

GERAÇÃO DE SEGUIDORES OTIMIZADOS APLICADOS A TRENS DE CARGA

Eduardo Waib
dudawaib@gmail.com

Resumo. Este trabalho compara o desempenho de diferentes estratégias de operação de um trem baseadas em seguidores. Foram construídos cinco tipos de seguidores: degrau, rampa, rampa inteligente, erro de Gauss e erro de Gauss inteligente. O consumo de energia, aderência à velocidade e as forças entre vagões são preocupações consideradas no trabalho. Um processo de otimização LQR foi utilizado para levar esses fatores em consideração. Os resultados das simulações mostram que o desempenho do trem pode ser otimizado utilizando novas referências, e que o seguidor erro de Gauss foi a melhor estratégia.

Palavras chave: Seguidores, Controle em Malha Fechada; Trem de carga; LQR; Controle

1. Introdução

O projeto foca a otimização do sistema de controle de trens, em que diferentes perfis de velocidade de referência são testados, visando uma saída ótima dos parâmetros considerados. Tais parâmetros são: a velocidade média do trem, o desvio de velocidade, tempo de percurso, forças na locomotiva e nos engates e a energia.

Uma das principais aplicações de um sistema de controle de trens é oferecer as condições técnicas para uma melhora da produtividade do transporte ferroviário. De fato, ele releva-se essencial tanto para reduzir ao máximo os custos gerados, através de uma estratégia de otimização da operação do trem, quanto para melhorar a segurança. Consumo de energia, tempo de viagem e manutenção são três parâmetros importantes que entram em jogo para a determinação dos custos operacionais dos trens de carga. O estudo da dinâmica longitudinal e a otimização dos modelos de controle participam da tentativa de barateamento do setor ferroviário.

Inicialmente os resultados da simulação de cada seguidor foram descritos, dando sequência para uma análise comparativa.

2. Objetivos

O objetivo do presente trabalho é a otimização dos picos de energia observados no trabalho de TODESCO (2010). O trabalho do mesmo é focado no controle LQR, onde a referência em degrau é utilizada. A introdução de seguidores, isto é, rampa e erro de Gauss, pretende reduzir altas taxas de variação de velocidade, tranco e energia.

3. Revisão dos trabalhos anteriores

A inspiração para o desenvolvimento dos seguidores surgiu da observação dos picos de controle e força do trabalho de Todesco (2010), e da proposta de melhoria dos trabalhos de Zhuan e Xia.

O trabalho de Zhuan e Xia (2006) propõe a otimização do controle de malha aberta. Dessa forma, o controle de malha fechada seria aplicado sobre um sistema linearizado inteligente. Concluiu-se que a malha aberta não apresentou um bom desempenho de maneira isolada, mas poderia ser um bom ponto de partida se utilizada como referência para o controle de malha fechada. Essa proposta, de fato, contribuiu para o melhor desempenho do controle de malha fechada (ZHUAN e XIA, 2007). Este trabalho desenvolve novas referências para o controle, ou seja, projeta seguidores, utilizando a ideia dos trabalhos citados acima, de maneira simplificada.

O trabalho de Fernandes (2015) apresenta três fases do movimento do veículo. A primeira fase, a fase de aceleração, é caracterizada pela velocidade aumentando até a próxima velocidade de referência, que é maior do que a velocidade atual. Essa fase é dividida em duas partes onde a aceleração de referência primeiramente aumenta de zero para a aceleração máxima permitida, e depois diminui até zero novamente.

A segunda fase, a fase de desaceleração, é caracterizada pela velocidade diminuindo até a próxima velocidade de referência, que é menor que a velocidade atual. Essa fase é dividida em duas partes, nas quais o módulo da aceleração primeiramente aumenta de zero até a máxima aceleração permitida, e depois diminui novamente para zero.

A terceira fase, a fase de velocidade constante, é caracterizada pela velocidade constante de cruzeiro. Nessa fase, a aceleração de referência é zero, e a velocidade de referência é constante.

Embora o sistema estudado por Fernandes (2015) seja veículo submarino operado remotamente ou ROV (do inglês *Remotely operated underwater vehicle*), algumas das ideias apresentadas foram adaptadas para serem usadas como referência para o movimento de um trem. A referência proposta neste trabalho inclui velocidade e aceleração para guiar o movimento dos veículos.

4. Metodologia

4.1. Modelo do trem

No estudo da dinâmica longitudinal do trem feita a partir das equações do movimento, as principais forças são: força de inércia, força nos engates (acoplamentos), força de resistência ao movimento e força do freio pneumático (BARBOSA, 1993). Ao referir-se a uma locomotiva, duas forças têm que ser adicionadas: força de tração e força de freio dinâmico. Sendo que i faz referência à posição do veículo ao longo do trem, x ao deslocamento, \dot{x} à velocidade, \ddot{x} à aceleração, a equação é descrita da seguinte forma (CHOU, XIA e KAYSER, 2007):

$$m_i \ddot{x}_i = u_i - \underbrace{k_i(x_i - x_{i+1}) - k_{i-1}(x_i - x_{i-1})}_{\text{Forças das molas}} - \underbrace{d_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1}) - d_{i-1}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1})}_{\text{Forças dos amortecedores}} - \left(\underbrace{c_o + c_v \dot{x}}_{F_{\text{rolamento}}} + \underbrace{c_{an} \dot{x}^2}_{F_{\text{aerodinâmica}}} \right) \cdot m_i - g \sin \theta_i m_i \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde m_i é a massa do veículo, u_i é a força de entrada (tração ou freio), k_i é a constante de mola do acoplamento, d_i é a constante de amortecimento do acoplamento, g é a gravidade, θ_i é o ângulo do plano da via na direção longitudinal, e c_o , c_v , c_{an} são constantes de resistência ao movimento obtidas experimentalmente (CHOU, XIA e KAYSER, 2007).

