



11ª Semana de Tecnologia Metroferroviária – Fórum Técnico

Simulações de Trens – Métodos e Ferramentas para Concepção de Linhas Metroviárias

Josafá A. Neves

São Paulo – 21.Setembro.2005



Simulações de Trens – Métodos e Ferramentas para Concepção de Linhas Metroviárias

1 - Introdução

Uma linha metroviária ou metropolitana eficaz apresenta bons índices de desempenho de transporte de massa em termos de [passageiros x quilômetros / hora], “headway” e velocidade comercial. O “headway” é importante porque, associado à lotação dos trens, indica a capacidade de “esvaziar estações”. Similarmente, a velocidade comercial indica a capacidade de “transporte efetivo de passageiros por distância e tempo”. Diferentes soluções técnicas trazem implicações de custos através da quantidade de trens e da quantidade de equipamentos de sinalização de uma dada tecnologia. Neste quadro, a criatividade nas soluções técnicas pode render bons dividendos.

Este trabalho apresenta um método de projeto que produz resultados eficazes em termos de tempo de projeto da sinalização da via, otimização da configuração de equipamentos e do desempenho de transporte, apresentados com clareza e visibilidade para transparência na qualidade destes resultados.

Ferramentas informatizadas possibilitam a utilização deste método desde o projeto conceitual, fase importante no estabelecimento dos custos e desempenho do empreendimento total.

2 - Quadro básico do projeto

Muitos fatores influenciam o desempenho de uma linha de transporte sobre trilhos. Entre estes, há fatores relacionados à via, aos trens e também aos sistemas e equipamentos de sinalização. Análises de sensibilidade podem produzir resultados muito valiosos em qualquer fase desde o início de um projeto, mas este trabalho focaliza especialmente o projeto da sinalização.



Normalmente este projeto utiliza simuladores de movimento dos trens. Estes simuladores representam o comportamento dos trens controlados conforme a tecnologia de sinalização adotada. É verificada a operação normal e são determinados o “headway” e a velocidade comercial, confirmando também a segurança contra colisões através simulações de pior caso para garantir o espaçamento seguro entre os trens. Frequentemente, a abordagem envolve a análise crítica e o ajuste dos simuladores, alguma análise da via baseada na experiência do projetista, e a alocação tentativa dos dispositivos da sinalização na via. Conforme os resultados das simulações, são feitos outros ajustes e tentativas até obter resultados aceitáveis.

A abordagem proposta neste trabalho é determinista. Através de uma análise adequada da questão, são estabelecidos cálculos e procedimentos que conduzem diretamente à melhor solução, ou apresentam os limites oferecidos para decisão de projeto. Estes cálculos e procedimentos são executados com ferramentas informatizadas para a visualização e quantificação dos parâmetros envolvidos. Estas ferramentas permitem também rápidas análises de sensibilidade quanto aos fatores relevantes. Com isto, decisões de projeto podem ser concentradas em cada fator, proporcionalmente à sua influência sobre os resultados.

3 - Método

O método adotado consiste em duas fases principais:

- A. Modelo simplificado – Desenvolve-se um modelo simplificado, limite, considerando apenas alguns dos parâmetros intrínsecos aos equipamentos envolvidos, visando determinar limitantes superiores do desempenho e da capacidade. Com ferramentas informatizadas obtêm-se os valores das variáveis relevantes ao projeto tais como o “headway” limite mínimo possível e a velocidade comercial máxima possível, bem como as respectivas condições.
- B. Modelo completo – Analisa-se o sistema a partir do quadro obtido na fase inicial, determinando a aplicação dos dispositivos necessários e a inevitável redução de desempenho



e capacidade, decidindo sobre o balanço a ser adotado. Nesta fase a utilização de ferramentas informatizadas permite a visualização clara da melhor condição possível e do mínimo uso de dispositivos, através de seleção e localização otimizados.

Em ambas as fases, as ferramentas permitem análises de sensibilidade e orientam os esforços na alteração de parâmetros de projeto conforme seus efeitos sobre os resultados.

4 - Aplicação ilustrativa

Uma aplicação ilustrativa, selecionada para clareza na exposição do método, trata da localização dos blocos de detecção de ocupação e de transmissão de comandos de velocidade num trecho entre duas estações e na saída da segunda estação, em nível, sem limitações de velocidade civil. A aplicação em área de manobra, mais complexa mas muito importante, prejudicaria a clareza na apresentação do método.

São utilizados tanto o modelo operacional como o de frenagem de segurança, representativos do movimento do trem. Considera-se a capacidade de aceleração em função da velocidade e carga; espaços e tempos de atraso no reconhecimento de comandos de velocidade; limitações de “jerk” na transição até a taxa de frenagem efetiva (valor mínimo da frenagem máxima de serviço). São adotados quatro comandos de velocidade (90, 70, 50, 30 km/h), além do comando de parada, e método de aproximação da estação por Parada Programada – taxa de frenagem escalar constante.

