



Otimização do trem-tipo de minério da EFC

GAESG-092-2003
RELATÓRIO TÉCNICO

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003		Fl.: 2/43
	Data 23/12/2003		Rev.: 02



RESUMO

O presente trabalho faz uma revisão do trabalho original GAVEN-002-2002 que primeiro ensaiou uma definição de tamanho ótimo para o trem de minério da EFC. Através do destaque das simplificações e fragilidades nas premissas e metodologia do trabalho original um novo modelo é desenvolvido o qual considera todas as componentes do ciclo de minério, parametrizando-as em função de variáveis-chave tais como a razão peso-potência, distribuição da tração, tamanho do trem, confiabilidade da frota, limites admissíveis de esforços nos engates, alocação de rebocadas boas para tração redundante, retorno menor, entre outras.

Uma função de mérito, J , é então definida como o montante anual de capital empregado na operação com uma configuração arbitrária de trem. O modelo desenvolvido é então aplicado a uma ampla faixa de TB/HP e de locos na tração do trem para determinar a configuração que minimiza o custo, J . Um algoritmo de pesquisa exaustiva foi implementado em uma rotina C++ compilada no LCC-Win32, produzindo um executável que rodava o algoritmo milhares de vezes em tempo viável.



Como resultado, planilhas de resultados com todos os parâmetros operacionais modelados foram geradas e analisadas produzindo a definição de um trem ótimo de 2 locos e 220 GDT em tração convencional para um programa de 70,5 MTPA (2004).

Portanto, pela peculiaridade da operação na EFC, cenários de aumento do tamanho dos trens passam obrigatoriamente por trabalhos prévios de levantamento de oportunidades de melhorias nos terminais de modo a minimizar o impacto associado às manobras de trens maiores.

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 3/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

INDICE

Introdução	04
Tecnologia de tração distribuída	05
Revisão do estudo original GAVEN-002-2002	06
Modelo paramétrico do ciclo de minério da EFC	07
Metodologia de solução do modelo por otimização	22
Resultados	29
Conclusões	37
ANEXO 1. Determinação do "perfil característico" da EFC	39
ANEXO 2. Simulações para determinação do tempo de viagem em função da razão (TB / HP)	41
ANEXO 3. Características das locações da EFC	43
ANEXO 4. Parâmetros da rotina validados pelas áreas da operação Norte	44

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 4/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

1. Introdução

a) Escopo

A EFC efetua todo seu transporte de minério em linha singela. Numa linha deste tipo, qualquer encontro de trens implica em um cruzamento tal que o trem menos preferencial pára numa linha desvio até que ocorra a passagem do trem prioritário pela direta. Deduz-se de imediato que a ocorrência de cruzamentos em linhas singelas impacta o ciclo e consumo pois implica no aumento de paradas e arrancadas do trem. Se a malha é homoganeamente espaçada, com igual número de trens em ambos os sentidos, o número total esperado de cruzamentos é o quadrado do número de trens por sentido.



Um aumento no volume transportado reflete-se diretamente no aumento do número de trens carregados na malha e, então, num muito maior aumento de cruzamentos. Em cenários de crescimento agressivo nos volumes transportados, gera-se um excesso na necessidade de novos pátios de cruzamento, com elevado investimento em obras civis. No limite, a solução passa pela duplicação parcial ou total da via.

Porém, mesmo com o aumento no número de pátios disponíveis para cruzamentos, os ciclos continuarão a elevar-se para uma mesma qualidade no despacho em função do aumento na hora parada já que, inevitavelmente, um dos trens chega ao pátio de cruzamento antes do outro e, como temos bem mais cruzamentos, observa-se uma elevação no tempo total de paradas. Pela elevação no ciclo, aumenta a necessidade de novos investimentos em ativos, mão-de-obra direta e combustível como efeitos indesejáveis da estratégia.

Uma estratégia alternativa é a redefinição do tamanho dos trens com o objetivo de reduzir o tráfego na malha, o que pode ser obtido por dois modos, não necessariamente concorrentes: A elevação da velocidade média dos trens e o aumento do tamanho dos trens. Em cada caso, deriva a necessidade de novos investimentos em infra-estrutura e tecnologia mas a abordagem é, até certo ponto, mais atrativa por reduzir de modo geral a necessidade de ativos e mão-de-obra eliminando os efeitos colaterais da abordagem anterior. Também, o investimento nas tecnologias para a viabilização técnica da alteração no trem é, em muitos casos, inferior ao das obras civis citadas.

b) Objetivo

Estabelecer com bases objetivas o trem-tipo recomendado para o transporte de minério na EFC considerando o máximo possível das características operacionais do sistema norte e os efeitos da redefinição do trem sobre estas características em cada cenário.

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 5/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

2. Tecnologia de tração distribuída

A tecnologia de tração distribuída apresenta interessante potencial de ganho em malhas de tráfego saturado na medida em que permite uma drástica redução no número de trens na malha em função do aumento no tamanho dos trens que circulam pela mesma. Outros ganhos inerentes à tecnologia são a economia de combustível e redução de equipagens já que o número de equipes necessárias reduz-se de forma diretamente proporcional ao número de trens simultâneos.

A economia de diesel, entretanto, depende não apenas do efeito da distribuição da tração mas também da relação peso-potência do trem de modo que o trem pode ser mais ou menos eficiente em função destas duas variáveis. O ganho de combustível pode ser atingido por duas diferentes formas, não concorrentes:



- A possibilidade de execução de operações assíncronas nas quais o ponto é diferenciado entre a locomotiva líder e a(s) remota(s), ampliando o número de combinações possíveis para se atingir a potência exigida pelo trecho. Claramente, a eficiência desta abordagem depende em grande parte das características de perfil da via;
- Em trechos sinuosos de curvas fechadas, a distribuição da tração reduz o esforço lateral no sentido interno à curva - o chamado "efeito corda" - já que uma de suas componentes é a projeção transversal dos esforços longitudinais aos vagões na curva que é tanto maior quanto maior for a concentração de potência e menor for o raio da curva. Ao reduzir-se a resistência em curvas, melhora a dinâmica do trem com conseqüentes melhorias no consumo e tempo de marcha.

Devemos considerar também o fato de que a tração distribuída implementa a segurança na medida em que as curvas de frenagem e os tempos de recobrimento são reduzidas pois os blocos intermediários de vagões recebem a pressurização no encanamento pelas duas extremidades.

No cenário atual, apenas a GE Transportation fornece uma solução de tração distribuída, marca LOCOTROL, a qual é baseada em tecnologia de comunicação via rádio e inclui freios eletrônicos de modo que as remotas podem atuar de modo assíncrono não apenas na aceleração mas também na frenagem.

No caso específico da EFC, temos curvas bem amplas com baixas rampas o que permite a formação de trens de elevada relação peso-potência os quais, por consequência, desenvolvem elevados esforços longitudinais. Nestas condições, o aumento do trem é limitado pela probabilidade de falha dos engates o que pode conduzir a impactos no ciclo por quebra de trem. A tração distribuída é um caminho viável para o aumento de trens, acima dos limites atuais, mantendo os esforços longitudinais em níveis seguros. Por outro lado, não são esperados quaisquer ganhos em função de redução de componentes laterais já que as curvas mais amplas da EFC inibem o potencial para este efeito.

Deve ficar claro que este projeto não tem como objetivo específico a implantação de locotrol na EFC mas sim a definição do tamanho otimizado do trem de minério. Porém, a adoção da tração distribuída é uma importante variável já que é o único modo de viabilizar o tráfego de trens maiores na EFC pois o acúmulo de HP em um único bloco elevaria os esforços longitudinais em níveis superiores aos limites admissíveis.

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 6/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

3. Revisão do estudo original GAVEN-002-2002

Foi efetuada uma revisão bibliográfica do estudo GAVEN-002-2002, que foi o primeiro trabalho consistente a tratar da definição do trem-tipo de minério da EFC. O estudo é bem abrangente e detalhista (as curvas de frenagem dos trens maiores obtidas por simulação em TOES são consideradas como inputs para simulação dos ciclos do trem no Fast Track, por exemplo), considerando inclusive aspectos de renovação/adequação de frota. Em resumo, a conclusão é de que os trens de maior viabilidade eram o 206 (as is) e o 336 GDT. Sendo o 336 um trem maior, a seleção recai sobre o mesmo em função da redução do tráfego na malha e a economia de diesel inerente à tecnologia locotrol.

Entretanto, estes trens (as is e 336) são os melhores justamente porque não exigem qualquer adequação na frota existente. Como conclusão decorrente, chegamos ao fato de que qualquer definição de trem que exige adequações na frota existente (substituição de x% da frota de locos 3,6 kHP por locos 4,4 kHP) gera um investimento proibitivo, inviabilizando a opção.

As conclusões do trabalho estão corretas. Porém a definição do 336 é decorrente das premissas assumidas no trabalho. Dentre elas, as listadas a seguir são plausíveis de revisão:

G) Tempo de permanência em CKS (4h) e em TPM (4,5h), invariante com respeito ao tamanho do trem.

H) Quantidade fixa, no horizonte de 10 anos, de 36 locos para outras atividades que não sejam trem-M ou help (manobra, trem-C, passageiro e serviço).

I) Valor de 2,2 milhões US\$ para des/investimento de locos e 45 mil US\$ para o GDT.

K) Reduções de custeio consideradas: Diesel e equipagem.

P) Ciclo total de minério variando linearmente com a relação HP/TB tal que qualquer aumento no tempo parado é alocado aos outros trens na malha, mesmo que estes tenham prioridade sobre o trem-M.

Q) Nas opções com adequação de frota, não se considera o valor de revenda das frotas existentes e não adequadas ao modelo de tração proposto para o trem-M, isto porque:

- Não se tinha mapeado mercado para revenda de locos C36 ou /SD40. Nem qual o valor de mercado das locos usadas da EFC;
- Do mesmo modo não se considerava a possibilidade de realocação das máquinas excedentes para carga;
- Considerava-se que as trações seriam padronizadas em todos os trens-M. Então se um trem era definido pela tração de 2 D9 e 1 C36, isto representava que 67% da frota com mais de 3,6 kHP deveria ser D9 e os 33% restantes C36, com os investimentos daí decorrentes.



S) Todo trem com mais de 208 GDT seria locotrol, com o respectivo investimento e redução de custeio em diesel decorrentes. Para todo locotrol, 3% de melhoria sobre a eficiência simulada foi aplicada.

U) A PV de minério considerada era a divulgada pela GEQAN no início de 2002. A PV de CG não foi considerada.

Não listadas dentre as premissas principais do trabalho mas destacadas nos textos específicos de cada seção do trabalho, temos duas importantes premissas adicionais, passíveis de revisão:

- A "tração ideal" do trem era definida como a mínima necessária para vencer o circuito CKS-TPM;
- O trem de retorno tem sempre a mesma configuração do trem carregado, daí se calculando a necessidade de novos pátios com base na formulação de Colson e expansão de pátios existentes com base no novo tamanho dos trens.

Para a reavaliação proposta, estaremos revendo/flexibilizando/estendendo algumas das premissas assumidas. Como premissa de partida, o novo estudo parte da conclusão estabelecida no trabalho original de que as opções que requerem adequação da frota existente são inviáveis face ao investimento proibitivo, o que nos parece ainda válido.

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 7/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

4 . Modelo paramétrico do ciclo de minério da EFC

Com vistas à solução do problema proposto, foi desenvolvido um modelo paramétrico para o ciclo de minério da EFC.

De modo geral, podemos estabelecer que os seguinte tempos são as principais componentes do tempo de viagem a sofrerem alterações com respeito ao tamanho do trem e sua razão peso - potência:

- Tempos de marcha,
- Impacto por avaria de locomotivas,
- Impacto por quebra de trens
- Impacto por cruzamentos

Todo o restante do tempo parado em viagem é aproximadamente invariante com aqueles parâmetros e fica classificado como outros tempos de viagem.

Além destes, compõem o ciclo de minério os tempos nos terminais CKS e TPM. Na pêra de CKS os tempos são idênticos para locos e vagões e se dividem nas seguintes componentes:

- Impacto em função de baixo estoque de minério
- Carregamento na pêra
- Outros tempos

No terminal TPM, os tempos diferem para locos e vagões. Para vagões, temos:



- Manobra de recepção
- Aguardando descarga no virador de vagões
- Descarregamento no virador de vagões
- Manobra de classificação
- Inspeção
- Manobra de formação
- Aguardando tração
- Aguardando equipagem
- Aguardando licenciamento

Destes, apenas os tempos de recepção, aguardando descarga, descarregamento, classificação e formação dependem do tamanho do trem e tipo de tração. Os tempos no terminal TPM para locos:

- Manobra de recepção
- Inspeção na oficina
- Manobra de formação
- Aguardando equipagem
- Aguardando licenciamento

Dentre estes tempos, apenas os de recepção e formação variam com o tamanho do trem e tipo de tração.

Nos tópicos a seguir, estaremos detalhando a parametrização das componentes dos tempos que dependem do tamanho do trem e tipo de tração.

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003		Fl.: 8/43
	Data 23/12/2003		Rev.: 02

4.1) Componente do tempo de marcha no tempo de viagem

A evolução do tempo de marcha com a razão peso - potência foi obtida por simulação para razões variando entre 1,772 e 7,146 TB/HP, mapeando todos os pontos de *stall* observados. No total, 68 simulações foram realizadas para o trem carregado CKS-TPM e para o trem vazio TPM-CKS e carregado TPM-CKS, as quais estão apresentadas em detalhe nas tabelas do Anexo 2. Nas simulações, os tempos de trocas de equipagens em Marabá, Acailândia e Santa Inês já foram cadastrados com 15 min e permaneceram invariantes com a razão peso - potência assim como os tempos médios de espera e anexação do help, com 30 min.

Os dados obtidos foram compilados e ajustados por regressão linear. Os melhores ajustes obtidos, com base no coeficiente de correlação, seguiram um ajuste quadrático para o tempo de marcha e uma equação tipo Weibull para a eficiência:

$$[Marcha + equip. + help]_{CKS-TPM} = A_1 + A_2(TB / HP) + A_3(TB / HP)^2$$

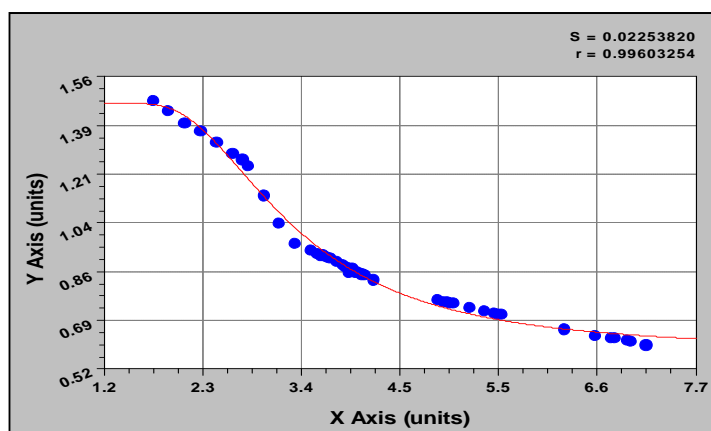
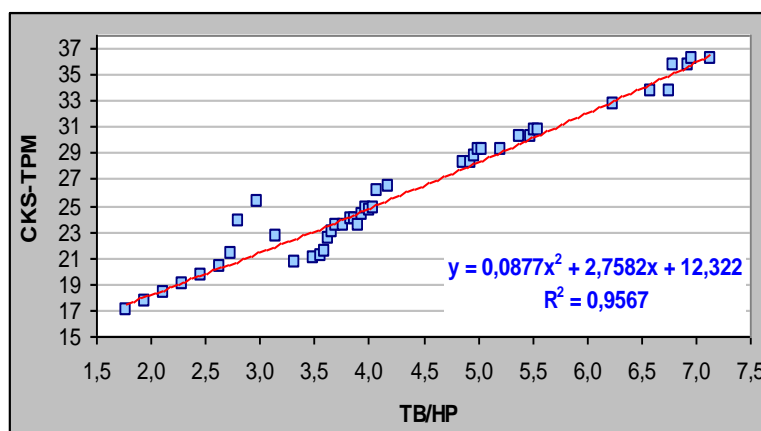
$$L / kTKB_{CKS-TPM(sem\ help)} = B_1 - B_2 \cdot EXP(-B_3 \cdot (TB / HP)^{B_4})$$



Temos abaixo, os coeficientes obtidos:

Coeficientes	Carregado CKS-TPM	Vazio TPM-CKS	Carregado TPM-CKS
Tempo de marcha com equip. e help			
A ₁	12,322202	13,377	12,758
A ₂	2,7582081	0,2138	2,5529
A ₃	0,087699281	5,8911	0,2892
Correlação	97,8%	100%	98,7%
Eficiência energética do trem (s/ help)			
B ₁	1,468138	4,2284	1,9207628
B ₂	0,88124405	0,2711	0,73334437
B ₃	34,016473	-1,1088	3,3144191
B ₄	-3,2662424	(*)	-3,2751536
Correlação	99,6%	100%	99,8%

(*) No caso da eficiência do trem vazio TPM-CKS, o melhor ajuste foi quadrático.

Os gráficos a seguir apresentam os ajustes para o tempo de viagem e eficiência do trem carregado sentido CKS-TPM:



 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 9/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

4.2) Componente do impacto de avarias de locomotivas no tempo de viagem

O impacto de avarias de locomotivas é o 2º maior na EFC. A média de 2003, é de 1,11 h/par. Na primeira quinzena de Set/03, este impacto era de 1,49 h/par, logo, observa-se alguma dispersão neste impacto.

No conjunto total de falhas observadas, verificamos que, do ponto de vista do ciclo de minério, algumas são de incidência “aleatória” no decorrer da viagem (ventiladores, bomba, relês, entre outros), ou seja sua incidência é não - preferencial com respeito à operação e varia em função da vida útil dos componentes e da regularidade e frequência das preventivas. Além destas, temos falhas cuja incidência é fortemente afetada pela solicitação a que o equipamento é submetido (por ex., se consideramos a razão peso - potência aplicada) e possuem locais preferenciais para incidência (rampas críticas do trecho). Exemplo destas falhas são as avarias de motores de tração e patinações. Neste trabalho, denominamos estas parcelas de “tendência”.

Segundo algumas fontes da literatura técnica, **confiabilidade operacional de um equipamento, tecnologia ou processo é a sua capacidade para cumprir sua função ou propósito, dentro de seus limites de projeto**. Podemos inferir que, do ponto de vista operacional da ferrovia, o propósito de uma locomotiva é proporcionar a tração necessária, de forma ininterrupta, para que o transporte pretendido para o trem seja realizado até o seu destino.

A confiabilidade da tração em um trem é então uma questão mais complexa do que a simples confiabilidade da locomotiva em si e depende fundamentalmente dos seguintes aspectos:

- Processos de manutenção;
- Tecnologia dos componentes;
- Solicitação de serviço, no caso a razão peso-potência.

Neste trabalho vamos admitir que os processos de manutenção e a tecnologia não serão alterados. Então faremos o tratamento do impacto de avarias sobre o ciclo, admitindo que esta pode ser expressa como uma função da confiabilidade da tração, R a qual depende fundamentalmente da solicitação de serviço. Mais exatamente de como a falibilidade da tração, (1-R), pode evoluir em diferentes configurações de trem com respeito à confiabilidade no trem atual. A parametrização do tempo parado por avaria no tempo de viagem do trem-M pode ser expressa então pela equação a seguir:



$$A \text{ var } ia = A \text{ var } ia|_{ASIS} \cdot \left(\frac{1 - R(TB/HP)}{1 - R(TB/HP)_{ASIS}} \right)$$

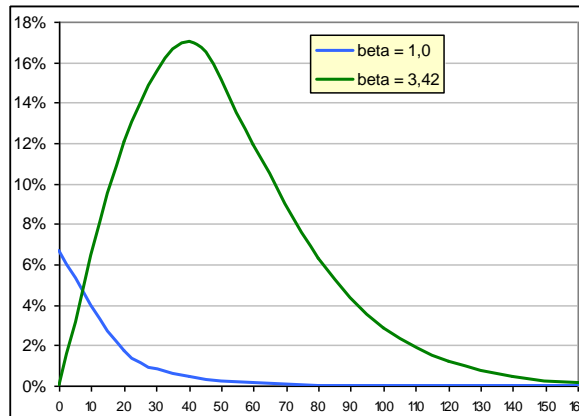
O último termo nestas equações considera o fato de que a confiabilidade da tração no trem pode ser alterada na operação em função da existência de potência redundante no trem seja pela alocação de equipamento adicional ao mínimo necessário ou através da redução de solicitação em serviço para o conjunto mínimo de equipamentos, o que aumenta a vida característica dos mesmos a médio prazo, condicionado aos processos de manutenção conduzidos e à tecnologia inerente do projeto.

