

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Aperfeiçoamento da lei de controle do simulador dinâmico
de direção SHERPA²**

Marcelo Martins Meira

São Paulo
2014

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Aperfeiçoamento da lei de controle do simulador dinâmico
de direção SHERPA²**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Marcelo Martins Meira

Orientador: Anca Melania Stratulat

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2014

Meira, Marcelo Martins

**Aperfeiçoamento da lei de controle do simulador dinâmico
de direção SHERPA² / M.M. Meira. -- São Paulo, 2014.**

56 p.

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Dinâmica veicular (Simulação) I. Universidade de São
Paulo.**

Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

RESUMO

Os simuladores dinâmicos de direção são dispositivos de teste que reproduzem as sensações de um condutor quando da direção de um veículo real. Os simuladores combinam ao mesmo tempo conhecimentos ligados à Engenharia Mecânica, às Ciências Cognitivas e Fatores Humanos, às Ciências do Movimento e à Realidade Virtual. Essas máquinas mostraram-se úteis às montadoras de veículos pois possibilitam uma redução significativa de custos e de atrasos nas primeiras etapas de prototipagem. Além disso, é possível, por exemplo, regular e reproduzir um mesmo ambiente de direção sem ocasionar nenhum risco ao condutor.

O presente texto abordará os trabalhos realizados em um estudo sobre o aperfeiçoamento da sensação da aceleração longitudinal no simulador dinâmico de direção pertencente ao grupo PSA Peugeot-Citroen, cujo nome é SHERPA², e se localiza no centro técnico de Vélizy Villacoublay. O objetivo desse estudo é encontrar quais parâmetros de simulação tornam a sensação de aceleração longitudinal mais próxima daquela vivenciada em um veículo real.

Num primeiro momento, o presente trabalho apresentará o contexto do estudo sobre a aceleração longitudinal. Em seguida, ele explicará a integração do ruído habitáculo (ruído no interior do veículo) de um veículo real ao simulador de direção. Além disso, destaca-se a realização de testes no simulador de direção junto a voluntários. Enfim, o presente trabalho explicará a aquisição e pós-tratamento dos dados recolhidos em veículo real e no simulador de direção, ressaltando a organização de toda essa informação para que ela seja facilmente utilizada por peritos em Estatística e Análise de Dados.

ABSTRACT

Dynamic driving simulators are machines that aim to reproduce, by their motion, the sensations drivers usually perceive in a real vehicle. These machines combine at the same time knowledge from different fields: mechanical engineering, cognitive science, human factors, human movement science and virtual reality. Driving simulators turned out to be useful for automobile manufacturers because they bring many advantages to these companies, such as the reduction of costs and time delays in the early stages of prototyping and the possibility to reproduce dangerous driving scenarios, as many times as one wants, while keeping the driver safe.

Recently, many studies in the driving simulator domain have been carried out. As a conclusion of these works, we became even more aware of how difficult it is to understand the human perception in a driving simulator. Drivers tend to overestimate the acceleration reproduced by the simulator. Moreover, not only the magnitude of the acceleration influences the human perception but also the manner (ratio between tilt and translation) the acceleration is reproduced interferes in the human sensation.

Finally, the aim of this report is to improve the longitudinal acceleration perception on SHERPA², which is the dynamic driving simulator that belongs to PSA Peugeot-Citroën. We look forward to determining the combination of certain simulation parameters that leads to a perception of acceleration on the simulator that is the closest to the one perceived in a real vehicle.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer Anca Melania Stratulat por ter confiado em mim e ter me escolhido para realizar o estágio na PSA Peugeot-Citroen e poder trabalhar ao seu lado. Sou grato pela sua orientação ao longo dos seis meses de trabalho, de compartilhar comigo seus conhecimentos, assim como por suas observações e críticas construtivas.

Agradeço igualmente Patricia Jonville e Vincent Roussarie pela confiança que me foi atribuída, me considerando como membro da equipe SCFH;

Agradeço Sébastien Denjean por se mostrar disponível toda vez que solicitei sua ajuda, sobretudo com relação a dúvidas com os programas de acústica e sobre Matlab. Agradeço também pelas convocações de pausa café e de pausa almoço;

Agradeço Emmanuelle Diaz de ter me acolhido muito bem no primeiro dia de estágio e de me ter feito compreender as sutilezas dos tratamentos estatísticos. Eu a agradeço também pelos sorrisos matinais e pelas conversas que tivemos em relação ao Brasil.

Agradeço Florian Savona pelos conselhos relacionados à percepção humana e também pelos bons momentos que passamos juntos durante o trabalho.

Agradeço a equipe de realidade virtual, sobretudo a equipe de simulação e direção, sem os quais o presente trabalho não poderia ter sido realizado.

Agradeço toda a equipe SCFH: engenheiros, estagiários, doutorandos, pelas pausas café e pausas almoço, assim como pelos bons momentos que passamos durante o trabalho. Sem o bom humor deles a realização desse trabalho não teria sido tão agradável.

Enfim, agradeço os professores da Escola Politécnica da USP Alberto Hernandez Neto, Sylvio Reynaldo Bistafa e Roberto Spinola Barbosa pelo tempo tomado para avaliar esse trabalho.

Boa continuação a todos!

Marcelo Meira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	CONTEXTO DO TRABALHO.....	9
2.1	O Grupo PSA Peugeot Citroën	9
2.2	O simulador dinâmico de direção SHERPA ²	11
2.3	Projeto sobre a sensação de aceleração longitudinal em simulador de direção ...	21
3	COLABORAÇÃO DO PRESENTE TRABALHO AO PROJETO SOBRE O APERFEIÇOAMENTO DA LEI DE CONTROLE DO SIMULADOR DE DIREÇÃO SHERPA ²	28
3.1	Objetivo 1 – Integração do ruído habitáculo ao simulador de direção	29
3.2	Objetivo 2 – Assistência aos voluntários em simulador de direção	38
3.3	Objetivo 3 – Aquisição e tratamento dos dados do estudo	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5	CONCLUSÃO	53
6	REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

O presente texto foi redigido no contexto de um estágio realizado em parceria com a *École Centrale de Nantes* e o *Grupo PSA Peugeot Citroen*. Esse estágio ocorreu em conjunto com a equipe de *Ciências Cognitivas e Fatores Humanos* e foi orientado pela Dra. Anca Melania Stratulat. Esse serviço faz parte da *Direção Científica de Tecnologias Futuras* (DSTF), que é o ramo mais à nascente do processo de *Pesquisa e Desenvolvimento* dentro da empresa. Este trabalho tem como objetivo contribuir para o avanço e a realização de um estudo sobre o aperfeiçoamento da sensação da aceleração longitudinal no simulador de direção SHERPA².

