

ARTIGO

Operação Autônoma de Trens

Hélvio Ghélere¹, Vivian Parreira²

Diretoria de Planejamento e Desenvolvimento, Avenida Dante Michelini, 5500, CEP 29090-900, Vitória - ES

e-mail: ¹ helvio.ghelere@vale.com, ² vivian.parreira@vale.com

RESUMO

No presente artigo busca-se demonstrar o desenvolvimento e a adequação da tecnologia de condução autônoma de trens na busca por resultados favoráveis no indicador de eficiência energética da Estrada de Ferro Carajás em trens com 330 vagões, sendo analisados o consumo de Diesel, tempo de viagem e esforços na composição, assim como as adequações realizadas no software, com o objetivo de embasar a decisão para a implantação desse sistema na frota de locomotivas utilizadas no transporte de minério de ferro.

Palavras-Chaves: Operação; Condução Autônoma de Trens; Economia de Combustível; Automação.

1. INTRODUÇÃO

O consumo de combustível em ferrovias não eletrificadas é um assunto de extrema relevância, pois normalmente representa seu maior custo, além dos impactos ambientais que são diretamente debitados a essas empresas.

A eficiência energética de uma ferrovia é obtida dividindo-se o consumo de óleo Diesel das locomotivas pela carga transportada em uma determinada distância. Para se conseguir um aumento na eficiência energética, várias ações já bastante conhecidas no meio ferroviário são rotineiramente empregadas, em suas diferentes áreas de atuação: tecnologias de tração, operação, manutenção, controle de aquisição, distribuição e abastecimento das locomotivas, dentre outras. Comumente busca-se por aumento do peso médio dos vagões, aumento no tamanho dos trens, utilização de locomotivas mais econômicas, adequação dos procedimentos de operação para condução econômica, redução da velocidade, sincronismo operacional para evitar paradas desnecessárias, tração distribuída, desligamento de locomotivas quando não

necessárias para a operação do normal dos trens, etc.

Quando todas as ações conhecidas já foram tentadas e ainda é necessário obter mais economia na queima de combustíveis, torna-se necessário inovar.

Com foco na operação de trens, estão ganhando espaço entre as grandes ferrovias os sistemas de auxílio à condução, vulgarmente conhecidos como pilotos automáticos.

Na verdade, tratam-se de sistemas de operação semiautônoma de trens: interligados ao computador de bordo da locomotiva comandante e também ao sistema de licenciamento da ferrovia, um sistema de operação semiautônoma permite operar diretamente o acelerador e o freio dinâmico de todas as locomotivas de um trem - podendo também operar o freio pneumático - controlando a velocidade de acordo com os limites estabelecidos pela ferrovia e tendo como foco principal a redução do consumo de Diesel.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar a metodologia utilizada e relatar o desenvolvimento e os testes comparativos que estão sendo realizados com o sistema de condução autônoma *Trip Optimizer* (ou simplesmente TO) na EFC.

Serão analisados o consumo de Diesel, tempo de viagem e esforços nos engates em dois grupos de trens:

1.º - Trens com operação convencional, sendo conduzidos de acordo com os padrões operacionais vigentes na EFC, e

2.º - Trens sendo operados pelo sistema de condução autônoma.

Os resultados finais serão analisados e deverão embasar a decisão de implantar ou não implantar esta tecnologia na frota de locomotivas utilizada pela EFC para o transporte de minério de ferro.

O desenvolvimento e as adequações necessárias do software do sistema de condução autônoma para garantir o seu bom desempenho serão também tratados no decorrer deste artigo.

3. JUSTIFICATIVA

O desempenho da infraestrutura de transportes em qualquer país é fundamental para o desenvolvimento econômico e social, bem como para a promoção da integração regional. Segundo a ANTF, entre 1997 e 2010 o volume nacional de transporte de cargas sobre trilhos cresceu 87%. O minério de ferro corresponde a quase 75% dos produtos da matriz ferroviária brasileira e é a principal carga transportada pela Estrada de Ferro Carajás (EFC). A ANTF planejou um traçado arrojado para a matriz ferroviária brasileira: programou-se para 2015 o transporte de 972,75 milhões de toneladas úteis.