Classicamente, a confiabilidade da tração é adequadamente expressada através da frequência acumulada da distribuição biparamétrica de Weibull:

$$R(x) = EXP \left[- \left(\frac{x}{\eta} \right)^\beta \right]$$

Onde, η , é o parâmetro de escala ou vida característica do equipamento, no caso, adotaremos o MKBF da locomotiva. O β é o parâmetro de forma da distribuição cuja definição pode fazer com que a distribuição de Weibull se reduza a outros tipos de distribuição como a normal, lognormal, exponencial, Rayleight, entre outras (vide gráfico a seguir).

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 10/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	



Empiricamente, observa-se que a definição mais apropriada de β depende do tipo de falha observado e do processo de manutenção conduzido. Normalmente, para simplificar os cálculos, adota-se $\beta=1$ o que reduz a distribuição de Weibull a uma distribuição exponencial. Entretanto, a literatura demonstra que esta distribuição é comum a falhas ocasionais ocorrendo a uma taxa constante, típica de processos sem manutenção preventiva. A adoção de $\beta=3,42$ aproxima a distribuição de Weibull a uma distribuição normal comum a falhas por envelhecimento ou desgaste em processos com manutenção preventiva. Este caso parece ser mais apropriado para a EFC e, então, estaremos adotando $\beta=3,42$ neste trabalho.

Finalmente, a variável “x” para o nosso caso será simplesmente a distância percorrida entre inspeções, isto é, a extensão do percurso para um ciclo TPM-CKS-TPM, ou 1784 km. Então, neste trabalho, a confiabilidade da tração será descrita por:



$$R(\text{ciclo}) = \text{EXP} \left[- \left(\frac{1784}{\text{MKBF}} \right)^{3,42} \right]$$

Claramente, será o fator de escala, MKBF, o parâmetro da confiabilidade que varia com a relação peso - potência. Uma evidência disto é a marcante diferença entre o MKBF da frota C36-7, 62000 km, para a frota C44-9, 72000 km, conforme informado pela GAREG. Como ambas estão sujeitas aos mesmos processos de manutenção preventiva, as diferenças ficam por conta da defasagem tecnológica das C36 com relação às C44 e pelo excedente de HP nas trações do trem-M com C44. Devemos ter claro que do ponto de vista da programação e operação do sistema norte, ambas as frotas compõem indistintamente a tração para um mesmo trem padrão de minério num mesmo trecho. Como a potência das C44 é bem superior, existe sobra de HP para os trens com C44 na tração principal. Isso claramente contribui para a obtenção de um maior MKBF nas C44 que, com certeza, não seria tão elevado se as C44 fossem alocadas exclusivamente para um trem-M mais pesado de forma proporcional ao aumento no esforço trator disponível.

Então, para estimar o relacionamento entre o MKBF e a razão (TB/HP), vamos lançar mão do fato de que para $\beta=3,42$ a distribuição resultante de falhas se aproxima com boa precisão de uma curva normal. Esta por sua vez é completamente descrita em termos de dois parâmetros: média e variância (σ^2). Podemos calcular pela equação anterior a confiabilidade para 1 loco C36 e a confiabilidade para 1 loco C44, respectivamente 90,63% e 91,88%. Comparando estes valores com a frequência acumulada de uma curva normal padronizada, chegamos à conclusão que ambas as distribuições retornam idênticas probabilidades se, respectivamente, $Z = 1,317$ e $Z = 1,396$ na curva normal, sendo Z definido como o número de desvios a partir da média tal que a frequência acumulada seja igual às probabilidades obtidas com a equação $\text{EXP} [-(1784 / \text{MKBF})^{3,42}]$.

Considerando que em um trem-M cuja tração é C36 temos 3,548 TB/HP, enquanto para trem-M com tração de C44 temos 2,903 TB/HP, obtemos a seguinte relação linear entre estas variáveis:

$$Z = 1,749 - 0,1218 (\text{TB/HP})$$

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 11/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

Esta relação é uma primeira aproximação, válida apenas para o trem-M da EFC. Observa-se que, mesmo quando $(TB/HP) = 0$, o parâmetro Z não se anula o que indica que sempre existirá uma probabilidade de falha, mesmo sem carga (por exemplo, por fim de vida útil dos componentes).

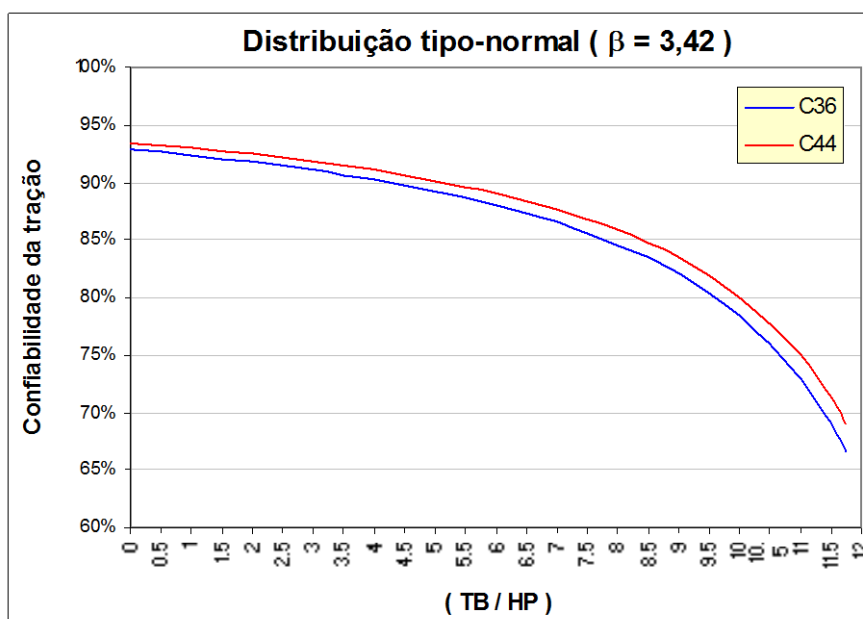
Se consideramos em cada caso que o MKBF (média móvel 12 meses) é uma aproximação válida para a média da curva normal, μ , podemos aplicar este valor para calcular σ em cada frota na condição atual, a saber: 76% do MKBF atual para a frota C36 e 72% do MKBF atual para a frota C44. Na curva de frequência acumulada, é o parâmetro σ que determina a inclinação da curva “S”. Logo, para uma mesma (TB/HP) e mesma média μ , a frota com maior σ exibirá menor confiabilidade. O menor σ obtido para as C44 é então consistente com o fato das mesmas exibirem uma melhor condição e vantagens tecnológicas.

Admitindo então que o desvio permanece constante para a condição atual, ou seja não diferenciamos os processos de manutenção ou introduzimos novas tecnologias, podemos estimar o MKBF para cada frota sob diversas condições de solicitação (TB/HP) :

$$MKBF = [1,749 - 0,1218 (TB/HP)] \sigma$$



O MKBF assim calculado é aplicado à distribuição de Weibull, $EXP[-(1784 / MKBF)^{3.42}]$, para estimar-se a confiabilidade da frota sob diferentes solicitações. Apenas como exemplo de aplicação desta metodologia, se aplicamos 2.903 TB/HP à C36 que é a atual solicitação para as C44 (na prática, reduzindo o trem para cerca de 170 GDTs), estimamos que o MKBF da frota elevar-se-ia de 62000 km para 65700 km com conseqüente aumento na confiabilidade de 82,1% para 83,1%. Nota-se que, para a mesma solicitação atual da C44, a frota C36 ainda não atingiria o MKBF atual da primeira, 72000 km, a despeito da melhoria na confiabilidade.

O gráfico a seguir apresenta a confiabilidade de trações com C36 e C44 em função da solicitação de serviço:

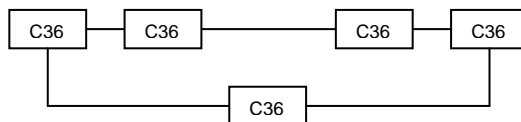


A metodologia exposta estima a confiabilidade de uma locomotiva com respeito à solicitação no trem. Para tração de múltiplas locomotivas de diversas frotas, deve-se adotar a resistência das mesmas combinadas em série já que as probabilidades de falha de cada loco no trem são eventos independentes.

Por fim, deve ser observado que estas definições anteriores aplicam-se apenas ao total de HP tracionando no trem. Se temos HP rebocado no trem, em condições de tracionar, o mesmo será tratado como um sistema com as locos tracionando em série e as “rebocadas boas”, ou mais apropriadamente redundantes, em paralelo tal que a confiabilidade é significativamente ampliada pois é preciso que um igual número de locos tracionando e redundantes falhe para que a confiabilidade desça aos níveis da confiabilidade em série. O esquema a seguir apresenta o exemplo de 4 C36 tracionando com mais 1 C36 rebocada boa. Se fossem apenas as 4 C36 em

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003		Fl.: 12/43
	Data 23/12/2003		Rev.: 02

série, teríamos $R=63\%$. Com a loco redundante, temos $R=96\%$, superior ao R de 1 C36 individualmente que é de 89% . É importante também observar neste exemplo como a alocação de mais máquinas em série ao trem reduz drasticamente a confiabilidade da tração.

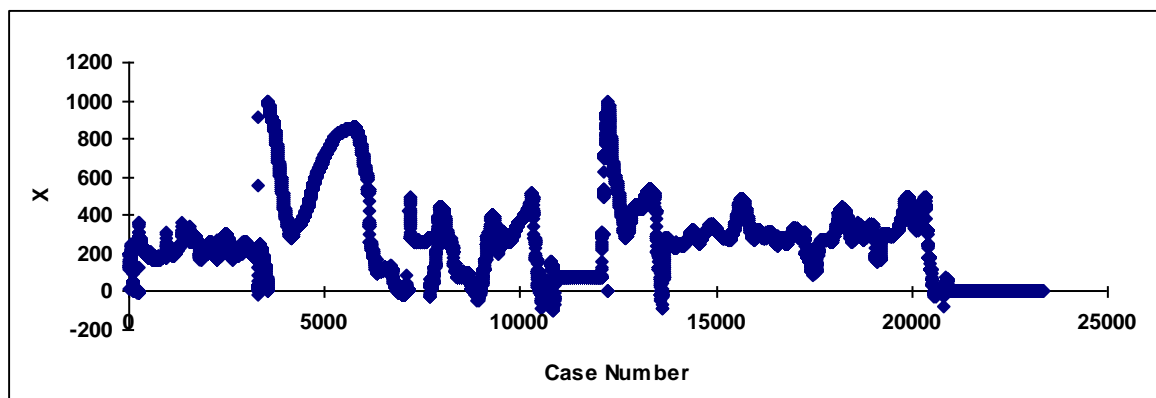


Para os propósitos deste trabalho vamos admitir que, caso ocorra, a alocação de locos rebocadas redundantes será aplicada apenas no sentido exportação do minério e, no máximo, apenas uma loco estará nesta condição. A participação de locos das frotas C44 e C40 é atualmente 50% com relação ao total de frotas do minério na EFC (C44, C40, C36 e SD60). Admitiremos que, em caso de redundância, a loco redundante será sempre C36, considerada apenas para efeito de cálculo na confiabilidade do trem.



4.3) Componente do impacto por quebra de trens no tempo de viagem

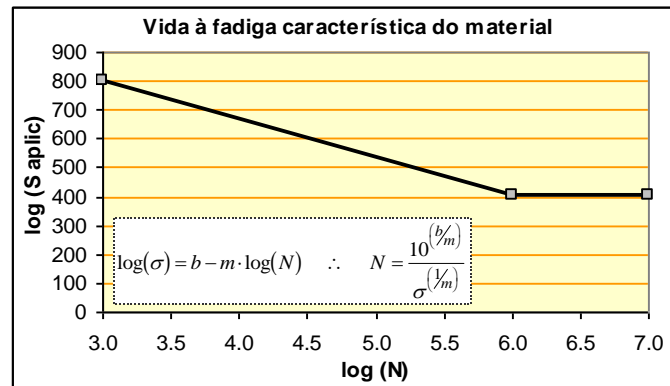
O impacto por quebra de trem corresponde a apenas $0,16$ h/par, ou $2,2\%$ do impacto total, pela estatística do corredor nos últimos 6 meses, o qual pode entretanto aumentar ou reduzir conforme a definição do trem. A probabilidade de falha dos engates é função do esforço trator desenvolvido na composição, que para o trem atual de 206 GDT (31 t/eixo) apresenta um valor teórico (quase - estático, vide modo de cálculo no desdobramento deste raciocínio) na faixa de 88 t nas rampas das locações 53 e 6. Cabe observar que, a região de maiores rampas no sentido exportação é a região do atual help com $0,37\%$. Esta região, entretanto, não é aquela onde se observam os maiores esforços, justamente em função da existência do auxílio de 2 C44-9. Assim, o esforço trator “na cabeça” do trem que seria da ordem de 114 t (bem acima da capacidade máxima de 2 locos C36-7) reduz-se a 52 t.

Entretanto, deve-se atentar que a relação entre a falha dos engates e o esforço desenvolvido não é linear, já que o modo predominante de falha é por fadiga e não por fratura à tração. Isto pode ser entendido em função dos níveis de esforço expostos no parágrafo anterior. Para um esforço quase - estático de 88 t podemos estimar, com base em relações empíricas da literatura, um valor máximo na ordem de 100 t para choques dinâmicos a 20 km/h com rodas de 36”. A figura a seguir apresenta a evolução no tempo, em segundos, dos esforços no engate traseiro, em kN, da segunda loco simulados em TOES para um trem-M carregado com 2 C36 na tração entre CKS e o km 617. O maior esforço dinâmico observado é da ordem de 102 t no km 833+780, o que também demonstra a exatidão dos cálculos efetuados.



O engate dos vagões GDT é o F mas vamos considerar a resistência à tração de um engate tipo E (menos robusto), que é de 295 t pela AAR. A literatura sugere a aplicação de fatores de segurança de 1,4 para engates novos a 1,75 para desgastados. Chegamos então a valores de resistência à tração na ordem de, respectivamente, 210 a 170 t bem superiores aos praticados. Logo, o modo de falha não é pelo mecanismo simples de tração mas sim por fadiga, a qual estabelece uma relação não linear da vida útil com a tensão aplicada em acordo com a clássica curva de Wöhler, também conhecida como curva S-N, para a vida característica à fadiga dos materiais:

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003		Fl.: 13/43
	Data 23/12/2003		Rev.: 02



Onde N é a vida característica em ciclos, σ é a amplitude da tensão cíclica aplicada, enquanto “b” e “m” são respectivamente o intercepto e a inclinação da curva linearizada na região de vida finita do material. A razão entre o impacto atual e o impacto para o cenário de novos trens será proporcional à razão entre as vidas características dos engates nestas mesmas condições que por sua vez depende de forma não - linear da razão entre os esforços tratores:

$$\frac{N_1}{N_0} = \frac{\sigma_0^{(1/m)}}{\sigma_1^{(1/m)}} = \frac{ET_0^{(1/m)}}{ET_1^{(1/m)}}$$

Portanto, o único parâmetro a determinar é a inclinação “m” característica da curva S-N do material do engate. Para isto, vamos considerar que o aço grau F, conforme informado pela GAROG, possui uma resistência à tração, S_{ut} , de 827 MPa, conforme a norma AAR M-201. Logo, os dois pontos que definem a porção inclinada da curva S-N são o ponto de 95% $S_{ut} = 796$ MPa para 1000 ciclos e o limite de resistência à fadiga para vida infinita que, para aços com $S_{ut} < 1380$ MPa é de 50% $S_{ut} = 419$ MPa com 1 milhão de ciclos. Com estes pontos chegamos à definição da curva S-N característica do aço dos engates (vide figura anterior) que, linearizada, apresenta inclinação $m = 0,093$.

Então, a seguinte equação pode ser proposta para avaliar o impacto de quebra de trem, em outros cenários de trens, como função não-linear do esforço trator desenvolvido:



$$Quebra_trem = Im\ pacto_{AS\ IS} \cdot \left(\frac{ET_{CENARIO}}{ET_{AS\ IS}} \right)^{(1/m)}$$

$ET_{AS\ IS} = 88\ t$ (Quase - estático na locação 53 e 6)
 $m = 0,093$

$$Quebra_trem = Im\ pacto_{AS\ IS} \left(\frac{ET_{CENARIO}}{88} \right)^{10,762}$$

De pronto observamos que, devido à não - linearidade, um aumento de 2% na solicitação implica em um aumento de 24% no impacto sobre o ciclo por quebra de engates sob condições de vida finita, já que a vida útil destes componentes reduz-se em igual proporção. A partir de cálculo e resultados de simulação, estima-se que para trens que desenvolvam esforços longitudinais inferiores a 60 t os engates trabalham em condições de vida infinita. Esta condição será observada neste trabalho de forma específica para a EFC. Também, definimos um contorno superior para o esforço trator que é de 170 t, correspondente ao limite admissível para engates tipo “E” desgastados, conforme a AAR com fator de segurança igual a 1,75.

O esforço trator que vamos considerar nos cálculos é quase - estático, definido para o trem não - acelerado e sem desenvolvimento de deslocamentos longitudinais relativos entre os veículos que o compõem. Para os propósitos deste trabalho, este critério não afeta a

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC		Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 14/43
		Data 23/12/2003	Rev.: 02

avaliação do impacto das quebras de trem sobre o ciclo já que este varia com a razão entre os esforços no novo cenário com relação ao atual e não com o valor absoluto do esforço em si, garantido que ambos sejam calculados pelas mesmas regras.

Também por premissa, o impacto de quebra de trem será calculado apenas para o tempo de viagem do trem-M carregado. O esforço longitudinal quase-estático para um trem com tração convencional é simplesmente a somatória de todas as resistências longitudinais individuais dos veículos que o compõem, a qual pode ser decomposta para locos e vagões em duas componentes:

- Uma componente “interna”, Res, função da resistência na manga dos eixos, aerodinâmica e da perda no contato entre rodas e trilhos que é classicamente descrita em uma série de potências com a velocidade conhecida pela equação de Davis. É importante notar que esta componente independe das características do trecho considerado, ou seja, é a resistência total ao movimento longitudinal que o veículo exibe em nível ($\alpha = 0$);
- Uma componente “de via” que é simplesmente o produto entre o peso do veículo, W, com a inclinação relativa do trecho considerado. Haveria ainda uma parcela de resistência da via relativa às curvas, entretanto, esta sempre pode ser absorvida como um acréscimo à resistência de rampa utilizando uma rampa característica, α .

Adotando estas definições, com a definição de que p peso total do trem, TB, é a soma dos pesos de seus veículos, $nr_locos \times W_{locos} + nr_vagos \times W_{vagos}$, e considerando por aproximação que quando o número de vagões é muito maior que o número de locos (elevadas relações peso-potência, que é o caso da EFC) com peso dos vagões quase igual ao das locos (124 t no vagão de sinter contra 180 t das locos), chegamos à seguinte equação para determinação do esforço trator em uma composição arbitrária do trem-M:

$$ET = nr_lo \cos \left(\alpha \cdot W_{LOCOS} + Res_{LOCOS} \right) + nr_vg \cdot \left(\alpha \cdot W_{VAGAO} + Res_{VAGAO} \right)$$

$$ET = \alpha \cdot TB_{TREM} + \left(nr_lo \cos \times Res_{LOCOS} + nr_vg \times Res_{VAGAO} \right)$$

Se $nr_vg \gg nr_lo \cos$, $vel \rightarrow 0$ e $W_{VAGAO} \cong W_{LOCOS}$, então $Res_{LOCOS} \cong Res_{VAGAO}$, e:



$$ET \cong \alpha \cdot TB_{TREM} + (nr_vg + nr_lo \cos) \times Res_{VAGAO}$$

Na expressão acima, TB é o peso bruto do trem, $(nr_vg + nr_locos)$ é o número total de veículos no trem, RES é a resistência ao movimento longitudinal dos vagões carregados, a saber, cerca de 90 kgf/vagão e α é a rampa característica do trecho considerado.