A velocidade comercial é obtida como usual, pela simulação do movimento operacional, com capacidade de aceleração de trem carregado, acelerando até uma velocidade máxima estabelecida, e Parada Programada na segunda estação.

A determinação do headway, que determina a melhor localização dos blocos, trata diretamente do caso limitante na via corrida que é a chegada de um trem [2] a uma estação da qual o trem [1] à frente está partindo.

Na fase (A) foi definido o modelo simplificado como uma aproximação do que seria um sistema de blocos móveis: o trem [2] que chega à estação (à velocidade máxima e Parada Programada) tem, associada à sua posição, uma distância à frente correspondente à frenagem segura conforme o modelo adequado para o trem, considerando sua velocidade real. O “headway” mínimo corresponde ao intervalo entre os dois trens tal que a curva correspondente aos pontos de frenagem segura à frente do trem [2] tangencia a curva do movimento da traseira do trem [1]. É desconsiderado qualquer seccionamento da via em blocos, tanto para a detecção de trens como para comandos de velocidade.

Naturalmente, o headway obtido desta forma é um limitante inferior, não realizável na prática, nem mesmo por um sistema de blocos móveis. No entanto, este é um valor extremamente importante para que se estabeleça uma meta realística, como referência para avaliar o resultado final do projeto. De qualquer outra forma, não serão eliminadas dúvidas sobre a possibilidade de se obter resultados melhores.

As figuras apresentam quatro situações ilustrativas.

A Figura 1 apresenta o gráfico de posição na via (Y) versus tempo (X), com o movimento dos dois trens, o movimento da traseira do trem [1] e a curva dos pontos de frenagem de segurança associados ao movimento do trem [2]. No trecho em parada programada, esta curva considera o início de frenagem de segurança à velocidade e aceleração do movimento real. A estação é definida na posição 2.000 m (frente do trem parado na estação), trem de 132 m. As curvas são mostradas com o espaçamento entre os trens ajustado para se ter o headway limite para estas condições, com as curvas críticas se tangenciando. Isto é obtido automaticamente pela ferramenta, que naturalmente apresenta também os resultados numéricos precisos dos parâmetros e pontos relevantes.

Na fase (B) foram introduzidos elementos para determinar a posição adequada para as fronteiras dos blocos em três diferentes condições.

A Figura 2 apresenta a otimização de desempenho, com aproximação à maior velocidade e ajuste para o menor headway. São calculadas as curvas de distância segura à frente do trem que chega à estação, agora considerando não mais a sua velocidade real (operacional) mas as diversas velocidades dos códigos utilizados pelo sistema. A alocação dos blocos foi orientada por dois critérios:

- a) evitar a invasão do bloco ocupado pela traseira do trem [1] pela curva de frenagem segura do trem [2] conforme a velocidade comandada considerada;
- b) evitar que a curva de frenagem segura gerada pela redução da velocidade comandada interfira no movimento do próprio trem [2].

Marcações auxiliares apresentam a lógica para a localização das fronteiras dos blocos de detecção e de comando de velocidade.

A Figura 3 apresenta as condições para headway = 120 s. Naturalmente a sinalização requer menos dispositivos na via.

A Figura 4 explora o menor headway para condições semelhantes à da Figura 3.

As figuras apresentam diversas curvas e pontos notáveis para facilitar a análise, e correspondem ao projeto concluído. Embora a princípio pareça complexo, os quadros são necessários para a visão completa do método e são facilmente dominados pela análise sequencial: identifica-se as curvas do movimento da frente e traseira do trem [1]; depois a curva do movimento da frente do trem [2]; as curvas à frente desta, indicando os pontos de segurança à frente do trem [2] conforme os comandos de velocidade. É indicado também o perfil para a fase (A), quando é considerada a velocidade real do trem durante a Parada Programada. Com linhas (traço e dois pontos) são indicadas as posições dos blocos, e na vertical são associados pontos relevantes das diversas curvas. A análise detalhada evidencia que cada situação limite é explorada adequadamente, sem folgas ou dispositivos desnecessários. Os re-

sultados numéricos são resumidos na Tabela 1. Todos os números são obtidos através de cálculos da ferramenta, sem a necessidade de manipulação gráfica manual.

Conclusões

O principal conceito utilizado neste método é a abordagem determinista e transparente para o projeto de sinalização de via, em relação a processos de tentativas iterativas.

