

FREIOS ELETROPNEUMÁTICOS NA ESTRADA DE FERRO VITÓRIA A MINAS

Hélvio Luiz Ghélere

VALE – Vitória - Brasil

RESUMO

O presente trabalho objetiva demonstrar os resultados de experimentos comparativos entre freios eletropneumáticos e convencionais na EFVM. Foram instalados freios eletropneumáticos em um trem com 2 locomotivas e 168 vagões de minério e realizadas numerosas viagens para aquisição de dados, comparando-se os resultados de tempo de percurso, choques nos engates e consumo de combustível com trens convencionais. O experimento permitiu avaliar os prós e contras de ambos os sistemas quanto ao controle de velocidade, distância de frenagem, precisão nas paradas, adequação à frota de material rodante e ao modelo operacional dos trens de minério. Foi possível constatar que os trens equipados com freios eletropneumáticos apresentaram aumento no consumo específico de 0,5%, redução do tempo de percurso de 4,7%, aumento da vida útil dos engates em 26,4 % devido à redução dos choques, e aumento de 19,2% na utilização de freios.

ABSTRACT

The present work aims to demonstrate the results of comparative experiments between electro-pneumatic and conventional brakes in EFVM. Two locomotives and 168 iron ore cars were equipped with electro-pneumatic brakes and numerous tests were carried out for data acquisition, comparing transit time, internal forces and fuel consumption with conventional trains. The experiments allowed evaluating pros and cons of both systems regarding speed control, braking distances, stops accuracy, adaptation to the rolling stock and operating standards of the ore trains. It was also possible to conclude that electro-pneumatic equipped trains showed an increase in the fuel consumption of 0.5 %, reduction of 4.7% in transit time, increase of 26.4 % in couplers life cycle due to reduced shocks, and 19.2% increase in the use of air brakes.

1. OBJETIVOS

Demonstrar o desempenho comparativo dos freios convencionais e eletropneumáticos (*ECP*) em trens de minério de ferro na Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), analisando os resultados de consumo de combustíveis, tempo de percurso, esforços nos engates, adequação dos equipamentos à frota de vagões e locomotivas, adequação da operação com freios *ECP* ao modelo operacional corrente e comportamento geral dos equipamentos *ECP* durante testes conduzidos entre 2009 e 2010.

2. INTRODUÇÃO

Os freios convencionais (ou pneumáticos) utilizados em todos os vagões de transporte de cargas no Brasil possuem características de funcionamento já bastante conhecidas no meio ferroviário. A atuação dos freios é comandada pela modulação da pressão no encanamento geral que percorre toda a composição.

Esta forma de atuação gera atrasos na aplicação e no alívio de freios dos vagões que estão mais distantes da locomotiva; estes atrasos podem induzir a formação de ondas de choques nos engates, dependendo da forma de operação, tamanho do trem, pesos e distribuição dos vagões nos trens, tração distribuída, velocidade, perfil planialtimétrico, etc. Dependendo destas condições, os choques assim gerados podem atingir valores acima dos limites admissíveis, ocasionando redução na vida útil dos engates e aparelhos de choque e tração, quebras nos engates e até mesmo acidentes decorrentes destas quebras.

Com o aumento no tamanho dos trens e no peso das cargas/eixo dos vagões, estas ocorrências podem se agravar, assumindo proporções significativas em uma ferrovia *heavy haul*, como a EFVM, EFC e MRS. Uma possível solução para reduzir a formação das ondas de choques nos engates e suas consequências é a utilização de freios eletropneumáticos.

O freio eletropneumático consiste em um conjunto de equipamentos e softwares instalados nos vagões e nas locomotivas que proporcionam o controle dos freios convencionais de uma composição ferroviária através de comandos eletrônicos, por meio de um cabo elétrico (*trainline*) que percorre toda a composição e aciona as válvulas eletropneumáticas nos vagões, possibilitando uma série de benefícios operacionais.

Conforme diversos estudos e experiências realizadas em outras ferrovias ou através do uso de simuladores, a utilização de freios *ECP* em trens pode gerar redução no consumo de combustível e tempo de percurso dos trens, trazendo ainda benefícios adicionais como economia de sapatas de freio e rodas e também redução de choques internos na composição, com prováveis reflexos em aumento da vida útil dos aparelhos de choque e tração e redução de descarrilamentos.

Com o objetivo de verificar a real ocorrência destes ganhos, foi realizada a aquisição de um sistema de freios eletropneumáticos para equipar um trem-tipo na Estrada de Ferro Vitória a Minas – EFVM – para a realização de testes comparativos entre os modos de operação de trens com freios pneumáticos (ou convencionais, como serão tratados neste artigo) e trens com freios eletropneumáticos.

O presente estudo registra as ações desenvolvidas durante os experimentos, dificuldades encontradas e suas soluções, e os resultados para os principais parâmetros mensuráveis: consumo de combustíveis, tempo de percurso e esforços internos na composição.

3. FUNDAMENTAÇÃO E DESCRIÇÃO TÉCNICA

Originalmente desenhada para utilização em metrô e trens de passageiros, a válvula de freio eletropneumática é também utilizada em trens de carga. Suas maiores vantagens são a rápida e simultânea atuação dos freios em todos os vagões de uma composição e que associada ao alívio gradual, possibilita ao maquinista um controle rápido e seguro de todo o trem, o que não pode ser obtido nos mesmos padrões com a utilização de válvulas de freio comuns.

Os atuais sistemas de freio da EFVM funcionam através da transmissão de sinais pelo ar do encanamento geral (EG) da composição. Estes sinais – que correspondem à modulação da pressão no EG – iniciam-se na parte frontal do trem e são transmitidos por esta tubulação até a parte traseira do mesmo. Desta forma, haverá sempre um tempo dispendido na transmissão dos comandos de frenagem. Este tempo é comumente denominado de taxa de propagação e ocasiona a frenagem dos vagões em diferentes instantes; por este motivo, durante uma aplicação de freios, enquanto os vagões da parte anterior do trem já estão freando, outros continuam aliviados na parte posterior, retardando a desaceleração, comprimindo a parte intermediária do trem e gerando uma série de choques nos engates.

Por outro lado, quando os freios são aliviados, a parte posterior da composição solta os freios primeiro e começa a puxar a parte posterior, que continua freando até que o sinal de alívio seja recebido por estes vagões.

