

Implementação de Frenagem ABS no Controlador de Veículo Autônomo

Fernando Teixeira de Freitas da Costa Nunes
Universidade de Brasília
Brasília, DF
Email: ftnunes@hotmail.com

Resumo—Uma das principais dificuldades no desenvolvimento de sistemas ABS é a verificação de seu desempenho. A Competição de Corrida Carros Simulada é uma oportunidade de se testar mecanismos de controle em para o desenvolvimento de carros autônomos em ambiente de simulação. Nesse trabalho são implementados três sistemas ABS em um controlador previamente desenvolvido para a competição, visando verificar se há algum impacto no desempenho desse controlador no ambiente de simulação. Os experimentos foram realizados seguindo métricas de performance utilizadas na própria competição e indicaram que a implementação de sistemas ABS no controlador tiveram impacto positivo em seu desempenho.

I. INTRODUÇÃO

A criação de carros autônomos, ou seja, veículos que possam ser conduzidos sem a necessidade de um motorista humano é tratada em diversos trabalhos produzidos nas últimas décadas, principalmente devido ao aumento do tempo gasto com o deslocamento urbano e a busca por uma melhor eficiência na condução do veículo [3]. Todavia, o desenvolvimento de mecanismos para o controle desses veículos autônomos apresenta diversos desafios relacionados ao planejamento de rotas, percepção dos arredores, além do controle do veículo [8].

Nesse contexto, mecanismos de controle para frenagem são necessários para que o pilotos autônomos desempenhem sua função de maneira apropriada, ou seja, melhorando a estabilidade do veículo e diminuindo as distâncias necessárias durante um freio abrupto, dessa forma, evitando acidentes mais sérios [1]. Desse modo, sistemas ABS (*Anti-lock Braking System*) se apresentam como uma ferramenta essencial para que, eventualmente, esses pilotos sejam capazes de lidar com a frenagem apropriadamente [11].

Sistemas ABS atualmente são considerados como mecanismos essenciais para melhorar o controle sobre veículo em condições de frenagem intensa [5]. Isso se deve ao fato de que, de forma simplificada, os sistemas ABS tem a função de impedir o completo travamento das rodas durante uma frenagem abrupta, evitando que o carro derrape sobre a pista [1].

No desenvolvimento de sistemas ABS, diversos desafios surgem principalmente relacionados a avaliação de resultados experimentais [5], incertezas nos sensores envolvidos no sistema [10] e a alta complexidade envolvida nos modelos físicos, resultante das relações não-lineares entre as variáveis [6].

O TORCS (*The Open Racing Car Simulator*) é um simulador considerado como o estado da arte, sendo utilizado na Competição de Corrida de Carros Simulada, campeonato que compara o desempenho de diversos controladores autônomos em um ambiente de simulação [7]. Para esta pesquisa, diferentes sistemas ABS são implementados em um controlador baseado em uma máquina de estados finitos desenvolvido anteriormente para essa competição, visando avaliar o impacto de um mecanismo de frenagem mais complexo em um contexto onde há diversas situações de freio intenso, característica de uma corrida.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Diversos trabalhos anteriores foram realizados em temas relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa. Esses trabalhos estão relacionados à Competição de Corrida de Carros Simulada, ao desenvolvimento de controladores para essa competição e ao desenvolvimento de controladores ABS.

A. Campeonato de Corrida de Carros Simulada

Em anos anteriores a 2009, diversas competições envolvendo controladores para jogos de corrida foram conduzidas. Esses controladores eram desenvolvidos por pesquisadores como uma forma de testar mecanismos de controle para a criação de pilotos para carros autônomos [7]. Como resultado dessas primeiras experiências surge o primeiro Campeonato de corrida de carros simulada (*Simulated car racing championship*), com o objetivo de reunir formatos de disputa e simulação adotados em competições bem sucedidas para propor uma competição que servisse de referência para a criação dos controladores [7].

O simulador TORCS (*The Open Racing Car Simulator*) foi utilizado na competição principalmente por oferecer um ambiente de simulação avançado e customizável, sendo considerado o estado da arte em jogos de simulação de carros [2]. Isso se deve ao fato desse simulador apresentar características como [7]:

- Visualização das corridas por meio de um motor gráfico.
- Física complexa capaz de lidar com diversos elementos presentes numa corrida como tração nas rodas, aerodinâmica e colisão entre os carros.
- Uma grande quantidade de pistas e carros, proporcionando variedade durante a simulação.

