

4º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

**IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DE NOVAS FERROVIAS E O USO DE TRENS DE
CAIXA MÓVEL**

INTRODUÇÃO

A concepção e o desenvolvimento dos trens de caixa móvel ou pendulares¹ se deram em paralelo à concepção e ao desenvolvimento dos Trens de Alta Velocidade – TAVs, a partir da década de 1960 (PERSSON, 2011). A motivação foi semelhante: aumentar a velocidade dos trens, na medida em que o transporte ferroviário de passageiros (regional e intercidades) perdia espaço para os modos aeroviário e rodoviário.

1 Optou-se por adotar o termo “trem pendular” em parte do presente trabalho. Este termo é adotado no artigo da Wikipedia em português (2017), em apresentação da Talgo (2011) traduzida do espanhol para o português e no projeto funcional do trem São Paulo - Sorocaba (CPTM, 2011), entre outros. O termo “trem de caixa móvel” é uma tradução mais próxima do termo em inglês carbody tilting e também é utilizado ao longo do trabalho.

Os trens pendulares representavam uma solução mais econômica, ao utilizarem vias existentes e assim não necessitarem da implantação de novas ferrovias com curvas de raios muito grandes (por vezes superiores a 2.000 m). Naturalmente, os trens pendulares apresentavam um incremento menor de velocidades em relação aos trens convencionais que os TAVs.

Na década de 1980, a tecnologia dos trens de caixa móvel experimentou um salto significativo. Este se deu com o início da operação em larga escala comercial dos trens de pendulação passiva da Talgo na Espanha e de pendulação ativa da Alstom na Itália e na Suécia. Atualmente, a tecnologia é estabelecida, porém moderadamente difundida no mundo. Segundo Persson (2011), mais de 5.000 veículos de caixa móvel foram produzidos ao redor do mundo por diferentes fornecedores, que operam hoje em países como a Alemanha, Espanha, Inglaterra, Itália, Japão, Portugal e Suécia.



Figura 1 – Trem pendular ativo ETR 600 da Alstom. Fonte: leferrovie.it (2014)

A ideia central em torno da tecnologia dos trens de caixa móvel é reduzir a aceleração lateral sentida pelo passageiro nas curvas ao inclinar-se a caixa do veículo para o lado interno das curvas. O efeito é, na prática, análogo e adicional ao provido pela superelevação da via. Ao reduzir-se a aceleração lateral por meio da inclinação da caixa do veículo, é possível aumentar a velocidade de operação nas curvas em um dado traçado; essa é, inclusive, a aplicação histórica da tecnologia, com o objetivo de reduzir tempos totais de viagem. De

2

modo semelhante, seria possível implantar uma infraestrutura com curvas de raios menores ao se planejar a operação de trens pendulares com a mesma velocidade prevista para um trem convencional. Dessa maneira, seriam reduzidos os custos de obras civis (viadutos e túneis), dado que o traçado geométrico se adequaria mais facilmente ao terreno natural.

A tabela a seguir mostra a redução do tempo de viagem possibilitadas em alguns corredores europeus na década de 1990 com o emprego de trens pendulares de sistema ativo, que são os com maior potencial de aumento de velocidade nas curvas. A redução do tempo de viagem nesses exemplos fica entre 12 e 20%.

Tabela 1 – Redução do tempo de viagem com emprego de trens pendular de sistema ativo em corredores europeus (PITA, 2006)

Corredor	Extensão	Tempo total de viagem		Redução do tempo de viagem	
	(km)	Trem convencional	Trem pendular ativo	(min)	(%)
Roma - Milão	624	5 h 10	4 h 30	40	13
Roma - Veneza	573	5 h 30	4 h 30	60	18
Roma - Régio da Calábria	690	6 h 50	6 h 00	50	12
Roma - Bari	512	5 h 00	4 h 15	45	15
Milão - Zurique	293	4 h 30	3 h 50	40	15
Milão - Genebra	372	4 h 10	3 h 20	50	20
Milão - Basileia	419	4 h 50	4 h 00	50	17

Quanto ao conforto do passageiro, experimentalmente verifica-se que os trens pendulares apresentam um nível de conforto maior que os trens convencionais; entretanto o material rodante de caixa móvel é algumas vezes associado com níveis mais significativos de enjoo de

movimento ou cinetose que os comboios convencionais (PERSSON, 2011). Essas questões são abordadas de maneira mais aprofundada no programa Fast and Comfortable Trains – FACT (KUFVER, 2005), nos trabalhos de Förstberg (2000), Persson (2011), entre outros.

O emprego dos trens pendulares apresenta uma série de implicações que serão expostas resumidamente no presente artigo. Essas implicações se dão principalmente nos âmbitos do projeto geométrico, dos critérios de segurança, da operação específica e diferenciada, do conforto do passageiro supracitado e dos custos diferenciados quanto à implantação, operação e manutenção.

Serão apresentados e comparados os resultados de simulações de marcha efetuadas para três traçados de geometria distinta, com o objetivo de verificar o potencial do aumento de velocidades (e assim também o de redução dos tempos totais de viagem) com o emprego de trens pendulares em substituição aos trens convencionais. Os estudos têm como objeto os trens de média velocidade (regionais e intercity), na faixa entre 120 e 200 km/h.

Embora os traçados analisados e o método empregado na avaliação dos efeitos em cada corredor tenham sido específicos, os critérios adotados foram semelhantes e com isso foi possível efetuar uma comparação geral. Ao final chegou-se a conclusões sobre o emprego do material rodante pendular e sobre o aumento de velocidades e as reduções dos tempos de viagem possibilitadas pela solução tecnológica.

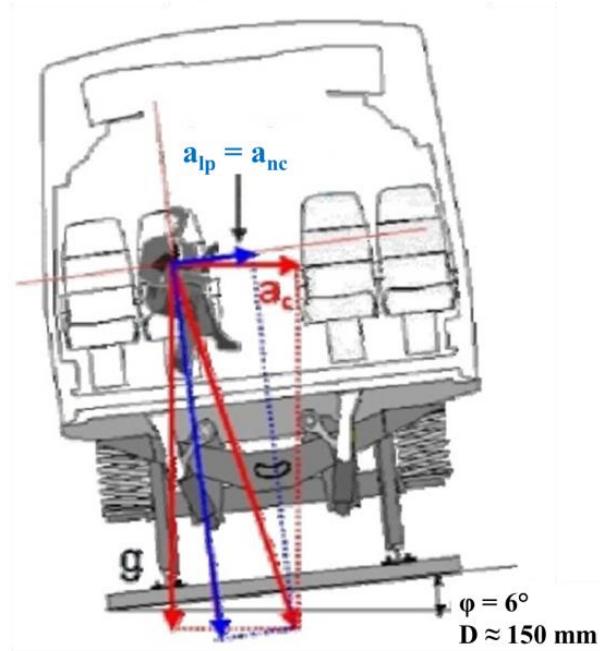
DIAGNÓSTICO

Solução tecnológica - Conceito da inclinação da caixa do veículo

Conforme o veículo ferroviário trafega por uma curva horizontal, sobre o passageiro age a aceleração centrífuga, a_c (m/s^2), proveniente da força inercial centrífuga (ou pseudoforça centrífuga) no caso quase-estático. Devido ao emprego da superelevação D (mm) da via, que em geral corresponde a um ângulo de até 6° (ou de 150 mm, considerando-se a bitola internacional de 1.435 mm), uma componente da gravidade atuante no plano do passageiro compensa parte dessa aceleração. A aceleração remanescente é chamada de aceleração lateral não compensada.

Os trens de caixa móvel ou pendulares provêm uma inclinação adicional à da superelevação em curva, em relação ao plano da via, de ângulo α ($^\circ$), o que reduz ainda mais a aceleração lateral sentida pelo passageiro para $a_{nc,p}$ ou $a_{lp,p}$, como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a seguir. O trem com o sistema pendular em operação (Erro! Fonte de referência não encontrada.-b) trafega numa velocidade superior na curva que o trem convencional (Erro! Fonte de referência não encontrada.-a).

a) Trem convencional



b) Trem pendular

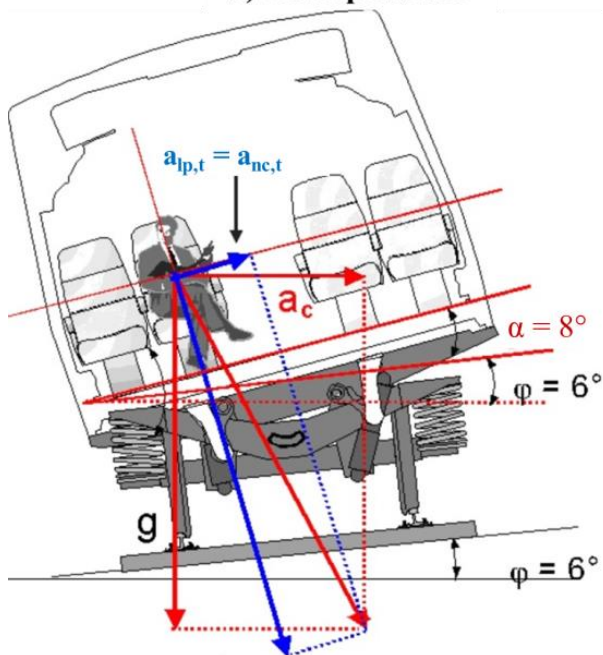


Figura 2 – Comparação entre um trem convencional e um trem pendular ao percorrer uma curva horizontal. Fontes: CPTM (2011); Alstom (2010)

Sendo que:

- a_c : Aceleração centrífuga (m/s^2);

- a_{nc} ou a_{lp} : Aceleração lateral não compensada, sentida pelo passageiro (m/s^2);
- $a_{nc,p}$ ou $a_{lp,p}$: Aceleração lateral não compensada, sentida pelo passageiro, reduzida pela atuação do sistema pendular;
- g : Aceleração gravitacional (m/s^2);
- ϕ : Inclinação transversal da via ($^\circ$), que corresponde à superelevação;
- D : Superelevação da via (mm);
- α : Inclinação provida pelo sistema pendular ($^\circ$).

