

Controle por Modo Deslizante de Freios Automotivos ABS

João Gabriel Queiroz de Araújo¹, Marcia Lissandra Machado Prado²

¹Universidade Estadual de Feira de Santana
Feira de Santana – BA – Brasil

²Departamento de Tecnologia – Universidade Estadual de Feira de Santana
Feira de Santana – BA – Brasil

gabrielaraujo18@gmail.com, marcia.lissandra@gmail.com

Abstract. *This paper describes the modeling of a system of automotive brakes with ABS (Anti-lock Braking System) and a Sliding mode controller for controlling the braking process and compare the system response with the response of the vehicle model only with conventional brake in MATLAB with Simulink.*

Resumo. *Este artigo descreve a modelagem de um sistema de freios automotivos com ABS (Anti-lock Braking System) e de um controlador Modo Deslizante para controlar o processo de frenagem e comparar a resposta do sistema com a resposta modelo do veículo apenas com o freio convencional no software MATLAB com o Simulink.*

1. Introdução

A cada dia que passa, o número de acidentes com automóveis nas estradas do Brasil e do mundo aumenta de forma preocupante e, por mais treinado e habilidoso que possa ser o motorista, às vezes é inevitável que ele se envolva em algum acidente. Na maioria das vezes esses acidentes são causados por falha humana, ou pelo fato do motorista não conseguir desviar de um determinado obstáculo em tempo hábil para evitar uma colisão.

Pensando neste segundo problema, foram criados os freios do tipo ABS (*Anti-lock Braking System*) que foram projetados para evitar que as rodas do automóvel travem e que o motorista mantenha o controle do automóvel durante o processo de frenagem, principalmente em situações severas como em pista escorregadia e com freadas bruscas [Lima 2005].

O grande problema dos freios ABS é quanto à sua adaptação a diversos terrenos e condições climáticas. Dependendo de quais sejam as condições da pista ou do terreno em questão, o freio ABS deve se comportar de forma diferente para compensar o maior ou menor atrito que está sendo produzido pelo conjunto pneu-pista. Manter um nível de escorregamento do pneu aceitável nem sempre é possível com as abordagens de controle do freio utilizadas atualmente. Por exemplo, em uma pista seca o coeficiente de atrito é maior do que com a mesma pista molhada ou com gelo. Essas mudanças ocorrem de tal forma que não dá para fazer uma previsão matemática exata do comportamento do veículo em situações diferentes. Sem falar que o próprio sistema de freios ABS é um sistema não-linear, o que torna o projeto de um controlador específico muito mais complexo [Lima 2005].

Uma das abordagens que vem sendo utilizada para resolver este problema é a utilização de controladores em modo deslizante. Esse tipo de controlador, diferentemente dos controladores convencionais, trabalha com sistemas numéricos não-lineares podendo controlar melhor o nível de escorregamento que o sistema pneu-pista possa sofrer. Existem diversas pesquisas realizadas com esses controladores em conjunto com freios ABS e que utilizam formas diferentes para se chegar a um ponto de escorregamento aceitável como os trabalhos feitos por Lin e Hsu (2003), Siqueira (2005), Lima (2005) entre outros.

Este trabalho mostra a implementação do modelo de um veículo de passeio no software MATLAB[®]. Os modelos consideram freios convencionais e freios com ABS e foram utilizados para simular o comportamento do sistema durante o processo de frenagem. Assim, esse trabalho resulta na comparação do resultado da resposta do freio convencional com o modelo do veículo que utiliza um controlador em Modo Deslizante, mostrando a diferença de resultado entre eles. Para o modelo com ABS foi implementado um sistema de controle de malha fechada utilizando Modo Deslizante, enquanto o modelo convencional não faz uso de nenhum tipo de controlador para ajustar o escorregamento do Sistema.

2. Modo Deslizante

O Modo Deslizante é uma lei de controle chaveada em alta velocidade, que ocorre quando o estado do sistema cruza certas superfícies descontínuas no espaço de estados. Essas superfícies são projetadas de forma que a dinâmica dos estados obedeça a um comportamento desejado quando em deslizamento. A estrutura de controle é usualmente não linear e resulta em um sistema com estrutura variável que pode ser considerado como uma combinação de subsistemas, cada um com uma estrutura fixa e que opera em uma região específica do espaço de estados [Utkin 1977].