As forças de atuação ativa são sobre as quais o controle pode ser exercido. Para os vagões, são apenas os freios pneumáticos com controle eletrônico. Já as locomotivas contam com os freios pneumáticos e com a tração juntamente com o freio dinâmico. Os atuadores serão tratados apenas como u_i . A intensidade e o instante da ação serão determinados pelo controle. Igualmente, os limites e a taxa de variação da força tanto para o freio como para a tração serão respeitados.

A Fig. 1 representa um trem com as forças em ação movimentando-se para a esquerda. Para cada veículo, teremos as equações do movimento.

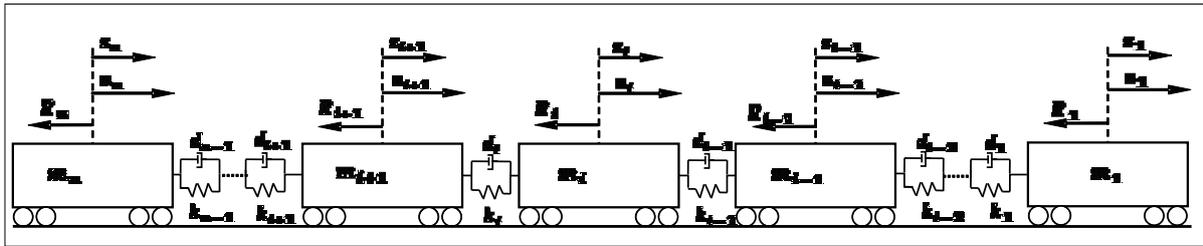


Fig. 1 - Diagrama de forças sobre o trem

4.2. Controle

O controle sobre o percurso tem o intuito de manter o trem na velocidade de referência, e pode ser utilizado com três ênfases: melhorar aderência com a velocidade pretendida, minimizar as forças nos acoplamentos e reduzir os gastos energéticos. Neste trabalho, a ênfase selecionada foi energia, pois foi a que apresentou melhor resultado no trabalho que deu origem a este estudo (TODESCO, 2010):

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} O_{n \times n} & I_{n \times n} \\ A_{21n \times n} & A_{22n \times n} \end{bmatrix}_{2n \times 2n} X + \begin{bmatrix} O_{n \times (m+n)} \\ B_{21n \times (m+n)} \end{bmatrix}_{2n \times (m+n)} U \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde $O_{n \times n}$ é uma matriz nula $n \times n$, $I_{n \times n}$ uma matriz identidade $n \times n$, $O_{n \times (m+1)}$ é uma matriz nula $n \times (m+1)$, e $B_{21} = [B_{211n \times m} \quad B_{212n \times n}]_{2n \times (m+n)}$. B_{212} é uma matriz identidade com dimensão n . As matrizes A_{21} e A_{22} são construídas por:

$$A_{21} = \begin{bmatrix} -\frac{k_1}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} & 0 & \vdots & 0 \\ \frac{k_1}{m_2} & -\frac{k_1 + k_2}{m_2} & \frac{k_2}{m_2} & \vdots & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{m_3} & -\frac{k_2 + k_3}{m_3} & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & -\frac{k_{n-1}}{m_n} \end{bmatrix}_{n \times n}$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} -c_v - 2c_a v_d - d_1 & d & 0 & \vdots & 0 \\ d & -c_v - 2c_a v_d - d_1 - d_2 & d & \vdots & 0 \\ 0 & d & -c_v - 2c_a v_d - d_2 - d_3 & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & -c_v - 2c_a v_d - d_{n-1} \end{bmatrix}_{n \times n}$$

$B_{211}_{n \times m}$ é a matriz dada pela configuração das posições das locomotivas $L = [l_1, l_2, \dots, l_m]$, onde l é a posição da locomotiva e m o número de locomotivas. A matriz é construída por:

$$B_{211} = \begin{bmatrix} 1_{l_1} & 0_{l_2-1} & \dots & 0_{l_{m-1}-1} & 0_{n-l_2} \\ & 1_{l_2} & \dots & & \\ & & \dots & 1_{l_{m-1}} & \\ & & & & 1_{l_m} \\ 0_{n-l_1} & 0_{n-l_2} & \dots & 0_{n-l_{m-1}} & 0_{n-l_m} \end{bmatrix}_{n \times m}$$

Onde 1_i , i representa a linha do valor 1. E 0_j denota um vetor coluna com dimensão j .

O freio controlado por eletrônico permite que a ação do mesmo seja diferenciada para cada veículo, agindo com a intensidade e no instante que o veículo necessita. Isso requer uma alta capacidade de sensoriamento e de processamento por parte do controle (TODESCO, 2010). O controle requer que cada veículo tenha seu estado definido, ou seja, cada veículo deve receber um sensor de velocidade.