A dinâmica de funcionamento do trem pendular se constitui de inclinar as caixas dos carros gradualmente, ao percorrer a curva de transição de entrada para uma curva circular horizontal; ao longo da curva circular em si, deverá manter a inclinação pretendida; ao percorrer a curva de transição de saída, deverá reverter a inclinação para a posição original. Naturalmente, no caso do trem percorrer curvas horizontais reversas ou compostas, deve haver a transição compatível de uma curva para outra.

Os trens pendulares podem trafegar com uma velocidade V e uma correspondente insuficiência de superelevação I relativamente maiores que os trens convencionais nas curvas horizontais. A insuficiência I representa a diferença entre a superelevação D e a superelevação teórica D_t . A superelevação teórica D_t , por sua vez, representa a superelevação que compensaria totalmente a aceleração lateral no plano do passageiro, dados o raio da curva R (m) e a velocidade V .

A equação a seguir (CEN, 2010), válida para a bitola internacional, ilustra o conceito e fornece a velocidade numa curva horizontal em função da superelevação e do raio:

$$V = \sqrt{R \cdot (D + I) / 11,8}$$

Em que:

- V: Velocidade [km/h]
- R: Raio da curva [m]
- D: Superelevação [mm]
- I: Insuficiência de superelevação [mm]

Por exemplo, tome-se uma curva de $R = 1.000$ m com uma superelevação $D = 150$ mm. Um trem convencional que deva respeitar uma insuficiência de superelevação $I = 100$ mm, que corresponde a $a_{nc} = 0,65$ m/s², poderá trafegar a uma velocidade $V = 145,6$ km/h nessa curva. Já um trem pendular, que no caso ilustrado é de sistema ativo (o que provê a maior inclinação usualmente praticada, de 8°) poderá trafegar com uma insuficiência $I = 300$ mm (UIC, 2003), com o mesmo nível de conforto ($a_{nc, p} = 0,65$ m/s²) e numa velocidade de $V = 195,3$ km/h nessa mesma curva, o que representa um aumento de 34,2% da velocidade.

Solução tecnológica - Tipos de sistemas

Existem dois tipos principais de sistemas de inclinação da caixa do veículo: os chamados sistemas naturais ou passivos, e os sistemas ativos. Esses dois tipos se diferenciam principalmente pela inclinação máxima e pelo modo como essa inclinação adicional é provida.

Trens pendulares de sistema natural ou passivo

Os sistemas pendulares chamados de passivos ou naturais dependem, basicamente, do posicionamento do eixo de giro (que é um eixo longitudinal e permite uma inclinação

transversal do veículo) significativamente acima do centro de gravidade da caixa do veículo, e da ação das forças inerciais. O eixo de giro da caixa do veículo pode situar-se mesmo acima do próprio veículo.

As principais vantagens do sistema de pendulação natural são (PERSSON, 2011):

- É um sistema simples e confiável;
- Possui custo inicial e de manutenção baixos;
- O sistema de controle, quando existente e que garante o desempenho dinâmico, é de funcionamento simples;
- Não há como ocorrer a pendulação inversa, ou seja, para o lado de fora da curva.

Já as principais desvantagens inerentes ao sistema passivo são:

- O momento de inércia da caixa do veículo provocará um atraso na ação de pendulação; devido a esse atraso, os passageiros podem sentir uma maior aceleração lateral não compensada em pontos localizados, principalmente na curva de transição, gerando desconforto;
- O deslocamento do centro de gravidade pode aumentar o risco de tombamento;
- Devido ao movimento lateral da caixa do veículo, por razão de atendimento ao gabarito dinâmico deve ser menor a largura da seção do veículo em sua parte inferior (próxima ao piso), onde ela é justamente mais necessária para acomodar os passageiros.

O exemplo mais difundido de material rodante com sistema pendular passivo é o presente nos trens da fabricante Talgo. O sistema desses trens provê até em torno de 4° de inclinação adicional. A figura a seguir ilustra o funcionamento desse sistema.

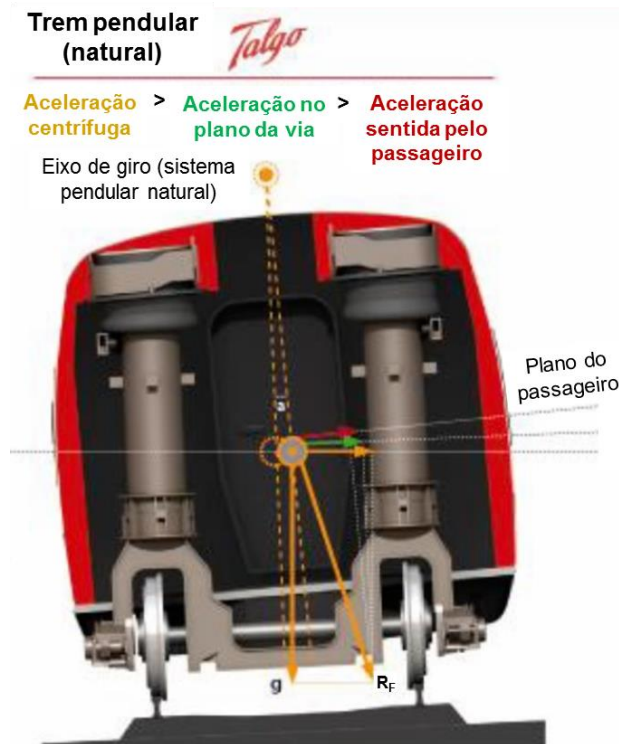


Figura 3 - Mecanismo da pendulação natural nos trens da Talgo (TALGO, 2011)

O sistema com suspensão elevada é constituído por um par de molas pneumáticas instaladas em pilares altos sobre os aparatos das rodas. Substituindo os truques tradicionais, esses aparatos são individuais para cada roda nos trens mais modernos da Talgo (ou seja, não há os eixos tradicionais, cada roda gira separadamente) e posicionados nas extremidades dos carros de passageiros. O par de molas exerce também a função de suspensão secundária do veículo (PERSSON, 2011).

Trens pendulares de sistema ativo

Os sistemas pendulares denominados como ativos, como o Pendolino da Alstom, pressupõem essencialmente o uso de um sistema de suspensão ativa, pelo qual a caixa do veículo inclina. A suspensão ativa, por sua vez, é composta por sensores, controladores e atuadores mecânicos (na maioria dos casos, hidráulicos) adicionados ao sistema de

suspensão e envolvendo retroalimentação, ou seja, a dinâmica do sistema é modificada com a inserção de novos dados.

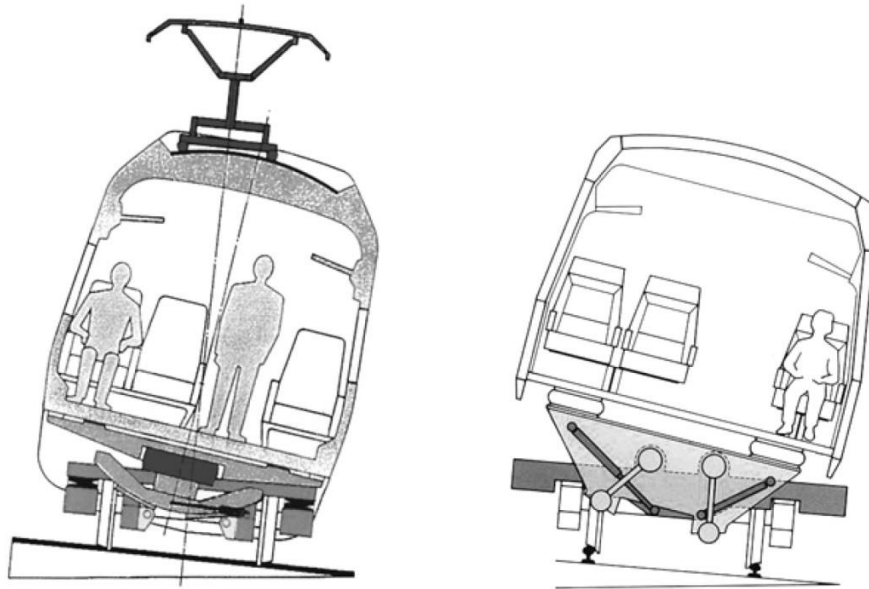


Figura 4 - Exemplos de sistemas ativos - Alstom Pendolino (esquerda) e Bombardier X2 (direita) (PERSSON, 2011)

Os sistemas pendulares ativos tem a vantagem de prover a rotação da caixa do veículo em torno do centro de gravidade do mesmo. Com isso, evita-se o deslocamento desse ponto, que afeta a segurança do veículo quanto ao tombamento, efeito presente em muitos dos trens pendulares passivos. Além disso, o impacto no gabarito dinâmico ferroviário é menor que o correspondente aos sistemas de pendulação natural. Os sistemas ativos provêm até em torno de 8° de inclinação para a caixa do veículo (Persson, 2011).

O sistema de controle da pendulação, presente em todas as variantes de sistema ativo, deve executar as seguintes funções sequenciais (MANCINI, PELACCHI, et al., 2008):

- Identificar, usualmente por meio de sensores, de maneira precisa e sem atrasos a posição inicial da curva de transição, que antecede a curva circular;

- Inclinar transversalmente a caixa móvel de acordo com o algoritmo do sistema;
- Verificar se a inclinação executada corresponde à inclinação requisitada para a curva em questão.

Os chamados sistemas antecipatórios ou preditivos são a tendência futura para trens pendulares ativos, em oposição aos sistemas responsivos, que podem incorrer em atrasos na inclinação da caixa do veículo, o que gera desconforto para o usuário. No subtipo preditivo, o computador de bordo do trem contém as informações sobre o alinhamento da via, podendo compará-las com as informações provenientes dos sensores. Com o uso de mais técnicas de posicionamento em paralelo, como por balizas instaladas ao longo da via e localização por GPS é possível obter uma precisão de 4 metros, suficiente para eliminar o problema do atraso na pendulação (SASAKI, 2005, apud PERSSON, 2007).

