



ANÁLISE DA ACELERAÇÃO LATERAL DE UM VEÍCULO EM UM SIMULADOR COM 9 GDL

Analysis of the lateral acceleration of a vehicle in a 9 DOF driving simulator

Elyton Elias Prado Naves (1); Jánes Landre Júnior (2); José Tomich Bosco Júnior (3)

(1) Eng. Mecânico, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.

(2) Dr. Prof., Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.

(3) Tutor, Fiat Chrysler Automobiles, Belo Horizonte - MG, Brasil

Email para Correspondência: elytonnaves@hotmail.com; (P) Elyton Elias Prado Naves

Resumo: O uso de simuladores dinâmicos veiculares está se tornando cada vez mais comum dentre as maiores montadoras de veículos do mundo. Esses simuladores podem ter diferentes tipos de aplicações e obterem resultados para vários tipos de atividades como, por exemplo, desenvolvimento de veículos e seus componentes, treinamento de pilotos, estudos voltados para a medicina, psicologia, entre outros. Existem diferentes configurações de simuladores sendo utilizados pelas montadoras, porém, o modelo utilizado para este trabalho possui um diferencial, que é possuir 9 graus de liberdade (9 GDL). Este artigo tem o objetivo de mostrar o comportamento dinâmico lateral de um veículo simulado no SIMCenter, o Centro de Excelência em dinâmica veicular, resultado de um projeto da parceria entre a FCA e PUC Minas. A análise do comportamento dinâmico de um veículo é realizada com o auxílio de manobras padronizadas, as quais exigem dados de entrada para se obter os dados de saída de acordo com cada necessidade. Com o intuito de analisar a dinâmica lateral, foi realizada a manobra padrão de degrau de esterçamento (*step steering*). Nela, o sinal de entrada dado pelo piloto é equivalente a um sinal do tipo degrau (*step input*). De acordo com a norma ISO 7401 (*Road vehicles - Lateral transient response test methods - Open-loop test methods*), para efetuar a manobra é preciso que o carro esteja a uma velocidade de 100 km/h, em quarta marcha e em linha reta, além disso não deve haver mudanças na posição do pedal do acelerador. Após 3 segundos, o piloto deve aplicar um ângulo de volante, predeterminado, de maneira rápida e manter o volante esterçado por 3 segundos aproximadamente. Passado esse tempo, deve-se soltar o volante e deixar que o veículo se realinhe livremente, sem intervenção do piloto. As amplitudes do ângulo de volante podem partir de 10 graus e serem incrementadas com um passo de 5 graus. No presente trabalho a amplitude do ângulo de volante escolhida para executar a manobra *step steering* foi de 20 graus. Essa manobra foi executada em um simulador de 9 GDL. Os resultados obtidos mostraram bastante fidedignos ao esperado, apontando que os softwares computacionais têm potencial para simular situações que demandariam um dispêndio adicional em aplicações físicas. Os resultados simulados em bancada – no



próprio SIMCenter – mostram a diferença existente na magnitude da aceleração lateral da plataforma. Isso se dá devido à alteração nos ganhos e nos filtros de frequência utilizados para fazer com que os movimentos sentidos pelo usuário do simulador se aproximem de uma sensação em um veículo real, o que é chamado de *motion cueing*.

Palavras chaves: Simulador; 9GDL; SIMCenter; Motion Cueing; FCA.