A equação acima descreve o esforço máximo apenas para trens com tração simples. Entretanto, para trens com locos de mesmo modelo em tração homogeneamente distribuída, tal que o esforço no engate traseiro do último vagão em cada bloco seja nulo, é fácil deduzir que o máximo esforço será exatamente o informado no caso de tração simples dividido pelo número de blocos de locomotivas. As restrições desta dedução é que locos e vagões se distribuem em iguais números (o que garante que não serão desenvolvido esforços de compressão permanentes ao longo do trem) e que as locos sejam as mesmas. A última restrição é um pouco forte e, com a simplificação de que a razão entre os esforços desenvolvido por diferentes locos é equivalente à razão entre suas potências, podemos generalizar a equação de modo a admitir trações mistas pela consideração do total de HP em cada bloco da tração distribuída:

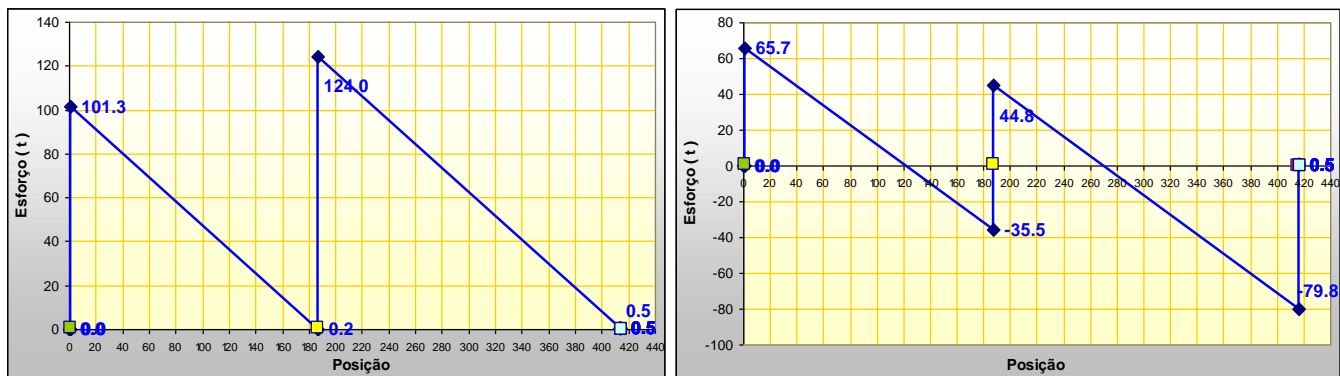
$$ET \cong \left(\frac{1}{nr_blo \cos} \right) \cdot \left[\alpha \cdot TB_{TREM} + (nr_vg + nr_lo \cos) \times Res_{VAGAO} \right]$$

$$ET \cong \left(\frac{HP_{MAIOR BLOCO}}{HP_{TOTAL TREM}} \right) \cdot \left[\alpha \cdot TB_{TREM} + (nr_vg + nr_lo \cos) \times Res_{VAGAO} \right]$$

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 15/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

Esta equação fornece o esforço junto a cada bloco de locomotivas e pode ser indistintamente aplicada para tração distribuída ou helps (onde o esforço necessariamente fica negativo já que os helpers empurram o trem). Nos cálculos deste trabalho, estaremos verificando apenas os máximos esforços positivos que em tração distribuída ocorrem no bloco que reúne o maior HP no trem e em caso de help junto à cabeça do trem, mesmo se este bloco for de menor potência.

Nas duas figuras que seguem, vemos gráficos de um trem locotrol bi-bloco de 410 vg em rampa de 0,37% com tração de 2 C36 na cabeça e 2 C44 na posição 187 e 188. À esquerda temos a condição sem help e verificamos o maior esforço junto ao bloco de 2 C44. À direita temos a mesma situação com help de 2 C44 e verificamos que, apesar de reunir a menor potência, o bloco de 2 C36 reúne o maior esforço trator. Em ambos os casos os esforços máximos positivos são descritos pela última equação, onde no primeiro caso informamos 8800 HP no numerador da razão de potências e no caso do help informamos 7200 HP do primeiro bloco no numerador da mesma razão.





As equações apresentadas são totalmente genéricas, resguardadas as condições que permitiram as aproximações propostas. Entretanto, para o caso específico do trem-M carregado da EFC uma forma em função de variáveis mais adequadas, por exemplo a razão (TB / HP) do trem e a rampa característica, pode ser aplicada. Se calculamos o resultado da equação anterior para todos os casos simulados no item 4.1 em várias rampas de trechos característicos da EFC, estes resultados podem então ser ajustados por regressão linear. A aplicação desta técnica permitiu chegar a um ajuste de 1ª ordem, conforme a equação a seguir, com correlação superior a 99,8% a partir de conjuntos de dados de razões peso - potência na faixa de 1,772 a 7,146 e rampas na faixa de 0,11% a 0,37%.

$$ET = [2,59 + 3600,209 \cdot \alpha] \left(\frac{TB}{HP} \right)$$

A equação ajustada aplica-se a trens com tração convencional de 1 única loco. A exemplo das deduções anteriores, podemos estabelecer a versão da mesma para trens com tração múltipla e distribuída (ou sob auxílio).

$$ET = nr_lo \cos \times \left(\frac{HP_{MAIOR BLOCO}}{HP_{TOTAL TREM}} \right) \times [2,59 + 3600,209 \cdot \alpha] \left(\frac{TB}{HP} \right)$$

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 16/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

4.4) Critérios para alocação de helpers, tempo de anexação e seu efeito sobre o impacto da quebra de trens

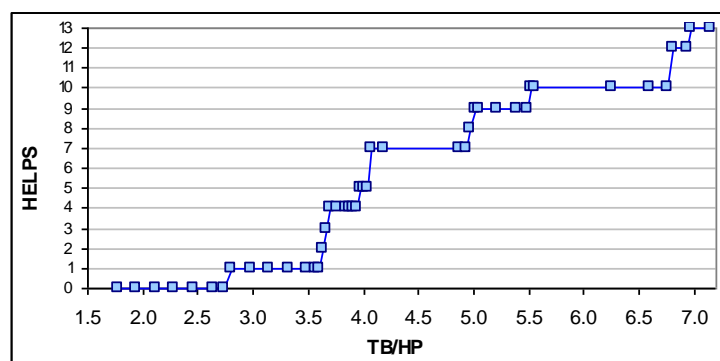
O critério de alocação de helpers assumido neste trabalho é o mais trivial possível, a saber, serão alocados helpers sempre que uma composição não apresentar potência suficiente para “vencer” o trecho e chegar ao seu destino.

Claramente, esta visão não é a mais adequada já que estudos anteriores demonstraram na prática o potencial dos mesmos para melhoria de performance em trechos-gargalo tal que o benefício gerado não se limita apenas ao trecho mas à circulação da malha como um todo. Tais considerações são de caráter específico: dependem da extensão do auxílio, do nr. de helpers alocados, do perfil do trecho, do equilíbrio entre ganhos *versus* recursos alocados, da regularidade da malha, etc. Entretanto, neste trabalho buscamos uma abordagem um pouco mais geral, porém poderosa, e focada na otimização do trem em si.



Como verificamos no tópico anterior, além da tração distribuída, a alocação de auxílios ao trem de minério afeta o impacto de quebra de trens na medida em que reduz o máximo esforço trator desenvolvido pela composição, o que naturalmente só vale para o trecho de auxílio. A lógica que se aplica é tal que, partindo de uma baixa razão (TB/HP) no trem de minério carregado quando nenhum help é necessário, e aumentando esta razão gradativamente, o esforço trator desenvolvido no trem sobe igualmente, até que chegamos a um ponto em não existe capacidade para o trecho km 607-477. É então alocado o 1º help (o atual help de 2 C44 entre o km 617 a 480). O que se observa é que, em função da redistribuição da potência devido ao posicionamento dos helpers, reduz-se o maior esforço longitudinal na “cabeça” do trem de modo que o maior passa a ser observado agora no trecho km 824-813. Alocando um 2º help a este trecho (o novo help de SD40 da Locação 53), surge um novo trecho crítico no km78-70 e assim sucessivamente. Ou seja, à medida em que alocamos auxílios e continuamos a elevar a razão (TB/HP) fazemos com que outros trechos, menos agressivos, tornem-se gargalos tão ou mais restritivos quanto eram os originais para menor (TB/HP). Este processo pode continuar indefinidamente até que, no limite, o conceito de auxílio perde o sentido já que os mesmos cobrem a maior parte do trajeto.

Por outro lado, a alocação indefinida de helpers não implica necessariamente em alocação mais racional do HP já que os ciclos de help envolvem a etapa de anexação, para a qual estabelecemos, por premissa, 15 min em média por evento. Na prática da EFC, observa-se que este tempo dificilmente excede os 30 min. Assim, a definição de 4 trechos para help implica em um aumento estimado de 1 h no ciclo, apesar de viabilizar a operação de trens mais pesados. Logo, existe um ponto de equilíbrio para o qual, a partir deste, a alocação excessiva de helpers torna-se consumidora de HP.

A partir das simulações conduzidas para levantamento das equações no tópico 4.1, o seguinte gráfico de necessidade de auxílios em função da razão (TB/HP) pode ser elaborado:



A distribuição obtida é discreta. Observa-se que, após a implantação do 1º help com 2.806 TB/HP, temos uma margem extensa para aumento do trem até 3.632 TB/HP quando aparece a necessidade do 2º help. Esta foi justamente a evolução seguida de forma intuitiva pela operação Norte até o trem de 208 GDT 31 t/eixo, quando a resistência na L53 torna-se restritiva. A partir daí a inclinação da curva torna-se maior do que zero e aumenta severamente até 4,08 TB/HP, de modo que em média a cada acréscimo de 0,09 TB/HP um novo help torna-se necessário, passando de 1 para 7 helpers com 4,08 TB/HP. Após, novamente encontramos uma margem para aumento do trem sem nenhuma realocação de novos auxílios até 4.976 TB/HP quando a inclinação da necessidade de helpers recomeça a ser maior do que zero. A forma da curva de necessidade de helpers em função da razão (TB/HP) é reflexo direto do perfil da EFC. O efeito destas definições sobre a alocação de helpers possui efeitos sobre o impacto de quebra de trens tal que, para cada cenário de trem, definimos uma razão peso - potência e pelo gráfico anterior determinamos a necessidade de auxílios. Então para cada N auxílios



 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC		Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 17/43
		Data 23/12/2003	Rev.: 02

necessários, teremos que efetuar o cálculo de esforço máximo trator considerando as rampas características, definidas conforme o Anexo 1, para os N+1 trechos mais críticos. Assim, se todos os helps alocados implicarem em redução severa do esforço longitudinal, o gargalo passa a ser o próximo trecho mais crítico não atendido pelos N auxílios definidos, (N+1)-ésimo trecho na ordenação por rampa crítica. A tabela a seguir apresenta uma versão da tabela de perfil característico da EFC, conforme Anexo 1, ordenada de forma decrescente com o grau de severidade de rampa:

	Trecho	km	TB/HP máx	vg/3.6kHP	Rampa eq.
16	km 607 - 477	130	2.806	80	0.37%
2	km 824 - 813	11	3.632	104	0.27%
26	km 78 - 70	8	3.667	105	0.26%
28	km 19 - 10	9	3.701	106	0.26%
8	km 710 - 688	22	3.977	114	0.24%
14	km 627 - 625	2	4.080	117	0.23%
24	km 100 - 95	5	4.080	117	0.23%
12	km 652 - 649	3	4.872	140	0.18%
20	km 192 - 186	6	4.976	143	0.18%
4	km 751 - 744	7	5.010	144	0.17%
15	km 625 - 607	18	5.408	157	0.15%
6	km 731 - 725	6	5.527	159	0.15%
29	km 10 - 0	10	6.579	191	0.12%
18	km 216 - 213	3	6.801	196	0.11%
22	km 129 - 127	2	6.801	196	0.11%
10	km 670 - 663	7	6.973	201	0.11%
21	km 186 - 129	57	8.370	243	0.08%
17	km 477 - 216	261	8.473	246	0.07%
23	km 127 - 100	27	10.850	315	0.04%
1	km 892 - 824	68	11.263	327	0.04%
3	km 813 - 751	62	11.746	341	0.03%
19	km 213 - 192	21	12.469	362	0.03%
27	km 70 - 19	51	14.122	410	0.02%

Naturalmente, apenas as rampas no sentido exportação são consideradas já que definimos o impacto de quebra de trens apenas para o trem carregado. Vamos também admitir que 2 trechos que requerem auxílio separados por uma distância inferior a 50 km serão um auxílio apenas (a princípio, o helper segue rebocado nos 50 km intermediários). Então, se necessário, existirá apenas um auxílio ao trem nos trechos 14 e 16 da tabela de modo que o auxílio fica do km 627 ao 477. Do mesmo modo, os trechos 24, 26 e 28, se necessário, caracterizam um único auxílio que se estende do km 100 ao 10. A necessidade de HP para help eleva-se mas o impacto de anexação do mesmo sobre o ciclo mantém-se sempre que a região de atuação aumenta em extensão. Esta análise foi aplicada aos trechos da tabela anterior e conclui-se que até o limite simulado de 7,146 TB/HP existirão no máximo 6 regiões contínuas de auxílio:

	TB/HP	Trechos crít.	Rampa	Helps	km	ciclo
-	< 2.806	0	0	-	0	0.00
1	≥ 2.806	16 km 607 - 477	1	0.37%	1 A 130	7.80
2	≥ 3.632	2 km 824 - 813	2	0.27%	2 B 11	0.66
3	≥ 3.667	26 km 78 - 70	3	0.26%	3 C 8	0.48
4	≥ 3.701	28 km 19 - 10	4	0.26%	C 68	4.08
5	≥ 3.977	8 km 710 - 688	5	0.24%	4 D 22	1.32
6	≥ 4.08	24 km 100 - 95		0.23%	C 90	5.40
7		14 km 627 - 625	7	0.23%	A 150	9.00
8	≥ 4.976	12 km 652 - 649	8	0.18%	A 175	10.50
9	≥ 5.01	20 km 192 - 186	9	0.18%	5 E 6	0.36
10	≥ 5.527	4 km 751 - 744		0.17%	6 F 7	0.42
11		15 km 625 - 607	11	0.15%	A 175	10.50
12	≥ 6.801	6 km 731 - 725	12	0.15%	F 26	1.56
13	≥ 6.973	29 km 10 - 0	13	0.12%	C 100	6.00

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 18/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

4.5) Componente do impacto de cruzamentos no tempo de viagem

Conforme discutido na introdução a ocorrência de cruzamentos em linhas singelas impacta o ciclo pois implica no aumento de paradas do trem menos preferencial. Se a malha é homogeneamente espaçada, o número total de cruzamentos será o produto entre o número de trens na malha no sentido exportação e retorno. Com igual número de trens em ambos os sentidos, temos uma simplificação e o número total esperado de cruzamentos é o quadrado do número total de pares de trens na malha.

$$nr_cruzamentos = Trem_malha_{PRIORITARIO} \times Trem_malha_{NÃO-PRIORITARIO}$$

$$nr_cruzamentos = (Pares_malha)^2$$

O número de trens na malha em cada sentido pode ser obtido diretamente do produto entre o número diário de trens e o tempo de viagem, em dias, por sentido. Novamente, se o número diário de trens é igual em ambos os sentidos, temos uma simplificação na qual o número total de trens na malha é o produto entre o número de pares diários e o ciclo total de viagem.

$$Trens_malha = (Trens_exportação \times tmp_viagem_exportação) + (Trens_retorno \times tmp_viagem_retorno)$$

$$Trens_malha = Pares \times ciclo_viagem$$

A 1ª equação expressa o número total de cruzamentos pela malha, entretanto, o número total de cruzamentos que um trem específico passará durante a sua viagem é igual ao número de trens na malha em sentido oposto e com maior prioridade de circulação. Assim, no caso específico do trem-M, podemos dizer que o número esperado de cruzamentos na viagem sentido exportação é igual ao número de trens-P na malha em sentido retorno. Para o trem-M no sentido retorno, o número esperado de cruzamentos será igual à soma de trens-C, trens-M e trens-P na malha, todos no sentido exportação. O número total de cruzamentos no ciclo completo de viagem do trem-M será então a soma de todos trens-P na malha, mais os trens-C e trens-M na malha com sentido exportação. Outra vez, quando o número de trens é igual em ambos os sentidos, temos a simplificação de considerar apenas os pares de trem-M e trem-C na malha.

$$nr_cruzam_ciclo = TremP_malha + |TremM_malha + TremC_malha|_{EXPORTAÇÃO}$$

$$nr_cruzam_ciclo = TremP_malha + Par_TremM_malha + Par_TremC_malha$$



O impacto dos cruzamentos sobre o ciclo do trem-M é então o produto do número total de cruzamentos no ciclo completo de viagem com o tempo médio em que o trem fica parado em cada evento nos pátios de cruzamento.

$$tmp_cruzamentos = nr_cruzamentos \times \overline{tmp_EVENTO}$$

Como estimativa para o tempo médio de parada dos trens em cada evento de cruzamento, o CCO sugere um valor típico de 30 min/evento.

Observamos que a condição de Colson para a construção de novos pátios é equivalente à condição de ocupação do pátio por mais de 100% do tempo disponível quando a taxa de chegada de trens é superior à taxa de atendimento. Nesta situação o pátio "acumula" os trens que vão chegando formando uma fila infinita. Algumas simulações conduzidas pelo PPC Norte no simulador de malhas Fast Track da Multimodal inc. para cenários de volume crescente na EFC com apenas os pátios existentes demonstram que o sistema "trava" pela impossibilidade de novos despachos de trens não sendo possível estabelecer uma curva de tempo médio de trem retido no pátio aguardando cruzamento (a simulação não chega ao fim).

Iremos então admitir que o número de pátios disponíveis é exatamente o necessário para o volume atual de tráfego conforme a formulação de Colson, sendo calculados o número dos mesmos, suas posições e custos. Logo, se um pátio existente apresenta para



 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 19/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

dado programa ocupação superior a 100% iremos admitir que um novo pátio ou duplicação será construído no trecho adjacente de modo que o tempo médio de trem parado por cruzamento fica aproximadamente constante.

Da forma como definimos o impacto de cruzamentos sobre o ciclo de minério, ou seja seguindo as prioridades atribuídas pela operação aos trens, exceto pelo cruzamento com o trem - P, este impacto fica integralmente para o trem-M de retorno. Assim, o tempo total de viagem do trem de minério no sentido exportação já é conhecido pela expressão:

$$TransitTime_{EXPORTAÇÃO} = Marcha_{EXPORTAÇÃO} + Quebra + \sum_{i=1}^{Nr_helps} help + \left(A \text{ varia} / 2 \right) + Cruz_Trem - P$$

Com este tempo de viagem, podemos conhecer o número de trens-M no sentido exportação transitando na malha e então calcular o impacto de cruzamentos sobre o ciclo inteiro de minério.