4.3. Controle LQR

A otimização terá como base a construção da função na qual teremos os ganhos que minimizam a função J , onde Q e R são os pesos (ZHUAN e XIA, 2006):

$$J = \int_0^T (x^T \cdot Q \cdot x + u^T \cdot R \cdot u) dt \quad \text{Eq. (3)}$$

Assim, a diagonal da matriz de ganho de R determina os desempenhos das trações e dos freios:

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_5 \end{bmatrix}$$

Onde r_i são os coeficientes de ponderação para a tração e força de frenagem em cada veículo. A ponderação da matriz Q é escolhida de forma que:

$$\delta x^T Q \delta x = \sum_{i=1}^{n-1} \underbrace{q_{1i} k_i^2 (\delta x_i - \delta x_{i+1})^2}_{\text{Mola}} + \underbrace{q_{1i} d_i^2 (\delta \dot{x}_i - \delta \dot{x}_{i+1})^2}_{\text{Amortecedor}} + \sum_{i=1}^n \underbrace{q_{2i} (\delta \dot{x}_i)^2}_{\text{desvio na velocidade pretendida}} \quad \text{Eq. (4)}$$

Na equação acima, todos os valores de q são positivos. O termo q_{1i} penaliza as forças nos acoplamentos, e o termo q_{2i} penaliza o desvio no rastreamento da velocidade pretendida para o trem. O termo que representa a força dos atuadores na equação do movimento é dado por:

$$\mathbf{u} = \mathbf{K} * ([\mathbf{r}] - [\mathbf{x}]) \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde K é a matriz de ganho e r é a referência, ou neste trabalho, o seguidor.

5. Seguidores

A solução de controle do trabalho de Todesco (2010) é um regulador, enquanto este estudo se baseia em seguidores. Foram introduzidos cinco tipos de seguidores: degrau, rampa e rampa inteligente, erro de Gauss e erro de Gauss inteligente.

Os tipos de seguidores, citados anteriormente, são explicados neste ítem utilizando-se de um exemplo de aplicação para o caso de um trem de dez vagões, com objetivo didático.

5.1. Degrau

Os seguidores de grau são resultado natural das velocidades permitidas na via devido à proximidade de centros urbanos, cruzamentos, estações, ou mesmo à áreas de declive ou curvas acentuadas. Esses são locais de risco de acidentes, por exemplo, descarrilamentos.

A referência em degrau é análoga à encontrada nas rodovias, onde velocidades máximas permitidas são atribuídas a trechos delimitados. A aderência à velocidade de referência é importante para diminuir o tempo de viagem, que é um importante parâmetro econômico das empresas operadoras de trens. Tal entrada pode ser vista na Fig. 2 a seguir.

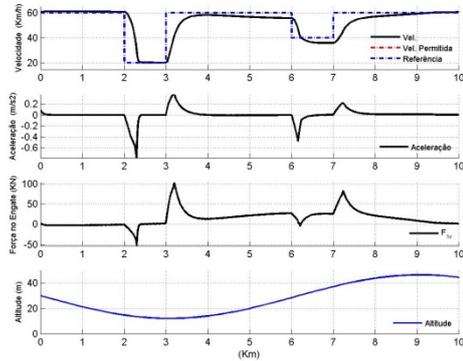


Fig. 2 – Seguidor degrau

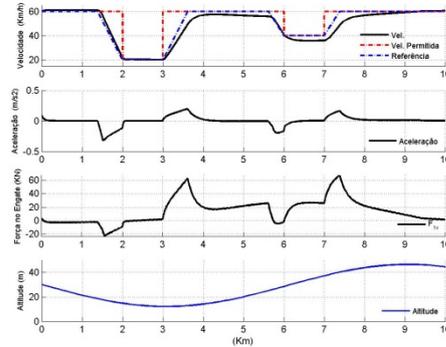


Fig. 3 - Seguidor Rampa

5.2. Rampa

O objetivo de introduzir uma referência em rampa é evitar uma ação de controle brusca. A nova referência permite um controle gradativo ao longo de um deslocamento, com uma variação da velocidade constante ao longo desse deslocamento.

A nova referência se inicia antes do degrau com variação negativa de velocidade para garantir que a locomotiva não esteja numa velocidade acima da permitida. O mesmo vale quando há uma variação positiva da velocidade permitida. A nova referência se inicia após o ponto em que ocorre a mudança da velocidade permitida da via. Desse modo, tanto para uma variação positiva quanto negativa da velocidade máxima permitida, o trem estará respeitando a velocidade regulamentada.

Esta entrada em rampa é mostrada na Fig. 3 acima.

5.3. Rampa inteligente

O seguidor rampa inteligente considera a velocidade real do trem ao invés da referência no mesmo momento. Por exemplo, em variações negativas de velocidade permitida da via, quando a velocidade do trem for superior ao patamar de velocidade, o controle será acionado com antecipação, pois o comboio terá que compensar essa diferença de velocidade, conforme visto na Fig. 4. O mesmo raciocínio se aplica quando o trem se encontra em velocidade inferior à de referência, onde, neste caso, o trem atrasará a frenagem. O mesmo comportamento se aplica em variações positivas de velocidade permitida da via.

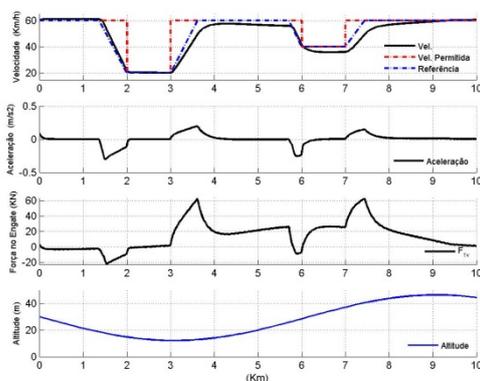


Fig. 4 - Seguidor Rampa Inteligente

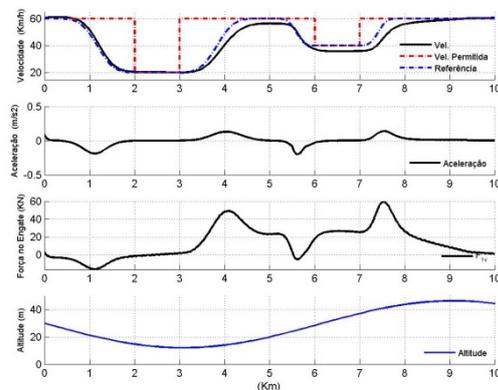


Fig. 5 - Seguidor erro de Gauss

5.4. Erro de Gauss

A referência erro de Gauss permite uma variação suave, sem descontinuidade, na variação da velocidade. A mesma regra aqui se aplica no sentido de respeitar a velocidade máxima permitida, ou seja, o trem antecipa o controle quando

há uma diminuição da mesma, e posterga a variação de velocidade quando há um aumento da velocidade máxima permitida. Este tipo de seguidor está ilustrado na Fig. 5 acima.