Considera-se um sistema descrito por equações de estado na qual uma das parcelas da entrada é descontínua através de uma hipersuperfície no espaço de estados. A técnica se baseia no fato de que, se esta lei de controle foi projetada de tal forma que todas as trajetórias que se iniciam dentro da mesma trajetória, permanecerão ali indefinidamente. Neste caso, as trajetórias permaneceram “deslizando” (Figura 1) pela superfície, que é então chamada de superfície de deslizamento (*sliding surface*). Evidentemente, a superfície de deslizamento deve ser definida convenientemente de forma que as trajetórias dentro da mesma se dirijam assintoticamente para os valores desejados (*set-points*). Nesta fase do movimento (dentro da superfície de deslizamento) diz-se que o sistema está em regime (modo) de deslizamento [Lima, 2005].

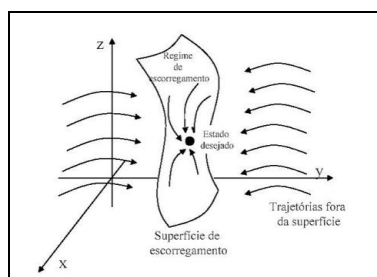


Figura 1: Superfície de deslizamento de um sistema

A superfície de deslizamento ou superfície de chaveamento $s(x) = 0$ é um espaço fechado $(n-m)$ dimensional em R^n , determinado pela intersecção de m superfícies de chaveamento de dimensão $(n-m)$. As superfícies de chaveamento são projetadas tal que o sistema, restrito a superfície $s(x) = 0$, tenha comportamento desejado [Ribeiro, 2006].

A superfície de deslizamento é dada por:

$$\{x(t) | s(x(t)) = 0\} \quad (1)$$

Cada entrada $u_i(t)$ do controle chaveado $u(t) \in R^m$ tem a forma:

$$u_i(t, x) = \begin{cases} u_i^+(t, x) & \text{com } s_i(x(t)) > 0 \\ u_i^-(t, x) & \text{com } s_i(x(t)) < 0 \end{cases}, i = 1, \dots, m \quad (2)$$

onde $\{x(t) | s_i(x(t)) = 0\}$ é a i -ésima superfície de deslizamento associada com a superfície de deslizamento Equação (1) de dimensão $(n-m)$. As superfícies de deslizamento são projetadas tais que a resposta do sistema restrito à $\{x(t) | s(x(t)) = 0\}$ tenha o comportamento desejado [Ribeiro, 2006].

3. Modelo Matemático do Sistema

O equacionamento do funcionamento da dinâmica do veículo com ABS é o resultado da aplicação da lei de Newton às rodas e ao próprio veículo. A dinâmica é determinada pela soma de todas as forças aplicadas ao veículo durante o processo de frenagem. A equação da dinâmica é dada por Lin e Hsu (2003):

$$\dot{V}_v(t) = \frac{-1}{M_v} [4F_t(t) + B_v V_v(t) + F_\theta(\theta)] \quad (3)$$

Na Equação (3) temos $V_v(t)$ que é a velocidade do veículo, M_v é a massa do veículo, B_v é o atrito viscoso do veículo, $F_t(t)$ é a força de tração e $F_\theta(\theta)$ é a força aplicada ao carro resultante de um gradiente vertical da estrada, de modo que esse valor é dado por:

$$F_\theta(\theta) = M_v g \sin \theta \quad (4)$$

onde θ é a inclinação da estrada e g é a aceleração da gravidade. A força de tração $F_t(t)$ é dada por:

$$F_t(t) = \mu(\lambda) N_v(\theta) \quad (5)$$

Na Equação (5), $N_v(\theta)$ equivale a:

$$N_v(\theta) = \frac{M_v g}{4} \cos \theta \quad (6)$$

onde $N_v(\theta)$ é a força nominal de reação entre a roda e a estrada, $\mu(\lambda)$ é o coeficiente de atrito e λ é o escorregamento da roda. Para esse modelo assume-se que o peso do veículo está igualmente distribuído entre as 4 rodas e todo o chassi [Lin e Hsu 2003].