Ambos os cenários costumam gerar elevados choques e forças de tração e compressão nos engates, reduzindo sua vida útil e consumindo energia desnecessariamente.

3.1 Expectativas de ganhos e aplicabilidade

As principais expectativas em relação ao uso do freio eletropneumático podem, então, ser assim relacionadas:

(Atuação simultânea de todos os freios) + (Alívio gradual dos freios) + (Melhor controle de velocidade) + (Redução das distâncias de frenagem) + (Maior precisão nas paradas) + (Tração distribuída via cabo) = Redução de choques na composição + Redução no tempo de percurso + Economia de combustível.

Como podem ser mensurados, estes foram os parâmetros escolhidos para estudo e avaliação com o trem-teste na EFVM.

O sistema *ECP* pode ser aplicado em quaisquer vagões – carga ou passageiros – cada um buscando diferentes resultados. A aplicação em trens de minério da EFVM pode buscar pelos resultados nos três indicadores relacionados, enquanto o trem de passageiros buscará por redução no tempo de percurso e conforto dos passageiros, principalmente, através da maior precisão no controle de velocidade e frenagens.

Obviamente alguns parâmetros podem se tornar conflitantes: ao se buscar por melhor tempo de percurso, pode-se perder no consumo de combustível e vice-versa. Da mesma forma, maiores velocidades podem implicar em aumento dos choques entre os vagões.

3.2 Formação e Operação de um sistema de freios eletropneumáticos

Para que um trem eletropneumático opere, os vagões e as locomotivas devem estar equipados com um conjunto de equipamentos *ECP*. As locomotivas e os vagões são interligados por um cabo elétrico, estabelecendo uma rede de comunicações intra-trem, completada por uma unidade EOT acoplada à cauda da composição:



Figura 1: Rede de comunicações de dados – Echelon

As informações de condição e controle do trem são transferidas entre as locomotivas, da locomotiva aos vagões, dos vagões às locomotivas e de vagão para vagão, na forma de pacotes de mensagens para controle de: gerenciamento da rede, composição, freios, alimentação, condição (status) e mensagens de exceção. O sistema *ECP* trata as informações e mantém o maquinista atualizado sobre o desenvolvimento das operações.

O sistema de controle dos freios na cabine do maquinista é o *EBV* – mesmo controle disponível para os maquinistas em locomotivas com freio convencional. Para alívio ou aplicação dos freios, o maquinista realiza os mesmos comandos que realizaria em um trem com freios convencionais. A unidade de controle envia a informação a todos os vagões, que recebem, interpretam e liberam ar do reservatório auxiliar para o cilindro de freio até que a aplicação seja atingida. Os microprocessadores dos vagões monitoram continuamente a

pressão nos cilindros de freio para garantir a aplicação, mesmo com vazamentos, mantendo a pressão necessária.

O alívio dos freios, ao contrário do sistema pneumático convencional, pode ser parcial e gradual; caso deseje-se aplicar novamente os freios, não é necessário aliviá-los por completo, como ocorre nas válvulas pneumáticas comuns.

Caso o comando de freio não seja transmitido, o vagão da cauda enviará mensagens com o status de frenagem. Todos os vagões da composição monitoram essas mensagens e se um deles obtiver falha na recepção por três tentativas o sistema considera que o trem está quebrado ou houve um problema na transmissão do sinal, e inicia automaticamente uma parada de emergência.

A operação de um trem *ECP* apresenta algumas características marcantes, que a diferem substancialmente da operação do trem com freios convencionais:

- A aplicação de freios é comandada por um cabo elétrico que percorre toda a composição;
- A aplicação e alívio de freios ocorrem simultaneamente em todos os vagões, bem mais rápido do que no freio pneumático;
- O alívio de freios é gradual;
- As distâncias e tempos de parada são significativamente reduzidos;
- A tração distribuída ocorre com comando pelo cabo elétrico: o rádio não é utilizado para este processo;
- A pressão no encanamento geral – EG - é mantida em 90 psi durante toda a operação, inclusive durante a aplicação de freios (exceto durante emergências, quando o EG vai a zero);
- O desacoplamento do cabo elétrico ou da mangueira do EG geral provoca emergência;
- O trem *ECP* precisa de uma unidade de *End of Train* – *EOT* - acoplada ao último vagão da composição para operar.

Algumas características são comuns a ambos os modos de operação:

- A força motriz para o acionamento dos freios continua a ser o ar comprimido dos reservatórios auxiliar e de emergência dos vagões;
- Os vagões *ECP* podem passar pelos viradores, normalmente;
- Os vagões *ECP* podem ser desacoplados da mesma forma que os convencionais: é recomendável desacoplar os cabos manualmente, mas não é necessário.

Ao possibilitar o alívio gradual dos freios e minimizar a ocorrência de ondas de choques nos engates, o freio *ECP* possibilita ao maquinista fazer melhor uso da inércia do trem, reduzindo a utilização do acelerador.

Ao iniciar uma descida de rampa, o maquinista pode permitir ao trem atingir maior velocidade em comparação ao trem com freios convencionais, pois se torna possível retardar a aplicação de freios, dado que a atuação dos freios *ECP* é mais rápida; ao mesmo tempo, o maquinista não mais necessita ser tão precavido com relação ao valor da aplicação inicial de freios: é possível modular para mais ou para menos a aplicação inicial de freios, com menor preocupação com as ondas de choques nos engates. Por fazer uso da inércia do trem e tendo a

gravidade como aliada, o maquinista pode então ganhar velocidade sem gastar combustível por confiar mais nos freios ECP, ganhando tempo de percurso e reduzindo o consumo de combustível.

Em outra situação, ao se aproximar do ponto de inversão das rampas em um fundo de vale (SAG), o maquinista pode reduzir gradualmente a utilização dos freios dos vagões, aproximando-se ao máximo do limite de velocidade do trem e utilizar a aceleração somente quando necessária, aproveitando-se novamente da inércia e da gravidade para economizar combustível e, obviamente, ganhar tempo no percurso.

3.3 Fontes de energia

Todos os vagões possuem baterias recarregáveis para prover a alta demanda de energia dos solenoides. As baterias são recarregadas com energia proveniente de uma fonte de alimentação instalada na locomotiva, através dos cabos de transmissão dos vagões.

