

# MODELAGEM E CONTROLE FUZZY DE VELOCIDADE DE TREM DE PASSAGEIROS CONSIDERANDO ESCORREGAMENTO E ADESÃO

FELIPE L. SUZART, DANIEL B. ROSSATO

Faculdade de Tecnologia SENAI “Mariano Ferraz”

Rua Jaguaré Mirim, 71, Vila Leopoldina, São Paulo – SP, CEP 05311-020.

E-mails: felipe.suzart13@hotmail.com, daniel.rossato@sp.senai.br

**Abstract**— This paper proposes the use of a controller based on fuzzy logic applied to the traction and braking systems of passenger trains, for speed control. It is a multivariable process with non-linearities, such as railroad track adhesion to rail, in which the use of controllers based on fuzzy logic is an excellent alternative to the complex current controllers. For this purpose, modeling of train and traction/braking systems were performed, as well as the configuration of the fuzzy-PI controller used in the train speed control, predicting three cases: without slipping, seeking maximum adhesion at the contact between the rotor of the train and rail, and taking into account the speed of slip between railroad and train. The models of the systems that integrate the train and the controllers were simulated in MATLAB / Simulink software.

**Keywords**— fuzzy, adhesion, slipping, velocity, train, traction, braking.

**Resumo**— Este trabalho propõe a utilização de um controlador baseado em lógica fuzzy aplicado ao sistema de tração e frenagem de trens de passageiros, para controle de velocidade. Trata-se de um processo multivariável com não linearidades, como a adesão do rodeiro do trem ao trilho, no qual o uso de controladores baseado em lógica fuzzy se mostra uma excelente alternativa aos complexos controladores atuais. Para isto, foi realizada a modelagem do trem e dos sistemas de tração e frenagem, bem como a configuração do controlador tipo fuzzy-PI utilizado no controle de velocidade do trem prevendo três casos: sem escorregamento, busca da máxima adesão no contato entre o rodeiro do trem e trilho, e considerando a velocidade de escorregamento entre rodeiro e trem. Os modelos dos sistemas que integram o trem e os controladores foram simulados em ambiente MATLAB/Simulink.

**Palavras-chave**— fuzzy, adesão, escorregamento, trem, velocidade, tração, frenagem.

## 1 Introdução

Os sistemas de frenagem e tração são fundamentais para a operação de um trem e exigem técnicas específicas de controle, principalmente para solucionar um grande problema em sistemas de tração e frenagem: o escorregamento entre rodeiros e trilhos. Este problema em sistemas ferroviários é mais crítico do que em automóveis, devido tanto o rodeiro quanto o trilho serem de metal. Os trens de passageiros modernos possuem sistemas de proteção de deslizamento de roda, que previnem o deslizamento durante a frenagem e durante a tração, semelhante a sistemas de travamento antibloqueio (ABS). O controlador de deslizamento combinado com os controladores de frenagem e tração auxilia em um maior conforto aos passageiros e minimiza problemas de desgaste de rodeiros e trilhos (Spiryagin et al., 2016), (Frylmark e Johnsson, 2003).

No momento de frenagem ou de tração, existe uma força que é transmitida entre rodeiros e trilho, denominada de força tangencial. O valor máximo da força aplicada depende de parâmetros, como o coeficiente de adesão  $\mu$  e o peso do trem. O coeficiente de adesão depende de diversos fatores, tais como: condições climáticas, condições da via e velocidade do rodeiro. O escorregamento ocorre no momento em que, ao ser transmitida a força tangencial, ocorre uma contração e expansão nos rodeiros e no trilho, exemplificado na figura 1 (Pichlík e Zdenek, 2014).

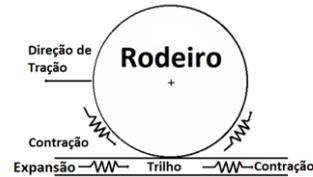


Figura 1. Escorregamento contato rodeiro-trilho.  
Fonte: Frylmark; e Johnsson, 2013.

A força de adesão em termos ferroviários, é definida como a capacidade do sistema de tração ou frenagem de exercer a força máxima de tração sobre o rodeiro e manter o contato com o trilho, sem exceder o escorregamento ideal. Ou seja, a aderência define a quantidade de força que pode ser aplicada ao rodeiro. A força de adesão  $F_{ad}$  pode ser equacionada e é mostrada na equação 1, onde  $\mu$  é o coeficiente de adesão,  $m$  é a massa do trem e  $g$  a gravidade (Pichlík e Zdenek, 2014), (Frylmark e Johnsson, 2003).

$$F_{ad} = \mu mg \quad (1)$$

A curva da função do coeficiente de adesão em função do escorregamento é chamada de característica de adesão-escorregamento. A curva é dividida em regiões: a região estável, onde o coeficiente de adesão apresenta características linear e não linear, e a região instável onde se torna difícil manter o contato rodeiro trilho, conforme mostra a figura 2 (Pichlík e Zdenek, 2014), (Frylmark e Johnsson, 2003).

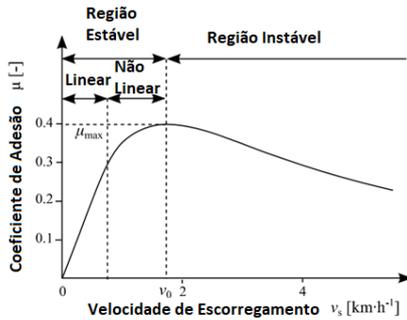


Figura 2. Característica adesão-escorregamento.  
Fonte: Pichlík e Zdenek, 2014.