Abstract: Driving simulators are becoming common among the OEMs. These simulators have different types of applications and obtain results for various types of activities such as the development of vehicles and their components, training for drivers, studies focused on medicine, psychology, among others. There are different configurations of simulators being used by the automakers, however, the model used for this work has a differential, which is 9 degrees of freedom (9 DOF). This article aims to show the lateral dynamic behavior of a simulated vehicle in SIMCenter, the Center of Excellence in vehicle dynamics, the result of a partnership project between FCA and PUC Minas. The analysis of the dynamic behavior of a vehicle is performed with the aid of standardized maneuvers, which require input data to obtain the output data according to each need. In order to analyze the lateral dynamics, the standard step steering maneuver was performed, in which the input signal given by the pilot is equivalent to a step input signal. According to ISO 7401 (Road vehicles - Lateral transient response test methods), to perform the maneuver it is necessary that the car is at a speed of 100 km / h, in fourth gear and in a straight line, in addition there should not be any change on throttle pedal. After 3 seconds, the pilot must apply a predetermined steering wheel angle quickly and keep the steering wheel steady for approximately 3 seconds. After that time the steering wheel must be released and let the vehicle realign freely. The amplitudes of the steering angle can start from 10 degrees and be incremented by a step of 5. In the present work the amplitude of the steering wheel angle chosen to execute the step steering maneuver was 20 degrees. This maneuver was performed in an actual vehicle, in a virtual model and in the 9 DOF simulator. The results obtained between the real vehicle and the virtual model were very close, pointing out that the computer software has the potential to simulate situations that would demand an additional expenditure in physical applications. The simulated benchtop results - in SIMCenter itself - show the difference in the magnitude of the lateral acceleration of the platform. This is due to the change in gain and frequency filters used to make the user's movements of the simulator approach a sensation in an actual vehicle, which is called motion cueing.

Keywords: *Simulator; 9DOF; SIMCenter; Motion Cueing; FCA.*

1 INTRODUÇÃO

Graças ao investimento movido pelo avanço da tecnologia, novos projetos e modernizações vão surgindo em prol do desenvolvimento de novos produtos. Com isso, o uso de simuladores dinâmicos veiculares tem se tornado cada vez mais comum dentre as montadoras automotivas mundiais. Esses simuladores podem ter diferentes tipos de aplicações e obterem resultados para vários tipos de atividades como, por exemplo, desenvolvimento de veículos e seus componentes, treinamento de pilotos, estudos voltados para a medicina, psicologia, entre outros.

Depois de um longo período de estudo sobre a viabilidade de novos projetos entre a indústria e a universidade, foi firmada uma parceria entre a PUC Minas – a qual possui vasta experiência no âmbito acadêmico em pesquisas relacionadas a área automotiva – e a FCA (Fiat Chrysler Automobiles) dando origem ao SIMCenter, o Centro de Excelência em dinâmica veicular. O qual é composto por um simulador dinâmico veicular. Existem diferentes configurações de simuladores sendo utilizados pelas montadoras, porém, o modelo utilizado nesta pesquisa possui um diferencial: ter 9 graus de liberdade.

A parte estrutural do simulador é composta por um *hexapod* (6 atuadores lineares), que realiza os movimentos de rolagem, arfagem e translação vertical, sobre uma base móvel onde atua um *tripod* (3 atuadores lineares), responsável pelos movimentos de guinada e translações no plano do solo. Essa combinação resulta em uma plataforma com 9 graus de liberdade. O *hexapod* é responsável pelos movimentos de alta frequência e baixa amplitude. Já o *tripod* atua mais nos movimentos de baixa frequência e amplitudes mais altas. A figura 1 mostra um esquema da estrutura da plataforma utilizada no simulador.

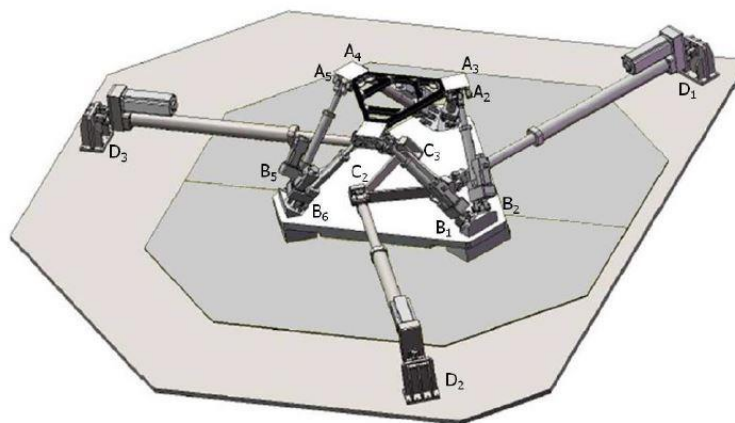


Figura 1 - Esquema da estrutura mecânica do simulador. A, B, C e D são as posições das juntas de cada atuador.