O sistema de cabeamento usa em torno de 25% da capacidade do sinal para o comando de freio e status das mensagens. Tração distribuída pode usar entre 10-15%, restando 60-65% da capacidade do sinal para monitoramentos especiais como sensores de pressão, temperatura e etc.

3.4 Tipos de válvulas ECP

Dois tipos de válvulas ECP estão disponíveis no mercado: *stand-alone* e *overlay*.

A válvula *stand-alone* substitui todo o conjunto de válvulas pneumáticas em uso, e somente permite ao vagão operar os freios quando conectado a uma locomotiva com sistema ECP instalado.

A válvula *overlay* é interligada ao conjunto de válvulas pneumáticas existentes e permite ao vagão operar em quaisquer modos: pneumático ou eletropneumático.

Para o trem-teste da EFVM optou-se pela aquisição de válvulas *overlay*, para permitir o estudo comparativo de desempenho entre os dois sistemas de operação de freio. A válvula *overlay* é totalmente compatível com válvulas pneumáticas (quando operando no modo pneumático) e também com as válvulas *stand-alone*, mas possuem custo superior a estas: aproximadamente 35%.

3.5 Componentes de um sistema de freios ECP

A figura abaixo ilustra, resumidamente, os equipamentos que compõem o sistema eletropneumático de um trem:

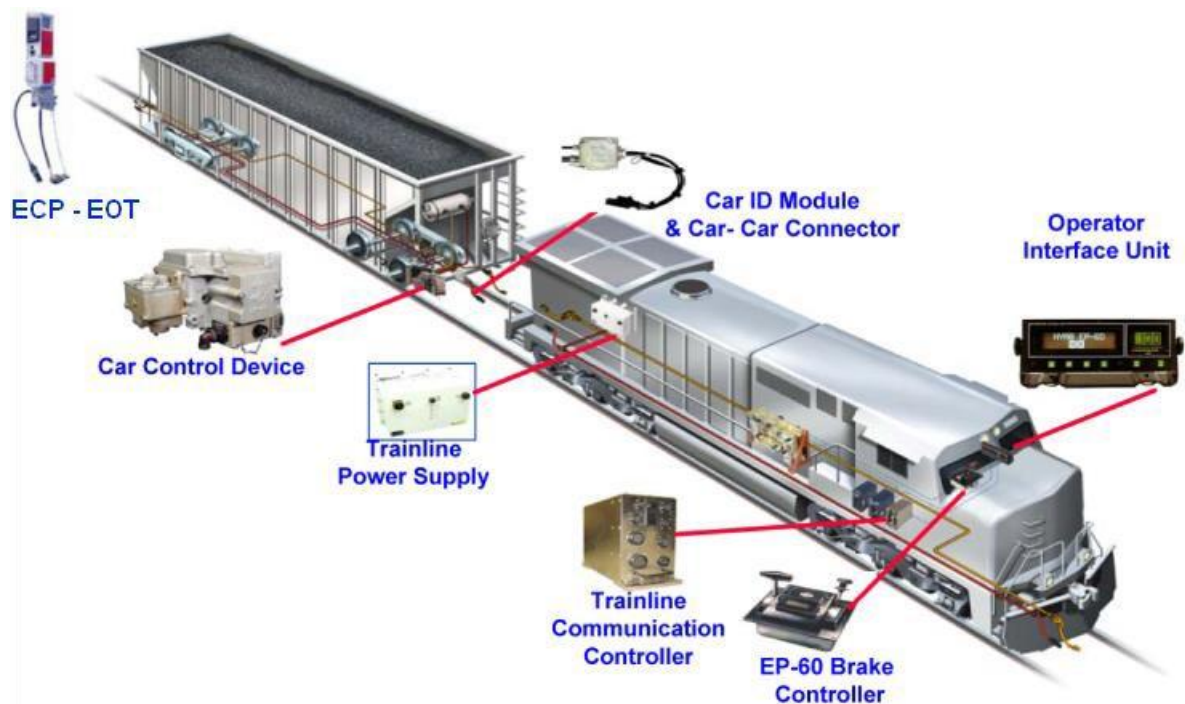


Figura 2: Trem eletropneumático

As locomotivas são equipadas com:

- 1 *Trainline Power Supply (TPS)*;
- 1 *Trainline Communication Controller (TCC)*;
- 1 *Car ID Device (CID)*;
- 1 *Operator interface unit (OIT)*;
- 4 *Junction Box*, e
- 4 cabos elétricos.

Cada dupla de GDE's é equipada com:

- 1 *Car Control Device (CCD)*;
- 1 *Car ID Device (CID)*;
- 4 *Junction Box*, e
- 3 cabos elétricos.

1. *Trainline Power Supply (TPS)*: fonte de alimentação que fornece energia para a operação das válvulas eletropneumáticas dos vagões, 24 ou 230 VDC.

2. *Trainline Communication Controller (TCC)*: computador do sistema EPC, o Controlador de Comunicações da Linha do Trem (*TCC*) fornece a interface entre a locomotiva principal e o trem para controlar a frenagem dos veículos, controle das locomotivas rebocadas e para reportar a condição do trem e informações de diagnóstico. O *TCC* contém um único

computador de bordo (*SBC*) e um processador de controle do freio. Uma função importante do *TCC* é o gerenciamento da rede do sistema de comunicações da linha do trem.

3. *EP-60 Brake Controller*: a interface homem-máquina para o sistema de freio *CCB II* é a Válvula do Freio Eletrônico (*EBV*). O *EBV* contém alavancas para operação dos freios automático e independente, e é o equipamento padrão já existente nas locomotivas que receberão o sistema *ECP* na VALE.

4. *Operator interface unit (OIT)*: a Unidade de Interface do Operador fornece a interface entre o sistema de freio *EP-60* e o operador do trem para configuração do trem, exibição dos comandos de freio, alarmes do sistema e exibição das informações operacionais. Nas locomotivas em teste, as *OIT's* estão integradas ao sistema da locomotiva, não requerendo a instalação de monitores extras.

5. *Car ID Device (CID)*: a unidade de identificação do veículo é incluída como parte de uma caixa de junção que conecta o *CCD* ao cabo da linha do trem. Este módulo identifica o número do veículo e permite o sequenciamento dos vagões / locomotivas na listagem do trem que é disponibilizada pelo sistema ao maquinista.

6. *Car Control Device (CCD)*: o dispositivo de controle do vagão é um pacote de controles integrados eletrônicos e pneumáticos, o qual faz interface com os equipamentos de freio convencional e o *trainline*, proporcionando controle eletropneumático dos freios do vagão.