Este relatório está dividido em três capítulos distintos: o primeiro capítulo contextualizará os trabalhos realizados durante o estágio, o segundo capítulo descreve os trabalhos que foram efetivamente realizados, e por fim, o terceiro capítulo apresenta as discussões finais e conclusões.

No primeiro capítulo, o texto apresentará o Grupo PSA Peugeot Citroen e o simulador dinâmico de direção SHERPA², ressaltando não só seus pontos fortes, mas também seus limites mecânicos e as soluções técnicas existentes a fim de ultrapassar essas limitações. Em seguida, será apresentada a revisão de literatura sobre os trabalhos de Pesquisa que foram realizados ligados à percepção dos movimentos no simulador de direção para, enfim, introduzir o estudo cujo objetivo é aperfeiçoar a percepção da sensação da aceleração longitudinal.

No segundo capítulo, as atividades realizadas durante o estágio serão colocadas em evidência. Esse capítulo está dividido em três partes principais: A integração do ruído habitáculo ao simulador de direção, a bateria de testes realizada com voluntários tanto em veículo real como em simulador de direção, e enfim a aquisição e organização dos dados de estudo a fim de facilitar as análises estatísticas.

2 CONTEXTO DO TRABALHO

2.1 O Grupo PSA Peugeot Citroën

A PSA Peugeot Citroën é uma das principais montadoras europeias, com aproximadamente 13% de participação de mercado europeu em 2012. O Grupo baseia seu desenvolvimento principalmente sobre duas marcas de prestígio e envergadura mundiais: Peugeot e Citroën. Suas atividades são ligadas à fabricação e à comercialização de veículos automotivos. Além de sua atividade maior de atuar como montadora, o Grupo PSA atua em dois outros ramos: o financiamento de redes comerciais e de clientes de marcas automotivas (Banco *PSA Finance*) e a concepção e produção de componentes e módulos destinados à produção automobilística (Faurecia, do qual PSA é acionista majoritária). Além disso, o Grupo detém 25% da empresa Gefco, atuando na área de transporte e logística. A fig.1 mostra o logo dessas empresas.



Figura 1 : Logo de outras empresas que pertencem ao Grupo PSA.

Num contexto de crise da indústria automobilística, o Grupo persegue há anos uma estratégia de fabricar veículos de qualidade elevada a fim de ter maior rentabilidade. *PSA Peugeot Citroën* e *General Motors* anunciaram no dia 29 de Fevereiro de 2012 a criação de uma aliança estratégica mundial que se baseia em dois pilares: o compartilhamento de plataformas de veículos, de componentes e de módulos e a criação de uma parceria de compras a escala mundial para os produtos e serviços. Em 2011, o Grupo destinou dois bilhões de euros (5,3% de sua renda) à Pesquisa e ao desenvolvimento através de seus centros de Pesquisa instalados na França, constituídos de 15000 pesquisadores, e também na América Latina e na China.

A *Direção de Pesquisa e Desenvolvimento* auxilia no avanço do Grupo desenvolvendo tecnologias chave e design adaptado à automobilística do futuro, oferecendo respostas inovadoras e performáticas às expectativas dos clientes. Essa direção engloba a DRIA, *Direção de Pesquisa e de Engenharia Avançada*, situada no centro técnico de Vélizy Villacoublay, em região parisiense.

O estágio ocorreu dentro da equipe *Ciências Cognitivas e Fatores Humanos* (SCFH) e foi orientado pela Dra. Anca Melania Stratulat. A equipe SCFH faz parte da *Direção Científica de Tecnologias Futuras* (DSTF) que é o ramo mais à nascente no processo de Pesquisa, e faz parte da DRIA. Dentro do DSTF, foi realizada a maioria dos trabalhos de exploração científica do Grupo. É lá também que são avaliadas as tecnologias ditas “em ruptura”, ou seja, que podem representar uma inovação com relação a tudo que é adaptado atualmente para os veículos. O organograma mostrado na fig. 2 simplifica a estrutura da Empresa.

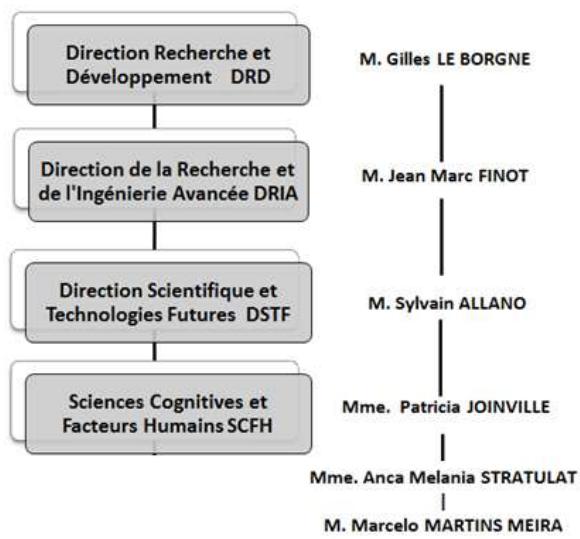


Figura 2 : Posicionamento da equipe Ciências Cognitivas e Fatores Humanos no organograma do Grupo.

A missão do serviço SCFH é levar em conta os fatores humanos na concepção de produtos do Grupo a fim de facilitar a definir e conceber o conforto do ambiente veicular, as interações homem-veículo, a qualidade. Por exemplo,

estudos sobre a percepção do barulho do bater das portas do veículo, a sensação de calor dentro do carro, o “cheiro de novo” foram realizado no SCFH.