Fonte: (Beghi, Bruschetta e Maran, 2014)

Além da estrutura responsável pelos movimentos da plataforma, o simulador também possui um *cockpit* adaptado e instrumentado para que haja troca de informações



entre o software e o hardware, onde é possível utilizar a própria arquitetura elétrica do veículo real para se obter alguns dados de entrada que são provocados pelo piloto como, por exemplo, direção, aceleração, freio, entre outros. Para tornar o ambiente mais realístico, o *cockpit* é a própria carroceria do veículo com algumas adaptações para reduzir peso e conseqüentemente tornar o movimento da plataforma menos dificultoso. Além disso, componentes que não afetam em nenhuma análise dinâmica do veículo em um simulador são considerados desnecessários e removidos, como, por exemplo, as rodas e motor. O fato de ter ou não as rodas físicas presentes na estrutura da carroceria/chassi, não interfere nas análises do simulador, uma vez que todas as suas configurações já estão incluídas no modelo virtual em simulação.

O simulador possui uma tela curva onde é projetado a parte gráfica do simulador, ou seja, o ambiente onde o veículo se encontra – seja uma pista, uma estrada ou uma cidade. Essa tela possui um ângulo de 230 graus para cobrir todo o campo de visão do condutor, pois um dos desafios de um simulador é fazer com que o usuário perceba o mínimo possível que está em um ambiente de simulação. Para isso, os retrovisores possuem telas que simulam a imagem que seria vista em um retrovisor real situado no local simulado. Ainda há limitações físicas e espaciais, portanto para que a sensação (ou percepção) do movimento, chamada de *motion cueing*, transmita ao usuário as acelerações que ele sentiria em um veículo real, é preciso realizar análises da dinâmica veicular do modelo e comparar com os parâmetros responsáveis por alterar os ganhos e as frequências dos movimentos que a plataforma é capaz de realizar.

A proposta deste artigo é mostrar o comportamento dinâmico lateral de um veículo simulado no SIMCenter, o Centro de Excelência em dinâmica veicular, resultado de um projeto da parceria entre a FCA e PUC Minas. A análise do comportamento dinâmico de um veículo é realizada com o auxílio de manobras padronizadas, as quais exigem dados de entrada para se obter os dados de saída de acordo com cada necessidade. Com o intuito de analisar a dinâmica lateral, foi realizada a manobra padrão de degrau de esterçamento (*step steering*).

2 METODOLOGIA

A análise do comportamento dinâmico de um veículo é realizada com o auxílio de manobras padronizadas, as quais exigem dados de entrada para se obter os dados de saída de acordo com cada necessidade. Por exemplo, em uma mesma manobra é possível obter diversas respostas variando-se a entrada, e isso depende de qual parâmetro deseja-se avaliar.

Com o intuito de analisar a dinâmica lateral, foi realizada a manobra degrau de esterçamento (*step steering*). Nela o sinal de entrada dado pelo piloto é equivalente a um sinal do tipo degrau (*step input*). O objetivo da manobra *step steering* é determinar o comportamento da resposta transiente do veículo avaliando as características de resposta ao controle, a estabilidade, o movimento da carroceria e a qualidade do realinhamento do volante de direção (CRF, 2007). De acordo com a norma ISO 7401 (*Road vehicles - Lateral transient response test methods - Open-loop test methods*), para efetuar a manobra é preciso que o carro esteja a uma velocidade de 100 km/h, em quarta marcha

e em linha reta, além disso não deve haver mudanças na posição do pedal do acelerador. Após 3 segundos, o piloto deve aplicar um ângulo de volante, predeterminado, de maneira rápida e manter o volante esterçado por 3 segundos aproximadamente. Passado esse tempo, deve-se soltar o volante e deixar que o veículo se realinhe livremente, sem intervenção do piloto. As amplitudes do ângulo de volante podem partir de 10° e serem incrementadas com um passo de 5° . No presente trabalho a amplitude do ângulo de volante escolhida para executar a manobra *step steering* foi de 60 graus.