7. *Junction Box* e cabos elétricos: o cabo elétrico que percorre toda a composição, ligando as locomotivas a todos os vagões, é conectado entre os veículos através de cabos especiais que podem ser desacoplados automática ou manualmente, ligados a caixas de passagem (*junction box*).

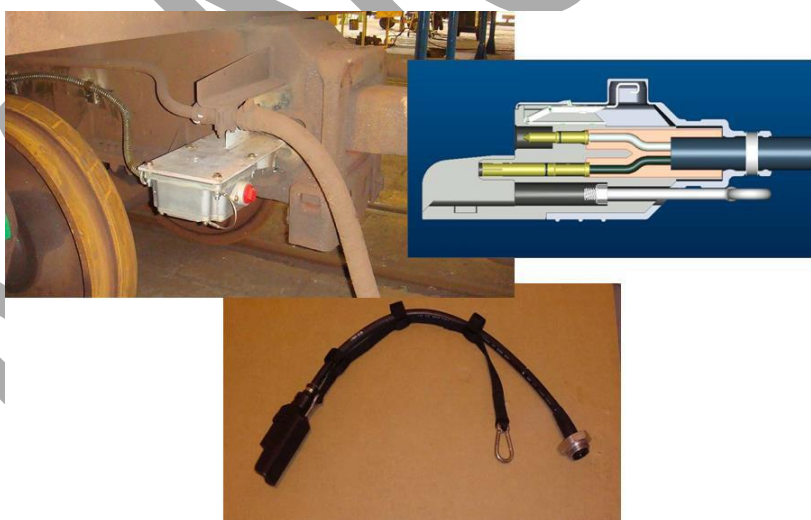


Figura 3: *Junction Box* e Cabos Elétricos entre os veículos

8. *End of Train (EOT)*: a unidade do final do trem tem como principais funções: o fechamento (conclusão) da linha de comunicação, informação da pressão na cauda e sinal de trem completo ao maquinista.

9. *Single Car Test Device*: equipamento utilizado para configuração e teste de funcionamento de equipamentos *ECP* em vagões.

4. CENÁRIO

A aquisição de dados ocorreu durante a realização de 76 testes com uma composição de 2 locomotivas Dash-9 + 168 vagões GDE equipados com freios eletropneumáticos do tipo *overlay*, que permite operar trens em ambos os modos operacionais com os mesmos vagões.

Os dados foram obtidos de viagens entre o porto de Tubarão e diferentes minas. Cada viagem foi conduzida no mesmo modo operacional em todo o ciclo: os trens vazios circularam de Tubarão às minas e voltaram carregados a Tubarão em um mesmo modo de freios – convencionais ou eletropneumáticos durante toda a viagem.

- Período de Aquisição de Dados: 24/04/09 a 27/09/10
- Origem / Destino: Trens vazios do porto de Tubarão (Vitória / ES) às minas de Brucutu, Gongo Soco ou Bicas, no estado de Minas Gerais, e os trens carregados todos com destino a Tubarão.
- Paradas: o tempo decorrido durante as paradas não foi considerado para o cálculo do tempo de percurso; da mesma forma não foi considerado o consumo de combustível ocorrido durante as paradas.
- Número de trens testados: Convencionais: 41 / Eletropneumáticos: 35

5. METODOLOGIA PARA AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

5.1 Consumo de combustíveis e tempo de percurso

Os dados dos trens testados foram extraídos dos registradores de eventos das locomotivas (*ROT*) e também do sistema *Unilog*.

O consumo de combustível foi obtido através do cálculo “teórico-prático”, ao invés do consumo real ocorrido em cada trem. Para tal, foram utilizados dados dos *ROT*'s e da tabela de consumo horário por ponto de aceleração das locomotivas Dash 9 (GE EFVM Dash-9 *fuel consumption table*).

Com o tempo total ocorrido em cada ponto de aceleração (*ROT*) e o consumo de combustível por ponto de aceleração em mãos, basta multiplicar os pares correspondentes e somar as parcelas para se obter o consumo total em uma viagem.

A Eficiência Energética (*EE*) foi obtida dividindo-se o consumo total de combustível pela *TKB* (tonelada quilômetro bruto) do trem, esta obtida do sistema *Unilog*.

Assim, **$EE = 1.000 \times \text{Consumo} / \text{TKB}$** , onde:

Consumo = consumo total em uma viagem completa (vazio + carregado) (em litros).

TKB = Tonelada quilômetro bruto, ou a soma do peso total do trem multiplicado pela distância trafegada, obtida diretamente do *Unilog*.

No exemplo abaixo:

TKB = 11.167.640 e consumo igual a 18.976 litros, assim:

$EE = 1.000 \times 18.976 / 11.167.640 \rightarrow EE = 1,699 \text{ litros/k.TKB}$

O tempo de percurso também vem diretamente da tabela abaixo, da locomotiva líder:

$TT = 15,06 + 14,32 \rightarrow TT = 29,38 \text{ hours}$.

Tabela 1: Exemplo de cálculo de consumo de combustível e tempo de percurso

Throttle position	Empty train		Loaded train		Fuel consumption	
	Loco 1 seconds	Loco 2 seconds	Loco 1 seconds	Loco 2 seconds	liters/hour	liters/hour X notch
1	2470	1360	1450	1451	42,59	80
2	3577	1748	1780	1779	87,9	217
3	7296	3745	2571	2567	192	863
4	5055	2456	2664	2662	271,91	970
5	7493	4657	4084	4085	387,59	2.188
6	15304	6760	14833	14828	497,59	7.149
7	4843	3271	769	770	608,01	1.630
8	7915	4976	7543	7545	720,4	5.599
DB	0	0	9339	9334	45,01	233
Idle	278	0	6511	6501	12,68	47
Total (s)	54231	28973	51544	51522	---	---
Total (h)	15,06	8,05	14,32	14,31	---	18.976

A principal razão para este processo, ao invés de usar dados diretos do consumo que poderia também ser obtido do *Unilog*, é isolar e remover dos cálculos os tempos e consumos ocorridos em atividades paralelas. Embora estas atividades ocorram em ambos os modos operacionais estudados – freio convencional ou eletropneumático – interferências significantes poderiam ocorrer. As mudanças esperadas nos tempos e consumos situam-se na faixa de 1 a 3%; todavia, mudanças nos processos operacionais podem exceder largamente estas expectativas, anulando a confiabilidade do consumo de combustíveis baseado diretamente no abastecimento direto das locomotivas, assim como nos tempos informados no sistema *Unilog*, o qual não reflete com precisão os tempos durante as paradas.