Além das atividades sobre os fatores humanos realizados dentro do departamento, essa equipe realiza trabalhos de Pesquisa em colaboração com o *Centro de Realidade Virtual* do Grupo, utilizando suas ferramentas para avaliar e validar os diferentes estudos sobre os fatores humanos. Uma das ferramentas do *Centro de Realidade Virtual* é o simulador dinâmico de direção SHERPA².

2.2 O simulador dinâmico de direção SHERPA²

Os simuladores de direção constituem uma tecnologia moderna e mostraram-se muito úteis às montadoras automobilísticas pelas seguintes razões:

- Redução de custos e atrasos nas primeiras etapas no processo de prototipagem
- Simulação de situações perigosas com condutores reais e sem risco aos condutores
- Ambiente de direção ajustável e reproduzível

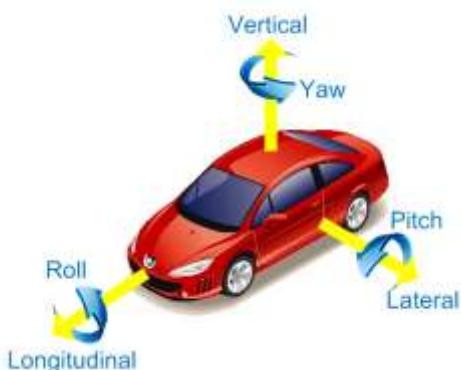


Figura 3 : Seis graus de liberdade de um veículo: três translações segundo X, Y e Z, e os três ângulos de Euler.

Graças à sua complexidade, os simuladores de direção permitem explorar diversos domínios de Pesquisa que são difíceis de serem estudados em condições normais. Por exemplo, eles possibilitam o estudo da interação entre diferentes informações sensoriais (visuais, auditivas, vibratórias, inerciais) para uma situação de direção dada (por exemplo, a frenagem) e assim estudar o comportamento do condutor e sua percepção do movimento.

O grupo PSA Peugeot Citroën construiu seu próprio simulador dinâmico de direção, SHERPA² (Simulador Híbrido de Estudos e de Pesquisa da PSA Peugeot Citroën para Automobilística) em 2007. SHERPA² é um simulador que permite a reprodução dos movimentos de um veículo real. Ele é constituído de um meio veículo Citroën C1 (apenas assentos da frente), como mostrado na fig. 4, que é situado dentro de uma cabine e sobre um hexápode. O hexápode é constituído de um conjunto de 6 cilindros elétricos capazes de restituir os movimentos segundo os três ângulos de Euler assim como pequenas translações ao longo dos eixos X,Y e Z, como mostrado na fig. 3. O hexápode, por sua vez, é colocado sobre dois trilhos X-Y, como mostrado na fig. 4. Adicionando os trilhos ao hexápode, o simulador apresenta oito graus de liberdade e isso permite atingir valores de aceleração mais elevadas que as acelerações obtidas apenas usando o hexápode. A figura 5 representa um esquema 3D do simulador de direção SHERPA².



Figura 4 : Vista externa e do interior do simulador dinâmico de direção SHERPA².

No interior da cabine do simulador, alto-falantes são utilizados para reproduzir o som do veículo assim como o som do meio ambiente (por exemplo, o som de outros veículos que passam pela estrada). Além disso, telas cobrem parcialmente o campo visual do condutor (120°) e têm como objetivo reproduzir a cena visual de direção, como a estrada, as árvores, os outros veículos. As restituições visuais, sonoras e dinâmicas permitem aumentar a impressão de realismo dos condutores quando da direção do simulador.

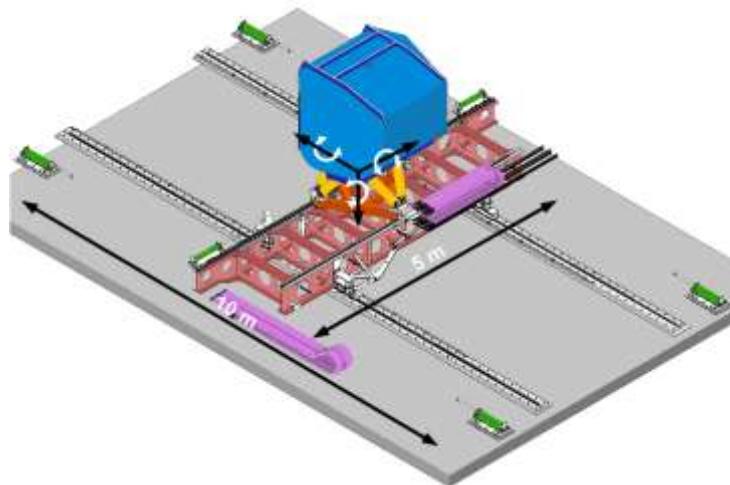


Figura 5 : Esquema 3D do simulador de direção SHERPA².

Os trilhos X-Y têm dimensão em termos de tamanho útil de 10 m x 5,0 m. Os deslocamentos sobre os trilhos são limitados em velocidade a 3 m/s e em aceleração 5 m/s². A tabela 1 resume as características dos trilhos.

Translação devido aos trilhos		
	X	Y
Deslocamento Máximo	±5.0m	±2.5m
Velocidade Linear Máxima	±3.0 m/s	±3.0 m/s
Aceleração Linear Máxima	±5.0 m/s ²	±5.0 m/s ²

Tabela 1 : Limites mecânicos dos trilhos do simulador SHERPA²

O hexápode é constituído de 6 cilindros elétricos ligados a uma plataforma hexagonal. Os cilindros permitem a movimentação da cabine como mostrado na tabela 2.