Foi utilizado um *software* que controla a plataforma, chamado VI-DriveSim. Através dele é possível alterar as configurações do simulador e dos parâmetros que regem seu comportamento, como o *motion cueing*, a parte gráfica da simulação, o sintoma de segurança dinâmico (que altera a sensação de aceleração longitudinal), o torque no volante de direção, entre outros. O VI-DriveSim é responsável por fazer com que a plataforma do simulador realize os movimentos – requeridos pelo piloto – de acordo com o comportamento dinâmico do modelo que está sendo simulado. As configurações e parâmetros ajustáveis existentes nele, são para determinar a fidelidade da simulação com relação ao ambiente real. Através desse software é possível realizar uma simulação virtual dos movimentos da plataforma para que, antes de colocá-la em operação, seja assegurado que os movimentos estejam dentro do espaço de trabalho disponível e que o equipamento não atinja seus limites de fim de curso. A figura 2 mostra a interface do software VI-DriveSim ao simular a plataforma virtual.

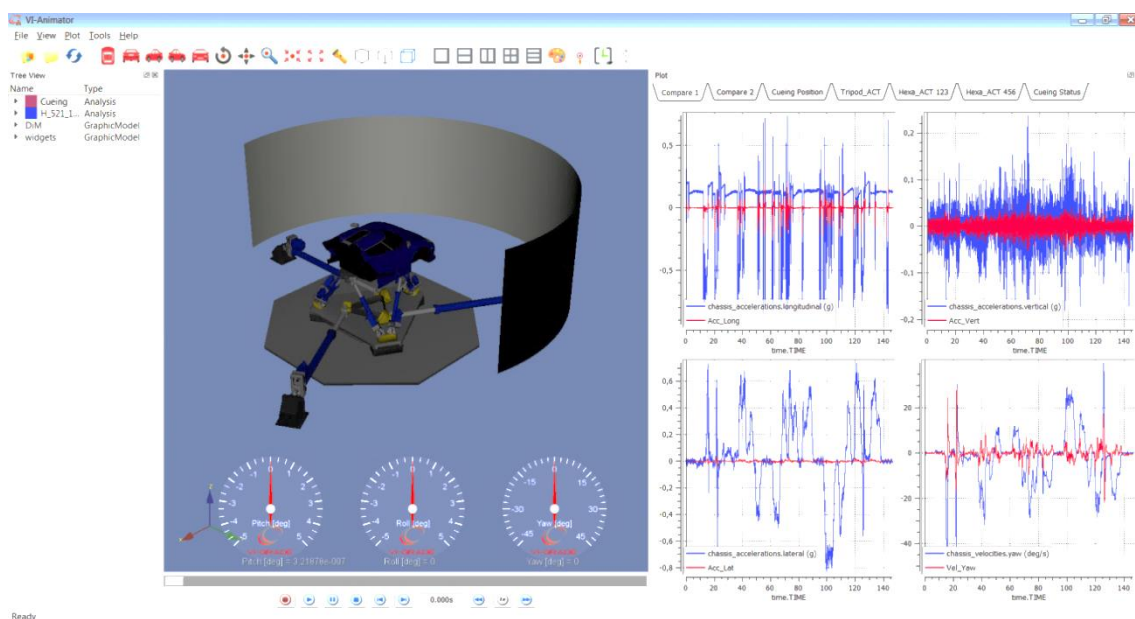


Figura 2 - Interface de simulação da plataforma virtual.