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC		Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 20/43
		Data 23/12/2003	Rev.: 02

4.6) Tempo de re formação do trem na estação de Parauapebas

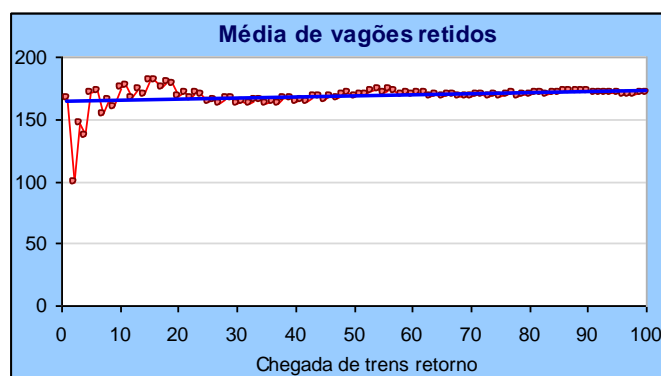
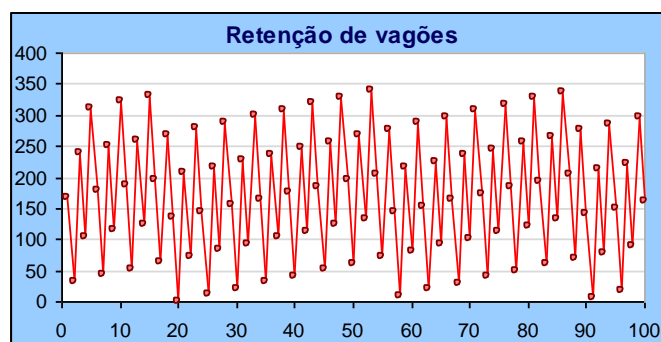
No caso de cenários em que os tamanhos do trem sejam diferentes no sentido exportação ou retorno, por questões de otimização da eficiência energética teremos o trem de retorno menor do que o exportação, de modo a caber em todos os pátios de cruzamento, tal que seja o retorno que é atualmente de menor prioridade a parar nos pátios de cruzamento enquanto o carregado passa sempre pela direta. Estudos anteriores demonstram que esta estratégia de priorização em muitos casos elimina o impacto das diversas paradas/arrancadas sobre o consumo do trem-M.

Neste cenário, teremos um tempo de trem parado para re formação em Parauapebas para que o trem mude a sua configuração, reunindo um determinado número de trens de retorno para compor um trem maior sentido exportação. Claramente, existem dois tempos envolvidos: o tempo em que um trem de retorno aguarda o próximo trem de retorno, que é a razão entre os tamanhos do trem carregado e retorno multiplicada pelo intervalo médio entre trens de retorno e o tempo de manobra a partir do momento em que todos os vagões necessários estejam reunidos em Parauapebas. O CCO estima um tempo fixo de 1h para esta manobra. A este tempo deve ser acrescido o tempo de link para o trem sentido exportação se o trem for de tração distribuída, o que não ocorrerá se o trem for igual em ambos os sentidos pois, estabelecido o link na formação do retorno em TPM, o mesmo segue sem alteração até fechar o ciclo. Os critérios para definição do tempo de link do locotrol seguem o detalhado a seguir para o tempo de link na formação no terminal de Ponta da Madeira.



$$PA = 1 + \frac{vg_carregado}{vg_retorno} \left(\frac{24}{tr_dia_retorno} \right) + tmp_link$$

$$\begin{cases} tmp_link = 0 & \Rightarrow \text{Para } Blo\cos = 1 \\ tmp_link = 0,667 + 0,333 \cdot (Blo\cos - 2) & \Rightarrow \text{Para } Blo\cos \geq 2 \end{cases}$$

O gráfico a seguir demonstra a situação no pátio de re formação para o locotrol de 340 vg com retorno de 206 vg a uma taxa diária de 8 trens/d. Vemos que o tempo aguardando pode chegar a 5h às quais serão acrescidas 1h de manobra e 40 min de link.



Tamanho exportação	340	vg
Tamanho retorno	206	vg
Trens/dia retorno	8	
Tam. export / return	1.65	
Tr return / Tr export	1.67	
Espera média p/ trem	5.0	h

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC		Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 21/43
		Data 23/12/2003	Rev.: 02

4.7) Tempo no terminal Carajás

Este tempo envolve diversas parcelas, cuja média horária em 2003 está relacionada na tabela a seguir:

Manobra de Recepção	0,32	6%
Aguardando carregamento	1.56	29%
Carregamento	2.52	44%
Manobra de formação	0.97	18%
CICLO VAGÃO CKS	5.37	

Na modelagem da permanência do trem em CKS admitiremos as seguintes regras, levantadas junto ao CCO:

- O tempo envolvido na manobra de posicionamento no silo deve permanecer aproximadamente invariante com relação ao trem;
- O tempo aguardando o carregamento deve evoluir linearmente com o volume diário de trens carregados.
- Se apenas 1 silo está disponível e o tamanho do trem excede o comprimento da L1, então ao tempo aguardando será acrescido o tempo de carga dos N lotes, onde N é a razão entre o comprimento do trem e da L1. O mesmo ocorre para 2 silos se o comprimento do trem excede o tamanho da L1 e L3. Se existem 3 ou mais silos, estes acréscimos no tempo aguardando não se observam. Por fim, independente do número de silos, se o trem excede a extensão da L1 + L3 + L5, ao tempo aguardando é acrescido o tempo de deslocamento da L56 a CKS já que o trem tem de ser fracionado na estação anterior tal que a direta não seja bloqueada em função da concorrência dos cargueiros e trens de serviço pelo acesso à pêra;
- O tempo de carregamento aumenta linearmente com o total de vagões a carregar no trem e com o número de silos e recuperadoras alocadas à atividade;
- A manobra de formação a princípio não deve sofrer variação com relação ao tempo atual (bater os N lotes, teste de cauda e licenciamento) até o limite de comprimento das linhas atuais. Quando o tamanho do trem excede o comprimento da L2 de formação, são acrescidos N_1 vezes o tempo entre CKS-L56, onde N_1 é a razão entre o tamanho do trem e a extensão da L2. A idéia é que as N_1 frações do trem seguem para a L56, uma de cada vez, para lá "bater" e completar a formação.

O conjunto de regras listado compõe uma heurística que é calculada para cada cenário de trem e programa de modo a estimar a componente do ciclo referente à permanência em CKS.



4.8) Tempo no terminal Ponta da Madeira para vagões

Este tempo envolve diversas parcelas, cuja média horária em 2003 está relacionada na tabela a seguir:

Manobra de Recepção	0.92	13%
Aguardando descarga	1.09	15%
Descarga	1.98	27%
Manobra de classificação	1.20	16%
Inspeção manutenção	0.11	1%
Manobra de formação	1.67	23%
Ag. Locomotiva	0.03	0%
Ag. Equipe	0.21	3%
Ag. Circulação	0.15	2%
CICLO VAGÃO TPM	7.36	

Cabe observar que o tempo de permanência em Set/03 estava na faixa de 10,45 h. De fato, os registros de permanência ao longo da primeira quinzena de Set/03 apresentam grande dispersão variando de 6,15 a 15,03 h. O desvio-padrão desta amostra é de 2,8 h.

A exemplo da metodologia aplicada para previsão do tempo de permanência em CKS, as seguintes regras - levantadas junto ao CCO - definem a lógica para previsão do tempo de permanência no TPM:

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 22/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

- Um trem carregado, será fracionado na recepção em um número inteiro N de lotes de vagões para descarga. Os lotes serão iguais e limitados pela capacidade do braço do virador que é de 120 GDT, conforme informado pela gerência de operação dos viradores;
- A manobra de recepção consome 30 min para o 1º lote do virador, 20 min para o 2º lote e mais 10 min para cada lote adicional no caso de trens maiores em tração distribuída;
- O tempo aguardando descarga eleva-se linearmente com o aumento do volume diário de trens carregados. Se o número de lotes para descarga é inferior ao número de viradores disponíveis, o tempo aguardando descarga será nulo. No caso oposto, mais lotes do que viradores, ao tempo aguardando descarga será acrescido o tempo de descarga dos lotes excedentes;
- Para contemplar no modelo a limitação de extensão das linhas de recepção no TPM e acesso aos viradores (L1 a L5), consideramos que caso o tamanho do trem exceda a extensão da L1 e seja menor que L1+L2 o trem é recebido sem obstruir a direta a partir do KM 0 mas o TPM não pode receber nenhum outro trem enquanto o atual estiver em recepção, aguardando descarga e na descarga propriamente dita. Isto provoca um atraso que denominamos "aguardando recepção" que é a soma destas 3 parcelas mais o tempo de deslocamento da locação 1 ao TPM menos o tempo médio entre chegadas de trens a TPM (que reduz-se com o programa). Deste modo só contamos como atraso o tempo decorrido após a chegada do 2º trem enquanto o 1º não passou pelo virador. Para os casos em que o tamanho do trem exceda o comprimento de L1 + L2, consideramos que o trem não é tecnicamente viável pois a sua recepção impediria a entrada e saída do TPM por um tempo elevado;
- O tempo de descarga é fixo e igual ao atual já que o tamanho do lote de fato não muda assim como a vazão dos viradores. São os tempos que a antecedem, o tempo de manobra e o tempo aguardando descarga, que sofre variações com respeito ao número de lotes (tamanho do trem) e número de viradores (apenas o tempo aguardando descarga);
- A classificação é dividida em duas parcelas, sendo uma o deslocamento na linha que conduz os vagões dos viradores até o pátio de classificação - esta parcela é invariante com relação à definição do trem - e outra referente ao tempo para classificar os vagões - esta parcela eleva-se linearmente com o tamanho do trem;
- Da mesma forma, o tempo da manutenção no pátio também eleva-se linearmente com o tamanho do trem;
- Para contemplar a extensão da maior linha do pátio de formação consideramos que, para trens de tamanho superior a esta, o pátio de classificação e a linha de acesso à oficina de vagões ficam bloqueados. Isto cria um novo atraso que denominamos "aguardando formação" decorrente da impossibilidade de transferir um novo trem recebido para descarga e classificação (após a passagem no virador o lote descarregado tem que, necessariamente, seguir para classificação. Não podem existir retenções nas linhas após os viradores). Este atraso será então a soma dos tempos de formação (do 1º trem), deslocamento e classificação (do 2º trem). Deste atraso abatemos ainda o tempo de descarga (do 2º trem) admitindo que exista eficiente coordenação de pátio para adiantar a descarga sem que a formação do 1º trem esteja 100% concluída;
- Admite-se que o tempo de formação permanece aproximadamente invariante com relação ao atual, acrescido do link nos casos de retorno com tração distribuída, conforme definido no item 4.6;
- Os demais tempos aguardando tração, aguardando equipe e aguardando licença são constantes.



4.9) Tempo no terminal Ponta da Madeira para locomotivas

A permanência de locomotivas no TPM é diferenciada com relação aos vagões pois as mesmas passam por diferentes processos. Estas participam nas manobras de recepção e formação. Entre estas duas etapas são acrescentados os tempos de inspeção e abastecimento de lubrificante na oficina (2,19 h) e o tempo de abastecimento de água, arreeiro (8 min) e diesel (25 min). Os tempos de recepção e formação são os mesmos determinados para vagões. A inspeção e abastecimentos é constante de 2,74h assim como os demais tempos aguardando equipe e licença.

$$TPM_{LOCOS} = ag_recepção + tmp_recepção + inspeção + (tmp_formação + tmp_link) + ag_equipe + ag_licença$$

$$\begin{cases} tmp_link = 0 & \Rightarrow \text{Para } Blo\cos = 1 \\ tmp_link = 0,667 + 0,333 \cdot (Blo\cos - 2) & \Rightarrow \text{Para } Blo\cos \geq 2 \end{cases}$$

Para os objetivos deste trabalho, estabelecemos que o tempo de inspeção não depende do tamanho do trem ou do tipo de tração formada. A inspeção de equipamentos de bordo corre paralela à inspeção da loco e, em geral, consome menor tempo de modo que a mesma não precisa ser considerada no cálculo da permanência.

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 23/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

5 . Metodologia de solução do modelo por otimização

As técnicas de otimização se aplicam à obtenção de soluções ótimas das variáveis que regem o comportamento de um sistema. Embora eficientes, estas técnicas apresentam limitações na modelagem de sistemas complexos. Ao introduzirmos aspectos dinâmicos e muitas variáveis o modelo de otimização é difícil de ser montado. A aplicação de simulações reproduz com maior fidelidade o comportamento de sistemas complexos, porém a técnica serve para avaliar soluções pré-determinadas (as configurações para as variáveis em questão) e não para gerar soluções. Isto limita o campo de pesquisas de soluções: No máximo, garantimos que a melhor dentre todas as soluções avaliadas foi selecionada como solução.

No presente trabalho seguimos uma solução combinada: A *Simulation Optimization*. Na forma como empregamos, as simulações de inúmeros cenários são ajustados em equações de regressão e combinadas com modelos físicos e estatísticos para produzir um modelo não-linear de diversas variáveis com suficiente aderência ao sistema real.



Então, condições de contorno são estabelecidas para as variáveis tal que uma rotina de otimização possa ser aplicada na busca do conjunto ótimo de soluções.

5.1) Rotina de determinação da configuração do trem e ciclo associado para cenários arbitrários

Para procedermos a otimização do sistema, precisamos definir um procedimento de cálculo dos vários parâmetros envolvidos na modelagem. Para permitir a obtenção de soluções ótimas, vamos admitir que a razão (TB/HP) do trem-tipo é variável de modo que permitimos a alocação de HP excedente ao trem. Também, admitiremos que possam existir situações de alocação de locos rebocadas sem tracionar. A tração distribuída existe apenas como uma hipótese que depende das restrições de limite de HP em um único bloco para a EFC e do fato do esforço trator exceder ou não os limites admissíveis para os engates.

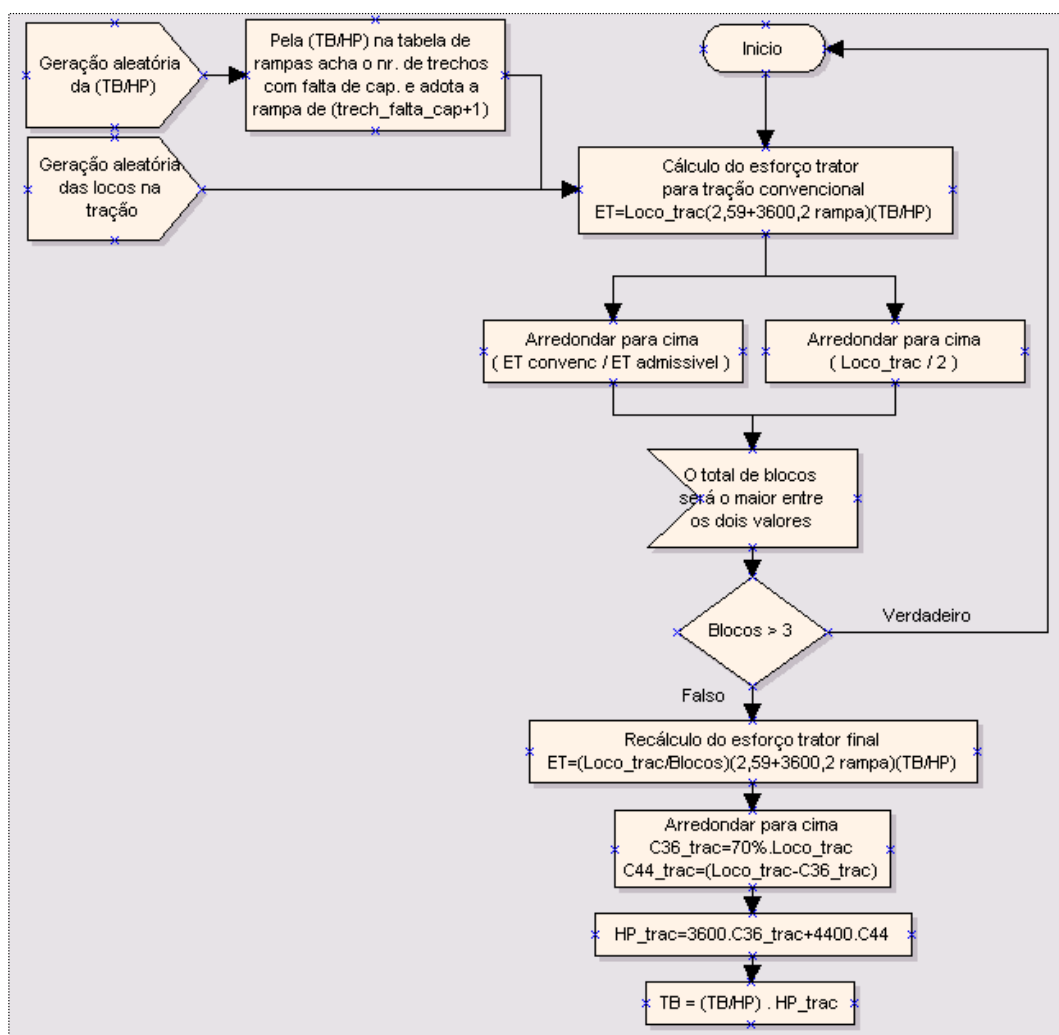
Obviamente, flexibilizar o sistema desta forma não implica que todas estas opções serão viáveis. Estamos apenas partindo de um sistema com menos restrições *a priori* e permitindo que o processo de otimização conduza, naturalmente, às soluções ótimas neste processo descartando as hipóteses inviáveis. Iremos também admitir os seguintes parâmetros como condições de contorno do problema:

- A razão (TB/HP) varia na faixa de 1,475 a 7,146 que foi a faixa de dados de simulação utilizados para o ajuste das curvas do item 4.1 (para tração com 1 C36 isto produz trens na faixa de 50 a 206 GDTs. Trens com mais de 2,737 TB/HP, mais pesados, exigirão auxílios);
- No máximo, uma única loco rebocada, C36, será admitida para redundância da tração no trem-M carregado - foi sugerido pela equipe da oficina a alocação de locos SD40 de CG de modo que a redundância teria menor custo de capital mas esta opção não parece viável porque criaria um déficit de locos para CG, obrigando o repasse de C36 para trem-C e novas aquisições de C44 para trem-M. Então para cada loco de menor valor alocada à redundância um novo investimento 4 vezes maior seria necessário;
- No máximo, 6 locos serão admitidas para tração do trem-M. Isto porque, se forem 6 C36 sem nenhuma rebocada, isto implica em chegar a uma falibilidade de 50% no ciclo de minério (em cada 2 trens, um falha antes de completar 1 ciclo). Como este cenário é claramente inviável, não existe motivo para considerar a alocação de um maior número de locos num mesmo trem;
- Consideramos uma restrição de 9000 HP por bloco de locos em trem na EFC. Isto implica em que cada bloco pode reunir, no máximo, 2 locos (7200 HP com 2 C36 e 8800 HP com 2 C44). Como temos no máximo 6 locos no trem, a combinação destas duas regras implica em que a maior distribuição de tração só poderá ocorrer em 3 blocos, fora help;
- A regra do limite de 9000 HP aplica-se também aos helpers. Sempre que a necessidade de locos em um bloco qualquer exceder um total de 2 máquinas, a solução não é calculada pois a configuração não é tecnicamente viável;
- Para simplificação, admitimos que o excesso de potência inerente à alocação dos helps será sempre capaz de absorver em função do aumento de velocidade o consumo adicional gerado pelo mesmo. Logo o consumo considerado para cálculo será o da tração principal do trem em todo o trajeto;
- Para definição do número de blocos para o trem de retorno, admitiremos que será o mesmo número de blocos do trem exportação sempre que o trem for igual em ambos os sentidos. Quando o trem for limitado pelo atual tamanho dos pátios, ou seja retorno de 206 GDT ou menor, a tração no retorno será sempre convencional, mesmo que o trem carregado opere com tração distribuída;
- máximo esforço longitudinal admissível para os engates é 170 t (Engate “E” pela AAR, com fator de segurança 1,75);
- Se o esforço longitudinal do trem ficar abaixo de 60 t, os engates estarão no regime de vida infinita à fadiga;
- Por simplificação, contamos as SD60 (3800 HP) na frota C36 (3600 HP) e as C40 (4000 HP) na frota C44 (4400 HP);

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003		Fl.: 24/43
	Data 23/12/2003		Rev.: 02

- Com esta premissa, temos que as C36 representam 50% da frota existente de locos para minério já incluídas as 8 C44 adquiridas da Ferronorte em preparação na oficina no início de 2004. Admitimos que as frotas são aleatoriamente distribuídas pelos trens e então, a tração dos trens será sempre mista, com C36 e C44, quando temos mais de 1 loco no trem. Para as situações de tração com 1 loco, os arredondamentos permitem apenas tração de C36;
- Um rendimento de 97% é admitido para o sistema Norte, assim consideramos 355 dias/ano de transporte;
- Para 2004, consideramos um volume de minério de 70,5 MTPA e um volume de carga geral de 5,9 MTPA;
- Para efeito de cálculo, vamos admitir um cargueiro médio de 2 SD40 + 4.500 TU e considerar que o ciclo deste trem permanece aproximadamente inalterado com relação ao atual. Assim, o número e necessidades destes trens na malha irão variar exclusivamente com o aumento do volume de carga geral;
- A indisponibilidade e não-utilização da disponibilidade serão de 22% para locos e 2% para vagões;
- Frota existente de locos para minério (C44, C36, SD60, C40): 82. Frota existente de GDTs: 5390, conforme informado pela oficina, considerando os recebimentos programados até Dez/04 pelos contratos celebrados até Jan/04;
- Todos os resultados calculados serão referentes às necessidades operacionais. Não são considerados os efeitos de tributação.