A função $\mu(\lambda)$ foi obtida de forma empírica, baseado na Equação (7), encontrada em Lima (2005), em outras aplicações realizadas com ABS, e no próprio MATLAB[®], obtendo o coeficiente de atrito para terreno seco, terreno molhado e terreno com gelo, todos no asfalto comum. A Figura 2 mostra estes coeficientes.

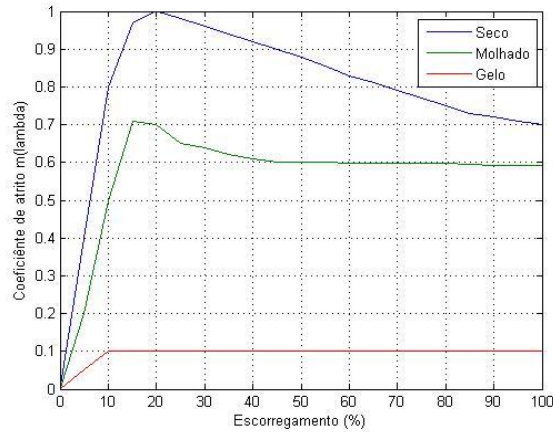


Figura 2: Coeficientes de atrito utilizados para a simulação.

$$\mu(\lambda) = \frac{2\mu_p \lambda_p \lambda}{\lambda_p^2 + \lambda} \quad (7)$$

Onde μ_p e λ_p são valores de pico do sistema.

Utilizando as leis da física para achar a velocidade angular do veículo, foi dividida a velocidade do veículo $V_v(t)$ pelo raio R_w da roda, então temos [Lin e Hsu 2003]:

$$w_w(t) = \frac{V_v(t)}{R_w}. \quad (8)$$

Para achar a dinâmica da roda, os torques que são aplicados às rodas no momento da frenagem são somados, tendo então:

$$\dot{w}_w(t) = \frac{1}{J_w} [-T_b(t) - B_w w_w(t) + T_t(t)], \quad (9)$$

em que $w_w(t)$ é a velocidade angular da roda, J_w é a inércia de rotação da roda, $T_b(t)$ é o torque de freio e $T_t(t)$ é o torque gerado dependendo do escorregamento entre a roda e a estrada que em geral é uma função da força de tração $F_t(t)$ [Lin e Hsu 2003]:

$$T_t(t) = R_w F_t(t). \quad (10)$$

O objetivo do controle de ABS é regular o escorregamento da roda e de maximizar o coeficiente de atrito entre a roda e a estrada para qualquer dada superfície de estrada. Em geral, o coeficiente de atrito (μ) durante a operação de frenagem pode ser descrito como uma função do escorregamento (λ), a qual é definida como:

$$\lambda(t) = \frac{w_v(t) - w_w(t)}{w_v(t)}. \quad (11)$$

Durante a frenagem, o escorregamento da roda é definido de acordo com a Equação (11). Então, derivando-a no tempo, tem-se:

$$\dot{\lambda} = \frac{(1 - \lambda)\dot{w}_v - \dot{w}_w}{w_v} \quad (12)$$

Substituindo as equações (3), (8) e (9) na Equação (12) é obtida a equação:

$$\dot{\lambda} = F_p(\lambda, t) + G_p u(t) \quad (13)$$

onde:

$$F_p(\lambda, t) = \left(\frac{4F_t + B_v R_w w_v + F_\theta}{M_v R_w w_v} \right) \lambda + \frac{4F_t + B_v R_w w_v + F_\theta}{M_v R_w} - \frac{(-B_w w_w + T_t)}{J_w w_v}, \quad (14)$$

é uma função não linear dinâmica; $G_p = 1/J_w$ é o ganho de controle com uma constante positiva e $u(t) = T_b(t)/w_v$ é o esforço de controle [Lin e Hsu 2003].

