades em minha vida

Agradeço a minha esposa Raquel, com apoio incondicional durante toda a jornada deste curso, sendo paciente nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos meus filhos, Levi, Davi e Yasmin, minhas grandes motivações de vida, o carinho de vocês sempre me impulsiona a seguir em frente

Agradeço aos meus pais, meus grandes alicerces, me educaram para sempre querer buscar crescer profissionalmente e como pessoa, amo muito vocês.

Agradeço ao meu orientador, prof. Shigeaki L. de Lima, pela orientação com disciplina, sempre com muita competência e conhecimento.

Agradeço a Vale S. A., representado pelo gerente Ricardo Schmitt, pela liberação para participar deste mestrado, sempre acreditando e investindo em meu desenvolvimento.

Agradeço ao engenheiro Victor Mota, pelo apoio com material bibliográfico e dos modelos de eficiência energética.

RESUMO

O transporte de cargas é estratégico para qualquer país que busca o desenvolvimento, e a utilização do modal ferroviário tem sua relevância, principalmente em países de dimensões continentais. Na operação de uma ferrovia, principalmente nas classificadas como *Heavy Haul*, a gestão da eficiência energética está ligada tanto aos aspectos econômicos quanto aos aspectos ambientais, em função destas ferrovias utilizarem locomotivas diesel elétricas, consumindo um tipo de energia não renovável (o diesel), e com emissão de CO_2 . Ao longo das décadas, ocorreu evolução das práticas de gestão da eficiência energética no mundo, principalmente em ferrovias dos Estados Unidos da América, com uso mais intenso de tecnologias e renovação de frota com locomotivas mais eficientes. No Brasil as poucas ferrovias possuem modelos de gestão buscando também esta melhoria, muito em função dos custos maiores do diesel, em comparação com ferrovias de outros países. Assim, será abordado no presente trabalho uma análise dos modelos de gestão da eficiência energética de ferrovias do Brasil, Estados Unidos da América e Canadá, com o objetivo de propor um modelo para melhoria dos processos de gestão existentes e para novas operações ferroviárias.

Palavras – chave: Transporte de Cargas, Ferrovias *Heavy Haul*, Eficiência Energética.

ABSTRACT

Freight transportation is strategic for any country seeking development, and the use of the rail modal is of relevance, especially in countries with continental dimensions. In the operation of a railroad, especially those classified as Heavy Haul, the management of energy efficiency is linked to both economic and environmental aspects, as these railroads use electric diesel locomotives, consuming a type of non-renewable energy (diesel), and with emission of CO_2 . Over the decades, energy efficiency management practices in the world have evolved, especially in United States railroads, with more intense use of technologies and fleet renewal with more efficient locomotives. In Brazil, the few railroads have management models looking for this improvement, much in function of the higher costs of diesel, compared to railroads of other countries. Thus, an analysis of the energy efficiency management models of railroads of Brazil, the United States of America and Canada will be approached in order to propose a model for improving existing management processes and for new railway operations.

Keywords: Freight Transportation, Heavy Haul Railway, Energy Efficiency.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 METODOLOGIA	16
3 TRANSPORTE DE CARGAS	17
3.1 DEFINIÇÕES E ESTRUTURA	17
3.2 COMPARAÇÃO ENTRE MODAIS DE TRANSPORTE DE CARGA	22
3.3 HISTÓRIA E EVOLUÇÃO DAS FERROVIAS NO BRASIL E EUA	25
4.1 MATERIAL RODANTE.....	30
4.2 LOCOMOTIVAS	32
4.3 DINÂMICA FERROVIÁRIA	35
5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	40
5.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FERROVIAS.....	43
5.1.1 MODELANDO UM TREM.....	45
5.2 INDICADORES DE DESEMPENHO	47
6 INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	48
7 TECNOLOGIAS E MÉTODOS AVANÇADOS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	52
7.1 SIMULAÇÃO DE OPERAÇÃO FERROVIÁRIA EM SOFTWARES	52
7.2 SIMULADOR TEM.....	53
7.3 SIMULADOR TDS.....	54
7.4 SIMULADOR VALE CONVÊNIO COM A USP	54
7.5 <i>TRIP OPTIMIZER</i>	56
7.6 LEADER.....	57
7.7 <i>AUTOMATIC ENGINE START AND STOP (AESS)</i>	59
7.8 FREIO ELETRO PNEUMÁTICO	59
7.9 <i>FREIGHTMISER</i>	61
8 RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DURANTE PROCESSO DE OPERAÇÃO DE TRENS 64	
9 UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS PARA OTIMIZAÇÃO DE PERCURSO DOS TRENS 68	
10 TECNOLOGIA NA LUBRIFICAÇÃO DOS TRILHOS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	71
11 RESULTADOS E DISCUSSÃO	73

11.1 Estrada de Ferro Carajás	75
11.2 MRS Logística as	78
11.5 RUMO	85
11.6 <i>Norfolk Southern Railway</i>	87
11.7 <i>Union Pacific</i>	90
11.8 <i>Canadian National</i>	91
11.9 <i>BNSF</i>	93
12 FATORES QUE IMPACTAM NO INDICADOR	94
13 MODELO DE GESTÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA NOVAS OPERAÇÕES FERROVIÁRIAS	99
14 CONCLUSÃO	105
REFERÊNCIAS	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Relação entre crescimento do PIB e Aumento no volume de transporte e armazenagem.	17
Figura 2 - Índice de serviço transporte de cargas e o ciclo de crescimento econômico nos EUA	18
Figura 3 - Distribuição do transporte de cargas no Brasil	18
Figura 4 - Distribuição do transporte de cargas no Brasil por modal de transporte.....	19
Figura 5 - Índice de Preço ao Produtor, modais ferroviário, aéreo, rodoviário e aquaviário. .	21
Figura 6- Distribuição de custos dos principais modais de transporte nos EUA.	22
Figura 7- Modal transporte versus produtos transportados na Alemanha em 2013	23
Figura 8 - Comparação do modal rodoviário com intermodal de rodoviário – ferroviário - rodoviário	24
Figura 9 - Exemplo de terminal intermodal rodo-ferroviário para escoamento de grãos.	24
Figura 10 - Concessionárias das ferrovias do Brasil e os principais produtos	29
Figura 11 - Percentual dos tipos de vagões sobre a frota total	31
Figura 12 - Comparação das características de projeto de vagões de acordo com os padrões UIC e AAR.	31
Figura 13- Configuração de locomotivas diesel-elétricas	32
Figura 14 - Conversão de energias no sistema diesel-elétrico de locomotivas	33
Figura 15- Configuração de locomotivas elétricas.....	33
Figura 16 - Desenvolvimento de locomotivas movidas a gás natural	34
Figura 17- Desenvolvimento da teoria da dinâmica ferroviária.....	35
Figura 18- Roda deslizando sobre superfície horizontal metálica.....	36
Figura 19 - Conjugado motor C_m sendo aplicado pela Locomotiva a via férrea.....	36
Figura 20 - Relação no plano inclinado.....	38
Figura 21- Exemplo de superelevação na via.....	39
Figura 22 - Sistema pneumático de freio em veículos ferroviários.....	40
Figura 23 - Processo de conversão de energia.....	41
Figura 24 - Fluxos de energia para um trem.....	45
Figura 25- Curva de esforço de tração	47
Figura 26 - Curva de esforço de tração por ponto de aceleração aplicado.....	47
Figura 27- TKB em trecho específico de uma ferrovia.....	49
Figura 28 - TKB total de uma ferrovia, composto por todos os trechos	49

Figura 29 - Exemplo de árvore do Indicador de Eficiência Energética	51
Figura 30 - Perfil de velocidade gerado pelo TEM	53
Figura 31 - Simulador convênio Vale com a USP	55
Figura 32 - Interface homem máquina trip optimizer	57
Figura 33 - Interface homem máquina LEADER.....	57
Figura 34 - Configuração de testes na NFS com tração convencional e tração distribuída	58
Figura 35 - Trem com sistema ECP	60
Figura 36 - Comparativo de trens utilizando sistema de frenagem convencional de frenagem com ECP.....	61
Figura 37 - Diagrama de bloco do FreightMiser	62
Figura 38 - Interface homem máquina do FreightMiser	63
Figura 39 - Interface homem máquina do FreightMiser evoluída.....	63
Figura 40 - Motor de Tração , funcionando no modo tração (à direita), e no modo frenagem dinâmica (à esquerda).....	64
Figura 41 - Comparação da energia gerada pela frenagem dinâmica calculada versus simulada pelo TEM.....	65
Figura 42 - Configuração das locomotivas em trem no padrão convencional (a) e com o FESS (b).	66
Figura 43 - Esquema geral das locomotivas com padrão convencional (a) e com o FESS (b).	67
Figura 44 - Trens circulando em linha singela em sentidos opostos, com pátios de cruzamento entre os mesmos	69
Figura 45 - Exemplo de trens em via singela com ajuste de TCS utilizando as três etapas.....	70
Figura 46 - Modelo dinâmico multi-corpo veículo sobre a via.....	72
Figura 47 - Melhoria da eficiência energéticas das ferrovias EUA e Canadá.....	73
Figura 48 - Evolução do TKU/Litro das ferrovias heavy haul do Brasil	74
Figura 49 - Evolução do volume transportado da EFC em milhares de toneladas/ano.....	76
Figura 50 - Fluxo do modelo de gestão da EFC.....	76
Figura 51 - Modelo de gestão da eficiência energética da EFC	77
Figura 52 - Evolução do volume transportado da MRS Logística	79
Figura 53 - Evolução do volume transportado da EFVM	81
Figura 54 - Evolução do volume transportado VLI.....	83
Figura 55 - Evolução do volume transportado RUMO	86
Figura 56 - Performance de Eficiência Energética da Norfolk Southern Railway	88

Figura 57- Sistema LEADER em locomotiva da Norfolk Southern Railway.....	89
Figura 58 - NS 999 locomotiva hibrida protótipo.	89
Figura 59 - Dispositivo ArroWedge da UP	91
Figura 60 - Canadian National nos EUA e Canadá.....	92
Figura 61- BNSF Railway nos EUA e Canadá	93
Figura 62- Mapa de aderência das ferrovias a fatores que impactam o indicador de eficiência energética.....	97
Figura 63 - Proposta de modelo base de gestão da eficiência energética para ferrovias heavy haul.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre os EUA e os países dos BRIC	20
Tabela 2 - Comparação do custo de transporte por modal (km/tonelada).....	25
Tabela 3 - Volume transportado em 2016, ferrovias heavy haul no Brasil.	30
Tabela 4 - Resistência ao movimento em diferentes tipos de veículos	37
Tabela 5 - Comparativo das ferrovias do Brasil e EUA quanto a TKU/l e percentual do custo do diesel sobre o custo total para manter a operação.	75
Tabela 6 - Comparativo das ferrovias do Brasil quanto a volume transportado (em toneladas útil) e eficiência energética (em L/1000xTKB).....	75
Tabela 7 - Fatores que impactam no indicador de eficiência energética.....	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAR	<i>Association of American Railroads</i>
AESS	<i>Automatic Engine Start and Stop</i>
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
CCO	Centro de Controle Operacional
CN	<i>Canadian National</i>
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
EFC	Estrada de Ferro Carajás
EFVM	Estrada de Ferro Vitória a Minas
EUA	Estados Unidos da América
FESS	<i>Flywheel Energy Storage System</i>
FNS	Ferrovias Norte Sul
FRA	<i>Federal Railroad Administration</i>
HPTA	<i>Horsepower Tonnage Analyzer</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IHHA	<i>International Heavy Haul Association</i>
IPP	Índice de Preços ao Produtor
IST	Índice de Serviço dos Transportes
LEADER	<i>Locomotive Engineer Assist/Display & Event Recorder</i>
MTTO	<i>Multi-Train Trajectory Optimization</i>
NS	<i>Norfolk Southern</i>
NYAB	<i>New York Air Brake</i>

PIB	Produto Interno Bruto
PNLT	Plano Nacional de Logística e Transportes
TCS	<i>Timetable Constraint Set</i>
TDS	<i>Train Dynamic System</i>
TEM	<i>Train Energy Model</i>
TKB	Tonelada Quilometro Bruta
TNLSA	Transnordestina Logística S. A.
TOR	<i>Top of Rail</i>
TTCI	<i>Transportation Technology Center Inc.</i>
UP	<i>Union Pacific</i>
VLI	Valor da Logística Integrada

1 INTRODUÇÃO

As ferrovias denominadas *heavy haul* (ferrovias de transporte com alta carga por eixo) tem eficiência energética superior quando comparadas ao modal rodoviário, o que torna a utilização atrativa, quando não é considerado custos de implantação e dependendo da carga a ser transportada.

Porém, estas ferrovias são compostas na grande maioria com locomotivas diesel-elétricas, as quais utilizam geradores para transformar a energia produzida pela queima do combustível fóssil em energia elétrica para o acionamento da locomotiva e serviços auxiliares. Logo, como o ciclo de combustão do diesel tem baixa eficiência, o consumo de óleo diesel representa um dos maiores custos da operação.

Existem alguns indicadores que monitoram esta eficiência do modelo, sendo o mais utilizado o que considera o cálculo da eficiência energética em função da quantidade de litros de diesel consumidos, dividido pelo volume transportado em TKB (Tonelada Quilometro Bruto), o indicador representa a quantidade de toneladas que passaram sobre a via, levando em conta todas as cargas (trens remunerados, trens de serviço, equipamentos ferroviários de manutenção), o qual quanto menor o valor, mais eficiente é a ferrovia (chamados indicadores de notação negativa, quanto menor o valor melhor), no que se refere a energia necessária para sustentar a operação de transporte.

Este indicador de eficiência energética tem influência de fatores ligados a potência das locomotivas versus a tonelagem do total do trem, aos modelos de operação dos trens, ao monitoramento do desempenho das locomotivas, a aerodinâmica dos veículos ferroviários (locomotivas e vagões), ao perfil da ferrovia, dentre outros fatores que não tem relevância destacada.

A Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF), apresenta com base no ano de 2015, a comparação do indicador de TKU (Toneladas Quilometro Úteis, que é toda tonelada útil transportada, multiplicada pelo quilometro percorrido pela mesma), dividido por litros consumidos entre as ferrovias do Brasil e dos Estados Unidos da América (EUA).

Esta comparação mostra que a eficiência energética média das ferrovias do Brasil era de 253 TKU/Litros, representando um percentual de 30% do custo total para manter as ferrovias.

As ferrovias dos EUA, para o mesmo período de 2015, apresentavam 198 TKU por litros de eficiência energética, porem representando 13% do custo total.

Desta forma, o modelo de gestão da eficiência energética será o responsável por buscar um resultado do indicador com níveis competitivos. Sem gestão energética, uma ferrovia pode não possuir sustentabilidade no médio e longo prazo.

O modal ferroviário leva vantagem quando comparado ao modal rodoviária para o transporte de cargas, guardadas as devidas premissas de estrutura e acesso, e segue muito utilizado nos países desenvolvidos, com infraestrutura avançada, o que eleva a uma alta competitividade, principalmente no transporte de cargas.

No Brasil, o percentual do modal rodoviária é bem superior quando comparado ao ferroviário, o que impacta diretamente na redução da competitividade dos produtos nacionais (Custo Brasil).

Sendo os altos custos do modal ferroviário atrelados ao consumo de óleo diesel (da ordem de 30% a 40% dos custos totais), os trabalhos direcionados para redução destes custos tem relação direta com a viabilização do modal ferroviário e sustentabilidade do negócio no seu conceito amplo, uma vez que o combustível utilizado é de matriz fóssil, gerando também impactos ao ambiente, mesmo que quando comparado ao modal rodoviário, haja sensível redução deste impacto ambiental.

Em países continentais, o tema logístico deve ser pautado de forma contínua, não há sentido em deslocar cargas por grandes distâncias em modais menos eficientes, no caso o rodoviário.

Comparando dois países com características continentais, como o Brasil e os EUA, o primeiro tem seu modal rodoviário representando 67% de todas as cargas transportadas no país, sendo o segundo, com 31% apenas (Cabral, 2017).

Desta forma, viabilizar o investimento no modal ferroviário está atrelado a aumento de competitividade do país.

O modelo de gestão da eficiência energética em ferrovias de alta carga por eixo, denominadas *heavy haul*, passa por um controle dos fatores que impactam positivamente ou negativamente nesta eficiência, se não há gestão dos mesmos não é possível controle.

Dado a diferença de frota de locomotivas, tamanho do trem, perfil de via, peso médio transportado, contato roda trilha, entre as ferrovias nacionais e internacionais, as prioridades de fatores que impactam na eficiência energética dos trens não pode ser um padrão, mas o modelo desta gestão pode possuir elementos das melhores práticas, gerando um modelo que pode ser adotado com a perspectiva de gerar ganhos ao negócio.

Este modelo, gerado das melhores práticas entre as ferrovias de alta carga por eixo, não pode ser considerado unicamente padrão para início da gestão da eficiência energética

em novos projetos ferroviários, mas uma referência útil para iniciar com uma estrutura básica de gestão para o tema.

O modelo gerado também servirá de base para continuidade de estudos quanto ao tema, uma vez que as diferenças de eficiência energética existentes em ferrovias com características semelhantes muitas vezes não conseguem ser explicadas, até mesmo se todos os fatores estão sendo explorados, controlados e com contramedidas para se chegar ao resultado esperado.

Como objetivo geral do presente trabalho é proposto analisar os modelos de gestão da eficiência energética das principais ferrovias *heavy haul* do Brasil e do mundo que utilizam os modelos diesel – elétrica de tração e propor um modelo utilizando as melhores práticas de cada modelo analisado.

Como objetivos específicos para o presente trabalho é proposto:

1. Comparar os modelos de gestão da eficiência energética de cada ferrovia;
2. Analisar os fatores que impactam no indicador de eficiência energética;
3. Propor uma referência para novas operações e melhoria das atuais, a partir das melhores práticas dos modelos analisados.

2 METODOLOGIA

Sobre a perspectiva dos procedimentos técnicos, o presente trabalho baseou-se em pesquisas bibliográfica e documental, onde ocorreu levantamento bibliográfico do estado da arte em gestão de eficiência energética, e utilização dos modelos de gestão de ferrovias *heavy haul* do Brasil, EUA e Austrália. (Silveira *et al*, 2009).

Sobre a perspectiva de seus objetivos, a pesquisa foi exploratória, quanto a forma de abordagem do problema, foi qualitativa. (Silveira *et al*, 2009).

O presente trabalho usou como base de modelos de gestão das ferrovias do Brasil, material apresentado no *Workshop* Nacional de Eficiência Energética, realizado em 2017 com as principais ferrovias do Brasil.

Os modelos de eficiência energética das ferrovias do Brasil serão analisados com base nos seguintes itens, conforme materiais apresentados no *workshop* de eficiência energética.

1. Gestão do indicador Eficiência Energética
2. Gestão do modelo operacional;
3. Implementação de tecnologias e métodos avançados para melhoria da eficiência energética;

Para as ferrovias dos EUA e Canadá, os modelos foram levantados por meio de informações disponíveis nos sites das próprias ferrovias, em alguns presentes em seus relatórios de sustentabilidade, atrelando a eficiência energética a redução de emissões atmosféricas.

Os principais impactos ao indicador de eficiência energética e os desafios indicados pelas ferrovias serão analisados com base na bibliográfica a ser levantada no presente trabalho.

A partir da base dados comparativa entre os modelos e do referencial teórico, será construída a proposta de modelo de gestão da eficiência energética para ferrovias *heavy haul*.

O modelo do presente trabalho não será aplicado, para medição de efetividade, visto que não é escopo do trabalho dissertativo aqui apresentado, uma vez que o modelo é uma proposta.

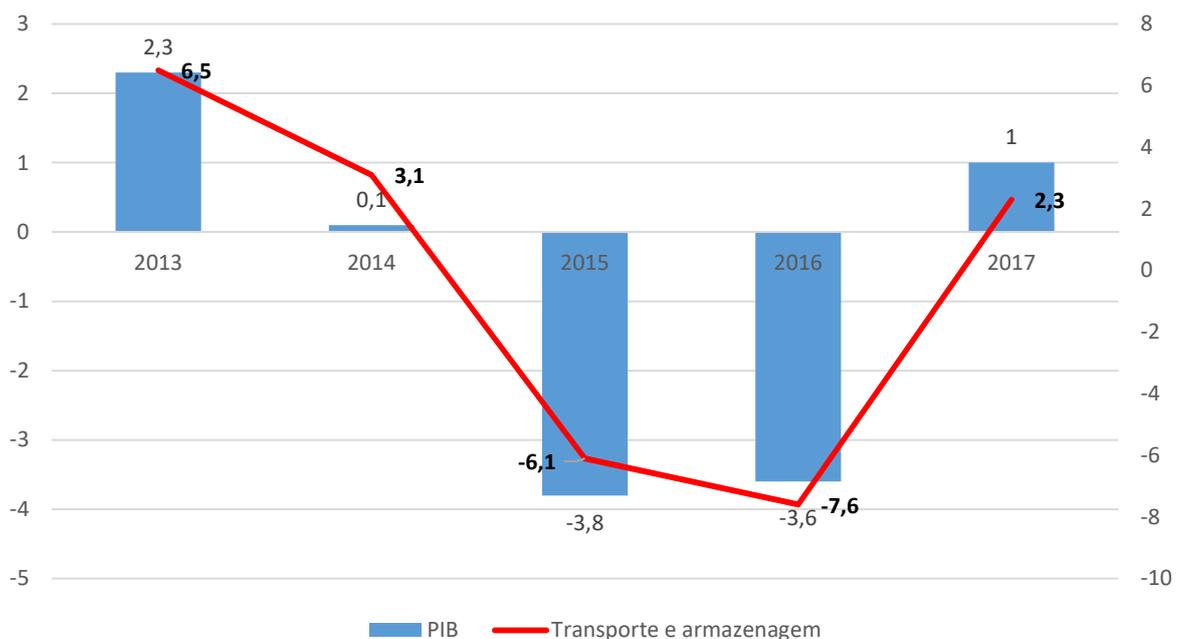
3 TRANSPORTE DE CARGAS

3.1 DEFINIÇÕES E ESTRUTURA

Para Pereira (2009), o transporte de cargas e o crescimento econômico estão em relação de interdependência, quando ocorre crescimento o setor de transporte é demandado e se o mesmo não tiver capacidade, acaba gerando impactos na limitação do crescimento.

A comparação entre crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) e crescimento do volume de transporte e armazenagem, reforça esta relação, conforme figura 1.

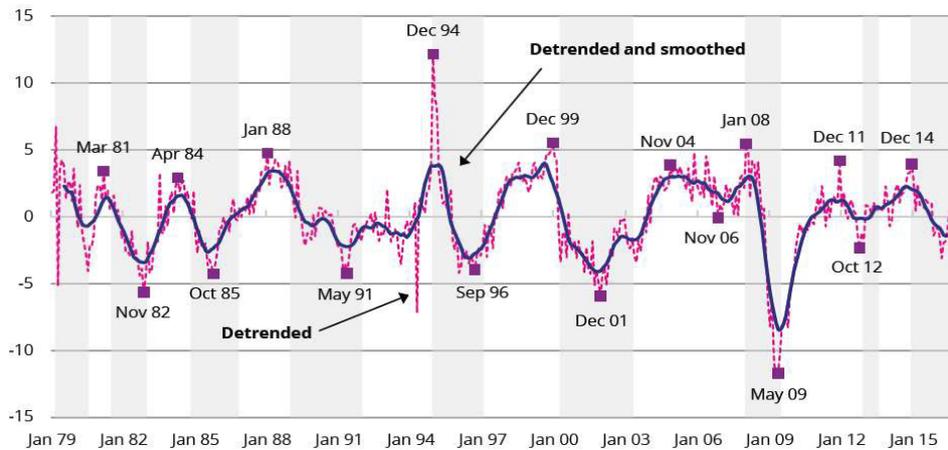
Figura 1- Relação entre crescimento do PIB e Aumento no volume de transporte e armazenagem.



Fonte: CNT e IBGE, 2018

O *U.S. Department of Transportation* (2017) apresenta um gráfico semelhante ao da figura 1 deste trabalho, porém com estatística vindo desde janeiro de 1979 a dezembro de 2016, comparando os ciclos de crescimento econômico com índice de serviços de transporte de cargas (IST).

Figura 2 - Índice de serviço transporte de cargas e o ciclo de crescimento econômico nos EUA



Fonte: U.S. Department of Transportation (2017)

Pereira (2009) comenta que os diferentes modais de transporte interagem para gerar uma rede intermodal.

Os principais modais de transporte de cargas são:

- Rodoviário
- Ferroviário
- Aquaviário
- Aéreo
- Dutoviário

Conforme Confederação Nacional dos Transportes (CNT), o volume de carga transporte no Brasil, de acordo com o meio, é definido na figura 3, com predominância do transporte terrestre.

Figura 3 - Distribuição do transporte de cargas no Brasil



Fonte: CNT (2017)

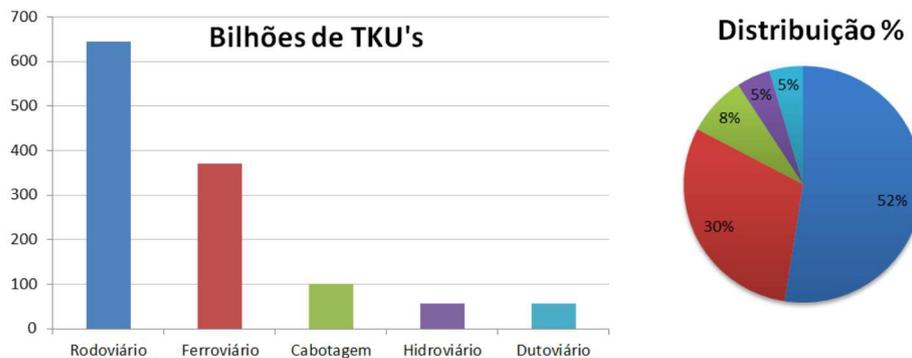
Este predomínio é gerado mais por uma deficiência de estrutura brasileira de rios e cabotagem do que por uma opção estratégica (COLAVITE, 2015).

Reforçando este panorama, o Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT), apresenta a distribuição dos dados de transporte de carga no Brasil por modal de transporte, conforme a figura 4.

Nestes dados foram retirados o transporte aéreo de carga pelo percentual de baixa relevância em relação aos demais modais (0, 4%).

O PNLT (2014), apresenta outra classificação para o Aquaviário, fazendo divisão entre cabotagem e hidroviário.

Figura 4 - Distribuição do transporte de cargas no Brasil por modal de transporte



Fonte: PNLT (2014)

O PNLT (2014) apresenta a reflexão de qual distribuição seria a mais equilibrada para a matriz de transporte brasileiro, levando-se em conta custos logísticos e questões ambientais.

Fici (2017), apresenta comparação dos EUA e os países emergentes dos chamados BRIC (Brasil, Rússia, Índia e China), conforme tabela 1, comparando as extensões de cada modal utilizado.

Esta tabela 1 expõe tanto a deficiência do Brasil quanto a sua estrutura logística de transporte, bem como o desbalanceamento da mesma, onde o foco é no modal rodoviário (PNLT, 2014).

Tabela 1- Comparativo entre os EUA e os países dos BRIC

Comparativo entre os EUA e os BRIC (Milhares de quilômetros de vias)					
	EUA	China	Rússia	Índia	Brasil
Rodovias	4.375	1.576	776	1.569	219
Ferrovias	225	86	87	64	29
Hidroviias	41	110	102	15	14

Fonte: Adaptado do World fact book banco Mundial (Apud Fici, 2017)

Os países desenvolvidos utilizam de forma mais equilibrada o conceito de intermodalidade, retirando o que de mais eficiente há em cada modal para redução de custos e maximização de eficiência.

Para Berg *et al* (2015), as economias desenvolvidas investiram de forma intensa em estrutura de transportes, bem como em tecnologias de suporte, gerando uma contínua redução de custos, o que garantiu a manutenção e até aumento de competitividade dos mesmos, diante dos países de baixa renda e em desenvolvimento, onde não há investimentos contínuos, há baixa governança e fraca regulamentação de setores que tem potencial de atrair investidores.

Teravaninthorn *et al* (2008), exemplifica a latente diferença entre os custos de transporte entre uma economia desenvolvida, e uma mais pobre, onde os custos de tonelada por quilômetro transportado na África custava 11 centavos de dólar americano, contra 5 centavos de dólar americano de custo de tonelada por quilômetro transportado quando o local é os EUA, menos da metade do custo do continente africano.

O investimento em transporte impulsiona o comércio, este último é fortemente dependente de eficientes redes de transporte, utilizando diferentes modais, surgindo assim o termo intermodalidade.

A intermodalidade está relacionada a processos interconectados de transporte de mercadorias e bens de consumo, em um sistema em rede, envolvendo vários modais de transporte, devendo se buscar a perfeita e eficiente coordenação entre os mesmos.

Para Mathisen *et al* (2014), transporte de carga intermodal é definido em termos de unidade transportada de uma única mercadoria por meio de diferentes modais, utilizando os pontos fortes de cada modal em um sistema de integração.

Havenga *et al* (2012), define transporte de carga intermodal como o transporte de um produto, de sua origem até o destino final, utilizando ao menos dois modais de transporte diferentes.

Qualquer projeto de transporte deveria ser analisado no âmbito de intermodalidade, estando dentro de uma rede já existente, que muitas vezes não está claramente determinada.

Para o setor de transporte de cargas, custo e intermodalidade são estratégicos.

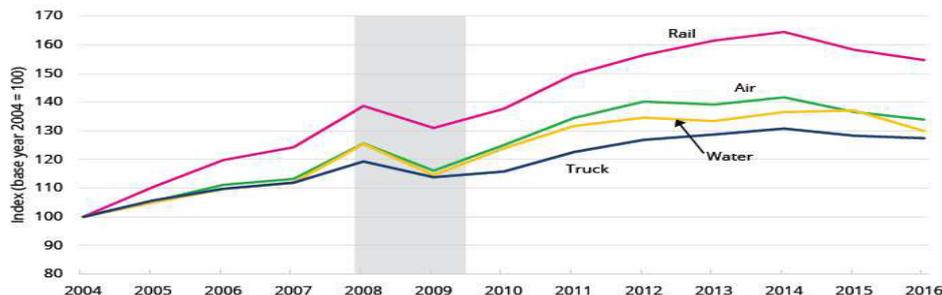
Para Ribeiro *et al* (2014), o Brasil perde em eficiência no transporte de cargas devido sua concentração no modal rodoviário (ver figura 3).