Avaliação do conforto

As considerações sobre o conforto do passageiro são de extrema importância para o projeto ferroviário, na medida em que muitas vezes resultam em critérios de dimensionamento mais restritivos mesmo que as condições de operação segura (que naturalmente também precisam ser avaliadas).

O conforto do passageiro pode ser definido e avaliado em diversos aspectos. Entre eles, estão:

- Os distúrbios como as acelerações e/ou *jerks* (variação da aceleração ao longo do tempo) laterais elevados e localizados, ressaltando-se que as curvas de transição de entrada são locais onde normalmente mais ocorre o desconforto do passageiro;

- O enjoo de movimento (*motion sickness*) ou cinetose, provocado por exposição prolongada a movimentos translacionais e/ou rotacionais de baixa frequência. Ocorre, portanto, em vias sinuosas com sequências longas de curvas reversas. O fenômeno ainda não é plenamente entendido

No caso específico dos trens pendulares ocorrem implicações adicionais aos efeitos citados, como a influência da velocidade rotacional mais elevada e a maior ocorrência de enjoo de movimento nesse tipo de material rodante, embora para essa última questão os estudos realizados não sejam conclusivos.

Quanto à avaliação dos distúrbios localizados de conforto, a norma UNE-ENV 12299, como detalha Pita (2006) e Goodall e Mei (2006), fornece uma das expressões gerais, derivada empiricamente. Essa fórmula retorna a porcentagem de passageiros que sentiria desconforto nas curvas de transição, também chamada de índice P_{CT} , conforme valores inseridos de aferições em operações reais, testes e simulações.

$$P_{CT} = \max(A \cdot \ddot{y} + B \cdot \ddot{\ddot{y}} - C; 0) + D \cdot \dot{\phi}^E$$

Onde:

- A, B, C, D e E: Coeficientes que dependem da posição do passageiro (sentado ou em pé);
- $\ddot{y}$: Aceleração lateral mensurada (m/s^2);
- $\ddot{\ddot{y}}$: Jerk lateral mensurado (m/s^3);
- $\dot{\phi}$: Velocidade angular de da caixa do veículo ($^\circ/s$).

Poder-se-ia inferir de antemão que a maior velocidade angular dos trens pendulares geraria maiores níveis de desconforto. Entretanto, resultados do indicador na linha Roma-Milão mostram que na verdade o índice P_{CT} retornou níveis menores de desconforto para trens pendulares que para trens convencionais (CANDELA et al, 2005, apud PITA, 2006), conforme o gráfico a seguir. Resultados do programa FACT (KUFVER, 2005) também mostram níveis de desconforto de maneira geral menores para os trens pendulares que para os trens convencionais.

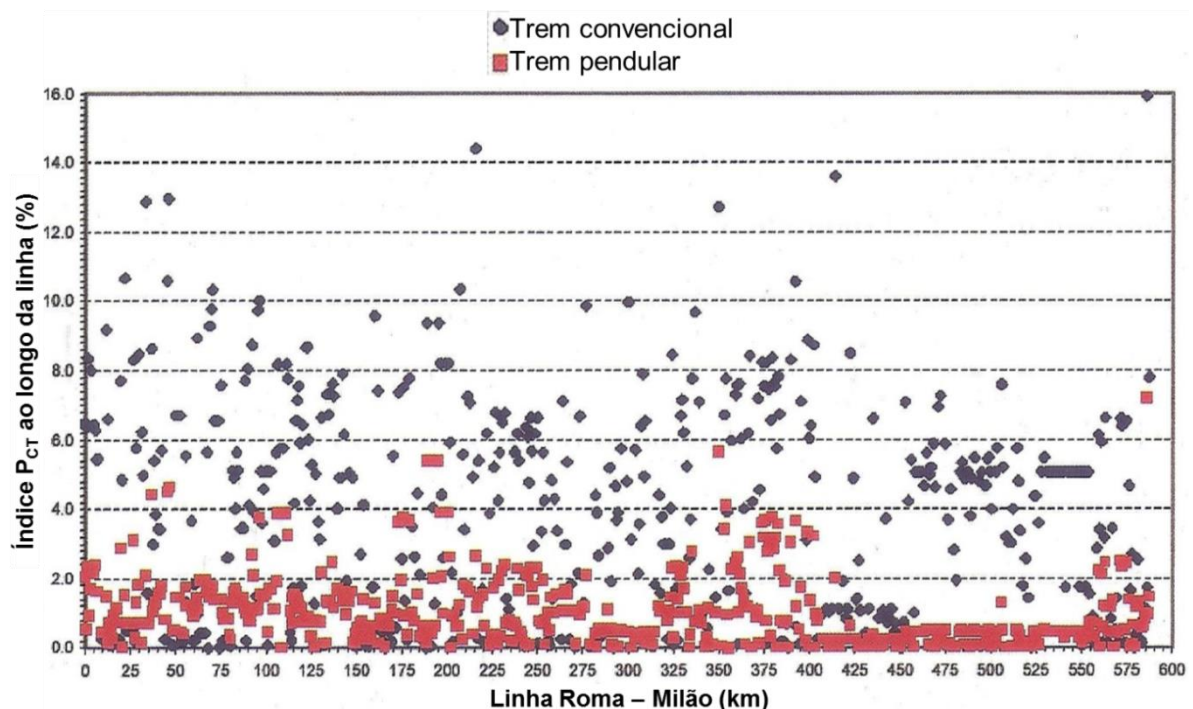


Figura 5 - Índice de conforto P_{CT} na linha Roma - Milão (CANDELA et al, 2005, apud PITA, 2006)

Principais implicações da operação de trens de caixa móvel

Resumidamente, foram verificadas as seguintes implicações decorrentes da previsão e operação de trens pendulares em novas linhas.

- Deve ser dada atenção especial para o risco de tombamento do veículo, pelo efeito do vento na transversal e pela maior aceleração centrífuga à qual o veículo está sujeito, como estudado por Persson (2011).
- O gabarito dinâmico ferroviário é de avaliação relativamente mais complexa no caso dos trens pendulares (JOHNSON, 2006).
- Os sistemas pendulares passivos são mais simples e práticos, embora apresentem inclinação menor. Já os sistemas pendulares ativos são mais complexos, mas fornecem maior inclinação. Os sistemas pendulares ativos são mais difundidos pelo mundo.
- É relevante analisar o conforto do usuário não só quanto à aceleração lateral na curva, como também na curva de transição, o que pode ser feito por meio do uso do índice P_{CT} .
- Também no âmbito do conforto do passageiro, o enjoo de movimento ou cinetose é algumas vezes mais associado aos trens pendulares que aos trens convencionais.
- No projeto geométrico de uma nova linha, recomenda-se adotar curvas de transição mais longas, por mais que isso não esteja no escopo inicial do trabalho (KUFVER, 2005). Dessa maneira, possibilita-se a futura operação de trens pendulares com velocidade incrementada e sem prejuízo para o conforto do usuário. Essas alterações no traçado na fase de projeto são pequenas e de custo adicional pouco expressivo.
- Os custos adicionais de aquisição e manutenção do material rodante pendular são da ordem de 9 a 15% superiores em comparação com o convencional, como afirmam

Lichtberger (2011) e Pita (2006). Os custos adicionais de implantação, adaptação e manutenção da via são pouco expressivos para a operação de trens pendulares.

Avaliação das velocidades dos trens pendulares em diferentes traçados -

Considerações gerais

As avaliações das velocidades dos trens pendulares envolveram simulações de marcha e análise de dados em três corredores de características de traçado diferenciadas, principalmente quanto à sinuosidade do alinhamento horizontal. Nesses três corredores, foram admitidos veículos com potência instalada que varia de 1.300 kW a 5.200 kW. Também foram admitidos três tipos de material rodante:

- O trem convencional, tomado como referência o veículo Desiro ML da Siemens (2011) ao qual de maneira geral correspondeu a superelevação teórica $D_t = 250$ mm;
- O trem pendular de sistema passivo, tomado como referência o veículo Talgo 250 (TALGO, 2011), ao qual de maneira geral correspondeu a superelevação teórica $D_t = 350$ mm;
- O trem pendular de sistema ativo, tomado como referência o veículo chamado de Novo Pendolino – ETR 600 (MANCINI et al., 2008) ao qual de maneira geral correspondeu a superelevação teórica $D_t = 450$ mm.

Para todos os cenários e trens simulados, as seguintes características comuns foram admitidas:

Tabela 2 – Especificações técnicas válidas para todas as simulações

Velocidade máxima	200	km/h
Aceleração inicial máxima	0,7 a 1,0	m/s ²
Desaceleração	1,0	m/s ²
Número de carros	4	
Peso (vazio)	176,0	t
Assentos	384	
Peso por passageiro	70	kg
Peso total	202,9	t
Carga máxima por eixo	17	t
Potência de tração elétrica	1.300 a 5.200	kW

Fonte: CPTM (2011)

Para as simulações de marcha efetuadas nos três corredores, foram elaboradas curvas de motorização baseadas nas existentes do veículo Desiro ML da Siemens (2011). Assumiu-se que quanto à motorização, os materiais rodantes convencional, pendular passivo e ativo são semelhantes. O gráfico a seguir apresenta as curvas de motorização.