Fonte: (Software VI-DriveSim, 2018)

Durante a simulação da plataforma virtual é possível acompanhar o comportamento de cada variável dinâmica do veículo e também do simulador, onde todos os dados computados são gravados em um arquivo e podem ser posteriormente pós-processados e comparados.



Ao realizar a simulação utilizando a plataforma, é possível acompanhar as respostas do veículo a cada manobra realizada pelo piloto em tempo real através do *software WinTAX4*. Todas as variáveis dinâmicas podem ser exportadas em arquivo para análises posteriores.

Ao iniciar a simulação fazendo o uso da plataforma, o usuário foi inserido em um campo de prova virtual, onde pôde ser realizado qualquer tipo de manobra desejada. Antes de realizar a manobra proposta para este trabalho, fez-se necessário que o piloto se acostumassem com o ambiente de simulação e também que fizesse uma verificação se os movimentos da plataforma estavam condizentes com o veículo real. Isso foi feito apenas com a execução de manobras aleatórias capazes de fornecer ao usuário sensações que confirmassem a veracidade dos movimentos.

Após verificado os movimentos da plataforma, iniciou-se os testes com a manobra padrão *step steering* com um ângulo de volante igual a 60° . Essa mesma manobra foi realizada 3 vezes para este trabalho com o intuito de validar as respostas.

Foi destacado também a aceleração lateral presente na plataforma do simulador, pois ela mostra como a aceleração do modelo virtual do veículo está sendo representada.

3 RESULTADOS

Após as 3 execuções da manobra padrão proposta para este trabalho, os dados coletados foram pós-processados para verificar qual o comportamento lateral do veículo através da análise da aceleração.

A figura 3 mostra como se deu a aceleração lateral no veículo e na plataforma para a primeira execução da manobra.

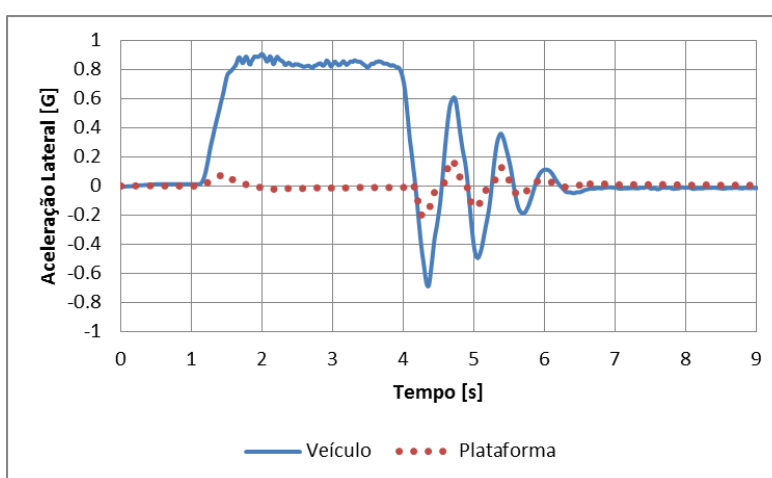


Figura 3 – Aceleração Lateral – primeira execução.

Fonte: (Autor, 2018)

Observa-se que, ao impor um ângulo de volante igual a 60° a uma velocidade de 100km/h, isso provoca uma aceleração lateral no CG do veículo igual a 0,89G, enquanto na plataforma aparece 0,081G. Isso ocorre devido ao espaço limitado da plataforma e, para poder transmitir uma sensação mais próxima do real, ela utiliza estratégias de *motion cueing*. Uma dessas estratégias é o *tilt coordination*, que faz com que haja uma pequena inclinação na plataforma capaz de fazer o usuário sentir uma aceleração linear, desde que a velocidade de inclinação ocorra dentro de uma faixa de 2 a $4^\circ/\text{seg}$ e a aceleração angular dentro da faixa de 0,2 a $0,4^\circ/\text{seg}^2$ (Groen e Bles, 2004). Outro ponto importante é a magnitude da aceleração no ato em que o piloto solta o volante para que o veículo se realinhe livremente, a qual chega a 0,69G e tende a atenuar em seguida para 0,61G, passando por 0,36G e tendo sua última oscilação (antes de se estabilizar) a 0,11G.