Principais fatores que interferem nos resultados:

- O volume final no tanque, após o abastecimento, nem sempre ocorre com a necessária precisão (15.000 litros). Na prática, valores entre 14.500 e 15.500 litros já foram identificados na saída das bombas.
- Após o abastecimento, outras atividades são executadas com as locomotivas, antes de serem acopladas ao trem-teste; como o tempo de espera das locomotivas antes da partida tende a ser maior para o trem *ECP* do que o convencional, estas atividades podem interferir no consumo final, de forma negativa para o trem *ECP*.
- As paradas no trecho ocorrem em quantidades e intervalos irregulares;
- A duração das atividades na mina de Brucutu pode ser irregular;
- Após a chegada em Tubarão, as locomotivas podem executar outras atividades antes de ocorrer o abastecimento.

Assim, ao adotar-se o consumo específico calculado com base no ROT e eliminar os tempos em que os trens estiveram parados, a maioria dos fatores acima deixa de existir, ou tem seus efeitos minimizados, como no caso das paradas ao longo do trecho.

5.2 Esforços nos engates

Os vagões GDE são duais, compartilhando os equipamentos de freio: entre os dois vagões de uma dupla há uma haste rígida de ligação, e não um engate.

Cinco hastes rígidas ao longo do trem receberam sensores especiais e sistemas de aquisição de dados para monitoramento dos esforços durante todas as viagens. Uma empresa terceirizada foi responsável pela instalação, coleta e análise dos dados, comparando trens *ECP* e não *ECP*, e emitiu um relatório conclusivo sobre os esforços internos nos engates, analisando a vida útil em fadiga destes equipamentos, e também o trabalho realizado pelos freios em cada modo de operação.



Figura 4: Hastes instrumentadas e registrador de dados

6. DESENVOLVIMENTO

Durante os testes, várias dificuldades ocorreram nos processos de formação e operação dos trens, causando atrasos e requerendo pessoal habilitado para a solução de contingências. Desta forma, é necessário considerar a confiabilidade do equipamento como parte importante na decisão sobre o futuro dos equipamentos *ECP* na EFVM. A formação de trens *ECP* em Tubarão demonstrou ser morosa, principalmente devido a dificuldades em identificar e corrigir problemas com o *trainline*, causando severos impactos na produção.

Além das falhas em equipamentos, dois outros fatores contribuíram negativamente:

- 1. Falta de pessoal treinado durante a formação:* Tubarão tem um grande número de *manobradores*, e o trem *ECP* é apenas um dentre muitos trens convencionais. Assim, foi necessário multiplicar sessões de treinamento para educar e manter pessoal treinado na operação do *ECP*, especialmente na resolução dos problemas de formação dos trens.
- 2. Demora para que um mesmo maquinista voltasse a operar o trem-piloto no modo ECP:* da mesma forma que acima, houve dificuldades para os maquinistas manterem o conhecimento dos procedimentos operacionais do trem *ECP*, afetando os resultados de consumo de combustível e tempo de trânsito.

6.1 Equipamentos Eletropneumáticos: Confiabilidade e Impactos Operacionais

Falhas na operação de trens com equipamentos *ECP* ocorreram principalmente devido aos seguintes fatores:

6.1.1. Cabos elétricos danificados nos viradores: quando os lotes são separados, os cabos são, às vezes, posicionados erradamente sobre os engates, e depois esmagados pelos braços dos

viradores. Embora vários treinamentos tenham sido dados aos manobreadores e inspetores dos viradores, o problema sempre persistiu.

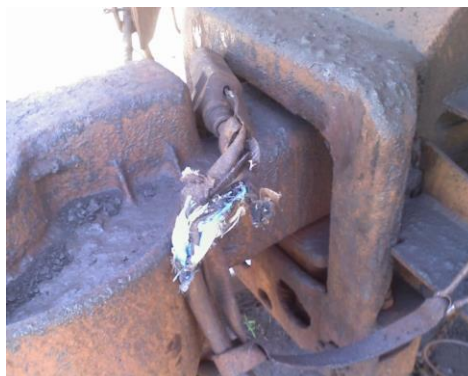


Figura 5: Cabo esmagado pelo braço do virador

6.1.2. *Desacoplamentos / falhas dos cabos elétricos durante descarga dos vagões:* no início os cabos *ECP* eram posicionados entre os engates e a mangueira do encanamento geral, sendo excessivamente tracionados durante a descarga nos viradores, *ocorrendo* desengates e danos aos cabos ou entortando os pinos dos engates dos cabos, causando maus contatos e operação irregular do sistema *ECP*, que são particularmente difíceis de localizar e corrigir.

A disposição dos cabos *ECP* nos vagões GDE não atendeu a duas importantes premissas:

1. Quando desacoplados, os conectores dos cabos *ECP* devem permanecer no mínimo 5 cm acima dos trilhos, evitando se chocarem com quaisquer obstáculos. Isto também evitaria a necessidade de posicionar o cabo em local seguro, permitindo manobras sem cuidados especiais, especialmente pelos viradores e *hump yard*. Sem atender a esta premissa, cada desacoplamento de vagões requer que os cabos sejam desacoplados manualmente e posicionados em local segura, requerendo mão de obra extra e perda de tempo.



Figura 6: – Conector desgastado (esquerda), e posição segura (direita)

2. Durante a descarga nos viradores, os cabos não deveriam ser excessivamente tracionados, de maneira a evitar o desgaste prematuro no sistema de travamento dos seus conectores. Todavia, este desgaste ocorreu rapidamente, inutilizando os cabos e multiplicando os casos de desacoplamentos inesperados.



Figura 7: Conectores avariados por desgaste prematuro e trinca

Este desgaste ocasionou muitos casos de desconexão parcial ou total durante a descarga, interrompendo o *trainline* e causando atrasos na formação dos trens.

Esta situação persistiu durante todo o período de testes, durante o qual várias tentativas de correção foram realizadas sem a obtenção de uma solução adequada. A adequação do *ECP* para vagões GDE consistiu em uma situação peculiar que não tinha sido confrontada pelo fornecedor antes: o vagão GDE é relativamente baixo, e sua descarga é realizada em viradores, ao contrário de outras ferrovias onde os freios *ECP* são correntemente utilizados.