A própria utilização do modal rodoviário perde eficiência por não ter complemento dos modais com maior capacidade e mais adequados a maiores distâncias, como o ferroviário e o aquaviário, levando também maiores custos no transporte de cargas.

O *U.S Department of Transportation* (2017) apresenta na figura 5, a comparação dos custos de cada modal aos compradores do serviço, no período de 2004 a 2016, utilizando o Índice de Preços ao Produtor (IPP), com aumento na ordem de 55% dos custos ferroviários.

Nos anos de 2008 a 2009 ocorreu um decréscimo, atribuído à crise econômica que assolou o país.

Figura 5 - Índice de Preço ao Produtor, modais ferroviário, aéreo, rodoviário e aquaviário.



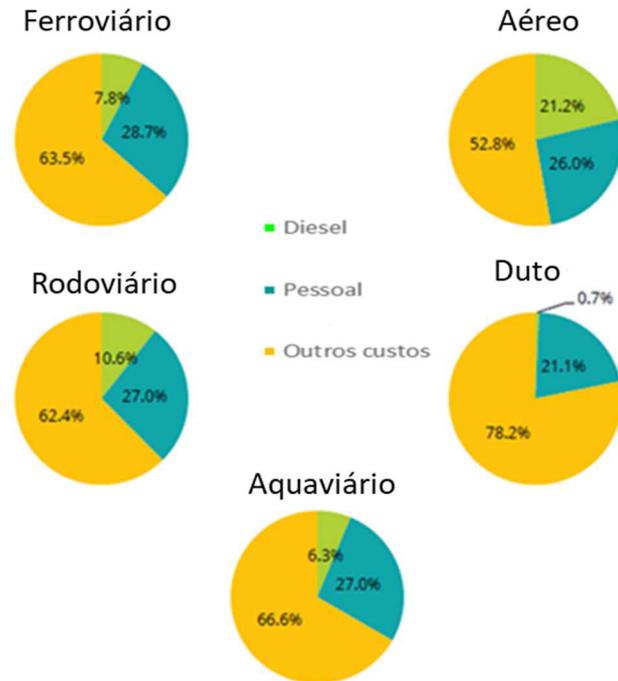
Fonte: *U.S. Department Transportation* (2017)

Os custos dos combustíveis são relevantes para os modais de transporte de carga, que geram custos diretos também para os consumidores finais destes produtos. Figura 6 detalha estes custos de acordo com cada modal, para o mercado dos EUA.

Conforme figura 6, o modal aéreo apresenta o maior custo quando a consumo de óleo diesel, enquanto o modal de duto e aquaviário os menores.

O ferroviário tem custo menor no consumo de óleo diesel, quando comparado ao rodoviário, porem o custo de pessoal do modal ferroviário apresenta diferença maior em relação ao rodoviário.

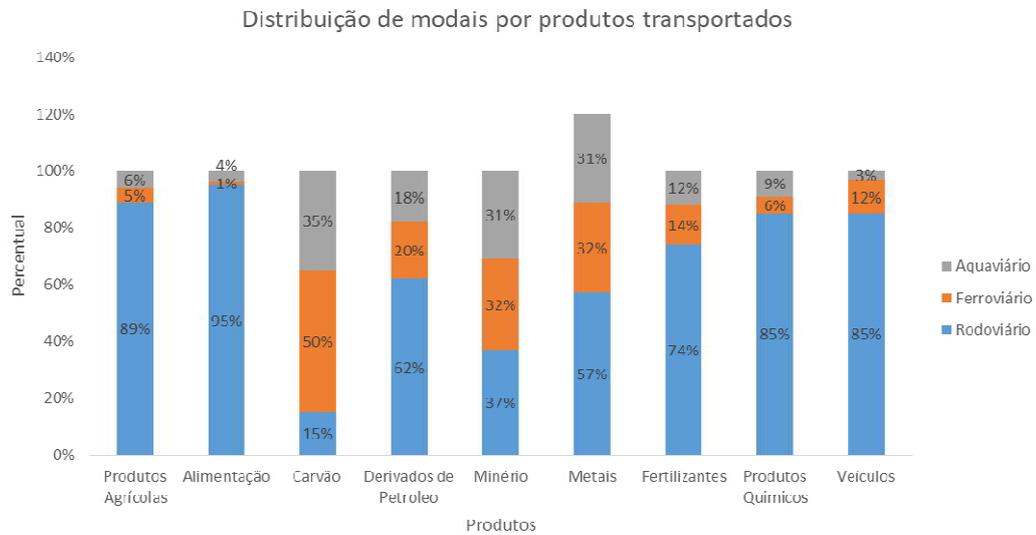
Figura 6- Distribuição de custos dos principais modais de transporte nos EUA.



Fonte: Adaptado pelo autor do *Report U.S. Department Transportation* (2017)

3.2 COMPARAÇÃO ENTRE MODAIS DE TRANSPORTE DE CARGA

Reis *et al* (2013), apresenta na figura 7, a comparação dos principais modais de transporte de carga (rodoviário, ferroviário e aquaviário) com produtos a serem transportados, tendo como país base a Alemanha.

Figura 7- Modal transporte versus produtos transportados na Alemanha em 2013

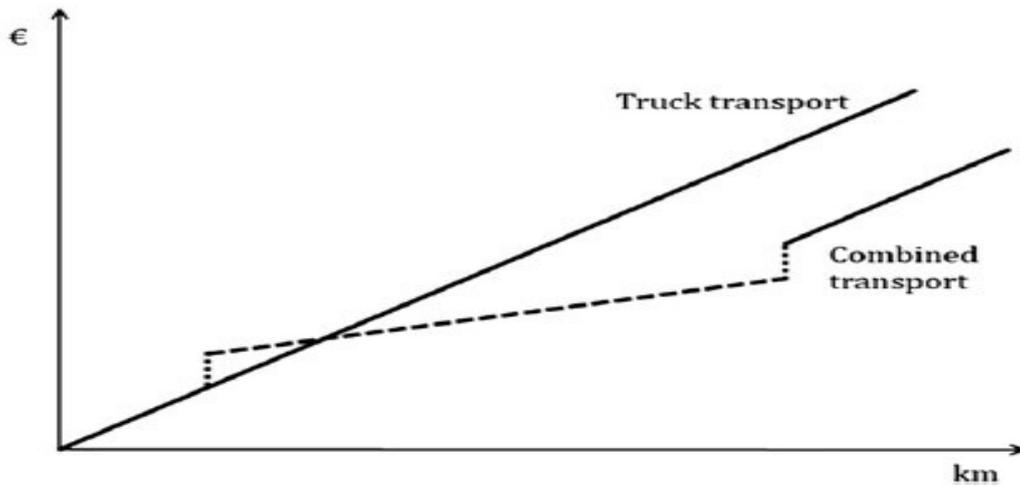
Fonte: Reis *et al* (2013)

A Alemanha não é um país continental, sua área total é de 357.051 km^2 , equivalente a 4% da área do Brasil (O Brasil possui área de $8.515.767 \text{ km}^2$), mas apresenta uma distribuição modal conforme as características dos produtos, aproveitando o melhor de cada modal, os produtos como carvão e derivados de petróleo possuem grandes volumes, não são perecíveis em relação ao tempo e de baixo valor agregado, assim, o percentual do modal ferroviário e aquaviário para o carvão atinge mais de 80% do total transportado (REIS *et al.* 2013).

Para produtos agrícolas e alimentação, o transporte rodoviário domina o total, com mais de 90% da carga transportada, uma vez que são produtos perecíveis, que necessitam de velocidade na distribuição aos consumidores.

Reis *et al* (2013) apresenta na figura 8 a relação entre o transporte puramente rodoviário versus o transporte combinado entre o ferroviário e o rodoviário, que é a intermodalidade. O transporte rodoviário, a linha sólida, apresenta custos maiores quanto maior for a distância, crescendo de forma linear, os custos do transporte ferroviário, que é a linha tracejada, têm um custo inicial maior no início do percurso, que vão reduzindo ao longo do caminho, uma vez que consegue absorver grandes volumes para grandes distâncias, quando chega no ponto da combinação, os custos aumentam novamente pela ligação intermodal (terminais de transferência) porém continua menor quando comparado a linha do modal rodoviário.

Figura 8 - Comparação do modal rodoviário com intermodal de rodoviário – ferroviário - rodoviário

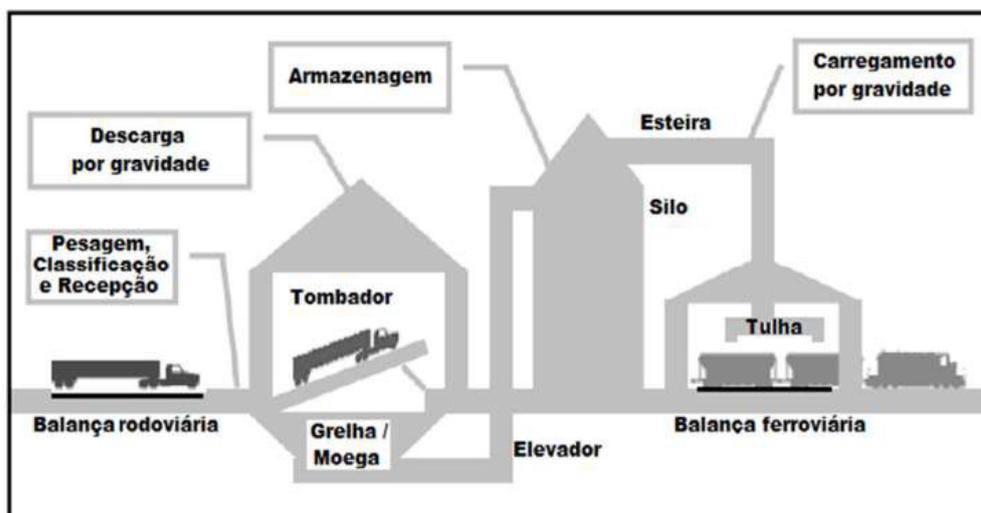


Fonte: Reis *et al* (2013)

Santos (2012) apresenta o critério para escolha do tipo de intermodal com base no fluxo de transbordo, sendo sempre do modal de maior fluxo. Exemplo: se o modal de maior fluxo é o rodoviário para o ferroviário, este será rodoferroviário.

Do ponto de vista da eficiência energética, o terminal rodo-ferro-aquaviário, a depender das distâncias percorridas para cada modal, conforme a figura 9, seria o melhor, mas este tipo de intermodal necessita de estrutura de transbordo mais complexa.

Figura 9 - Exemplo de terminal intermodal rodo-ferroviário para escoamento de grãos.



Fonte: Santos, (2012)

Pécora *et al.* (2015) apresentou trabalho onde compara a relação custo e distância percorrida por cada modal de transporte, tabela 2, levando em conta os três principais para transporte de carga, o rodoviário, ferroviário e hidroviário.

Tabela 2 - Comparação do custo de transporte por modal (km/tonelada)

Faixa inferior (Km)	Faixa superior (Km)	Modal Rodoviário (R\$)	Modal Ferroviário (R\$)	Modal Hidroviário (R\$)
0	200	0,174	0,0855	0,042
201	500	0,131	0,0855	0,042
501	800	0,11	0,0635	0,042
801	1100	0,102	0,0635	0,042
1101	1000000	0,088	0,0635	0,042

Fonte: Pécora et al(2015)

Fazendo exemplo com base na tabela 2, o custo para transportar uma tonelada por 1.000 km custaria R\$ 102,00 no modal rodoviário, R\$ 63,5 no ferroviário e R\$ 42 no hidroviário. Está é uma análise sem levar em conta as limitações de flexibilidade de cada modal (principal o ferroviário e o hidroviário), bem como outros custos de devidos a estrutura do modal.

3.3 HISTÓRIA E EVOLUÇÃO DAS FERROVIAS NO BRASIL E EUA

O desenvolvimento histórico do modal ferroviário está ligado a revolução industrial e a Inglaterra, esta última o berço de seu nascimento, no século XIX (HOBSBAWM, 2013).

Em 1800, a Inglaterra dominava o mercado de produção de carvão, com 90% da produção mundial, para escoar esta imensa produção surgiu o modal ferroviário, com sua primeira via férrea entre a mina de carvão de Durham até o litoral (HOBSBAWM, 2013).

No princípio locomotivas movidas a vapor utilizavam carvão mineral como matriz energética, o carvão estava sendo utilizado como principal matriz na revolução industrial, sendo que as ferrovias facilitaram também seu escoamento, gerando ciclo de desenvolvimento (FICI, 2017).

Nos EUA, a ferrovia impulsionou um pujante desenvolvimento econômico, integrando o continental território americano, criando, da mesma forma que observado na Inglaterra, um ciclo de crescimento e formando a base do capitalismo moderno (MAZZUCHELLI, 2009).

Pozzi (2013) comenta uma frase dita pelo ex-presidente dos EUA, Franklin D. Roosevelt, em 1932, época da impactante grande depressão na economia do país, quando o modal rodoviário estava crescendo sobre o ferroviário no país: “O interesse econômico de um país exige um funcionamento contínuo e eficiente do sistema ferroviário”.

A *Association of American Railroads (AAR, 2018)* apresenta fatos marcantes da história das ferrovias nos EUA:

1825 - John Stevens, que é considerado o pai das ferrovias americanas, montou linha férrea circular de 800 metros em sua propriedade operando a primeira locomotiva a vapor em solo americano.

1830 – Peter Cooper projetou e construiu a primeira locomotiva a vapor dos EUA, batizada de *Tom Thumb*, iniciando a substituição dos cavalos pelas locomotivas para locomoção sobre o trilho.

1862 – Em plena guerra civil americana, o presidente Abraham Lincoln assinou o *Pacific Railroad Act*, com objetivo de integrar a nação de leste a oeste.

1869 – A nação finalmente era integrada de leste a oeste pela *Central Pacific Railroad* e a *Union Pacific Railroad*, sete anos após a assinatura do *Pacific Railroad Act*, as viagens entre as costas leste e oeste foram reduzidas de forma relevante (antes levava-se meses para a viagem, após a ferrovia o tempo caiu para semanas).

1883 – As ferrovias americanas e canadenses tinham problemas por conta de diferentes fusos horários das cidades, que não tinha impacto nos transportes uma vez que as viagens eram muito longas, levavam meses, mas com viagens ferroviárias levando horas, agendar um trem era complicado, com isto as ferrovias dividiram a América do Norte em quatro grandes fusos horários, com linhas divisórias muito próximas das existentes até os dias atuais, em 1918, o Congresso Americano adotou formalmente estes fusos como sistema oficial dos EUA.

1980 – As ferrovias americanas estavam perdendo em competitividade para os modais rodoviário, aéreo e aquaviário, devido regulamentação do final do século 19, assim o congresso americano aprovou o *Staggers Rail Act*, desde a aprovação do mesmo, as ferrovias investiram mais de USD \$ 575 bilhões em fundos privados para modernizar o sistema ferroviário, voltando a serem lucrativas.

Fici (2017) comenta que as ferrovias influenciaram desde a ocupação territorial do país, desenvolvimento da indústria, novas tecnologias, até nas finanças e nos modelos de gestão das empresas. O governo americano seguiu a linha de incentivar os investimentos no setor privado, gerando crescimento do setor de forma independente.

The Federal Railroad Administration (FRA, 2018), rede ferroviária dos EUA é uma indústria que movimenta USD \$ 60 bilhões por ano, com uma malha de 225.000 quilômetros, possuindo sete ferrovias classificadas como *Class I* (são as principais ferrovias do país, possuem características de abrangência interestadual e são responsáveis por cerca 70% da carga transportada em ferrovias), e 560 ferrovias regionais e ramais de menor extensão, representando os 30% restantes da carga.

O Brasil experimentou a implantação do modal ferroviário para substituir tração animal, que de forma precária realizava o escoamento da produção, principalmente do café e a cana-de-açúcar, o sistema ferroviário já assume um relevante papel no desenvolvimento do país na segunda metade do século XIX, bem como no processo de colonização (FONTANARI *et al.* 2013)

A primeira tentativa deu se por meio da Lei Feijó, em 1835, porém o modelo de concessões, com vários privilégios e isenções, não foi efetivo, segundo o modelo, após 80 anos de concessão o patrimônio passaria a ao governo (MATOS, 1990).

O sucesso do modelo de concessão do governo veio em 1852, por meio da Lei 641, com as principais vantagens do Governo Imperial a garantia de 5% de juros sobre o capital empregado durante a construção da ferrovia, somando-se 2% garantidos pelas provinciais, com mais isenções sobre a importação dos materiais para construção e baixa concorrência em que não se podiam construir novas ferrovias na mesma região (FONTANARI *et al.*, 2013)

A ANTF (2018), dividiu em seis fases a evolução das ferrovias do Brasil:

Fase I (1835 a 1873) – Implementação do sistema ferroviário no Brasil de forma lenta, com predomínio do capital privado;

Fase II (1873 a 1889) – A expansão é acelerada já sob o efeito da Lei 641, com o governo Imperial garantindo juros sobre o capital investido;

Fase III (1889 a 1930) – A malha ferroviária continua sua expansão, porém o Estado necessita intervir em função de empresas com dificuldades financeiras;

Fase IV (1930 a 1960) – O controle passa das empresas privadas para o controle estatal, já com ritmo de crescimento menor;

Fase V (1960 a 1990) – A malha foi consolidada em poucas empresas públicas, sem concorrência, desativação de ramais considerados de baixa rentabilidade;

Fase VI (1990 a 2016) – Período marcado pela concessão da malha ferroviária nacional a iniciativa privada;

O Brasil atualmente possui 29.000 quilômetros de extensão de ferrovias cedidas ao setor privado, por meio de concessão, está regulamentada e fiscalizada pela Agência Nacional de Transportes Terrestre (ANTT, 2018);

Conforme a ANTT (2018), a Lei n.º 8.013/90, de 12/04/1990, instituiu o Programa Nacional de Desestatização (PND), com os objetivos de:

- Desonerar o Estado;
- Melhorar alocação de recursos;
- Aumentar eficiência operacional;
- Fomentar desenvolvimento; e
- Melhoria na qualidade do serviço.

A ANTT (2018) apresenta as principais cargas transportadas por ferrovia no Brasil, conforme figura 10, sendo que há uma concentração de graneis sólidos e produtos de baixo valor agregado, não havendo grandes fluxos de transporte de produtos com valor agregado maior, transportados em sua maioria em *contêineres*.

A ANTT (2018), lista as concessões ferroviárias atuais no Brasil, conforme abaixo:

- Ferrovia Centro-Atlântica S.A (FCA);
- Ferrovia Norte Sul (FNS);
- Ferrovia Tereza Cristina S.A.(FTC);
- Ferrovia Transnordestina Logística S.A.;
- MRS Logística S.A.;
- Rumo S.A. (Malhas Norte, Oeste, Paulista e Sul);
- Vale – Estrada de Ferro Carajás (EFC);
- Vale – Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM).

Figura 10 - Concessionárias das ferrovias do Brasil e os principais produtos

Concessionárias	Produtos				
ALLMN	Grãos - Milho	Soja	Farelo de Soja	Celulose	
ALLMO	Celulose	Minério de Ferro	Prd. Siderúrgicos - Outros	Ferro Gusa	
ALLMP	Açúcar	Óleo Diesel	Gasolina	Contêiner Vazio de 40 Pés	
ALLMS	Soja	Açúcar	Grãos - Milho	Óleo Diesel	
EFC	Minério de Ferro	Manganês	Ferro Gusa	Outros - Comb e derivado - Perigoso	
EFPO	Contêiner Cheio de 40 Pés	Soja	Grãos - Milho	Óleo Vegetal	
EFVM	Minério de Ferro	Carvão Mineral	Prd. Siderúrgicos - Bobina - BF	Coque	
FCA	Soja	Grãos - Milho	Açúcar	Farelo de Soja	Minério de Ferro
FNS	Soja	Grãos - Milho	Celulose	Óleo Diesel	Minério de Ferro
FTC	Carvão Mineral	Contêiner Cheio de 20 Pés	Contêiner Cheio de 40 Pés	Contêiner Vazio de 20 Pés	Contêiner Vazio de 40 Pés
MRS	Minério de Ferro	Açúcar	Cimento a Granel	Prd. Siderúrgicos - Outros	Outras
FTL SA	Óleo Diesel	Cimento acondicionado	Gasolina	Prd. Siderúrgicos - Bobina - BF	Minério de Ferro

Fonte: ANTT, (2016)

Para Kussano *et al* (2012) este tipo de modal é denominado por grandes empresas com transporte de grandes volumes de cargas com demanda prevista, ou seja, o modal perde competitividade se atuar semelhante ao modal rodoviário, onde a relação demanda versus oferta é mais forte, deixando assim clientes com demanda menor e irregular não atendidos.

4 FERROVIA HEAVY HAUL

Conforme o *International Heavy Haul Association* (IHHA), as ferrovias denominadas de *heavy haul* devem atender no mínimo dois dos requisitos abaixo:

1. Operar regularmente, ou com trens unitários ou combinados, com carga maior ou igual a 5.000 toneladas métricas;
2. Tem planejamento e execução de transporte maior ou igual a 20 milhões de toneladas brutas por ano em segmentos da ferrovia, compreendendo no mínimo 159 km de extensão;
3. Opera de forma regular ou contempla em seu projeto estrutural trens com suporte para maior ou igual 25 toneladas por eixo.

Utilizando o anuário dos transportes CNT (2017), algumas ferrovias do Brasil entram nesta classificação de *heavy haul*, conforme tabela 3.

Tabela 3 - Volume transportado em 2016, ferrovias heavy haul no Brasil.

Concessionária	Vollume Transportado (Milhares de toneladas úteis)
Rumo	49.839
EFC	175.333
EFVM	129.907
VLI	42.102
MRS	137.126

Fonte: CNT(2018)

A empresa RUMO adquiriu a malha pertencente a ALL, e a VLI é composta pelas ferrovias FCA e FNS tramo norte.

4.1 MATERIAL RODANTE

Material rodante de uma ferrovia são todos os veículos utilizados para o transporte das cargas sobre os trilhos, no caso específico os vagões, locomotivas, veículos de manutenção da via permanente e veículos auxiliares, conforme a *Association American Railroad* (AAR).

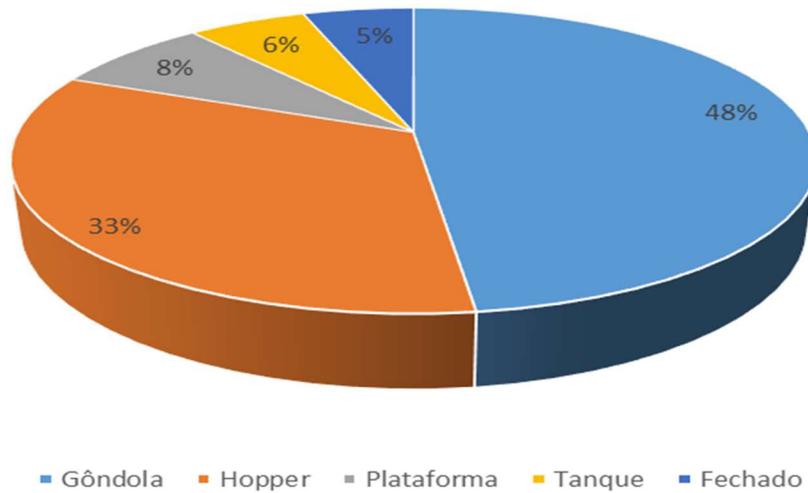
A formação do trem com o material rodante, vagões e locomotivas, depende de fatores como o tipo e quantidade de carga a ser transportada, perfil da ferrovia, bitola da ferrovia (distância entre os trilhos), tipo do terminal de carregamento e/ou descarga.

Os principais tipos de vagões utilizados em ferrovias brasileiras são:

- Tipo *hopper* - este tipo de vagão é destinado ao transporte de *commodities* agrícolas, como soja, açúcar, milho, protegem a carga contra intempéries e possuem descarga por comportas inferiores (ROSA, 2006).
- Tipo gôndola – este tipo de vagão é destinado a descarga em *car dumper* (o vagão é virado por um equipamento, tanto o carregamento quanto a descarga são feitos pela parte superior), são vagões destinados ao transporte de produtos que não sofrem interferência de intempéries, uma vez que não há cobertura para proteção da carga (ROSA, 2006)

A figura 11 ilustra a frota de vagões do Brasil por tipo (Estatística Revista Ferroviária, 2018).

Figura 11 - Percentual dos tipos de vagões sobre a frota total

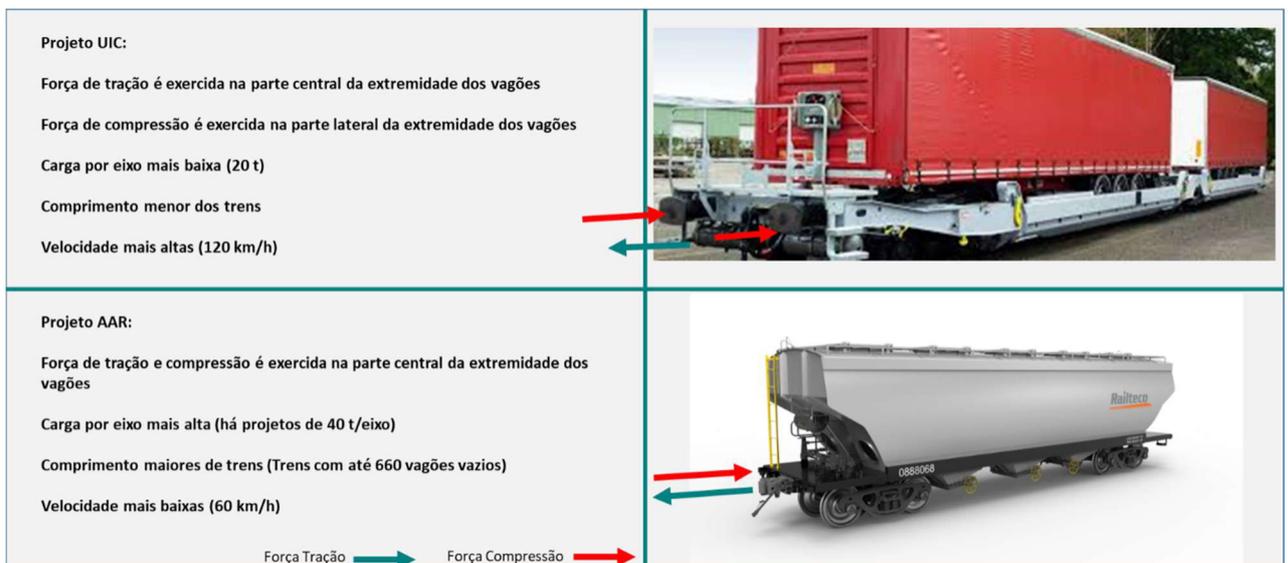


Fonte: Revista Ferroviária (2018)

Esta concentração nos dois tipos de vagões é explicada pelo majoritário transporte ferroviário do Brasil em graneis sólidos, as *commodities* minério de ferro, soja e açúcar.

Os vagões que circulam no Brasil utilizam, em sua maioria, o padrão americano, regidos pelas normas da AAR, diferem-se dos vagões padrão europeu, regidos pelas normas da UIC. A figura 12 compara os dois padrões, com características específicas (ROSA, 2006).

Figura 12 - Comparação das características de projeto de vagões de acordo com os padrões UIC e AAR.



Fonte: Adaptado Rosa (2006)

4.2 LOCOMOTIVAS

Borba (2008) define dois principais tipos de locomotivas que podem ser utilizadas em ferrovias para transporte de carga e passageiros são do tipo:

1. Locomotivas diesel-elétricas
2. Locomotivas elétricas

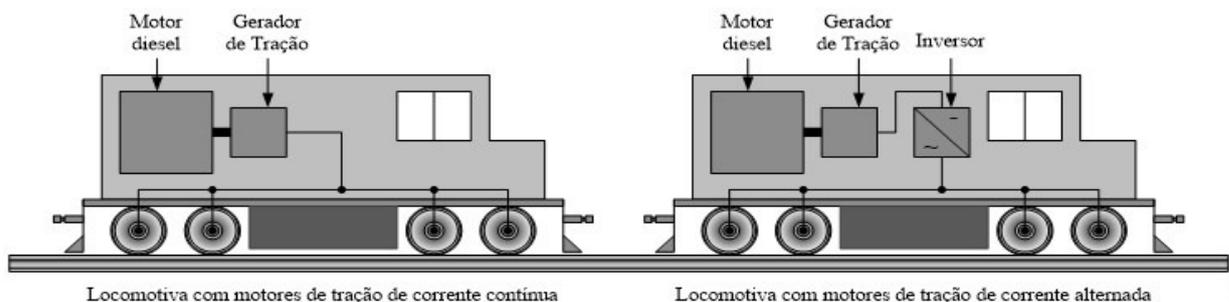
As locomotivas diesel-elétricas são um sistema isolado e completo de geração de energia elétrica, com um motor diesel acoplado a um gerador de energia elétrica. Esta energia elétrica gerada alimenta os motores de tração elétricos para movimentação da locomotiva (BORBA, 2008).

As locomotivas diesel – elétricas, carregam grandes tanques de combustível, uma vez que necessitam do diesel para continua operação, locomotivas de alta potência possuem tanque de até 18.000 litros (MANUAL GE, 2014).

A figura 13 apresenta configuração de locomotivas diesel-elétricas, onde os motores de tração podem ser em corrente contínua ou corrente alternada.

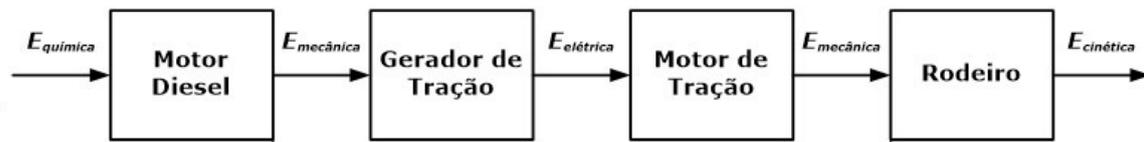
Borba (2008) apresenta o esquema de conversão das energias, conforme figura 14, envolvidas no sistema das locomotivas diesel-elétricas, onde o motor diesel efetua a conversão da energia química presente no combustível fóssil, no caso o diesel, em energia mecânica por meio do eixo virabrequim até o gerador de tração, este por sua vez converte esta energia mecânica em energia elétrica até os motores de tração. O Motor de tração faz a conversão da energia elétrica em energia mecânica até as rodas da locomotiva, convertendo em movimento, a energia cinética.