A figura 4 aponta o comportamento da aceleração na segunda execução da manobra.

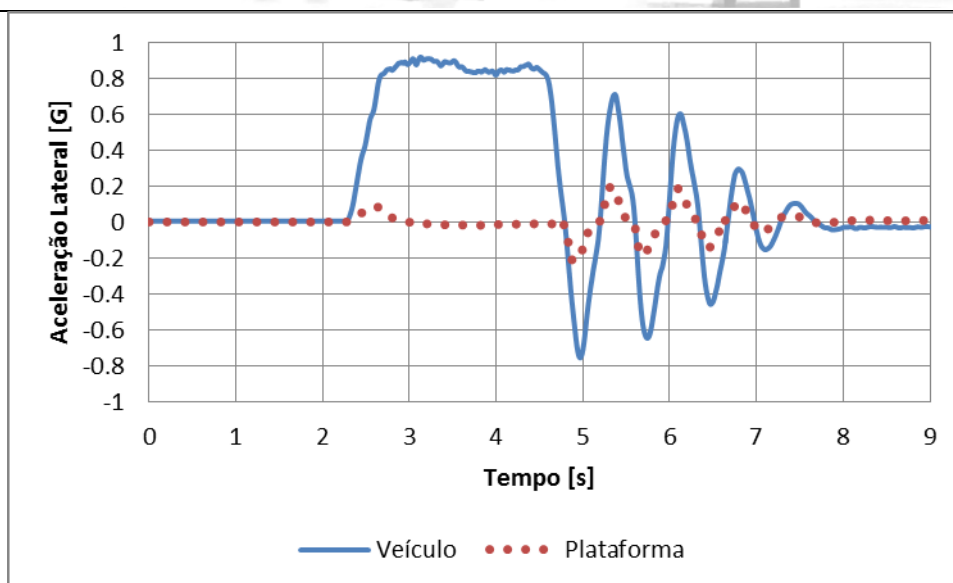


Figura 4 - Aceleração Lateral – segunda execução.

Fonte: (Autor, 2018)

Já na segunda execução houve um pico de 0,91G de aceleração lateral no veículo e 0,079G na plataforma. No realinhamento do veículo ocorreu mais oscilações do que na manobra anterior e com valores maiores de aceleração, onde o pico para o realinhamento foi de 0,75G. Isso pode ocorrer devido à possível diferença na velocidade de esterçamento que o piloto provocou no volante do veículo, pois ao girar o volante mais rapidamente, há um ganho de aceleração lateral.

Na figura 5 é possível observar a aceleração lateral no veículo e na plataforma para a terceira e última execução da manobra.