4. Modelo do Controlador em Modo Deslizante

O objetivo do controle é encontrar uma lei de controle de modo que o escorregamento possa alcançar um valor desejado $\lambda_d(t)$. Lin e Hsu (2003) definiram o erro associado ao escorregamento como:

$$\lambda_e(t) = \lambda_d(t) - \lambda(t) \quad (15)$$

onde $\lambda(t)$ é a saída e $\lambda_d(t)$ é o valor de referência que é especificado pelo comando da entrada $\lambda_c(t)$ seguido por um modelo de referência, que é o modelo a ser seguido para que o sistema obtenha estabilidade.

Segundo Lin e Hsu (2003), a primeira etapa do projeto do controlador em Modo Deslizante é selecionar uma superfície de deslizamento que modela o desempenho de malha fechada desejado no espaço variável de estado. Em seguida, criar o controle de tal forma que as trajetórias de estado do sistema são forçadas a irem em direção à superfície de deslizamento e permanecer nele. Assim, define-se uma superfície de deslizamento para o controlador em Modo Deslizante para o ABS como:

$$s(t) = \lambda_e(t) + k_1 \int_0^t \lambda_e(\tau) d\tau, \quad (16)$$

em que k_1 é uma constante positiva. Unsal e Kachroo (1999) definiram a lei de controle em modo deslizante como:

$$u_{sm}(t) = u_{eq}(t) + u_{ht}(t). \quad (17)$$

Onde $u_{eq}(t)$ é um sinal de controle equivalente, dado por:

$$u_{eq}(t) = G_n^{-1}[-F_n(\lambda, t) + \dot{\lambda}_d(t) + k_1 \lambda_s(t)] \quad (18)$$

e o sinal de controle de acertos $u_{ht}(t)$ é projetado para dissipar as incertezas de forma que:

$$u_{ht}(t) = G_n^{-1}[W \cdot \text{sgn}(s(t))] \quad (19)$$

em que $\text{sgn}(\cdot)$ é uma função sinal e W é uma constante.

5. Resultados Obtidos

Os resultados deste artigo foram obtidos na simulação das equações anteriormente citadas no software MATLAB® com o Simulink. Para se alcançar os resultados abaixo foram utilizados os valores que constam na Tabela 1.

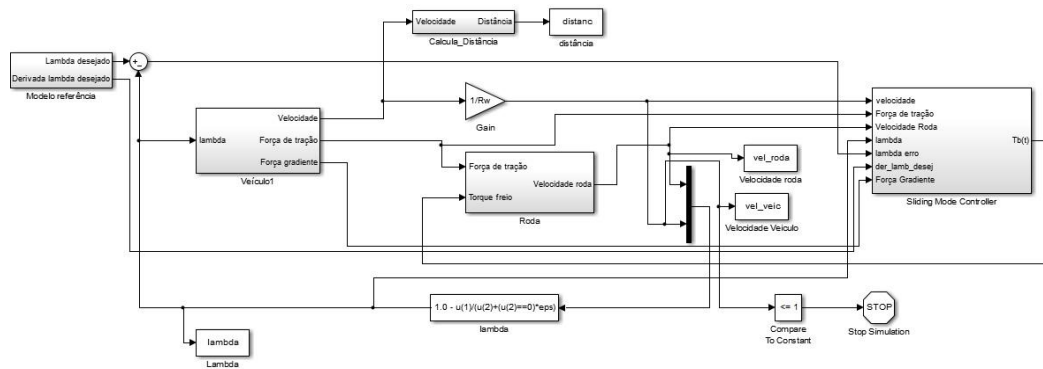


Figura 3: Sistema implementado no Simulink

Tabela 1: Valores utilizados na simulação do sistema.

Variável	Valor
M_v	1.368kg
g	9,81m/s ²
V_o	80km/h
B_v	6
J_w	1,13
$T_b(\text{máximo})$	1200N
W	25
k_l	100
R_w	0,33m
$\lambda(\text{desejado})$	0,2
B_w	4
Θ	0

A Figura 3 mostra como ficou o modelo do veículo no Simulink, onde os blocos que estão contidos nele são o Modelo de Referência que serve para que o sistema tenha um parâmetro para se estabilizar, veículo1 é responsável por gerar a velocidade do veículo, roda é responsável por gerar a velocidade da roda, o Sliding Mode Controller é onde está implementado todo o modelo do controlador em Modo Deslizante e o lambda é a implementação no Simulink da Equação 11. A Figura 4(a) mostra o comportamento do torque quando está em terreno seco. O torque é a resposta que o controlador envia para o subsistema da roda para que possa ocorrer a redução da velocidade. No sistema sem controlador, o valor do torque é colocado direto no subsistema da roda como 1200Nm, que é o valor máximo que o torque pode atingir.