Assim, o ajustamento do comprimento do cabo tornou-se crítico: quando aumentado ou reposicionado para permitir a descarga nos viradores, tornava-se muito longo e arrastava no chão quando desacoplado; no caso contrário, ao serem reduzidos ou reposicionados para não arrastar quando desacoplados, tornavam-se curtos para os viradores.

6.1.3. 3. Desgastes dos cabos elétricos e mangueiras do encanamento geral: com o atrito freqüente entre os cabos e mangueiras e entre os cabos e as alavancas de desacoplamento dos engates, tantos os cabos elétricos quanto as mangueiras começaram a mostrar sinais de desgaste. Algumas mangueiras começaram a mostrar a lona, podendo ocorrer perfurações se o processo assim continuasse. Alguns cabos elétricos demonstraram desgaste acentuado no revestimento de borracha, quase atingindo a malha de aterramento por fricção com mangueiras ou alavancas de desacoplamento.



Figura 18 – Desgaste nas mangueiras e cabos elétricos

6.1.4. *Mosquetões*: ocorreram muitos furtos dos mosquetões, sujeitando os cabos eléctricos a serem prematuramente danificados. Para uso futuro, os mosquetões devem ser substituídos por outras peças que permitam a troca rápida dos cabos, quando necessário, e que não sejam atraentes para furtos.



Figure 19 – Cabos, alças e mosquetões

Durante os testes, na busca por uma solução para os diversos problemas apresentados pelos cabos eléctricos, a instalação dos mesmos foi modificada no trem *ECP*:: as caixas de junção foram substituídas por novo modelo, e o *trainline* e as novas caixas de junção foram movidos para o outro lado do engate. Esta modificação resolveu parcialmente os problemas com cabos eléctricos: não há mais interferências entre mangueiras, cabos e alavancas de desengate; há comprimento satisfatório e espaço para o movimento do cabo durante a descarga nos viradores, e altura suficiente acima dos trilhos quando os cabos estão desacoplados.



Figura 20 – Nova posição dos cabos no lado oposto do engate, e novas *EOC-JB*'s

Em substituição aos mosquetões originais dos cabos eléctricos e que eram alvo constante de furtos, foram instalados suportes em forma de “oito”, fabricados sob encomenda e que

deveriam suportar a força necessária para desacoplar os cabos durante o corte de vagões em manobras.

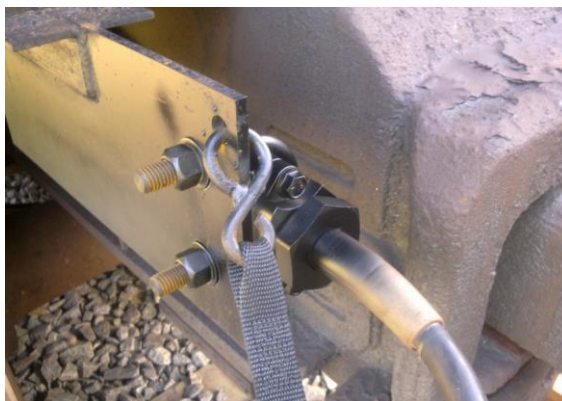


Figura 20 – Suportes em “oito”

Após as modificações no posicionamento das caixas de passagem e dos cabos elétricos entre os vagões, o sistema eletropneumático apresentou sensível melhoria em sua confiabilidade, embora ainda apresentando algumas irregularidades relativas aos equipamentos ou na forma como o sistema é utilizado:

1. Conectores quebrados.

Alguns conectores foram encontrados com os pinos internos quebrados por cisalhamento; isso ocorre quando os conectores são submetidos a forças laterais excessivas (para as quais não foram dimensionados) ao serem inadequadamente pisados para a transposição dos vagões, por exemplo.



Figura 3 – Conectores com pino danificado

O treinamento e conscientização dos empregados pode resolver em parte o problema, mas o sistema ainda fica sujeito a avarias por pessoas que transpõem as composições estacionadas ao longo da ferrovia.

2. Cabos desacoplados: os cabos ainda desacoplam com certa frequência durante a descarga nos viradores.

6.1.5. *Baterias com falhas prematuras*: causando baixo número de carros *ECP* operacionais, evitando a formação no modo *ECP* ou causando falhas ao longo do caminho. Todas as baterias originais foram substituídas em garantia para um novo modelo de uso militar, e não ocorreram mais falhas desde então.

6.1.6. *Falhas no IDM e CCD*: causando a perda de funcionamento dos freios no vagão danificado, quando em modo eletropneumático. O índice de falhas foi elevado: 12,5% !.

Foram identificados 11 CCD's com avarias durante todo o período de testes, os quais foram retirados e encaminhados para manutenção. A manutenção desses equipamentos envolverá custos e considerável demora em seu retorno, já que a KBB deverá encaminhá-los para manutenção na NYAB, nos Estados Unidos: não há manutenção no Brasil.

É possível que parte das avarias tenha ocorrido pela não utilização do equipamento por longo período (mais de um ano), durante os estudos, testes e troca dos cabos elétricos para o lado oposto do engate, provocando o travamento de componentes internos, conforme informado por técnicos da NYAB. Continuam sendo falhas, de qualquer forma; não deveriam ocorrer, mesmo com o tempo em desuso.

6.1.7. *Infiltração de água em caixas de junção*: presença de água infiltrada na caixa de junção dos cabos elétricos entre os vagões, causando curtos-circuitos e danos aos conectores.

6.1.8. *Falha no TCC*: o mau funcionamento de um TCC (computador *ECP*) impediu uma locomotiva de trabalhar por 18 horas.

6.1.9. *EOT*: trata-se de um equipamento desnecessariamente grande e pesado, e os processos para sua instalação e remoção causam atrasos adicionais; são também um bom alvo para vandalismo. Uma falha na trava de uma *EOT* causou sua queda durante uma viagem e uma consequente emergência nos freios deste trem.

6.2 Aquisição e Análise de Dados

6.2.1 Consumo de Combustível e Tempo de Percurso

Os tempos e consumos foram adquiridos do sistema *Unilog* e do Registrador de Eventos (ROT) das locomotivas, para a análise comparativa de consumo e desempenho entre o modo pneumático e eletropneumático.