A abordagem seguida é a mais adequada para o objetivo do modelo: Prover uma base de comparação entre diferentes definições do trem de minério. Este objetivo não deve ser confundido com as necessidades de dimensionamento de HP, vagões e pátios mês-a-mês. O fluxograma a seguir apresenta a rotina seguida para a definição completa do trem de minério em um cenário hipotético: Razão peso - potência, total de locos (abrindo entre C36 e C44), blocos de tração distribuída, tamanho do trem carregado, tamanho do trem de retorno, se inclui loco rebocada no carregado ou não, número de auxílios, locos de helper, trechos a auxiliar e esforços.



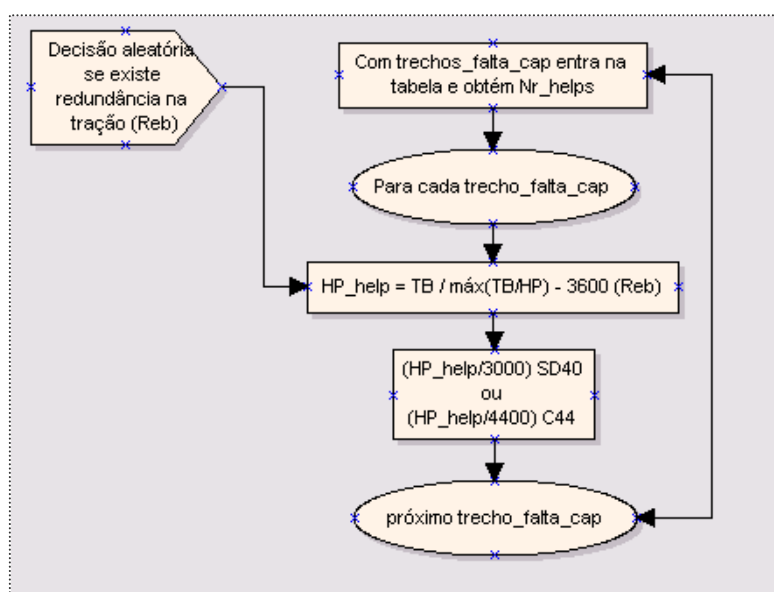
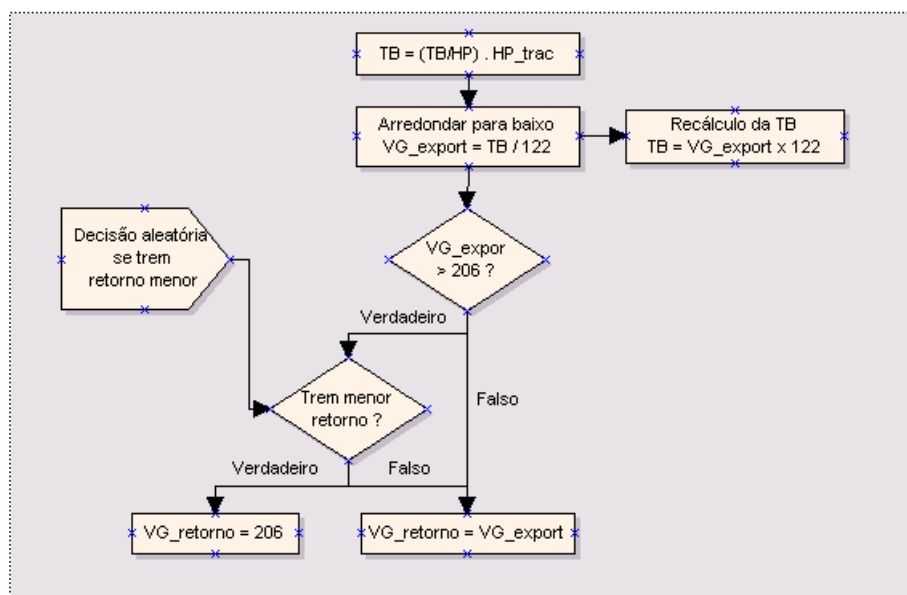
**CVRD****GETEG****GAESG**Título: **Trem-tipo de minério da EFC**

Nº: GAESG-092-2003

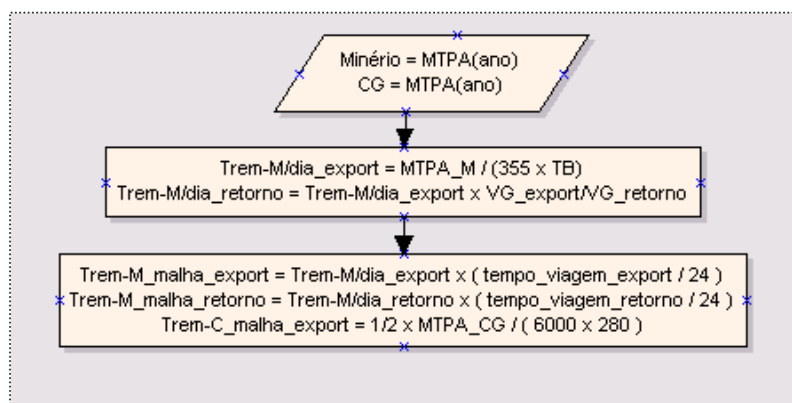
Fl.: 25/43



Data 23/12/2003

Rev.: 02



Com a definição do trem para o cenário hipotético, calculamos os parâmetros que irão determinar o tráfego a partir dos volumes de transporte considerados.



 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 26/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

O conjunto destes parâmetros permite calcular o ciclo de minério para locomotivas e vagões:

1. Os tempos de marcha e equipagem para o trem vazio e carregado são calculados pelas respectivas razões TB/HP, conforme o item 4.1;
2. O impacto de avarias é calculado com base nas falibilidades as quais, por sua vez, são obtidas considerando a razão TB/HP, para ter o MKBF esperado das C36 e C44 nestes cenários, e o total de locomotivas C36 e C44 em série e se existe uma C36 em paralelo ou não, conforme o item 4.2. A confiabilidade da tração no trem atual, R_{AS_IS} é de 80,5%;
3. O impacto de quebras de trem é calculado conforme o item 4.3, pelo maior esforço longitudinal obtido na rotina anterior;
4. O tempo gasto com a anexação dos helps é calculada conforme o item 4.4 em função do número total de auxílios necessários;
5. Para determinar o impacto de cruzamentos conforme o item 4.5, temos que obter o total de cruzamentos esperados no ciclo do trem-M que é a adição do número de trens M e C na malha, ambos no sentido exportação, com o trem P na malha (sempre 1). Para determinar o número de trens M sentido exportação, conforme a rotina anterior;
6. Se o trem de retorno difere do trem exportação neste cenário, o tempo de reformação do trem em Parauapebas para o carregamento deve ser calculado segundo o item 4.6;
7. O tempo no terminal CKS é calculado em função do número de vagões no sentido exportação, conforme item 4.7;
8. Temos ainda o tempo no terminal de Ponta da Madeira que é calculado de forma diferenciada para locos (item 4.9) e vagões (item 4.8) a partir do tamanho dos trens de retorno e exportação além do número de blocos de locomotivas na tração do trem de retorno (uma vez que afeta o ciclo em função do tempo para estabelecimento do link do locotrol);
9. A soma destas componentes compõe o ciclo total de minério para locos e vagões.

5.2) Necessidade de pátios para o ciclo e trens definidos no cenário arbitrário

Ao avaliar a necessidade de pátios para trens hipotéticos precisamos considerar dois diferentes aspectos:

- Se o trem de retorno é igual ao trem de exportação, e se ambos tem mais de 206 GDTs, um número de pátios deve ser ampliado o qual depende do tamanho do trem no cenário arbitrário;
- Independente do tamanho do trem de retorno, mas em função do volume planejado para transporte no ano e para o ciclo calculado no cenário arbitrário, pode ser necessária a construção de novos pátios de modo a não elevar o atual tempo de espera em cruzamentos, conforme discutido no item 4.5.

Para avaliar a extensão de pátios iremos considerar o comprimento total útil (CTU) de cada um dos pátios existentes da EFC (Anexo 3), distância do marco à SB ($DMSB = 5\text{ m}$) e uma extensão constante de 20 m de segurança, além do número de locos e vagões definidas no item 5.1. A sobra de extensão nos pátios pode ser então calculada por:

$$Sobra(m) = CTU - 2 \times DMSB - 10 \cdot Vg_retorno - 22 \cdot (Locos_trac + Reb) - 20$$



Neste cálculo consideramos 10 m para o comprimento do GDT e 22 m para o comprimento das locos. As sobras são calculadas para cada pátio construído sempre que o trem exceder 206 GDTs. Pátios com folga negativa exigem extensão do valor da própria folga.

Para a necessidade de novos pátios, utilizaremos o cálculo de capacidade de Colson para linhas singelas:

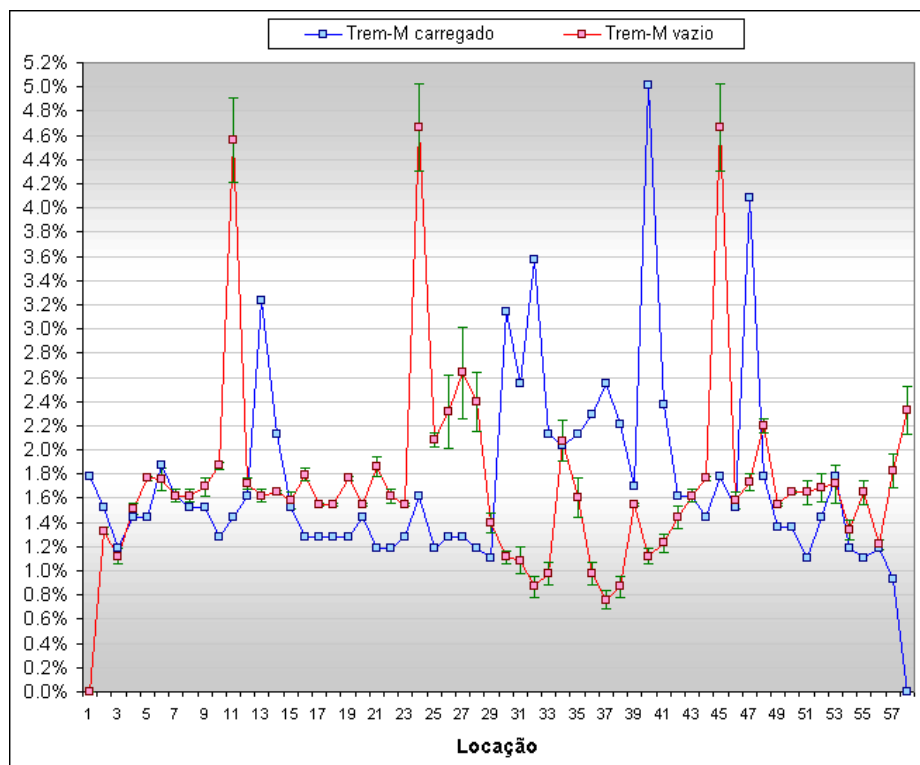
$$Capacidade_pares_trem = k \frac{(24 - T_{INDISP_VIA})}{Headway}$$

$$Headway = Marcha_{IDA} + Marcha_{VOLTA} + T_{AGUARDANDO}$$



Este cálculo deve ser aplicado a todos os trechos da EFC, considerando $k = 0,75$ e média diária de 2 h de indisponibilidade da via para manutenção (conforme as premissas normalmente admitidas para dimensionamento de pátios na EFC – “CapMacro”). Para cada trecho entre pátios cuja capacidade em pares for inferior ao número de trens exportação então um novo pátio deve ser criado naquele

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003		Fl.: 27/43
	Data 23/12/2003		Rev.: 02

trecho. Para determinar o headway dos trechos basta considerar os tempos de marcha em cada sentido, conforme o item 4.1 e aplicar estes tempos às seguintes distribuições por trecho:



Este gráfico foi obtido a partir de algumas das simulações que serviram de base para as equações ajustadas para o tempo de marcha do item 4.1 de modo a obter o “rateio” do tempo total de marcha pelos trechos em cada sentido. Uma estimativa dos erros foi efetuada para a distribuição no tempo do trem de retorno com diferentes razões (TB/HP) e as barras verdes indicam os desvios. No geral, os erros são aceitáveis e a abordagem é útil ao problema pois permite que a exata necessidade de pátios seja obtida a partir da marcha a qual depende da razão TB/HP no cenário sob análise. O CTU destes novos pátios será o comprimento do trem acrescido de 30 m (2.DMSB + 20 m de segurança) e a extensão total será CTU + 250 m (diferença padrão entre os AMVs e os marcos).

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 28/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

5.3) Função de mérito e técnica de otimização

Para avaliar a atratividade de uma opção de trem com relação às demais devemos eleger uma função de mérito a ser otimizada.

A redefinição do trem de minério deve ser avaliada com respeito às alterações calculadas nas necessidades de locos, sistemas locotrol, vagões, pátios, equipes e diesel. No caso específico dos sistemas locotrol, a necessidade existe apenas quando o número de blocos do trem é maior que 1, ou seja, quando o esforço trator desenvolvido obriga à distribuição da tração no trem. As seguintes expressões determinam as necessidades totais destas quantidades para o minério da EFC em um ano:

$$\begin{aligned}
 HP &= Trem_dia_export \times (Locos_export + Rebocadas) \times \left(\frac{ciclo_loco}{24} \right) + \sum_{i=1}^{Nr_helps} help_{(i)} \\
 GDT &= (Trem_dia_export \times VG_export) \times \left(\frac{ciclo_vg}{24} \right) \\
 Pátios\ (m) &= \sum_{PATIOS_MENORES} (-Sobra_{(M)}) + Novos_pátios\ (Comprim_trem_{(M)} + 2DMSB + 20 + 250) \\
 Diesel\ (mil\ L / ano) &= \frac{1}{1000} \left\{ (0,982\ EE\ TB) \cdot (355\ tr_dia)_{EXPORT} + (0,982\ EE\ TB) \cdot (355\ tr_dia)_{RETORNO} \right\} \\
 Equipes &= 4 \times trem_malha \\
 Locotrol &= 1,3\ (Trem_dia_export \times Blocos_export) \times \left(\frac{ciclo_loco}{24} \right)
 \end{aligned}$$

Todos os parâmetros envolvidos no cálculo destas necessidades já foram desenvolvidos no item 5.1, com exceção da eficiência energética (EE) para cada sentido cuja equação para cálculo foi obtida nas regressões lineares apresentadas no tópico 4.1. Quanto à necessidade de pátios para um cenário arbitrário, o seu cálculo segue a rotina exposta no item 5.2.



A nossa função de mérito deve ser uma combinação linear de todas estas necessidades. O custo de cada uma delas fornece uma base adequada para ponderar a sua participação nesta função.

Vamos considerar os seguintes custos: 1970 mil US\$ por loco de minério, 45 mil US\$/GDT (conforme definido pela oficina a partir das últimas aquisições da EFVM e EFC), 0,9526 R\$/l diesel (preço médio sem icms na EFC em Out/03, conforme relatório diesel-dilo), 20 mil R\$/equipe/ano (sem encargos e benefícios), 500 US\$/m para novos pátios e extensão de pátios e 100 mil US\$ por sistema locotrol (conforme preço final fechado com a GEVISA na aquisição para a FCA em 2003). Consideramos ainda a paridade de 2,95 R\$/US\$ (cotação oficial 14/11/03). Podemos então propor a seguinte função de mérito:

$$J = 1800 \left[(HP - Exist_loco) + \frac{Exist_loco}{10} \right] + 50 \left[(GDT - Exist_GDT) + \frac{Exist_GDT}{45} \right] GDT + 0,213\ Pátios + 0,3229\ Diesel + 13,56\ Equipes + 100\ locotrol$$

A função de mérito, J, totaliza em milhares de US\$ o custo de um ano de operação do trem nos volumes definidos pela soma do capital imobilizado em ativos (HP, locotrol, GDT e pátios) e o custeio anual (diesel e equipes) da operação deste transporte. No caso dos ativos em especial, estaremos considerando para as frota existentes apenas o valor da depreciação linear dos mesmos em 1 ano para ter a mesma base de medida do custeio, para isto, dividimos o custos dos ativos pela vida econômica dos mesmos (vida útil). Consideramos 12 anos para locos (até o primeiro *full overhaul*) e 30 anos para vagões GDT, conforme definido junto à equipe da oficina. Para a necessidade de HP e GDT que excede a frota existente, o valor integral do ativo é acrescido ao custo anual da operação já que trata-se de um investimento para viabilizar a PV daquele ano em particular.

Nos casos em que as necessidades totais de HP são inferiores à frota existente, consideramos um desinvestimento de 600 mil US\$ por loco já que o número de locos em excesso é repassado para a carga geral na proporção 1:1 dispensando a compra de locos para carga (a exemplo de outros estudos similares, admite-se que a carga sempre possui demanda para absorver o excesso do minério). No caso de sobra de GDTs da frota existente, não é considerado o desinvestimento do ativo. No caso de pátios e sistemas locotrol, desconsideramos a depreciação anual e portanto apenas as ampliações (para pátios) e novas aquisições (construções para pátios)

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 29/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

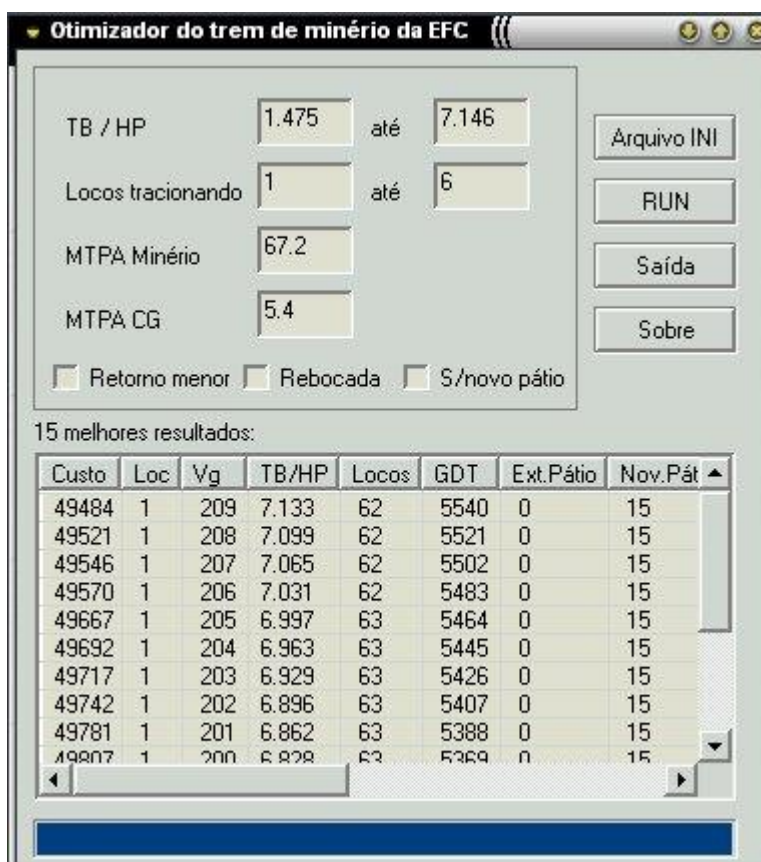
entram no cálculo. Como não existe nenhum sistema locotrol disponível no presente para a EFC, todas as necessidades contribuem integralmente para o cálculo.