Os principais resultados oferecidos pelo método são:

- Obtenção de limitante inferior de headway – referência “ideal”, mas “realista” (similar à condição de blocos móveis);
- Localização eficaz dos dispositivos de via e comandos de velocidade - menor quantidade de dispositivos, menor custo e melhor confiabilidade;
- Avaliação da qualidade dos resultados por comparação com a referência “ideal”;
- Rapidez de projeto assegurada pelo método e pela viabilidade de ferramentas informatizadas;
- Transparência no procedimento – confiança na qualidade do projeto;
- Facilidade de análises de sensibilidade – melhor gestão dos fatores conforme sua relevância (exercício na apresentação).

Tabela 1 – Casos ilustrativos – Comparação de índices

	Fig 1	Fig 2	Fig 3	Fig 4
part[2]-cheg[1]	46,9	53,5	90,0	64,7
parada estação	30,0	30,0	30,0	30,0
headway	76,9	83,5	120,0	94,7

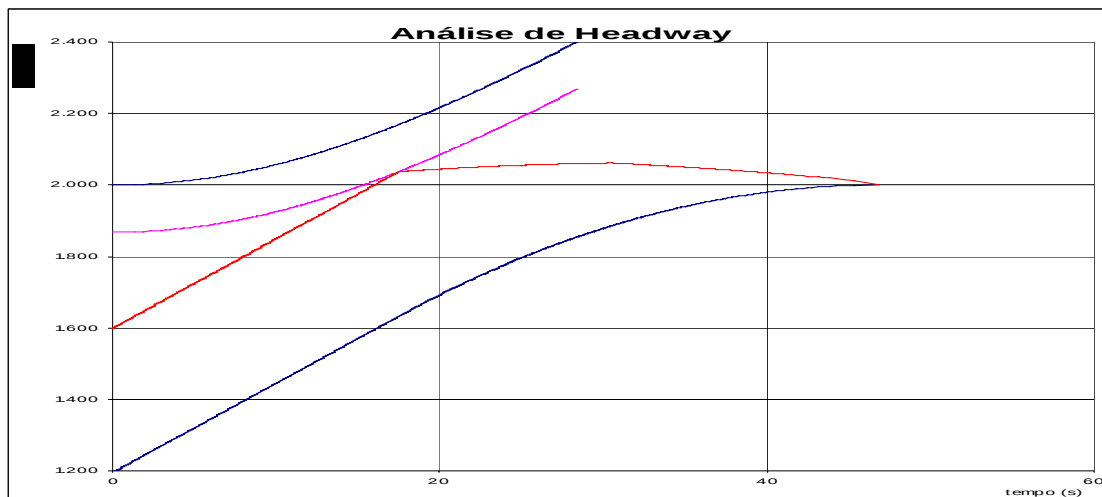


Figura 1 – Condição limite – “blocos móveis”