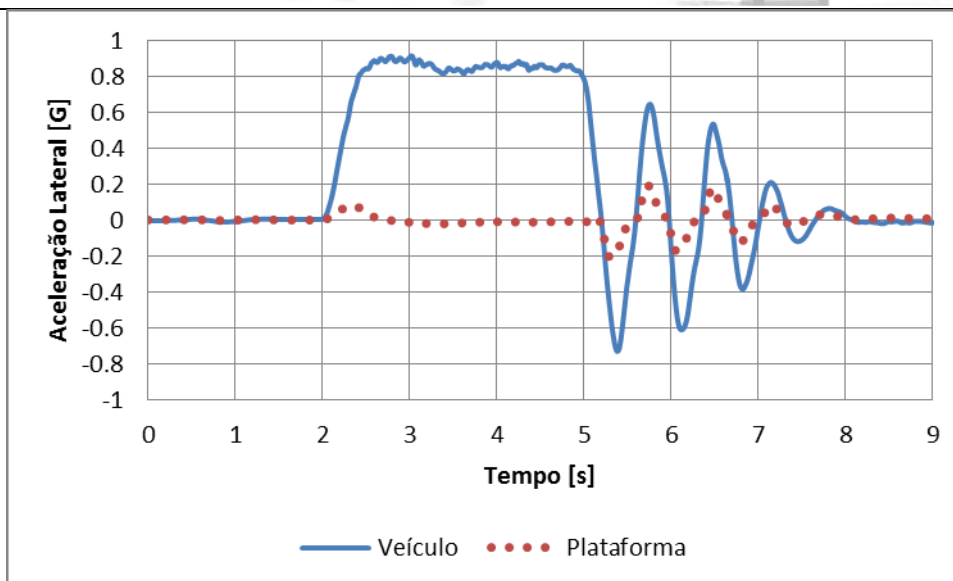


Figura 5 - Aceleração Lateral – terceira execução.

Fonte: (Autor, 2018)

Nota-se que o comportamento da última manobra se assemelha ao da segunda. Seu pico de aceleração lateral no veículo foi de 0,91G, assim como no anterior. Já para a plataforma, seu comportamento foi similar ao da primeira execução, onde o pico de aceleração lateral foi de 0,081G, porém as oscilações durante o realinhamento foram maiores. O pico de aceleração no realinhamento foi de 0,73G.



4 CONCLUSÃO

De posse dos resultados obtidos, conclui-se que o simulador veicular com 9 graus de liberdade é uma ferramenta com grande potencial de contribuir para o desenvolvimento tecnológico dentro da indústria, da universidade e do país. Com os resultados apresentados é possível afirmar que o simulador tem a capacidade de substituir alguns testes realizados em protótipos na fase de projeto de determinado produto.

As oscilações durante o realinhamento do veículo se mostraram diferentes de como acontecem no modelo virtual. Vários fatores externos podem ter acarretado nesse comportamento, um deles – e o principal – está relacionado ao atuador responsável por transmitir o torque e a sensação de direção para o volante. Algumas limitações do atuador da direção impedem um comportamento fiel ao modelo do veículo (tal assunto ainda está sendo estudado para aperfeiçoar as respostas retroativas do sistema de direção).

Os resultados simulados no SIMCenter mostram a diferença existente na magnitude da aceleração lateral da plataforma. Isso se dá devido à alteração nos ganhos e nos filtros de frequência utilizados para fazer com que os movimentos sentidos pelo usuário do simulador se aproximem de uma sensação em um veículo real, o que é chamado de *motion cueing*.



AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, à Fiat Chrysler Automobiles e ao governo brasileiro pela criação do projeto Inovar Auto, que foi de onde surgiu o programa de Residência Tecnológica para Engenheiros.

REFERÊNCIAS

BRUSCHETTA, Mattia; MARAN, Fabio; BEGHI, Alessandro. A non-linear mpc based motion cueing implementation for a 9 dofs dynamic simulator platform. 53rd IEEE Conference On Decision And Control, California, p. 2517-2522, dez. 2014.

GILLESPIE, Thomas D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers, Inc., 1992, 1st edition.

GROEN, E.I.; BLES, W.. How to use body tilt for the simulation of linear self motion. Journal of Vestibular Research, Soesterberg, v. 14, p. 375-385, jun. 2004.

JAZAR, Reza N.. Vehicle Dynamics: Theory and Application. Riverdale: Springer, 2008, 1015 p..

MARAN, Fabio. Model-based control techniques for automotive applications. Itália: Universidade de Padova, 2013. 164 p.

MILIKEN, William F., MILIKEN, Douglas L. Race car vehicle dynamics. Warrendale: SAE International, 1995, 890 p.

MILLIKEN, William F.; MILLIKEN, Douglas L. Chassis Design: Principles and Analysis. 1. ed. Society Of Automotive Engineers, 2002. 638 p.