O coeficiente de adesão utilizado como referência para controle de trens de passageiros deve ser mantido no limite da região estável, a fim de manter o conforto e segurança dos passageiros. Para solucionar este problema, este artigo aborda a utilização de ferramentas de controle não lineares, neste caso a lógica fuzzy. Na segunda seção, é apresentado a arquitetura de dois dos principais controladores utilizados em trens para manter o escorregamento constante e dentro de limites de segurança. Na terceira seção, são apresentados os modelos obtidos para o trem, o rodeiro e os sistemas de tração e frenagem. A quarta seção apresenta o desenvolvimento dos controladores fuzzy utilizados. Por fim, a quinta seção apresenta os resultados obtidos no uso de controladores fuzzy para solução do problema de controle de velocidade, considerando escorregamento e adesão nos trens.

## 2 Tipos de Controladores

Dois métodos para controle de velocidade de trens de passageiros são mostrados a seguir: método baseado no controle de velocidade de escorregamento a um valor constante, e o método baseado na procura do máximo valor da curva adesão-escorregamento (Pichlík e Zdenek, 2014).

### 2.1 Controladores baseado na velocidade de escorregamento a um valor constante

Este método de controle é utilizado principalmente em trens com motores elétricos de corrente contínua. Este controle se baseia no valor máximo de coeficiente de adesão que ocorre quando a velocidade de escorregamento ultrapassa valores entre 2 a 5 km/h (este valor é obtido por meio de ensaio). A desvantagem deste método é a necessidade de determinar a velocidade de cada rodeiro tracionado e do trem. Os rodeiros são facilmente medidos através de encoders e a velocidade longitudinal do trem através de radares. Atingir o valor do coeficiente de adesão próximo ao valor máximo é uma exigência difícil, que pode acarretar em oscilações no esforço de controle de tração do trem. A arquitetura do controlador é apresentada na figura 3 (Pichlík e Zdenek, 2014), (Frylmark e Johnsson, 2003).

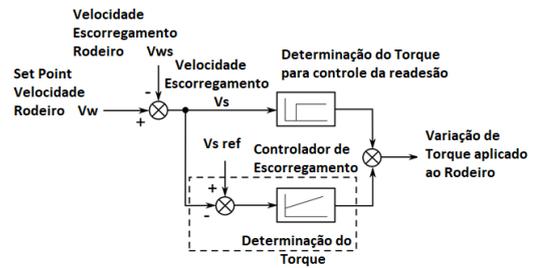


Figura 3. Controlador velocidade de escorregamento constante.  
Fonte: Pichlík e Zdenek, 2014.

### 2.2 Controlador baseado na procura do máximo valor da curva de adesão-escorregamento

A técnica de controle utilizada para determinar o valor máximo da curva de adesão-escorregamento consiste em derivar o coeficiente de adesão de acordo com a velocidade ou aceleração do rodeiro de acordo com a força aplicada ao motor. Quando a variação for positiva, o valor está na área estável, se for negativa o valor está na área instável, e se a variação for zero, o valor está no máximo. A vantagem deste método é não precisar medir a velocidade do trem, e nem o coeficiente de adesão, que deve ser estimado através de equações relacionadas com a aceleração do rodeiro. Apesar desta vantagem, por sempre trabalhar no limiar da curva característica da adesão-escorregamento, trabalha constantemente na região instável, o que acarreta em oscilações ao esforço de tração aplicado aos motores, podendo levar ao aumento de desgastes dos componentes de tração (Pichlík e Zdenek, 2014), (Frylmark e Johnsson, 2003).

Os métodos apresentados, assim como grande parte dos sistemas de controle ferroviário utilizam controladores PID. Porém, na operação de um trem, os sistemas de tração e freio sofrem desgastes e há variação de adesão ao longo do percurso, o que gera instabilidade nos controladores clássicos. O controle baseado em lógica fuzzy procura de forma intuitiva entender como o processo funciona, baseando-se nessas informações para obter o melhor ajuste do sistema. Esta técnica não linear de controle se torna útil em sistemas com acesso a dados limitado (Passino e Yurkovich, 2001), (Frylmark e Johnsson, 2003).

## 3 Modelagem dos Sistemas

O modelo do trem proposto considera a composição inteira de uma unidade como um único corpo, desconsiderando as massas e deslocamentos individuais de cada vagão, que são influenciados pelos engates entre vagões e configuração *Electric Multiple Unit* (EMU) utilizada onde há carros reboques e carros motores que efetuam a tração do trem. São consideradas as seguintes hipóteses para simulação: o esforço aplicado pelos motores é igualmente dividido entre os eixos, o diâmetro dos rodeiros iguais, o conjunto de transmissão possui rendimento ideal, a mas-

sa do trem permanece invariável. O perfil de via utilizado foi baseado em condição ideal: aspectos como rampas, curvas e paradas entre estações não foram considerados.

### 3.1 Modelagem do Trem

O modelo dinâmico de um trem é descrito por sistemas de equações diferenciais, assumindo que não existe movimentação lateral nem vertical durante o percurso do trem na via. O comportamento longitudinal de um trem pode ser descrito como uma função com variáveis de entrada como a aplicação dos freios, topografia da via e características do sistema de tração. A figura 4 ilustra a atuação de forças em um trem, e a equação 2 descreve a atuação destas (Spiryagin et al., 2017), (Pires, 2002).