Em relação ao total de 76 trens analisados, 24 trens foram excluídos da análise, por não possuírem informações de ROT ou por apresentarem problemas nos arquivos do registrador de eventos que impossibilitavam a análise dos dados. Desta forma, foram analisados 52 trens nos modos eletropneumático e convencional de freios.

Tabela 2: Consumo de combustível e tempo de percurso

2009 / 2010			
Trem	TKB	Hora-Marcha	Consumo Específico
Pneum	11.033	28,53	1,535
	11.086	27,19	1,543
ECP / Pneum		95,3%	100,5%

O consumo calculado através de informações extraídas do ROT indica 0,5% de acréscimo no consumo dos trens *ECP* em relação aos trens convencionais.

Os trens *ECP* indicam 4,7% de ganho no tempo de percurso em relação aos trens convencionais. Apesar deste ganho, verificou-se uma considerável perda no tempo de formação dos trens em Tubarão.

6.2.2 Esforços nos Engates

Principais conclusões:

- A utilização de freios eletropneumáticos nos trens testados indica uma redução significativa nos choques nos engates, com um conseqüente aumento no tempo de vida útil em engates e aparelhos de choque e tração da ordem de 28,4%.
- A utilização de freios eletropneumáticos aumentou em 19,2% a potência de frenagem acumulada em relação aos trens convencionais, causando correspondente aumento no desgaste de rodas e sapatas de freios.

7. CONCLUSÕES

7.1 Consumo de Combustível e Tempo de Percurso

A economia de combustível pretendida com o projeto não foi alcançada durante os testes: o resultado final 2009/2010 aponta para 0,5% de acréscimo no consumo em relação aos trens convencionais. Admitida certa variabilidade no processo de testes, pode-se afirmar, na melhor das hipóteses, que a operação de trens com freios eletropneumáticos não apresentou economia de combustível nos testes realizados na EFVM.

Com a utilização dos freios eletropneumáticos, foi obtida uma redução média de 4,7 % na hora-marcha dos trens-testes. Variações nesses resultados podem ser obtidas, dependendo da forma como o trem é operado: o maquinista pode conseguir ganhos maiores na hora-marcha em detrimento do consumo de combustível e vice-versa. Todavia, os ganhos em tempo de percurso ocorridos durante as viagens foram superados pelas perdas em Tubarão, devido a problemas em restaurar a funcionalidade do *trainline*.

Pelo lado positivo, os freios eletropneumáticos demonstraram possibilitar ao maquinista melhores recursos para operar o trem em velocidades mais próximas da VMA por períodos mais prolongados, já que esses freios permitem maior precisão no controle da velocidade do trem, redução nas distâncias de parada, redução dos choques internos, maior desaceleração e

exatidão no local desejado para parada. A operação do trem no modo eletropneumático confirmou-se como bastante segura, sendo muito bem aceita pelos maquinistas de viagem.

Todavia, se a operação realizada não estiver focada em economia, o consumo de combustível pode ser maior que o trem com freios convencionais: o maquinista, sabendo que o trem freia melhor, mantém a aceleração por mais tempo e realiza frenagens mais curtas e bruscas, ao invés de apenas aproveitar-se da gravidade e da inércia do trem para fazer retomadas de velocidade mais econômicas, principal maneira de se obter redução de consumo de combustível com o emprego de freios eletropneumáticos.

7.2 Confiabilidade e Impactos Operacionais

Ainda que a maior parte das dificuldades técnicas tenha sido resolvida durante o desenvolvimento do projeto, o sistema eletropneumático apresenta algumas fragilidades que devem ser consideradas, ao compararmos o desempenho da frota com ou sem esses equipamentos instalados, já que estas fragilidades podem conduzir a frota de vagões a maior suscetibilidade a falhas, diminuindo o seu MKBF.

Estes problemas, remanescentes da instalação do sistema *ECP* nos vagões GDE carros não puderam ser resolvidos de forma satisfatória, sujeitando o trem a sucessivos fracassos durante o processo de formação, causando impactos significativos na operação em um ponto chave para a produção da EFVM: o pátio do porto de Tubarão.

Os cabos elétricos entre duplas são notavelmente frágeis e suscetíveis a avarias. Comparativamente ao restante dos equipamentos instalados nos vagões, é relativamente comum ocorrerem danos a esses cabos, principalmente quando são utilizados de forma inadequada. Por exemplo, ao serem pisados – indevidamente – para a transposição da composição, seja por empregados não treinados / não conscientizados ou por terceiros, o que ocorre com frequência relativamente alta ao longo da ferrovia, os conectores dos cabos sofrem danos, como os já relatados.

Ao mesmo tempo em que resolveu os problemas de interação entre cabos, mangueiras e engates e possibilitou deixar os cabos a uma altura segura do solo, a mudança dos cabos para o outro lado do engate tornou-os mais suscetíveis a esse tipo de avarias.

Se a avaria ocorrer ao longo da ferrovia, um trem com equipamentos eletropneumáticos do tipo stand alone sofrerá sérios transtornos, que somente serão solucionados com a troca do cabo e recuperação do modo eletropneumático. (Stand alone seria o modelo definitivo para implantação na frota, pelo menor custo, e que opera somente no modo eletropneumático de freios; o modelo atualmente em testes é o overlay, que pode operar em ambos os modos)

Avarias ou falhas podem vir a ocorrer também na operação em Tubarão ou nas minas, sempre que ocorrerem desacoplamentos de engates durante descarga, carregamento ou manobras, e os cabos não sejam operados corretamente, provocando atrasos.

Em uma situação em que os equipamentos estejam instalados em uma frota completa e em condições normais de operação e manutenção, o comportamento de todo o sistema eletropneumático seria afetado, possibilitando resultados mais favoráveis, como segue:

- O sistema deve ser instalado e operado de forma definitiva em toda a frota; isso possibilita que o pessoal envolvido tenha contato constante com o equipamento – e

não de forma eventual, como atualmente – e esteja sempre treinado nos corretos procedimentos para sua operação / manutenção, obtendo seu melhor desempenho;

- O sistema deve ser utilizado de forma constante, e não alternativa, de forma a mantê-lo sempre em condições normais de utilização, evitando falta de carga nas baterias e utilização das válvulas de freio eletropneumáticas;
- O sistema de manutenção – mão de obra, instalações, ferramental e peças de reposição – deve ser dimensionado e preparado para manter locomotivas e vagões em condições adequadas de operação, em níveis iguais ou superiores ao material rodante atual,

Excluídas as falhas de cabos elétricos e de processos na recepção, descarga e formação dos trens eletropneumáticos, conforme acima exposto, há condições técnicas para sua operação regular, mantendo ou melhorando os resultados de consumo, tempo de percurso, esforços internos e utilização de freios. A perda de tempo na formação dos trens eletropneumáticos em Tubarão, nessas condições, poderia ser considerada igual a zero, conservando-se o ganho em tempo de percurso time apurado nos testes anteriores.