Paralelamente, o atual cenário econômico mundial direciona os preços das commodities, dentre elas o minério de ferro, para patamares muito baixos, semelhantes aos praticados em 2008, efeitos da redução do crescimento da China, instabilidades e pífia retomada do crescimento norte americano e, obviamente, pela atual super oferta de minério no mercado, ainda piorada com a recente retomada das atividades de muitas mineradoras anãs, viabilizadas temporariamente e atraídas pelos já esquecidos U\$ 180 / tonelada desse metal.

Competidores melhores situados geograficamente apresentam custos mais baixos, quando o assunto é transporte: as gigantes australianas estão ao lado dos maiores mercados consumidores de minério de ferro, e a uma fração dos nossos custos com transporte marítimo.

Para competir em condições de igualdade, torna-se então necessário investir ainda mais em escala de produção e em redução de custos. O programa de crescimento de produção da EFC já está em curso e multiplicará por 2,5 a atual capacidade de escoamento desta ferrovia. Mas isso implica também em gastar mais com energia fóssil. Muito mais, já que, paradoxalmente, ao passo que o preço do petróleo desaba no mercado externo, o preço do combustível no Brasil continua em firme ascensão.

Desta forma, as pressões negativas sobre os custos da Estrada de Ferro Carajás em seu item de maior relevância – o óleo Diesel - torna-se de grande prioridade. Qualquer redução no indicador de eficiência energética deve ser comemorado e incentivado, pois representa manter um grande montante de dinheiro nos caixas da empresa.

4. DESENVOLVIMENTO

4.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética é um dos indicadores operacionais de maior impacto em uma ferrovia, e representa o consumo de óleo diesel das locomotivas dividido pela carga transportada e pela distância de um determinado trecho, em litros por 1.000 TKB.

$$EE = \frac{\text{Consumo}}{\text{TKB}} \times 1000 \quad (1)$$

Onde:

- EE = Eficiência Energética, em litros / k.TKB
- Consumo = volume de Diesel consumido pelo trem, em litros.
- TKB = peso bruto do trem multiplicado pela distância transportada (em toneladas X quilômetros).

Muitos programas já foram estabelecidos e obtiveram excelentes resultados no aumento da eficiência energética na EFC:

- Procedimentos Operacionais estudados em laboratório: especialistas em operação de trens estudam em simuladores a forma mais

econômica e produtiva de conduzir os trens, elaborando um procedimento operacional (receita) que os maquinistas devem cumprir.

- Operação econômica dos trens: é disparada quando o Centro de Controle Operacional determina que determinados trens não devem ter pressa em atingir seus destinos, em situações operacionais específicas.
- Aquisição de locomotivas mais econômicas, de tecnologias mais recentes, como as locomotivas com motores de tração de corrente alternada.
- Utilização da locomotiva certa para a atividade: escolher corretamente a locomotiva para realizar manobras, para operar trens de carga geral ou trens de minério.
- Desligar os motores quando não são necessários: pode parecer óbvio, mas não é tão simples quanto pode parecer. Em muitas ocasiões, os trens ficam parados por horas com as locomotivas ligadas, consumindo Diesel sem necessidade. A utilização do AESS (Automatic Engine Start Stop) da GE, está sendo implantado em algumas frotas.

As locomotivas em pátios e oficinas também devem ser melhor administradas, quando o assunto é consumo de Diesel: o principal é motivar o pessoal e monitorar o desligamento das locomotivas.

- Controle de compra, distribuição e abastecimento, para evitar desvios, vazamentos e perdas diversas.
- Manutenção das locomotivas, mantendo-as dentro dos padrões aprovados de consumo energético por ponto de aceleração (teste de potência).