Além disso, o simulador foi desenvolvido com a possibilidade de que pilotos (também chamados de robôs) fossem desenvolvidos em módulos separados e adicionados posteriormente. Esses robôs têm que lidar com dados fornecidos pela simulação para a tomada de decisões, controlando valores que determinam ações do veículo como aceleração, freio e controle da direção [13]. Vale ressaltar que esses robôs possuem acesso a todo o contexto presente da simulação, ou seja, são capazes de saber a qualquer momento informações sobre a pista como um todo e a posição de quaisquer outros corredores [7]. Desse modo, os pilotos possuem dados que não estariam disponíveis em um contexto de um piloto autônomo real [7].

Para a competição, o TORCS é alterado para se tornar uma aplicação cliente-servidor [2]. Os controladores (antes chamados de robôs) passam a ser clientes que recebem e transmitem informações para o jogo, que desempenha a função de servidor. São enviadas pelo cliente informações quanto às ações possíveis no carro como aceleração, freio e troca de marcha [7]. Os dados recebidos pelo cliente estão relacionadas ao contexto da simulação, que são organizados como sensores que medem grandezas como a velocidade do carro e a distância do carro para as bordas da pista, oponentes e para o início da pista [13]. Nesse sentido nota-se que os controladores para a competição têm certa limitação ao acesso às informações da simulação da corrida, mais próximo do que estaria disponível para um piloto autônomo implementado na realidade [2].

Dessa forma, a frenagem no controlador para a competição é apenas um entre outros parâmetros necessários para o controle do carro [7]. O parâmetro para o freio pode assumir valores entre 0 e 1, onde 1 representa o estado em que há a maior força aplicada aos pedais de freio e 0 representa o estado em que não há força aplicada pelo sistema de frenagem ao veículo [2].

Algumas características presentes no simulador da competição são relevantes para o contexto desse trabalho, dado que incentivam a utilização de mecanismos elaborados para o controle da frenagem.

A física do TORCS é complexa o suficiente para diferenciar as pistas disponibilizadas pelo simulador em uma série de características [7]. Entre esses aspectos destaca-se que cada pista tem um tipo de piso associado, influenciando a performance da frenagem em relação a estabilidade do veículo e a distância percorrida durante o freio [2]. As pistas disponibilizadas pelo TORCS podem então ser divididas em dois tipos principais: pistas de terra e pistas de asfalto [7].

Além disso, a física de colisões presente no simulador incrementa o dano sofrido pelo veículo a cada colisão de acordo com a sua gravidade, essas colisões podem ocorrer tanto entre o carro e seus oponentes quanto entre o carro e as paredes que cercam a pista [7]. Quando o carro sofre uma determinada quantidade de dano, ele é removido da corrida. Desse modo, é desejável, principalmente para corridas mais longas, que o dano sofrido pelo carro seja o mínimo possível [2].

B. Sistemas ABS

Os controladores ABS têm como principal objetivo manter o deslizamento das rodas em um deslizamento ótimo, no qual o torque de frenagem é o máximo, assim, obtendo um ganho na performance da frenagem do veículo [12]. Um deslizamento excessivo nas rodas do veículo gera efeitos indesejáveis para a condução do mesmo:

- Aumento da distância de frenagem, pois a força atuante no freio passa a ser somente o atrito das rodas com o piso
- Estabilidade do veículo fica comprometida, dado que o travamento pode ocorrer em apenas algumas rodas, fato que pode causar sérios acidentes.
- A capacidade do motorista alterar a direção do veículo é reduzida substancialmente, não sendo possível alterar a trajetória do automóvel para se evitar acidentes.

Os freios ABS são responsáveis por atenuar os efeitos citados, sendo possível então notar a sua importância na segurança durante a condução de um veículo [4]

Diversos métodos de controle já foram utilizados para se desenvolver controladores ABS. Em [4], um controlador Proporcional Integral Derivativo é utilizado para o manter o deslizamento das rodas próximo a um determinado deslizamento de referência, levando a um controlador simples de se implementar e de fácil otimização, sendo contudo, menos eficiente quando ruído é introduzido no sistema e as condições da pista são variáveis.

Devido às características não-lineares do modelo físico utilizado para o desenvolvimento de sistemas ABS, um controlador não-linear é desejável, ao contrário do que é proposto pelo controlador PID. Nesse sentido, foi desenvolvido em [5] um controlador PID não-linear para ser testado em um ambiente de simulação com caminhões. Esse controlador apresenta as vantagens de ser menos suscetível às incertezas presentes no sistema, além de ser facilmente otimizável.

Outro controlador que busca uma melhor eficiência em lidar com as incertezas presentes nos sistemas ABS é apresentado em [10]. Esse controlador utiliza um método de controle baseado em lógica difusa para o controle do deslizamento das rodas, desse modo, o controlador se mostra capaz de variar rapidamente para um deslizamento de referência mais adequado de acordo com as regras estabelecidas para o controlador. Desse modo, é possível obter um baixo tempo de resposta para variações nas condições da pista.