5.5. Erro de Gauss inteligente

Assim como o seguidor rampa inteligente, este seguidor leva em conta a velocidade real do trem. Porém, neste caso observa-se que as variações de velocidade seguem curvas mais suaves que no caso da rampa. A escolha do seguidor erro de Gauss se deve à relação entre a aceleração, variação de velocidade e a distância necessária para a mudança de energia cinética. A aceleração a ser respeitada é diretamente proporcional à diferença de quadrados das velocidades de patamares consecutivos, e inversamente proporcional à distância requerida para a variação de energia. Os ensaios para este caso podem ser vistos na Fig. 6 a seguir.

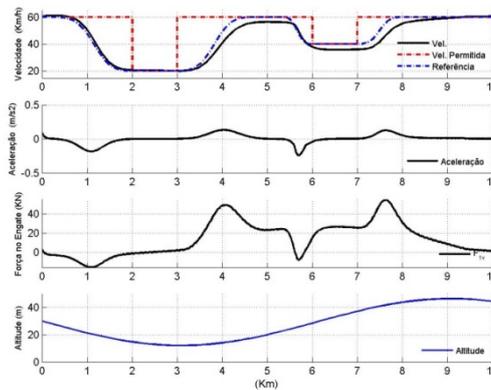


Fig. 6 - Seguidor erro de Gauss inteligente

6. Resultados

Os cinco tipos de seguidores foram simulados, e os resultados são mostrados a seguir. O controle é obtido a partir da linearização das equações do movimento, entorno do ponto estável do modelo.

6.1. Degrau

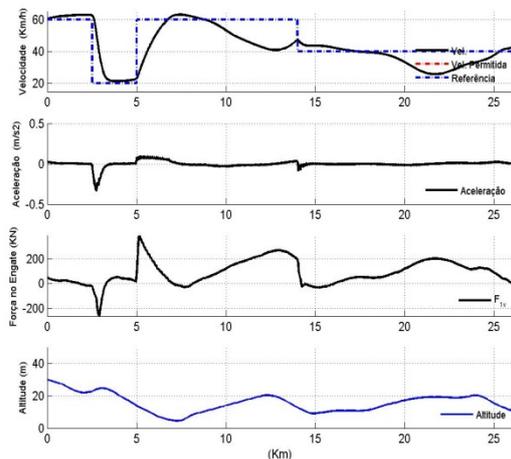


Fig. 7 - Resultado para o seguidor Degrau

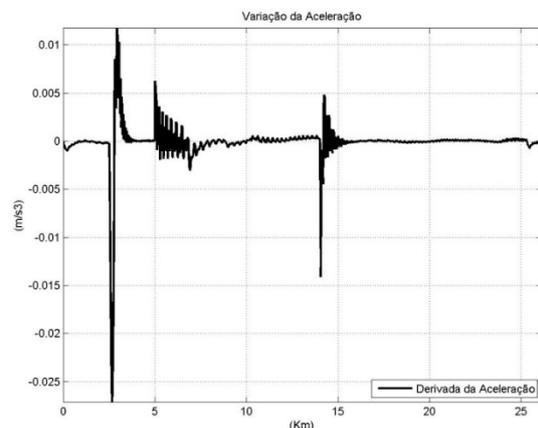


Fig. 8 - Tranco para entrada Degrau

A Fig. 7 mostra o comportamento do trem com o seguidor degrau. Pode-se observar no gráfico de velocidades que a velocidade real do trem não respeita a velocidade permitida da via, principalmente na primeira redução de velocidade permitida, de 60 para 20km/h. Observa-se também que o trem não consegue manter a velocidade constante em subidas, isto é, o controle não aplica a força necessária para manter a velocidade. Já em descidas, a velocidade do trem não descola muito da referência.

Observa-se no gráfico de aceleração que as mudanças de velocidade permitida estão acompanhadas de picos de aceleração. Os mesmos picos estão presentes no gráfico de força no engate do primeiro vagão. No restante do percurso, a força no engate varia mais suavemente, mantendo-se entre os valores máximos acima.

A Fig. 8 representa a variação da aceleração, ou seja, o tranco. Observam-se picos ao longo do percurso, atingindo 0,027m/s³ no pior caso, no período de diminuição de velocidade de 60 para 20km/h.

6.2. Rampa

A Fig. 9 abaixo mostra o comportamento do trem com o seguidor rampa. Pode-se observar no gráfico de velocidades que a velocidade real do trem começa a diminuir antes do momento de mudança de velocidade permitida da via, de 60 para 20km/h. Essa redução antecipada contribui para diminuir a infração da velocidade máxima da via, quando comparado ao seguidor degrau. A não aderência à velocidade de referência em subidas no caso do degrau também é observada na rampa. Em descidas, a velocidade do trem não descola muito da referência, igual ao caso da rampa.