Neste cenário, para se conseguir ainda melhores resultados no indicador de eficiência energética, é necessário manter as ações já desenvolvidas, mas, inexoravelmente, deve-se inovar.

Já em largo uso por grandes ferrovias norte-americanas mas ainda não realmente implantado na América do Sul, uma tecnologia relativamente recente tem sinalizado com bons resultados na busca por economia de combustível: são os chamados sistemas de auxílio à condução de trens, ou simplesmente “economizadores de combustível”, traduzindo-se literalmente o termo “fuel savers” do inglês.

4.2 AUTOMAÇÃO DA OPERAÇÃO DE TRENS: EFICIÊNCIA ENERGÉTICA *versus* TEMPO DE PERCURSO *versus* ESFORÇOS NOS ENGATES

Os “fuel savers” têm evoluído no sentido de deixarem de ser apenas economizadores de combustível para se tornarem sistemas de automação da condução de trens, dispensando a atuação do maquinista em parte de suas atividades, ou mesmo retirando totalmente o maquinista do trem, realizando uma operação autônoma total: surgem então os chamados trens “drones”.

Ações buscando um ou outro objetivo têm sido realizadas por diferentes ferrovias, com também diferentes resultados. Ferrovias americanas utilizam o *Trip Optimizer* com o objetivo de reduzir consumo de combustível, principalmente, ao passo que na Austrália já se projeta a operação completa de uma ferrovia com trens totalmente autônomos. Evidente que a redução de custos que paga a implantação dessa tecnologia é muito melhorada quando se pensa em economizar também na mão de obra dos maquinistas.

A utilização de um nível mais profundo de automação depende muito das características e peculiaridades de cada ferrovia: qual é o nível atual das demais tecnologias relacionadas à operação ferroviária, sua localização geográfica, interação com cidades e comunidades, disponibilidade e custo de mão de obra, aspectos sociais, políticos e legais.

Todavia, iniciar atividades com um sistema de auxílio à condução ou de automação da operação é a porta de entrada para o desenvolvimento de automação mais profunda, se e quando isso se tornar possível à medida que os cenários se modifiquem com o tempo e com a evolução natural das circunstâncias econômicas, sociais, legais...

Resumidamente, o mundo caminha neste sentido, buscando por redução de custos e aumento de produtividade através da automação. Os competidores diretos da EFC já estão alguns passos à frente, indicando a necessidade de reagir.

Neste aspecto, dois produtos adequáveis à operação de trens como os da EFC estão disponíveis no mercado, com tecnologias e estados de desenvolvimento semelhantes: o Leader da New York Air Brake, atualmente em implantação na Estrada de Ferro Vitória a Minas, e o *Trip Optimizer* da General Electric,

que se encontra em testes iniciais na Estrada de Ferro Carajás.

Além das considerações acima sobre a eficiência energética, dois outros fatores não menos relevantes devem ser analisados: o tempo médio de percurso dos trens e os esforços nos engates.

Por mais que seja desejável economizar combustível, isto não pode ser obtido através da redução da velocidade dos trens, por motivos óbvios: tempo é dinheiro e, nas circunstâncias atuais e no cenário de produção desenhado para os próximos anos, todo o minério que puder ser entregue pela ferrovia ao porto da EFC será vendido, ou seja, a ferrovia pode ainda ser o gargalo no processo produtivo mina-ferrovia-porto. Assim, os tempos médios de viagem – excluídos os tempos no porto, na mina e também as paradas dos trens durante o percurso porto-mina-porto – devem também ser analisados, de forma que o tempo médio dos trens operados pelo *Trip Optimizer* não deve ser superior ao tempo médio dos trens operados em forma convencional.

Ou seja: economia de combustível é sempre bem vinda, mas vender minério é bem melhor!