Um método diferente é aplicado em [6]. A teoria de *Grey Systems* é aplicada a um *Sliding-Mode controller* (SMC). Dessa forma, os valores futuros para o deslizamento das rodas é estimado utilizando os deslizamentos obtidos no passado. Esse método de controle apresentou um pequeno tempo de resposta para alterações nos valores dos deslizamentos de referência estipulados para o controlador.

As implementações de sistemas ABS apresentadas tiveram seus desempenhos analisados principalmente em ambientes de simulação diferentes, sob condições diferentes. Nesse sentido, pode-se notar que o Campeonato de Corrida de Carros Simu-

lada se apresenta como uma oportunidade de comparação entre diversos métodos de controle ABS, dado que os sistemas ABS seriam comparados em um mesmo ambiente de simulação e sob as mesmas condições.

III. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desse trabalho, foram implementados sistemas ABS em um controlador para a Competição de Corrida de Carros Simulada.

A. FSMDriver

O controlador utilizado como base para as implementações de ABS é chamado de FSMDriver (*Finite State Machine Driver*) [9]. Esse controlador elaborado para a competição de corrida de carros simulada (SCR) baseia-se na intuição de que o processo de condução de um veículo pode ser dividido em diversos comportamentos, levando a uma implementação de controlador utilizando uma máquina de estados finitos [9].

A máquina de estados finitos implementada para esse controlador possui três estados que correspondem a três comportamentos básicos para o carro durante a corrida:

- *Inside Track*: Esse estado é responsável pelo comportamento do carro quando ele se encontra ao longo da pista.
- *Out of Track*: Esse estado controla o carro quando o mesmo se encontra fora da pista, sem apresentar dificuldade na locomoção.
- *Stuck*: Estado responsável por controlar o carro caso ele não seja capaz de se mover adiante.

O método de transição entre esses estados é responsável por escolher o estado mais apropriado para o controlador dado as informações recebidas sobre a simulação no momento presente. Os estados *Out of Track* e *Stuck*, por serem estados em que se deseja passar o mínimo de tempo possível, são chamados de estados de exceção.

O *design* utilizado pelo controlador FSMDriver é interessante por permitir a evolução independente de cada estado, sendo possível uma evolução gradativa do controlador ao se adicionar novos mecanismos às funções realizadas pelos estados. Essas características fazem com que a implementação de sistemas ABS no controlador possa ser realizada de forma mais simples, sem a necessidade de alteração em partes do código que gerenciam outros comandos ao carro que não sejam a frenagem.

Com o objetivo de testar se um mecanismo de controle ABS têm impacto no desempenho do FSMDriver, três controladores ABS foram implementados no módulo de frenagem. Dois deles (PID e NPID) já foram utilizados na literatura para sistemas ABS reais[4][5], enquanto que o terceiro controlador é implementado em um tutorial para o desenvolvimento de robôs para o TORCS¹.

Para a implementação desses controladores foram criados novos estados para o FSMDriver, com um comportamento semelhante ao estado *Inside Track* para todos os seus métodos, exceto o método responsável pela frenagem. Esses novos

estados então são instanciados substituindo o estado *Inside Track* do FSMDriver original. Dessa forma, foram criados 3 novos controladores para o SCR, cada um implementando um controlador ABS diferente.

A frenagem no FSMDriver original é controlada por um método presente no estado *Inside Track*. Esse método é chamado a cada intervalo de simulação, retornando um valor em ponto flutuante que representa o valor de frenagem calculado para aquele momento. O cálculo do valor de freio é realizado de forma simples: a velocidade atual é comparada com a velocidade desejada para aquele trecho da pista (essa velocidade é calculada em outros módulos do estado *Inside Track* e está disponível para esse método), se a velocidade atual for menor que a velocidade desejada, o valor de frenagem é igual a zero, caso contrário, um valor fixo b_p é determinado para o freio.

Os novos estados *Inside Track* criados sobreescreveram o método de frenagem do estado *Inside Track* original, alterando os cálculos feitos para o valor de frenagem com o objetivo de diminuir o deslizamento das rodas do carro durante a corrida, atenuando os efeitos negativos provenientes desse evento.