Observa-se no gráfico de aceleração que as mudanças de velocidade permitida estão acompanhadas de picos de aceleração, assim como no seguidor degrau. Porém, neste caso, a aceleração atinge valores inferiores quando comparados ao do seguidor degrau.

Comportamento análogo acontece com a força no engate do primeiro vagão. A força máxima de compressão neste caso é igual à mesma força no seguidor degrau, enquanto a força de distensão diminuiu sensivelmente.

A Fig. 10 representa a variação da aceleração, ou seja, o tranco. Observam-se picos ao longo do percurso, no período de diminuição de velocidade de 60 para 20km/h. O tranco diminuiu mais do que pela metade quando comparado ao seguidor degrau. A mesma diminuição observada ao longo dos outros picos de tranco no percurso.

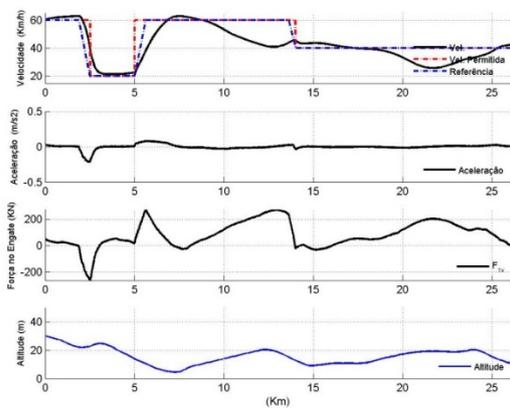


Fig. 9 - Resultado para o seguidor Rampa

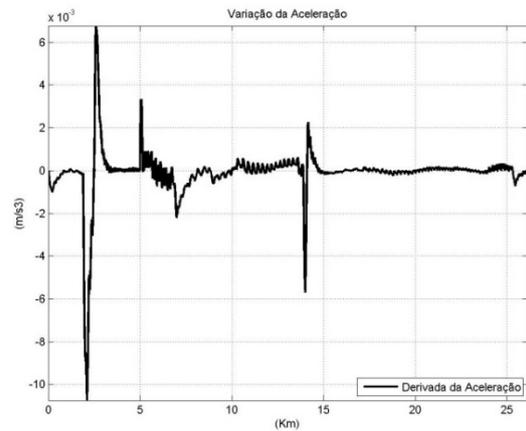


Fig. 10 - Tranco para entrada Rampa

6.3. Rampa inteligente

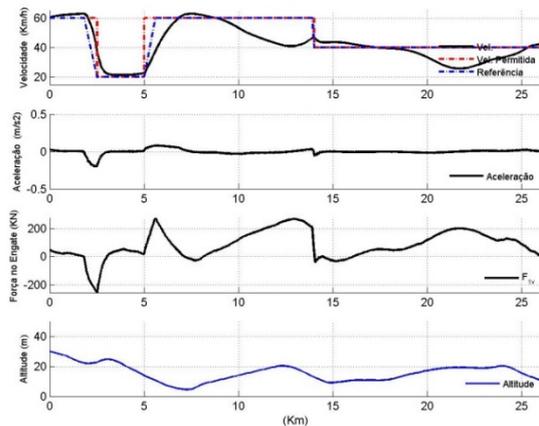


Fig. 11 - Resultado para o seguidor Rampa Inteligente

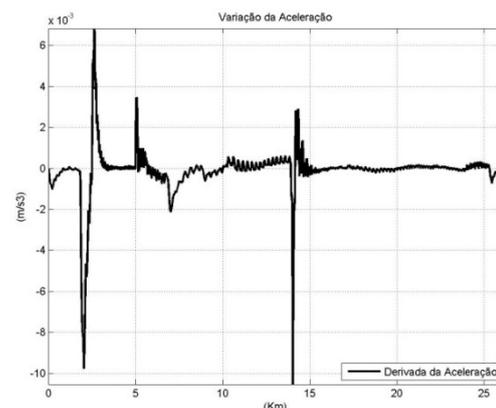


Fig. 12 - Tranco para entrada Rampa Inteligente

A Fig. 11 mostra o comportamento do trem com o seguidor rampa inteligente. Os resultados para esse seguidor são semelhantes ao seguidor rampa normal. O trem também antecipa a diminuição da velocidade nos momentos de variação negativa de velocidade permitida da via. Porém, quando cuidadosamente analisado, percebe-se que a redução de velocidade se inicia antes pelo fato da velocidade real do trem ser considerada. Ou seja, o seguidor inteligente percebe que o trem está com uma velocidade maior que a de referência e antecipa a frenagem com o objetivo de alcançar o novo patamar de 20km/h.

Observa-se no gráfico de aceleração que as mudanças de velocidade permitida estão acompanhadas de picos de aceleração, assim como no seguidor rampa normal. Porém neste caso a aceleração apresenta valores menores.

Comportamento semelhante acontece com a força no engate do primeiro vagão, com compressão ligeiramente inferior ao seguidor normal, e distensão ligeiramente superior ao seguidor normal, na primeira redução de velocidade

permitida. No restante do percurso, a força no engate varia mais suavemente, mantendo-se entre os valores máximos mencionados.

Os trancos observados na Fig. 12 obtidos com o seguidor inteligente não apresentaram melhoria relevante quando comparado ao seguidor rampa normal.

6.4. Erro de Gauss

A Fig. 13 abaixo mostra o comportamento do trem com o seguidor erro de Gauss. Pode-se observar no gráfico de velocidades que a velocidade real do trem começa a diminuir antes do momento de mudança de velocidade permitida da via, de 60 para 20km/h. Mas agora, quando comparado à rampa, essa antecipação acontece ainda antes. Além de prever melhor a mudança de velocidade da via, a variação da velocidade ao longo de todo o percurso é mais suave que no caso da rampa.