É possível notar pela Figura 4(a) que no sistema com controlador não é necessário que o torque do sistema alcance o seu valor máximo. O tempo de parada também é menor no sistema com controlador em Modo Deslizante, o que pode ser visto na Figura 4(a).

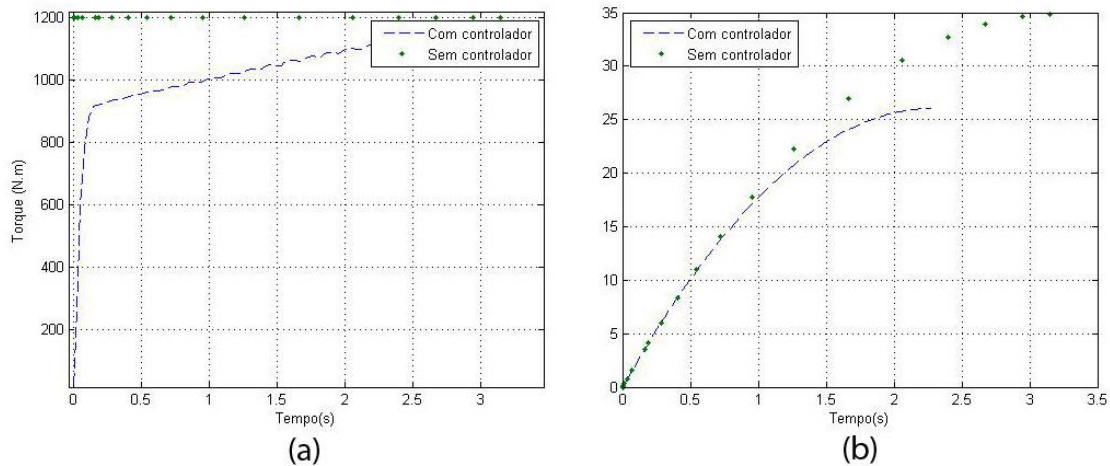


Figura 4: Valor do torque para terreno seco (a) e distância percorrida (b).

A Figura 4(b) mostra a distância de parada do veículo com o tempo. Neste gráfico é possível comprovar a melhor eficácia do controlador em Modo Deslizante com relação à distância também.

A Figura 5(a) mostra o comportamento do escorregamento do sistema para terreno seco. Com o controlador em Modo Deslizante é possível alcançar o valor desejado do escorregamento da roda, fazendo com que a mesma reduza cerca de 20% do seu escorregamento durante o processo de frenagem, enquanto no sistema sem controlador o valor do escorregamento chega imediatamente a 1, acusando o travamento total da roda durante o processo de frenagem. O gráfico da Figura 5(b) mostra o comportamento da velocidade do sistema. A velocidade inicial do sistema é de 80km/h para essa simulação, entretanto, para que o sistema calcule de forma correta esse valor é convertido para radianos por segundo.

A Figura 5(b) mostra as velocidades do veículo e da roda para terreno seco. É possível notar que para o modelo sem controlador a velocidade da roda chega a zero bem antes da velocidade do veículo parar, acusando o travamento, enquanto no modelo

com controlador, a velocidade da roda se mantém reduzindo conforme a velocidade do veículo reduz.