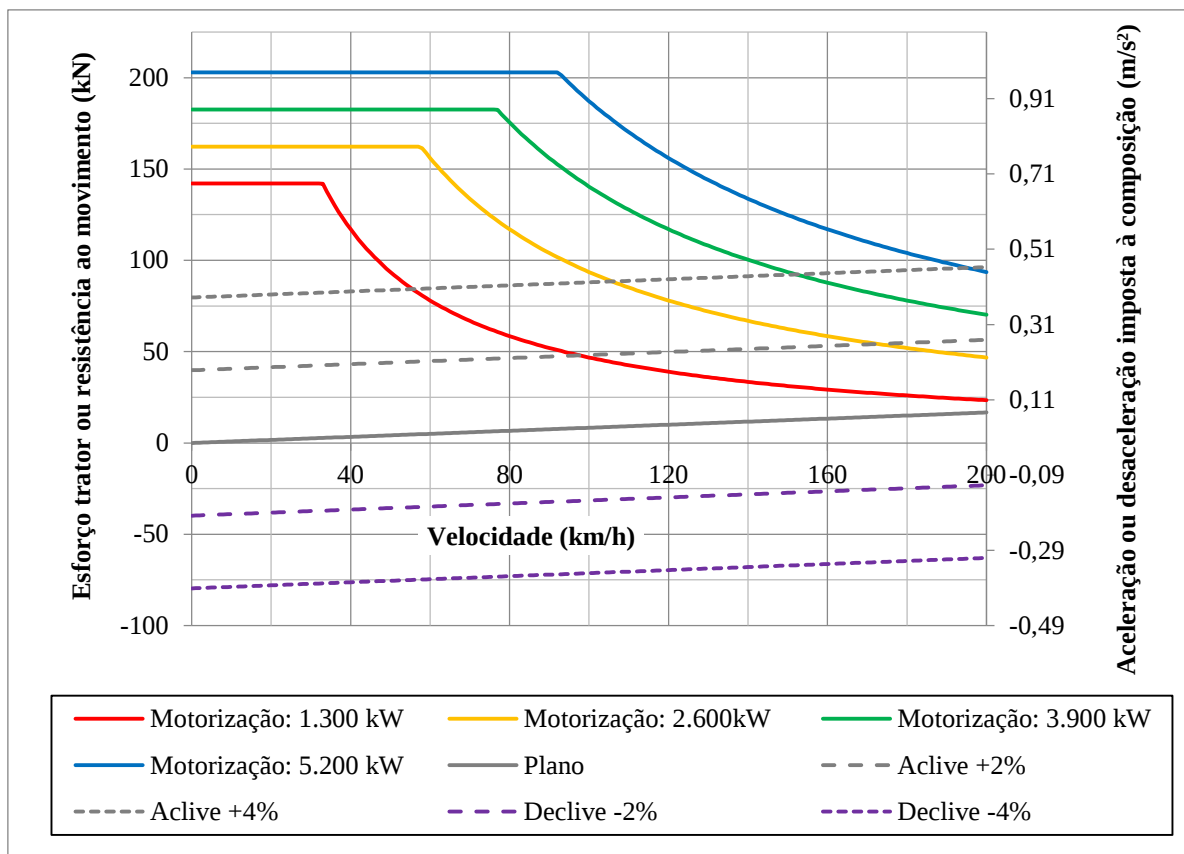


Figura 6 – Curvas de motorização utilizadas nas simulações de marcha

Avaliação 1 - Traçado medianamente sinuoso (projeto funcional do corredor São Paulo – Sorocaba)

A primeira avaliação envolveu um trecho rural com 47,4 km, de um corredor em projeto, de traçado medianamente sinuoso, característico de terreno ondulado. O traçado foi levemente alterado a partir do original, obtido por meio do projeto funcional da ferrovia São Paulo – Sorocaba, por sua vez fornecido pela CPTM (2011). O alinhamento horizontal possui a grande maioria das curvas com raios de 1.000 m. O traçado em planta e perfil é mostrado na figura a seguir.

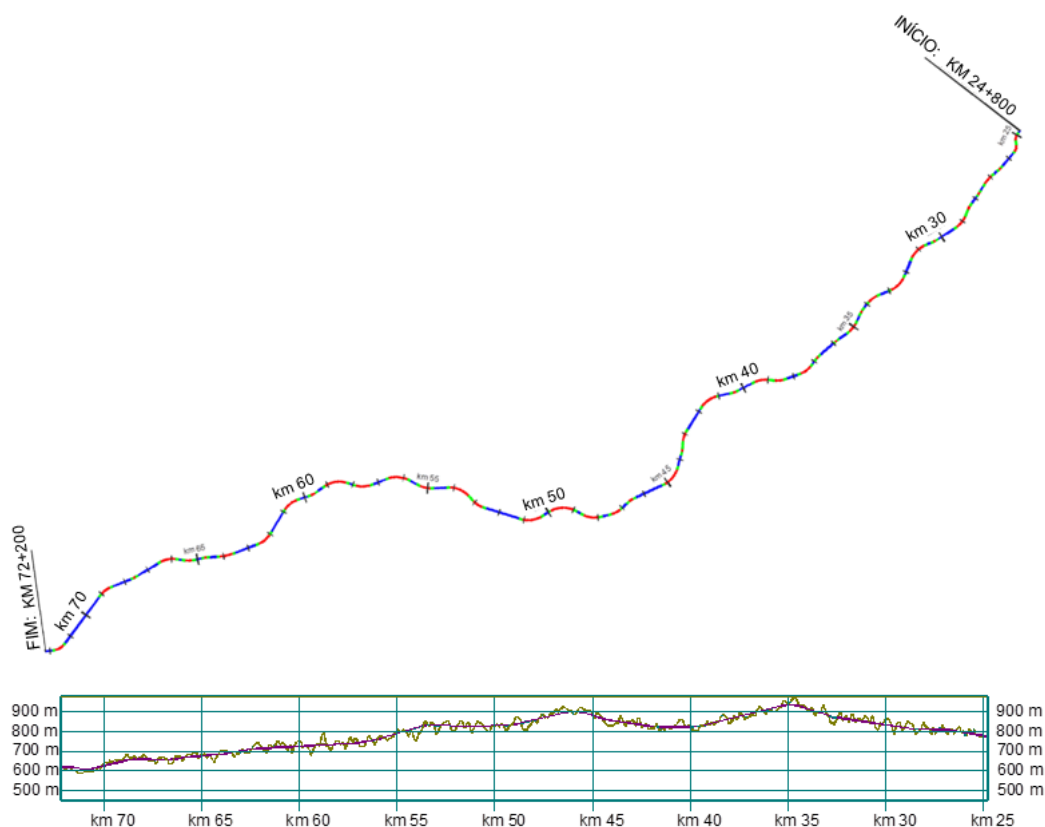


Figura 7 – Traçado em planta e perfil do corredor São Paulo - Sorocaba

Nas simulações de marcha, o alinhamento horizontal impôs restrições de velocidade em função do material rodante considerado. Já o alinhamento vertical impôs limitações à aceleração, principalmente nos trechos em aclive, e também em função da motorização considerada.

Para cada um dos três tipos de material rodante considerados, foram feitas simulações em quatro níveis de motorização admitidos (1.300, 2.600, 3.900 e 5.200 kW de potência instalada), o que resultou num total de 12 opções operacionais para a presente avaliação.

Os gráficos a seguir mostram as simulações de marcha resultantes.

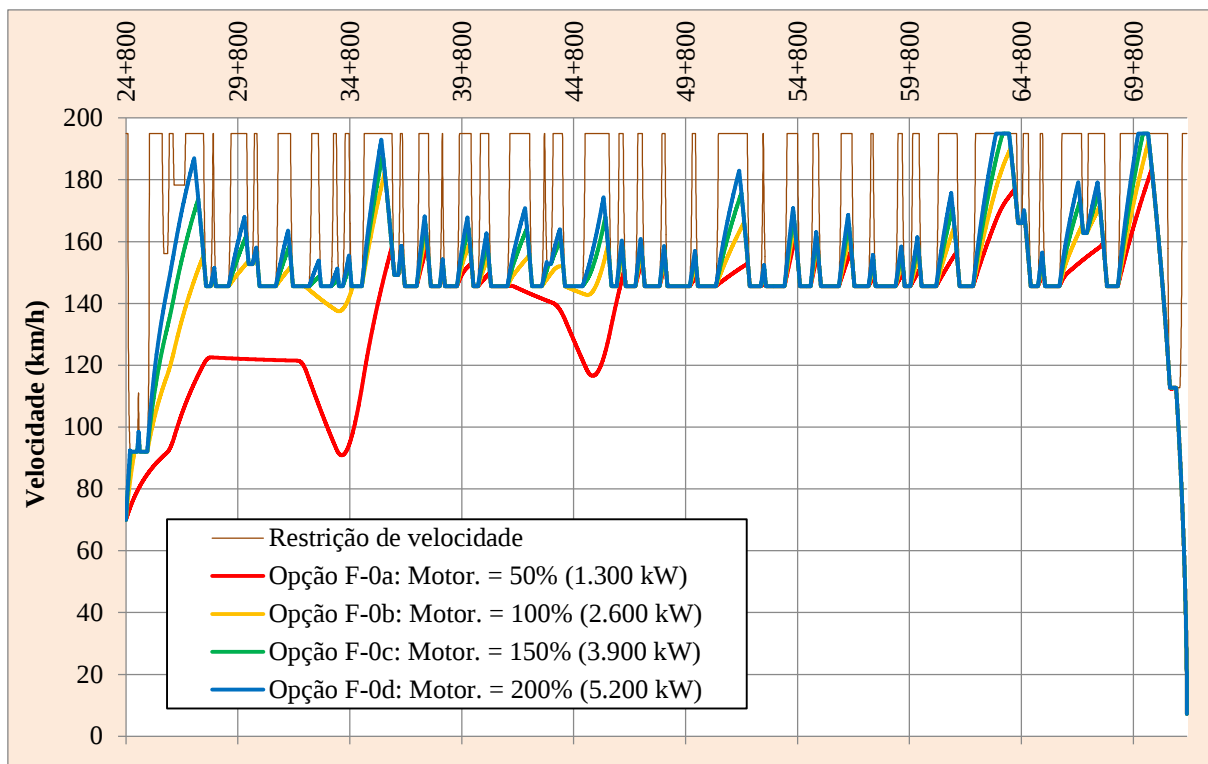


Figura 8 – Traçado medianamente sinuoso: Simulações de marcha para a opção operacional F-0 (trem convencional)