Neste contexto, definimos que o trem ótimo para o transporte de minério na EFC será aquele que minimize o custo J de todas as necessidades relacionadas, diferenciando entretanto as necessidades de recursos existentes das novas necessidades.

Vamos então tratar o problema da busca de soluções. Como dissemos, na *Simulation Optimization* empregada, as simulações de inúmeros cenários são ajustados em equações de regressão e combinadas com modelos físicos e estatísticos para produzir um modelo não-linear de diversas variáveis com suficiente aderência ao sistema real. Porém, técnicas convencionais de solução não são aplicáveis em função da complexidade do modelo vamos então aplicar a pesquisa exaustiva de soluções variando os parâmetros de locos/trem e TB/HP de modo uniforme.

O algoritmo desenvolvido foi implementado em código C++, compilado e linkado no LCC-Win32 de modo a produzir um executável com interface gráfica de seleção de parâmetros e, principalmente, a mais elevada performance de processamento. Desta forma, é possível efetuar-se um grande número de rodadas do algoritmo sem que esta execução consuma um tempo proibitivo.

O executável resultante teve a *relocation table* removida e foi compactado em UPX 1.90, gerando uma pequena peça de software com cerca de 19 kB capaz de rodar o algoritmo desenvolvido cerca de 2000 vezes em 10 seg sob processador Pentium 3. A planilha CSV de saída para o Excel apresenta tipicamente 1 MB de dados. A figura a seguir apresenta a interface gráfica (GUI) do aplicativo.



Otimizador do trem de minério da EFC

TB / HP: 1.475 até 7.146

Locos tracionando: 1 até 6

MTPA Minério: 67.2



MTPA CG: 5.4

☐ Retorno menor ☐ Rebocada ☐ S/novo pátio

Arquivo INI
RUN
Saída
Sobre

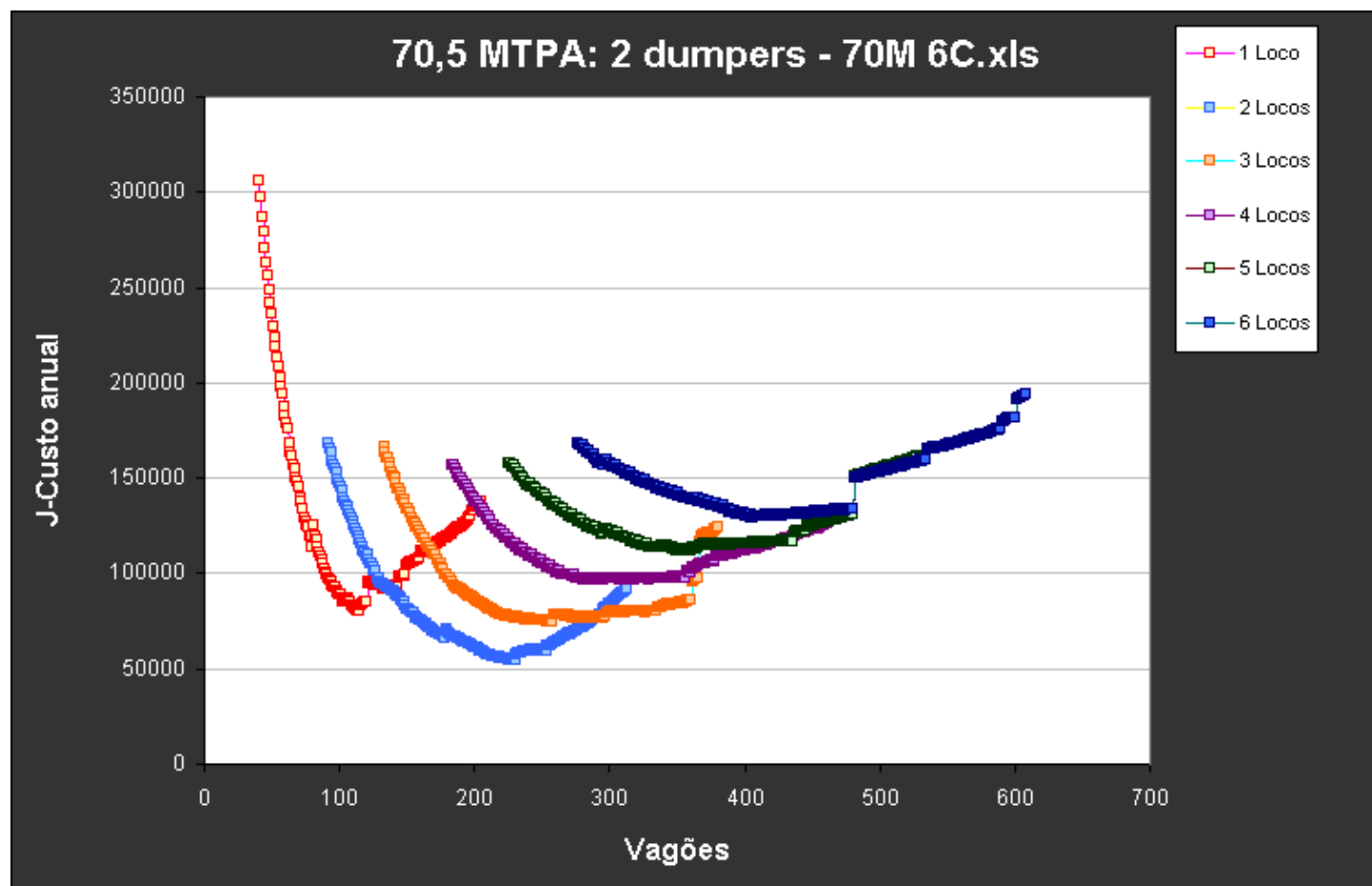
15 melhores resultados:

Custo	Loc	Vg	TB/HP	Locos	GDT	Ext.Pátio	Nov.Pát
49484	1	209	7.133	62	5540	0	15
49521	1	208	7.099	62	5521	0	15
49546	1	207	7.065	62	5502	0	15
49570	1	206	7.031	62	5483	0	15
49667	1	205	6.997	63	5464	0	15
49692	1	204	6.963	63	5445	0	15
49717	1	203	6.929	63	5426	0	15
49742	1	202	6.896	63	5407	0	15
49781	1	201	6.862	63	5388	0	15
49807	1	200	6.828	63	5369	0	15

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003		Fl.: 30/43
	Data 23/12/2003		Rev.: 02

6 . Resultados



O gráfico a seguir apresenta a evolução da função de custo, J no cenário de 70,5 MTPA, com o tamanho do trem para cada um dos trens-tipos avaliados pela rotina conforme definido ao longo das seções 4 e 5 deste trabalho. A curva dos trens com 2 locos exibe o mínimo global.



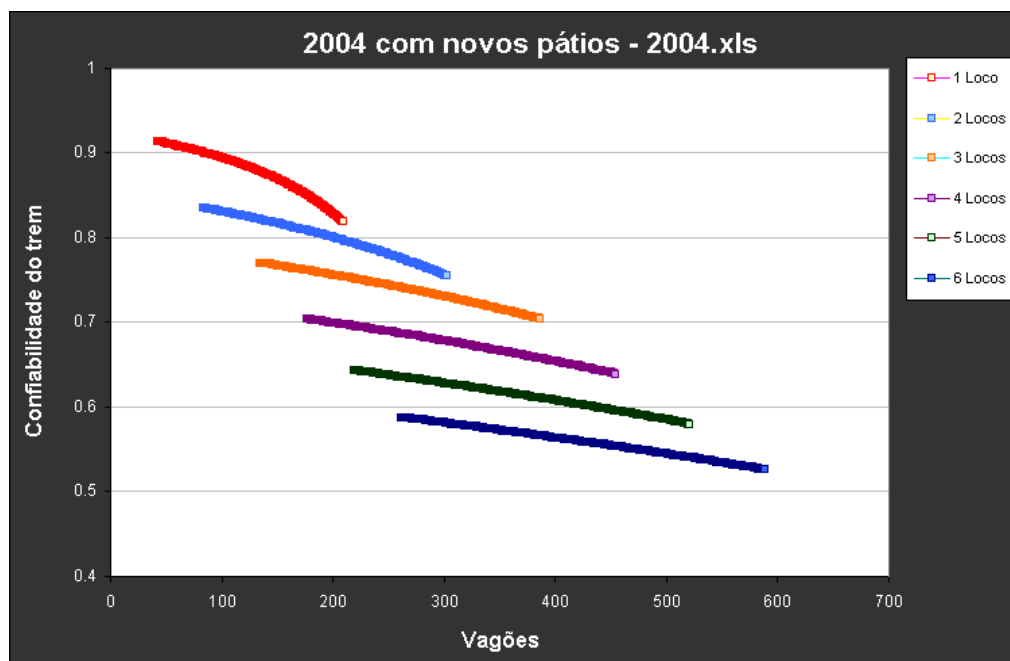
Identificamos um comportamento das curvas do tipo parabólico no qual as mesmas decrescem, atingindo um mínimo e reiniciam a elevar o custo com o aumento do tamanho do trem.

Os “saltos” observados neste gráfico ocorrem sempre nas mesmas razões TB/HP para todos os tipos de trem e são justamente as razões nas quais definimos as alocações de helps pois, acima destas razões, a tração definida para o trem não apresenta capacidade em todo o trecho (em 2,806 TB/HP por ex., definimos o help “A” que é o atual entre o km 617 e 480). Após o ponto de alocação de helps as curvas continuam a decrescer já que a necessidade de helpers reduz com o aumento do trem (já que há menos trens na malha a auxiliar). Outras descontinuidades situam-se próximas aos tamanhos múltiplos de 240 GDTs quando um tempo adicional de espera na descarga em TPM é incorporado já que temos no cenário de 70 MTPA apenas 2 viradores com capacidade de 120 GDTs cada. Estes são alguns dos eventos discretos (definidos em “degraus”) associados ao modelo que introduzem descontinuidades na evolução do custo com o tamanho do trem.

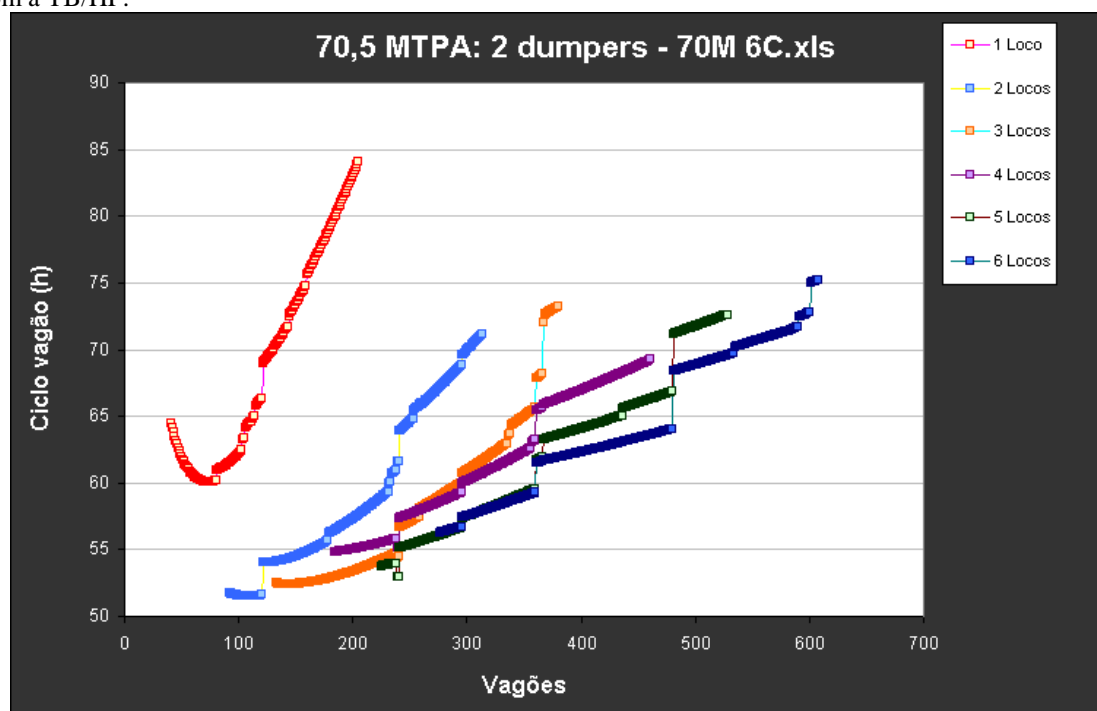
Observamos também que só as trações de 1 loco conseguem explorar, às custas de alocações de todos os 6 helps, todo o espectro de razões TB/HP avaliado isto porque em trens maiores o aumento desta razão dá origem a soluções com 3 locos no help ou em um dos blocos (> 9000 HP), solução esta impossível pelo aspecto técnico.



 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003		Fl.: 31/43
	Data 23/12/2003		Rev.: 02

O gráfico a seguir apresenta a confiabilidade da tração calculada segundo o modelo do item 4.2 para os diversos trens-tipo. Claramente as configuração com menos locos na tração e baixas razões TB/HP apresentam confiabilidades superiores o que reduz a parcela do ciclo associada às avarias, 2º maior impacto no ciclo atual de minério da EFC.

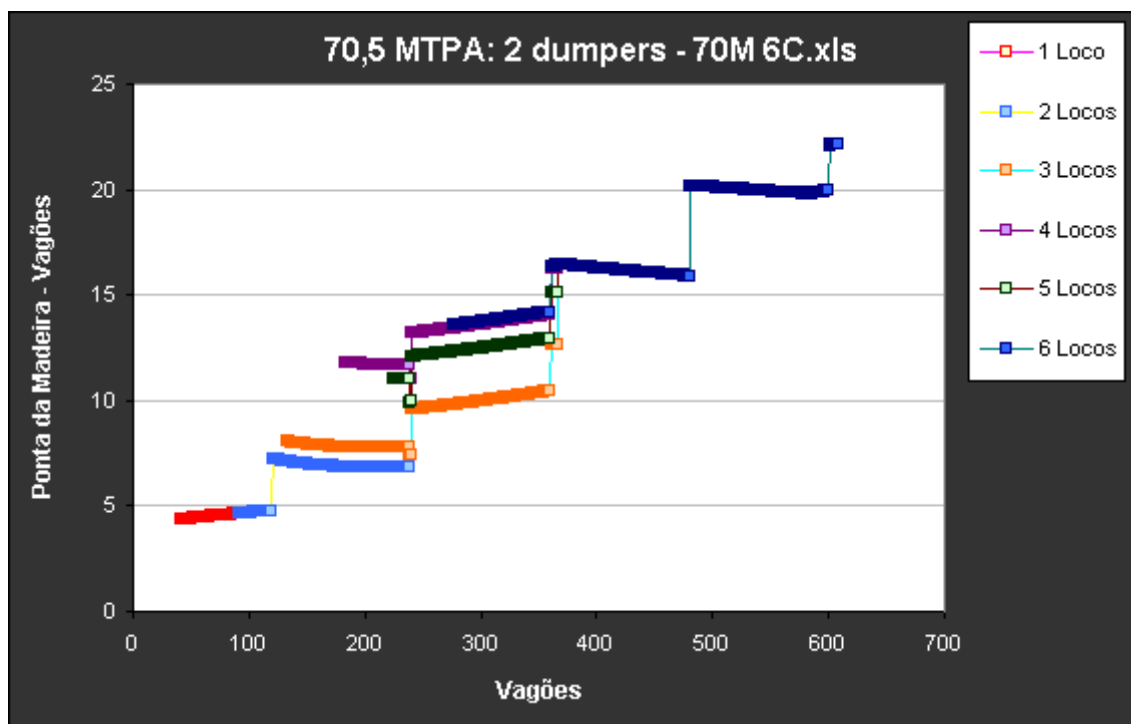


No próximo gráfico temos os ciclos projetados de vagões para as diversas configurações do trem. Como seria de esperar o ciclo aumenta para cada tipo de trem com a razão TB/HP mas sofre as descontinuidades do tempo de acoplamento dos helps e, de forma mais clara, do tempo de espera no virador de vagões quando o trem excede acumulos múltiplos de 120 GDT. Observa-se que a formação de trens maiores com mais locos na tração muda a inclinação da curva do ciclo mas não ao ponto de modificar a tendência de evolução com a TB/HP.

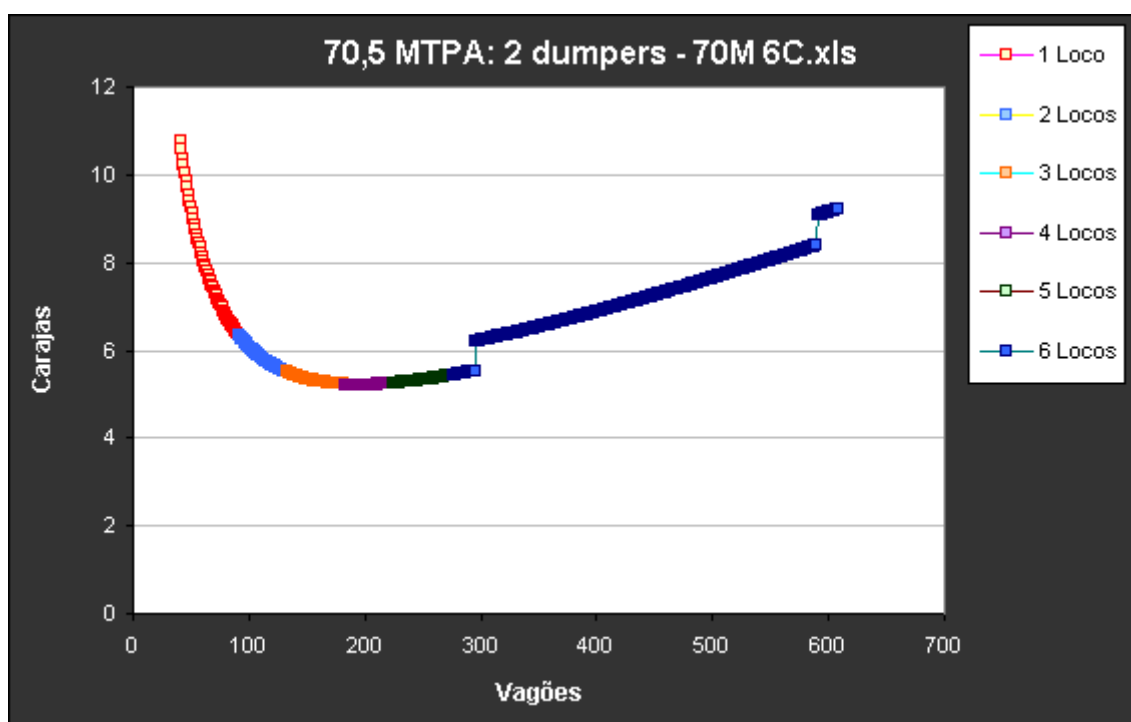




 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003		Fl.: 32/43
	Data 23/12/2003		Rev.: 02

A seguir temos o ciclo de vagões no TPM. O comportamento é linear com o tamanho do trem exibindo os degraus nos múltiplos de 120 GDTs. Observa-se também que os trens com mais de 2 locos gastam mais tempo para o mesmo tamanho de trem. Isto deve-se ao link do locotrol aplicado em todas as configurações com mais de 2 locos. Observa-se que o ciclo TPM evolui de 4 a até 22 h.