Figura 13- Configuração de locomotivas diesel-elétricas



Fonte: Borba (2008)

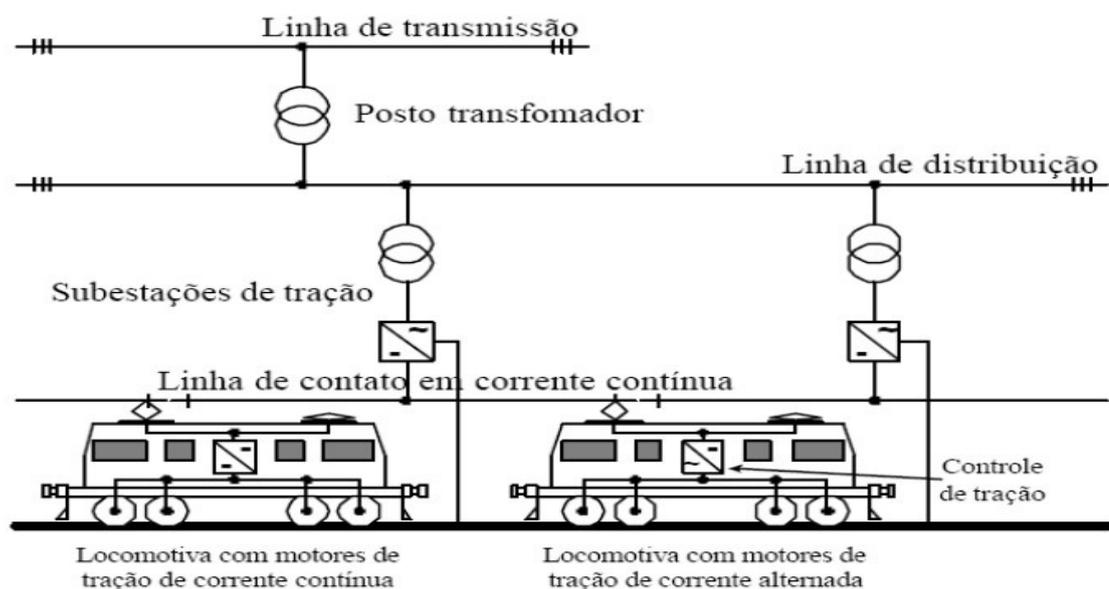
Figura 14 - Conversão de energias no sistema diesel-elétrico de locomotivas



Fonte: Borba (2008).

As locomotivas elétricas recebem alimentação externa por meio de uma rede aérea ou um terceiro trilho energizado, a configuração mais utilizada é o fornecimento de energia em corrente contínua de 600V a 3kV. Este tipo de sistema é mais utilizado em ferrovias de trens de passageiros, com cargas por eixo menores, em ferrovias *heavy haul* a predominância de locomotivas diesel-elétricas em função da necessidade de auto esforço de tração para vencer a inércia do conjunto (BORBA, 2008). A figura 15 apresenta configuração de locomotivas elétricas:

Figura 15- Configuração de locomotivas elétricas



Fonte: Borba (2008)

Hong *et al* (2017) apresenta trabalho de desenvolvimento de um sistema híbrido em um protótipo de locomotiva, com uma célula de combustível a hidrogênio. Os autores propuseram também um sistema de gerenciamento de energia nesta locomotiva protótipo, baseada em

controle lógico difuso. Este desenvolvimento é direcionado para redução das emissões bem como aumentar a eficiência energética do sistema.

De acordo com *Full Cell Bulletin* (2009), a BNSF *railway company*, situada no Texas, EUA, iniciou teste com célula de carga de hidrogênio. A BNSF é uma ferrovia com tradição em desenvolvimento de novas locomotivas com maior potência e maior eficiência energética, como exemplo o desenvolvimento de locomotivas diesel elétricas de corrente contínua. Este projeto está sendo conduzido em conjunto com a *Vehicle Projects*.

A *Anglo American Platinum* possui também investimentos em conjunto com a empresa *Vehicle Projects*, em projeto de locomotiva com célula de combustível de carga de hidrogênio, para suas minas subterrâneas na África do Sul (*FULL CELL BULLETIN*, 2012).

No Brasil, ocorreu desenvolvimento de locomotivas com motores *due-fuel*, utilizando diesel e gás natural, em parceria com as empresas Vale e a GE, com objetivo de redução dos custos operacionais e emissões. Um vagão especial fica acoplando a locomotiva, carregado com gás natural. A figura 16 ilustra a desenvolvimento em ferrovias da empresa Vale S.A. (BICALHO, 2015).

Figura 16 - Desenvolvimento de locomotivas movidas a gás natural



Fonte: Carvalhes, 2015

A empresa *GE Transportation*, apresenta em seu portfólio de produtos o *retrofit Tier 2+ / Tier 3 EPA Emissions EVO Locomotives*, que é um kit para transformar locomotivas em *due-fuel*, utilizando gás natural, este oferece flexibilidade de relação diesel / gás natural (até 80% de gás natural e 20% diesel), e também 100% diesel.

4.3 DINÂMICA FERROVIÁRIA

Wickens (2006) define que o trem percorrendo uma via é um dos mais complexos sistemas de engenharia do mundo.

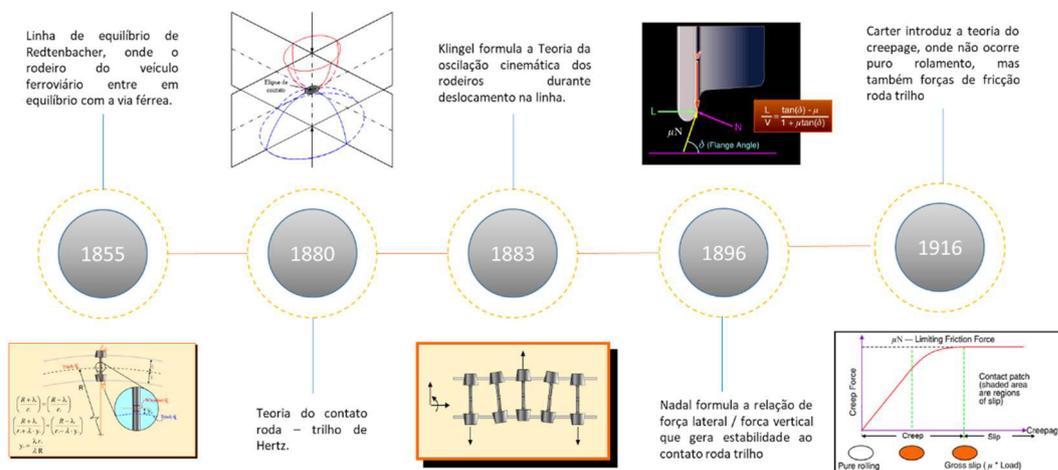
Existem muitos corpos interagindo, gerando vários graus de liberdade, os veículos que trafegam a via possuem conexões e uma interface com a via, envolvendo a geometria complexa entre as rodas e os trilhos.

Esta tecnologia complexa foi desenvolvida a muito tempo, no final do século XVIII a início do século XIX. No século XX, ocorreu desenvolvimento da base teórica da dinâmica ferroviária, com o apoio de simuladores computacionais, elevando a segurança do sistema, bem como a velocidade dos trens e redução e melhorias energéticas.

O *Transportation Technology Center, Inc* (TTCI), elaborou a cronologia dos primeiros estudos no desenvolvimento da dinâmica ferroviária, conforme figura 17.

Após este período, os estudos subsequentes aprimoraram as relações dinâmicas de uma circulação ferroviária.

Figura 17- Desenvolvimento da teoria da dinâmica ferroviária



Fonte: Adaptado pelo autor de TTCI (2004)

Borba (2008) aborda que a dinâmica ferroviária está relacionada aos seguintes fatores:

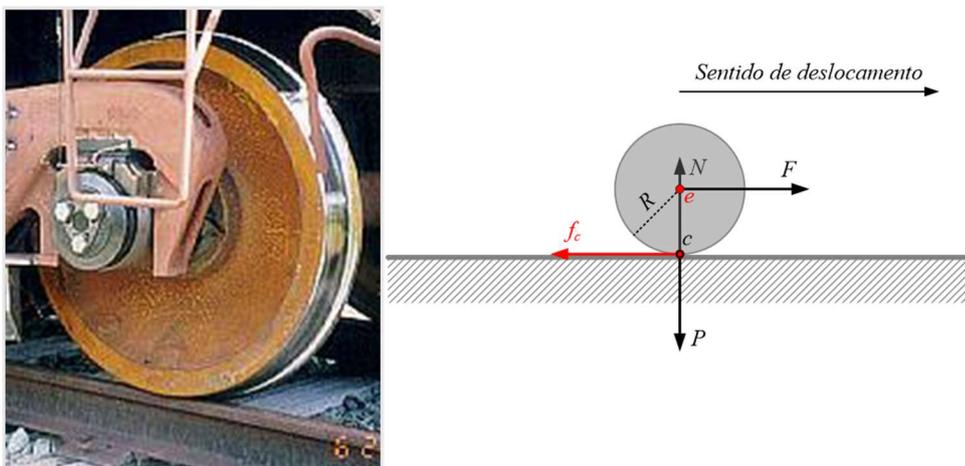
1. Aderência – Fator físico de aderência entre roda e o trilho, que é capacidade de a locomotiva acelerar, tracionar e frear, a quantidade de agarramento entre duas superfícies em contato, que neste caso são superfícies que tem o aço como material base.

Quando uma roda metálica cilíndrica desliza sobre uma superfície também metálica disposta horizontalmente, seu eixo e se desloca linearmente sobre a superfície no mesmo sentido da força aplicada F , fazendo surgir uma força de atrito cinético f_c aplicada no ponto de contato c , que se opõem ao deslizamento (BORBA, 2008, p.22)

A figura 18 ilustra a relação da força de aderência no contato roda e trilho, onde o eixo e se desloca no mesmo sentido da força F , gerando uma força de atrito f_c , no ponto de contato c .

2. Tração – Para haver deslocamento do trem sobre a via férrea, a locomotiva deve produzir uma força de tração F_t , que deve ser aplicada no ponto de contato c , em cada roda de seus n eixos tratores no trilho. O motor de tração age por meio de um conjugado motor C_m . A figura 27 ilustra a aplicação do conjugado.

Figura 18- Roda deslizando sobre superfície horizontal metálica.



Fonte: Borba (2008)

Figura 19 - Conjugado motor C_m sendo aplicado pela Locomotiva a via férrea.

Fonte: Borba, 2008

3. Resistência ao movimento – É uma resultante de forças que se opõe ao movimento dos veículos tanto os veículos denominados trator quanto os de reboque. Fatores que geram esta resultante de força contrária ao movimento do trem:

- Atrito pelo contato roda-trilho;
- Atrito nos rolamentos nas mangas dos eixos;
- Resistência gerada pelo deslocamento da massa de ar e por ventos laterais;
- Perfil da via permanente (aclives, declives, curvas)
- Movimentos parasitas que agem nos veículos ferroviários (dependem de seus projetos construtivos)
- Peso dos veículos
- Inércia do trem

A unidade para resistência é o:

$$\left[\frac{kgf}{tf} \right]$$

É a resistência ao movimento do veículo, em quilograma força, gerada para cada tonelada de peso do próprio veículo.

Para o transporte de carga do modal ferroviário, a resistência ao movimento será menor com os vagões vazios do que quando os mesmos estão carregados.

A resistência ao movimento pode ser classificada em resistências normais (atritos nos elementos dos veículos ferroviários e o meio fluido, que é o ar), e resistências ocasionais (resistência a rampas, curvas, aceleração e força centrífuga).

Borba (2008) compara na tabela 9 as resistências ao movimento em diferentes tipos de veículos (atuação apenas de resistências normais).

Tabela 4- Resistência ao movimento em diferentes tipos de veículos

Tipo de veículo	γ_R em $\left[\frac{kgf}{tf} \right]$
Carroça em solo não compactado	150 a 180
Caminhão em estrada não pavimentada	45 a 65
Caminhão em estrada calçada	20 a 35
Caminhão em estrada com pavimento liso	15 a 18

Vagão vazio de 21 t com velocidade inferior a 65 km/h	2,5 a 2,6
Vagão carregado de 120 t com velocidade inferior a 65 km/h	1,2 a 1,6
Vagão carregado de 120 t com velocidade inferior a 25 km/h	0,8 a 1,1

Fonte: Borba (2008)

O veículo ferroviário apresenta menor resistência ao movimento quando comparado a um caminhão.

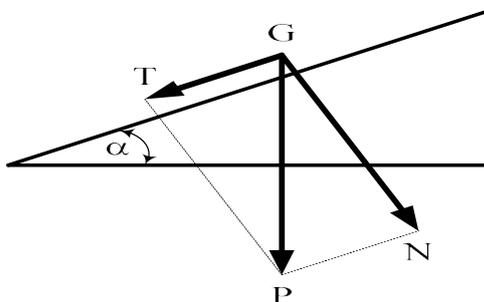
Para Cole (2006) devido à complexidade do arrasto aerodinâmico do trem, as fórmulas de W. J. Davis de 1926, que são fórmulas empíricas, podem ser utilizadas até os dias atuais, com algumas melhorias do modelo original, uma vez que as constantes encontradas por Davis são para trens operando em uma faixa de 0 a 100 km/h, e projetos de veículos ferroviários semelhantes de suas pesquisas, as duas condições se mantêm até os dias atuais, principalmente em ferrovias *heavy haul*.

As resistências ocasionais estão relacionadas em parte ao projeto da via férrea, que pode reduzir esta parcela da resistência do trem ao movimento, melhorando os indicadores operacionais, como a velocidade máxima de circulação, tempo de ciclo entre terminais e a eficiência energética (BORBA, 2008).

A resistência a rampa é uma resistência ocasional, esta afeta a dinâmica de operação do trem tanto no aclave quanto no declive, este valor é calculado com base na fórmula do plano inclinado, conforme figura 20. Para ferrovias o ângulo de inclinação não é superior a 2°.

(BORBA, 2008).

Figura 20 - Relação no plano inclinado



Fonte: Borba (2008)

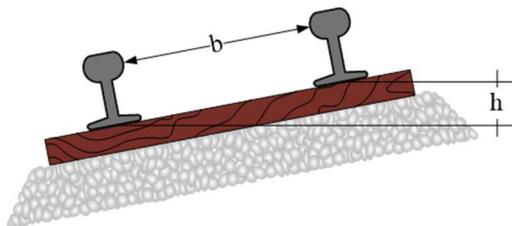
Outra importante resistência ocasional é a resistência a curvas presentes na ferrovia, uma vez que as rodas do veículo são solidárias e paralelas (são rodas rígidas conectadas por um

eixo), ocorre escorregamentos das mesmas para compensar a diferença de velocidade, gerando forças resistentes.

A AAR (2014) tem especificação para raios de curva de projeto para ferrovias *heavy haul*.

A força provocada pelo elemento curva em uma ferrovia, que é a força centrífuga, provoca o deslocamento do veículo no sentido do trilho externo a curva, gerando atrito em as rodas e o trilho, e provocando resistência ao movimento, para reduzir estes efeitos é realizada uma inclinação da via em um dado ângulo para equilibrar a força centrífuga inerente da curva, a mesma é denominada superelevação, a figura 21 ilustra esta configuração (BORBA, 2008).

Figura 21- Exemplo de superelevação na via



Fonte: Borba (2008)

Para Cole (2006) a dinâmica ferroviária influencia o gerenciamento da condução do trem, uma vez que há uma grande massa a ser retirada da inércia, ganhar energia até atingir a velocidade de cruzeiro, e que toda parada gera uma perda desta energia acumulada, não pode simplesmente ser conduzindo sem uma eficiente gestão da condução.

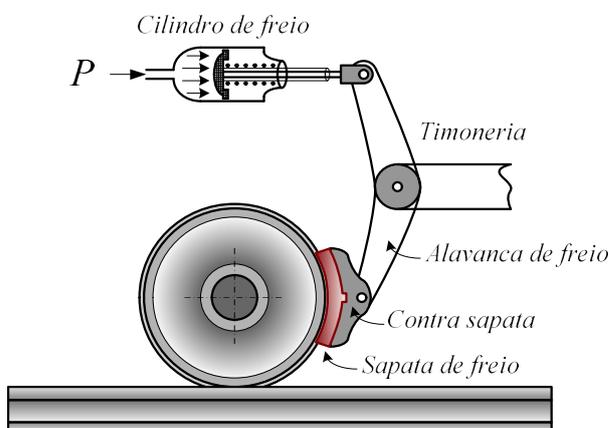
Esta evolução vem desde os tempos das locomotivas a vapor, passando para locomotivas diesel- elétricas, as novas locomotivas micro processadas, com alta potência e eficientes controles de tração.

Esta gestão da condução em ferrovias passa por planejamento assertivo de paradas e um controle de frenagem que não gere uma grande redução da energia acumulada e nem propicie uma falta de controle do trem por parte do maquinista.

A frenagem dos trens de carga é feita por um sistema pneumático, conforme esquemático da figura 22, onde a força de frenagem é aplicada por um cilindro pneumático acoplado em uma série de alavancas que transferem a força deste cilindro para as rodas, por meio do contato com sapatas de freio, de material não metálico (BORBA, 2008).

Para Cole (2006) todas as vezes que não há um correto planejamento da condução, ou os fatores dinâmicos de projeto não estão sendo cumpridos (uma restrição de velocidade na via férrea causada por algum defeito que gera necessidade de aplicação de freio pelo maquinista), a energia que o trem acumulou será desnecessariamente perdida, levando a necessidade de nova aplicação energética por meio das locomotivas para retomada da velocidade.

Figura 22 - Sistema pneumático de freio em veículos ferroviários



Fonte: Borba (2008).

5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética pode ser definida a partir da relação entre a quantidade de energia aplicada em determinada atividade e a quantidade que foi utilizada efetivamente para

esta atividade ser realizada. Promover eficiência energética deve ter seu ponto de partida desde as transformações primárias da fonte de energia, até seu efetivo aproveitamento, não deixando de haver preocupação com impactos ambientais que esta fonte energética gera (ELETROBRAS, 2006).

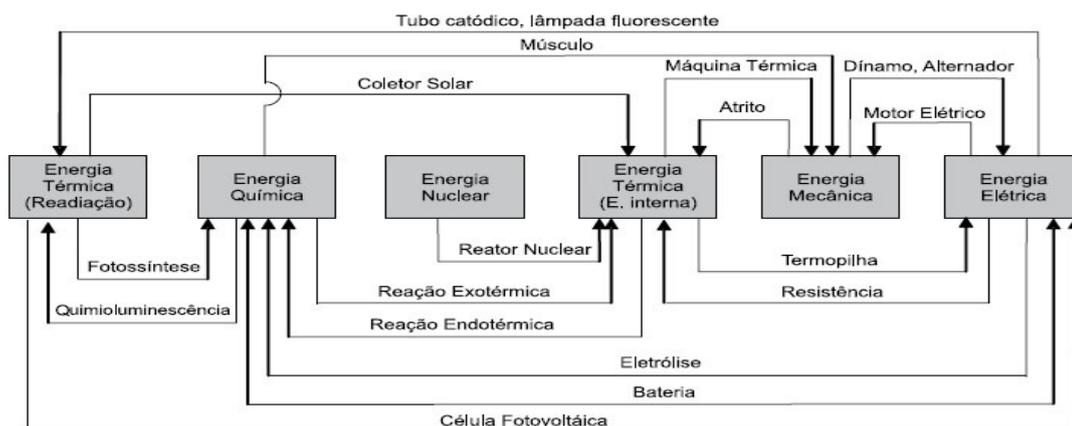
A figura 23 apresenta formas principais de conversão de energia, esta deixa mais claro que o melhor termo a ser utilizada quando se fala de energia é conversão, ao invés de processos de geração ou sistemas de consumo (ELETROBRAS, 2006).

Para Patersson (1996) eficiência energética pode se considerar um termo genérico, ou seja, deve se atrelar um indicador bem definido para comparação do que é ou não é eficiente energeticamente. Eficiência energética pode ser definida como o uso de menor energia para produzir a mesma saída do processo em avaliação, mantendo também a mesma configuração anterior.

Patersson (1996) definiu quatro grupos de indicadores principais para apuração de eficiência energética, conforme segue:

1. Termodinâmicos;
2. Físico – termodinâmicos;
3. Econômico – termodinâmico;
4. Econômico;

Figura 23 - Processo de conversão de energia



Fonte: Eletrobras (2006)

1. Termodinâmicos - Base destes indicadores é a teoria da termodinâmica, sendo alguns como taxas mais simplificadas e outros mais sofisticados, sempre relacionando medidas reais a referencial ideal.

Este grupo de indicadores tem como base a 1º e a 2º leis da termodinâmica, onde:

1º lei da termodinâmica - Eficiência térmica ou entálpica, medindo "conteúdo de calor", em termos de valores de mudança entálpica, (ΔH). A taxa de eficiência entálpica para um dado processo é dada pela relação do ΔH de saída do processo sobre o ΔH de entrada do processo, conforme em 1:

$$E_{\Delta H} = \frac{\Delta H_{saída}}{\Delta H_{entrada}} \quad (1)$$

Este indicador mede apenas a saída útil, como exemplo a lâmpada incandescente tem 6% de eficiência entálpica, a entrada de energia elétrica é convertida em energia luminosa, os demais 94% é considerada "desperdício", sendo perdido no ambiente em forma de calor.

2º lei da termodinâmica - a primeira lei não é suficientemente capaz de explicar todos os fenômenos que ocorrem, em função da qualidade da energia não ser levada em consideração, não levando em conta, em nível significativo, as eficiências energéticas relativas.

Agora o termo trabalho aparece, é ΔG é energia livre Gibbs, quando está decresce, o trabalho aproxima do máximo, é dada pela expressão em 2 (onde T é a temperatura, ΔH mudança na entálpica, ΔS mudança na entropia).

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2)$$

Outros dois importantes fatores da qualidade da energia são a exergia (pode ser definido de forma simplificada como o trabalho disponível em um gás, fluido ou massa), e trabalho disponível, que difere da energia livre de Gibbs em condições de pressão e temperatura.

Outra forma de definição da eficiência energética relativa é a energia ideal mínima para realizar a tarefa, sendo definida em 3:

$$\rho = \frac{E\Delta H_{real}}{E\Delta H_{ideal}} \quad (3)$$

ρ – Eficiência de um processo para executar específica tarefa;

$E\Delta H_{real}$ – Eficiência entálpica real de um processo executando específica tarefa;

$E\Delta H_{ideal}$ – Eficiência entálpica ideal de um processo executando uma tarefa reversível de um dispositivo perfeito;

O valor de ρ varia de 0 a 1, mostrando um nível de proximidade a uma eficiência ideal.

2. Físico – termodinâmicos – Diferente dos indicadores termodinâmicos, que medem eficiência energética na saída dos processos em termos calor e trabalho, estes medem em unidade física, que geram melhor gestão do indicador para os processos aos quais estão sendo medidos, como exemplo, para o setor de transportes, onde as variáveis são massa transportada a uma dada distância, assim uma saída física para medir a eficiência energética deste processo seria medida conforme em 4:

$$EE = \frac{\text{Saída (toneladasquilomentros)}}{\text{Energia de entrada (\Delta H)}} \quad (4)$$

A vantagem destes indicadores é que podem ser utilizados independente do produto ou serviço que está sendo medido, uma tonelada sempre será uma tonelada.

Este tipo de indicador se mostra efetivo para medição de eficiência energética no setor de transportes, onde a entrada na maioria das vezes é de caráter baseado nas leis da termodinâmica (a base de queima de combustíveis fósseis, e a saída é relacionada à massa transportada (toneladas) e o percurso (quilômetros, milhas, etc).

3. Econômico – termodinâmico – Indicadores híbridos que diferente dos físico-termodinâmicos, estes possuem entrada de energia em termo termodinâmicos, mas a saída em termos de valor de mercado (\$). Um exemplo é a relação energia versus o PIB para medir o quanto uma nação possui eficiência no uso de sua energia, porém é crítica por alguns autores em função de outros fatores que impactam no PIB e muitas vezes não são isolados quando é feita esta análise comparativa, levando a dados não precisos.

4. Econômicos – Nestes indicadores tanto a entrada quanto a saída são em termos econômicos. Os críticos deste indicador é que o mesmo não deveria ser parâmetro para eficiência energética, uma vez que é uma comparação de preços, de referência (ou ideal), e o real. O indicador econômico muito utilizado segue em 5.

$$EE = \frac{\text{Entrada-custo geração energia (\$)}}{\text{Saída- Energia gerada (\$)}} \quad (5).$$

5.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FERROVIAS

Para Szkoda *et al* (2016), as ferrovias já possuem uma imagem de eficientes quando se fala do fator energético, em função de, quando comparadas ao modal rodoviário, já possuem

melhor eficiência energética, mas esta imagem não pode eximir os operadores ferroviários de continuarem avançando em melhorias de processos e avanços tecnológicos para aumentar a eficiência energética e também reduzir as emissões de poluentes inerentes do combustível fóssil.

Uma melhora da eficiência energética dos trens, nas ferrovias, significa direta redução de custos, importante em um modal com altos custos fixos, uma das estratégias utilizadas na Europa neste sentido é a renovação da frota de locomotivas diesel - elétrica, que já possuem elevada idade de operação, por locomotivas mais modernas, com melhor eficiência energética e atendendo os requisitos de emissão de gases. A metodologia utilizada foi o custo de ciclo de vida.

Reis *et al* (2013) comenta que a eficiência energética de uma ferrovia tem influência em uma variedade de fatores que devem ter seu estudo direcionada para a melhoria da eficiência.

Liu *et al* (2013) comenta que a abordagem tradicional de eficiência energética em ferrovias está centrada em locomotivas mais eficientes, treinamento de maquinistas, redução de resistências ao deslocamento dos trens, manutenção adequada dos vagões, porém somente isto não basta para um maior avanço na melhora do desempenho, e sugere a migração para avanços tecnológicos, como a condução autônoma de trens.

Para Zhang *et al* (2012) o conjunto de escassez de energia disponível, fatores climáticos como o aquecimento global, e a preocupação maior com o ambiente estão levando a eficiência energética em ferrovias *heavy haul* a um nível prioritário, mesmo o modal ferroviário já contribuindo de forma positiva quando comparado a outros modais de transporte.

Larsson *et al* (2009), comenta que o controle de aceleração e perfil de velocidade tem contribuição direta nos consumos de combustível e conseqüente melhora na eficiência energética.

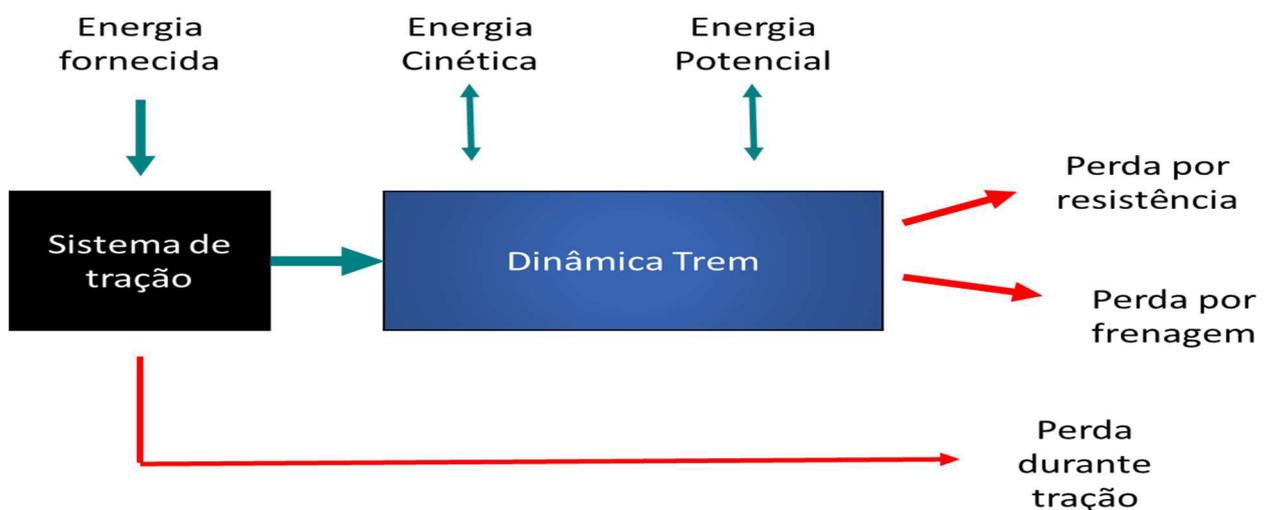
As ações de treinamento de maquinistas não devem ser isoladas, uma vez que em pesquisas realizadas em motoristas de veículos automotores, mesmo com treinamentos de condução para obter menor consumo, os mesmos voltavam ao estilo anterior de condução, após certo período de tempo, levando uma piora na eficiência energética, deixando claro que o monitoramento deve ser constante.

5.1.1 MODELANDO UM TREM

Na modelagem de uma operação de um trem existem energias envolvidas enquanto as locomotivas estão tracionando quanto enquanto as mesmas estão aplicando frenagem na composição.

Assumindo a locomotiva que conduz o trem como modelo diesel elétrica, a energia gerada no sistema será convertida em mecânica na roda da locomotiva para prover o movimento do trem, sendo “perdida” para a resistência ao movimento do trem e na aplicação da frenagem em dado momento, ainda parte da energia é armazenada em forma de energia cinética e potencial, a figura 24 ilustra o relato acima (HOWLETT *et al.*, 1994).

Figura 24 - Fluxos de energia para um trem



Fonte: Howlett *et al* (1994)

Howlett *et al* (1994), apresentam o modelo de energia mecânica no trem, que pode ser descrito em termos de equação diferencial, conforme em 6:

$$v \frac{dv}{dx} = u - r(v) + g(x) \quad (6)$$

onde:

$v = v(x)$ – Velocidade do trem;

$u = u(x)$ – Aceleração controlada do trem;

$r(v)$ – Resistência a aceleração;

$g(x)$ – Gradiente de aceleração.