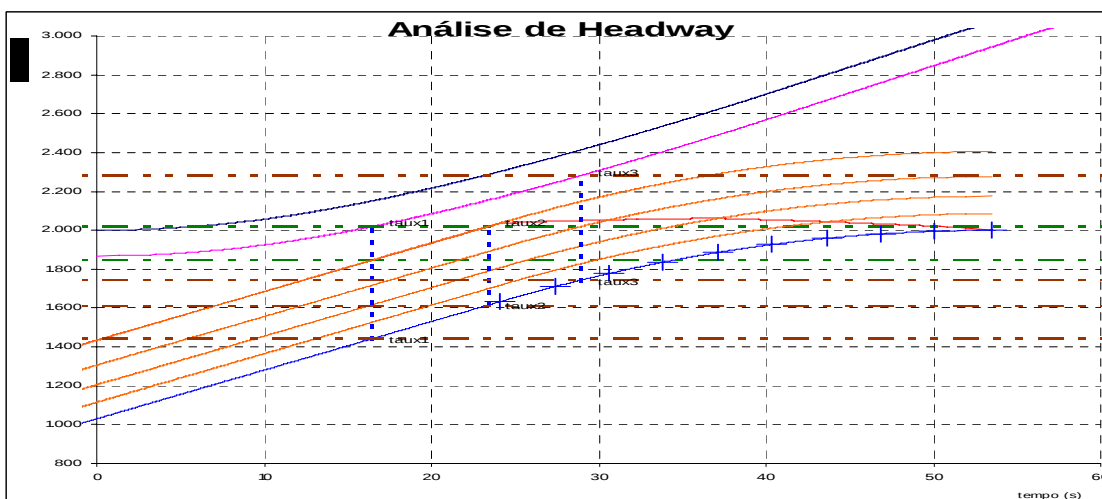


Figura 2 – Condição de máximo desempenho

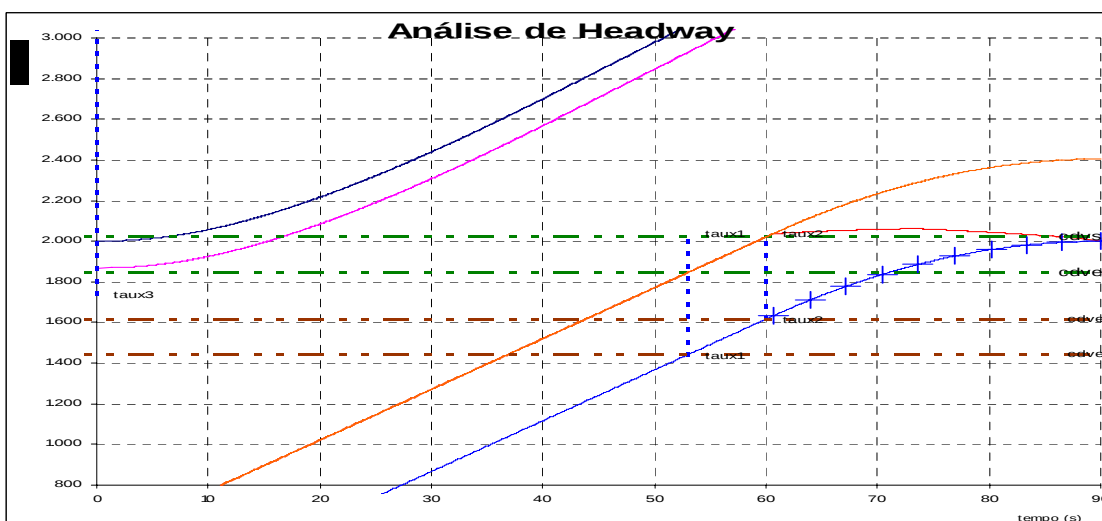


Figura 3 – Condição de headway = 120 s

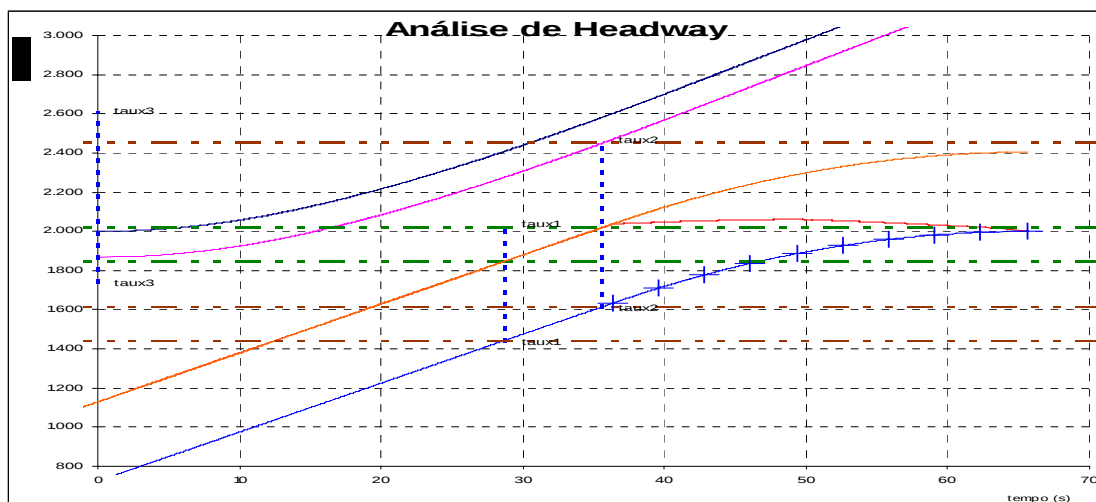


Figura 4 – Menor headway na configuração da Figura 3

Josafá A. Neves

Engenheiro e pós graduado pelo ITA. Iniciou na CMSP em 1975. Atuou na ESCA, Westinghouse e CMW/Alstom, em funções de engenharia. Atualmente consultor – **JAN** Engenharia e Consultoria. Principais trabalhos: análise e projeto de sistemas, hardware e software com funções de segurança; modelagem e simulação de trens; desenvolvimento de algoritmos de controle de trens; sistemas de alta confiabilidade. Condições adversas de aderência.