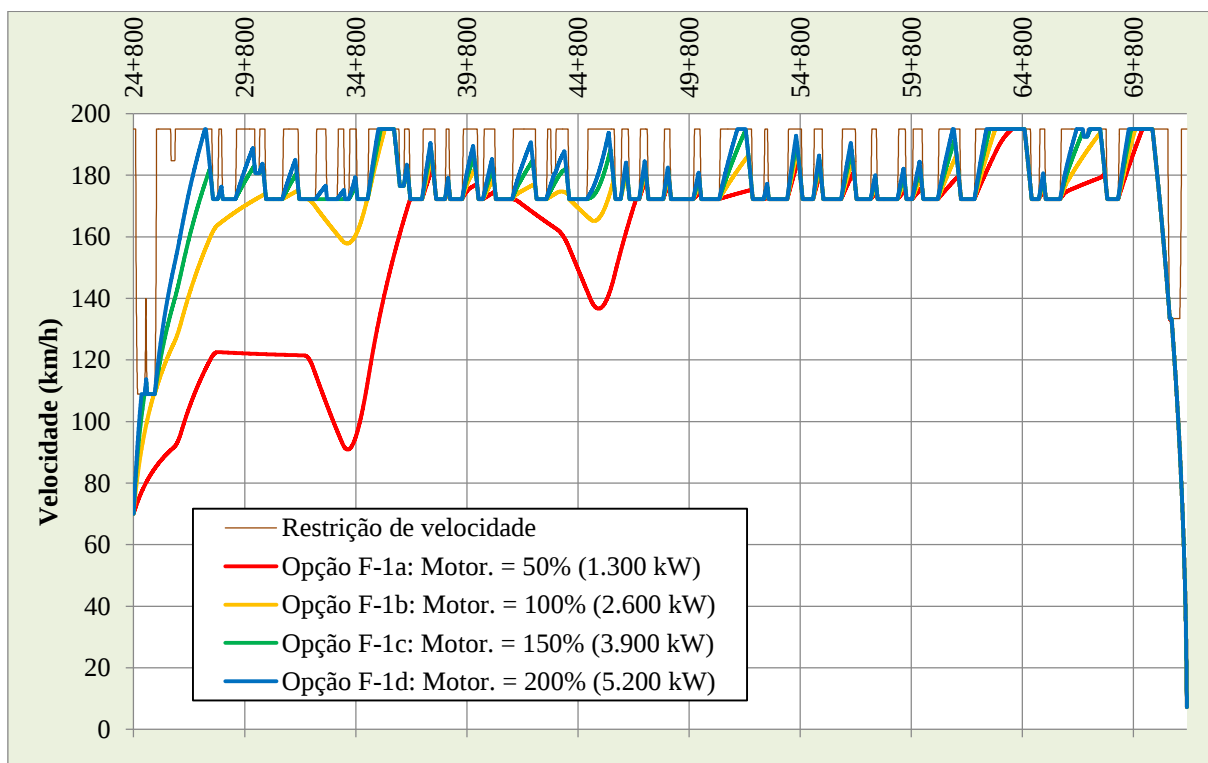


Figura 9 – Traçado medianamente sinuoso: Simulações de marcha para a opção operacional F-1 (trem pendular passivo)

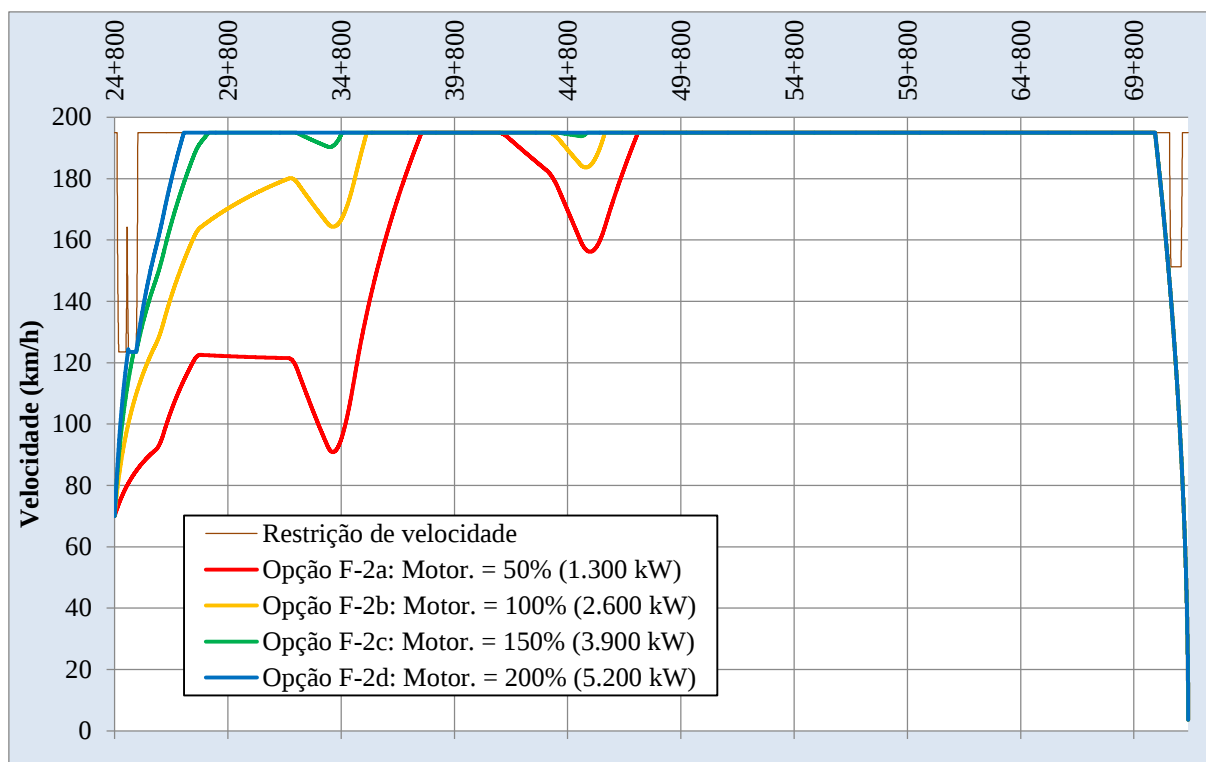


Figura 10 – Traçado medianamente sinuoso: Simulações de marcha para a opção operacional F-2 (trem pendular ativo)

É possível notar que as opções operacionais com trem convencional têm a velocidade máxima restrita principalmente por conta das curvas horizontais. No caso da operação do trem pendular passivo, as restrições são menores; já no caso do trem pendular ativo, a restrição quase não se verifica, o que possibilita que o trem trafegue na velocidade de 195 km/h ao longo de praticamente todo o trecho.

O gráfico a seguir reúne os 12 tempos totais de viagem, correspondentes aos 12 cenários simulados. Os tempos são dados em função dos três valores de superelevação teórica, cada um correspondente a um tipo de material rodante.

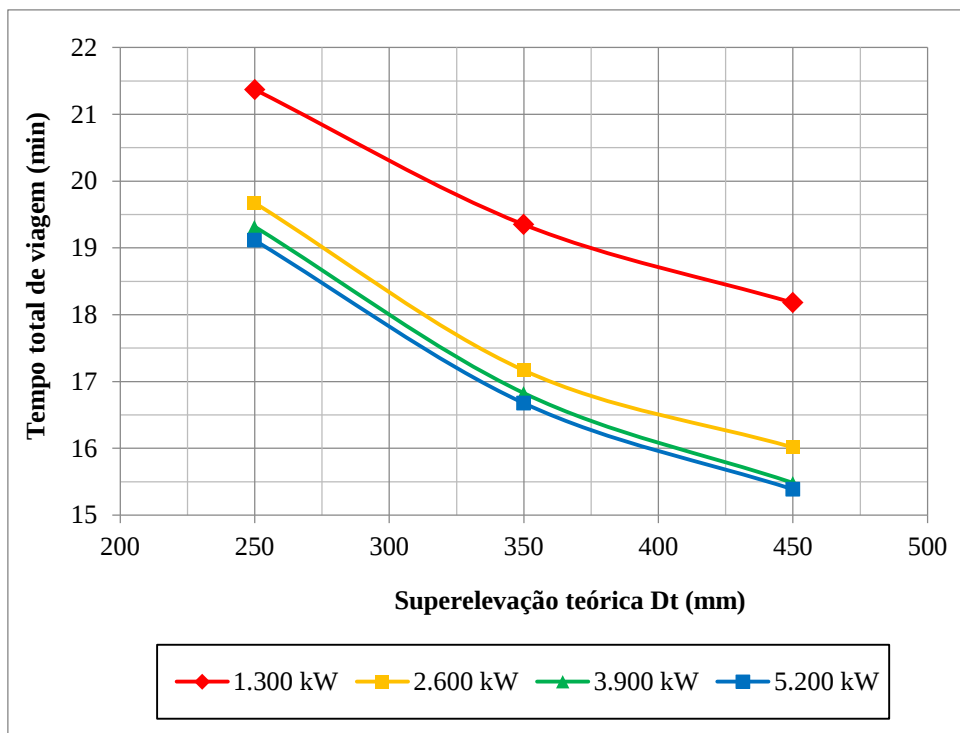


Figura 11 – Tempos totais de viagem para o traçado medianamente sinuoso

Nota-se que o aumento da motorização possibilita a redução do tempo total de viagem para os três tipos de material rodante. O ponto ótimo da potência instalada se situa em torno de 2.600 kW.

A redução do tempo total de viagem com o emprego do material rodante pendular, passivo ou ativo, é considerável. Mesmo quando se dobra a motorização de 1.300 kW para 2.600 kW, a redução do tempo total de viagem é menor que a proporcionada pela troca do material rodante convencional pelo trem pendular, seja o passivo ou o ativo.