B. Controlador PID

Esse controlador usa o método de controle proporcional integral derivativo (PID) para o controle do deslizamento nos pneus. Essa técnica consiste em utilizar uma combinação linear entre o valor do erro obtido no deslizamento das rodas, a integral e a derivada desse erro para realizar o controle do sinal [4]. Desse modo, esse controlador pode ser descrito pela seguinte equação:

$$b(e) = KP(e + T_I \int e + T_D \dot{e})$$

Na fórmula acima, K_P é o ganho proporcional, T_I é chamado de ganho integral e T_D é o ganho derivativo. A variável e é o erro no deslizamento de referência obtido em determinado instante de tempo, esse erro é dado por:

$$e = \lambda - \lambda_D$$

Onde λ é o deslizamento obtido em determinado instante de tempo e λ_D é o deslizamento de referência determinado para o controlador. O deslizamento das rodas pode ser calculado utilizando a equação:

$$\lambda = \frac{V - \omega R}{V}$$

Em que V é a velocidade do veículo, ω e R são, respectivamente, a frequência angular e o raio da roda em que o controlador atua. A partir da equação anterior, podemos concluir que o valor de deslizamento está entre 0 e 1. Quando valor do deslizamento está próximo de 1, ωR é um valor próximo de 0, logo, pode-se concluir de que as rodas estão próximas do travamento. Por outro lado, se λ está próximo de 0, significa que não há uma grande diferença entre a velocidade do veículo e a velocidade das rodas, significando que as rodas não estão próximas do travamento.

¹<http://www.berniw.org/tutorials/robot/tutorial.html>



Figura 1. Pistas escolhidas para os testes de desempenho. Da esquerda para a direita: *Brondehach*, *CG Speedway Number 1*, *Street-1*, *Dirt-1*, *Dirt-3*, *Dirt-5* e *D-Speedway*

Em um controlador PID, os ganhos determinam a influência que a componente proporcional, integral e derivativa, respectivamente, terão sobre o controlador. Assim, o aumento dos ganhos em geral diminuem o tempo de resposta de sua respectiva componente dentro do controlador, ou seja, reduzem o tempo necessário para que o controle faça com que a variável (deslizamento) estabilize próxima de seu valor de referência.

O ganho proporcional K_P é a taxa de resposta para o sinal de erro, assim, o aumento do ganho proporcional em geral resulta na diminuição no tempo de resposta do sistema, também aumentando as oscilações em torno do valor de referência. O ganho integral T_I diminui o erro de estado estacionário, ou seja, o erro presente no sistema quando o mesmo atinge o equilíbrio em relação ao valor de referência definido. O ganho derivativo T_D controla a velocidade com que o sistema responde a variações muito elevadas no erro, de forma a atenuar as oscilações decorrentes desse evento.

Ao se implementar o controlador ABS no FSMDriver, o novo estado *Inside Track* agora necessita armazenar os valores de erro nos intervalos de simulação passados, pois agora o estado é responsável por calcular o erro presente no deslizamento, sendo então capaz de calcular a derivada e a integral do erro necessários para o controle.

Para o cálculo do deslizamento nas rodas, como a simulação não permite o controle do valor de freio em cada roda individualmente, foi utilizado a média dos deslizamentos em cada roda, de uma forma similar a utilizada no tutorial para o desenvolvimento de robôs para o TORCS.

C. Controlador NPID

Devido as características não-lineares presentes durante a modelagem de um sistema ABS, um método de controle também não-linear seria mais adequado para o controle do deslizamento do veículo. Desse modo, um sistema ABS não-linear foi implementado no controlador FSMDriver na expectativa de se obter um menor tempo de resposta no processo de controle, resultando em um melhor desempenho durante a frenagem.

Esse controlador utiliza um método de controle Proporcional Integral Derivativo não-linear (NPID) para efetuar o controle da frenagem, funcionando de forma similar ao controlador PID, entretanto, utilizando uma combinação não-linear entre o erro obtido no deslizamento das rodas, a derivada e a integral do erro. Assim, pode-se definir o controlador como:

$$b(e) = K_{NP}[f(e, \alpha_P, \delta_P) + T_{NI}f(\int e, \alpha_I, \delta_I) + T_{ND}f(\dot{e}, \alpha_D, \delta_D)]$$

Onde K_{NP} , T_{NI} , T_{ND} possuem significados equivalentes aos ganhos K_P , T_I , T_D do controlador PID. $f(x, \alpha, \delta)$ é uma função não linear definida como:

$$f(x, \alpha, \delta) = \begin{cases} \text{sign}(x) \cdot |x|^\alpha, & \text{se } |x| > \delta \\ \delta^{\alpha-1} \cdot x, & \text{se } |x| \leq \delta \end{cases}$$

Na equação acima, α e δ são parâmetros da função em que δ é um valor positivo que determina que, quando x está abaixo desse valor e próximo de zero, f possui um comportamento linear em uma tentativa de diminuir o ganho nessa região da função, efeito que poderia levar a problemas numéricos [5]. Além disso, α é um valor entre 0 e 1 de tal forma que, quando $\alpha = 1$, f se comporta como a função identidade $y = x$. Nesse controlador, o deslizamento das rodas e o erro no deslizamento e são calculados seguindo a mesma equação utilizada no controlador anterior.