Figura 1 – Consumo X Velocidade

Via de regra, existe um forte *trade-off* entre o consumo de Diesel e a velocidade média dos trens: quanto maior a velocidade, maior o consumo; daí a importância de corretamente configurar o sistema de condução autônoma para reproduzir a operação atual da EFC, ou a almejada economia pode simplesmente não ocorrer.

E isto não é tarefa simples: a dinâmica da EFC vem constantemente se alterando com o

tempo, principalmente em função das obras de duplicação ao longo de todo o trecho.

Da mesma forma, os trens operados pelo *Trip Optimizer* não deverão apresentar esforços superiores aos limites de segurança estabelecidos para a EFC, sob pena de acarretar riscos à segurança operacional e/ou decréscimo na vida útil dos aparelhos de choque e tração dos vagões e da via permanente, inviabilizando o projeto.

Outros possíveis benefícios de um sistema de condução autônoma:

- Redução do risco de acidentes por falha humana, e
- Operação otimizada em malha (*spacing*), quando os trens recebem tempos-alvo para cumprirem até o próximo ponto notável, seja um pátio para cruzamento ou a aproximação de outro trem no mesmo sentido, evitando paradas desnecessárias e uma vez mais poupando combustível. A arrancada de um trem da EFC até a velocidade de cruzeiro pode consumir mais de 300 litros de Diesel.

Para que os comparativos tenham validade estatística, foi determinado que um grupo de 30 viagens deverá ser executado no modo convencional e um grupo de 30 viagens deverá ser executado em controle automático pelo *Trip Optimizer*, atribuindo um grau de confiabilidade de 95% aos resultados de consumo de combustível.

Este trabalho irá tratar dos testes em andamento na EFC, acompanhando o desenvolvimento dos equipamentos, sua adequação aos sistemas da locomotiva e de licenciamento da ferrovia, mas principalmente da realização dos testes comparativos de desempenho no referente à economia de combustível, tempo de viagem e esforços internos na composição, já que quaisquer destes três fatores podem decidir pela continuidade do projeto.

5. A EXPERIÊNCIA NA EFC

Ainda inédita na América do Sul, a operação semiautônoma de trens *heavy-haul* está demandando uma intensa etapa de experimentação e adequações do software, antes da realização de testes comparativos de desempenho entre os modos convencional e semiautônomo que venha efetivamente a embasar uma decisão da empresa em investir nesta tecnologia.

Vencidas estas etapas, os dados foram levantados do registrador de eventos, do ATC e do próprio sistema *Trip Optimizer* nas locomotivas dos trens testados, e também do sistema Unilog.

Serão testados 30 trens no modo convencional de operação e 30 trens em condução semiautônoma pelo *Trip Optimizer*, analisando-se o consumo de combustível e tempo de viagem, assim como os esforços nos engates de alguns trens selecionados.

Critérios de exclusão de dados inválidos foram aplicados, de forma a garantir a validade estatística dos resultados. Os tempos e consumos analisados são apenas os ocorridos após a partida das origens e até a chegada aos destinos para os trens vazios e carregados. Tempos e consumos ocorridos durante as eventuais paradas dos trens quando já em operação ao longo da ferrovia foram excluídos.

Os consumos considerados são calculados com base nos tempos por ponto de aceleração gravados nos registradores de eventos, multiplicados pelo consumo horário por ponto de aceleração constantes na tabela de consumo fornecida pelo fabricante para as locomotivas utilizadas (GE Evolution ES 58 AC), de forma a evitar a interferência de outros processos e ocorrências no cálculo do indicador de eficiência energética.

Os trens testados são formados por 3 locomotivas GE Evolution ES 58 AC e 330 vagões em tração distribuída no modo assíncrono, utilizando a tecnologia *Locotrol* da GE, no ciclo completo porto-mina (trem vazio) e mina-porto (trem carregado).