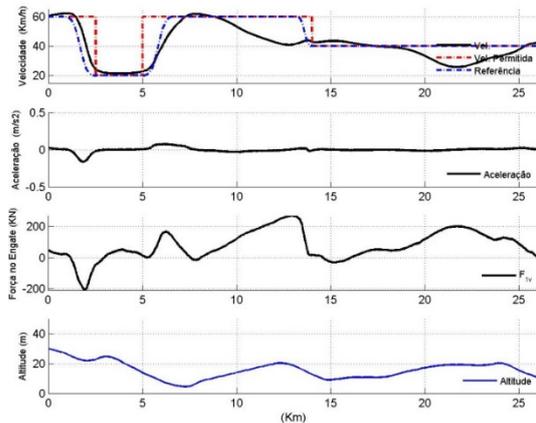


Fig. 13 - Resultado para o seguidor erro de Gauss

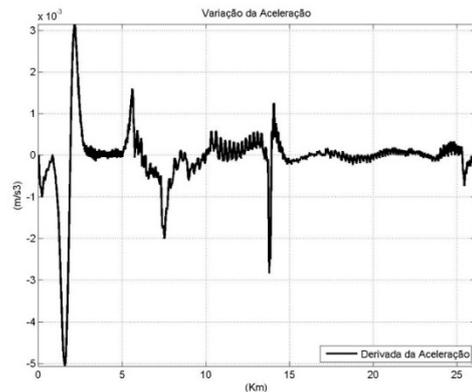


Fig. 14 - Tranco para entrada erro de Gauss

A variação da velocidade próximo ao km 5, onde a velocidade da via vai de 20 para 60km/h, acontece mais lentamente no caso do erro de Gauss, quando comparado à rampa.

Observa-se no gráfico de aceleração que as mudanças de velocidade permitida estão acompanhadas, desta vez, de curvas suaves, e não mais picos. As acelerações máximas positivas e negativas são menores que no caso do seguidor rampa, comportamento esperado para o seguidor erro de Gauss.

Comportamento análogo acontece com a força no engate do primeiro vagão, com curvas mais suaves. A força máxima de compressão neste caso é sensivelmente inferior à mesma força no seguidor rampa, enquanto a força de distensão diminuiu ligeiramente. No restante do percurso, a força no engate varia mais suavemente, mantendo-se entre os valores máximos mencionados.

A Fig. 14 representa a variação da aceleração (tranco). O tranco nos picos da figura acima diminuiu mais do que pela metade quando comparado ao seguidor rampa, ou seja, o seguidor erro de Gauss apresentou um bom rendimento quando comparado ao seguidor rampa, atingindo o objetivo esperado de suavizar o movimento do trem.

6.5. Erro de Gauss inteligente

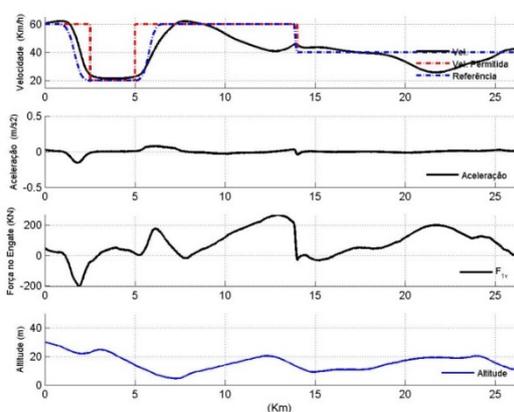


Fig. 15 - Seguidor erro de Gauss inteligente

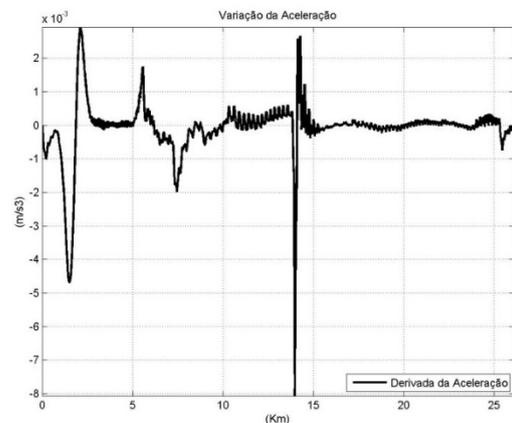


Fig. 16 - Tranco para erro de Gauss inteligente

A Fig. 15 mostra o comportamento do trem com o seguidor erro de Gauss inteligente. Os resultados para esse seguidor são semelhantes ao seguidor erro de Gauss normal. O trem também antecipa a diminuição da velocidade nos momentos de variação negativa de velocidade permitida da via. Porém, quando cuidadosamente analisado, percebe-se que a redução de velocidade se inicia antes pelo fato da velocidade real do trem ser considerada. Ou seja, o seguidor inteligente percebe que o trem está com uma velocidade maior que a de referência e antecipa a frenagem com o objetivo de alcançar o novo patamar de 20km/h.

Observa-se no gráfico de aceleração que as mudanças de velocidade permitida ainda estão acompanhadas de curvas suaves de aceleração, assim como no seguidor erro de Gauss normal, porém com valores ligeiramente menores.

Comportamento semelhante acontece com a força no engate do primeiro vagão, com curvas suaves de compressão ligeiramente superior ao seguidor normal, e distensão, igual ao seguidor normal, na primeira redução de velocidade permitida. No restante do percurso, a força no engate varia mais suavemente, mantendo-se entre os valores máximos mencionados.