A implementação desse controlador no FSMDriver necessitou dos mesmos ajustes utilizados no controlador PID, com a adição de um método no estado *Inside Track* para o cálculo de f .

D. Controlador Berniw

O controlador ABS utilizado nesse FSMDriver é implementado de forma similar ao controlador implementado no tutorial de desenvolvimento de robôs para o TORCS. O novo estado *Inside Track* possui um valor fixo de frenagem e , de acordo com o deslizamento das rodas, atenua esse valor pré-estabelecido. O deslizamento das rodas para esse controlador é calculado como:

$$s = \frac{\omega R}{V}$$

Onde ω , R e V possuem os mesmos significados utilizados para os outros controladores. Devido às mesmas limitações citadas anteriormente, a média dos deslizamentos nas rodas é utilizada para se realizar o controle da frenagem. Na equação acima, pode-se notar que há uma relação inversa a encontrada nos controladores anteriores de tal forma que, quando $s = 0$ a roda está completamente travada e quando $s = 1$ não há deslizamento.

Caso o valor do deslizamento calculado esteja abaixo de um determinado limiar t_b , o valor padrão de freio é atenuado usando a seguinte relação:

$$b = b_p \cdot s \cdot b_{at}$$

Onde b_p é o valor padrão de frenagem e b_{at} é uma constante utilizada para auxiliar a atenuação do valor de freio.

IV. RESULTADOS

Com o objetivo de avaliar os controladores desenvolvidos, uma série de experimentos foram conduzidos visando testar o desempenho dos controladores sob determinadas condições. Vale ressaltar que os valores das constantes utilizados pelos controladores foram obtidos empiricamente e são apresentados na Tabela I.

Tabela I
PARÂMETROS UTILIZADOS

Parâmetro	Valor
b_p	0,3
K_P	0,4836
T_I	0,2
T_D	0,425
K_{NP}	0,2435
T_{NI}	0,532
T_{ND}	0,0099
δ	0,1
α_P	0,3
α_I	0,27
α_D	0,15
b_{at}	0,8
t_b	0,8

A. Determinação do Deslizamento de Referência

Numa tentativa de melhorar o desempenho dos controladores PID e NPID no ambiente de simulação, um experimento foi realizado para determinar o deslizamento de referência que seria utilizado para os 2 tipos de piso usados no TORCS (asfalto e terra).

Os deslizamentos de referência utilizados nos controladores ABS são dependentes das condições da pista, e variam entre os valores de 0,1 e 0,2 [12]. Sendo assim, 11 valores de deslizamento de referência foram testados para cada controlador, variando em intervalos de comprimento igual a 0,01. Cada um dos valores foi testado em 6 pistas diferentes, sendo 3 pistas de asfalto e 3 pistas de terra. Para se determinar a performance, foi utilizado o mesmo critério da etapa de classificação do SCR, a distância percorrida ao longo de 10.000 *game tics* (intervalos de simulação).

Para esses testes, pistas rápidas foram escolhidas, ou seja, pistas em que pode-se atingir uma alta velocidade antes das curvas. Sendo assim, o desempenho na frenagem antes das curvas seria essencial para aumentar a performance dos controladores nessas pistas, já que um melhor controle sobre a direção do carro e a diminuição da distância de frenagem permitiriam que o controlador passasse mais rapidamente pelos segmentos de curva.

A Tabela III apresenta resumidamente os resultados obtidos para o experimento realizado, os melhores e segundo melhores resultados para cada controlador são marcados em negrito. Em alguns casos, o controlador não foi capaz de completar a corrida, seja por limitações do controlador FSMDriver original ou devido a uma grande quantidade de dano acumulado. Esses casos são marcados com † na tabela. Pode-se notar que os melhores resultados nas pistas se concentram em torno de valores diferentes para pistas de asfalto e pistas de terra. Para as pistas de terra, valores mais próximos de 0,1 se mostraram mais eficazes enquanto que para pistas de asfalto esses valores estiveram mais próximos de 0,2.

B. Desempenho dos Controladores Desenvolvidos

A Tabela II mostra os valores escolhidos para controladores nos dois tipos de pistas existentes. Esses valores foram escolhidos por apresentarem um bom desempenho na maioria das pistas selecionadas, sem necessariamente apresentarem os melhores desempenhos em todas as pistas.