Translação do Hexápode		
	X	Y
Deslocamento Máximo	±30.0 cm	±26.5 cm
Velocidade Linear Máxima	±0.70 m/s	±0.65 m/s
Aceleração Linear Máxima	±7.5 m/s ²	±7.5 m/s ²

Rotação do Hexápode		
	X	Z
Deslocamento Máximo	±18°	±18°
Velocidade angular Máxima	±20°/s	±20°/s
Aceleração Angular Máxima	±300°/s ²	±300°/s ²

Tabela 2 : Limites mecânicos do hexápode do simulador SHERPA²

2.2.1 A lei de controle do simulador

Todos os simuladores de direção são controlados por algoritmos complexos que lhes permitem de se deslocar segundo todos seus graus de liberdade levando em conta suas limitações mecânicas e tecnológicas. No entanto, os simuladores têm limitações impostas pelo comprimento dos trilhos X-Y e pelos movimentos do hexápode, isto é, os simuladores são incapazes de reproduzir exatamente os mesmos valores de aceleração produzidos por um veículo real. Portanto, devem-se encontrar maneiras de ir além dessas limitações mecânicas. Para tanto, os algoritmos que controlam os simuladores de direção usam truques técnicos baseados em fenômenos cognitivos. Descoberto nos anos 60 e muito usado na década de 90, o algoritmo de *washout* é atualmente o algoritmo mais conhecido para o monitoramento e controle de simuladores de direção.

O algoritmo de *washout* baseia-se na ambiguidade basculamento/translação do sistema vestibular, como apresentado por Mars (2001) e Prieur (2004). Esta ambiguidade é devida ao fato de que o cérebro humano não é capaz, quando submetido a determinadas condições (ou seja, na escuridão total), de distinguir um basculamento de uma aceleração linear como mostrado na fig. 6. Assim, uma inclinação pode ser interpretada como uma aceleração longitudinal. Da mesma forma, uma aceleração longitudinal pode ser vista como um basculamento. O algoritmo de *washout* tem como um objetivo combinar basculamentos e acelerações lineares a fim de reproduzir uma aceleração desejada.

Para reproduzir uma aceleração desejada, o algoritmo de *washout* trata separadamente as acelerações lineares e as velocidades angulares. As primeiras são transcritas de duas maneiras diferentes no movimento do simulador: as acelerações a altas frequências são reproduzidas por movimentos lineares (translação sob os trilhos), enquanto as baixas frequências são reproduzidas pelo basculamento da plataforma de Stewart. Este funcionamento é descrito no diagrama da fig 7.

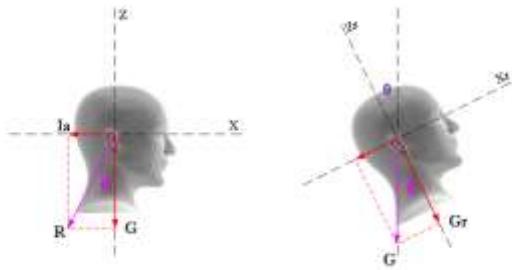


Figura 6 : Duas situações equivalentes do ponto de vista perceptivo constituem o princípio do algoritmo de *washout*. A soma da força inercial devida à aceleração linear (I_a) e de gravidade tem como resultado o vetor de aceleração gravito-inercial. O sistema vestibular não consegue distinguir essa situação de um basculamento da cabeça onde o vetor de gravidade corresponde à aceleração gravito-inercial. Assim, segundo Holly e McCollum (1994) uma aceleração linear pode ser simulada ou por translação, por basculamento ou pela combinação desses dois elementos.

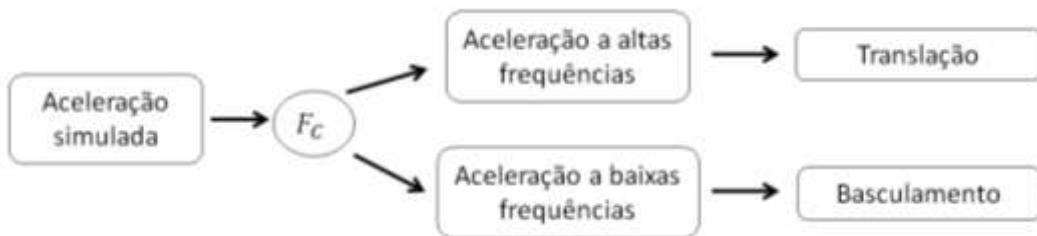


Figura 7 : O limite de frequência das acelerações que serão reproduzidas por basculamento e por translação nos trilhos é determinado frequência de corte .

O algoritmo utiliza um limite para determinar as altas frequências e as baixas frequências e assim desacoplar o movimento do simulador em translação e basculamento. Esse limite é chamado de *frequência de corte*, F_c mostrado no diagrama da fig. 7. Atualmente, o valor da frequência de corte é em torno de 0,6 Hz. Este valor foi determinado empiricamente em função dos limites físicos do simulador Sherpa². As acelerações a alta frequência são reproduzidas por meio da translação nos trilhos, enquanto que as acelerações a baixa frequência são reproduzidas pelo basculamento do hexápole.

A função de *washout*, segundo Bexroth (2004), tende a trazer o hexápole para uma posição central ou neutra após cada movimento, o que justifica seu nome *washout* (*limpando* a posição atual (retorno ao ponto neutro) a fim de poder recomeçar rapidamente um novo movimento).

O algoritmo de *washout* é integrado à lei de comando e controle (LCC) do simulador. A fig. 8 mostra quais são os dados de entrada e saída da LCC e como é reproduzida a restituição do movimento em função das ações do condutor.



Figura 8 : Esquema simplificado sobre o funcionamento do simulador de direção. A posição de controle é obtida integrando duas vezes a aceleração.

Além do algoritmo de *washout*, a LCC leva em conta o fato de que a sensação da aceleração é superestimada quando comparada à sensação de um condutor para uma aceleração de mesmo módulo reproduzida por um veículo real. De fato, de acordo com Stratulat e al. (2011), trabalhos de pesquisadas realizados recentemente na PSA Peugeot-Citroën em parceria com o *Instituto de Ciências do Movimento de Marseille* mostraram que as acelerações longitudinais são superestimadas no simulador de direção. De acordo com esses estudos, é necessário determinar um coeficiente inferior a um pelo qual se multiplica a aceleração real a fim de obter uma aceleração simulada pelo simulador menor. Esse coeficiente é chamado *Fator de Escala*. A figura 9 mostra o funcionamento do fator de escala. A curva à esquerda representa um perfil de “Aceleração Real”, ou “Aceleração a ser simulada”, produzida por um veículo real devido à ação do condutor sobre o pedal de aceleração. Tal aceleração representa um dado de saída do modelo dinâmico de veículo, como mostrado na fig. 8.