A Fig. 16 representa a variação da aceleração (tranco). Observam-se picos ao longo do percurso, ligeiramente abaixo do seguidor normal equivalente. A grande diferença se encontra na segunda variação negativa da velocidade da via, quando tranco atinge valor quase três vezes superior ao caso normal. Nesse último caso, o erro de Gauss inteligente apresenta uma piora quanto ao tranco do seguidor normal.

7. Análise dos resultados

Uma análise comparativa é realizada para possibilitar a seleção do seguidor mais apropriado para atingir o objetivo deste trabalho.

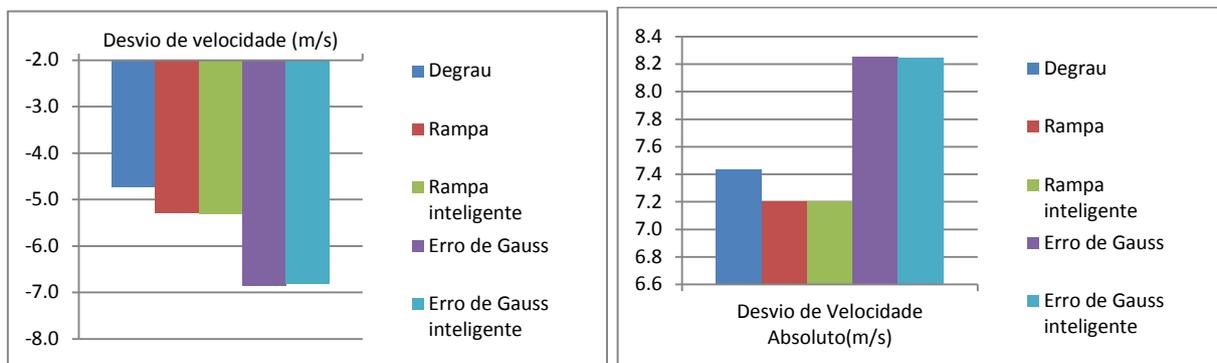


Fig. 17 - Desvio de Velocidade

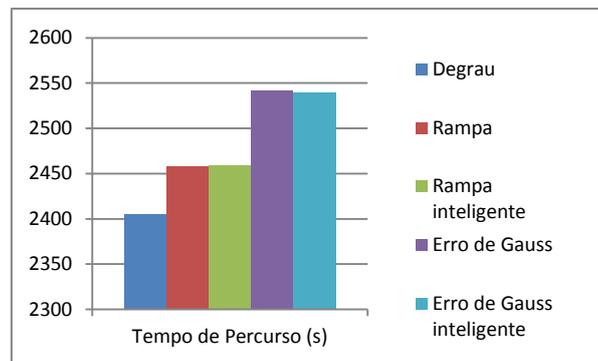


Fig. 18 - Tempo de percurso

A Fig. 17 mostra que o seguidor degrau apresenta melhores resultados em termos do desvio de velocidade, tendo maior aderência ao perfil de velocidades da via. Esse resultado está alinhado com a Fig. 18, que mostra que o trem apresentou um menor tempo de percurso com esse seguidor. No entanto, vale ressaltar que a diferença no tempo de viagem é de apenas 2,2 e 5,6%, quando comparado ao seguidor rampa e erro de Gauss, respectivamente.

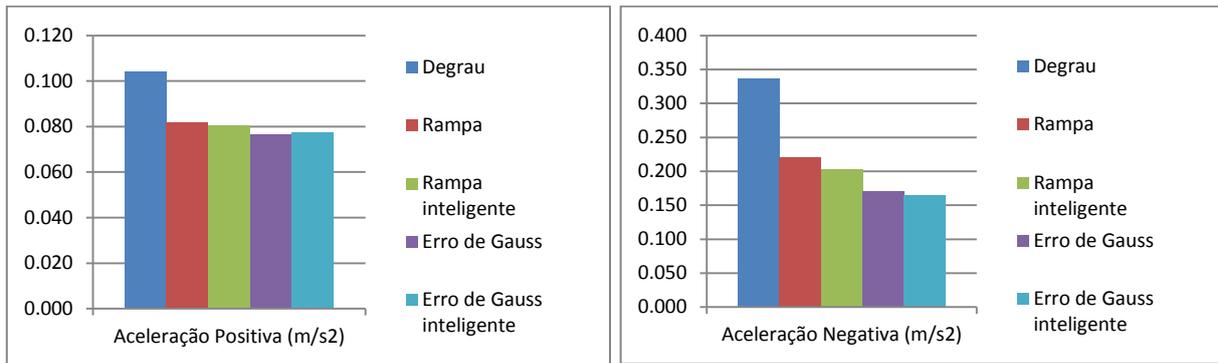


Fig. 19 – Aceleração

Os seguidores rampa e erro de Gauss obtiveram melhor desempenho quando se analisam as acelerações positivas e negativas da Fig. 19, isto é, as mesmas apresentaram valores absolutos bem inferiores ao seguidor degrau. Quando comparamos o seguidor rampa ao erro de Gauss, observa-se que a vantagem do seguidor erro de Gauss é mais relevante em acelerações negativas.