As velocidades inicial e final são especificadas. Quando o trem está tracionando, a relação da aceleração é dada em 7:

$$0 \leq u \leq u_{máximo} \quad (7)$$

Durante a frenagem:

$$u_{mínimo} \leq u < 0 \quad (8)$$

O gradiente de aceleração, em termos práticos, é dado por:

$$g(x) = -g \sin \theta(x) \quad (9)$$

Sendo (g) a aceleração devido à gravidade, $\theta(x)$ é o ângulo de inclinação a dada distância x ao longo da via férrea.

Para Cole (2006) a importância de trazer no modelo tanto a tração quanto a frenagem se torna válida para o mesmo se aproximar mais da realidade.

A complexidade do modelo depende muito dos aspectos específicos das locomotivas, que estão cada vez mais avançadas em termos de controle de tração, gerando menores eventos de perda de tração.

As locomotivas de última geração possuem controles que limitam a aceleração pelo operador, limitando por consequência o gasto de energia, em termos práticos se o operador aplicar o máximo de pontos de aceleração (ou “pisar fundo no acelerador”, fazendo analogia a um automóvel), o controle limitador não aplica esta ação, acelerando a locomotiva de forma gradual.

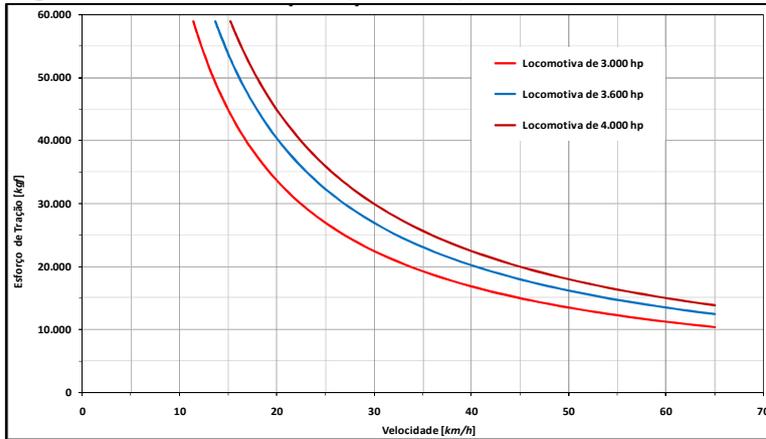
Borba (2008), comenta que a força de tração vai crescendo rapidamente e, na sequência a retirada do trem da inércia, começa a reduzir a medida que a velocidade do trem vai aumentando. Para a aderência, μ_a , é adotado valores entre 30% a 36%, conforme em 10.

$$f_t = \mu_a \cdot P_a [kgf] \quad (10)$$

As curvas de esforço de tração para uma locomotiva tipo diesel elétrica, é representada por uma hipérbole, usando a relação entre a potência da locomotiva, seu rendimento, a velocidade e uma constante, em função da relação que o esforço de tração vai decrescendo à medida que a velocidade aumenta, e o contrário também ocorre. Em 11 está relação fica melhor apresentada.

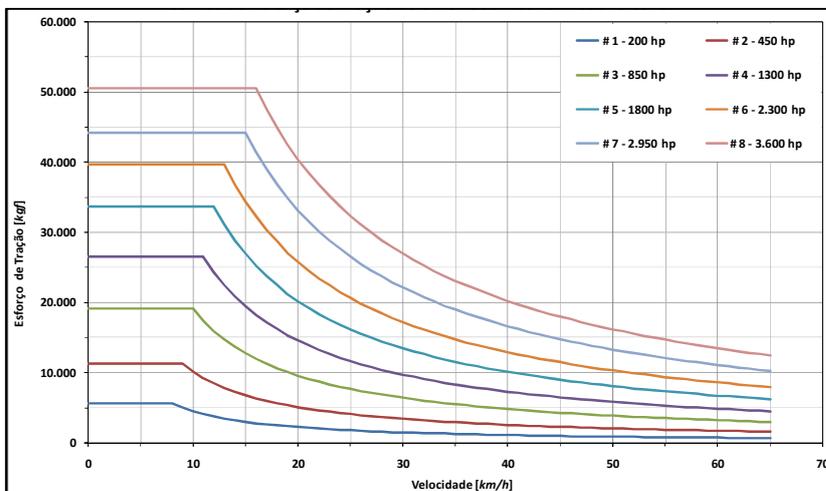
$$F_{loco} = \frac{273,74481 \cdot [HP] \cdot \eta_{loco}}{v_{loco}} \quad (11)$$

A relação peso aderente e demanda de aderência é inversamente proporcional, levando a dedução que maior potência disponível para tração é necessária para maior velocidade do trem, conforme a figura 25 para três exemplos de locomotivas e as respectivas potências.

Figura 25- Curva de esforço de tração

Fonte: Borba (2008).

A locomotivas tem configuração com oito pontos de aceleração, que representam oito níveis de potência para tração, gerando assim oito curvas de esforço de tração em função da velocidade, conforme a figura 26.

Figura 26 - Curva de esforço de tração por ponto de aceleração aplicado

Fonte: Borba, 2008

5.2 INDICADORES DE DESEMPENHO

Indicadores de desempenho devem ser utilizados para eficiente gestão dos processos. Processos sem medição de desempenho deixam a gestão ineficiente, o que eleva o risco de qualquer negócio se sustenta (PEREIRA, 2009).

Para o modal ferroviário, especificamente no Brasil que passou por processo de privatização, os indicadores de desempenho têm sua importância potencializada, checar a sustentabilidade do negócio ferroviário pós privatização seria impossível sem indicadores de desempenho, até a nível de renovação de concessões (PEREIRA, 2009).

Pereira (2009) argumenta que indicadores devem ter sólida base teórica, não havendo divergência entre as partes que compõe, nem concorrência, o indicador deve ser de simples compreensão, a coleta dos dados e análise também não podem ser complexas.

Diógenes (2002) destaca aspectos a serem usados quando se elabora um indicador:

- Acessibilidade
- Custo baixo de geração dos dados
- Rastreabilidade
- Representar o processo estatisticamente

Falconi (2004) apresenta que não há gerenciamento sem meta definida. Os indicadores de desempenho sem metas de acompanhamento, não conseguem cumprir com a missão para os quais foram criados. O gerenciamento de processos é possuir metas, acompanhamento de indicadores de desempenho, e planos de ação para atingir as mesmas.

6 INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Nas ferrovias *heavy haul*, o indicador de eficiência energética é comumente atrelado ao acompanhamento do consumo relativo das locomotivas diesel elétricas (PEREIRA, 2009).

Jordão (2006) apresenta a expressão da eficiência energética como a relação de carga tracionada por uma locomotiva diesel elétrica pelo que a mesma consome de combustível.

Ribeiro *et al* (2006), apresenta o cálculo do indicador de eficiência energética para ferrovias *heavy haul*, conforme em 12.

$$EE = \left[\frac{\text{Litros}}{1000 \cdot \text{TonKMBruta}} \right] = \left[\frac{\text{Litros}}{KTKB} \right] \quad (12)$$

Litros nesta fórmula são adicionados nas locomotivas, com o diesel como combustível, sendo ainda um desafio tecnológico medir com eficiência a quantidade consumida por cada locomotiva, dado a geometria dos tanques, que com o passar do tempo e uso, os mesmos reduzem a área útil.

Tonelada Quilometro Bruta (TKB) é o indicador composto por todas as cargas que trafegam pela ferrovia, seja vagões carregados ou vazios, e a distância total que os mesmos percorrem.

Pereira (2009) apresenta a geração de TKB em um determinado trecho de uma ferrovia, conforme figura 27, onde a tonelada bruta transportada é multiplicada pela distância do ponto A até o ponto B.

Para os vagões vazios, não havendo carga de retorno, é resultado desbalanceamento entre os fluxos, com as respectivas taras dos vagões.

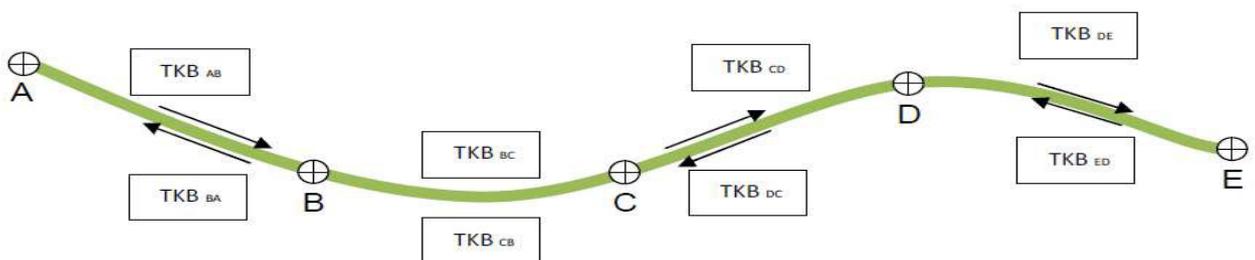
Após o TKB de cada trecho, se compõe o TKB total da ferrovia, trecho a trecho, conforme a figura 28, levando ao planejamento do consumo estimado de combustível.

Figura 27- TKB em trecho específico de uma ferrovia



Fonte: Pereira (2009)

Figura 28 - TKB total de uma ferrovia, composto por todos os trechos



Fonte: Pereira (2009)

Dada a eficiência energética esperada, a quantidade de litros a ser consumida para o planejamento de transporte é dado em 13.

$$EE_{AE} = \frac{Litros_{AB} + Litros_{BC} + \dots + Litros_{DE} + \dots + Litros_{CB} + Litros_{BA}}{1000 \cdot (TKB_{AB} + TKB_{BC} + \dots + TKB_{DE} + TKB_{CB} + TKB_{BA})} \quad (13)$$

Este consumo esperado de litros de diesel passará a ser a meta para aquela dada ferrovia, uma vez que estará diretamente ligada ao custo de transporte da mesma.

O indicador de eficiência energética, como qualquer outro indicador, deve ser acompanhado como meta, e os planos de ação para manter ou aumentar a eficiência energética devem ser elaborados e cumpridos (FALCONI, 2004).

Como a relação da eficiência energética com os litros consumidos é diretamente proporcional, então o indicador de eficiência energética é de orientação negativa, quanto menor o seu valor, mais eficiente é o trem que está sendo medido (FALCONI, 2004).

Quando se analisa a composição do indicador de eficiência energética, outros indicadores têm relevância sobre este de forma direta, conforme seguem (PEREIRA, 2009).

- Peso médio dos vagões – O indicador de peso médio dos vagões pode impactar de forma negativa na eficiência energética, se o mesmo estiver abaixo da meta estipulada, uma vez que irá reduzir o TKB total. Na prática, se a capacidade total dos vagões não está sendo preenchida, a potência das locomotivas está sendo utilizada para transportar uma carga menor, logo a energia utilizada terá um custo maior.

- Paradas programadas – Paradas para cruzamentos de trens em ferrovias não duplicadas, para troca de equipes de maquinistas, para abastecimento, a otimização destas paradas tem reflexo direto na melhora do indicador de eficiência energética.

- Paradas não programadas – Este indicador, que também pode ser conhecido como trem hora parada, tem influência na eficiência energética em função da balança energético do trem, toda a energia que o trem ganha em percurso será perdida durante aquela parada não programada (que pode ser provocada por algum defeito do trem, da via férrea ou de terceiros, o trem necessitaria de nova adição de energia para retirar a massa da inercia e voltar a velocidade do trecho.

Carneiro (2010) apresenta estudo de influência de outro indicador sobre a eficiência energética de uma ferrovia, que é o indicador de restrições de velocidade.

As restrições de velocidade são decorrentes de defeitos ou manutenções na via férrea que geram redução da velocidade do trecho atingido, esta redução de velocidade altera a velocidade média de percurso (*transit time*) dos trens, levando a impactar a eficiência energética. Estas restrições não podem durar muito tempo, ou seja, devem ser corrigidas, devolvendo a condição normal de velocidade dos trechos.

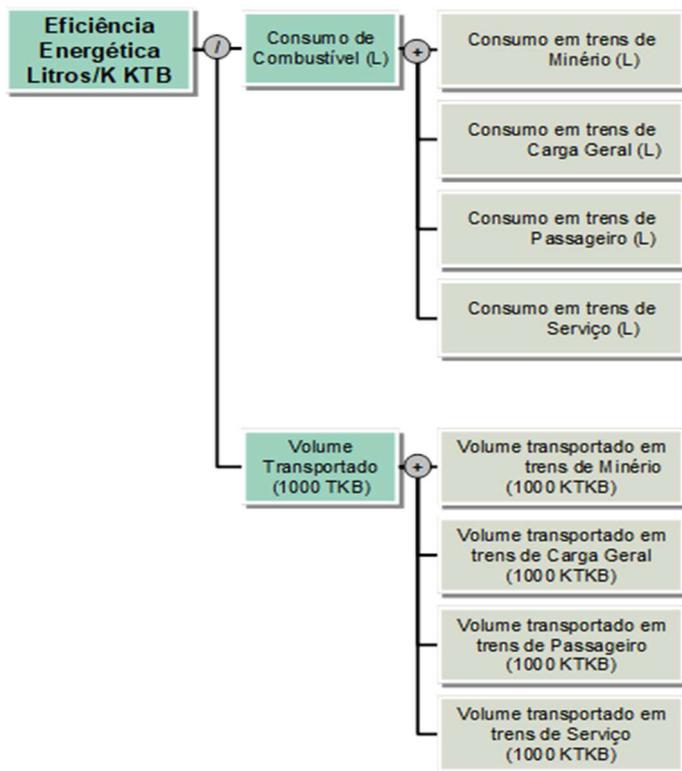
Laroca (2014) comenta que a eficiência energética total da uma ferrovia deve contemplar todos os fluxos que trafegam pela mesma, seja trens de cargas, trens de serviço

(trens que transportam materiais para manutenção da via férrea, como carregamentos de brita e trilhos), e trens de transporte de passageiros, se houver.

A visão de árvore do indicador gera uma análise mais detalhada do consumo de combustível de uma ferrovia, como o exemplo de árvore de uma ferrovia *heavy haul* de transporte de minério de ferro e outras cargas, apresentada na figura 37.

Os fluxos e tipos de cargas transportadas devem ser analisadas de forma separada, em função do risco de um tipo de fluxo ou carga poder compensar uma possível piora de eficiência energética do outro, não revelando o real problema a ser tratado.

Figura 29 - Exemplo de árvore do Indicador de Eficiência Energética



Fonte: Laroca (2014)

7 TECNOLOGIAS E MÉTODOS AVANÇADOS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Pereira (2009), comenta que para melhorar a eficiência energética dos trens de carga, novas tecnologias e métodos devem ser utilizados, além das técnicas e métodos convencionais de gestão já praticados por algumas ferrovias.

A aplicação de tecnologias e técnicas avançadas, já utilizadas em outros modais de transporte, pode ser aplicada também no modal ferroviário, uma vez que as locomotivas utilizam motores diesel, com geradores que transformam a energia gerada pelo combustível fóssil em energia elétrica. (PEREIRA, 2009).

7.1 SIMULAÇÃO DE OPERAÇÃO FERROVIÁRIA EM SOFTWARES

Simuladores de operação ferroviária são utilizados tanto para elaboração de padrões de operação, quanto para treinamento de maquinistas, análise de acidentes bem como testas novos processos e ou equipamentos nos trens. (CARNEIRO, 2010)

Carneiro (2010) comenta que estes simuladores conseguem aproximar nos cálculos de consumo de combustível dos trens, bem como reduzir as forças de tração e compressão durante a condução dos trens, este tipo de ferramenta é fundamental para uma operação ferroviária segura e eficiente, gerando vários cenários de circulação de trens, e também levando a decisões de projeto quanto ao perfil da ferrovia, que possa gerar um menor esforço resistente ao trem, melhorando sua eficiência de percurso e energética.

Outra utilização da ferramenta de simulação, que tem grande importância para melhoria da eficiência energética, está relacionada ao treinamento de maquinistas na condução dos trens, que após carga horária de utilização do simulador aumentar sua capacidade de conduzir um trem em dada ferrovia. (PALHANO,2009).

Para Deltrégia (2014) o uso de um modelo para análise de modos de condução tem impactos positivos nos custos e segurança da operação ferroviária, com a possibilidade de repetidos testes de desempenho antes do mesmo virar realidade operacional.

7.2 SIMULADOR TEM

Rowangould (2010) comenta que o TEM (*Train Energy Model*) é o mais popular simulador de operação ferroviária do mercado, o mesmo tem como base o estudo de Davis, mas conhecido como as equações de Davis, que conseguem produzir o consumo de combustível total do sistema, eficiência energética e densidade de tráfego.

Deltregia (2014) comenta que o TEM foi desenvolvido pela AAR, o mesmo consegue calcular a necessária energia para operação do trem, gerando informação suficiente para tomada de decisão quanto a ações de melhoria da eficiência energética, sem reduzir segurança da operação.

O TEM permite ao usuário configurar as composições e suas cargas, perfis de circulação, quantidade de locomotivas e posições, condições ambientais, porém não permite ao condutor assumir o trem durante o desenvolvimento da simulação, a mesma é feita de modo automático. O TEM considera o trem um único bloco, o que permite economizar recursos de processamento, este simulador utiliza o *Generalized Algorithm for Train Control*.

O TEM entrega, após a conclusão da simulação, informações gráficas de velocidade do trem versus velocidade limite da via férrea, conforme figura 30.

O simulador também gera relatório resumido para cada ciclo de simulação, há também a informação das energias produzidas por cada que age no trem.

O simulador TEM não consegue simular os choques de compressão e tração na composição, os tempos do TEM são inferiores aos tempos reais, uma vez o simulador sempre busca chegar na velocidade da via férrea, gerando distanciamento dos tempos reais.

Figura 30 - Perfil de velocidade gerado pelo TEM



Fonte: Painter (2006)

7.3 SIMULADOR *TRAIN DYNAMIC SYSTEM*

A empresa *New York Air Brake* (NYAB) produz o simulador *Train Dynamic System* (TDS), com tecnologia para reproduzir perfis da via ferroviária bem como o modelo de trem que está sendo utilizado, podendo inserir até 06 locomotivas e simular trens com mais de 600 vagões, chamados trens super longos.

O TDS consegue calcular o consumo total da composição, com base na aceleração, e gera resultado bem próximo do real. O trem pode ser montado com tração distribuída, onde a locomotiva líder é a comandante do trem, e as demais não possuem maquinista (NYAB, 2018)

A operação do TDS deve ser feita por profissional experiente, sendo um dos pontos de atenção para aquisição e utilização do mesmo no dia a dia de uma nova operação (NYAB, 2018).

O TDS pode também ser vendido na versão *control stand*, destinado para finalidade de análises de engenharia, treinamentos dos maquinistas ao longo da ferrovia, sua fácil mobilidade também é uma vantagem útil (NYAB, 2018).

7.4 SIMULADOR VALE CONVÊNIO COM A USP

A empresa Vale S. A., em conjunto com a Escola Politécnica da USP, desenvolveram um simulador de operação de trens, com objetivo inicial de treinamento dos maquinistas. Este simulador é um sistema de realidade virtual definido como multiusuário, diferente dos demais simuladores anteriormente apresentados no presente trabalho, este simulador permite interação entre maquinistas, dentro de uma malha viária completa.

Barbosa *et al* (2011), comenta que foi utilizada a ferramenta desenvolvida pela *Unity Technologies*, denominada de *Unity-3D*.

Foi utilizado também um padrão gráfico de mercado, muito utilizado para desenvolvimento de jogos, que é o *FBX*, desenvolvido pela empresa *AUTODESK*, este modelo é confiável quanto à qualidade gráfica, reduzindo também possíveis retrabalhos nas exportações de modelos. A figura 31 apresenta a visualização do simulador.

Figura 31 - Simulador convênio Vale com a USP



Fonte: Barbosa *et al* (2011)

Barbosa *et al* (2011), utilizaram a técnica de sistema multicorpos para modelar o comportamento dinâmico dos veículos dentro do simulador desenvolvido, esta técnica é baseada em equações das formulações de *Lagrange*, variação de energia cinética e potencial. Para o simulador se aproximar da realidade, algoritmos robustos são necessários, à medida que o maquinista vai aplicando os comandos no simulador, suas ações devem produzir as reações no trem.

Silva (2010) analisou o simulador desenvolvido pela USP, comparando o mesmo com o TDS da NYAB, com resultado bastante promissor, sendo necessário a continuação do desenvolvimento para uma calibração mais assertiva, e com conseqüente aproximação da realidade.

7.5 TRIP OPTIMIZER

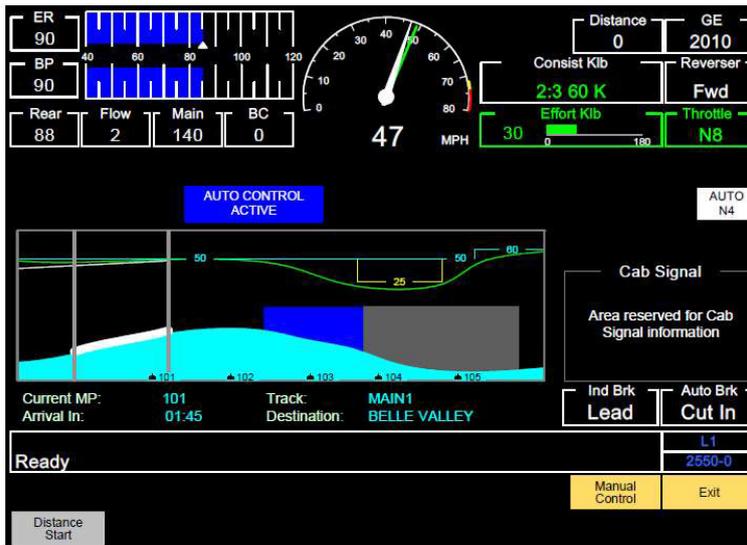
Conforme Ghelere (2016) o *trip optimizer* é um sistema computadorizado criado pela empresa *GE Transportation*, como objetivo de semi-automatizar a condução dos trens, com ganhos na eficiência energética dos mesmos.

A *GE Transportation* (2018) apresenta o sistema como o *state-of-the-art* para controle eficiente de trens, reduzindo tanto as emissões quanto o consumo de combustível, o sistema vai aprendendo as características da via e implementa um controle eficiente tanto da aceleração quanto da frenagem dinâmica, preservando o balanço energético adquirido pelo trem em percurso.

O fornecedor do sistema apresenta reduções possíveis na ordem de 3% a 17% do consumo de combustível em ferrovias *heavy haul*. Esta redução não será por algum controle no sistema de tração da locomotiva, e sim por curvas de velocidade aderentes a VMA dos trechos ferroviários, quando esta condução é feita pelo maquinista, o mesmo não consegue manter aderência elevada em função das possíveis diferenças de velocidade em cada trecho (estas podem ser devidas a elementos construtivos do trecho, que não permitem velocidades maiores, ou por restrições colocadas em função de manutenções ou defeitos na via férrea).

A figura 32 apresenta a tela inicial do sistema *trip optimizer*, que segue o padrão AAR de operação de trens.

Figura 32 - Interface homem maquina *trip optimizer*

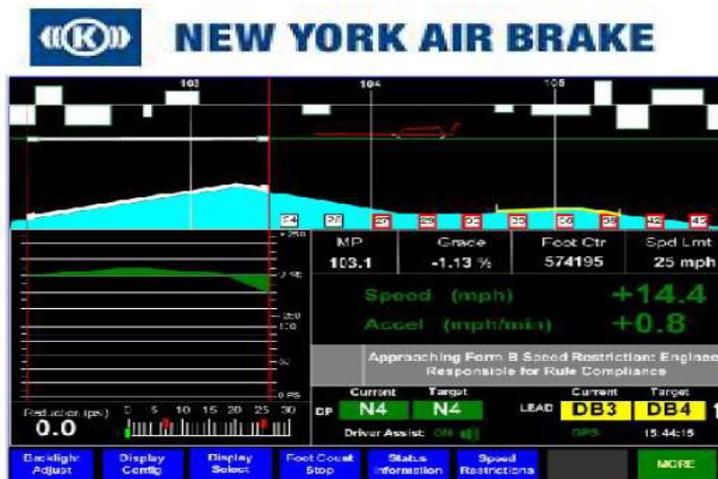


Fonte: GE Transportation (2011)

7.6 LEADER

Conforme a NYAB (2018), o LEADER (*Locomotive Engineer Assist/Display & Event Recorder*) é um sistema de gestão da operação do trem, melhorando a operação por parte dos maquinistas e, de forma significativa, a redução do consumo de combustível. O sistema apresenta parte da tecnologia utilizada no simulador que a NYAB comercializa também, o TDS, conforme figura 33.

Figura 33 - Interface homem máquina LEADER



Fonte: NYAB (2011)

Carneiro (2011) comenta que as características importantes do sistema LEADER são:

- Adaptação em locomotivas dos principais fabricantes do mundo (GE e EMD);
- Opera tanto em trens com tração convencional quanto com tração distribuída;
- Apresenta em sua interface homem – máquina, o gráfico de esforços no trem, apresentando também as ondas de choque que ocorrem;
- Conforme fabricante, tem expectativa de redução de consumo da ordem de 4% a 19%.

Lawrence (2009), apresenta os testes piloto do sistema LEADER em ferrovia dos EUA, a *Norfolk Southern*, onde operando em um corredor específico (*Wiston Salem District*), foram conseguidas médias de redução da ordem de 17,5% do consumo no modo convencional.

Na continuação dos testes, em trens com tração distribuída, os resultados chegaram até 30% de redução no consumo. A figura 46 apresenta as duas configurações de circulação na NFS, tração convencional e com a tração distribuída.

Figura 34 - Configuração de testes na NFS com tração convencional e tração distribuída



Fonte: Lawrence (2009)

7.7 AUTOMATIC ENGINE START AND STOP (AESS)

As locomotivas aguardando em trem, no modo distribuído, não podem ser desligadas pelo maquinista na locomotiva líder, há casos também de locomotivas ligadas em pátios de manobra e oficinas.

O *Automatic Engine Start and Stop* (AESS) executa a desligamento e ou re-ligamento da locomotiva quando a mesma está em posição de *Idle*.

Kitamura *et al*(2013) comenta que o sistema AESS tem como principais objetivos melhorar eficiência energética com a redução do consumo das locomotivas, com consequente redução de emissões e desgaste do motor diesel.

A *Progress Rail* (2018) apresenta o sistema AESS com as seguintes características para o sistema entrar em funcionamento:

- Manipulo da locomotiva na posição *Idle*
- Locomotiva está parada
- Locomotiva com os freios aplicados
- Pressão do reservatório principal é maior do que a pressão do encanamento geral.

O sistema efetua o *shutdown* após o cheque de parâmetros:

- Temperatura e nível da água do motor diesel
- Voltagem e corrente da bateria
- Pressão do ar
- Histórico de tempo de funcionamento do motor

Para o re-ligamento, o AESS também checa parâmetros, estes cheques de parâmetros são necessários para evitar falhas no processo e danos ao motor.

7.8 FREIO ELETRO PNEUMÁTICO

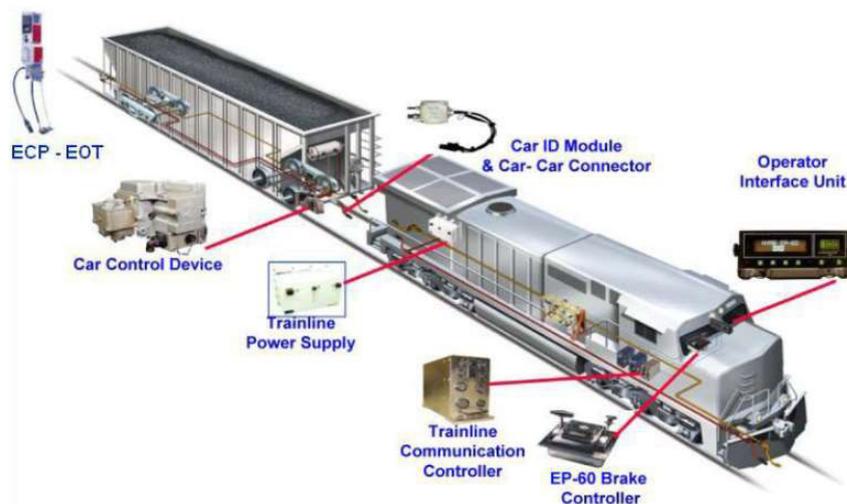
Ghelere (2018) comenta que os freios dos veículos ferroviários, classificados de convencionais, tem atuação por meio da modulação de pressão no encanamento geral dos mesmos, o que gera um *delay* entre a aplicação de freio pelo maquinista até o último vagão aplicar.

Em trens mais longos, a utilização do sistema de frenagem convencional se torna mais complexo, uma vez que há a formação de gradientes de pressão do início até o final do trem torna se mais lenta. Há também procedimento de recarregar o sistema pneumático de frenagem, que acarreta outro complicador para a condução dos trens (GHELERE, 2018).

Uma solução seria a aplicação simultânea de frenagem em todos os veículos do trem, está pode ser feita por meio do sistema de frenagem eletropneumático, sendo composto por um conjunto de equipamentos e softwares, este sistema comanda a frenagem do trem não mais por diferença de pressão no encanamento geral, e sim por meio de comandos eletrônicos, conduzidos por um condutor elétrico (*trainline*), este aciona as válvulas eletropneumáticas aplicando freio nos vagões. Suas principais vantagens são a redução do consumo de energia do trem e tempo de percurso do trem (GHELERE, 2018).

Ghelere (2018) apresenta na figura 35 a configuração do sistema freio eletro pneumático em trem.

Figura 35- Trem com sistema ECP



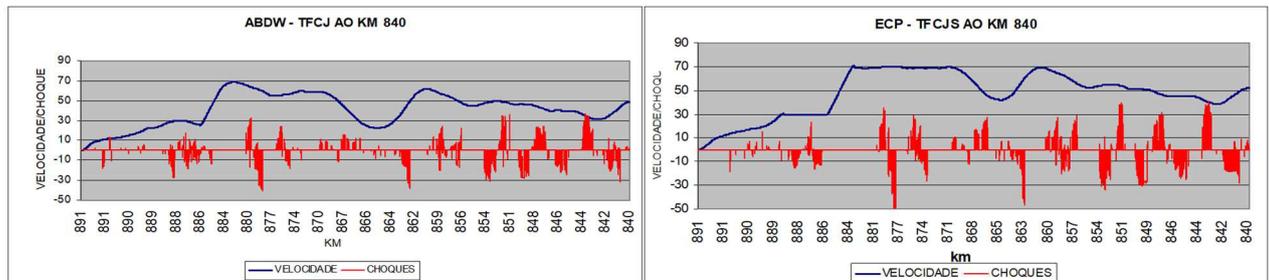
Fonte: Ghelere (2018)

Palhano (2009), apresenta testes utilizando o sistema de freios eletro- pneumáticos para vagões em uma ferrovia *heavy haul*. O sistema utilizado atualmente em muitas ferrovias é convencional de freio automático, que pode ser utilizado em diferentes combinações de tamanho de trens e quantidades de locomotivas, porem este sistema tem o maquinista como principal premissa para seu correto funcionamento, o que gera problemas uma vez que a diferentes níveis de capacitação e o fator humano pode acarretar em erros na condução.