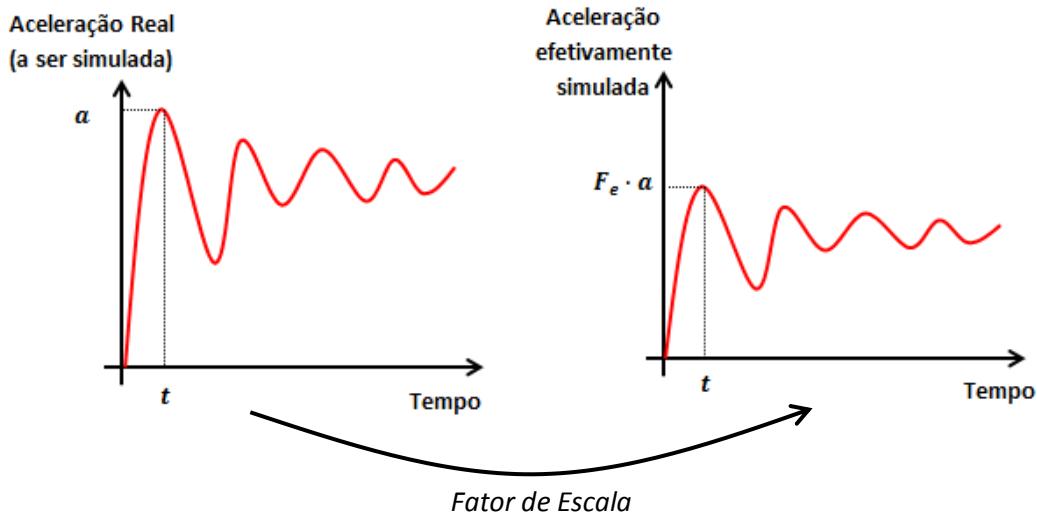


Figura 9 : Efeito da superestimação das acelerações é contrabalanceado pelo Fator de Escala

O fator de escala atenua esse perfil de aceleração e a aceleração simulada é obtida como resultado da multiplicação desse coeficiente pela aceleração real. Assim, a aceleração simulada corresponde à aceleração efetivamente reproduzida pelo simulador. Na figura 9, o fator de escala utilizado é constante, mas ele pode evoluir em função da amplitude da aceleração real, o que é chamado um fator de escala linear. No entanto, a literatura específica da área de simulação de direção recomenda um fator de escala constante e igual a 0,6. Atualmente, para o simulador de direção Sherpa², utiliza-se um fator de escala linear:

$$F_e(\ddot{x}) = C_1 - C_2 \cdot \ddot{x} \quad (1)$$

Onde C_1 e C_2 são constantes determinadas empiricamente em função das limitações mecânicas do simulador Sherpa² (os valores atuais por volta de $C_1 = 0,5$, $C_2 = 0,02$) e \ddot{x} é a aceleração proveniente do modelo dinâmico de veículo.

As explicações do algoritmo de *washout*, da frequência de corte e do fator de escala são necessárias a fim de melhor se entender o funcionamento da lei de controle. Tal lei apresenta como dado de entrada a aceleração real, ou seja, a aceleração reproduzida por um veículo em consequência da ação do condutor sobre o pedal de aceleração e que representa um dado de saída do modelo de dinâmica veicular (MDV). Assim para uma mesma configuração de ângulo de

volante, marcha, curso do pedal de aceleração tanto para o carro real quanto para o virtual (simulador), deve-se obter uma mesma aceleração em ambos os casos. Contudo, do ponto de vista perceptivo, a aceleração produzida pelo veículo pode ser sentida pelo condutor de uma maneira diferente. Atualmente, não existem estudos que comparam a **aceleração real do veículo** com a **aceleração sentida em veículos reais**. No entanto, segundo Stratulat e al. (2011), sabe-se que a **aceleração sentida em simuladores** é superestimada em relação à **aceleração efetivamente reproduzida pelo simulador**. Levando em conta essa superestimação, a lei de controle multiplica a aceleração real por um fator de escala a fim de obter a_2 , aceleração efetivamente simulada. Em seguida, utilizando filtros passa-alta e a frequência de corte, a lei de comando reproduz a parcela de a_2 a altas frequências em translação (a_{2T}) e a parcela de a_2 a baixas frequências em basculamento (a_{2B}). Evidentemente, somando-se as acelerações a_{2B} et a_{2T} , encontra-se a_2 . A figura 10 apresenta o esquema de funcionamento da lei de controle.