Resumidamente, o objetivo de todo o projeto de operação autônoma de trens na EFC é testar a tecnologia *Trip Optimizer*, através da experimentação e coleta de dados de dois grupos de trens, um operado pelo *Trip Optimizer* e outro operado de forma convencional, e comparar os consumos de combustível, tempos de percurso e esforços nos engates.

Três requisitos básicos devem ser atendidos para que o projeto seja bem sucedido:

1. Os esforços nos engates devem estar dentro dos limites da EFC;
2. Os trens operados pelo *Trip Optimizer* devem apresentar tempo médio de percurso igual ou inferior ao tempo médio dos trens operados de forma convencional, e

3. Os trens operados pelo *Trip Optimizer* devem apresentar menor consumo energético do que os trens operados de forma convencional.

Este capítulo detalha os métodos utilizados para obtenção, tratamento e análise dos dados dos trens e determina as regras e critérios utilizados para validação dos resultados.

5.1 DESENVOLVIMENTO E TESTES DO SISTEMA

Há aproximadamente dois anos o sistema *Trip Optimizer* vem sendo desenvolvido e testado na EFC.

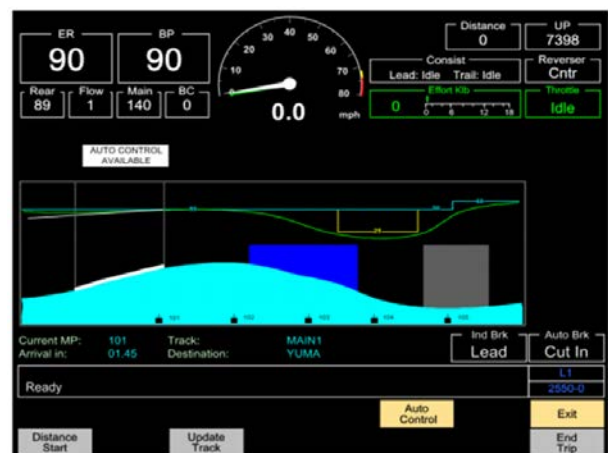


Figura 2 – Tela de operação do *Trip Optimizer*

Plano de Evolução do projeto TO na EFC:

- **2012 – 2016:**

Piloto: desenvolvimento e experimentação.

Fase 1: Implementação → Operação de tração e freio dinâmico em modo assíncrono com integração ao ATC.

- **2017 a 2020:**

Fase 2: Operação de freio automático.

Fase 3: Operação de arrancadas automáticas.

Fase 4: Operação de paradas automáticas.

Fase 5: Operação autônoma integrada ao SGF.

- **2021 →**

Fase 6: Operação Remota (?)

Fase 7: Trens drones (?)

Integrar o TO ao SGF, de forma que cada trem possa operar de forma sincronizada com a malha ferroviária, poderá evitar muitas paradas desnecessárias e otimizar a velocidade de cada trem, economizando ainda

mais combustível e possibilitando aumento da produção.

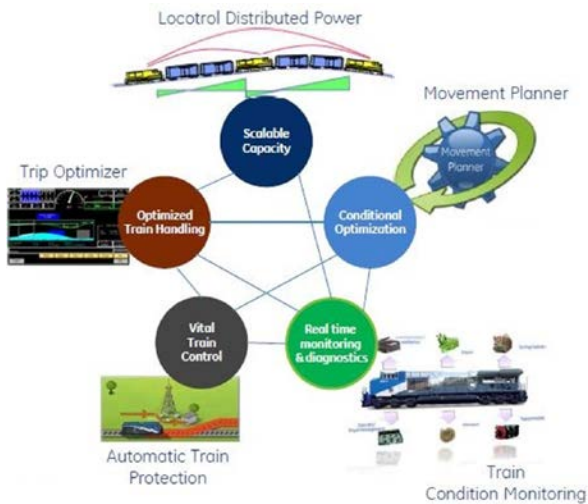


Figura 3 – Integração de sistemas

Várias etapas repetitivas de Desenvolvimento, Avaliação em Laboratório, Experimentação e Coleta de Resultados foram realizadas ao longo de quase dois anos, seguindo as etapas abaixo:

1. Disponibilização inicial do software → Plano de viagens → Simulações → Replanejamento de viagens → Simulações → Testes iniciais: alto consumo, menor tempo de percurso, várias regiões de esforços elevados.
2. Desenvolvimento e adequações do software → Plano de viagens → Simulações → Novos testes: alto consumo, menor tempo de percurso, algumas regiões de esforços elevados.
3. Desenvolvimento e adequações do software → Plano de viagens → Novos testes: consumo de Diesel um pouco acima dos trens convencionais e melhor tempo de percurso, algumas regiões de esforços elevados.
4. Workshop Vale/GE → Zonas de controle manual → Isolamento da remota C → Velocidade condicional → Antecipação dos prompts → Desenvolvimento e adequações do software → Novos testes: resultado positivo no consumo, tempo de percurso equivalente, esforços sob controle.

Durante o desenvolvimento do sistema, as principais dificuldades encontradas foram:

1. Resultados não favoráveis no consumo de combustível: foram realizadas adequações nas velocidades máximas em todo o trecho, aproximando-as das velocidades médias praticadas pelos trens convencionais. O ajuste

do “*min time off set*” permitiu também melhorar a relação tempo de percurso *versus* consumo. O consumo ainda não é favorável em todos os trechos, especialmente no trem vazio: ainda há um dever de casa para melhorar o consumo.

2. Choques elevados em diversas localizações: a adequação das velocidades máximas nesses locais resolveu a maioria; em dois trechos mais críticos foi adotada a operação manual dos trens para garantir uma operação segura.

3. Falhas no Início das Viagens: ao iniciar a viagem, nas origens ou nos pontos de troca de equipe, a comunicação entre o *Trip Optimizer* e a GE, para baixar dados do trem e das restrições de velocidade, falhou constantemente, muitas vezes impossibilitando o início do sistema e obrigando o trem a prosseguir no modo manual, inviabilizando o teste.

No momento a GE está implantando 3 diferentes soluções para garantir os *Trip Inits*, sem falhas: laptops, *USB reader* e um novo modem de celular.

4. Controle de velocidade na aproximação de pátios (sinal amarelo): o que foi resolvido mapeando-se estes locais e diminuindo a velocidade de entrada no sinal amarelo, simplesmente.

5. Maior consumo na remota C, exigindo reabastecimento em Marabá: o procedimento de isolamento da remota C incorporado ao TO está resolvendo esse inconveniente.

6. Engates comprimidos: ao invés de procurar manter os engates esticados sempre que possível, o *Trip Optimizer* opera os trens com mais tração nas locomotivas remotas, comprimindo os engates. Isto causou certa estranheza entre o pessoal operacional, mas revelou algumas surpresas boas: em alguns casos, os choques nos engates devido à ação de folgas em função do perfil foram menores do que os comumente ocorridos em trens convencionais.

Mas não em todos os casos: a maioria dos casos foram tratados através do controle mais rigoroso da velocidade, e os dois mais críticos com zona de operação manual.

5.2 METODOLOGIA DE TESTES

Foram definidas as principais regras para normatizar a forma como os dados serão coletados e tratados, para permitir resultados com uma margem de 95% de confiabilidade:

1. Todos os trens deverão ser operados com locomotivas Evolution ES 58 AC, na seguinte formação:

- 1 Evo + N GDT/GDU + 1 Evo + N GDT/GDU + 1 Evo + N GDT/GDU

Onde:

- N: número de vagões no lote → o nominal é 110 vagões.
- GDT/GDU: vagões do tipo gôndola GDT ou GDT, para transporte de minério de ferro e descarga em car dumpers.
- Evo: abreviação da locomotiva GE Evolution ES 58 AC.