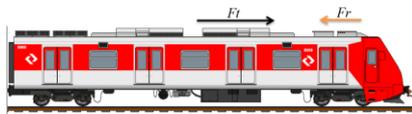


Figura 4. Forças atuantes no trem. Fonte: Stippe, 2016.

$$F_t - F_r = m\zeta a = m\zeta \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

Na equação 2 temos,  $F_t$  força de tração ou frenagem,  $F_r$  força de oposição,  $m$  é a massa do trem,  $a$  aceleração, e a constante  $\zeta$  que surge devido ao efeito de rotação das massas, aumentando a massa do trem devido a inércia dos eixos, rotores e rodeiros. A fim de se aplicar um modelo eficaz para análise dinâmica, será utilizado a equação de Davis, comumente utilizada como força de oposição para trens de passageiros (Spiryagin et al., 2017), (Pires, 2002).

$$F_r(t) = A + Bv(t) + Cv(t)^2 \quad (3)$$

Na equação de Davis (equação 3), o termo  $A$  é independente da velocidade, dependendo somente da massa do trem e do número de rodeiros. O termo  $B$  da equação depende da velocidade, devido a resistências de fricção, número de motores de tração e potência de tração. O termo  $C$  está relacionado à aerodinâmica do trem, utilizando o coeficiente de arrasto, área frontal do trem e comprimento do trem. Com base nestas equações foi obtido o modelo para o trem, conforme figura 5 (Boschetti e Mariscotti, 2012).

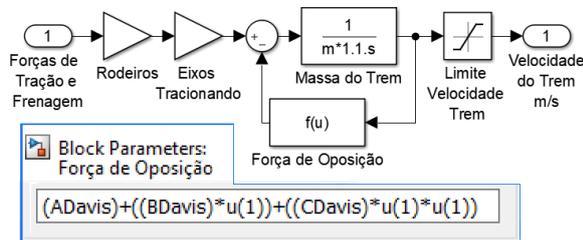


Figura 5. Modelo do trem.

### 3.2 Modelagem do Rodeiro

A figura 6 ilustra o diagrama de forças atuantes sobre o rodeiro do trem, onde  $v$  é a velocidade,  $R_r$  é o raio do rodeiro,  $Q_r$  é o produto da massa sustentada pelo rodeiro pela força da gravidade  $g$ ,  $N$  é a força de reação do trilho devido  $Q_r$ ,  $F_r$  são as forças de oposição,  $F_t$  a força de tração aplicada e  $T_r$  o torque de tração (Spiryagin et al., 2017), (Pires, 2002).

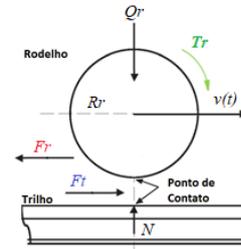


Figura 6. Diagrama de esforços no contato rodeiro-trilho.

Fonte: Spiryagin et al., 2017

A limitação imposta devido ao contato de rodeiro-trilho é chamada de força de adesão,  $F_{ad}$ , mostrada na equação 4 (Lozano et al., 2012), (Pires, 2002).

$$|F_{ad}| \geq |F_t| \quad (4)$$

O módulo na equação 4 deve-se a força  $F_t$  ser tanto para tracionar o trem, quanto para a frenagem. Se a força de tração for maior que a força de adesão, no caso de um processo de tração do trem os rodeiros podem sofrer um efeito de patinação, o mesmo vale para o processo de frenagem, que caso ocorra pode fazer com que os rodeiros deslizem sobre os trilhos, aumentando a distância de frenagem e afetando a segurança do trem. A equação que rege a força de adesão é mostrada na equação 1, onde o coeficiente  $\mu$  é o coeficiente de adesão. A equação 5 apresenta o cálculo do coeficiente de adesão, esta equação é baseada em experimentos realizados em diversas condições de clima e contaminantes nos trilhos (Polach, 2005), (Lozano et al., 2012), (Pires, 2002).

$$\mu(v_s) = \mu_0 \left( (1 - A_\mu) e^{-B_\mu v_s} + A_\mu \right) \quad (5)$$

Os termos  $A_\mu$  e  $B_\mu$  na equação 5, se referem respectivamente a razão do limite de fricção à máxima velocidade de fricção e o coeficiente de decaimento de fricção, o  $v_s$  é a velocidade de escorregamento em m/s, e o coeficiente  $\mu_0$  adesão. Os termos  $A$ ,  $B$  e o coeficiente  $\mu_0$  na equação 5, se alteram de acordo com a condição do contato entre rodeiro e trilho (Polach, 2005), (Spiryagin et al., 2017).

O torque de tração é transferido dos motores de tração para os rodeiros através de engrenagens que compõem o sistema de transmissão. Para a solução de sistemas mecânicos de translação serão utilizadas as equações de movimento, onde o torque do motor de tração  $T_m$  é transferido por um conjunto de engrenagens para o rodeiro do trem, como mostra a figura

7, e o modelo completo na figura 8 (Pires, 2002), (Kaller e Allenbach, 2008).

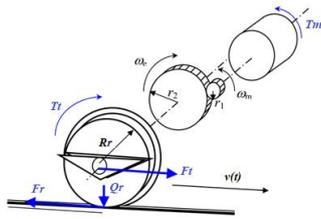


Figura 7. Transmissão do torque do motor de tração para os rodeiros. Fonte: Kaller e Allenbach, 2008.

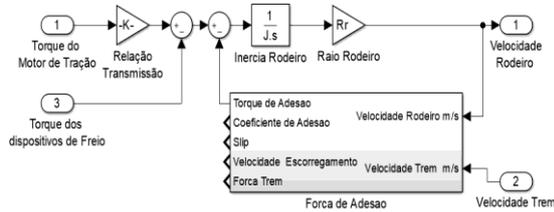


Figura 8. Modelo do rodeiro.