Avaliação 2 - Traçado pouco sinuoso (corredor existente Estocolmo – Gotemburgo)

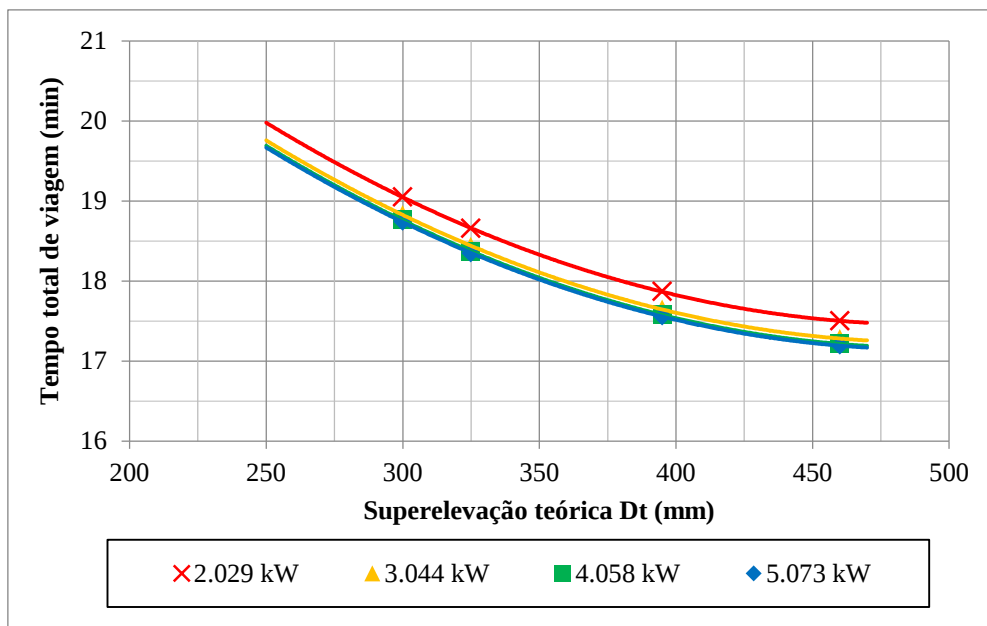


Figura 13 – Tempos totais de viagem para o traçado pouco sinuoso

O aspecto das curvas no gráfico é semelhante às das curvas do gráfico correspondente à análise anterior, para o traçado medianamente sinuoso do corredor São Paulo - Sorocaba. A análise dos dados revelou que a potência instalada ótima deve se situar em torno de 1.400 kW.

Novamente nota-se a redução expressiva dos tempos totais de viagem com a utilização do material rodante pendular, de maior superelevação teórica. Embora o traçado seja pouco sinuoso, supõe-se que mesmo assim as curvas horizontais existentes imponham restrições significativas ao aumento das velocidades para os trens convencionais.

Caso se imaginasse como seria um gráfico de simulação de marcha correspondente a este traçado, pode-se supor que ele teria aspecto parecido com o da Figura 8. A restrição de velocidades, todavia, teria menos “vales” (que correspondem às curvas horizontais), que também seriam mais afastados e talvez menos extensos. De toda forma, após transpor uma das curvas horizontais em velocidade reduzida, o trem convencional não conseguiria atingir

a velocidade máxima antes de se aproximar da curva seguinte e ter que desacelerar novamente.

Avaliação 3 - Traçado muito sinuoso (alinhamento teórico gerado)

A terceira avaliação envolveu a geração de um traçado em planta teórico muito sinuoso e em perfil com rampas acentuadas, característicos de um terreno fortemente ondulado ou montanhoso. Esse traçado foi gerado por processos aleatórios (com auxílio do Excel) com 47,4 km e curvas horizontais de raio igual a 1.000 m. Os alinhamentos horizontal e vertical gerados são mostrados a seguir.

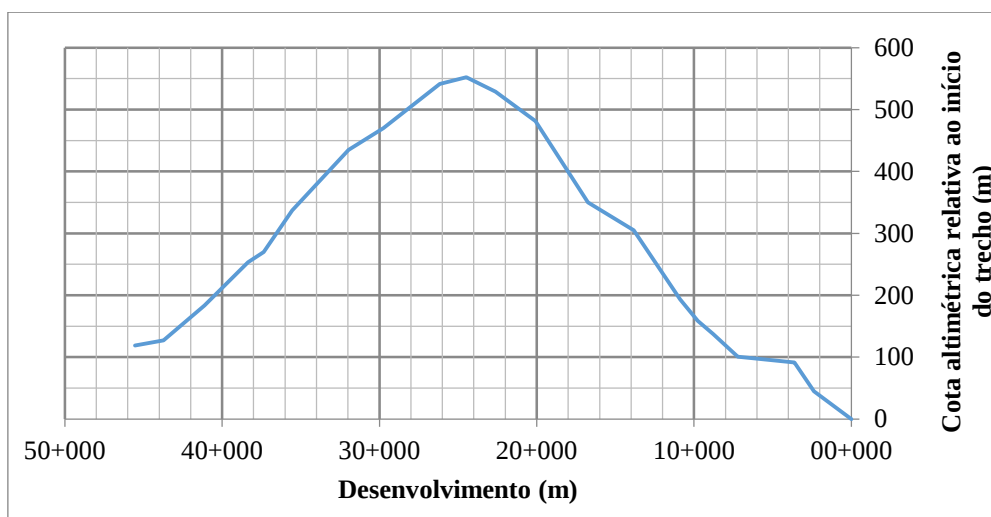
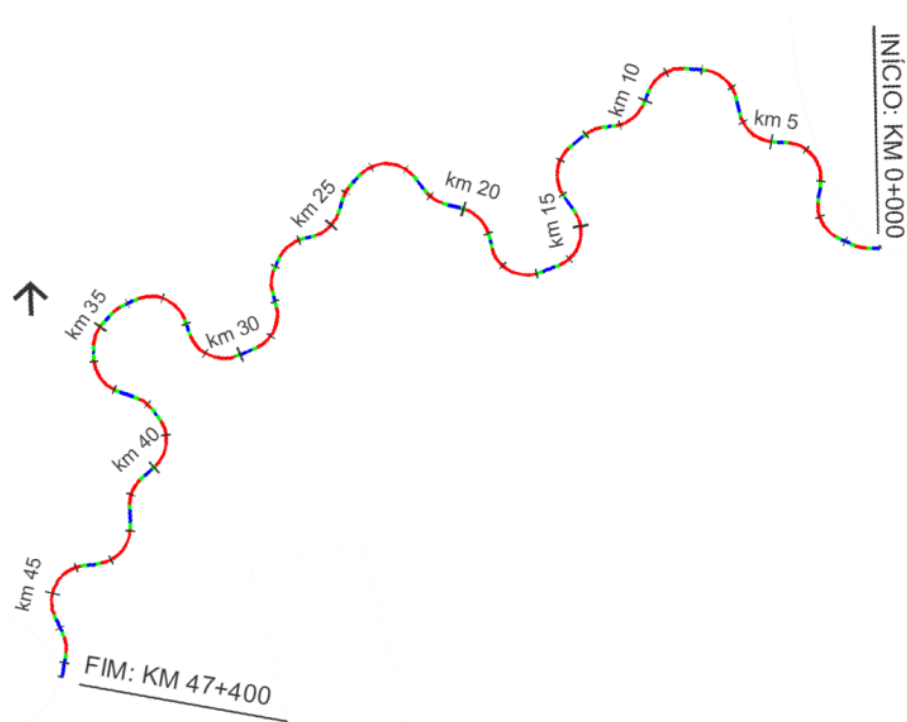


Figura 14 – Traçado em planta e perfil teórico gerado

De maneira semelhante ao que foi realizado na primeira avaliação, foram feitas simulações de marcha para 12 cenários, em função do tipo de material rodante e do nível de motorização admitidos.

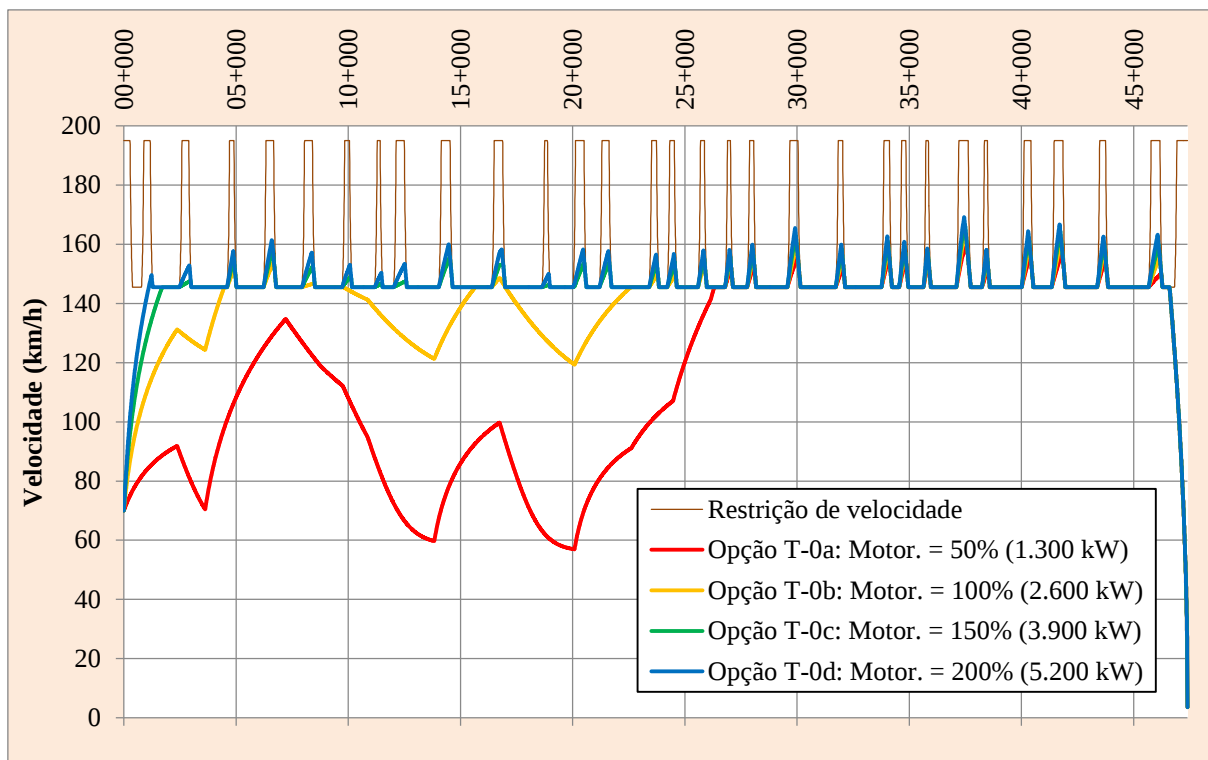


Figura 15 – Traçado muito sinuoso: Simulações de marcha para a opção operacional T-0 (trem convencional)