2. O número de vagões nos trens deve ser superior a 320.

3. Serão levantados dados de dois grupos de trens: um grupo operando em modo convencional (grupo NonTO) e outro grupo operando com o *Trip Optimizer* ativado (grupo TO).

Cada grupo deverá realizar 30 viagens válidas completas (vazio + carregado). Serão comparados os dados de consumo de combustível e de tempo de percurso.

4. Os dados serão medidos da efetiva partida dos trens vazios de QPM e até a efetiva chegada (parada) em QCA, e da efetiva partida dos trens carregados de QCA até a efetiva chegada em QPM.

5. Os dados de tempo e consumo de combustível durante as paradas deverão ser excluídos dos cálculos.

6. Os dados de tempo, consumo de combustível e TKB no trecho operado com helpers acopladas ao trem carregado (o trecho nominal de uso de helpers na EFC é entre os quilômetros 610 e 480) deverão ser excluídos dos cálculos para os dois grupos de teste: TO e Non TO.

7. Trens com falhas de locomotivas ou que tenham sofrido quaisquer outros eventos que interfiram nos dados de consumo ou tempo de percurso deverão ser excluídos do comparativo.

8. Os dados para os trens NonTO serão obtidos de quaisquer trens operando com quaisquer 3 locomotivas Evolution, distribuídos no mesmo período de avaliação do TO e seguindo os mesmos critérios de avaliação e exclusão acima.

9. Não serão excluídos trens em função de restrições de velocidade no trecho.

10. Não serão excluídos trens em função de número e locais de paradas ocorridas com os trens no trecho.

11. A variação percentual da quantidade de trens TO x Non TO não deverá ser superior a +/- 3 % .

12. Será calculada a média dos tempos de percurso (transit time) e o desvio padrão (DP) destes tempos.

Valores superiores à média + 3 DP ou inferiores a média - 3 DP --> os dados de tempo, consumo de combustível e TKB serão excluídos.

Serão então recalculadas as novas médias de tempo de percurso e consumo com os valores remanescentes.

13. Serão comparadas as Eficiências Energéticas (EE) dos dois grupos de trens, em litros / k.TKB.

O consumo de cada trem será obtido pela fórmula:

$$\text{Consumo} = (t1.f1 + \dots + t8.f8 + tFD.fFD) \quad (2)$$

, para as 3 locomotivas.

Onde:

- t1 a t8 = tempo em horas em cada ponto de aceleração.
- f1 a f8 = consumo de combustível / hora em cada ponto de aceleração.
- tFD = tempo em horas em freio dinâmico.
- fFD = consumo de combustível / hora em freio dinâmico.
- f1 a f8 e fFD são valores informados pela GE para as locomotivas Evolution,
- t1 a t8 e tFD são obtidos nos ROT's das locomotivas.

14. O TKB será obtido multiplicando-se o peso total do trem (sem as locomotivas, obtido do Unilog) pela distância fixa informada na tabela de comparação de desempenho para cada trecho.

15. Os dados de tempo, consumo e TKB serão levantados para cada trecho:

Vazios: PM-AA / AA-AL / AL-MA / MA-CA

Carregados: CA-MA / MA-AL / AL-AA / AA-PM

Onde:

PM: Ponta da Madeira (porto, em São Luís – MA), AA: Alto Alegre, AL: Açailândia, MA: Marabá e CA: Carajás (mina).

Os objetivos de dividir o trecho desta forma para a apuração dos dados são possibilitar a análise dos resultados por seção,

possibilitando ações localizadas no desenvolvimento do software do *Trip Optimizer*, e também evitar a perda de dados de uma viagem completa de um trem vazio ou carregado devido a alguma ocorrência localizada.