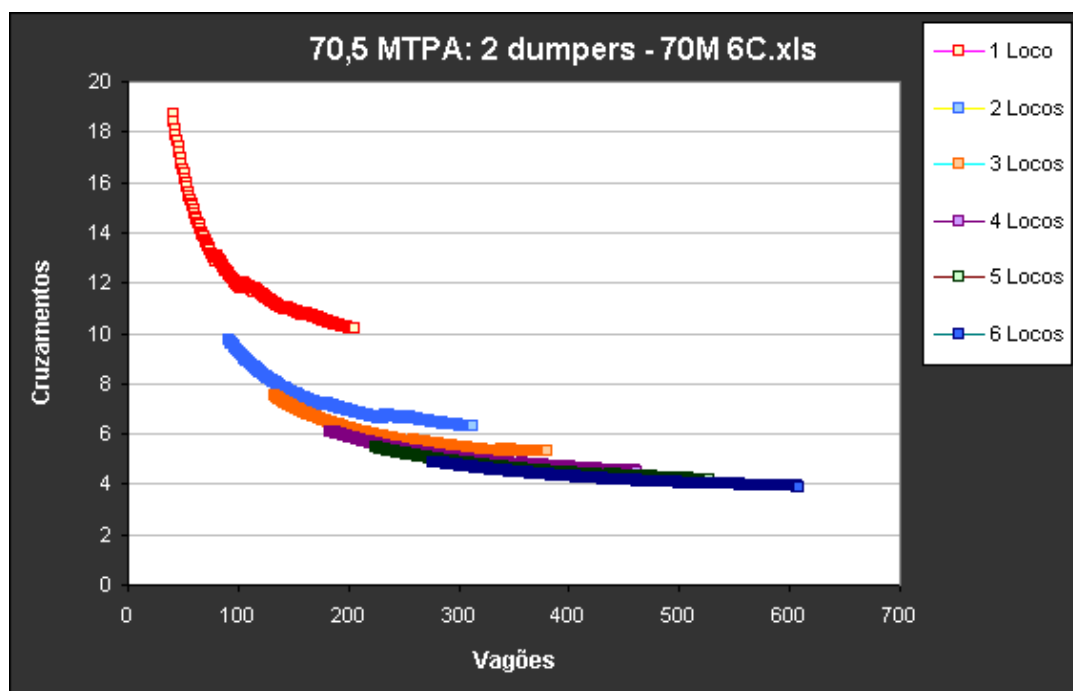


O gráfico a seguir apresenta a evolução da permanência em Carajás com o tamanho do trem.

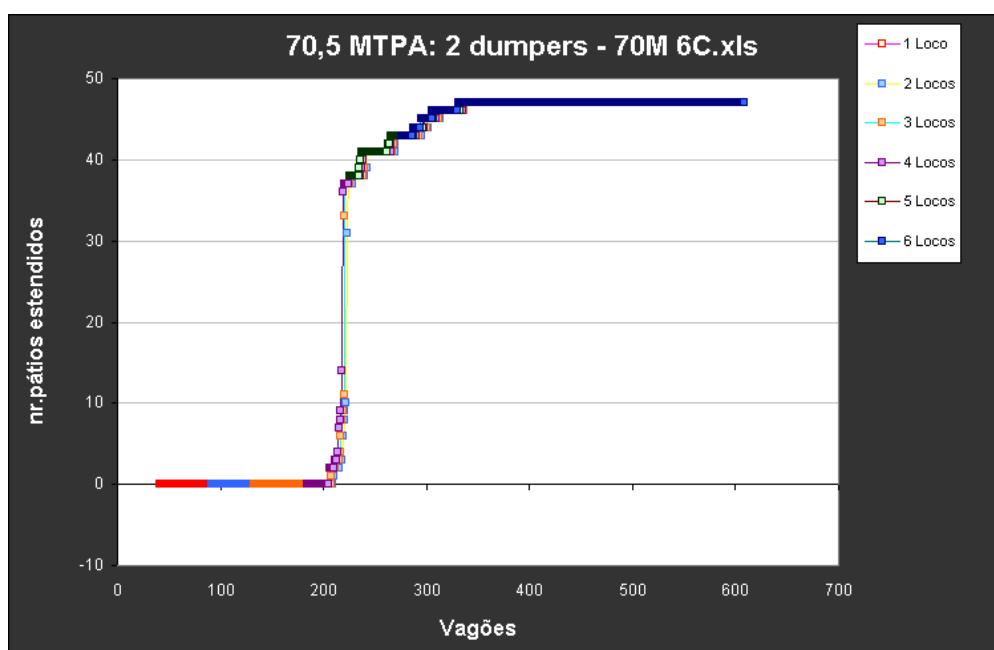




 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003		Fl.: 33/43
	Data 23/12/2003		Rev.: 02

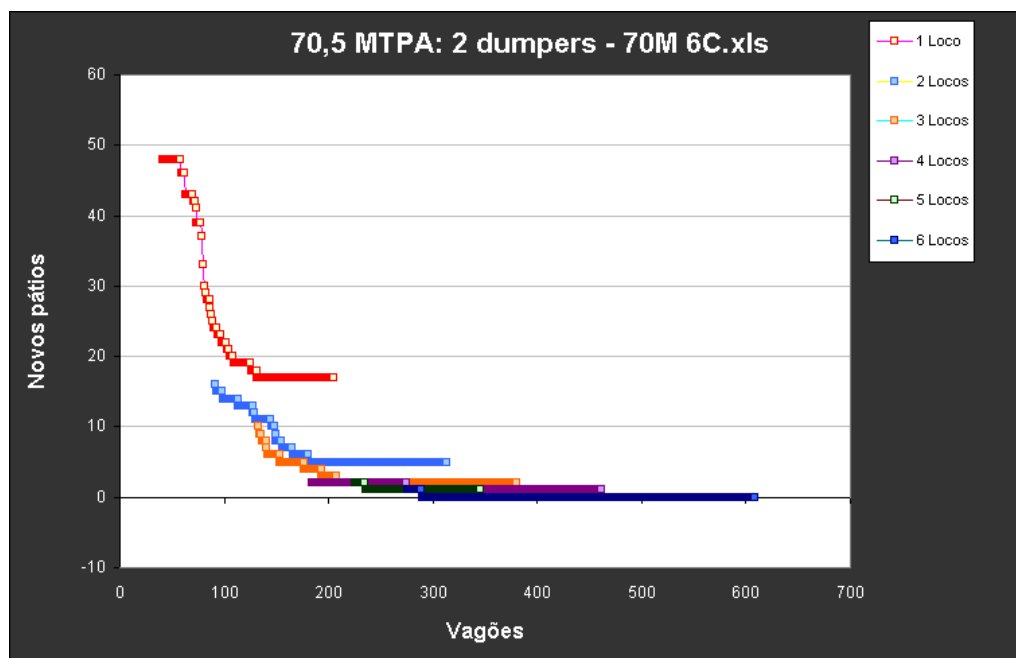
Abaixo temos a evolução do impacto de cruzamentos com o tamanho do trem. O comportamento decresce potencialmente com o tamanho do trem mas a redução é mais significativa dos trens com 1 loco até 3 locos (para o mesmo tamanho, menor TB/HP). Após, o ganho com o aumento de locos na tração é menor. Observa-se ainda que, excluindo o caso dos trens com 1 loco (muito pequenos, ou de elevada TB/HP), o impacto varia na faixa de 10 a 4 h (6,8 h é o obtido para o trem 2L+206) ou seja é pequeno na presença da evolução observada nos ciclos TPM (5 a 22 h) e CKS (6 a 9 h).



Nos gráficos a seguir temos, respectivamente, a necessidade de ampliações e construções de novos pátios com o aumento do trem. A construção de novos pátios já é reduzida para 2 com trens de 3 locos a partir de 210 GDT (baixa TB/HP, o que reduz o headway. No trem 2L+206 com os volumes informados para 2004, temos 5 novos pátios). O modelo revela ainda que quando o tamanho do trem chega a 218 GDT a quantidade de pátios a ampliar inicia um salto de 9 para 37 na forma de uma curva-S.





 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003		Fl.: 34/43
	Data 23/12/2003		Rev.: 02



Finalmente, apenas os trens com 3 ou mais locos na tração exigem a aplicação da tecnologia. Como vimos, estes trens não produzem resultados otimizados para a EFC, logo a tecnologia não será necessária para os volumes estimados em 2004.

A seguir temos os 10 melhores resultados para o cenário de 70,5 MTPA e 2 viradores:

J	loc/trem	vg	tb/hp	locos.total.trem	GDT	Ext.patio	Novo patio	mil L	equipes
54469	2	225	3.533	55	4876	37	5	140284	80
55081	2	223	3.502	56	4865	31	5	141102	81
55082	2	222	3.486	56	4859	10	5	141517	81
55137	2	221	3.470	56	4853	9	5	141935	81
55213	2	220	3.455	56	4848	8	5	142358	82
55281	2	219	3.439	56	4842	6	5	142784	82
56130	2	218	3.424	57	4837	3	5	143215	82
56234	2	217	3.409	57	4831	3	5	143649	83
56327	2	216	3.393	57	4826	3	5	144087	83
56420	2	215	3.377	57	4820	2	5	144529	83
56520	2	214	3.362	57	4815	2	5	144975	83
56636	2	213	3.346	57	4810	2	5	145425	84
57501	2	212	3.331	58	4804	2	5	145878	84
57606	2	211	3.316	58	4799	2	5	146336	84
57726	2	210	3.300	58	4794	1	5	146798	85

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 35/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

7 . Conclusões

Com a entrada em operação das últimas 8 C44 adquiridas da FerroNorte e em preparação pela oficina, verificamos que a frota C44 + C40 fica na proporção de 50% com relação à frota C36 + SD60 (apenas 1, considerada). Então, o caso mais provável será de tração mista C44 + C36 no trem-M da EFC. Para esta combinação, e considerando implantado o novo help da L53, concluímos que para manter a atual relação TB/HP, o trem pode aumentar para até 228 GDT.

Ao rodar o otimizador baseado em critério econômico, verificamos que o trem ótimo para 70 MTPA com 2 viradores é o 2L + 224 GDT. Entretanto, será necessário efetuar expansões de 17 a 100 m em 37 pátios existentes. Para o cenário de 80 MTPA de minério, 8 MTPA CG e 3 viradores, o trem mais econômico é o 2L+222 GDT, mantendo o ciclo na casa de 59 h obtido com o trem 224 GDT no cenário 70 MTPA. Para 90 MTPA de minério, 15 MTPA CG e 3 viradores temos o trem 2L+220 GDT com um ciclo de 62,3 h.



Para o trem de 224 GDT, será necessário efetuar expansões de 17 a 100 m em 37 pátios existentes. Dado o tempo disponível estas obras podem não ser tecnicamente viáveis. Não obstante, o 6º trem mais econômico é o 2L + 220 GDT que exige a expansão média de apenas 5 pátios elevando a necessidade de locos em 1 mas reduzindo a necessidade de GDT em 34 vagões, com relação ao 225 GDT (com relação ao 206 GDT, temos redução nas necessidades de 3 locos e aumento de 68 GDT). O ciclo permanece na ordem de 58h para o volume de 70 MTPA. A elevação total no custo deste horizonte é da ordem de 812 kUS\$/ano. Portanto, esta parece uma opção mais razoável no curto prazo, considerando também o horizonte de 90 MTPA.

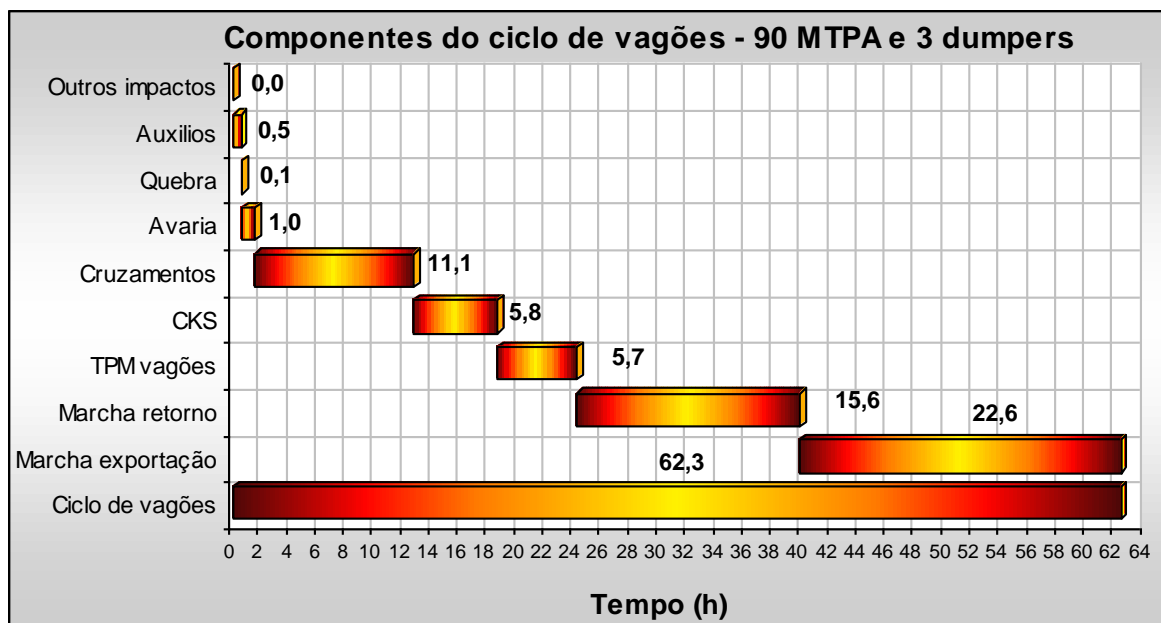
Logo, a definição do trem ótimo da EFC nos limites de 70 a 90 MTPA de minério é:

C44 + C36 + 220 GDT (27.640 TB)

Como demais parâmetros operacionais, temos 31 t/eixo, 3.455 TB/HP, um esforço trator máximo na ordem de 87 t nos trechos do KM 10 a 19 e KM 70 a 78. Outros trechos críticos são os KM 688 a 710 e KM 95 a 100. A confiabilidade da tração é de 83%, com um impacto de avarias na casa de 1h. São previstas confiabilidades de 62615 km para s C36 e 68625 km para as C44. Os tempos de marcha são da ordem de 23h no sentido exportação e 16h no sentido retorno. A tabela a seguir indica as evoluções previstas para o ciclo de minério (vagão), Permanência no TPM, impacto de cruzamentos, volume diário de trens, necessidade de locos para trem-M e help e necessidade total de GDT.

	70,5 MTPA	80 MTPA	90 MTPA
Ciclo GDT (h)	58,5	59,0	62,3
Permanência no TPM	6,8	5,7	5,7
Permanência em CKS	5,2	5,5	5,8
impacto de cruzamentos	6,7	8,0	11,1
Volume diário de trens	8,9	10,1	12
necessidade de locos para trem-M e help	56	66	82
necessidade total de GDT	4.842	5.524	6.947

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003		Fl.: 36/43
	Data 23/12/2003		Rev.: 02



Quanto às adequações da via, os seguinte itens descrevem as obras necessárias:

70,5 MTPA minério e 6 MTPA CG, 2 dumpers

Será necessária a extensão de 4 pátios: L10 em 10m, L26 em 40m, L38 em 93m e L53 em 88m. Deverão ser construídos 4 novos pátios nas L32, L35, L37 e L40. Será necessário duplicar o trecho entre as L47-L48.

80 MTPA minério e 8 MTPA CG, 3 dumpers

Deverão ser construídos mais 4 novos pátios, além dos 4 do cenário 70 MTPA, nas L22, L35, L52 e L57. Será necessário duplicar ainda o trecho entre as L44-L45, além da L47-L48.



Cenário 95 MTPA minério e 15 MTPA CG, 3 dumpers

Deverão ser construídos mais 3 novos pátios, além dos 8 dos cenários 70 e 80 MTPA, nas L29, L43, e L55. Será necessário ainda duplicar os trechos entre as L10-L11, L13-L14, L23-L24, L30-L31, L33-L34, L41-42.

Analista responsável
Correio eletrônico

Tito Lívio Medeiros Cardoso
tito.livio@cprd.com.br

Início 10 / 09 / 2003
Status **Concluído**

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 37/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

ANEXO 1. Determinação do "perfil característico" da EFC

A metodologia consistem em segmentar a EFC, para cada sentido, em trechos menores "característicos", ou seja, trechos nos quais a via apresenta uma resistência semelhante ao movimento de trens em função de suas rampas e curvas, ou rampas equivalentes.

O "perfil" resume-se a uma tabela de rampas equivalentes "características" da resistência do trecho, as quais podem ser utilizadas para:

- Avaliar se uma determinada composição apresenta capacidade de reboque em todo os trechos característicos entre a origem e o destino;
- Dimensionar uma nova composição para determinada origem-destino a partir da pior rampa nos trechos característicos. Este dimensionamento pode atender a diferentes critérios: Pelo limite de capacidade das locos, Tal que nenhuma das locos tracione abaixo da VMC, entre outros.



Para determinar dos trechos característicos do perfil foram empregados simuladores ferroviários, caracterizando os trens simulados pela razão peso/potência (estudos anteriores determinaram que o comportamento do trem na EFC se repete com boa aproximação para diferentes trens com mesma razão peso/potência). Desta forma, foram efetuadas 66 simulações variando a razão de 1,772 a 7,146 TB/HP no sentido exportação e 0,636 a 2,461 TB/HP no sentido retorno marcando em cada simulação os trechos de "stall", ou seja, aqueles em que se observa falta de capacidade de reboque para a composição.

A partir deste mapeamento, foram estabelecidos 29 trechos contínuos no sentido exportação e 18 no sentido retorno nos quais o limite à razão TB/HP admissível é aproximadamente uniforme. Como a base do cálculo de resistência ao movimento empregado pelo simulador é exatamente igual ao utilizado neste trabalho (vide item 3.1) é possível efetuar o cálculo inverso e determinar a rampa equivalente que conduz a esta resistência e, então, à limitação na razão HP/TB.

A tabela a seguir apresenta os trechos característicos obtidos desta forma para o sentido exportação:

	Trecho	TB/HP máx	vg/3.6kHP	Rampa eq.
1	km 892 - 824	11.263	327	0.04%
2	km 824 - 813	3.632	104	0.27%
3	km 813 - 751	11.746	341	0.03%
4	km 751 - 744	5.010	144	0.17%
5	km 744 - 731	17.222	500	0.00%
6	km 731 - 725	5.527	159	0.15%
7	km 725 - 710	17.222	500	0.00%
8	km 710 - 688	3.977	114	0.24%
9	km 688 - 670	17.222	500	0.00%
10	km 670 - 663	6.973	201	0.11%
11	km 663 - 652	17.222	500	0.00%
12	km 652 - 649	4.872	140	0.18%
13	km 649 - 627	17.222	500	0.00%
14	km 627 - 625	4.080	117	0.23%
15	km 625 - 607	5.408	157	0.15%
16	km 607 - 477	2.806	80	0.37%
17	km 477 - 216	8.473	246	0.07%
18	km 216 - 213	6.801	196	0.11%
19	km 213 - 192	12.469	362	0.03%
20	km 192 - 186	4.976	143	0.18%
21	km 186 - 129	8.370	243	0.08%
22	km 129 - 127	6.801	196	0.11%
23	km 127 - 100	10.850	315	0.04%
24	km 100 - 95	4.080	117	0.23%
25	km 95 - 78	17.222	500	0.00%
26	km 78 - 70	3.667	105	0.26%
27	km 70 - 19	14.122	410	0.02%
28	km 19 - 10	3.701	106	0.26%
29	km 10 - 0	6.579	191	0.12%

A tabela a seguir apresenta os trechos característicos obtidos para o sentido retorno:

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC		Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 38/43
		Data 23/12/2003	Rev.: 02

	Trecho	TB/HP máx	vg/3.6kHP	Rampa eq.
1	km 0 - 1	3.272	95	0.30%
2	km 1 - 3	2.204	64	0.47%
3	km 3 - 63	5.718	166	0.14%
4	km 63 - 65	2.377	69	0.43%
5	km 65 - 416	4.168	121	0.22%
6	km 416 - 431	1.206	35	0.90%
7	km 431 - 439	4.340	126	0.21%
8	km 439 - 443	1.343	39	0.81%
9	km 443 - 447	3.203	93	0.31%
10	km 447 - 450	1.447	42	0.75%
11	km 450 - 539	1.516	44	0.71%
12	km 539 - 541	2.204	64	0.47%
13	km 541 - 813	2.514	73	0.41%
14	km 813 - 815	2.204	64	0.47%
15	km 815 - 866	3.272	95	0.30%
16	km 866 - 868	2.411	70	0.43%
17	km 868 - 879	3.410	99	0.28%
18	km 879 - 892	1.206	35	0.90%

Apenas como exemplo, é interessante observar que para um trem de 2 C36 e 206 GDT com 25.904 TB (100% sinter) temos incapacidade de reboque no trecho 16 do sentido exportação (km 607 a 477), justamente a região do atual help entre o km 617 (L41-Vila Nova) e 480 (L30). Para o mesmo trem 100% sinter com 208 GDT e 26.152 TB temos alertas para os trechos 16 e 2 (km 824 a 813), justamente o trecho para o qual está sendo proposto o projeto do novo help na Locação 53 para os trens mais pesados. Verifica-se que a metodologia empregada mantém boa aderência com a prática observada na EFC.