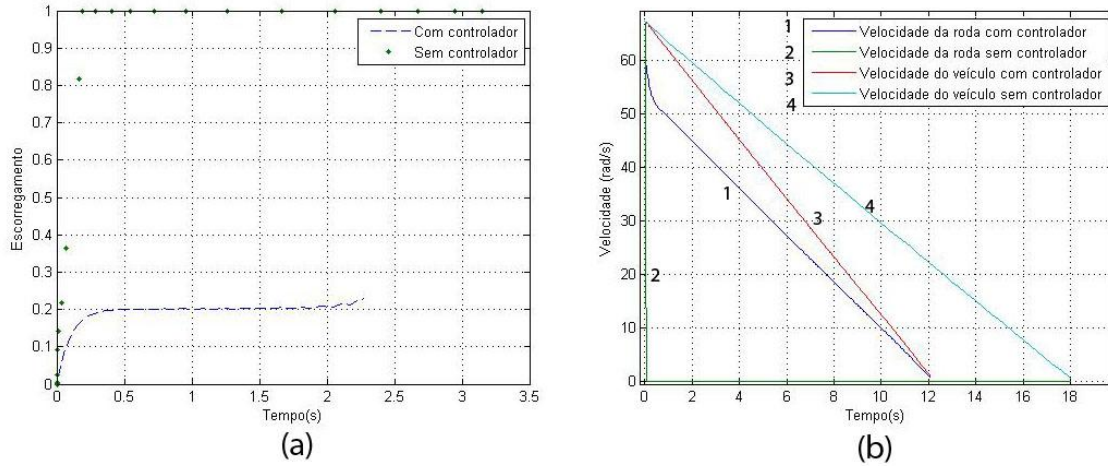


Figura 5: Escorregamento em terreno seco (a) e redução de velocidade (b).

A simulação em terreno molhado foi feita da mesma forma que a simulação em terreno seco, apenas o que mudou foi a função $\mu(\lambda)$, que foi adequada para responder como o atrito pneu-pista de uma pista de asfalto molhado. A Figura 6(a) mostra o comportamento do torque do sistema em uma frenagem com uma velocidade inicial de 80km/h. É possível notar que nestas condições a resposta do torque do sistema em controle deslizante é menor que a resposta em terreno seco devido ao menor atrito, consequentemente é obtida uma distância de parada maior para as mesmas condições iniciais anteriores.

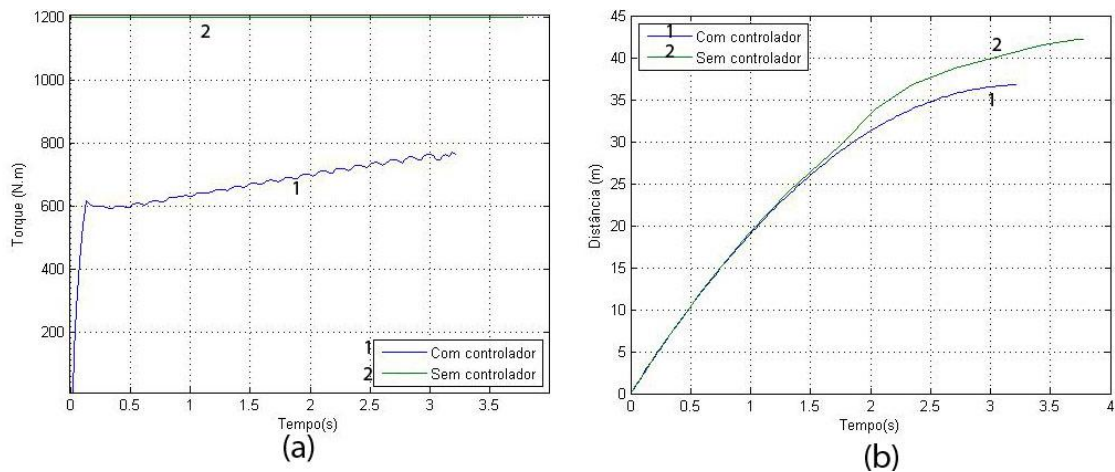


Figura 6: Torque do sistema com terreno molhado (a) e distância percorrida (b).

A Figura 6(b) mostra a distância de parada do sistema com o controlador em Modo Deslizante e sem controlador. Pode-se notar que a diferença da distância de parada do sistema com controlador e sem controlador é menor que na simulação para terreno seco, entretanto o sistema com ABS e controle em Modo Deslizante mostra um desempenho melhor que o sistema sem controlador.