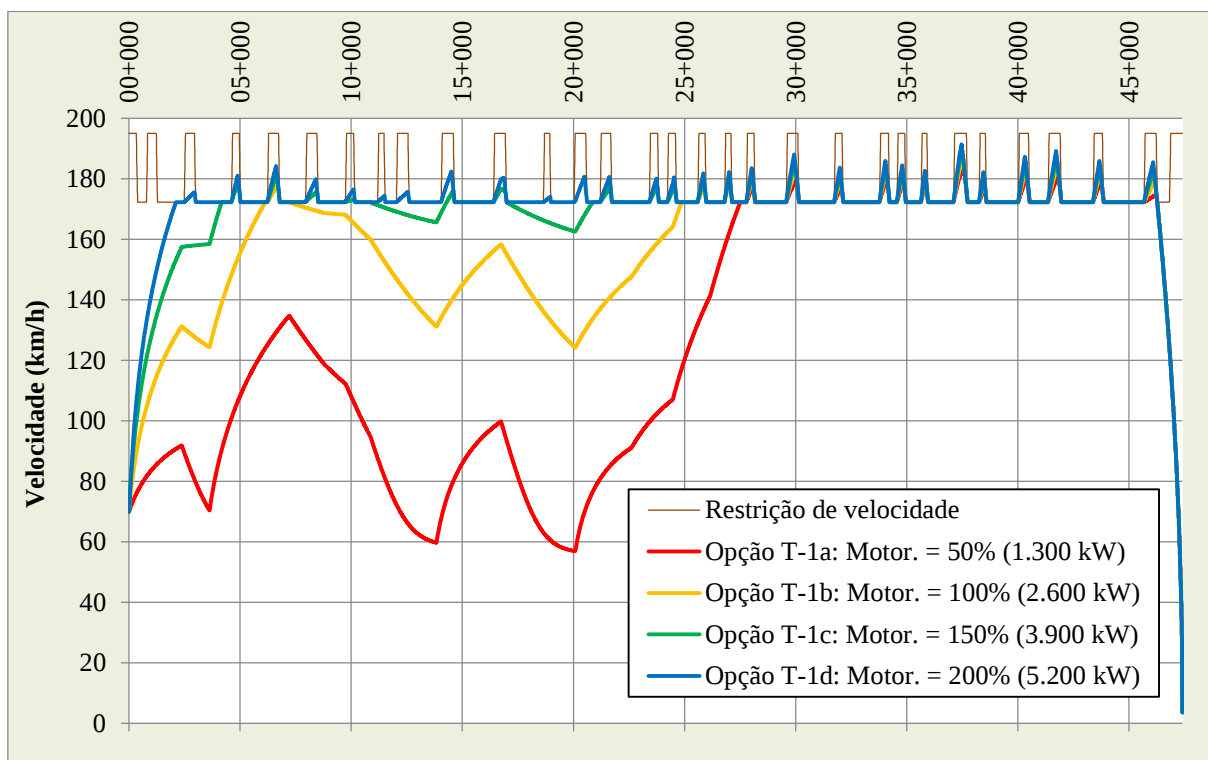


Figura 16 – Traçado muito sinuoso: Simulações de marcha para a opção operacional T-1 (trem pendular passivo)

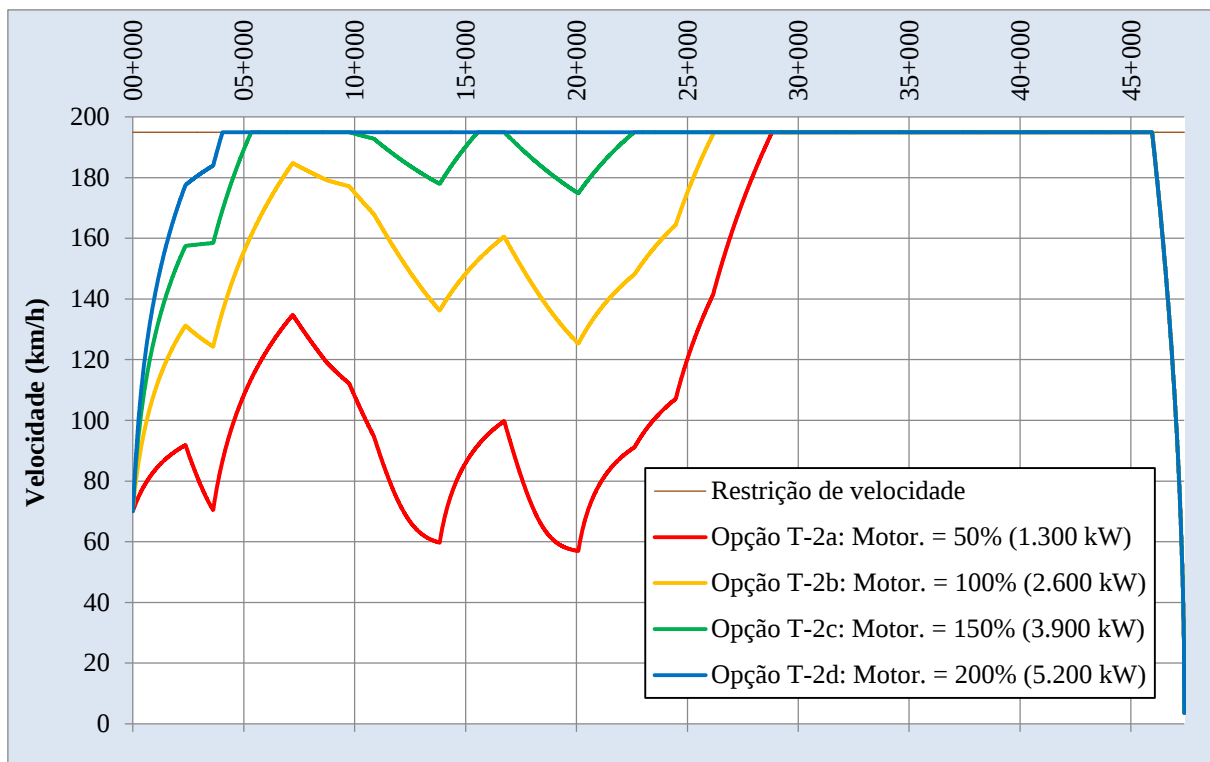


Figura 17 – Traçado muito sinuoso: Simulações de marcha para a opção operacional T-2 (trem pendular ativo)

Valem as mesmas observações feitas quanto aos gráficos das simulações de marcha correspondentes ao traçado medianamente sinuoso. Ressalva-se que as restrições de velocidade são mais pronunciadas, devido à maior quantidade e extensão de trechos em curva. Devido às rampas mais acentuadas, nota-se a exigência de maiores níveis de motorização para atingir as velocidades superiores.

O gráfico a seguir reúne os tempos totais de viagem dos 12 cenários simulados.

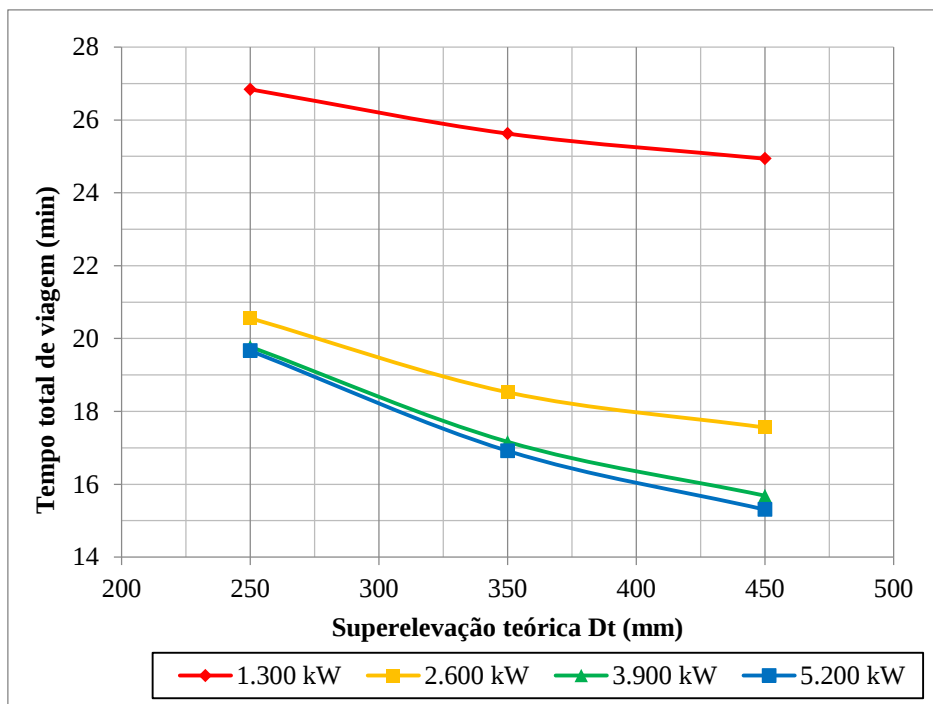


Figura 18 – Tempos totais de viagem para o traçado muito sinuoso

Mais uma vez é notável a redução do tempo total de viagem com o emprego do material rodante pendular. O ponto ótimo da potência instalada se situa em torno de 3.600 kW para este traçado.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em cima dos resultados das simulações de marcha sobre os três corredores considerados, foi feita uma comparação geral, de modo a verificar-se o potencial de redução do tempo de viagem em função da menor ou maior sinuosidade do traçado em planta. Foram usados os tempos referentes às potências ótimas instaladas para cada traçado específico.