SIMULAÇÕES DE TRENS MÉTODOS E FERRAMENTAS PARA CONCEPÇÃO DE LINHAS METROFERROVIÁRIAS

Josafá A. Neves



ROTEIRO

- ÍNDICES DE DESEMPENHO
- FATORES MAIS IMPORTANTES
- QUANDO AVALIAR?
- COMO ESTABELECEER ALVO?
 - BLOCOS MÓVEIS
 - BLOCOS FIXOS
- EXEMPLOS ILUSTRATIVOS
- RESUMO E CONCLUSÕES



■ AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

- “HEADWAY”
- VELOCIDADE COMERCIAL
- PASSAGEIROS / HORA
- PASSAGEIROS X KM / HORA
- NÚMERO DE TRENS, CARROS



- VIA – ESTAÇÕES, DISTÂNCIAS, RAMPAS, CURVAS, SUPERELEVações, LIMITAÇÕES DE VELOCIDADE, E OUTROS
- TRENS – COMPRIMENTO, LOTAÇÃO, VELOCIDADE, ACELERAÇÃO, FRENAGEM, MODOS DE CONTROLE
- SINALIZAÇÃO – SEGURANÇA, CONFORTO E OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL; LÓGICA E ALGORITMOS; TECNOLOGIA

QUANDO AVALIAR O DESEMPENHO A SER OBTIDO?



- TÃO CEDO QUANTO POSSÍVEL
- ANTES DE FIXAR FATORES IMPORTANTES
- DURANTE ANÁLISE DE ALTERNATIVAS



COMO ESTABELECEER O ALVO DE DESEMPENHO?

■ QUESTÕES ESSENCIAIS

- DADO UM ANTEPROJETO
 - PODE SER MELHORADO?
 - O DESEMPENHO E OS CUSTOS ESTÃO PERTO OU LONGE DO MELHOR POSSÍVEL?
- O ANTEPROJETO PODE SER ELABORADO DE MODO DETERMINISTA, OTIMIZADO, EM PRAZO E CUSTOS VIÁVEIS?



■ PROPOSTA

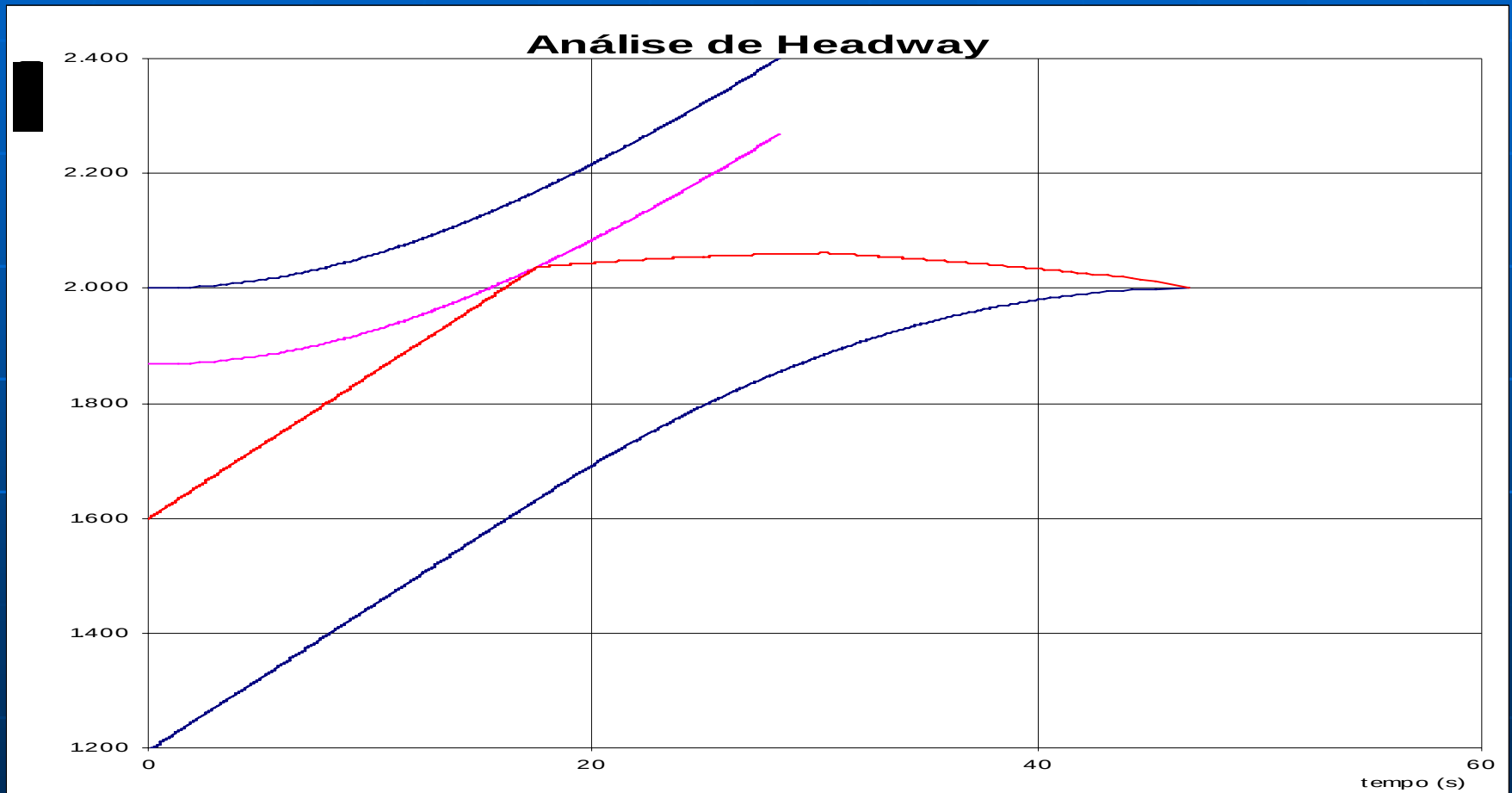
- 1ª ETAPA – MODELAR O SISTEMA [VIA + TRENS + SINALIZAÇÃO] SIMPLIFICADO
 - DETERMINAR LIMITANTES
 - ANÁLISES DE SENSIBILIDADE
- 2ª ETAPA – MODELO COMPLETO PARA A APLICAÇÃO ESPECÍFICA
 - PROJETO DETERMINISTA, OTIMIZADO