Tabela II
DESLIZAMENTOS DE REFERÊNCIA SELECIONADOS

λ_D	Terra	Asfalto
PID	0,1	0,2
NPID	0,11	0,2

Com os valores de deslizamento de referência obtidos, foram realizados experimentos que indicassem o desempenho dos controladores em diversos quesitos. Cada controlador foi avaliado quanto a distância percorrida e dano sofrido ao longo de 10.000 *game tics*. Além disso, a quantidade de *game tics* em cada estado da FSM foi obtida.

A distância percorrida pelos controladores é a medida utilizada no SCR, sendo uma das principais medidas de desempenho dos controladores em um ambiente de competição, definindo qual o controlador mais rápido em determinada pista, dado que o tempo é constante (10.000 *game tics*). O dano, importante em corridas mais longas, é útil como um indicativo de quanto o controlador está evitando colisões, também indicando se o controlador esta correndo de forma eficiente, no sentido de o controlador ser capaz de correr em uma velocidade alta sem comprometer a sua continuação na corrida.

A quantidade de *tics* em cada estado pode ser analisado de maneira similar ao dano. Ao se analisar a quantidade de tempo gasta em estados de exceção, seria possível, por exemplo, avaliar o impacto desses estados na distância percorrida pelo controlador ao longo dos 10.000 *game tics*.

Os controladores foram testados em 7 pistas diferentes, sendo obtidos os resultados para os quesitos mencionados anteriormente. Foram selecionadas 3 pistas de terra e 4 pistas de asfalto para serem utilizadas nos testes. Essas pistas foram escolhidas de forma a se obter uma mistura entre pistas com retas maiores seguidas de curvas mais fechadas, pistas com curvas mais suaves e pistas com uma grande quantidade de

Tabela III
DISTÂNCIA PERCORRIDA POR DESLIZAMENTO DE REFERÊNCIA (10.000 *game tics*)

Deslizamento de Referência	Street 1	E-track 3	Brondenhach	Dirt 1	Dirt 3	Dirt 5
Controlador NPID (m)						
0,1	7239.75	7155.78	7074.01	4148.27	5110.48	3462.49
0,11	6968.62	7751.07	6662.26	4137.21	5468.86	3745.48
0,12	7180.12	7101.9	6824.85	4011.05	3399.86	3524.21
0,13	7143.83	7133.7	7057.12	4032.86	3490.86	3621.61
0,14	7076.84	7075.44	7086.15	3676.46	4780.53	3541.43
0,15	7289.16	7748.55	6767.11	4382.05	5385.98	3550.92
0,16	7103.83	7640	7043.75	3880.26	5247.35	3526.14
0,17	7327.12	7753.12	7060.37	4284.94	4724.59	3525.18
0,18	7357.38	7133.15	6988.75	4105.09	5220.48	3220.2
0,19	7450.67	7729.01	6921.21	4190.66	4916.47	3526.46
0,2	7287.99	7750.21	7316.43	4023.36	4385.84	3521.71
Controlador PID (m)						
0,1	7104.97	7177.95	7039.47	4148.27	5110.48	3462.49
0,11	7209.17	†	7032.47	4137.21	5468.86	3745.48
0,12	7116.87	7060.8	7074.26	4011.05	3399.86	3524.21
0,13	7216.07	7050.91	7145.1	4032.86	3490.86	3621.61
0,14	7200.85	7559.67	7200.55	3676.46	4780.53	3541.43
0,15	7120.9	6892	7104.93	4382.05	5385.98	3550.92
0,16	7159.19	4033.25	7104.1	3880.26	5247.35	3526.14
0,17	7098.17	7132.23	7046.43	4284.94	4724.59	3525.18
0,18	7249.21	7747.08	7026.98	4105.09	5220.48	3220.2
0,19	7396.05	6787.57	6946.03	4190.66	4916.47	3526.46
0,2	7274.89	7753.08	7033.61	4023.36	4385.84	3521.71

curvas, nas quais não é possível ao carro atingir maiores velocidades. Desse modo, fazendo-se uma tentativa de se comparar o impacto dos controladores ABS nesses dois tipos de pista. As pistas selecionadas são apresentadas na Figura 1.

Os resultados obtidos nesses experimentos foram comparados com os resultados obtidos pelo FSMDriver sem o sistema ABS implementado. Desse modo, pode-se verificar se a incorporação dos controles ABS tiveram impacto, ou não, sobre a performance do controlador nos quesitos citados anteriormente.

A Tabela IV mostra os resultados de distância percorrida pelos controladores, os melhores resultados estão marcados em negrito. Por meio da análise dos resultados obtidos, percebe-se que, no geral, os controladores com ABS implementados apresentaram desempenhos superiores ao FSMDriver com relação à distância percorrida ao longo de 10.000 *game tics*.