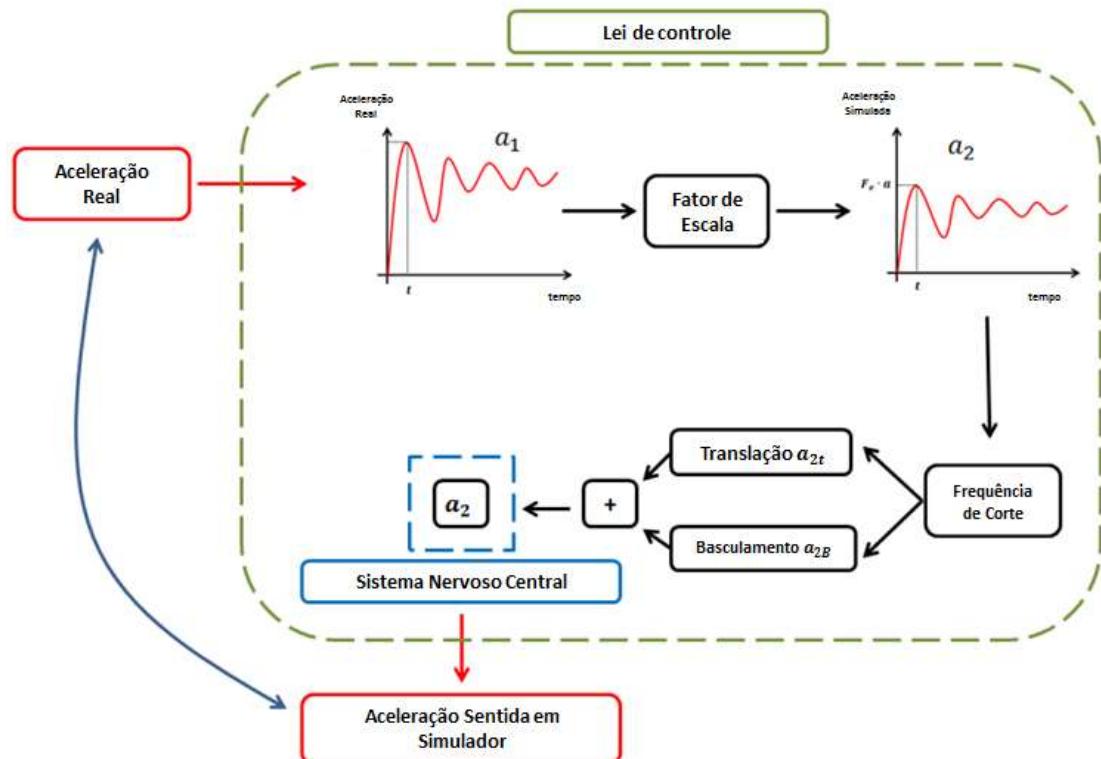


Figura 10 : Esquema conciso da lei de comando e controle (LCC) do simulador Sherpa²

Como resultado da lei de controle, o condutor deve perceber a *aceleração sentida em simulador*, como mostrado no esquema da fig. 10. O objetivo de um simulador de direção é reproduzir a sensação da aceleração que um condutor teria num veículo real para uma mesma configuração de pedal, ângulo volante, e marcha do carro. Assim, o simulador não tem como objetivo reproduzir exatamente o mesmo módulo de aceleração que um veículo real teria, mas sim a percepção dessa aceleração.

2.2.2 Trabalhos recentes sobre a percepção do movimento em simulador de direção

Presentemente, a maneira de utilizar os movimentos de basculamento e de translação na reprodução das acelerações longitudinais em simulador de direção ainda está em discussão.

Os trabalhos recentes de Stratulat e al. (2011) sobre a percepção de movimentos longitudinais em simulador dinâmico de direção mostram que, para a direção passiva (voluntários são submetidos a um cenário de direção pré-definido), a percepção da desaceleração varia em função da relação de basculamento/translação que compõe a amplitude de desaceleração total do simulador.

Efetivamente, para frenagens compreendidas entre 0 et -1 m/s², basta utilizar somente translação com um coeficiente inferior a 1. Para desacelerações compreendidas entre -1 m/s² e -4 m/s² é necessário combinar tanto basculamento quanto translação. Para de desacelerações menores que -4 m/s² deve-se utilizar basculamento puro, mas também utilizando um fator de escala inferior a 1. A figura 11 resume o comportamento descrito acima.

Por outro lado, no tocante da sensação das acelerações positivas em simulador de direção, Stratulat (2011) mostra que elas são superestimadas pelos condutores e que sua percepção não depende da combinação entre basculamento

e translação (logo, a percepção não depende da frequência de corte). Em contrapartida, a superestimação é tão mais forte a medida que se aumenta o módulo da aceleração, como mostrado na fig. 12. Assim, o fator de escala deve variar em função da intensidade da aceleração.

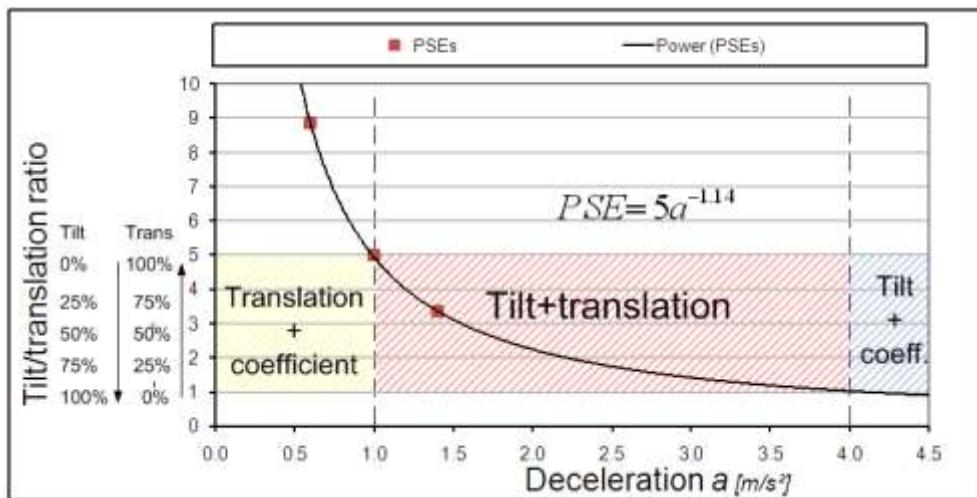


Figura 11 : De acordo com estudos realizados até o momento atual, a maneira de reproduzir a sensação correta para a frenagem em função da razão basculamento/translação deve seguir a curva apresentada acima, segundo Stratulat e al. (2011).

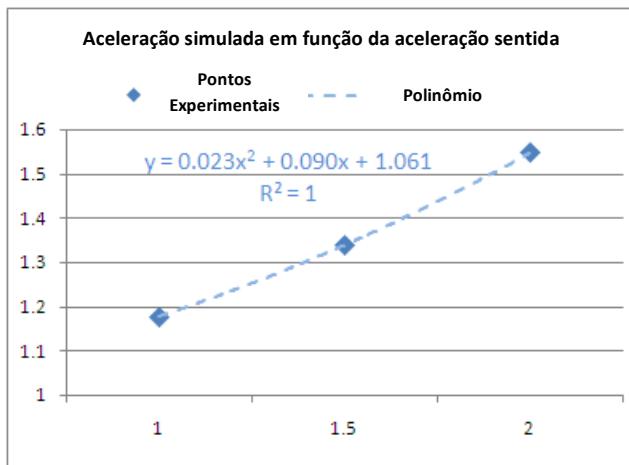


Figura 12 : A aceleração sentida em simulador e aceleração simulada segundo Stratulat (2011)

Os trabalhos apresentados anteriormente foram realizados para uma direção passiva. Contudo, a maioria das simulações é feita para uma conduta interativa, que é definida como aquela que leva em conta os comandos do condutor para controlar o veículo. Como consequência, um projeto foi elaborado para estudar a percepção das acelerações longitudinais em conduta interativa, o que

permitirá de melhorar a sensação das acelerações reproduzidas no simulador, aperfeiçoando a lei de controle e comando (LCC).