A força de adesão na figura 8 é baseada no modelo de deslizamento longitudinal de Polach. Este modelo não necessita de poderes computacionais grandes e oferece uma abordagem simplificada para análise de trens, conforme mostra as equações 6, 7, 8 e 9 (Ayasse e Chollet, 2006).

$$F_{ad}(\mu(v_s)) = \frac{2Q\mu(v_s)}{\pi} \times \left( \frac{K_a \varepsilon}{1 + (K_a)} + \arctan(K_s \varepsilon) \right) \quad (6)$$

$$\varepsilon(\mu(v_s)) = \frac{G \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot k \cdot C_1}{4 \cdot Q \cdot \mu(v_s)} \quad (7)$$

$$k = \frac{K_a + K_s}{2} \quad (8)$$

$$C_1 = 0,33 \cdot \left( \frac{a}{b} \right)^2 + 0,49 \cdot \left( \frac{a}{b} \right) + 3,49 \quad (9)$$

Onde  $Q$  é a carga por rodeiro,  $K_a$  é o coeficiente de redução de adesão,  $K_s$  é o coeficiente de redução de escorregamento,  $a$  é a área de adesão e  $b$  área de escorregamento,  $G$  é o módulo de cisalhamento e  $C_1$  é o coeficiente de linearidade de Kalker para movimento longitudinal.

O contato rodeiro-trilho está diretamente ligado à força de adesão, modelar este sistema é algo extremamente complexo e imperfeito, as tensões mecânicas envolvidas são altas e a superfície de contato do rodeiro com trilho não apresenta nenhuma linearidade. O rodeiro de um trem pode ser considerado como um cilindro cônico que, ligado por um flange, forma o conjunto de rodeiros do truck do trem conforme mostrado na figura 9 (Spiryagin et al., 2017), (Ayasse e Chollet, 2006).

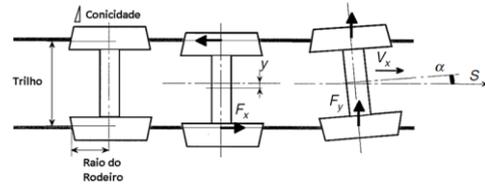


Figura 9. Modelo básico do rodeiro ferroviário. Fonte: Ayasse; Chollet, 2006.

O modelo proposto não prevê os deslocamentos laterais em  $F_y$  e nem o ângulo de deslocamento  $\alpha$ , eliminando assim dois graus de liberdade ao sistema. Serão considerados apenas os deslocamentos longitudinais em  $F_x$ , ocasionados devido aos processos de tração e frenagem do trem. A interação entre rodeiro e trilho ocorre em uma pequena área do rodeiro, conforme mostra a figura 10. Esta superfície sofre os estresses da pressão aplicada das forças de tração e de frenagem. Para determinar esse comportamento, são utilizados diversos métodos de estudos de contato rodeiro trilho, como métodos dos elementos finitos. Um modelo simples, que necessita baixo esforço computacional, é o modelo hertziano clássico para mecânica de contatos (Spiryagin et al., 2017), (Polach, 2005), (Ayasse e Chollet, 2006).

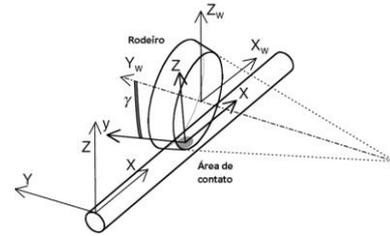


Figura 10. Área de Contato Rodeiro Trilho. Fonte: Ayasse e Chollet, 2006.

### 3.3 Modelagem do Driver de Tração e Freio

Aplicação de frenagem em um trem é um dos processos mais críticos em sua operação, se a força de frenagem aplicada exceder o valor da força de adesão  $F_{ad}$ , os rodeiros do trem podem escorregar, ocasionando uma distância maior de frenagem, danos aos rodeiros e principalmente afetando a segurança do sistema (Spiryagin et al., 2017), (Barna, 2012).

A modelagem de um sistema de freio eletropneumático de um trem pode se tornar muito complexo e consiste de uma série de fatores não lineares. O modelo proposto descreve a relação entre a pressão nos cilindros com a força de frenagem aplicada, a pressão aplicada em uma válvula pode ser mostrada no modelo da figura 11 (Barna, 2012).

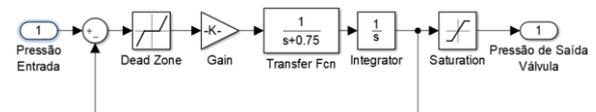


Figura 11. Modelo da válvula de freio.

O modelo do driver do freio não contempla perdas no sistema de ar comprimido, nem desgaste mecânico de pastilhas de freio, e outros efeitos de desgaste mecânico ou não linearidades. O valor de Set point para frenagem foi considerado linear, a força de frenagem exercida é igual em todos os dispositivos de frenagem acoplados aos rodéis do trem. O modelo completo adotado é mostrado na figura 12.

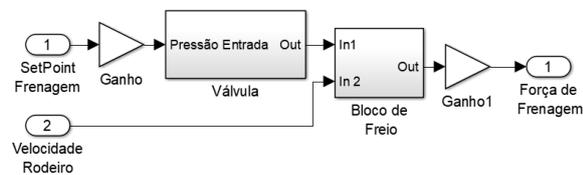


Figura 12. Modelo do dispositivo de frenagem.