Ainda, é possível notar que os controlador PID e Berniw apresentaram os melhores desempenhos no geral. Vale ressaltar ainda que o controlador PID e Berniw só apresentaram os piores desempenhos em uma pista cada (*Brondenhach* e *Dirt 3* respectivamente). Foi possível ainda perceber que os controladores apresentaram um ganho no desempenho maior

nos testes realizados em pistas onde havia uma maior quantidade de retas seguidas de uma curva mais fechada, como na pista *Street 1*. Isso pode ser atribuído ao fato de que nessas situações uma diminuição na distância de frenagem somados a uma melhora no controle sobre a direção do veículo tiveram um maior impacto sobre a velocidade com a qual o carro conseguiu passar por essas curvas.

O dano e a quantidade de *game tics* em cada estado obtidos pelos experimentos são apresentados nas Tabelas V e VI respectivamente. Analisando-se a quantidade de *game tics* em cada estado do FSMDriver, pode-se notar que os controladores com ABS implementados concentraram os menores tempos em estados de exceção, sendo possível perceber que, de forma generalizada, os controladores que ficaram menos tempo em estados de exceção também sofreram menos dano com relação ao FSMDriver, como é possível notar nas pistas *CG Speedway number-1*, *Dirt 1*.

Além disso, é notável que na maioria dos casos em que não houve uma diminuição significativa ou não houve diminuição do dano sofrido pelos controladores, houve um ganho na distância percorrida pelos controladores ABS, ou seja, pode-se argumentar que houve um ganho na performance do contro-

Tabela IV
DISTÂNCIA PERCORRIDA (10.000 *game tics*)

	Street 1	CG Speedway Number-1	Brondenhach	Dirt 1	Dirt 3	Dirt 5	D-Speedway
FSMDriver	7052.09	7249.41	6877.95	4442.57	5249.14	3596.69	14456.5
PID	7274.89	8192.95	6729.85	4282.82	5216.23	3707.17	14528.5
NPID	7287.99	7652.53	7316.43	4137.21	5468.86	3745.48	14139.7
Berniw	7348.51	7996.85	7033.61	4152.29	5402.11	3750.32	15755.2

Tabela V
DANO SOFRIDO (10.000 *game tics*)

	Street 1	CG Speedway Number-1	Brondenhach	Dirt 1	Dirt 3	Dirt 5	D-Speedway
FSMDriver	7052.09	7249.41	6877.95	4442.57	5249.14	3596.69	14456.5
PID	7274.89	8192.95	6729.85	4282.82	5216.23	3707.17	14528.5
NPID	7287.99	7652.53	7316.43	4137.21	5468.86	3745.48	14139.7
Berniw	7348.51	7996.85	7033.61	4152.29	5402.11	3750.32	15755.2

Tabela VI
TEMPO EM CADA ESTADO (*game tics*)

		Street 1	CG Speedway Number-1	Brondenhach	Dirt 1	Dirt 3	Dirt 5	D-Speedway
Stuck	FSMDriver	157	611	409	794	748	808	0
	PID	159	206	357	569	631	619	8
	NPID	164	691	191	705	572	770	132
	Berniw	156	414	357	926	525	725	0
Out of Track	FSMDriver	1320	1209	957	1896	939	1833	312
	PID	1186	900	1100	1944	617	1803	278
	NPID	1199	1238	956	1754	886	1868	297
	Berniw	1167	1031	1100	2009	679	1642	51
Inside Track	FSMDriver	8523	8180	8634	7310	8313	7359	9688
	PID	8655	8894	8543	7487	8752	7578	9714
	NPID	8637	8071	8853	7541	8542	7362	9571
	Berniw	8677	8555	8543	7065	8796	7633	9949

lador considerando-se que o carro andou uma maior distância com quase a mesma quantidade de dano.

De acordo com os resultados obtidos, é possível concluir que o controlador PID apresentou o melhor desempenho nos quesitos avaliados, apesar de, nas pesquisas desenvolvidas na literatura, o método de controle NPID ser mais apropriado para um sistema não-linear como o ABS [12]. Esse resultado pode ter ocorrido devido a ausência de um processo mais complexo de otimização dos parâmetros, o método utilizado pode ter beneficiado a menor quantidade de parâmetros presentes no controlador PID.

Somando-se a isso, foi possível perceber que todas as

implementações de ABS apresentaram, na maioria das pistas testadas, uma melhora na performance do FSMDriver. Pode-se notar ainda que os controladores ABS apresentaram em geral uma performance superior ao FSMDriver original em pistas de terra, fato que pode ser atribuído a ausência de um controle mais complexo neste último controlador visto que são poucas as opções possíveis para torná-lo um controlador adaptável ao tipo de pista.