Palhano (2009) comparou em testes os dois modelos de sistema de frenagem, apresentando resultados de maior aderência a velocidade média autorizada (VMA) para o sistema com de freios eletro-pneumáticos, porém com maiores valores de choque entre os

vagões, o autor comenta que estes valores mais elevados podem ser reduzidos com práticas de operação de trem. A figura 36 apresenta a comparação feita em simulação dos modelos.

Figura 36- Comparativo de trens utilizando sistema de frenagem convencional de frenagem com ECP



Fonte: Palhano (2009)

7.9 FREIGHTMISER

Yee *et al* (2004) apresentaram os resultados iniciais dos testes com o sistema *FreightMiser*, desenvolvido para operação de trens longos em auxílio ao maquinista na economia de combustível durante o percurso.

Estes testes foram realizados na Austrália, em 2003, e tiveram redução do consumo de combustível na ordem de 15%.

O sistema *FreightMiser* analisa o perfil da via durante o percurso e vai indicando ao maquinista o que deve ser feito na condução do trem para alcançar a economia de combustível, mantendo o tempo de percurso programado.

O sistema trabalha levando em conta que a eficiência energética durante a condução do trem pode ser entendida com um problema de pesquisa operacional, onde se busca maximizar a aderência ao tempo estipulado de percurso, minimizando o consumo de combustível.

Desta forma, quatro modos de condução são buscados pelo sistema:

- Locomotiva com esforço máximo de tração;
- Manter a velocidade do trem constante;
- Vagões com esforço mínimo de tração;
- Freio com esforço máximo de frenagem.

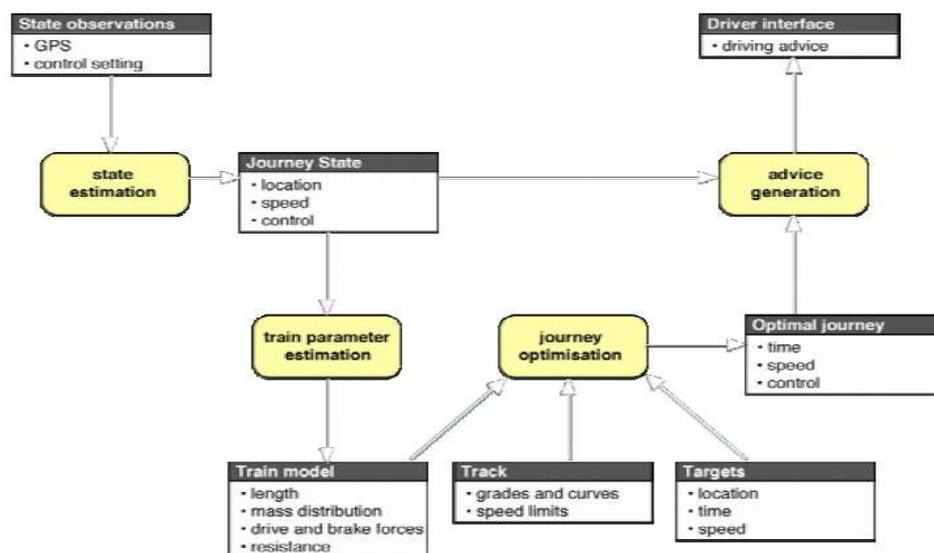
O sistema trabalha, na prática, com as principais estratégias de otimização da condução do trem:

- Controlar a velocidade para não levar a uma condução que de privilegio a aumentar a velocidade do trem, aumentando também o consumo, chegar mais cedo do que o previsto não é indicativo de eficiência;
- Conhecer bem o perfil da via férrea é fundamental, antecipar a geografia do terreno onde a via férrea está instalada é fator essencial para se explorar a energia potencial acumulada do trem;
- Aplicação de frenagem em altas velocidade converterá a energia cinética do trem em calor, que não será aproveitado, desta forma a aplicação da frenagem deve ser feita com o trem em velocidades mais baixas.

A figura 37 apresenta as quatro atividades feitas pelo sistema *FreightMiser*.

1. *State Estimation* – Atividade de monitoramento do percurso do trem, calcula a velocidade e localização do trem na linha.
2. *Train Parameter Estimation* – Calcula os valores de resistência a rolamento do trem por meio do comportamento do trem em movimento.
3. *Journey Optimisation* – Calcula a velocidade ideal e o perfil de controle, já indicando também ações para a próxima etapa do percurso.
4. *Advice Generation* – Compara o estado atual do trem com o ideal e indica a forma de condução otimizada ao maquinista.

Figura 37- Diagrama de bloco do *FreightMiser*



Fonte: Yee *et al* (2004)

A figura 38 apresenta a interface homem máquina do *FreightMiser*. O sistema vai buscar sempre indicar o perfil ideal, desta forma, se ocorrer algum imprevisto durante o percurso que provoque a parada do trem em local não programado, o sistema não terá a sensibilidade de entender que ocorreu imprevisto, continuará indicando ao maquinista que não deve parar.

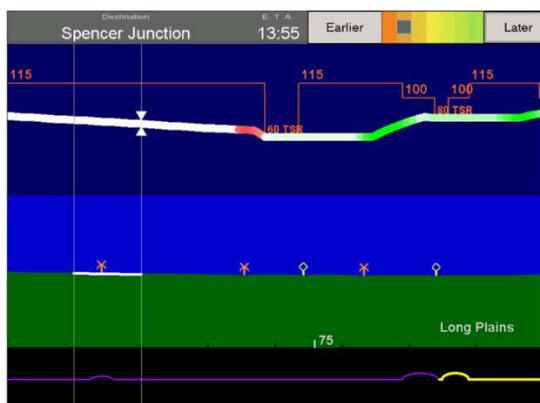
Figura 38- Interface homem máquina do FreightMiser



Fonte: Yee *et al* (2004)

Howlett *et al* (2008) apresentou, cinco anos após o primeiro teste com o sistema, melhorias em um padrão mais comercial do *FreightMiser*, conforme figura 40, bem como o percentual de redução na ordem de 15% veio se mantendo nos testes realizados ao longo de cinco anos.

Figura 39- Interface homem máquina do FreightMiser evoluida



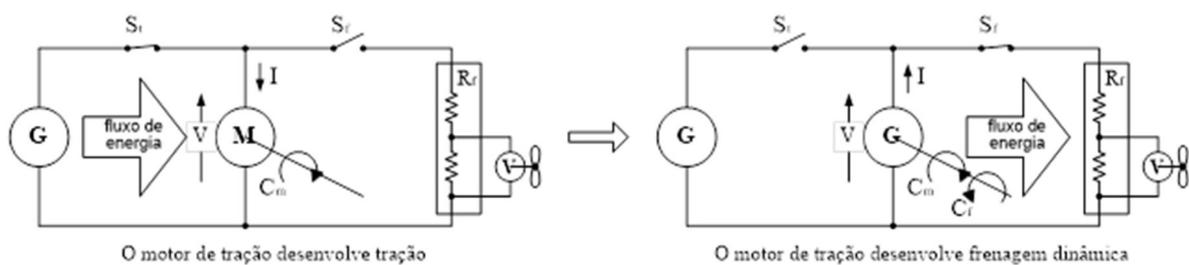
Fonte: Howlett *et al* (2008)

8 RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DURANTE PROCESSO DE OPERAÇÃO DE TRENS

Painter *et al* (2006) iniciou estudos para aproveitar a energia gerada na frenagem dinâmica das locomotivas no transporte de cargas dos EUA, a partir de simulações utilizando o TEM, e ao dados que são registrados na própria locomotiva, estimou que o potencial de energia era de 1.200 kW/h por trem, para situação estudada geraria redução de 10.600 litros.

Borba (2008) comenta que a frenagem dinâmica, é o momento onde os motores de tração se comportam como geradores de energia, com o objetivo de controlar a velocidade do trem, esta energia é dissipada na forma de calor, nos resistores de um componente chamado de banco de resistência do freio dinâmico.

Figura 40- Motor de Tração , funcionando no modo tração (à direita), e no modo frenagem dinâmica (à esquerda)



Fonte: Borba (2008)

Há um sistema de sopradores para levar o calor gerado até o ambiente, a própria energia dissipada alimenta o funcionamento dos mesmos.

Um estudo conduzido pela *Federal Railroad Administration (FRA)*, em 1979, analisou a possibilidade de aproveitamento da frenagem dinâmica das locomotivas, para este estudo uma locomotiva diesel-elétrica foi acoplada a um vagão que continha um sistema de armazenamento de energia. A energia gerada pelos motores de tração, quando a frenagem dinâmica é utilizada, seria direcionada para o sistema de armazenamento do vagão, ao invés de ser direcionada para as grades do resistor. A locomotiva usaria esta energia como fonte principal e quando a mesma fosse consumida, o sistema comuta para o convencional diesel-elétrico.

O estudo estava dividido em três fases, a primeira foi conduzida por dezesseis meses, sendo parado em função de não ser viável economicamente, a energia gerada foi muito baixa a época, as fases dois e três não foram feitas.

Painter *et al* (2006), analisaram que a viabilidade econômica poderia depender da ferrovia mais propicia a utilizar da frenagem dinâmica em grandes quantidades pelo fluxo de

trens, o que pode viabilizar a tecnologia. O trecho escolhido foi da ferrovia BNSF, nos EUA, com elevada utilização de frenagem dinâmica.

A partir da utilização do simulador TEM e dos dados do registrador de eventos das locomotivas, foram tabelas as energias por meio do registrador de eventos e do TEM, com alguns casos com grandes diferenças, que podem ser explicadas por ações dos maquinistas não contempladas no simulador, bem como alguma outra restrição de via, que o simulador também não conseguirá sensibilizar. A figura 41 apresenta estes dados.

Desta forma os dados do TEM não foram utilizados.

Figura 41- Comparação da energia gerada pela frenagem dinâmica calculada versus simulada pelo TEM

Train Symbol	Dynamic Energy (kWh)	
	Calculated	TEM
M-BARWAT120A	2,592	2,362
M-BARLAC131A	1,244	1,083
M-BARSDG131A	692	968
M-BARWAT131A	2,744	10,204
M-BARWAT130A	155	1,375
M-SDGBAR101A	800	6,100
M-SDGBAR128A	237	3,177

Fonte: Painter *et al* (2006)

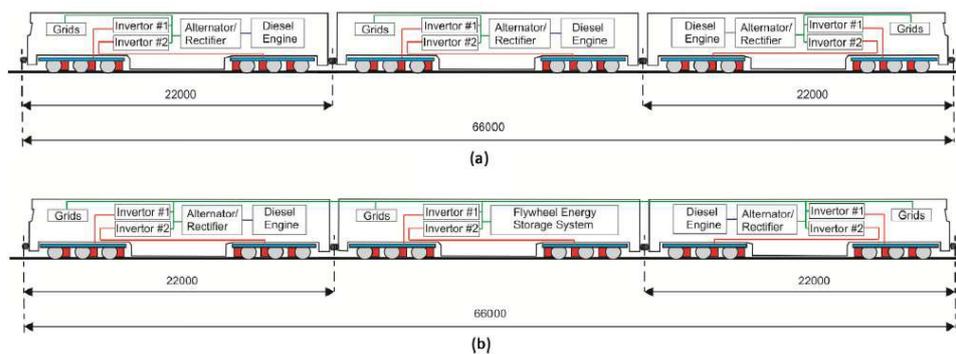
No trecho piloto selecionado, a energia a partir da frenagem dinâmica seria de 1.209 kWh por trem. O sistema de armazenamento desta energia não foi analisado, sendo um dos grandes desafios para o desenvolvimento desta tecnologia. Outro dado importante é que nem todos os trens seriam elegíveis, neste trecho piloto, ao armazenamento de energia (trens com programação já definida com mínimo de utilização de frenagem dinâmica). Utilizando assim os trens com máxima utilização de frenagem dinâmica, a energia potencial a ser recuperada vai a 41.106 kWh / dia, equivalente 15.000 MWh/ano.

Fazendo a conversão financeira, a potencial economia chegar a US\$ 1.500.000,00. Entretanto toda esta economia gerada seria para uma eficiência de recuperação de 100%, que é algo irreal, desta forma o estudo adotou uma eficiência de 50%, o que daria valor de US\$ 525.000,00 em um ano de operação deste sistema, nesta operação piloto específica.

Semelhante ao estudo da FRA em 1979, a recuperação de energia na frenagem dinâmica continua inviável economicamente, mas tendo benefícios ambientais, pela redução do consumo de combustível.

Spiryagin *et al* (2015) estudaram *Flywheel Energy Storage System*(FESS), em uma configuração de trem com três locomotivas diesel elétricas puxando a composição, neste caso foi substituída uma locomotiva convencional por uma com o FESS, conforme figura 42.

Figura 42 - Configuração das locomotivas em trem no padrão convencional (a) e com o FESS (b).



Fonte: Spiryagin *et al* (2015)

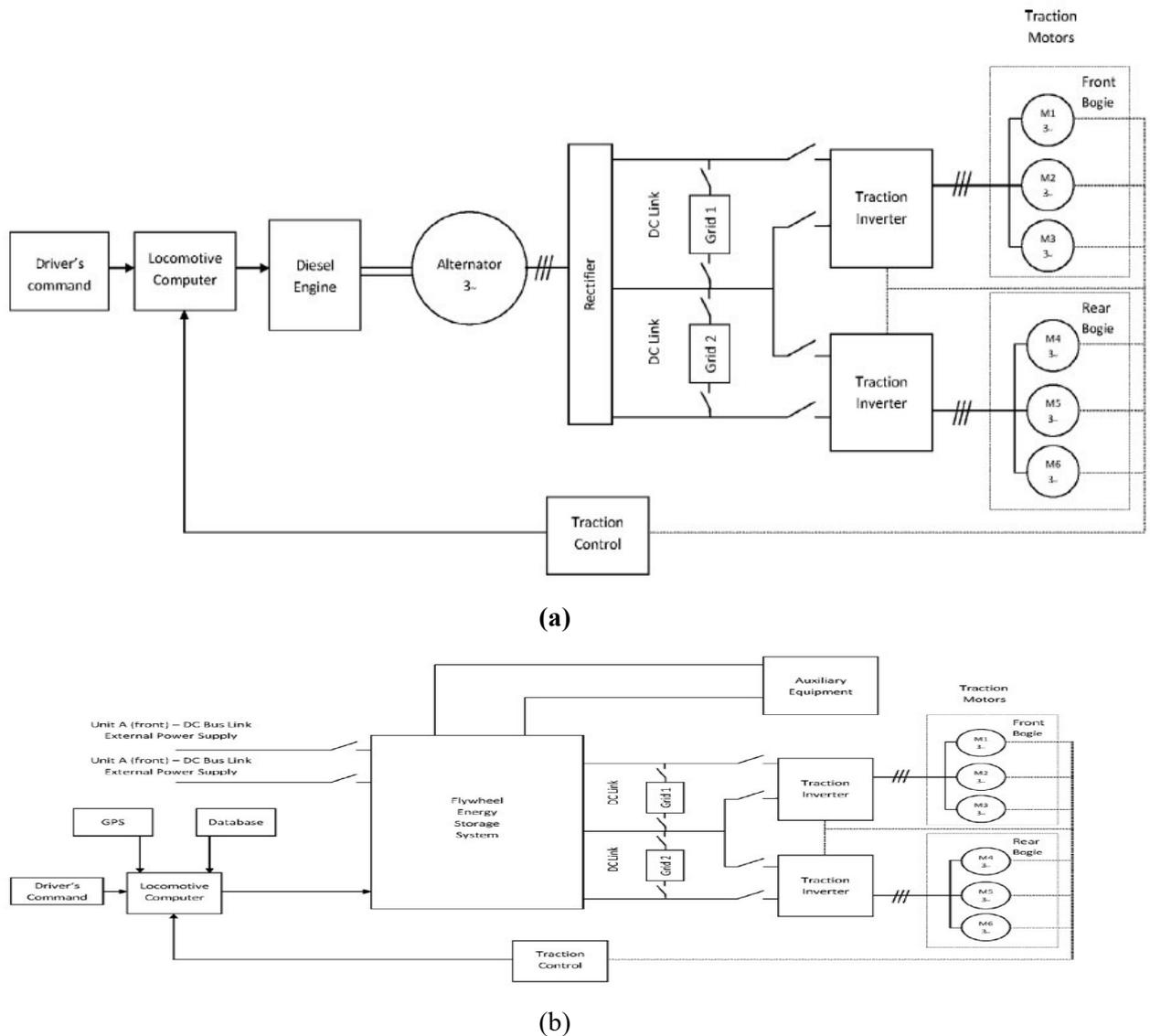
O FESS usa o princípio de armazenamento de energia cinética, gerada a partir de massa rotativa, sendo os limites de energia e potência as principais restrições operacionais.

Os FESS modernos utilizam avançados materiais na estrutura do rotor, como fibra de carbono, kevlar ou fibra de vidro.

Este rotor é colocado em um vaso a vácuo para reduzir *windage loss*. Mancais magnéticos e mecânicos são combinados, sendo que os magnéticos podem utilizar ímãs permanentes.

A figura 43 ilustra esquema elétrico geral de uma locomotiva convencional e com o FESS.

Figura 43- Esquema geral das locomotivas com padrão convencional (a) e com o FESS (b).



Fonte: Fonte: Spiriyagin *et al* (2015)

Spiriyagin *et al* (2015) apresentaram um estudo em ferrovia de transporte de carvão na Inglaterra, entre *Ulan* e *Hunter Valley*, em percurso de 275 km, carga por eixo de 30 toneladas, peso bruto de 120 toneladas por vagão, com trem típico de 92 vagões puxado por três locomotivas diesel - elétricas, em parte do percurso as locomotivas estão operando em frenagem dinâmica, o que possibilita regenerar e armazenar energia, que pode ser usada para rampas onde as três locomotivas são necessárias.

Com as simulações feitas no estudo é possível avançar com a aplicação do FESS em locomotivas de transporte *heavy haul*, porem o tempo de viagem na simulação foi maior quando

comparado ao modelo convencional, o que pode ser reduzido com a continuação do desenvolvimento da tecnologia.

9 UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS PARA OTIMIZAÇÃO DE PERCURSO DOS TRENS

Wang *et al* (2017) apresentam uma abordagem de otimização de velocidades para trens com a finalidade de eficiência energética, onde podem ocorrer atrasos durante o percurso, levando os maquinistas a aumentarem a velocidade para recuperar parte do tempo perdido, esta velocidade adicional e o atraso no tempo de percurso, geram uma perda de eficiência energética, sendo um impacto maior em trechos de linha singela, uma vez que o impacto será amplificado para os demais trens, gerando um problema ainda maior para eficiência energética de toda a ferrovia.

A pesquisa foi concentrada em trens de ferrovias que utilizam um sistema de sinalização de bloco fixo, onde ocorre uma situação de atraso.

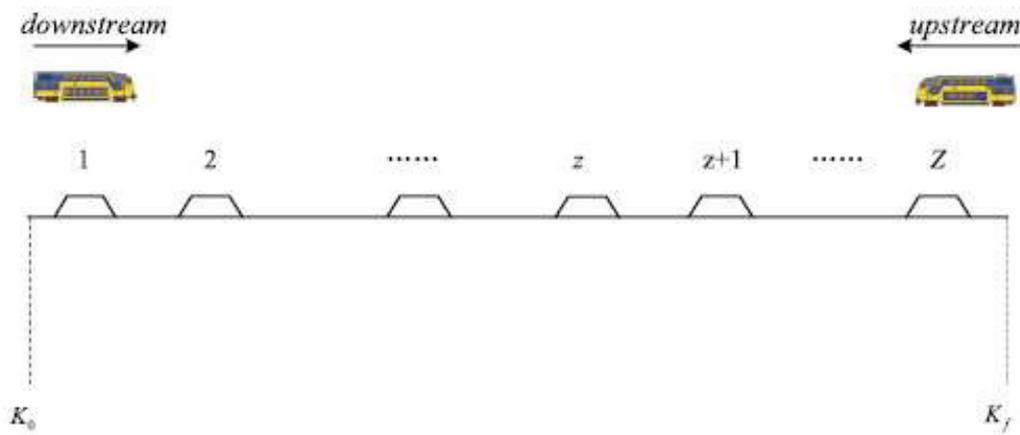
Um simulador multi-trem foi utilizado em conjunto com três métodos de busca: *enhanced brute force*, *ant colony optimization* e *genetic algorithm*.

Em um caso específico com quatro trens, o algoritmo foi capaz de reduzir o consumo de combustível em comparação com uma situação normal de atraso, entretanto, ocorreu longo período para o cálculo das soluções ideias, o que inviabiliza na prática seu uso.

O trabalho então foi conduzido para encontrar *timetable constraint set* (TCS), formulando assim conjuntos de restrições de horários. Na sequência é elaborado modelo *multi-train trajectory optimization* (MTTO), encontrando trajetórias dentro das janelas. O MTTO calcula perfis de velocidade de modo simultâneo entre trens, indicando os melhores locais para cruzamento dos trens, reduzindo assim os tempos de atrasos e melhorando de modo significativo a eficiência energética.

O problema descrito de cruzamento de trens é ilustrado na figura 44, onde existe uma origem e destino (K_0 a K_f), e um conjunto Z pátios de cruzamento. Para descrição matemática, os autores descreveram três eventos que podem ocorrer nos pátios de cruzamento: chegada, partida e passagem.

Figura 44 - Trens circulando em linha singela em sentidos opostos, com pátios de cruzamento entre os mesmos



Fonte: Wang *et al* (2017)

Quando ocorrem atrasos em trens, as TCS devem ser calculadas, as mesmas seguem três princípios:

1. Operacionalidade – As TCS serão alcançadas com o mínimo de tempo de operação, conforme padrão do trecho, e um tempo máximo de parada;
2. Viabilidade – Não podem haver conflitos de trens em cruzamento, desta forma a TCS deve ser viável operacionalmente;
3. Eficiência Energética – As TCS não podem levar a um maior consumo de combustível durante o trajeto.

O cálculo das TCS segue então:

Etapa 1 – Calcular um pacote de tempo operacional para cada trem, de forma separada;

Etapa 2 – Ajuste da TCS para viabilidade;

Etapa 3 – Ajustar TCS para melhorar a eficiência energética.

Um exemplo de janela para trens em via única é apresentado na figura 45, onde:

- Figura 45 (a) – O trem tem condições que chegar mesmo com atrasos, uma vez que os tempos mínimos de execução são menores que os programados (barra vermelha e a barra azul respectivamente).
- Figura 45 (b) – Para este momento do percurso já há aparecimento de possível conflito (etapa viabilidade), a região sobreposta deverá ter um pátio de cruzamento duplo, senão os trens se encontrarão em pátio singelo, levando a parada para cruzamento.

não haveria pátio para cruzamento, levando a atrasos maiores, utilizando o MTTO, os trens atingiram tempos e velocidades ótimas, levando a cruzamentos em pátios que não geraram conflitos, bem como a redução do consumo de energia do trem, quando comparado ao modelo padrão.

10 TECNOLOGIA NA LUBRIFICAÇÃO DOS TRILHOS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A redução dos esforços do trem para vencer a resistência gerada pela interação roda e trilho tende a levar a uma também redução do consumo de diesel.

Uma região dos trilhos onde este esforço é mais severo são as curvas, onde em menores raios das mesmas, ocorre uma resistência física maior ao rolamento no contato roda e trilho.

Wu *et al* (2016) comentam que o gerenciamento da fricção entre as rodas e os trilhos tem contribuição direta para redução do consumo de diesel das locomotivas, bem como para redução do desgaste nos trilhos e rodas.

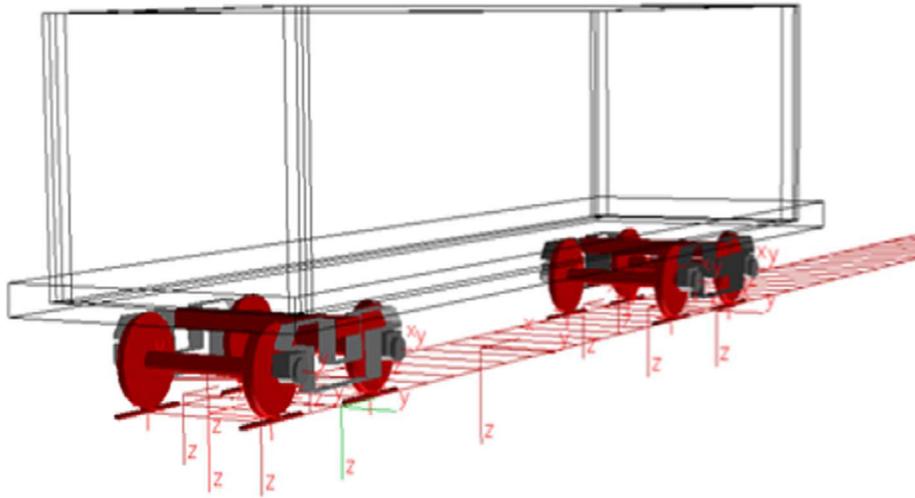
Wu *et al* (2016) construíram um modelo numérico para estimar a economia de combustível com a lubrificação *top of rail* (TOR), em uma ferrovia *heavy haul*.

Este modelo é constituído de:

- Modelo dinâmico multi-corpo
- Modelo de modificador de fricção
- Modelo de economia de energia com base na energia dissipada pela fricção roda e trilho.

A figura 46 mostra o modelo dinâmico da interação do veículo ferroviário com a via.

Figura 46 - Modelo dinâmico multi-corpo veículo sobre a via



Fonte: Wu *et al* (2016)

O modelo de economia de energia foi estudado com diferentes velocidades e também diferentes raios de curva, em uma ferrovia de 25 toneladas por eixo.

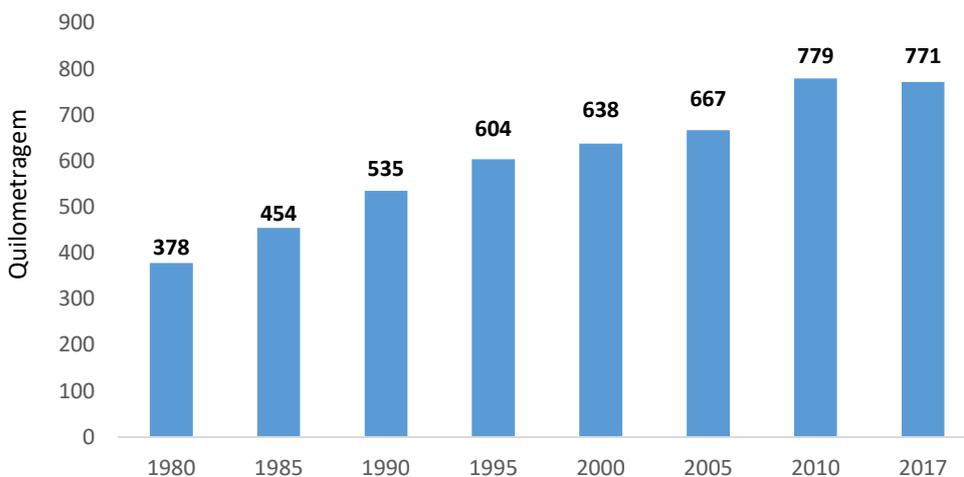
Como resultado, a economia de energia comparando trilhos novos e desgastados, com a aplicação do TOR, é sensivelmente melhor para os desgastados, porém dependente também do tamanho do raio de curva e da velocidade, onde em raios de curva 1000 metros e velocidades mais altas, os trilhos desgastados com a aplicação do TOR tiveram economia menor quando comparados a trilhos novos, em mesmo raio de curva e com aplicação do TOR.

11 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente trabalho foram levantados os dados dos modelos de eficiência energética das cinco maiores ferrovias *heavy haul* do Brasil, e das quatro maiores ferrovias *heavy haul* dos EUA e Canadá, todas utilizando veículos ferroviários padrão AAR, para melhor comparação das práticas de gestão da eficiência energética.

Conforme a AAR (2018), em 1980 as ferrovias dos EUA e Canadá consumiam 3,79 litros de diesel para mover uma tonelada por 378 km em média. Em 2017, estes mesmos 3,79 litros de diesel conseguem gerar transporte de uma tonelada por 770 km, um aumento de 104% em 27 anos de melhoria contínua do indicador de eficiência energética, conforme a figura 62, que é quantidade de quilômetros transportando uma tonelada com 3,79 litros de diesel.

Figura 47- Melhoria da eficiência energéticas das ferrovias EUA e Canadá



Fonte: AAR (2018)

O modelo utilizado pelas ferrovias dos EUA e Canadá teve como principais alavancas:

1. Renovação de frota com milhares de locomotivas mais eficientes, retirando de serviço os modelos de pior performance quanto a eficiência energética;
2. Melhor aproveitamento de carga por vagão e trem, com melhorias no *design* dos vagões, trens mais longos, a tonelada transportada em média por trens aumentou 25% do ano 2000 a 2017.
3. Aplicação de tecnologia com softwares para otimização da circulação, gerando a condução semi autônoma.

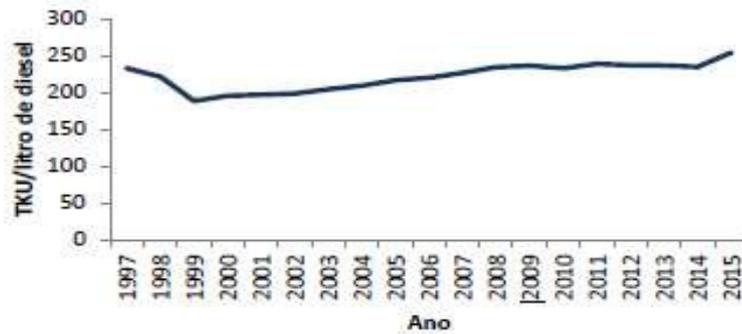
4. Capacitação de maquinistas de forma estruturada, partindo do pressuposto de que qualquer melhoria a ser implementada com sucesso passa por maquinistas bem treinados e com conhecimento necessário.