Ainda, com a maturação dos processos operacionais, há margem para se obter mais ganhos no percurso sem impactar a eficiência operacional, conforme resultados obtidos em simulações.

7.3 Esforços Internos

A redução de esforços na composição proporciona aumento de 28,4 % na vida útil de hastes / engates e aparelhos de choque e tração, permitindo que o trem seja operado de forma mais segura e veloz, porém agregando o fator indesejado de aumentar em 19,2 % a potência de frenagem acumulada, em relação aos freios convencionais, o que se refletirá em proporcional aumento nos desgastes de sapatas e rodas.

7.4 Viabilidade econômica

A pretendida redução no consumo de combustíveis não se verificou: opostamente aos conceitos e estudos concluindo que a utilização de freios eletropneumáticos traria economia de combustível, no caso aqui estudado ocorreu acréscimo no consumo. E a suposta redução nos custos com combustíveis seria o principal sustentáculo para a implantação dos freios eletropneumáticos na EFVM, já que a redução obtida no tempo de percurso foi suplantada pelo maior tempo de formação em Tubarão, não trazendo benefícios ao ciclo dos trens e correspondente aumento de produção.

Ainda que o tempo de percurso pudesse ser considerado como ganho real, caso as perdas em Tubarão deixassem de existir em um projeto completamente implantado, a atual capacidade de produção da EFVM é suficiente para atender à projeção de demanda para o curto e médio prazo, ou seja, aumento de capacidade de produção não é requerido para o cenário próximo.

Desta forma, em função do alto custo para implantação, do acréscimo no consumo de combustível e do aumento no tempo de formação em Tubarão devido a problemas com cabos elétricos, eliminando assim os ganhos obtidos com a redução de hora marcha, o projeto do freio ECP na EFVM apresenta, nas condições atuais, inviabilidade econômica para sua implantação.

7.5 Considerações finais

O sistema de freios eletropneumáticos demonstrou possibilitar uma série de benefícios à ferrovia, notadamente os relacionados à segurança (freios simultâneos, alívio gradual, redução de choques, menores distâncias para desaceleração), tempo de percurso (melhor controle da velocidade) e manutenção (melhor distribuição dos esforços de frenagem ao longo da composição, redução dos choques = aumento da vida útil dos engates).

Os pontos negativos (aumento da dificuldade e do tempo de formação em Tubarão, colocação e retirada da EOT) são resultantes principalmente da má adequação dos cabos elétricos aos vagões GDE e de sua inerente fragilidade, e no referente ao consumo de combustíveis, onde não se verificaram os ganhos esperados.

A operação de todos os trens no modo eletropneumático, caso o sistema fosse instalado em toda a frota, iria solucionar a dificuldade de manter os maquinistas corretamente treinados em sua operação, podendo trazer melhores resultados em tempo de percurso e em consumo de combustíveis, algo de difícil realização na operação de apenas um trem teste em meio aos demais trens convencionais.

A utilização do sistema eletropneumático em outras ferrovias, ou até mesmo em outros modelos de trens, pode trazer resultados bastante diferentes. A forma como se utilizam os freios em uma composição pode ser significativamente alterada em função de muitos parâmetros, como os já citados neste trabalho.

Para que os freios eletropneumáticos apresentem resultados positivos de consumo de combustível seria necessário, antes de tudo, que o modelo de trem e as características da ferrovia demandassem a utilização de freios em grande escala. Em estudos realizados nos trens de minério da EFVM, constatou-se que os freios são utilizados em menos de 13% do percurso total, ou seja, a oportunidade para economizar combustível ou ganhar em tempo de percurso só existe, aproximadamente, nestes 13% da extensão total da ferrovia.

Desta forma, ferrovias com perfis mais acidentados e que demandem constante aplicação e alívio de freios podem se beneficiar muito mais do que ferrovias de traçados mais favoráveis. Conclusivamente, cada ferrovia, tipo de trem e modelo operacional deve ser estudado em laboratório e testado em um projeto piloto antes de se decidir pela implantação desta tecnologia, face ao seu alto custo de implantação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO Fº, R. P. e OLIVEIRA, F.M., *Estudo dos possíveis ganhos energéticos e operacionais devido à utilização de válvulas eletropneumáticas em vagões de trens da estrada de ferro Vitória-Minas*. XIV Congresso nacional de estudantes de engenharia mecânica. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

BARBOSA, R.S. *Estudo da dinâmica longitudinal do trem*. 1993. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1993.

BARBOSA, R. S. *Tratado de Estradas de Ferro Material Rodante*, Capítulo 4 Dinâmica de Veículos ferroviários. Editores: José Eduardo S. Castello Branco & Ronaldo Ferreira. Rio de Janeiro, 2000.

BRINA, Helvécio L, *Estradas de Ferro – Volume 1*. Belo Horizonte: Ed UFMG, 1988.

BUCHTER, Randy. *Electronically Controlled Pneumatic brakes being used on various railroads in the US*. <http://www.railway-technical.com>, Upgraded in March 2005.

KULL, R.C. *WABTEC ECP system update*. IEEE Vehicular Technology Society Land Transportation Division and ASME Trail Transportation Division Joint Railroad Conference. Toronto, 2001,

PALHANO, Anaximenes. *Operação de Trens com Válvula Eletropneumática em Simulador*. Centro de Excelência em Logística Ferroviária. CVRD. Vitória, 2008.

ROZA, Leopoldo Corrêa. *Dinâmica Ferroviária, Freios e Economia de combustível*, Notas de Aulas. Campinas, 1996.

ZHUAN X., Xia X., *Optimal Scheduling and Control of Heavy Haul Trains Equipped With Electronically Controlled Pneumatic Braking Systems*, IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2007.

MANUTA