ANEXO 2. Simulações para determinação do tempo de viagem em função da razão (TB / HP)

Trem carregado CKS-TPM

Locos	GDT	TB	cks-pm	cons.	L/KTKB	TB/HP	stall	help	km stall
1 C36	50	6.380	17.05	8.396	1.475	1.772	0,0%	0	
1 C36	55	7.000	17.67	8.978	1.438	1.944	0,0%	0	
1 C36	60	7.620	18.25	9.497	1.397	2.117	0,0%	0	
1 C36	65	8.240	18.92	10.044	1.367	2.289	0,0%	0	
1 C36	70	8.860	19.58	10.479	1.326	2.461	0,0%	0	
1 C36	75	9.480	20.37	10.891	1.288	2.633	0,0%	0	VMC de 21s
1 C36	78	9.852	21.30	11.132	1.267	2.737	0,0%	0	VMC de 27s. Limiar para 1o stall
1 C36	80	10.100	23.83	11.201	1.243	2.806	0,6%	1	580 a 479. Boa parte do trecho é por VMC e não por stall
1 C36	85	10.720	25.23	10.890	1.139	2.978	3,9%	1	607 a 479
1 C36	90	11.340	22.58	10.480	1.036	3.150	5,6%	1	607 a 479
1 C36	95	11.960	20.65	10.309	0.966	3.322	6,5%	1	607 a 479
1 C36	100	12.580	20.93	10.556	0.941	3.494	6,8%	1	607 a 479
1 C36	102	12.828	21.15	10.643	0.930	3.563	6,9%	1	607 a 479
1 C36	103	12.952	21.48	10.659	0.923	3.598	6,9%	1	607 a 479. Limiar para 2o stall
1 C36	104	13.076	22.43	10.773	0.924	3.632	7,0%	2	820 a 815, 607 a 478. Limiar p/ 3o stall
1 C36	105	13.200	22.90	10.791	0.916	3.667	7,1%	3	820 a 815, 607 a 478, 76 a 73, 17 a 11
1 C36	106	13.324	23.38	10.836	0.912	3.701	7,3%	4	820 a 815, 607 a 478, 76 a 73, 17 a 11
1 C36	108	13.572	23.50	10.881	0.899	3.770	7,5%	4	820 a 815, 607 a 478, 76 a 73, 17 a 11
1 C36	110	13.820	23.97	10.939	0.887	3.839	7,7%	4	820 a 815, 607 a 478, 76 a 73, 17 a 11
1 C36	111	13.944	24.00	10.960	0.881	3.873	7,8%	4	820 a 815, 607 a 478, 76 a 73, 17 a 11
1 C36	112	14.068	23.43	10.773	0.858	3.908	7,9%	4	821 a 815, 607 a 478, 76 a 73, 17 a 11
1 C36	113	14.192	24.33	11.064	0.874	3.942	8,0%	4	821 a 815, 607 a 478, 76 a 73, 17 a 11. Limiar p/ 5o stall
1 C36	114	14.316	24.83	11.042	0.865	3.977	8,2%	5	821 a 815, 691 a 689, 607 a 478, 77 a 73, 17 a 11
1 C36	115	14.440	24.60	11.068	0.859	4.011	8,2%	5	821 a 814, 691 a 689, 607 a 478, 77 a 73, 17 a 11
1 C36	116	14.564	24.82	11.134	0.857	4.046	8,3%	5	821 a 814, 691 a 689, 607 a 478, 77 a 73, 17 a 11. Limiar p/ 6o e 7o stall
1 C36	117	14.688	26.17	11.159	0.852	4.080	8,4%	7	821 a 814, 691 a 689, 627 a 625, 607 a 478, 97 a 95, 77 a 73, 17 a 11
1 C36	120	15.060	26.40	11.231	0.836	4.183	8,6%	7	822 a 815, 692 a 689, 627 a 625, 607 a 478, 97 a 95, 76 a 73, 17 a 11
1 C36	140	17.540	28.23	11.933	0.763	4.872	9,9%	7	823 a 814, 692 a 689, 652 a 649, 628 a 478, 98 a 96, 77 a 73, 18 a 11
1 C36	142	17.788	28.23	11.979	0.755	4.941	10,0%	7	824 a 814, 692 a 689, 652 a 649, 628 a 478, 98 a 96, 77 a 73, 18 a 11
1 C36	143	17.912	28.73	12.036	0.753	4.976	10,0%	8	824 a 814, 692 a 689, 652 a 649, 628 a 478, 189 a 186, 98 a 96, 77 a 73, 18 a 11
1 C36	144	18.036	29.23	12.088	0.751	5.010	10,1%	9	824 a 814, 748 a 745, 692 a 689, 652 a 649, 628 a 478, 189 a 186, 98 a 96, 77 a 73, 18 a 11
1 C36	145	18.160	29.23	12.152	0.750	5.044	10,1%	9	823 a 814, 748 a 745, 692 a 689, 652 a 649, 628 a 478, 189 a 186, 98 a 96, 77 a 73, 18 a 11
1 C36	150	18.780	29.23	12.284	0.733	5.217	10,4%	9	823 a 814, 748 a 745, 692 a 689, 652 a 649, 628 a 478, 189 a 186, 98 a 96, 77 a 73, 18 a 11
1 C36	155	19.400	30.23	12.516	0.723	5.389	10,6%	9	823 a 814, 748 a 745, 692 a 689, 652 a 649, 628 a 478, 189 a 186, 98 a 96, 77 a 73, 18 a 11
1 C36	158	19.772	30.23	12.581	0.713	5.492	10,8%	9	823 a 814, 748 a 745, 692 a 689, 652 a 649, 628 a 478, 189 a 186, 98 a 96, 77 a 73, 18 a 11
1 C36	159	19.896	30.73	12.635	0.712	5.527	10,9%	10	824 a 813, 749 a 745, 731 a 725, 692 a 689, 652 a 649, 628 a 477, 189 a 186, 100 a 95, 78 a 72, 19 a 11
1 C36	160	20.020	30.73	12.679	0.710	5.561	10,9%	10	824 a 813, 749 a 745, 731 a 725, 692 a 689, 652 a 649, 628 a 477, 189 a 186, 100 a 95, 78 a 72, 19 a 11
1 C36	180	22.500	32.73	13.190	0.657	6.250	12,0%	10	824 a 813, 749 a 745, 731 a 725, 692 a 689, 652 a 649, 628 a 477, 189 a 186, 100 a 95, 78 a 72, 19 a 11
1 C36	190	23.740	33.73	13.455	0.635	6.594	12,5%	10	824 a 813, 749 a 745, 731 a 725, 692 a 689, 652 a 649, 628 a 477, 189 a 186, 100 a 95, 78 a 72, 19 a 11
1 C36	195	24.360	33.73	13.595	0.626	6.767	12,8%	10	824 a 813, 749 a 745, 731 a 725, 692 a 689, 652 a 649, 628 a 477, 189 a 186, 100 a 95, 78 a 72, 19 a 11
1 C36	196	24.484	35.73	13.674	0.626	6.801	12,8%	12	824 a 813, 749 a 745, 731 a 725, 692 a 689, 652 a 649, 628 a 477, 216 a 214, 189 a 186, 129 a 127, 100 a 95, 78 a 70, 19 a 11
1 C36	200	24.980	35.73	13.761	0.618	6.939	13,1%	12	824 a 813, 749 a 745, 731 a 725, 692 a 689, 652 a 649, 628 a 477, 216 a 214, 189 a 186, 129 a 127, 100 a 95, 78 a 70, 19 a 11
1 C36	201	25.104	36.23	13.757	0.614	6.973	13,2%	13	824 a 813, 751 a 744, 731 a 725, 710 a 688, 670 a 667, 652 a 647, 628 a 477, 216 a 213, 192 a 186, 129 a 127, 100 a 95, 78 a 70, 19 a 10
1 C36	206	25.724	36.23	13.828	0.603	7.146	13,5%	13	824 a 813, 751 a 744, 731 a 725, 710 a 688, 670 a 663, 652 a 647, 628 a 477, 216 a 213, 192 a 186, 129 a 127, 100 a 95, 78 a 70, 19 a 10

Trem vazio TPM-CKS

Locos	GDT	TB	pm-cks	cons.	L/KTKB	TB/HP
1 C36	70	1.650	14,52	6.064	4,120	0,458
1 C36	103	2.343	15,73	8.223	3,935	0,651
1 C36	140	3.120	17,62	10.102	3,630	0,867

Outros trens carregados TPM-CKS

Locos	GDT	TB	pm-cks	cons.	L/KTKB	TB/HP	stall	help	km stall
1 C36	17	2.288	14,35	3.944	1,932	0,636	0,0%	0	
1 C36	20	2.660	14,65	4.534	1,911	0,739	0,0%	0	
1 C36	30	3.900	15,80	6.385	1,835	1,083	0,0%	0	
1 C36	32	4.148	16,03	6.819	1,843	1,152	0,0%	0	
1 C36	33	4.272	16,18	6.948	1,823	1,187	0,0%	0	
1 C36	34	4.396	16,40	7.099	1,810	1,221	0,0%	0	VMC por 2s
1 C36	35	4.520	17,05	7.148	1,773	1,256	0,4%	2	417 a 431, 884 a 892
1 C36	38	4.892	16,87	7.394	1,694	1,359	1,1%	2	417 a 431, 884 a 892
1 C36	39	5.016	16,80	7.460	1,667	1,393	1,2%	3	417 a 431, 441 a 443, 884 a 892
1 C36	40	5.140	16,97	7.557	1,648	1,428	1,3%	3	417 a 431, 441 a 443, 884 a 892
1 C36	41	5.264	17,13	7.668	1,633	1,462	1,4%	3	418 a 431, 441 a 443, 884 a 892. VMC: 448 a 450
1 C36	42	5.388	17,60	7.783	1,619	1,497	1,5%	3	417 a 431, 440 a 443, 448 a 450, 884 a 892
1 C36	45	5.760	17,62	8.037	1,564	1,600	1,8%	3	417 a 431, 440 a 443, 447 a 450, 884 a 892
1 C36	50	6.380	17,73	8.464	1,487	1,772	2,1%	3	416 a 431, 440 a 443, 447 a 450, 884 a 892
1 C36	60	7.620	18,68	9.328	1,372	2,117	2,7%	3	416 a 431, 440 a 443, 447 a 450, 883 a 892
1 C36	64	8.116	19,80	9.744	1,346	2,254	2,8%	5	1 a 3, 416 a 431, 439 a 443, 447 a 450, 539 a 541, 813 a 815, 879 a 892
1 C36	65	8.240	20,15	9.836	1,338	2,289	2,8%	5	1 a 3, 416 a 431, 439 a 443, 447 a 450, 539 a 541, 813 a 815, 879 a 892
1 C36	69	8.736	20,78	10.145	1,302	2,427	3,1%	6	1 a 3, 63 a 65, 416 a 431, 439 a 443, 447 a 450, 539 a 541, 813 a 815, 879 a 892
1 C36	70	8.860	21,30	10.246	1,296	2,461	3,2%	7	1 a 3, 63 a 65, 416 a 431, 439 a 443, 447 a 450, 539 a 541, 813 a 815, 866 a 868, 879 a 892

**CVRD****GETEG****GAESG**Título: **Trem-tipo de minério da EFC**

Nº: GAESG-092-2003



Fl.: 1/43

Data 23/12/2003

Rev.: 02

ANEXO 3. Características das locações da EFC

Km	PFX	LOCAÇÃO	NOME PÁTIO	Km AMV 01	Km AMV 02	CTU
0	PM	01	PONTA MADEIRA	0	-	-
11	11	02	Km 11	8+877	11+662	2,496 m
23	23	03	Km 23	22+280	25+300	2,769 m
39	PE	04	PERIZES	37+697	40+431	2,482 m
57	57	05	Km 57	55+781	58+329	2,296 m
73	73	06	Km 73	72+139	74+673	2,302 m
91	91	07	Km 91	89+815	92+236	2,263 m
108	108	08	Km 108	107+614	110+165	2,300 m
126	126	09	MIRANDA	125+203	127+757	2,303 m
145	VM	10	VITÓRIA MEARIM	144+295	146+800	2,254 m
161	161	11	Km 161	159+812	162+362	2,298 m
179	179	12	Km 179	178+326	180+884	2,306 m
196	196	13	Km 196	195+020	197+554	2,301 m
213	SI	14	SANTA INÊS	211+908	214+518	2,359 m
230	230	15	Km 230	229+331	301+869	2,307 m
249	249	16	Km 249	248+118	250+671	2,302 m
265	AA	17	ALTO ALEGRE	263+812	266+330	2,267 m
281	281	18	MINEIRINHO	280+274	282+800	2,299 m
299	299	19	AUZILÂNDIA	297+751	300+179	2,296 m
315	315	20	ALTAMIRA	314+509	317+065	2,305 m
334	PP	21	PRESA PORCO	333+081	335+605	2,273 m
351	351	22	Km 351	349+605	352+152	0 m
367	367	23	Km 367	366+618	369+173	2,304 m
384	NV	24	NOVA VIDA	383+701	386+252	2,300 m
405	405	25	Km 405	404+200	407+668	3,217 m
422	422	26	BOM JESUS	421+089	423+564	2,224 m
439	433	27	Km 433	437+991	440+541	2,781 m
457	457	28	Km 457	456+026	458+575	2,298 m
470	470	29	Km 470	469+049	471+599	0 m
480	480	30	Km 480	477+444	481+874	3,468 m
492	492	31	Km 492	491+156	493+710	2,303 m
502	502	32	Km 502	500+318	502+868	0 m
513	AL	33	AÇAILÂNDIA	512+284	514+835	2,299 m
531	531	34	Km 531	529+857	532+420	2,312 m
545	545	35	Km 545	544+423	546+915	0 m
556	556	36	Km 556	554+922	557+434	2,299 m
565	565	37	Km 565	565+830	568+387	0 m
575	575	38	Km 574	574+284	576+706	2,171 m
591	591	39	Km 591	589+284	592+359	2,296 m
603	603	40	Km 603	601+461	604+015	0 m
617	617	41	VILA NOVA	615+985	618+537	2,301 m
633	633	42	Km 633	631+541	634+991	0 m
650	SP	43	SÃO PEDRO	648+821	651+336	2,263 m
668	668	44	Km 668	666+629	669+179	2,299 m
685	685	45	Km 685	683+812	686+179	2,295 m
702	702	46	Km 702	701+354	703+904	2,299 m
720	720	47	Km 720	719+334	721+867	2,282 m
738	MA	48	MARABÁ	736+381	739+176	3,026 m
753	753	49	Km 753	752+082	754+640	2,307 m
769	769	50	Km 769	767+848	770+392	2,293 m
785	785	51	ITAINÓPOLIS	783+681	786+232	2,300 m
801	801	52	Km 801	800+364	802+915	0 m
817	817	53	Km 817	816+017	818+444	2,176 m
832	832	54	Km 832	830+680	833+233	2,302 m
848	848	55	Km 848	847+184	849+734	0 m
861	PA	56	PARAUPEBAS	859+379	862+463	3,103 m
878	878	57	Km 878	876+943	879+493	0 m
891	CJ	58	CARAJÁS	892+176	-	-

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 2/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

ANEXO 4. Parâmetros da rotina validados junto às áreas da operação Norte Arquivo "all_default.ini"

[Parâmetros gerais do formulário]

```

MIN TB-HP:1.475
MAX TB-HP:7.146
MIN LOCOS:1
MAX LOCOS:6
MTPA MINERIO:70.5
MTPA CG:5.9
PASSO CALC. TB/HP:0.001

```

[Parâmetros que alteram a forma de calculo padrão]

```

RETORNO MENOR:0
PERMITE REBOCADAS:0

```

[Constantes de tempo do ciclo atual]

```

ACOPLAGEM DO HELP:0.50
ESPERA EM CRUZAMENTO:0.50
ESPERA LINK:0.667
IMPACTO ATUAL AVARIA:1.11
IMPACTO ATUAL QUEBRA:0.09
MANOBRA REFORMACAO PARAUAPEBAS:1.00

TMP ATUAL RECEPCAO EM CKS:0.52
TMP ATUAL AGUARD. CARR. CKS:1.56
TMP ATUAL CKS CARREGAMENTO:2.52
TMP ATUAL FORMACAO EM CKS:0.97
TMP ATUAL DE VIAGEM L56-CKS:0.67

MANOBRA TPM RECEPCAO (1o LOTE):0.584
MANOBRA TPM RECEPCAO (2o LOTE):0.334
MAN. TPM RECEPCAO (DEMAIS LOTES):0.167
TMP ATUAL TPM AG.DESC:1.09
TMP ATUAL TPM DESCARGA:1.98
TMP ATUAL DESLOC. DUMPER/CLASS.:0.2
TMP ATUAL TPM CLASSIFICACAO:1.00
TMP ATUAL TPM MANUTENCAO:0.11
TMP ATUAL TPM FORMACAO:1.00
TMP ATUAL TPM AGUARD. LOCO:0.03
TMP ATUAL TPM AGUARD. EQUIPE:0.21
TMP ATUAL TPM AGUARD. LICENCA:0.15
INSPECAO OFICINA/ABASTEC. LOCOS:2.74
TMP ATUAL DE VIAGEM L01-TPM:0.45

```

[Constante para necessidade de pátios]

```

CUSTO LINHA/METRO:0.500
MINIMO TAM.PATIO NOVO (VG):206
DIST.MARCO A SB:5
EXT.SEGURANCA (m):20
DIST.MARCA A AMV:250
COMPR. GDT (m):10
COMPR. LOCO (m):22
CTE COLSON:0.75
INDISPONIB.VIA (h):2



```

[Constante para necessidade de HP e GDT]

```

VALOR LOCO MINERIO:1970
VALOR LOCO CG:600
VIDA UTIL LOCOS:12
VIDA UTIL VAGOES:30
FROTA EXIST.LOCOS:82
FROTA EXIST.GDT:5390

```

 CVRD	GETEG	GAESG	
Título: Trem-tipo de minério da EFC	Nº: GAESG-092-2003	Fl.: 3/43	
	Data 23/12/2003	Rev.: 02	

DISPONIBILIDADE LOCOS:0.78
DISPONIBILIDADE GDT:0.98

[Parâmetros da pêra CKS]

SILOS:2
RECUPERADORAS:3
RAZAO DE VAZAO RECUP./SILO:0.333
EXTENSAO L1 PERA:4030
EXTENSAO L3 PERA:2668
EXTENSAO L5 PERA:2482
EXTENSAO L2 PERA:2954

[Parâmetros do terminal TPM]

CAPACIDADE VIRADOR:120
NR.VIRADORES:2
EXTENSAO L1 ENTRADA:3669
EXTENSAO L2 ACESSO DUMPER:2177
EXTENSAO L8 PATIO FORMACAO:2383

[Constantes que determinam avarias e quebra]

CONFIAB. AS IS:0.8052
MKBF C36 AS IS:62000
MKBF C44 AS IS:72000
ESFORCO ADMISSIVEL:170
ESF.VIDA INFINITA:60
ESFORCO AS IS:88

[Outras constantes]

FROTA C36 / C44+C36:0.5
TB/VG CARREGADO:124
TB/VG RETORNO:20
TU GDT:102
TU/TREM CG:4500
DIAS/ANO MINERIO:355
DIAS/ANO CG:355
OUTROS TRENS/DIA:1
PAR/DIA DE TREM-M ATUAL:8.33