Tabela 3 – Comparação geral dos resultados

	CORREDOR	Estocolmo – Gotemburgo (existente)	São Paulo – Sorocaba (projeto)	Traçado teórico (gerado)
Material rodante	Potência instalada ótima (kW)	1.400	2.600	3.600
	Sinuosidade do traçado	Baixa	Média	Alta
	Porcentagem de trechos em curva	9,40%	34,70%	62,60%
Trem convencional ($D_t = 250$ mm)	Tempo de viagem (min)	20,3	19,7	19,8
	Velocidade média (km/h)	139,8	144,6	143,5
	<i>Tempo relativo (%)</i>	<i>100,00%</i>	<i>100,00%</i>	<i>100,00%</i>
Trem pendular passivo ($D_t = 350$ mm)	Tempo de viagem (min)	18,7	17,2	17,3
	Velocidade média (km/h)	152,1	165,7	164,4
	<i>Tempo relativo (%)</i>	<i>91,90%</i>	<i>87,30%</i>	<i>87,30%</i>
	<i>Redução relativa (%)</i>	<i>-8,10%</i>	<i>-12,70%</i>	<i>-12,70%</i>
Trem pendular ativo ($D_t = 450$ mm)	Tempo de viagem (min)	17,9	16	15,9
	Velocidade média (km/h)	158,9	177,6	179,3
	<i>Tempo relativo (%)</i>	<i>88,00%</i>	<i>81,40%</i>	<i>80,00%</i>
	<i>Redução relativa (%)</i>	<i>-12,00%</i>	<i>-18,60%</i>	<i>-20,00%</i>

Como esperado, houve redução considerável dos tempos de viagem nos dois traçados mais sinuosos (-12,7 a -20,0%) com a operação de trens pendulares. A redução para o traçado menos sinuoso, porém, também é significativa (-8,1 a -12,0%).

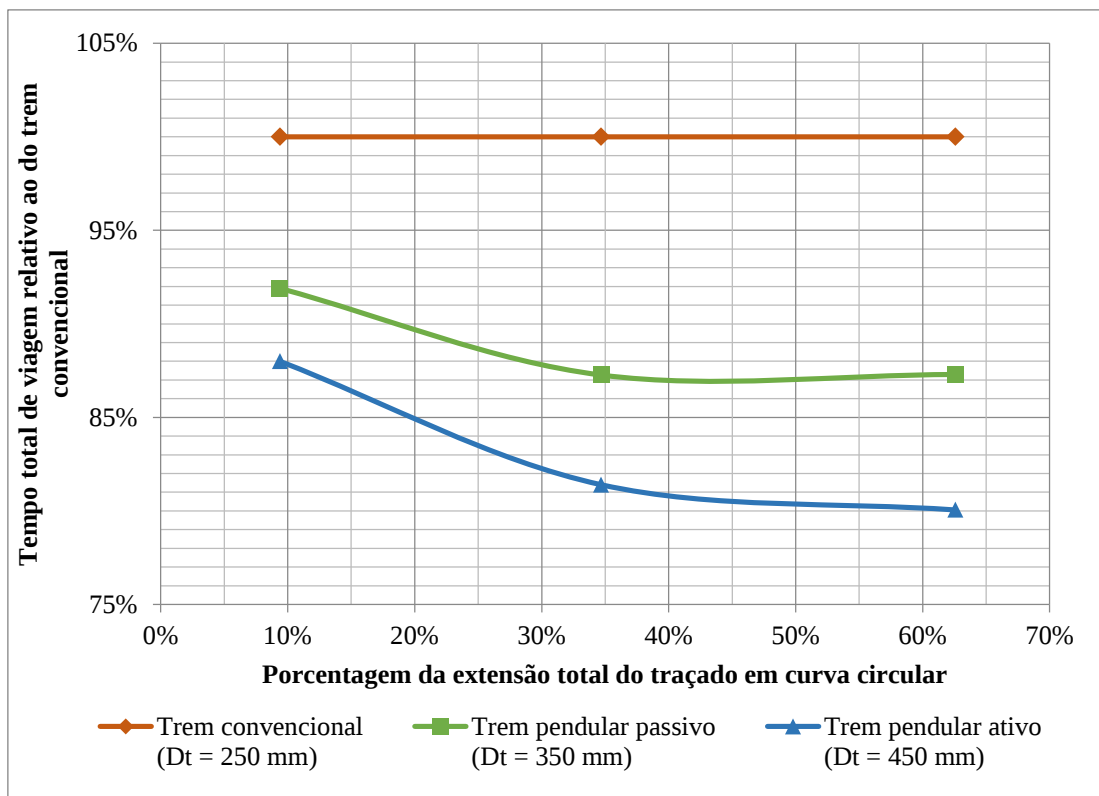


Figura 19 – Tempos de viagem relativos em função da sinuosidade do traçado

CONCLUSÕES

Conceitualmente, expôs-se o funcionamento dos trens pendulares, onde foi verificada sua operação diferenciada, que possibilita maior conforto do passageiro e o aumento das velocidades em traçados existentes.

As principais implicações da operação de trens pendulares centram-se no critério de segurança quanto ao tombamento, na análise diferenciada do gabarito dinâmico, no conforto do passageiro na curva de transição e com respeito ao enjoo de movimento. As implicações no projeto geométrico também são relevantes, embora as alterações necessárias para prever a operação do material rodante pendular sejam pequenas e de baixo custo.

As simulações de marcha mostraram reduções significativas dos tempos de viagem, algumas vezes maiores que as referentes a um aumento grande da potência instalada. A redução do tempo de viagem variou de -8,1% a -20,0%, o que é próximo ao encontrado na literatura (PITA, 2006).

Em projetos de novas linhas ferroviárias, recomenda-se que o traçado seja adaptado para a eventual operação de trens pendulares, mesmo que o escopo da implantação não preveja isso. As mudanças necessárias são pouco impactantes: a principal delas é a inserção de curvas de transição mais extensas que as usuais. Essa prática possibilita um aumento de velocidades com a eventual operação de trens de caixa móvel futuramente, o que caracteriza a implantação de um serviço mais robusto e competitivo.

Em futuros trabalhos, recomendam-se estudos e simulações de marcha de trens pendulares que mostrem as potenciais reduções de tempos de viagem em comparação com os trens convencionais. Em paralelo pode-se efetuar um estudo econômico de viabilidade. Também é recomendado verificar a hipótese de implantação de uma linha de traçado com raios menores, que melhor se adeque ao terreno natural e assim gere economia de obras civis, de modo que seja atingida a velocidade comercial pretendida por meio da operação de trens pendulares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALSTOM. **Technologies & Systems - Tiltronix: Leaning towards high speed**. Alstom. Alstom, 2010.

CEN. **Railway applications - Track - Track alignment design parameters - Track gauges 1435 mm and wider - Part 1: Plain line.** Bruxelas: European Committee of Standardization, 2010.

CPTM. **Estudos de Traçado, de Viabilidade Técnica, Operacional e Ambiental, de Inserção Urbana e de Projeto Funcional para Implantação de um Serviço Ferroviário de Passageiros ligando as cidades de São Paulo e Sorocaba.** Companhia Paulista de Trens Metropolitanos. São Paulo: CPTM, 2011.

FÖRSTBERG, J. **Ride comfort and motion sickness in tilting trains: Human responses to motion environments in train experiment and simulator experiments.** Estocolmo: Royal Institute of Technology, 2000.

GOODALL, R. M.; MEI, T. X. **Active Suspensions.** In: IWNICKI, S. **Handbook of Railway Vehicle Dynamics.** Boca Raton: CRC Press, 2006. p. 327-357.

GOOGLE MAPS. **Rota entre Estocolmo e Gotemburgo na Suécia, disponível no Site do Google Maps.** Disponível em: [\(www.google.com.br/maps/dir/Estocolmo,+Sweden/Gothenburg,+Sweden/@58.5824208,15.0090793,8z/data=!4m14!4m13!1m5!1m1!1s0x465f763119640bcb:0xa80d27d3679d7766!2m2!1d18.0685808!2d59.3293235!1m5!1m1!1s0x464f8e67966c073f:0x4019078290e7c40!2m2!1d11.97456!2\). Acesso em: 28/set/2014.](http://www.google.com.br/maps/dir/Estocolmo,+Sweden/Gothenburg,+Sweden/@58.5824208,15.0090793,8z/data=!4m14!4m13!1m5!1m1!1s0x465f763119640bcb:0xa80d27d3679d7766!2m2!1d18.0685808!2d59.3293235!1m5!1m1!1s0x464f8e67966c073f:0x4019078290e7c40!2m2!1d11.97456!2)

JOHNSON, D. M. Gauging Issues. In: S. IWNICKI, **Handbook of Railway Vehicle Dynamics**, p. 181-207. Boca Raton: CRC Press, 2006.

KUFVER, B. **Fast And Comfortable Trains - FACT - Deliverable D8: Tracks for tilting trains.** Linköping: European Commission, 2005.

LEFERROVIE.IT. **Elettrotreno politensione ETR 600 - leferrovie.it.**

Disponível em:

(www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=schede_tecniche:elettrico:etr:etr_600).

Acesso em: 27/set/2014.

LICHTBERGER, B. **Track Compendium: Track System, Substructure, Maintenance & Economics.** Hamburgo: DW Media Group GmbH, Eurail Press, 2011.

MANCINI, G.; PELACCHI, S.; BALLI, M.; FATTORI, A. C. **New developments with the Italian solution for tilting trains: optimization of tilting system on new generation of Pendolino trains.** Florença: Trenitalia SpA, 2008.

PERSSON, R. **Tilting trains: Description and analysis of the present situation.** Estocolmo: Royal Institute of Technology (KTH), 2007.

PERSSON, R. **Tilting trains: Technology, benefits and motion sickness.** Estocolmo: Royal Institute of Technology (KTH), 2008.

PERSSON, R. **Tilting trains: Enhanced benefits and strategies for less motion sickness.** Estocolmo: Royal Institute of Technology (KTH), 2011.

PITA, A. L. **Infraestructuras ferroviarias.** Barcelona: Edicions UPC, 2006.

Siemens. **Siemens - Desiro ML: Soluções Siemens para os Trens Regionais no Brasil.** Siemens. São Paulo: Siemens: Industry Sector - Mobility Division, 2011.

TALGO. **Apresentação Talgo.** Talgo, 2011.

UIC. **UIC-703RI: Infrastructure for tilting trains.** International Union of Railways. UIC - International Union of Railways, 2003.

WIKIPEDIA. **Comboio Pendular.** Artigo da Wikipedia. Disponível em: (https://pt.wikipedia.org/wiki/Comboio_pendular). Acesso em: 15/jul/2017.