Nas Tabelas V e VI, foi possível notar que os controladores ABS não apresentaram o comportamento esperado na pista oval *D-Speedway*. Os controladores NPID e PID não apresentaram um ganho na distância percorrida, além de

passarem mais tempo em estados de exceção. Por meio da visualização da simulação com o motor gráfico presente no TORCS, foi possível perceber que, nesses controladores, o veículo demonstrou instabilidade nas curvas, ocasionando no derrapamento do carro, saída da pista e colisões que não foram observadas no FSMDriver original.

V. CONCLUSÃO

O *design* utilizado pelo controlador FSMDriver desenvolvido anteriormente a esta pesquisa apresenta a capacidade de ter seus estados evoluídos gradativamente com novos mecanismos adicionados para tornar esse controlador mais competitivo. Nesse contexto, surge a oportunidade de verificar se sistemas ABS para controlar a frenagem nesse controlador podem impactar positivamente no seu desempenho.

Por outro lado, um dos maiores desafios no desenvolvimento de sistemas ABS se encontra justamente na dificuldade de testes, geralmente sendo utilizados ambientes de simulação para os experimentos. Sendo assim, a implementação de sistemas ABS no FSMDriver se encaixa de maneira natural na proposta do campeonato de corrida de carros simulada (SCR). Nesse contexto, três controladores ABS foram implementados no FSMDriver, cada um fazendo uso de métodos de controle diferentes.

Os resultados obtidos são um indício de que os sistemas ABS podem melhorar o desempenho de controladores para o SCR, desde implementações mais simples, como a solução apresentada no controlador Berniw, como também em implementações mais complexas como as apresentadas pelos controladores PID e NPID.

Por fim, os controladores desenvolvidos poderiam apresentar um melhor desempenho caso algoritmos de otimização mais complexos tivessem sido utilizados para a determinação de seus parâmetros. Ainda, é necessário que mais testes sejam conduzidos para verificar as causas dos erros gerados pelos controladores ABS em pistas ovais, nas quais os controladores obtiveram desempenho abaixo do esperado.

REFERÊNCIAS

- [1] Ayman A. Aly, El-Shafei Zeidan, Ahmed Hamed, and Farhan Salem. An antilock-braking systems (abs) control: A technical review. *Intelligent Control and Automation*, 2011.
- [2] M. V. Butz and T. D. Lonnerker. Optimized sensory-motor couplings plus strategy extensions for the torcs car racing challenge. pages 317–324, Sept 2009.
- [3] J. Carbaugh, D. Godbole, and R. Sengupta. Tools for safety analysis of vehicle automation systems. 3:2041–2045 vol.3, Jun 1997.
- [4] Chankit Jain, Rahul Abhishek, and Abhishek Dixit. Linear control technique for anti-lock braking system. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 2014.
- [5] F. Jiang and Z. Gao. An application of nonlinear pid control to a class of truck abs problems. In *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, 2001.

- [6] Erdal Kayacan, Yesim Oniz, and Okyay Kaynak. A grey system modeling approach for sliding-mode control of antilock braking system. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 2009.
- [7] D. Loiacono, P. L. Lanzi, J. Togelius, E. Onieva, D. A. Pelta, M. V. Butz, T. D. Lonnerker, L. Cardamone, D. Perez, Y. Saez, M. Preuss, and J. Quadflieg. The 2009 simulated car racing championship. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 2(2):131–147, June 2010.
- [8] T. Luettel, M. Himmelsbach, and H. J. Wuensche. Autonomous ground vehicles - concepts and a path to the future. *Proceedings of the IEEE*, 100(Special Centennial Issue):1831–1839, May 2012.
- [9] Bruno H. F. Macedo, Gabriel F. P. Araujo, Gabriel S. Silva, Matheus C. Crestani, Yuri B. Galli, and Guilherme N. Ramos. Evolving finite-state machines controllers for the simulated car racing championship. *Proceedings of SBGames 2015*, November 2014.
- [10] Georg F. Mauer. A fuzzy logic controller for an abs braking system. *IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS*, 1995.
- [11] V. Milanés, C. González, J. E. Naranjo, E. Onieva, and T. De Pedro. Electro-hydraulic braking system for autonomous vehicles. *International Journal of Automotive Technology*, 11(1):89–95, 2010.
- [12] Hossein Mirzaeinejad and Mehdi Mirzaei. A novel method for non-linear control of wheel slip in anti-lock braking systems. *Control Engineering Practice*, 18(8):918 – 926, 2010.
- [13] J. Muñoz, G. Gutierrez, and A. Sanchis. A human-like torcs controller for the simulated car racing championship. pages 473–480, Aug 2010.