5. Redução do *Idling*, com implementação da tecnologia *star-stop*.

6. Aplicação de tecnologias para reduzir a resistência ao rolamento dos trens, melhorias aerodinâmicas, detecção avançada do desempenho dos ativos, *big data e analytics*.

A ANTF (2017) apresenta o consolidado das ferrovias do Brasil com o indicador de TKU/Litros, com dados até 2015, conforme figura 48. O resultado de 2015 foi de 253 TKU/Litro, superior ao apresentado pelas ferrovias dos EUA, que foi de 198 TKU/litro.

Figura 48 - Evolução do TKU/Litro das ferrovias *heavy haul* do Brasil



Fonte: *Workshop* Eficiência Energética - ANTF (2017)

Conforme a ANTF (2017), quando ocorre a comparação do impacto do consumo de diesel entre as ferrovias do Brasil e EUA, com base no ano de 2015, as ferrovias dos EUA apresentam 15% de impacto do custo diesel sobre o custo total para manter a operação, para as ferrovias do Brasil, este custo chega a 30% do custo total para manter a operação, conforme a tabela 5.

Para ANTF (2017), a melhoria do desempenho da eficiência está relacionada com a sustentabilidade do negócio, com um impacto de 30% sobre o custo total para manter a operação, as ferrovias do Brasil devem trabalhar com ações e melhores práticas de mercado para reduzir este impacto.

Tabela 5- Comparativo das ferrovias do Brasil e EUA quanto a TKU/l e percentual do custo do diesel sobre o custo total para manter a operação.

País	TKU/L	% Custo do diesel sobre o custo total (%)
EUA	198	13
Brasil	253	30

Fonte: *Workshop* Eficiência Energética, ANTF, 2017

A tabela 06 apresenta a comparação dos volumes transportados pelas ferrovias do Brasil, no ano de 2016 com os respectivos resultados de eficiência energética, utilizando o indicador de L/1.000xTKB, estes resultados foram apresentados no *workshop* de eficiência energética.

Tabela 6 - Comparativo das ferrovias do Brasil quanto a volume transportado (em toneladas útil) e eficiência energética (em L/1000xTKB).

Concessionária	Vollume Transportado 2017 (Milhares de toneladas úteis)	Valor da Eficiência Energética 2016 (L/10 ³ TKB)
Rumo	42.769	4,200
EFC	155.252	1,487
EFVM	12.601	1,682
VLI	30.022	5,180
MRS	141.501	2,485

Fonte: *Workshop* Eficiência Energética, 2017

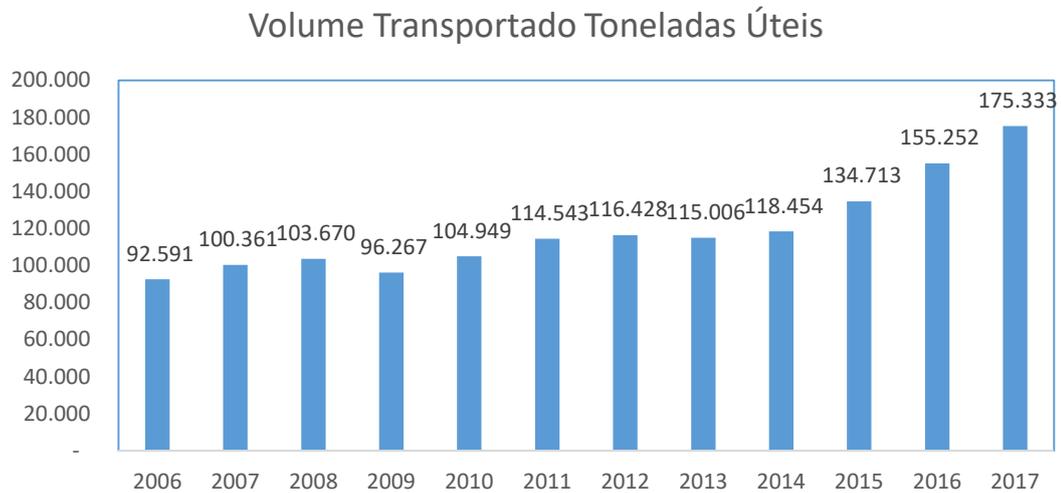
11.1 ESTRADA DE FERRO CARAJÁS

Conforme ANTT (2018) a Estrada de Ferro Carajás (EFC) é de concessão da empresa Vale S.A., com sua área de atuação nos estados do Pará e Maranhão, possuindo bitola 1,6 metros (bitola larga), com extensão total de 978 km. Tem intercâmbio com a Ferrovia Norte Sul (FNS) e a Ferrovia Transnordestina Logística S.A. (TNLSA) (sendo que a EFC interconecta com o Porto de Ponta da Madeira em São Luís, Maranhão).

Conforme Anuário CNT (2018), a EFC possuía frota de 300 locomotivas diesel-elétricas e 18.976 vagões, até o ano de 2017.

A CNT (2018) apresenta conforme figura 49, o volume transportado pela EFC do período de 2006 a 2017, sendo a ferrovia de maior volume transportado no Brasil em 2017.

Figura 49 - Evolução do volume transportado da EFC em milhares de toneladas/ano



Fonte: CNT (2018)

Com base no material apresentado no *workshop* de eficiência energética (2017), segue a análise do modelo de gestão com base na metodologia adotada no presente estudo.

1. Gestão do indicador Eficiência Energética

Indicador é gerido pela sua área de Centro de Controle Operacional (CCO), sendo suportado por uma área de Engenharia Ferroviária para acompanhamento e projeções futuras do indicador.

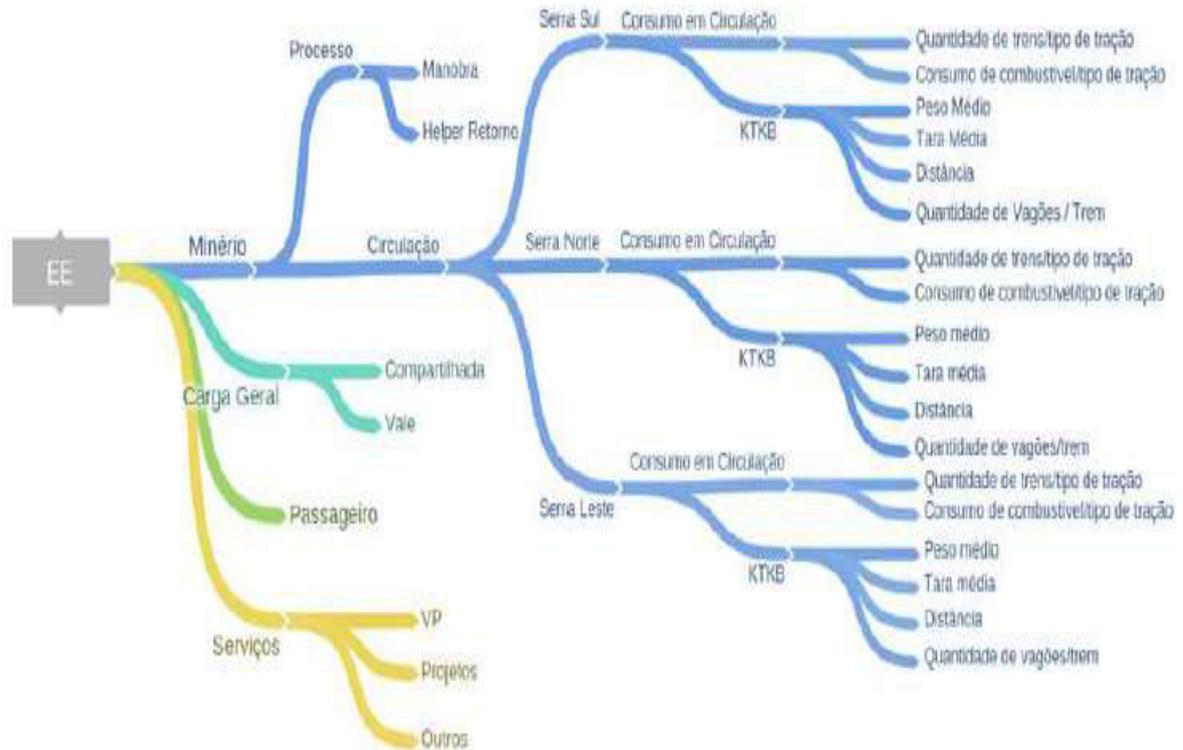
A figura 50 é fluxograma utilizado para gestão do indicador. O consumo de combustível é gerido por um sistema informatizado, com o *input* de diferença do nível do tanque das locomotivas entre dois abastecimentos das mesmas. O TKB é medido de todos os trens que trafegam na via em dado período de tempo. A figura 51 ilustra o modelo completo.

Figura 50 - Fluxo do modelo de gestão da EFC



Fonte: Victor *et al* (2017)

Figura 51- Modelo de gestão da eficiência energética da EFC



Fonte: Victor *et al* (2017)

2. Gestão do modelo operacional;

A EFC implementou prática de análise modelo operacional dos trens, com modificações na composição da quantidade de locomotivas e no tipo, locomotivas tipo corrente alternada (AC) e corrente contínua(DC), para garantir um modelo de trem que reduza consumo de combustível, mantendo o tempo de viagem. Outra análise em curso é quanto a trafegar com o trem vazio com uma das três locomotivas desligadas, reduzindo a potência despendida durante a viagem e como consequência direta, reduzindo o consumo de combustível.

Implementou projeto para aumento do peso médio dos vagões, com modificações nos vagões para aumentar a carga por eixo e automação de silos de carregamento para melhoria na precisão.

3. Implementação de tecnologias e métodos avançados para melhoria da eficiência energética;

- Sistema de Helper Dinâmico - Em determinado ponto da ferrovia, onde há necessidade de helper de duas locomotivas para vencer a cive da linha férrea, este sistema

permite o trem não parar para acoplar estas locomotivas adicionais, permitindo manter parte da energia acumulada no trem.

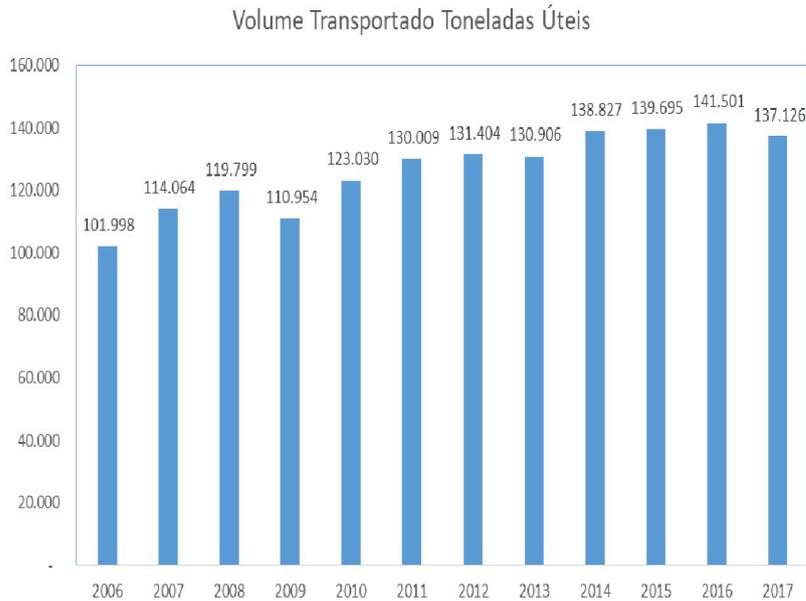
- *Trip Optimizer* – Sistema da GE Transportation sendo implementado na EFC, onde já foram realizados testes com ganhos de até 1.400 litros de combustível por ciclo de viagem.
- Medidor de nível Omnicomm – Sistema para rastrear e monitorar nível do tanque de combustível das locomotivas, utilizando comunicação via GPS e GPRS/WI-FI, melhorias na gestão de litros consumidos das locomotivas.

11.2 MRS LOGÍSTICA AS

Conforme ANTT (2018), a MRS Logística S.A. recebeu a concessão da Malha Sudeste pertencente a Rede Ferroviária Federal S.A., a empresa atua nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, sua bitola na maior parte da malha é de 1,60m, com 1.613 km, e possui trechos com bitola mista 1,00m e 1,60m, com 73 km. Possui pontos de intercâmbio com a EFVM, FCA, Rumo Logística S.A. (Antiga ALL Malha Paulista), e a ferrovia de passageiros SUPERVIA. Tem conexão com os portos de Santos, em São Paulo, e porto de Sepetiba Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Conforme Anuário CNT (2018), a MRS possuía frota de 768 locomotivas diesel - elétricas e 19,949 vagões, até o ano de 2017.

A CNT (2018) apresenta conforme figura 52, o volume transportado pela MRS Logística SA no período de 2006 a 2017.

Figura 52 - Evolução do volume transportado da MRS Logística

Fonte: CNT (2018)

Com base no material apresentado no WS de eficiência energética (2017), segue a análise do modelo de gestão com base na metodologia adotada no presente estudo.

1. Gestão do indicador Eficiência Energética

Na MRS a gestão do indicador de eficiência energética é feita por uma área gerência geral de Engenharia de transporte, desdobrando para uma Coordenação Engenharia de Operações, Coordenação de Eficiência das Operações, com o processo de gestão baseado em:

- Gestão diária do indicador, possuindo meta anual;
- Desenvolvimento de novos processos,
- Metodologia de melhoria continua
- Novas tecnologia e inovação
- Projetos de eliminação de desperdícios
- Acompanhamento de abastecimento e estoque sobre rodas.

2. Gestão do modelo operacional;

A gestão do modelo operacional é focada em padrões bem como operação dos maquinistas, com:

- Medição do desempenho dos maquinistas,
- Aquisição e utilização das informações do LOG das locomotivas (Chamada de “caixa preta”)

- Treinamento dos maquinistas em simulador
- *Feedback* constante a maquinistas quanto a condução
- Análise de *trade off* consumo diesel versus tempo de circulação.
- Revisão das regras de desligamento de locomotivas

3. Implementação de tecnologias e métodos avançados para melhoria da eficiência energética;

A MRS trabalha com os seguintes projetos:

- AESS – *Automatic Enginer Star and Stop*
- Utilização dos Simuladores para treinamento de maquinistas
- SIC – Sistema Informação da Condução
- Implementar o Trip Optimizer - Sistema da GE *Transportation*

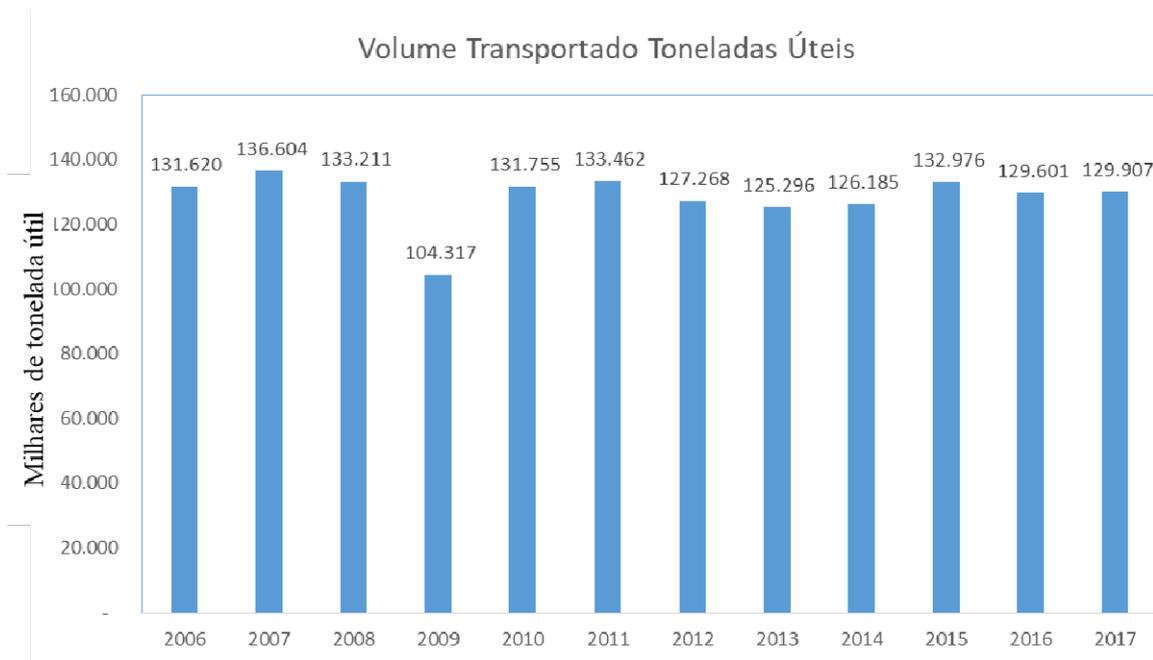
A MRS implementou projeto de supercapacitores, com a finalidade de redução de falhas em baterias de locomotivas. Esta tecnologia tem forte impacto de variação cambial, o que pode inviabilizar projetos futuros.

11.3 ESTRADA DE FERRO VITÓRIA A MINAS

Conforme ANTT (2018) a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), é de concessão da empresa Vale S.A., com sua área de atuação nos estados do Espírito Santos e Minas Gerais, possuindo bitola 1,00 metro (bitola métrica), com extensão total de 895 km. Tem pontos de intercâmbio com a MRS Logística e com a FCA, sendo que a EFVM interconecta com o Porto de Tubarão em Vitória, Espírito Santo.

Conforme Anuário CNT (2017) a EFVM possuía frota de 315 locomotivas diesel - elétricas e 19.031 vagões, até o ano de 2017.

A CNT (2018) apresenta conforme figura 64, o volume transportado pela EFVM no período de 2006 a 2017.

Figura 53- Evolução do volume transportado da EFVM

Fonte: CNT (2018)

Com base no material apresentado no WS de eficiência energética (2017), segue a análise do modelo de gestão com base na metodologia adotada no presente estudo.

1. Gestão do indicador Eficiência Energética

A gestão do indicador da EFVM segue três premissas básicas:

- Apuração dos litros consumidos de duas formas: Abastecido e consumido nas locomotivas, sendo que a primeira forma é utilizada para apuração oficial do indicador e a segunda para fins de estratificação e análise.
- Estratificação do indicador por tipo de composição (Minério, carga geral, serviço e passageiro)
- Apuração diária do indicador de eficiência energética e de outros que geram impacto direto.

2. Gestão do modelo operacional;

Na gestão do modelo operacional, a EFVM trabalha com foco nos seguintes parâmetros:

- Regularidade – Chegada e partida dos trens dos terminais de forma regular, reduzindo as paradas durante a circulação para ajustes da malha, e como consequência melhorando o indicador de eficiência energética;

- Confiabilidade de ativos – Lubrificação dos trilhos e instalação de PAD (componente que melhora a circulação dos vagões) em vagões da frota de minério, reduzindo o atrito
- Capacitação de Maquinistas – Criação de módulo exclusivo para eficiência energética. Além dos maquinistas, os controladores do tráfego e dos pátios também foram incluídos. Feita também capacitações especificadas na utilização dos pontos de aceleração e na parada dos trens.
- Estudo de Paradas do Trem – análise de definição dos melhores pontos de parada para troca de equipe, analisando sob a ótica da melhor eficiência energética, com ganhos estimados em 100.000 litros por mês.
- Procedimentos de Condução.

3. Implementação de tecnologias e métodos avançados para melhoria da eficiência energética;

A EFVM indicou os projetos em andamentos e futuros:

- AVF – Analisador de Viagem Ferroviária, tem por objetivo analisar de forma automática o registrador de eventos de cada trem, com estes dados é possível melhoria contínua da condução dos maquinistas
- Medidor de nível Omnicomm – Sistema para rastrear e monitorar nível do tanque de combustível das locomotivas, utilizando comunicação via GPS e GPRS/WI-FI, melhorias na gestão de litros consumidos das locomotivas.
- LEADER – sistema da NYAB para operação semi - autônoma
- AESS – *Automatic Engine Start Stop*

Redução de rotação do motor diesel em locomotivas GE DASH 9 – reduzir rotação do motor diesel quando a locomotiva estiver em ponto 8, porém sem reduzir a potência final.

11.4 VALOR DA LOGÍSTICA INTEGRADA

Conforme site da empresa Valor Logística Integrada (VLI), a mesma é uma empresa que fornece soluções intermodal, integrando portos, ferrovias e terminais. A companhia possui duas ferrovias, a Ferrovia Centro- Atlântica (FCA), e a Ferrovia Norte SUL (FNS).

Conforme ANTT (2018) a FCA possui a concessão da Malha Centro-Leste que pertenciam a Rede Ferroviária Federal S.A., possuindo extensões de via de 7.089 km com bitola 1,00m, 3 km de bitola 1,60m e 131 km de bitola mista, 1,00m e 1,60m, totalizando extensão de

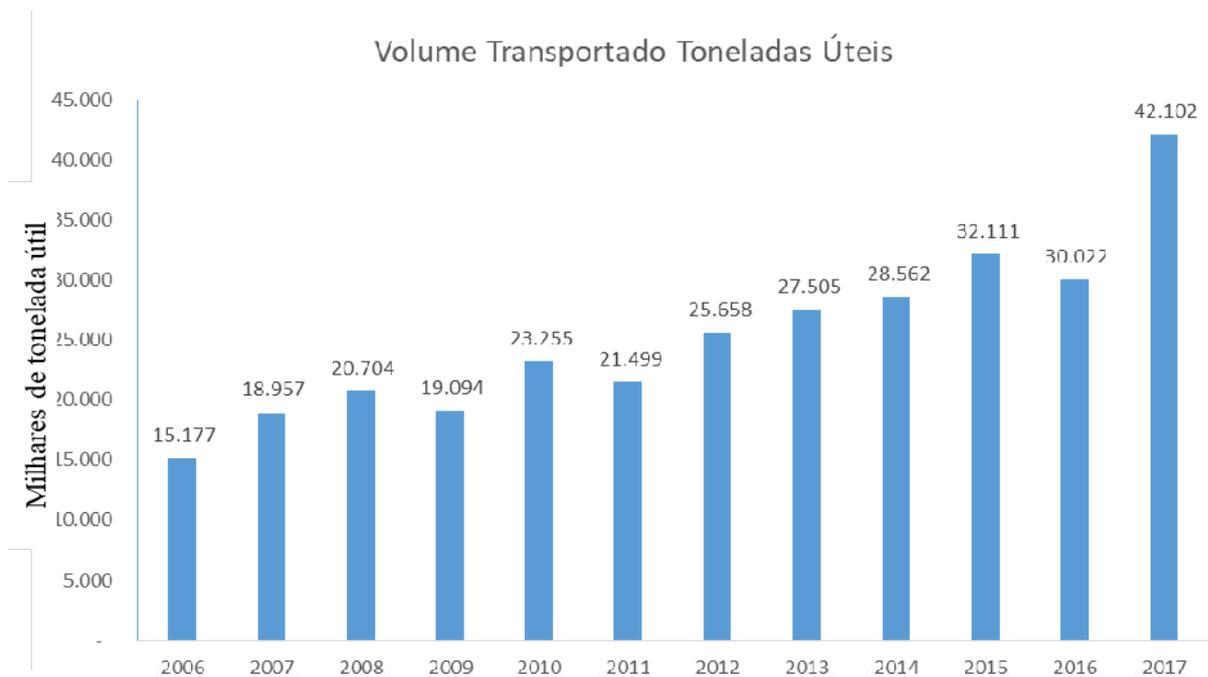
7.223km. A FCA possui pontos de intercâmbio com a EFVM, MRS Logística, RUMO Logística (Malha Paulista da antiga empresa ALL), Transnordestina Logística e, pontos de interconexão com portos em Angra dos Reis, no Rio de Janeiro, Aracaju em Sergipe, e Aratu e Salvador na Bahia.

Conforme ANTT (2018) a FNS tem extensão atual de 745 km, com bitola de 1,60m e ponto de intercâmbio com a EFC, atuando nos estados do Tocantins, Goiás e Maranhão, e ponto de interconexão portuária em São Luís, Maranhão, com o Porto do Itaqui.

Conforme Anuário CNT (2018), a FCA e a FNS possuíam frota de 614 locomotivas diesel - elétricas e 19.719 vagões, até o ano de 2017.

A CNT (2018) apresenta conforme figura 54, o volume transportado pela VLI (Somatório das cargas das ferrovias FCA e FNS) no período de 2006 a 2017.

Figura 54 - Evolução do volume transportado VLI



Fonte: CNT (2018)

Com base no material apresentado no WS de eficiência energética (2017), segue a análise do modelo de gestão com base na metodologia adotada no presente estudo.

1. Gestão do indicador Eficiência Energética

Em sua estruturação geral, a VLI possui áreas específicas denominadas de Eficiência Energética de Curto Prazo e Eficiência Energética de Médio e Longo Prazo, com escopos conforme abaixo:

- Curto Prazo: Analisa os indicadores para atuação imediata para melhoria da eficiência energética, gestão junto as áreas de interface, apura o indicador.
- Médio e Longo Prazo: Implementa novas ferramentas de gestão e melhoria, estudo de novas tecnologias, projeta consumo e faz interface com outras ferrovias.

A VLI utiliza sistema informatizado para gestão do indicador, gerando quantidade consumida a partir do volume de abastecimento, somado ao nível final do tanque das locomotivas no último abastecimento, sendo subtraído o nível atual de cada tanque.

É também utilizada um rateio entre as diversas áreas operacionais da VLI, utilizando as seguintes premissas:

- Resistência ao movimento do trem
- Tonelada bruta que está sendo tracionada
- Distância entre os pontos da operação.

Como processo de gestão do indicador, há envio diário do indicador de eficiência energética e demais indicadores correlacionados para todas as áreas operacionais, reunião semanal entre as áreas operacionais e a engenharia.

No médio e longo prazo, a VLI faz anualmente *workshop* de eficiência energética com as áreas de interface, e a estimativa do indicador é feita com base em histórico, impacto de novos projetos e modelos operacionais e planejamento de volumes.

2. Gestão do modelo operacional

Na gestão do modelo, a VLI implementou:

- Simulador de alocação de locomotivas com base em Eficiência Energética – Buscar otimizar o consumo de combustível;
- Estratégia de abastecimento – Gestão conforme autonomia versus valor litro em cada ponto de abastecimento.
- Gestão Operacional de Performance – Gestão das viagens de cada trem para otimizar a performance da eficiência energética.
- Renovação frota – Entrada de locomotivas mais eficientes.

3. Implementação de tecnologias e métodos avançados para melhoria da eficiência energética

- A VLI trabalha com o sistema AESS, desde janeiro de 2017, com expectativa de ganhos acima de 10.000 litros por locomotiva por ano.

- Sistema A2VF para abastecimento de locomotivas, com objetivo de bloquear ações de furto, mitigar transbordos no abastecimento, menor tempo de abastecimento, maior rastreabilidade dos abastecimentos.
 - Truques de alta performance em vagões para reduzir o atrito, com conseqüente redução das resistências ao trem, melhorando a eficiência energética.
 - Gestão total de atrito com instalação de lubrificadores de trilhos automáticos, reduzindo a resistência ao rolamento.
 - Projeto de assistente de condução, com as duas tecnologias de condução semiautônoma líderes de mercado, o sistema LEADER da NYAB e o *Trip Optimizer* da GE.
- A VLI indica outros futuros projetos: Desenvolver vagões de maior capacidade de carga, otimização de trens, formas alternativas de energia.

11.5 RUMO

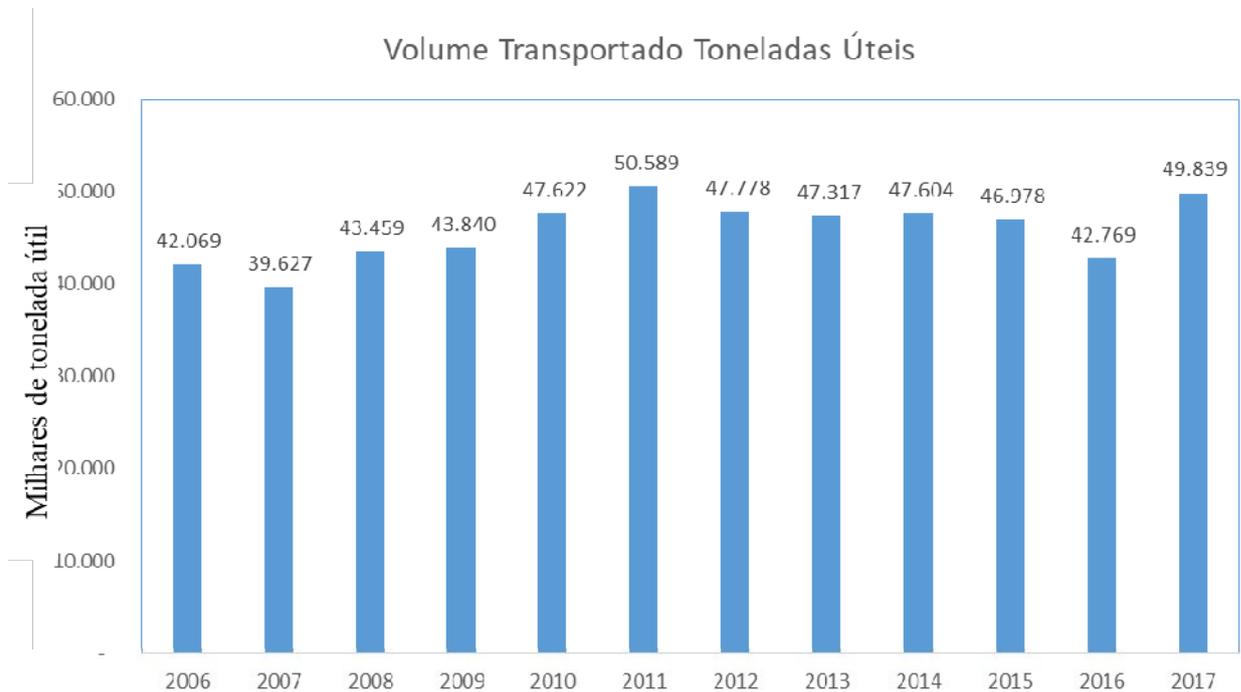
Conforme site da empresa RUMO Logística S.A. (2018), a RUMO é a maior operadora ferroviária do Brasil, com serviços ferroviários, silos de estocagem e processo de elevação em Portos. A empresa surgiu da fusão da RUMO Logística (Grupo Cosan) e a empresa América Latina Logística (ALL).