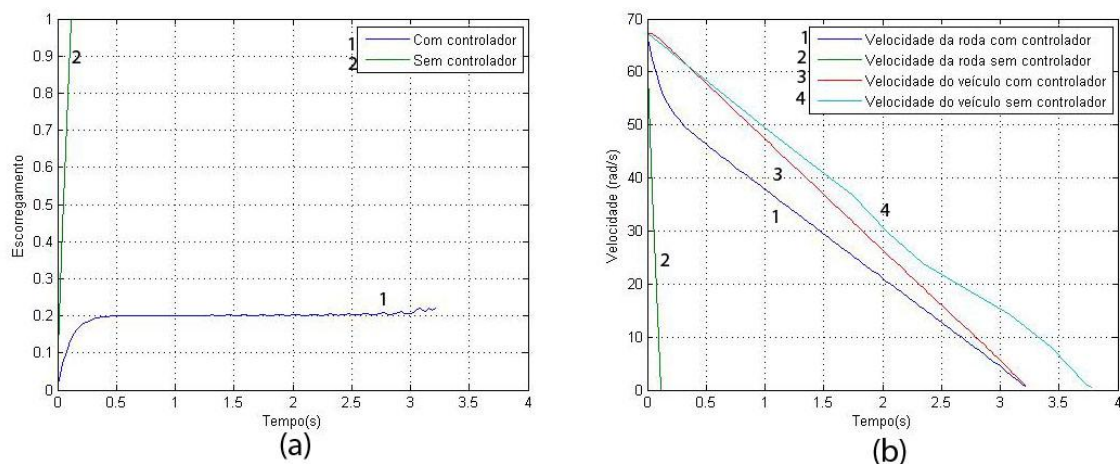


Figura 7: Distância de parada em terreno molhado (a) e redução de velocidade (b).

Como consequência do torque do sistema, foi obtido o escorregamento para terreno molhado, que também se manteve de acordo com o valor desejado de 20% de diminuição do escorregamento da roda como visto na Figura 7(a).

Com isso, a Figura 7(b) mostra a redução de velocidade da roda e do veículo para as duas situações, com e sem controlador.

6. Conclusão

Com este trabalho foi possível verificar o comportamento de um controlador em Modo Deslizante em um freio automotivo com ABS e fazer o comparativo com um freio convencional. É possível observar a diferença de comportamento do veículo com o atrito modificado para simular uma superfície de asfalto seco para outra com asfalto molhado e compará-los com o comportamento de um veículo sem o dispositivo de ABS, mostrando a melhoria causada pelo controlador em determinados casos.

O estudo e entendimento dos controladores não lineares, em especial, o controle em Modo Deslizante, abre um leque maior de possibilidades de pesquisa na área de automação e controle, onde é possível abordar novas estratégias com controladores robustos que podem diminuir os problemas que são causados pelas não linearidades pesadas em determinados tipos de planta. Tais não linearidades podem deixar um projeto realizado com controladores lineares (mais comuns na indústria) muito mais complexos, o que pode justificar o uso de controladores não lineares, que geralmente são tão confiáveis quanto os controladores lineares.

Como trabalhos futuros espera-se realizar uma pesquisa para melhorar o desempenho desse tipo de controlador, buscando mesclar estratégias que já existem na literatura com estratégias novas, abordando outros modelos e inteligência artificial para no futuro aumentar a confiabilidade e segurança de freios automotivos com ABS.

Referências

Lima, J. D. J. B. (2005) Sistema Antibloqueio (ABS) para Freios Eletromecânicos Utilizando Controle por Modo Deslizante. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 124.

- Lin, C. e Hsu, C. F. (2003) Self-Learning Fuzzy Sliding-Mode Control for Antilock Braking Systems. IEEE Transactions on Control Systems Technology, p. 273-278.
- Ribeiro, J. M. D. S. (2006) Controle Discreto com Modos Deslizantes em Sistemas Incertos com Atraso no Sinal de Controle. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, p. 126.
- Siqueira, T. C. P. A. (2005) Sistemas de Controle Automotivo. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 79.
- Unsal, C. e Kachroo, P. (1999) Sliding Mode Measurement Feedback Control for Antilock Braking Systems. IEEE Transactions on Control Systems Technology.
- Utkin, V. I. (1977) Variable Structures Systems with Sliding Modes. IEEE Transactions on Automatic Control, p. 212-222.