A modelagem do sistema de tração é uma tarefa extremamente complexa, visto que o sistema pode ser dividido em aspectos mecânicos, elétricos e elementos de controle, o inversor de tração possui um controlador próprio, tornando a modelagem complexa, a modelagem do motor de tração pode ser feita através de dados fornecidos por fabricante ou medições experimentais. A fim de simplificar o modelo do sistema de tração, podemos assumir o modelo apresentado na figura 13 para o sistema de tração, aproximado para um sistema de primeira ordem (Spiryagin et al., 2017).

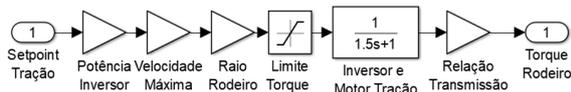


Figura 13. Modelo do driver de tração.

Através dos relatórios de testes de aceitação de fábrica (TAF) e das curvas de tração e torque, foi obtido o valor para o sistema de primeira ordem para o inversor e motor de tração. Os valores de especificação de potência, relação de transmissão e sistema de tração, foram baseados no trem série 8000 CPTM da CAF. O modelo proposto não pode ser utilizado para julgar análises de precisão, pois condições de vias são irregulares, a distribuição dos pesos do trem entre os rodéis não é igual, o torque aplicado aos motores pode não ser distribuído igualmente entre os motores e as forças de componentes laterais e verticais afetam o sistema de tração e freio. Apesar disso, o modelo oferece um ponto de partida para estudos e modelagens de trens (Spiryagin et al., 2017).

#### 4 Desenvolvimento dos Controladores Fuzzy

A estrutura dos controladores fuzzy de velocidade propostos se baseia no tipo baseado em regras. Foi utilizado a ferramenta do Matlab Fuzzy ToolBox para desenvolvimento dos controladores. Optou-se pela máquina de inferência tipo Takagi-Sugeno-Kang (TSK) devido a sua aplicação em sistemas de automação e por suas funções de associação de saída do controlador serem lineares. Foram adotadas funções

de pertinência do tipo gaussiana para permitir uma transição suave entre as duas saídas (tração e frenagem). Os limites impostos de Set Point de Tração e Frenagem foram ajustados entre 0 e 1, os limites referentes ao erro entre -200 e 200, e limites de variação de erro entre -10 e 10.

O controlador adotado foi o controlador fuzzy PI pela sua estabilidade e simplicidade de configuração, nas figuras 14, 15 e 16 são mostradas as configurações dos controladores Fuzzy PI Simples, Fuzzy PI Slip e Fuzzy PI Adesão, respectivamente.

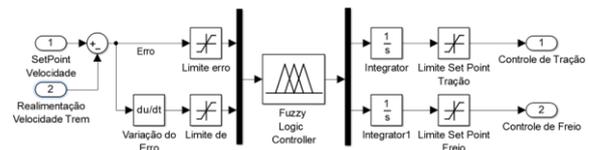


Figura 14. Controlador Fuzzy PI Simples.

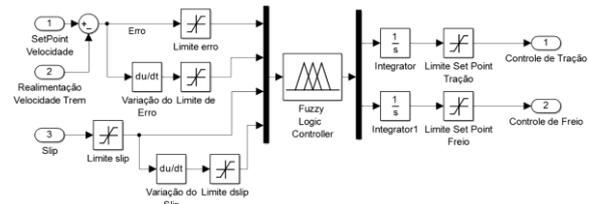


Figura 15. Controlador Fuzzy PI Slip.

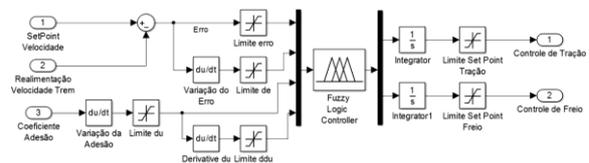


Figura 16. Controlador Fuzzy PI Adesão.

O controlador PI Simples serve como um ponto inicial de estudo de controladores para trens, porém não leva em consideração o fator determinante em sistemas ferroviários, a adesão entre rodelo e trilho para se evitar o escorregamento. As regras do controlador Slip se baseiam em manter o escorregamento o menor possível, evitando efeitos de patinação entre rodelo e trilho, monitorando a diferença entre as velocidades do rodelo e do trem. O controlador fuzzy PI baseado na adesão utiliza a variação máxima da adesão, procurando manter sempre o valor de adesão máximo da curva apresentada na figura 2. Um exemplo da configuração das funções de pertinência é mostrado na figura 17.

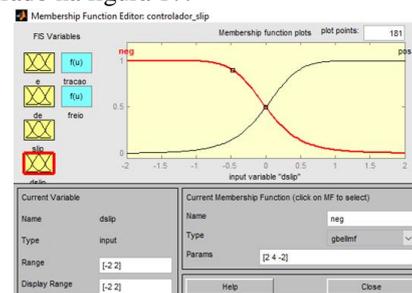


Figura 17. Exemplo de configuração das funções de pertinência.