Conforme ANTT (2018), a empresa RUMO Logística S.A possui a concessão Rumo Malha Norte S.A., Rumo Malha Sul S.A., Rumo Malha Oeste S.A. e Rumo Malha Paulista S.A. Centro-Leste que pertencia a outras ferrovias, possuindo extensões de via de 16.479 km com bitolas de 1,6m e 1,00m.

O RUMO tem abrangência nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso.

Conforme Anuário CNT (2018), a RUMO possui frota de 1.218 locomotivas diesel - elétricas e 21.478 vagões, até o ano de 2017.

A CNT (2018) apresenta na figura 55, o volume transportado pela RUMO no período de 2006 a 2017.

Figura 55- Evolução do volume transportado RUMO

Fonte: CNT (2018)

1. Gestão do indicador Eficiência Energética

O processo de gestão da eficiência energética da RUMO é baseado nos seguintes pilares:

- Desenho de Trens – Gestão do mix de formação dos trens
- Lotação – Aderência a capacidade máxima dos vagões
- Condução – Aderência a VMA da ferrovia a ao padrão de condução
- Ativos – Gestão da frota, gestão frota versus volumes de transporte
- Projetos de Longo Prazo – Planejamento e Tecnologia para melhoria da eficiência energética.

energética.

Diariamente o indicador de eficiência energética é divulgado para todas as áreas, existe um comitê mensal de gestão da eficiência energética com a participação das áreas envolvidas.

2. Gestão do modelo operacional

Devido à forte atuação da RUMO com o transporte de produtos agrícolas (RUMO,2018), a mesma possui ações para o período de entre safra com objetivo de reduzir consumo de combustível:

- Desligamento de Locomotivas – Com ganhos na ordem de 12% do indicador de eficiência energética, quando comparado ao período de safra.

- Estocagem de ativos – Com ganhos na ordem de 9% do indicador de eficiência energética, quando comparado ao período de safra.
- Isolar locomotivas - Com ganhos na ordem de 5% do indicador de eficiência energética, quando comparado ao período de safra.
- Trens com Tração Distribuída (LOCOTROL Assíncrono) - Com ganhos na ordem de 4% do indicador de eficiência energética, quando comparado ao período de safra.

3. Implementação de tecnologias e métodos avançados para melhoria da eficiência energética

A RUMO listou os projetos de tecnologia e métodos avançados para curto, médio e longo prazo:

- Faróis de LED para locomotivas – redução direta no consumo de energia em comparação com as lâmpadas convencionais, redução do tempo médio entre reparos com as lâmpadas convencionais queimadas.
- Projeto Aderência de Velocidade Ideal – Ferramenta para gestão das viagens dos trens para atingir velocidade ideal e reduzir consumo. A ferramenta faz gestão da condução do maquinista, de forma individualizada, faz análise estatística dos mesmos, com *output* de relatórios de desempenho.
 - AESS – *Automatic Engine Start Stop*
 - Sistema *Trip Optimizer* (Projeto Futuro)
 - Dispositivo de corte automático – Ganhos de 19 minutos na separação das locomotivas do restante da composição, principalmente em manobras de *helper*, o que gera economia em não ter a necessidade de parada do trem para efetuar o corte manual.

11.6 NORFOLK SOUTHERN RAILWAY

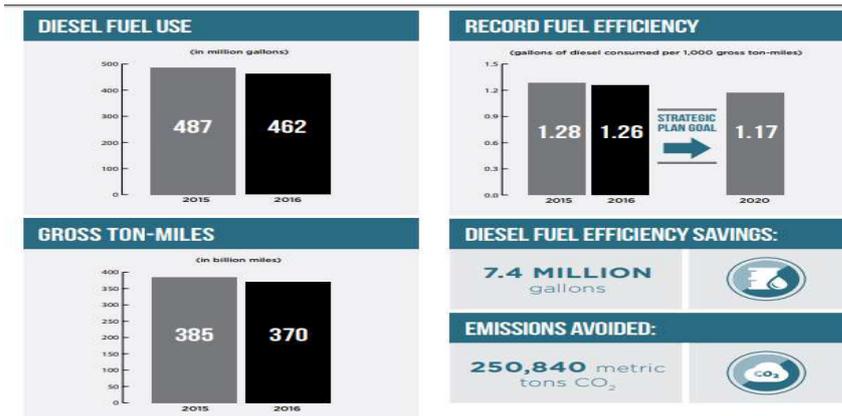
A *Norfolk Southern Corporation* (NS) é uma das principais empresas de transporte intermodal dos EUA. Sua ferrovia opera uma malha de mais de 31.000 quilômetros, em mais de 22 estados americanos, com conexão com outras ferrovias.

Possui 4.155 locomotivas (frota própria e *leasing*), bem como 62.706 vagões (frota própria e *leasing*).

A NS (2018) apresentou relatório de recorde de eficiência energética no ano de 2016, chegando ao número de 1,26 *gallons of diesel consumed per 1.000 gross ton-miles* (indicador difere das ferrovias brasileira nas unidades de medidas), conforme figura 56, com expressiva quantidade de litros economizados de diesel, reforçando também a redução nas emissões de CO_2 .

A NS tem uma estratégia definida para redução do consumo de óleo diesel em suas operações, com objetivo de redução de consumo, redução de emissões ao meio ambiente e como consequência, redução dos custos. Esta estratégia se sustenta em melhoras práticas operacionais, tecnologias avançadas e modernização de locomotivas.

Figura 56 - Performance de Eficiência Energética da Norfolk Southern Railway



Fonte: Norfolk Southern Railway (2018)

A NS (2018) indicou suas ações-chave para melhorias da eficiência energética:

- Sistemas de condição semi autônoma – a NS utiliza o sistema LEADER para auxiliar a condução dos trens com finalidade de otimizar a circulação, conforme **figura 57**, o sistema teve testes iniciados em 2009, sendo já instalados nas locomotivas a partir de 2010. A NS adicionou, a partir de 2016, o sistema *Trip Optimizer*, sendo que em 2017, 72% de sua frota possui ou sistema LEADER ou sistema *Trip Optimizer*.

- *Horsepower per Ton (HPT)*–Os maquinistas utilizam a ferramenta, mais conhecida como HPT, continuamente, para cada viagem planejada, a ferramenta informa ao maquinista o máximo de HP a ser utilizado, com base nas informações de tipo de composição, tonelagem e segmento de via férrea, a ferramenta é um procedimento para os maquinistas, e foi desenvolvido a partir de 2016.

- Modernização da Frota de Locomotivas – A NS utilizou um programa do governo EUA para modernização de locomotivas com a finalidade de redução de emissões, também utilizada prática de conversão de locomotivas com motores de tração DC em AC, aumentando a potência das locomotivas e reduzindo a quantidade por trem.

Figura 57- Sistema LEADER em locomotiva da Norfolk Southern Railway

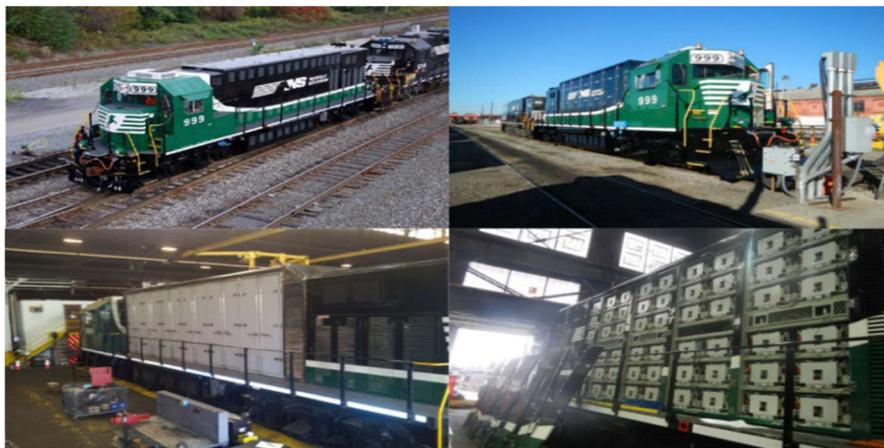


Fonte: Norfolk Southern Railway (2018)

A NS também iniciou desenvolvimento de locomotivas híbridas, com um *energy storage system* (ESS), o objetivo era de desenvolver uma locomotiva híbrida com baixas emissões atmosféricas e ganhos em eficiência energética na ordem de 8% a 15%. A figura 58 ilustra o protótipo denominado NS 999.

Com base em experimentos e testes realizados de 2008 a 2017, a NS concluiu em relatório emitido que somente tecnologia avançada de baterias de íons de lítio seriam capazes de prover a comutação e manter a performance, mas isto leva a cada unidade ultrapassar US \$ 1.000.000,00, o que torna inviável, por hora, esta implementação.

Figura 58 - NS 999 locomotiva híbrida protótipo.



Fonte: NS, (2017)

11.7 UNION PACIFIC

A *Union Pacific Railroad* (UP) faz parte da *Union Pacific Corporation*, com malha ferroviária de 51.000 quilômetros, passando por 23 estados dos EUA, sendo das mais importantes malhas logísticas do país, com frota de 8.600 locomotivas.

A eficiência energética de suas operações tem ênfase tanto quanto aos aspectos ambientais quanto aos econômicos, uma vez que o consumo de diesel responde por 14% do custo operacional da UP.

A UP chegou a melhor valor de eficiência energética de sua história, com melhoria de 1,7% de 2016 para 2017, sendo desde o ano de 2000, a empresa economizou aproximadamente 11,36 bilhões de litros com seu programa de eficiência energética.

Sua estratégia é baseada conforme abaixo:

- Trabalho de redução em conjunto com os clientes – Avaliando junto a clientes a migração do modal rodoviário para o ferroviário, aumento o volume transportado e como consequência melhorando a eficiência energética dos trens.
- Renovação de sua frota de locomotivas – Desde o ano 2000, a UP já fez o processo de parar mais de 3.200 locomotivas menos eficientes, adquirindo mais de 4.600 novas locomotivas no mesmo período, mais eficientes, para renovação e aumento de frota. A UP também fez revisão de mais de 6.700 motores diesel, com *upgrades* para motores mais eficientes, com menores emissões.
- Sistemas de condução semi autônoma – A UP utiliza os sistemas *Trip Optimizer* e *LEADER*, com aproximadamente 1.300 locomotivas com os sistemas ativos, com aproximadamente 38 milhões de quilômetros percorridos em viagens.
- Melhoria de Processo – Melhorias no processo de teste de potência de locomotivas produziu redução de mais de 13,25 milhões de litros de diesel.
- *ArroWedge* – Sistema desenvolvido e patenteado pela UP, o dispositivo é utilizado em trens que transportam contêineres em pilha dupla (um contêiner sobre o outro em cada vagão), sendo colocado sobre o primeiro após a locomotiva, a conicidade de seu corpo permite que ar flua de forma mais fácil, reduzindo o arrasto aerodinâmico, como consequência, reduzindo as resistências ao movimento do trem, conforme figura 66 que apresenta o protótipo do dispositivo. Cada *ArroWedge* leva a uma redução de 530 litros por viagem (ida e volta). O projeto original foi concebido para contêineres de 48 ft, sendo revisado para 52ft, levando a

aumento de 20% da economia do projeto anterior. A UP continua estudando este desenvolvimento em túneis de vento para buscar uma maior redução do consumo dos trens.

- Gestão de Locomotivas de baixa potência – UP retirou de circulação aproximadamente 500 locomotivas de baixa potência, entre os anos de 2016 e 2017, a frota restante de baixa potência é gerida com planos de manutenção preventiva específica, de acordo com condição de cada locomotiva, para garantia eficiência durante a operação.

Figura 59 - Dispositivo ArroWedge da UP



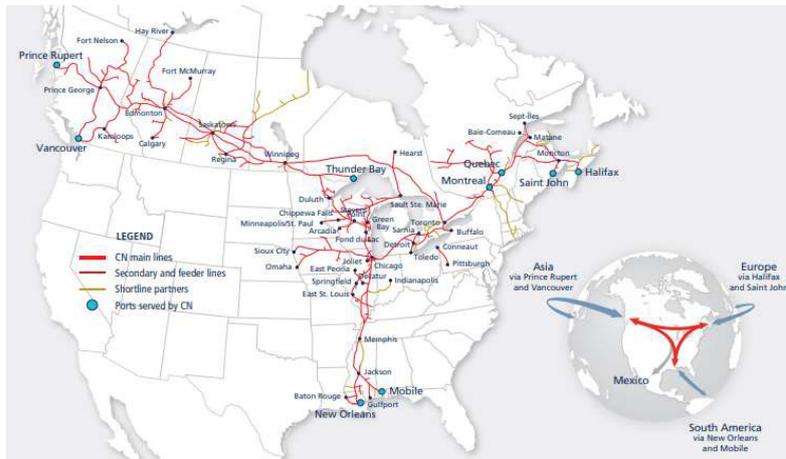
Fonte: UP 2017 Building America Report (2018)

11.8 CANADIAN NATIONAL

A *Canadian National*(CN) é uma das principais empresas de transporte dos EUA e Canada, com 31.500 quilômetros de via férrea, conexão em portos de três costas do continente, a figura 60 ilustra a atuação da CN.

A CN é a ferrovia mais eficiente dos EUA, conforme a *U.S. Federal Railroad Administration* (2018), consumindo 15% abaixo da média do setor, atuando com bastante inovação a frente das demais ferrovias. De 1996 a 2016, a CN melhorou aproximadamente em 40% a eficiência energética de seus trens de carga.

Figura 60 - Canadian National nos EUA e Canadá



Fonte: Sustainability Report (2018)

A estratégia da CN é conforme abaixo:

Práticas de conservação de energia – As equipes de viagens dos trens e os controladores de tráfego recebem treinamentos permanentes com a finalidade de reduzir consumo de combustível, com escopo de monitoramento e desligamento de locomotivas em pátios, manobra de vagões em pátios de forma otimizada, melhores rotas para os trens para conservação energética. Somente em 2016 esta prática reduziu em 14% a operação de locomotivas em *Idle*.

Melhoria da Eficiência Energética utilizando o *Analytics e Gestão Big Data* - A CN tem três pilares na aplicação destas tecnologias:

- *Trip Optimizer* – O sistema foi operacionalizado em 2016 na ferrovia, com 490 locomotivas GE EVO, conforme mencionado no presente trabalho, o sistema leva a uma operação semi-autônoma dos trens, com redução no consumo de combustível
- Sistema de telemetria – Sistema de coleta de dados do trem por telemetria para otimizar o percurso e reduzir consumo. Com base nestes dados, outras tecnologias são usadas para redução consumo.
- *Horsepower Tonnage Analyzer (HPTA)* – Ferramenta criada pela própria CN, que utiliza os dados do sistema de telemetria, gerando instruções para os maquinistas e monitoramento em tempo real dos trens, sempre buscando otimizar a relação potência versus tonelagem do trem
- Potência Distribuída – Permite o controle de mais locomotivas no trem, de forma autônoma, garantindo melhor controle do trem e como consequência, melhoria da eficiência

energética. Em 2016 foram incluídas noventa locomotivas AC com potência distribuídas, levando a 770 locomotivas com o sistema instalado.

A CN busca garantir, por meio de treinamentos, que os maquinistas possam utilizar ao máximo as tecnologias para redução do consumo de combustível.

De 2008 a 2016, a CN conseguiu melhoria de 19% na eficiência energética de seus trens.

11.9 BNSF

A BNSF Railway é uma ferrovia que tem abrangência por 28 estados dos EUA e três provinciais do Canadá, totalizando 53.300 quilômetros de linhas férreas, com frota de 8.000 locomotivas. A figura 61 ilustra a malha ferroviária da BNSF.

Figura 61- BNSF Railway nos EUA e Canadá



Fonte: BNSF Railway (2018)

Para a BNSF Railway (2017) há alguns fatores de impacto mais relevante na eficiência energética dos trens, indicando:

- Idade da frota
- Maior fluidez dos trens na malha
- Soluções tecnológicas
- Mix de negócios
- Práticas de Operação e Manutenção

Utilizando estes fatores com base da gestão de eficiência energética a BNSF Railway gerou, na última década, melhoria de 10% na eficiência energética,

Atualmente mais de 90% das locomotivas da BNSF *Railway* utilizam tecnologia para controle de locomotivas em *idle*, efetuando o desligamento automático de locomotivas que não estão sendo utilizadas.

Uma das filosofias da BNSF *Railway*, é de reparação dos vagões e locomotivas com alta padrão de desempenho para que os mesmos possam contribuir de forma positiva para o indicador de eficiência energética.

- Para as práticas de operação, os maquinistas recebem treinamento para:
- Desligar locomotivas em *idling*
- Remover ou isolar locomotivas não necessárias para tracionar o trem
- Cumprir as indicações de aceleração e frenagem do software de gerenciamento energético nas locomotivas.

A BNSF *Railway* implantou um programa para monitoramento e melhoria da condução dos maquinistas, com objetivo claro de redução do consumo de diesel, chamado de *Fuel MVP*, consiste em um sistema *wireless* para *download* dos dados de condução em cada trem (velocidade, tempo, distância, uso de freio dinâmico e independente), mensalmente é feito um consolidado de todos os maquinistas, listando os melhores para referência e comparação com os demais. Os maquinistas posicionados entre os 10% melhores recebem um cartão de combustível de US \$ 100,00 para uso pessoal, os próximos 10% melhores maquinistas recebem um cartão de US \$ 50,00.

12 FATORES QUE IMPACTAM NO INDICADOR

De acordo a revisão da bibliografia e os modelos de eficiência energética analisados no presente trabalho, foi elaborado um *check list* para medir o percentual de atendimento das ferrovias analisadas em cada fator crítico.

Este percentual foi calculado a partir das informações disponíveis no modelo de cada ferrovia analisada, não avaliando de forma quantitativa, não avaliando o grau de gestão de cada ferrovia para o impacto.

Abaixo segue a descrição resumida para cada impacto levantado:

1. Sistema de medição de consumo de combustível confiável – Para gestão do indicador de eficiência energética é necessário o uso de um confiável sistema de medição de consumo, o que poderia ter uma conotação de simples, se torna complexo na medida que as

locomotivas possuem tanques de até 18.000 litros, e com suprimento para um motor acoplado a um gerador.

2. Gestão do mix das composições que trafegam na ferrovia – Este fator pode não possuir impacto relevante para ferrovias com baixo mix de trens (ferrovia voltada apenas para o transporte de *commodities* por exemplo), que é o dimensionamento de trens em função dos tipos de cargas que os mesmos transportam, mas em ferrovias com várias cargas e destinos tem relevância e impacto a ser considerado no indicador.

3. Gestão de paradas programadas dos trens – Conforme já comentado no presente trabalho, a energia acumulada pelo trem durante a circulação não pode ser perdida por paradas que não tenham como diretriz eficiência energética.

4. Aproveitamento da capacidade máxima de carga dos vagões – Dimensionar as locomotivas para transportar uma dada carga nos vagões, e não utilizar a capacidade máxima, e perda de energia durante a circulação. O peso médio dos vagões deve possuir gestão.

5. Gestão da condução dos maquinistas – A condução dos maquinistas possui relação direta com a eficiência energética do trem, uma vez que o consumo está ligado ao processo de tração do trem (arrancadas, circulação, manobras e paradas).

6. Gestão de locomotivas em *idle* – Locomotivas aguardando circulação em pátios de cruzamento, aguardando manutenção na via, ou mesmo em pátios de oficina em modo *idle* (espera), geram consumo de combustível e necessitam ser desligadas para posterior religamento e utilização.

7. Gestão da idade da frota e renovação tecnológica de locomotivas – A análise do ciclo de vida das locomotivas deve fazer parte da gestão da ferrovia, com viés não apenas de redução de custos de manutenção, mas também quanto à eficiência energética. Nesta análise é levado em conta também os avanços de tecnologia.

8. Gestão do estado de manutenção da frota de locomotivas e vagões sob a ótica da eficiência energética – Para sustentar o resultado de eficiência energética, os ativos devem também estar em estado aceitável de manutenção a ponto de não interferir na eficiência energética do trem.

9. Redução de resistência ao rolamento do trem – As resistências ao deslocamento do trem devem ser estudadas e aplicadas soluções para redução das mesmas.

10. Redução de paradas não programadas dos trens – Semelhante às paradas programadas do trem, as paradas não programadas devem ser evitadas, em função de serem mais impactantes, uma vez que podem ser geradas em regiões que levarão o trem a um maior consumo de combustível para arrancada.

11. Gestão da relação HP versus tonelada bruta dos trens – A relação da potência das locomotivas com relação a carga transportada é essencial para gestão da eficiência energética, sem o correto dimensionamento, pode haver uma elevação do consumo.

12. Programas de incentivo aos maquinistas de melhor condução quanto à eficiência – Os maquinistas recebem seu salário para condução dentro dos padrões das empresas, porem programas de inventivo para conduções mais eficientes visam a motivas os maquinistas a melhoria continua a cada dia.

A tabela 07 apresenta estes resultados, relacionando os fatores críticos que impactam no indicador de eficiência energética com o percentual das ferrovias que fazem gestão do mesmo em seus modelos.

Tabela 7- Fatores que impactam no indicador de eficiência energética

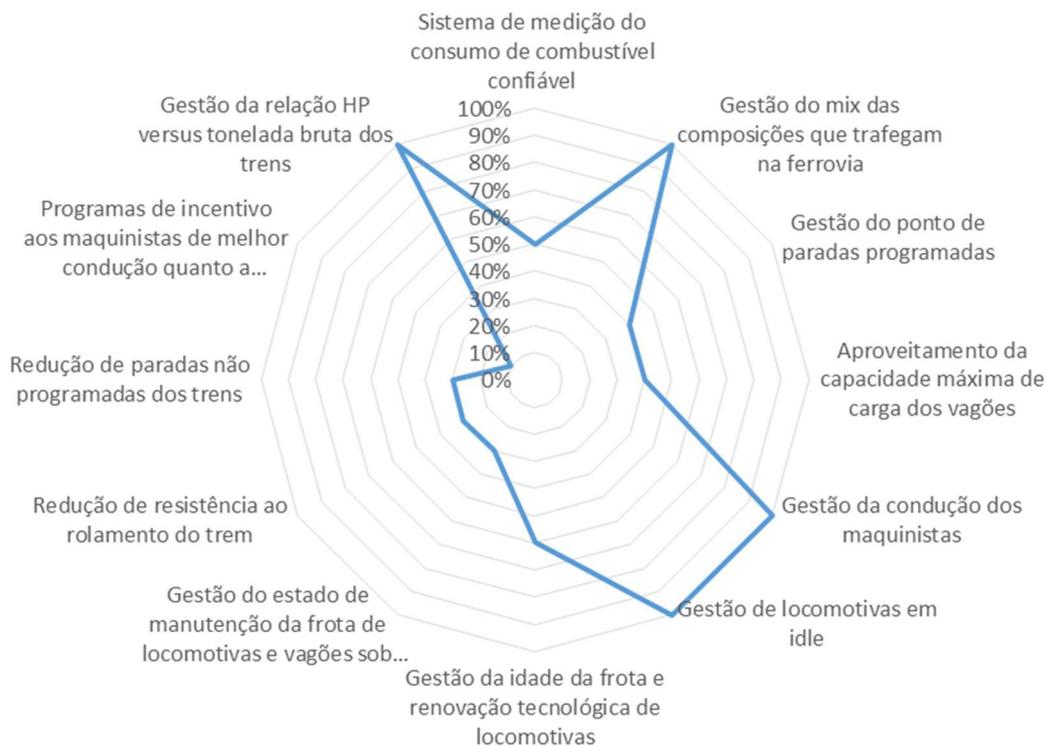
ID	Fatores que impactam no indicador	Percentual de Ferrovias possuem gestão do fator
1	Sistema de medição do consumo de combustível confiável	50%
2	Gestão do mix das composições que trafegam na ferrovia	100%
3	Gestão das paradas programadas dos trens	40%
4	Aproveitamento da capacidade máxima de carga dos vagões	40%
5	Gestão da condução dos maquinistas	100%
6	Gestão de locomotivas em <i>idle</i>	100%
7	Gestão da idade da frota e renovação tecnológica de locomotivas	60%
8	Gestão do estado de manutenção da frota de locomotivas e vagões sob a ótica da eficiência energética	30%
9	Redução de resistência ao rolamento do trem	30%
10	Redução de paradas não programadas dos trens	30%

11	Programas de incentivo aos maquinistas de melhor condução quanto a eficiência	10%
12	Gestão da relação HP versus tonelada bruta dos trens	100%

Fonte: Autor (2018)

A figura 62 ilustra os dados da tabela 07, dos doze fatores listados, apenas quatro são seguidos por todas as locomotivas pesquisadas.

Figura 62- Mapa de aderência das ferrovias a fatores que impactam o indicador de eficiência energética



Fonte: Autor (2018)

As ferrovias dos EUA e Canadá não enfatizaram o fator indicado pelas ferrovias do Brasil, que é o sistema de medição do consumo de combustível, não havendo informações disponíveis se o mesmo é um problema relevante para a gestão da eficiência energética nas mesmas.

Os fatores analisados por todas as ferrovias seguem abaixo:

1. Gestão do mix das composições que trafegam na ferrovia

2. Gestão da condução dos maquinistas
3. Gestão de locomotivas em idle
4. Gestão da relação HP versus tonelada bruta dos trens

Estes quatro fatores, comuns na gestão de todas as ferrovias analisadas, configuram-se como relacionados diretamente ao indicador de eficiência energética, que faz relação com a quantidade de diesel consumida (em Litros ou Galões), com a tonelagem total bruta (em toneladas), e do trem pelo percurso percorrido (em Km ou Milhas).

No presente trabalho não foram analisados como cada fator listado impacta no indicador de eficiência energética, em função de que os mesmos dependem da configuração de cada operação, por exemplo, em ferrovias onde a resistência ao rolamento do trem não é fator relevante, o mesmo não será abordado com a mesma ênfase de um fator mais relevante, como reduzir locomotivas em *idle* sem necessidade.

Outro ponto relevante é o fator quanto a programas de incentivo aos maquinistas para melhor condução dos trens visando redução de consumo. Apenas uma ferrovia apresentou o mesmo, sendo fator com potencial de contribuição para redução do consumo de diesel, uma vez que, mesmo em sistemas semi autônomos, o maquinista continua com forte contribuição para viagens de trem com eficiência elevada.

Outros fatores podem ser tratados com viés que não seja de eficiência energética, como redução de paradas não programadas nos trens, que geram atrasos no percurso, e impactam em outros indicadores, como o *transit time*, e em consequente atraso de entrega aos clientes.

O fator de gestão de manutenção da frota de locomotivas e vagões também afeta a confiabilidade do percurso do trem, podendo estar sendo tratados nas ferrovias, mas sem focar em melhorias de eficiência energética.

A gestão da idade da frota e avanços tecnológicos gera análises não somente sobre a ótica da eficiência energética, uma vez que estão envolvidos valores elevados de investimento para este tipo de processo, sendo os ganhos com eficiência energética *inputs* para a análise de viabilidade na renovação da frota.

13 MODELO DE GESTÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA NOVAS OPERAÇÕES FERROVIÁRIAS

Com base na análise de modelos de gestão da eficiência energética de nove ferrovias *Heavy Haul* do Brasil, EUA e Canadá, um modelo de eficiência energética pode ser dividido em ações imediatas de curto, médio e longo prazo, que serão utilizados conforme o perfil de cada operação, e o quanto os fatores listados no presente documento são relevantes para a operação, e até de fatores não listados no presente trabalho, mas que podem se mostrar relevantes em uma específica operação.

Importante, para o modelo, ocorrer a conexão de visões da gestão do dia a dia, que estão dentro do escopo do curto prazo, com ações que levam um maior tempo de implementação e maturação, até atingirem níveis que garantam os ganhos propostos.

As ferrovias dos EUA e Canadá possuem frotas significativas de locomotivas, como exemplo, qualquer modificação validada em testes protótipos levará a uma certa quantidade de tempo para ser implementada. Mesmo para as ferrovias do Brasil, com frotas comparativamente menores, o impacto também é significativo, uma vez que os ativos são utilizados de modo intensivo.

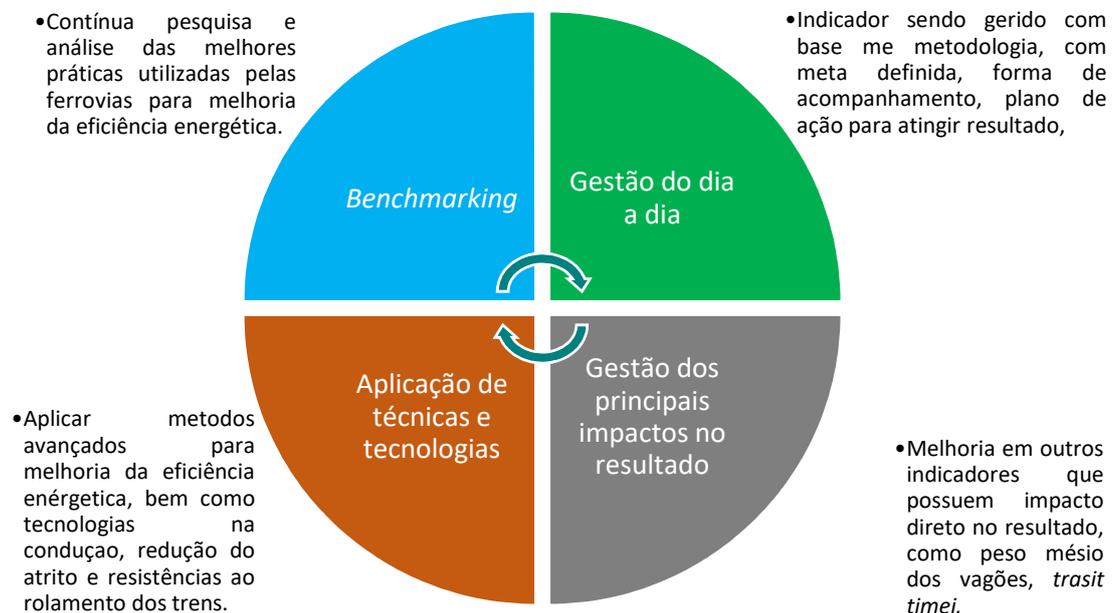
Um modelo que possa abranger e controlar todos os fatores que impactam o indicador de eficiência energética deverá fazer:

1. Gestão do indicador de eficiência energética - medição do consumo de diesel, estabelecimento de metas (mensais, anuais e plurianuais), medição da quilometragem percorrida, medição das toneladas brutas transportada.
2. Gestão do mix dos trens – Garantir a tonelagem bruta planejada, garantir um peso médio programado dos vagões, árvore desdobrada do mix de trens.
3. Gestão da operação dos trens – Condução dos maquinistas, gerir paradas programadas e não programadas dos trens durante a circulação, formação dos trens com análise de HP versus tonelagem bruta total, desligamento de locomotivas em *idle* sem necessidade,
4. Gestão da frota – idade da frota, tipos de tração versus potência, práticas de manutenção, análise de renovação, avanços tecnológicos em novas locomotivas, pesquisa em novos tipos de combustíveis
5. Gestão redução das resistências ao rolamento – Lubrificação de via, melhorias em vagões, melhorias aerodinâmicas da composição, perfil de via.