16. Todos os cálculos acima serão realizados para cada trecho, obtendo-se suas médias de tempo de percurso (tm), consumo médio (fm) e TKB médio (TKBm)

17. Poderão ocorrer diferentes quantidades de dados analisados para cada trecho.

18. A variação percentual da TKB média final TO x Non TO não deverá ser superior a +/- 5 %

19. TKB médio final:

$$\text{TKBmFinal} = \text{Soma}(\text{TKBmPM-AA} + \dots + \text{TKBmMA-CA}) + \text{Soma}(\text{TKBmCA-MA} + \dots + \text{TKBmAA-PM}) \quad (3)$$

Ou seja: o TKB médio final é a soma dos TKB's médios de todos os trechos vazios e carregados.

Para corrigir o eventual desvio acima do percentual estabelecido, poderão ser eliminados dados de trens NonTO - completos (ou seja, em todos os trechos) e inserir novos dados de trens Non TO.

20. Os resultados finais serão então obtidos, para cada modo de operação, da seguinte forma:

Tempo de percurso médio final:

$$\text{TmFinal} = \text{Soma}(\text{tmPM-AA} + \dots + \text{tmMA-CA}) + \text{Soma}(\text{tmCA-MA} + \dots + \text{tmAA-PM}) \quad (4)$$

Ou seja: o tempo de percurso médio final é a soma de todos os tempos médios de vazios e carregados.

Eficiência Energética Final:

$$\text{EEfinal} = \frac{\text{Soma}(\text{fmPM-AA} + \dots + \text{fmMA-CA}) + \text{Soma}(\text{fmCA-MA} + \dots + \text{fmAA-PM}) * 1000}{\text{Soma}(\text{TKBmPM-AA} + \dots + \text{TKBmMA-CA}) + \text{Soma}(\text{TKBmCA-MA} + \dots + \text{TKBmAA-PM})} \quad (5)$$

Ou seja, a Eficiência Energética final para cada grupo de trens será a soma dos consumos médios de vazios e carregados multiplicado por 1.000, dividida pela soma dos TKB's médios de vazios e carregados.

Os resultados dos cálculos acima serão os dados finais para comparação.

21. Os esforços máximos admitidos em trens operados com o sistema *Trip Optimizer* serão:
Choque de tração ou compressão: 50 tf

Forças máximas contínuas de tração ou compressão: 156,8 tf

22. Antes da rotina de testes (30 viagens de trens TO) a GE deverá enviar um plano completo de viagem para o trem vazio e para o trem carregado.

Este plano de viagens será então reproduzido com o uso de simuladores de dinâmica operacional da Vale, e seus resultados serão avaliados pela equipe técnica da engenharia de operações ferroviárias da VALE.

6. CONCLUSÕES

Uma grande evolução ocorreu no desempenho do sistema de condução autônoma durante o período de desenvolvimento e testes na EFC, nos últimos dois anos.

O *train handling* foi significativamente melhorado, resolvendo a maioria das questões relacionadas aos esforços nos engates.

A adequação do tempo de percurso aos trens atuais e a introdução de novas funcionalidades ao sistema permitiu reduzir notadamente o consumo de combustível dos trens operados pelo *Trip Optimizer*, que agora começa a apresentar resultados positivos.

Todavia, alguns problemas são remanescentes do início do projeto, e ainda carecem de desenvolvimento para que a operação do sistema seja confiável, sem falhas: comunicação terra-trem e início das viagens, destacadamente merecem melhorias.

A automação da aplicação dos freios a ar já é possível, e sua introdução aos sistema da EFC seria bastante oportuna, devendo ser negociada e incorporada assim que possível.

A viabilidade econômica assegurada pela economia de combustível, associada aos demais benefícios que um sistema de condução autônoma pode trazer à uma ferrovia, indicam a conveniência e oportunidade para uma mudança de patamar na operação dos trens, especialmente face ao rápido desenvolvimento desta tecnologia, podendo incorporar ganhos ainda maiores em um futuro próximo.