2.3 Projeto sobre a sensação de aceleração longitudinal em simulador de direção

Um projeto sobre o aperfeiçoamento da sensação da aceleração longitudinal em simulador de direção foi realizado em parceria com o *Instituto de Ciências de Movimento de Marseille*. Essa melhoria busca aproximar a sensação da aceleração longitudinal em simulador da sensação experimentada em veículo real, ou seja, busca aperfeiçoar a lei de controle e comando. Para tanto, foi necessário realizar testes comparando a direção real e a direção em simulador variando os parâmetros de simulação, como a frequência de corte e o fator de escala. Dada a complexidade das situações possíveis de direção em simulador, o projeto levará em conta apenas uma fase da direção, a fase denominada “decolagem”, que é a situação de condução quando se acelera de 0 km/h até 30 km/h. Além disso, essa situação foi escolhida pois, no momento presente, ela apresenta uma das situações de direção menos realistas para o simulador Sherpa².

2.3.1 Objetivos do estudo

Os objetivos do projeto sobre a percepção da aceleração longitudinal consistem a:

- determinar o fator de escala F_e e a frequência de corte F_c que possibilitam reproduzir a sensação de aceleração longitudinal mais próxima daquela experimentada em veículo real, o que será chamada de **situação de referência**.
- determinar a influência do fator de escala e da frequência de corte na percepção da aceleração longitudinal e comparar a sensação da aceleração longitudinal para a direção passiva e direção interativa.

2.3.2 Metodologia do projeto

Como o estudo consiste na comparação entre percepção dos condutores em veículo real e em simulador de direção, os testes serão efetuados em duas etapas e utilizando dois equipamentos distintos:

- veículo do Grupo PSA Peugeot Citroën, um **Citroën C3 HDI 70HP**, com câmbio manual;
- simulador dinâmico de direção **SHERPA²**.

O teste foi realizado em duas etapas, uma primeira em veículo real, e uma segunda em simulador.

- **Tarefa em veículo real:** Num primeiro momento, os voluntários realizam uma fase de familiarização com o veículo real. Essa fase foi feita ao redor do Centro Técnico de Vélizy. Em seguida, os participantes do estudo dirigiam sobre uma via sem tráfego que pertencia ao próprio Centro Técnico da PSA. Sobre esta via reta, os participantes deveriam acelerar de 0 km/h até 30 km/h sem trocar de marcha. Depois, eles deveriam manter a velocidade constante a 30 km/h durante 2 segundos e enfim frearem devagar até a parada total do veículo. Os voluntários eram pedidos para realizar acelerações como eles o fariam em seus próprios veículos e deveriam repetir essa aceleração até que eles a tivessem memorizado e conseguissem repeti-la (situação de referência). Uma vez a aceleração memorizada, os voluntários realizavam 20 acelerações no veículo real. Esses perfis de aceleração foram levados em conta na análise dos dados.
- **Tarefa no simulador:** Logo após a fase em veículo real, os voluntários realizam a fase em simulador. A fase de familiarização com o simulador é feita em um cenário visual que foi modelizado especialmente para esse projeto. Esse cenário é a reprodução fiel da via sobre a qual os voluntários realizam a fase em veículo real. Durante a fase de familiarização no

simulador, foi utilizada a Lei de Controle atual ($C_1 = 0.5$, $C_2 = 0.03$ e $F_c = 0.6 \text{ Hz}$). Em seguida, os voluntários devem reproduzir no simulador a mesma aceleração da situação de referência (ver abaixo) e comparar aos pares as condições de teste definidas na tabela 3. Eles devem responder duas perguntas a cada par de condições: “**Qual a aceleração mais próxima da experimentada em veículo real?**” e “**Dentre as duas acelerações, qual é a mais forte?**”.

A figura 13 descreve o desenrolar das sessões de teste.

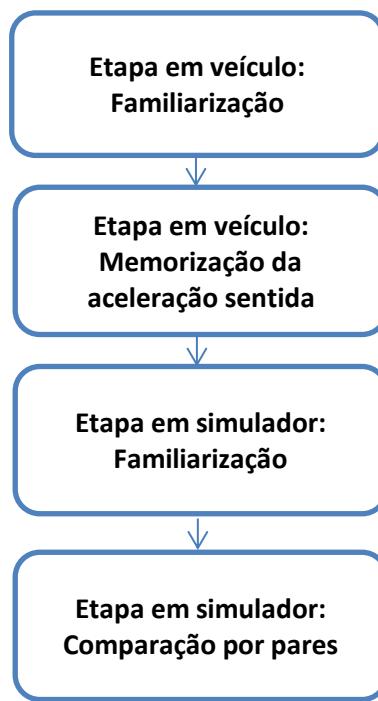


Figura 13: Esquema explicativo das sessões de teste

2.3.3 Protocolo

A fim de aperfeiçoar a lei de controle do simulador de direção, três parâmetros são modificados durante o estudo para encontrar qual a combinação deles permitirá reproduzir uma sensação de aceleração longitudinal mais próxima daquela experimentada na realidade. Os parâmetros são:

- Constantes C_1 e C_2 do fator de escala (ver equação 1)
- A frequência de corte F_c

Cada tripla de parâmetros (C_1, C_2, F_c) determina uma **condição de teste**, ou seja, um comportamento do simulador gerando uma resposta particular segundo a simulação da aceleração realizada. O objetivo é otimizar esses parâmetros tendo como base a medida da sensação da aceleração para cada condição de teste definida. As condições do estudo foram determinadas fixando duas modalidades para cada um dos três parâmetros, como mostrado na tabela 3.