### 4.1 Controlador PI Simples

Para o controlador fuzzy PI simples foram configuradas as variáveis: “erro” (e) para a entrada 1 e “variação do erro” (de) para a entrada 2. Para o “erro” foram estabelecidos os valores linguísticos “neg” e “pos” com função de pertinência tipo “sino” e range de -80 a 80. Para a “variação do erro” (de) foram estabelecidos também os valores linguísticos “neg” e “pos” e função de pertinência tipo “sino”, mas com range de -5 a 5. Para a saída 1 (tração) foram adotados três constantes: “tp=0,3”; “tz=0”; “tn=-0,3” para inferência do tipo TSK. O sinal de saída do sistema fuzzy, na verdade, é uma variação (devido ao integrador do Fuzzy-PI), sendo as variáveis “tp”, variação positiva; “tz” variação zero e “tn” variação negativa. O mesmo vale para a saída 2 (freio), com as constantes: “fp=0,5”; “fz=0”; “fn=-0,5”. Estes valores foram adotados com base na velocidade do trem imposta pela via e a aplicação de freios. A base de regras implementada é mostrada na figura 18.

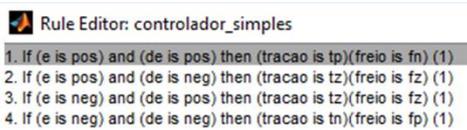


Figura 18. Base de regras do controlador Fuzzy PI Simples.

### 4.2 Controlador PI Slip

Para o controlador fuzzy PI Slip foram configuradas as variáveis: “erro” (e) e “variação do erro” (de) para as entradas 1 e 2. Para o “erro” foram estabelecidos os valores linguísticos “neg” e “pos” com função de pertinência tipo “sino” e range de -60 a 60. Para a “variação do erro” (de) foram estabelecidos também os valores linguísticos “neg” e “pos” e função de pertinência tipo “sino”, com range de -5 a 5. Para o controle de escorregamento foram configuradas as variáveis: “escorregamento” (slip) para entrada 3 e “variação do escorregamento” (dslip) para a entrada 4. Para o “escorregamento” (slip) foram estabelecidos os valores linguísticos “baixo” e “alto” com função de pertinência tipo “sino” e range de 0 a 10. Para a “variação do escorregamento” (dslip) foram estabelecidos os valores linguísticos “neg” e “pos” e função de pertinência tipo “sino”, com range de -2 a 2. Para a saída 1 (tração) foram adotados cinco constantes: “tpp=0,3”; “tp=0,2”; “tz=0”; “tn=-0,2”; “tnn=-0,3” para inferência do tipo TSK, sendo as variáveis “tp” e “tpp”, variação positiva; “tz” variação zero, “tn” e “tnn” variação negativa. O mesmo vale para a saída 2 (freio), com as constantes: “fpp=0,6”; “fp=0,55”; “fz=0”; “fn=-0,55”; “fnn=-0,6”. Estes valores foram adotados com base na velocidade do trem imposta pela via e a aplicação de freios. A base de regras implementada é mostrada na figura 19.



Figura 19. Base de regras do controlador Fuzzy PI Slip.

### 4.3 Controlador PI Adesão

Para o controlador fuzzy PI Adesão foram configuradas as variáveis: “erro” (e) e “variação do erro” (de) para as entradas 1 e 2. Para o “erro” foram estabelecidos os valores linguísticos “neg” e “pos” com função de pertinência tipo “sino” e range de -60 a 60. Para a “variação do erro” (de) foram estabelecidos também os valores linguísticos “neg” e “pos” e função de pertinência tipo “sino”, com range de -5 a 5, semelhantes ao controlador PI Slip. Para o controle de adesão foram configuradas as variáveis: “variação da adesão” (u) para entrada 3 e “derivada da variação da adesão” (ddu) para a entrada 4. Para a “variação da adesão” (du) foram estabelecidos os valores linguísticos “baixo” e “alto” com função de pertinência tipo “sino” e range de -1 a 1. Para a “derivada da variação da adesão” (ddu) foram estabelecidos os valores linguísticos “neg” e “pos” e função de pertinência tipo “sino”, com range de -2 a 2. Para as saídas foram adotadas e configuradas as mesmas constantes do controlador PI Slip. Estes valores foram adotados com base na velocidade do trem imposta pela via e a aplicação de freios. A base de regras implementada é mostrada na figura 20, assim como um exemplo do controlador conectado aos sistemas do trem, exemplificado na figura 21.

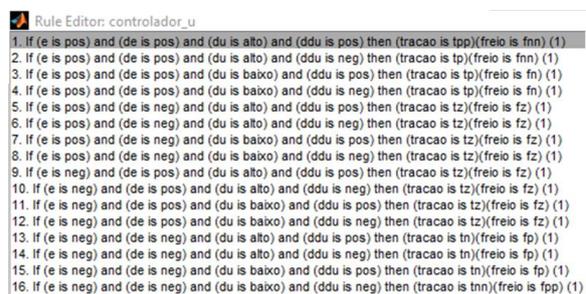


Figura 20. Base de regras do controlador Fuzzy PI Adesão.

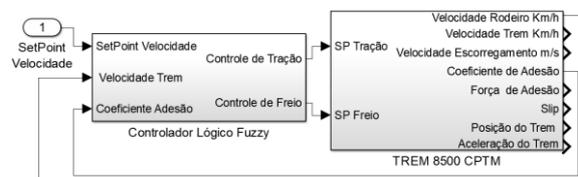


Figura 21. Conexão do controlador ao sistema do trem.

O objetivo em se projetar os controladores Fuzzy PI Slip e PI Adesão é verificar o funcionamento das técnicas de controle de escorregamento, com o intuito

de diminuir o escorregamento e problemas de solavanco (jerks) dos sistemas de tração e frenagem.