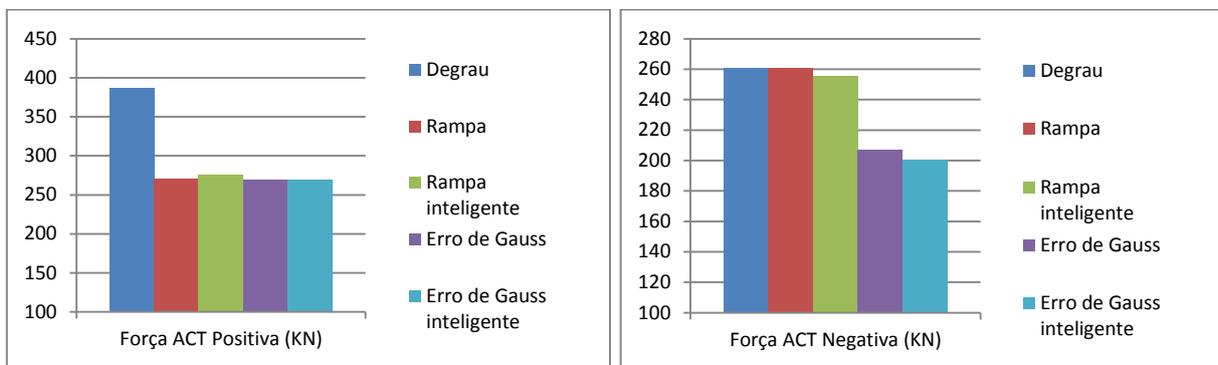


Fig. 20- Força ACT

Os seguidores rampa e erro de Gauss, conforme Fig. 20, desenvolvem forças negativas no ACT (acoplamento comprimido) sensivelmente inferiores quando comparadas ao seguidor degrau. No entanto, para o caso de distensão do acoplamento (forças positivas), somente o seguidor erro de Gauss se destacou com forças bem menores aos outros seguidores.

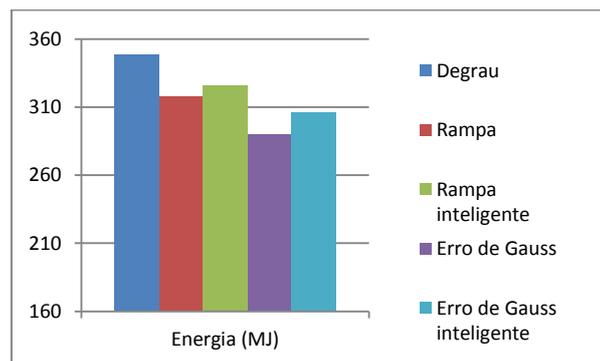


Fig. 21 – Energia

Em relação à energia gasta, os seguidores rampa e erro de Gauss mais uma vez mostraram maior desempenho que o seguidor degrau. Porém entre eles, o seguidor erro de Gauss consumiu menos que o seguidor rampa, ao redor de 7,5%.

8. Conclusão

Os seguidores introduzidos neste trabalho foram capazes de reduzir altas taxas de variação de velocidade, evitando saltos no uso de energia (motor, freio). Além de reconhecer o melhor momento para acelerar ou frear, respeitaram também a aceleração máxima e evitaram ações bruscas no período transitório do movimento do trem, decorrentes das alterações dos limites de velocidade da via.

Conclui-se que a introdução dos seguidores rampa e erro de Gauss atingiu o objetivo de suavizar o movimento do trem. Pode-se concluir ainda que o seguidor erro de Gauss apresentou melhores resultados que o seguidor rampa, ao apresentar menores acelerações, trancos e picos de força. O único aspecto a ser considerado no uso do seguidor erro de Gauss seria em relação à aderência a velocidade e tempo de percurso, que não eram do interesse do controle projetado. O seguidor erro de Gauss, portanto, é o mais indicado para atingir o objetivo desejado, contribuindo para menor custo de manutenção e mais segurança no transporte ferroviário.

Para trabalhos futuros diversas contribuições são possíveis: explorar novos seguidores; aperfeiçoar o controle ótimo ao considerar o erro do regulador; projetar seguidores “online”, onde novas referências são criadas em cada iteração da simulação.

9. Referências

BARBOSA, R. S. Estudo da Dinâmica Longitudinal do Trem, Campinas, 1993.

CHOU, M.; XIA, X. Optimal cruise control of heavy-haul trains equipped with electronically controlled pneumatic brake systems. **Control Engineering Practice**, n. 15, p. 511-519, 2007.

CHOU, M.; XIA, X.; KAYSER, C. Modelling and model validation of heavy-haul trains equipped with electronically controlled pneumatic brake systems. **Control Engineering Practice**, n. 15, p. 501-509, 2007.

FERNANDES, D. D. A. An output feedback motion control system for ROVs. Doctoral theses at NTNU, p. 122, 2015.

TODESCO, J. Otimização do controle da dinâmica longitudinal do trem de carga equipado com um sistema de frenagem eletropneumático (ECP), Sao Paulo, 2010.

ZHUAN, X.; XIA, X. Cruise Control Scheduling of Heavy Haul Trains. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 14, n. 4, 2006.

ZHUAN, X.; XIA, X. Optimal Scheduling and Control of Heavy Haul Trains Equipped With Electronically Controlled Pneumatic Braking Systems. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 15, n. 6, 2007.

Generation of optimized path followers applied to heavy-haul trains

Eduardo Waib

dudawaib@gmail.com

Abstract. This project compares the performance of different operational strategies of a train, based on path followers. Five kinds of path followers were built: step, ramp, optimized ramp, Gauss error and optimized Gauss error. Energy consumption, speed tracking and in-train forces are addressed concerns. A linear quadratic regulator (LQR) optimization process was used to consider those three aspects. The simulation results indicate that the train’s performance can be optimized with the use of new references, and the designed Gauss error input was the best strategy.

Keywords. *Path follower, closed-loop control, heavy-haul train, LQR, optimal control*