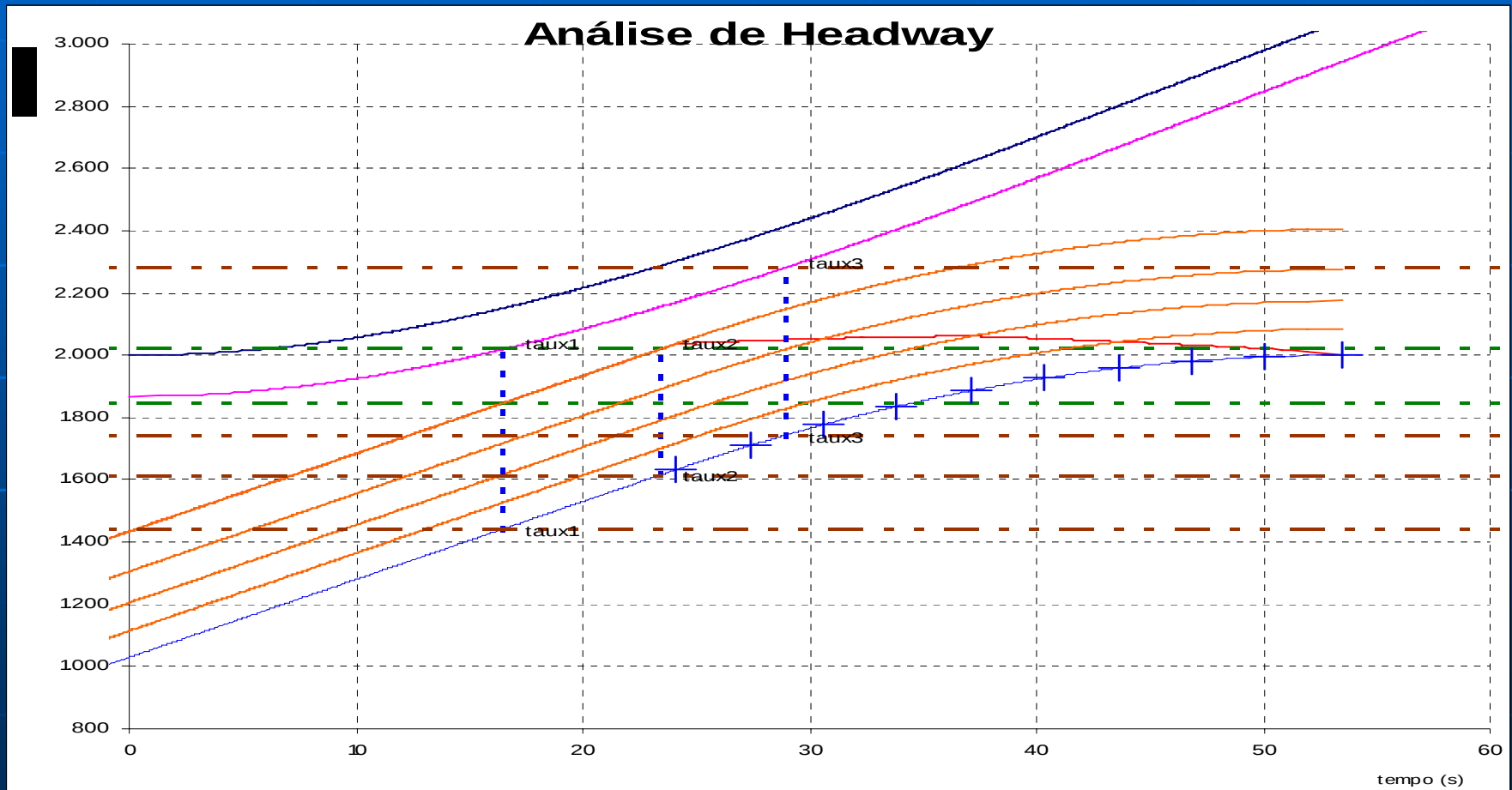


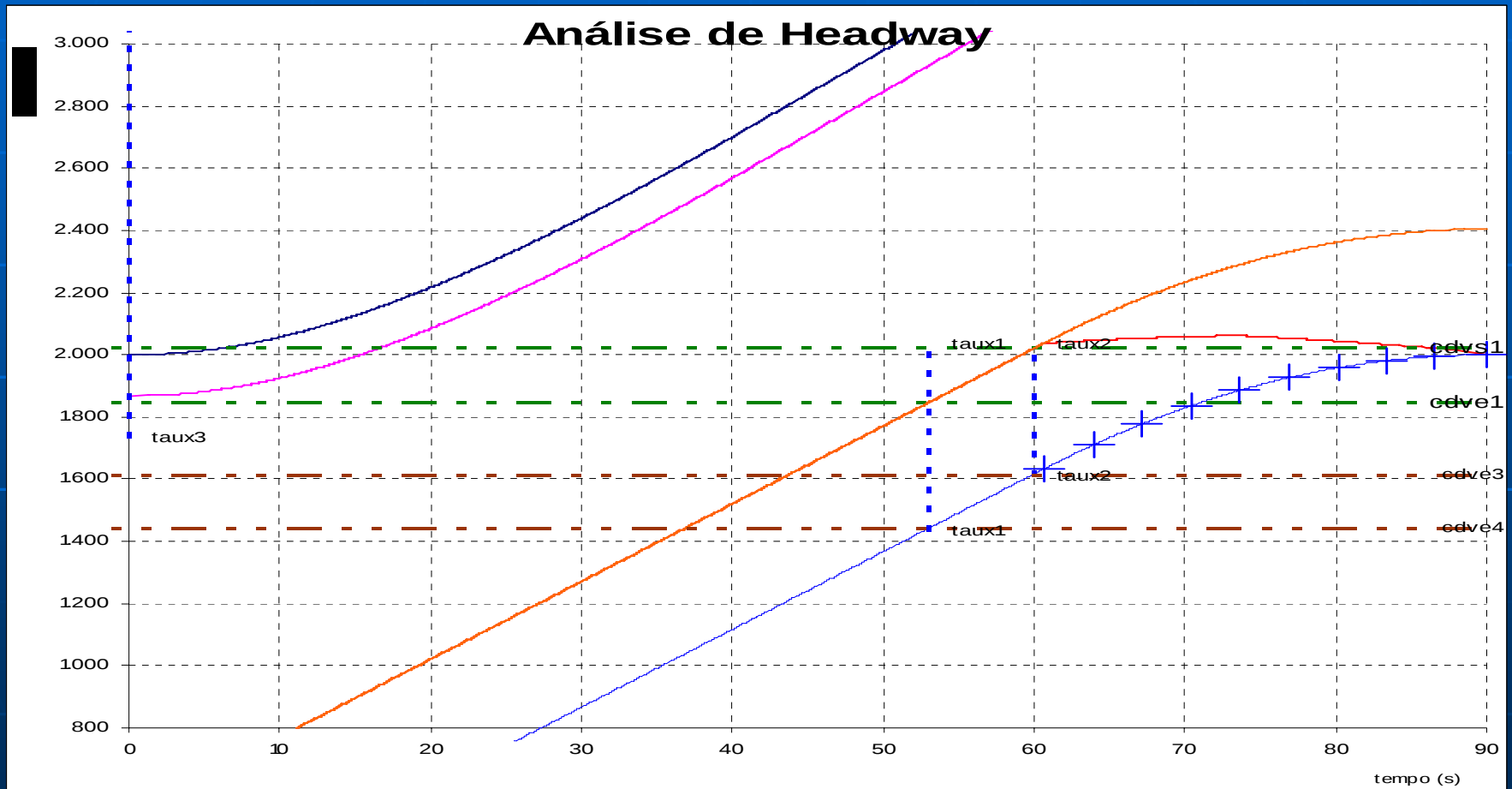
■ CASOS

- MODELO SIMPLIFICADO – “BLOCOS MÓVEIS”
- MODELO COMPLETO – BLOCOS FIXOS

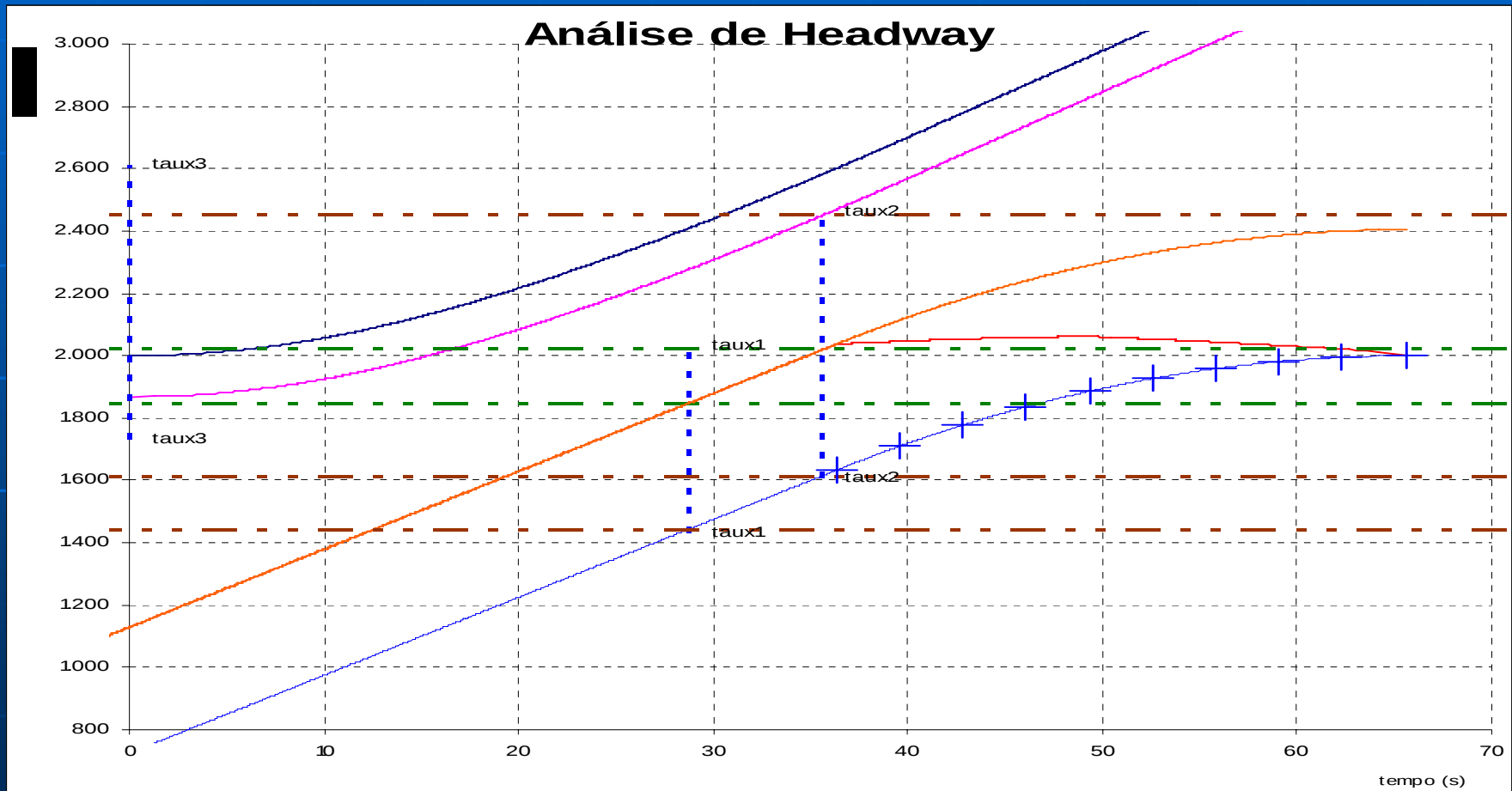
■ EXPOSIÇÃO DE UMA ESTAÇÃO EM LINHA CORRIDA, TANGENTE E NÍVEL, PARA MAIOR CLAREZA







EXEMPLOS ILUSTRATIVOS





- DESEMPENHO DE TRANSPORTE –
 - FASE DE CONCEPÇÃO – ANÁLISES DE SENSIBILIDADE
- REFERÊNCIA
 - “IDEAL” X “REALISTA” – “BLOCOS MÓVEIS”
- PROJETO DETERMINISTA
 - OTIMIZADO
- FERRAMENTAS EM SOFTWARE
 - TRANSPARÊNCIA, PRATICIDADE



JOSAFÁ A. NEVES
josafa.neves@terra.com.br
(11) 9172 8568