## 5 Resultados Obtidos

A fim de obter uma primeira validação do modelo, foi realizado por meio de simulação, o levantamento das curvas de adesão para a condição de trilho seco e molhado. Foi adotado um sinal tipo rampa na velocidade de escorregamento e as curvas obtidas podem ser vistas na figura 22, mostrando semelhança com a figura 2, mostrando as áreas de adesão estáveis e instáveis, o modelo proposto apresenta o escorregamento longitudinal, a teoria linear elástica de Hertz foi utilizada para simplificação do modelo, mostrado na seção 3.2, considerando as superfícies contínuas e as deformações na região de contato desprezíveis.

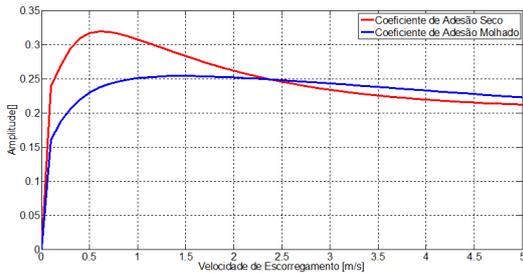


Figura 22. Curva de adesão-escorregamento.

Para comparar o desempenho dos controladores foi aplicado inicialmente um sinal de referência tipo degrau para 150 km/h e, após 200s a referência de velocidade foi diminuída para 40 km/h. foi realizada a simulação tanto em trilho seco quanto em trilho molhado.

A figura 23 mostra as velocidades do trem e do rodeiro com cada controlador, na condição de partida com trilho seco. Os esforços de controle são mostrados nas figuras 24, 25 e 26. Os índices de desempenho são mostrados na tabela 1.

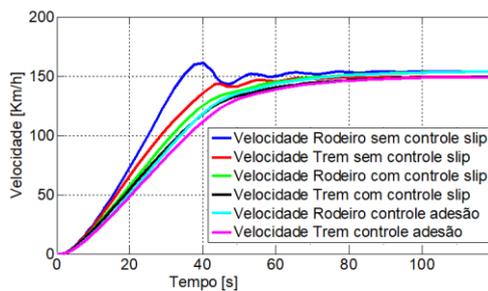


Figura 23. Comparativo de velocidades do rodeiro e trem na partida, com a condição de trilho seco.

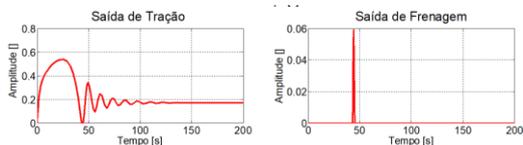


Figura 24. Saída controlador Fuzzy PI Simples.

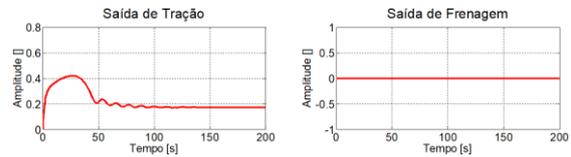


Figura 25. Saída controlador Fuzzy PI Slip.

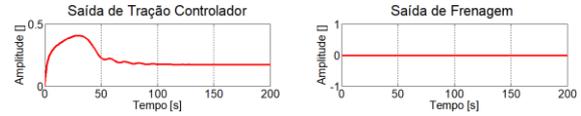


Figura 26. Saída controlador Fuzzy PI Adesão.

Tabela 1. Desempenho dos controladores com redução de velocidade na condição trilho seco.

| CONTROLADOR      | Tempo de Acomodação (s) | Slip Máximo Partida (%) | Slip Máximo Movimento (%) | Erro Estacionário (%) |
|------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Fuzzy PI Simples | 105,8                   | 15,53                   | 0,098                     | 12,65                 |
| Fuzzy PI Slip    | 108,5                   | 3,14                    | 0,1722                    | 5,25                  |
| Fuzzy PI Adesão  | 104,4                   | 3,1                     | 0,1162                    | 4,38                  |

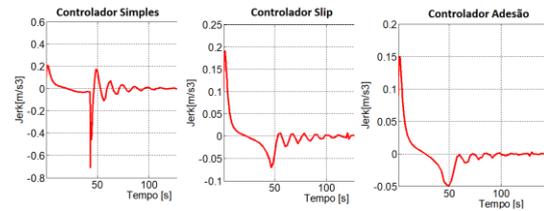


Figura 27. Jerk em cada controlador na condição trilho seco.

O controlador PI Simples, por não possuir o controle de escorregamento, acabou ocasionando, no momento de partida, o acionamento de freio, devido à velocidade do trem e rodeiro aumentarem com o escorregamento. Os controladores slip e adesão conseguiram evitar o escorregamento e acarretaram em ações de controle suaves, como pode ser observado pelo jerk na figura 27, observando que o valor máximo deve ser de  $1\text{m/s}^3$ , para condições de segurança e conforto de passageiros (Spiryagin et al., 2017).

A seguir, temos a comparação entre os controladores para a condição de trilho molhado, na figura 28. Os índices de desempenho são mostrados na tabela 2. E os esforços de controle nas figuras 29, 30 e 31.

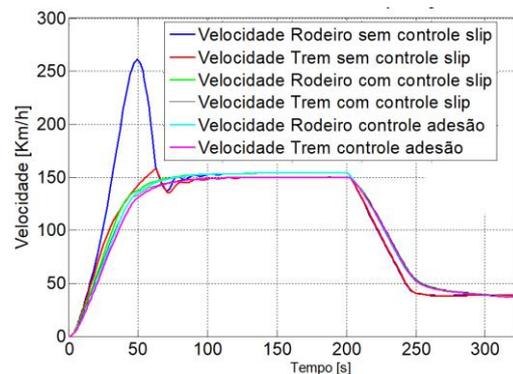


Figura 28. Comparativo de redução de velocidades, com a condição de trilho molhado.