6. Gestão na implementação de projetos de melhoria - Tecnologias para otimização da condução semi-autônoma dos maquinistas, análises avançadas de otimização utilizando algoritmos, *big data*, *analytics*, tecnologia de recuperação de energia durante operação da locomotiva, desligamento e re-ligamento automático de locomotivas.

A figura 63 apresenta resumo do modelo descrito acima, com um processo que deve ser cíclico, sendo dividido em:

Figura 63 - Proposta de modelo base de gestão da eficiência energética para ferrovias heavy haul.



Fonte: Autor (2018)

1. Gestão do dia a dia do indicador de eficiência energética - onde existe meta definida com valores e prazos a serem alcançados, metodologia de apuração, estratificação dos fluxos consumidores do combustível, plano de ação de suporte.

Para esta etapa, que é inicial e base do modelo, são necessários recursos quanto a:

- Sistema de medição do consumo das locomotivas
- Sistema de medição da tonelagem bruta transportadas sobre a via
- Sistema de apropriação e gestão das informações para cálculo confiável do indicador.

Nesta fase de acompanhamento diário, a informação do resultado é essencial para ágil tomada de decisão quanto às ações de curto prazo que possam influenciar positivamente no resultado.

Importante, para esta fase do modelo, haver uma equipe dedicada, com profissionais com conhecimento da operação ferroviária e de método de gestão, bem como no uso de *softwares* de simulação de operação ferroviária, uma vez que o procedimento de operação, construído e constantemente revisado, é elaborado por meio de análises utilizando simulador.

A análise dos impactos no resultado, utilizando ferramentas de gestão, geram ações para manter e melhorar o resultado continuamente. Desta forma, a equipe precisa também possuir capacitação em ferramentas de análise e solução de problemas.

2. Gestão dos principais impactos no resultado – De acordo com o modelo operacional da ferrovia, alguns impactos no indicador são mais relevantes que outros (como exemplo o peso médio pode ser mais relevante em uma ferrovia em detrimento de outro), devendo possuir acompanhamento e tratamento especiais, uma vez que o peso destes na melhora do indicador é bem significativo.

A árvore de indicadores é um bom direcionador para a visão do que deve ter gestão e como este impacta na eficiência energética.

Nesta fase o acompanhamento deve ter a visão também do médio prazo, onde pode ocorrer mudanças em processos correlatos que venham gerar impactos no indicador de eficiência energética, como por exemplo, alterações causadas por quebra de safra em um fluxo de transporte de grãos.

Como existem alguns impactos que não estão sobre a gestão direta da equipe de gerenciamento da fase de gestão do dia a dia, como por exemplo, o desempenho das locomotivas pós-manutenção, ou o processo de lubrificação de trilhos, importante estabelecimento de rotina (pode ser semanal ou quinzenal, de acordo com a maturidade do processo) de acompanhamento de todos os indicadores que impactam na eficiência, estabelecendo um grupo maior com todas as interfases.

Alguns indicadores, depois de estabilizados, podem reduzir a frequência de acompanhamento, mas esta visão somente será possível se a árvore de impactos for bem definida, ou seja, a certeza do que realmente está impactando o indicador de eficiência energética.

Durante a análise dos modelos das ferrovias analisadas no presente trabalho, foi verificado que algumas ferrovias utilizam o mesmo grupo de gestão do dia a dia para analisar estes impactos, quanto mais autônomos forem os controles, é possível ganhar produtividade da

equipe de gestão, e não necessariamente utilizar mais pessoas para a finalidade de acompanhar esta segunda fase do modelo proposto.

3. Aplicação de técnicas e tecnologias – Utilização de algoritmos para maximizar a condução dos trens, reduzir paradas, tecnologias de condução semi-autônoma, melhoria aerodinâmica dos trens, redução de resistência ao rolamento, para resultados contínuos da eficiência energética, a médio e longo prazo, esta etapa da gestão, que está ligada a um viés de pesquisa e desenvolvimento, deve fazer parte do processo.

Nesta fase do modelo, a ferrovias devem fazer análise de qual tecnologia é mais aplicada ao seu modelo operacional (tamanho de trem, linha singela ou duplicada, densidade de tráfego, etc.).

Importante esta fase do modelo ser conduzida por pessoas com grau maior de experiência tanto de operação ferroviária quanto na tecnologia a ser implementada.

O sucesso dependerá do quanto a gestão de mudanças será efetiva, uma vez que absorver uma tecnologia em um modelo já operacional requer, em vários casos, adaptações de *hardware* e *software*, treinamento com todos os envolvidos, mudanças das estratégias de manutenção dos ativos, gestão de peças e componentes, em grande maioria importados no caso da realidade do Brasil.

Outro ponto bem relevante é quanto ao custo para implementação, que deve ser suportado por uma análise robusta de geração de valor, para não inviabilizar a implementação.

As duas fases anteriores também devem estar consolidadas, sob risco de não se conseguir apurar os ganhos com a aplicação da nova metodologia ou tecnologia adquirida.

Uma forma de controle de riscos e o método de testar um protótipo para posterior validação e liberação para aplicação de maneira ampla na operação da ferrovia. O método de validação deve seguir método estatístico que consiga dar robustez para uma tomada de decisão na aplicação para toda operação. Este passo é muito importante para não inviabilizar o método ou a tecnologia testada, sem o mesmo, tanto pode ser aprovado algo que não vai gerar o resultado esperado, quanto uma oportunidade de melhoria do processo pode ser perdida.

4. *Benchmarking* – A pesquisa contínua das melhores práticas realizadas pelas ferrovias *heavy haul* deve fazer parte do modelo de gestão, esta etapa do modelo visa gerar respostas para os impactos no indicador que ainda não foram resolvidos, mas que podem já possuir respostas em outras ferrovias.

Esta fase de prospecção deve levar em consideração as três anteriores, uma vez que a prática de *benchmarking*, para sua efetividade, deve se conhecer de forma detalhada como está

sendo conduzido o processo interno da operação quanto a gestão da eficiência energética, para base de comparação ser sustentável.

Deve haver o cuidado, por parte da equipe responsável pelo processo, de usar o método de equalização das bases de comparação, por exemplo, ferrovias que possuem distâncias distintas de extensão de via, a simples comparação de indicadores poderá levar a falsas interpretações.

Equalizando a base de comparação com indicadores, como exemplo, consumo por quilômetros percorridos, gera uma análise confiável, e retira as diferenças que existem em cada ferrovia.

Esta etapa fecha o ciclo do modelo proposto, assim a mesma deve alimentar as fases seguintes para direcionamento da estratégia, como modelo cíclico, as fases não findam após determinadas etapas planejadas, e sim a melhoria continua a ser implementada, com ganhos na eficiência energética da operação.

O modelo de gestão deve ser conhecido tanto pela alta direção da ferrovia quanto por seus empregados que formam a base das operações, desde o mecânico de manutenção das locomotivas, controlador de circulação, oficiais de operação, maquinistas, engenheiros de manutenção e processos, gerentes, todos devem estar buscando o mesmo objetivo, a redução do consumo de combustível durante a circulação dos trens.

O presente modelo possui limitações quanto sua aplicabilidade, conforme é descrito abaixo:

1. Equipes dedicadas – Aplicação do modelo proposto necessita de criação de equipe dedicada para o mesmo, se não ocorrer esta adequação do time para o foco na gestão da eficiência energética, haverá riscos de efetividade das ações, uma vez que o modelo parte de uma análise diária até planos de longo prazo, horizontes de cinco anos.

2. Simulador de operações ferroviárias – A construção e revisão dos procedimentos de condução, bem como construção dos quadros de tração para cada fluxo de atendimento ferroviário são feitos por meio de simulação ferroviária. A ausência desta ferramenta limita a implementação do modelo proposto.

3. Aquisição de sistema de gestão - A apuração do indicador de eficiência energética passa por informações confiáveis de consumo dos litros e da tonelada bruta transportada no período, para isto é necessário a aquisição de um sistema informatizado, ou o desenvolvimento de um pela própria ferrovia, ambas as formas necessitam de dispêndio de recursos financeiros.

4. Investimento para implementação de tecnologias – A implementação de uma tecnologia ou um método avançado de análise e tomada de decisão levam a custos que podem ser incompatíveis com o tamanho da operação ferroviária, e dependem de uma análise de viabilidade econômica para sua liberação pela alta direção. O diesel é proveniente do petróleo, uma *commoditie* que possui variações históricas em seu valor, o que pode gerar situações em que em dado momento, a análise de viabilidade não gere um sinal positivo para aquisição da tecnologia, e em outros momentos pode haver. Se houver um direcionamento de suspensão temporária de investimentos da ferrovia que implementar o modelo, as fases três e quatro ficarão comprometidas quanto sua efetividade.

5. Profissionais qualificados – Para implementação do modelo proposto no presente trabalho, são necessários profissionais com experiência em operação ferroviária, simulação de trens, implementação de projetos, gestão de processos e indicadores, o que pode não haver disponibilidade dos mesmos, ocasionando um tempo maior para aplicação plena do modelo, bem como aplicação de forma inconsistente, levando ao insucesso. Uma alternativa é contratação de empresas e consultorias especializadas, porém pode encontrar barreiras na limitação anterior do presente modelo.

6. Disponibilidade de informações para fase de *benchmarking* – Para o processo de *benchmarking* ser efetivo são necessários dados de outras ferrovias que muitas vezes não estão disponíveis por questões de normas internas de cada empresa ou até mesmo pela concorrência que existe entre empresas, o que para a realidade do Brasil ainda não acontece. Uma das formas de conseguir os dados é por meio de contratação de consultorias, porém aumenta os custos da fase e pode inviabilizar a mesma.

O modelo proposto foi construído a partir do levantamento bibliográfico deste estudo e pelas práticas apresentadas pelas ferrovias estudadas.

Não foi possível, o levantamento de práticas das ferrovias da China e Austrália, países que possuem ferrovias tipo *heavy haul* e veículos ferroviários padrão AAR, onde pode haver oportunidades de tamanha relevância quanto às estudadas, porém o próprio modelo, construído para ser algo contínuo, proporciona a contínua análise das melhores práticas para suportar um processo de melhoria contínua do indicador de eficiência energética da ferrovia que o adotar, buscando atingir o objetivo para o qual foi criado.

O modelo não é descrito em um detalhamento maior para poder ser utilizado da melhor forma, e atender a diferentes tipos e tamanhos de operadores ferroviários, com o intuito de ser construído assimilando as características da ferrovia que o utilizará, não perdendo a essência do seu conceito.

14 CONCLUSÃO

Foi possível levantar os principais modelos de gestão da eficiência energética em ferrovias *heavy haul*, com práticas inovadoras e de uso de tecnologia.

Melhorar a eficiência energética de uma ferrovia não pode ser entendido como a implementação de ações pontuais, mais sim de um conjunto destas ações onde haja metas estabelecidas e com gestão para acompanhar sua efetividade.

O presente estudo mostrou que as ferrovias focam de forma mais direta em impactos mais relevantes ao comportamento do perfil de consumo existente em suas operações, sendo assim uma oportunidade de aumentar a abrangência para outros impactos que podem gerar ganhos no curto e médio prazo.

Um aspecto interessante das ferrovias dos EUA e Canada é a abordagem sempre em conjunto com redução de emissões atmosféricas de CO_2 , deixando de forma clara que o objetivo de ser mais eficiente não é apenas um viés econômico, mais de sustentabilidade total.

O desenvolvimento de protótipos para mudança da matriz energética das locomotivas, com base atual em combustível fosseis (diesel), também gera expectativas de um futuro mais sustentável para as ferrovias, tornando o modal, que já possui uma eficiência energética maior, quando comparado ao modal rodoviário, superior aos demais, em termos de eficiência energética.

A visão de longo prazo deve ser estruturada e perseguida pelas ferrovias, o modelo de gestão deve ser independente quanto a mudanças nas equipes de implementação ou mudanças estruturais das empresas, desta forma é essencial a padronização dos processos de gestão da eficiência energética para garantir a continuidade do modelo.

O modelo proposto visa buscar abranger e suprir necessidades de direcionamento de trabalho para alcance do objetivo de redução de consumo. O mesmo não entra em detalhes da literatura de gestão, uma vez que o tema é amplamente difundido e com conhecimento avançado, e sim busca adentrar em um assunto pouco discutido, que são as melhores práticas para gestão da eficiência energética em uma ferrovia *heavy haul*, principalmente no Brasil, onde o modal ferroviário fica aquém da relevância encontrada em países continentais e mais desenvolvidos.

Quanto ao assunto eficiência energética de ferrovias no Brasil, comentado sobre sua pouca discussão, os principais estudos do tema estão restritos a poucas ferrovias presentes no país, não havendo literatura técnica disponível de forma a gerar conhecimento e tecnologias

nacionais, como exemplo do relato, há apenas a menção de uma tecnologia sendo desenvolvida nacionalmente, que é o simulador de operações desenvolvido entre a parceria da Vale S.A. e a USP, as demais tecnologias são de empresas estrangeiras, bem como os estudos utilizando metodologias mais avançadas.

A aplicação do modelo apresenta também limitações quanto a viabilidade. Estas limitações podem levar a decisão de não utilização do modelo em sua totalidade, mas de forma parcial o mesmo tem potencial de ser aproveitado e gerar valor para ferrovia que o utilizar.

O modelo também não foi aplicado, até a conclusão do presente trabalho, o que pode gerar melhorias quanto a seu formato, bem como inclusão de impactos a eficiência energética que não foram contemplados, porém o modelo tem como ponto forte a base das ferrovias selecionadas, que possuem práticas de gestão consolidadas com indicadores de resultado comprovados.

A aplicação do modelo cria oportunidade para novo trabalho técnico científico, gerando desenvolvimento e maturidade ao mesmo para também ampliar a geração de valor que se propõe.

Para o sucesso do modelo, a aplicação do mesmo deve permear toda a equipe responsável pela operação e manutenção de uma ferrovia, não sendo responsabilidade somente dos maquinistas, ou do centro de controle, ou dos engenheiros de operação ferroviária.

O descrito nos impactos, que modificam a eficiência do energética dos trens, permeou por todas as áreas que compõe uma ferrovia, desta forma a equipe criada deve ter representantes de todas as áreas, mitigando assim riscos do resultado esperado não ser alcançado.

Os estudos, quanto a melhoria da eficiência energética, devem continuar com a finalidade tanto de prover construção de conhecimento técnico científico, principalmente para a realidade do cenário ferroviário do Brasil, quanto de prover soluções para as ferrovias de sustentabilidade, em um mundo cada vez mais escasso de recursos energéticos, principalmente combustíveis fósseis.

Como recomendação de estudos futuros, com intuito de desenvolvimento do conhecimento e aplicação das melhores práticas para redução de consumo de combustível em trens de carga:

1. A aplicação de métodos de otimização operacional
2. Utilização de *big data* e *advanced analytics*;
3. Desenvolvimento de locomotivas híbridas;
4. Desenvolvimento da condução semi autônoma dos trens;
5. Redução da resistência ao rolamento com melhorias aerodinâmicas nas composições;
6. Melhorias de design e de processo para aumento de peso médio dos vagões.
7. Desenvolvimento de simuladores para melhoria de performance da circulação;

REFERÊNCIAS

- ABREU, B. R., **Avaliação do Impacto do Envelhecimento de Frota na Eficiência Energética de uma Empresa do Setor Ferroviário**. 2013. 114f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.
- ASSOCIATION AMERICAN RAILROAD. **Freight Railroads Help Reduce Greenhouse Gas Emissions**, 2018. Disponível em: <<https://www.aar.org/>>. Acesso em: 15 mai. 2018.
- ASSOCIATION AMERICAN RAILROAD. **Putting Technology to Work – How Freight Rail Delivers The 21ST Century**. Disponível em: <<https://www.aar.org/wp-content/uploads/>>. Acesso em: 28 jun. 2018.
- BALLEW, B. et al. Federal Railroad Administration. **Hybrid locomotive for energy savings and reduced emissions**. Disponível em: <<http://www.fra.dot.gov.>>. Acesso em: 04 jul. 2018.
- BARBOSA, R. S. et al. **Sistema de realidade virtual de simulação multiusuários de trens em malha ferroviária para treinamento de operadores**. São Paulo, 2011.
- BERG, C. N.; DEICHMANN, U.; LIU, Y.; SELOD, H. Transport Policies and Development. **The Journal of Development Studies**, Washington, v. 53, n. 4, p. 465-480, 2017. Disponível em: <<http://www.bnsf.com/>>. Acesso em: 28 mai. 2018.
- BNSF. **Railway Annual Review**, 2015. Disponível em: <<http://www.bnsf.com/>>. Acesso em: 28 mai. 2018.
- BNSF. **Railway Annual Review**, 2016. Disponível em: <<http://www.bnsf.com/>>. Acesso em: 28 mai. 2018.
- BORBA, J. L. **Apostila de Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária – Módulo Locomotivas**, 2008.
- BRONZINI, M. S., **Handbook of Transportation Engineering – National Transportation Networks and Intermodal Systems**, Virginia: McGraw-Hill, 2014.
- BUDD, L.; ISON, S. The role of dedicated freighter aircraft in the provision of global airfreight services. **Journal of air Transportation Management**, Loughborough, v. 1, n.61, p. 34-40, 2017.
- CABRAL, E. W. S. **A Eficiência Energética do Consumo de Combustível de uma Ferrovia Heavy Haul**. 2017. 70f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2017.
- CAMPOS, V. F. **Gerenciamento da rotina do trabalho do dia-a-dia**. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda, 2004.
- Canadian National 2017. **Sustainability Report**. Disponível em: <<https://www.cn.ca/en/>>. Acesso em: 06 jun. 2018.
- CARNEIRO, F. M.. **Documento Técnico 4756**. Engenharia Ferroviária da empresa Vale S.A., 2010.

CARVALHAES, B. B. **Documento Técnico 19815**. Engenharia Ferroviária da empresa Vale S.A., 2015.

COLAVITE, A. E.; KONISHI, F. **A matriz do transporte no Brasil: uma análise comparativa para a competitividade**. XII – SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2015.

COLE, C. **Handbook of Railway Vehicle Dynamics – Longitudinal Train Dynamics**. Boca Raton: Taylor & Francis, Central Queensland University, 2006.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Anuário CNT do Transporte – estatísticas consolidadas 2017**. Brasília: CNT, 2017.

CORREA, V. H. C.; RAMOS, P. A precariedade do transporte rodoviário brasileiro para o escoamento da produção de soja do Centro-Oeste: situação e perspectivas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 48, n. 2, p. 447–472, 2010.

DELTREGIA, F. M. **Documento Técnico 2431**. Engenharia Ferroviária da empresa Vale S.A., 2014.

DIOGENES, G. S. **Uma contribuição ao Estudo dos indicadores de desempenho operacionais de ferrovias de Carga: O caso da Companhia Ferroviária do Nordeste – CFN**. 2002. 112f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

DUARTE, P.C. **Desenvolvimento de um mapa estratégico para apoiar a implantação de uma plataforma logística**. 2004. 284f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

ELETROBRÁS. **Conservação de Energia – Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações**. Universidade Federal de Itajubá, 3ª ed., 2006.

EMD AESS. **Progress Rail**. Disponível em <:<https://www.progressrail.com/>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

FICI, R. P. **O sistema ferroviário mundial: o caso brasileiro**. 2017. 220f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

FILHO, R. P. A.; OLIVEIRA, F. M. Estudo de possíveis ganhos energéticos e operacionais devido a utilização de válvulas eletro pneumáticas em vagões de trens da Estrada de Ferro Vitória a Minas. **XIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica**, Uberlândia, 2007.

FONTANARI, R., SAES, A. M., OLIVEIRA, P. R., Transporte ferroviário e econômica regional em São Paulo: Comércio de café pela Cia. Mogiana E.F. (1900-1920). São Paulo, Universidade de São Paulo, 2013.

FULL CELL BULLETIN, South Africa, p. 4, 2012, Disponível em: <:<https://www.vehicleprojects.com/>>. Acesso em: 20 maio 2018.

GASPARINI, R. F. **Dinâmica Longitudinal de Veículos Pesados: Forças Resistivas e Outros Fatores de influência o Consumo de Combustível**. 2010. 103f. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

GE TRANSPORTATION'S DIGITAL SOLUTIONS. **Trip Optimizer**. Disponível em: <<https://www.gettransportation.com/>>. Acesso em: 22 jun. 2018.

GHELERE, H. **Documento Técnico 18080**. Engenharia Ferroviária da empresa Vale S.A., 2016.

HAVENGA, J.; SIMPSON, Z.; BOD, A. South Africa's domestic intermodal imperative. **Research in Transportation Business e Management**, South Africa, n. 5, p.38-47, 2012.

HONG, Z. et al. An energy management strategy based on dynamic power factor for fuel cell/battery hybrid locomotive. **International Journal of Hydrogen Energy**. Sichuan Province, n. 43, p. 3261-3273, 2017.

HOWLETT, P. G.; MILROY, I. P.; PUDNEY, P. J. Energy-Efficient Train Control, **Control Eng. Practice**. Sydney, v. 2, n. 2, p. 193-200, 1994.

HOWLETT, P. G.; VU, X.; PUDNEY, P. J., Local energy minimization in optimal train control. **Automatica**. Mawson Lakes, n. 45, p. 2692-2698, 2009.

HOWLETT, P. G. et al. **Freightmiser: Helping drivers to save fuel and arrive on time**. Sydney, 2008. <<https://www.researchgate.net/publication/242021024>>. Acesso em: 30 maio 2018.

INTERNATIONAL HEAVY HAUL ASSOCIATION – IHHA, **About IHHA**. Disponível em: <<https://www.ihha.net/about-ihhahttp://gbmx.com.br/tipos-negocios/vagoes/>>. Acesso em 20 jun 2018.

JORDÃO, L. F.; RIBEIRO, F, **Otimização da eficiência energética no corredor Centro da FCA: Uma análise de redução de custo operacional no trecho**. Belo Horizonte, MG. 2006.

KUSSANO, M. R.; BATALHA, M. O. Custos logísticos agroindustriais: avaliação do escoamento da soja em grão do Mato Grosso para o mercado externo. **Gestão & Produção**, v. 19, n. 3, p. 619–632, 2012.

LAROCA, D. **Documento Técnico 17814**. Engenharia Ferroviária da empresa Vale S.A., 2014.

LARSSON, H.; ERICSSON, E. The effects of an acceleration advisory tool in vehicles for reduced fuel consumption and emissions. **Transportation Research Part D**, n. 14, p. 141-146, 2009.

LAWRENCE, C. LEADER – Locomotive Engineer Assist Display and Event Recorder, **Norfolk Southern**, 2009. Disponível em: <<http://www.nscorp.com/nscorphtml/pdf/09invday-jcl-color.pdf>>. Acesso em: 25 jun 2018.

LIJUN, Z.; MENG, X.; YULING, F.; XIANGTAO, Z. Models and control methodologies of heavy haul trains toward energy efficiency: A survey. **Control and Decision Conference (CCDC)**, p.2152-2157, 2012.

LIU, H.; MAO, B.; DING, Y.; JIA, W.; LAI, S. Train Energy-saving Scheme with Evaluation in Urban Mass Transit Systems. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, v. 7, n. 5, p. 68-73, 2007.

LIU, R.; GOLOVITCHER, I. M. Energy-efficient operation of rail vehicles. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 37, n. 10, p. 917-932, 2003.

MARTINIS, V., WEIDMAN, U. A. **Improving energy efficiency for freight trains during operation: The use of simulation**, Zurich, 2016.

MATHISEN, T. A.; HANSSEN, T. E. S. The academic literature on intermodal freight transport, **Transportation Research Procedia**. In: 17th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, 3., Sevilha, 2014. p. 611-620.

MATOS, O. N. **História Geral da Civilização Brasileira. O Brasil Monárquico**, v. 6, t. 2, 6. ed., Rio de Janeiro, 2004.

MESSIAS, V. S. N. **Multimodalidade como Estratégia Logística para o Transporte de Commodities Agrícolas no Centro-Sul do Brasil: O papel do PNLT no equilíbrio da matriz**. 2017. 81f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2017.

MILLER, A. R. et al. Analysis of fuel cell hybrid locomotives. **Power Sources**, Denver, n. 157, p. 855-861, 2006.

NEW YORK AIR BRAKE LEADER DRIVER ASSISTAN. Disponível em: <http://www.nyab.com/en/>. Acesso em: 21 jun. 2018.

NEW YORK AIR BRAKE TDS-6000 SIMULATOR SYSTEMS. Disponível em: <http://www.nyab.com/en/>. Acesso em: 20 jun. 2018.

Norfolk Southern 2017 Sustainability Report – Strides in Stewardship. Disponível em: <http://www.nscorp.com/content/nscorp/en.html>. Acessado em: 19 jun 2018.

PAINTER, T. D. **Recovering Railroad Diesel-Electric Locomotive Dynamic Brake Energy**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – University of Illinois, Urbana-Champaign, Illinois, 2006.

PALHANO, A. N. **Documento Técnico 2862**. Engenharia Ferroviária da empresa Vale S.A., 2009.

PATTERSON, M. G. What is energy efficient? Concepts, indicators and methodological issues, **Energy Policy**, Palmerston North, v. 24, n. 5, p. 377-390, 1996.

PEREIRA, O. C. **Soluções de otimização da eficiência energética de uma ferrovia de carga: o caso da Estrada de Ferro Carajás – EFC**. 2009. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

POZZI, S. **EEUU vive una nueva fiebre del ferrocarril**. Disponível em:<
https://elpais.com/economia/2013/03/01/actualidad/1362157781_745817.html. Acesso em: 09
set. 2018.

PUDNEY, P. J.; YEE, R. **Saving fuel on long-haul trains: Freightmiser initial trial results**, Conference On Railway Engineering, Darwin, 2004.

REIS, V. et al. Rail and multi-modal transport. **Research and Transportation Economics**, TU Dortmund, n. 41, p. 17-30, 2013.

RIBEIRO, L.O.M.; BOENTE, A.N.P. **A Intermodalidade e o Transporte de Carga no Brasil: Uma Visão de Aplicabilidade na Lógica Fuzzy**. In: XVII SIMPOI -Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais, 1.,Fortaleza, 2014, p. 1.

RONDINELLI, D.; BERRY, M. Multimodal transportation, logistics, and the environment: Managing interactions in a global economy. **European Management Journal**, v. 18, n.4, p. 398-410, 2000.

ROSA, P. M. C. F. **Apostila de treinamento de supervisores de mecânica da ferrovia Centro-Atlântica – Veículos Ferroviários Vagões**, 2006.

ROWANGOULD, G. **A Spatially Detailed Locomotive Emission Model and Goods Movement Data Constraints on Public Policy and Planning**, Davis. Institute of Transportation Studies, University of California, 2010.

SALIN, D. L. **Soybean Transportation Guide: Brazil 2016**. Washington: United States, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.9752/TS048.05-2017>>. Acesso em 29 abr. 2018.

SANTOS, A. B. **Avaliação da eficiência operacional dos terminais intermodais da cadeia logística de grãos brasileira**. 2012. Dissertação (Mestrado em Administração) -Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2012.

SILVA, W. **Documento Técnico 4529**. Engenharia Ferroviária da empresa Vale S.A., 2010.

SILVEIRA, D. T.; GERHARDT, T. E. **Métodos de Pesquisa**. Porto Alegre, RS: Editora da UFRGS, 2009.

SPIRYAGIN, M. et al. Application of flywheel energy storage for heavy haul locomotives. **Applied Energy**, Rockhampton, n. 157, p.607-618, 2015.

SZKODA, M.; TULECKI, A. Ecology, energy efficient and resource efficiency as the objectives of rail vehicles renewal. **Transportation Research Procedia**, Shanghai, n. 25, p. 386-404, 2016.

TERAVANINTHORN, S.; RABALLAND, G. **Transport prices and costs in Africa: A review of the main international corridors**. DC: World Bank, Washington, 2008.

TOLETTI, A.; MARTINIS, V.; WEIDMANN, U. What about train length and energy efficiency of freight trains in rescheduling models?. **Transportation Research Procedia**, Delft, n. 10, p. 584-594, 2015.

TRANSPORTATION TECHNOLOGY CENTER INC. TTCl. Disponível em:<<http://www.railway-research.org/Transportation-Technology-Center>. Acesso em: 30 abr. 2018.

U.S. Department of Transportation. **Bureau of Transportation Statistics - National Transportation Statistics**. Disponível em:<www.bts.gov>. Acesso em 30 abr. 2018.

U.S. Department of Transportation, **Bureau of Transportation Statistics –Transportation Economic Trends 2017**. Disponível em:<www.bts.gov>. Acesso em: 25 abr. 2018. Union Pacific Building America report 2017. Disponível em:<<https://www.up.com/index.htm>>. Acesso em: 28 mai. 2018.

WANG, P.; GOVERDE, R. M. P. Multi-train trajectory optimization for energy efficiency and delay recovery on single-track railway lines. **Transportation Research**, Delft, n. 105, p. 340-361, 2017.

WICKENS, A. H. **Handbook of Railway Vehicle Dynamics – A History of Railway Vehicle Dynamics**. Boca Raton: Taylor & Francis - Central Queensland University, 2006.

WU, L. et al. Effects of curve radius and rail profile on energy saving in heavy haul achieved by application of top of rail friction modifier. **Wear**, p. 279-286, 2016.

YANG, S. et al. Energy-Efficient timetable and speed profile optimization with multi-phase speed limits: Theoretical analysis and application. **Applied Mathematical Modelling**, Beijing, v.? n. 56, p. 32-50, 2018.