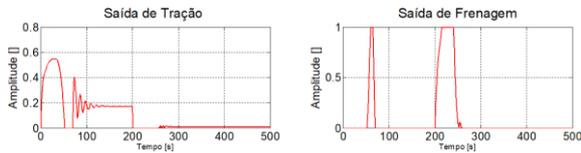


Figura 29. Saída controlador Fuzzy PI Simples com redução de velocidade, com a condição de trilho molhado.

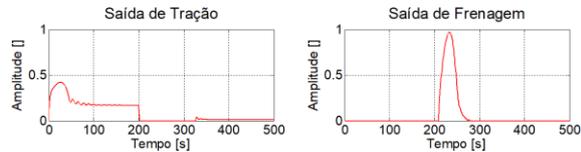


Figura 30. Saída controlador Fuzzy PI Slip com redução de velocidade, com a condição de trilho molhado.

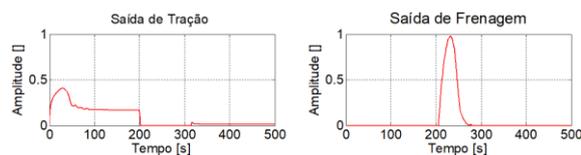


Figura 31. Saída controlador Fuzzy PI Adesão com redução de velocidade, com a condição de trilho molhado.

Tabela 2. Desempenho dos Controladores redução de velocidade condição trilho molhado.

| CONTROLADOR      | Tempo de Acomodação (s) | Slip Máximo Partida (%) | Slip Máximo Movimento (%) | Erro Estacionário (%) |
|------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Fuzzy PI Simples | 105.8                   | 15.53                   | 0,349                     | 0,875                 |
| Fuzzy PI Slip    | 108.5                   | 3,14                    | 0,4                       | 0,65                  |
| Fuzzy PI Adesão  | 104.4                   | 3,1                     | 0,4                       | 1,18                  |

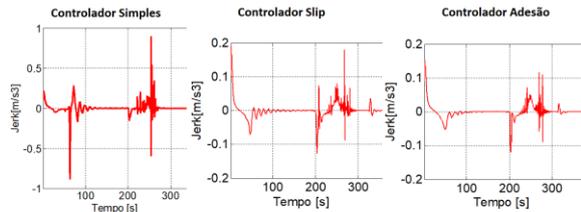


Figura 32. Jerk dos controladores com redução de velocidade, com a condição de trilho molhado.

O controlador PI Simples acabou ocasionando, no momento de frenagem uma saturação na saída do controlador. Os controladores slip e adesão conseguiram evitar o escorregamento e acarretaram em ações de controle suaves, que mesmo em processo de frenagem não ultrapassaram o jerk máximo de  $1\text{m/s}^3$ .

## 6 Conclusão

Analisando os resultados obtidos na simulação, verificou-se que o controlador fuzzy-PI Simples apresentou um sobressinal e oscilações antes de se regular completamente devido ao efeito do escorregamento, já os controladores fuzzy-PI Slip e o baseado em adesão obtiveram uma resposta suave no controle do sistema de tração. As condições simuladas e os coeficientes de adesão utilizados foram baseadas em literatura e aproximados de forma linear para o modelo do trem. A fim de aprimoramento do modelo, podem ser coletados dados de um trem real através

de dispositivos de aquisições de dados para obtenção de parâmetros mais próximos da realidade. Em ferrovias, onde a maioria dos processos é não linear, como a adesão rodeiro trilho, torna-se interessante o uso de controladores fuzzy, com a principal vantagem de se obter um bom desempenho de controle mesmo não se tendo um modelo matemático preciso do processo.

## Referências Bibliográficas

- Ayasse, J. e Chollet, H. (2006). Wheel Rail Contact. In: S. Iwnicki, ed., *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. Boca Raton: CRC.
- Barna, G. (2012). Matlab Simulink Model of a Braked Rail Vehicle and Its Applications. In: *Technology and Engineering Applications of Simulink*. London: IntechOpen.
- Boschetti, G. e Mariscotti, A. (2012). The Parameter of motion mechanical equation as a source of uncertainty for traction systems simulation. In: *20th IMEKO World Congress 2012*. Genova, pp.1-6.
- Frylmark, D. e Johnsson, S., *Automatic Slip Control for Railway Vehicles*, M.S. thesis, Dept. of Elect. Eng., Linkopings Univ., Linkopings, Sweden, 2003.
- Kaller, J.M. e Allenbach, J. M. (2008). *Traction électrique*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Lozano, J.; Félez, J.; Dios Sanz; J. e Mera; J. (2012). Railway Traction. In: *Reliability and Safety in Railway*. London: IntechOpen.
- Passino, K. e Yurkovich, S. (2001). *Fuzzy control*. Beijing: Tsinghua University Press.
- Pires, C. (2002). *Simulação de marcha de composição ferroviária acionada por motores de indução e PWM*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Pichlík, P. e Zdenek, J. (2014). Overview of Slip Control Methods Used in Locomotives. *Transactions on Electrical Engineering*, 3(2), pp.38-43.
- Polach, O. (2005). Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit. *An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear*, 402(403), pp.992-1000.
- Spiryagin, M.; Wolfs, P.; Cole, C.; Spiryagin, V., Sun, Y. e McSweeney, T. (2017). *Design and simulation of heavy haul locomotives and trains*. Boca Raton: CRC.