Parâmetros de Simulação	
C_1	0.4 e 0.5
C_2	0.0 e 0.05
Frequência de corte	0.6 e 1.5

Tabela 3 : Parâmetros de simulação da Lei de Controle do projeto sobre a aceleração longitudinal

Como cada parâmetro apresenta duas modalidades, obtém-se no total $2^3 = 8$ **condições de teste**. As 8 condições de teste são avaliadas por comparações por pares, ou seja, $\frac{8 \cdot 7}{2} = 28$ pares a serem testados. Todos os pares de condição são realizados. A ordem de apresentação dos pares é contrabalanceada dentro do próprio grupo de voluntários de modo que para duas condições de teste A e B, os pares AB e BA são vistos o mesmo número de vezes dentro do grupo de participantes, mas não são vistos por um mesmo voluntário (considerando assim que as respostas às perguntas que seriam dadas ao par AB seja a mesma que a resposta dada ao par BA. Logo, cada voluntário realiza AB ou BA). Os pares são apresentados segundo uma ordem pseudoaleatória. Esse experimento é repetido três vezes (em três sessões diferentes, mas apresentando a mesma ordem de pares de uma sessão a outra para um mesmo voluntário), ou seja, obtém-se $28 \times 3 = 84$ comparações no total para cada voluntário. Para cada par de condições de teste proposto, o voluntário deve avaliar qual é a condição cuja sensação de aceleração é mais próxima daquela experimentada na situação de referência e qual das duas condições a sensação de aceleração é mais forte.

Para a análise dos dados, o método de Bradley Terry Luce foi utilizado, conforme apresentado por Dittrich e Hatzinger. Esse método permite que se estabeleça uma ordem partindo da condição de teste menos realista até a condição mais realista. O método de Bradley Terry Luce é um método antigo utilizado há anos por pesquisadores de domínios diversos. Esse procedimento robusto permite de colocar em ordem os atributos ou características de um jogo de elementos (no caso do estudo em questão, o método colocará em **ordem de realismo as oito condições de teste**). Os elementos do jogo são apresentados aos voluntários dois a dois. Os voluntários, por sua vez, devem escolher para **cada par** qual o elemento melhor satisfaz a característica analisada (comparação por pares). Como resultado do método de escolha por pares, obtém-se uma nota para cada elemento do jogo (no caso, para cada condição de teste) segundo uma escala.

O modelo de Bradley Terry Luce define a probabilidade de um objeto j O_j seja preferido a um objeto k O_k numa comparação dada (jk), para j diferente de k , como:

$$p(O_j \succ O_k | \pi_j, \pi_k) = \frac{\pi_j}{\pi_j + \pi_k} \quad (2)$$

Onde π_j e π_k são números positivos que descrevem a posição dos elementos numa escala de preferência. O número de todos os pares possíveis de um jogo de J elementos é $\binom{J}{2} = \frac{J(J-1)}{2}$. Por exemplo, dado $J = 4$ elementos nomeados 1, 2, 3 e 4, existem 6 pares de elementos (12), (13), (14), (23), (24), (34).

A figura 14 esquematiza o funcionamento do método de Bradley Terry Luce. É importante ressaltar que após a realização de cada sessão de teste para um voluntário dado, uma nota é obtida para cada condição. Assim, o objetivo de realizar três sessões de teste apresentando a mesma ordem de pares é de verificar a consistência das respostas dos voluntários às perguntas. Além disso, foram

utilizados 30 voluntários para verificar a consistência das respostas de um participante a outro.

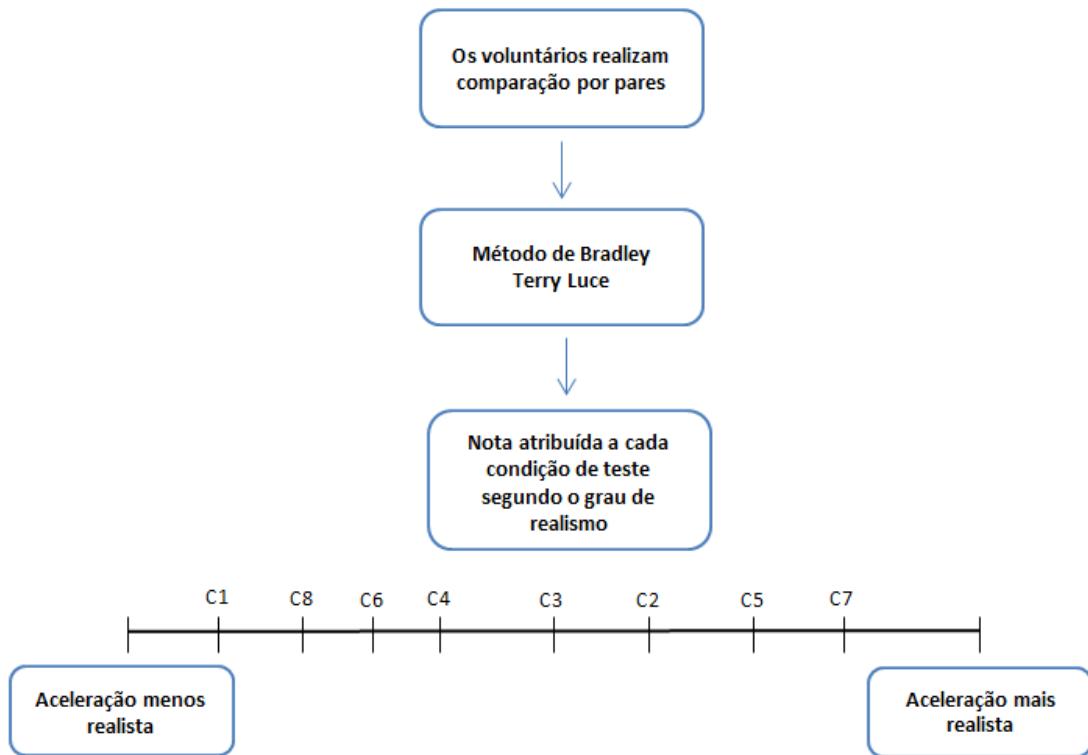


Figura 14: O método de Bradley Terry Luce permite de ordenar as 8 condições de teste segundo seu realismo. Uma escala dessa é obtida por sessão e por voluntário. Assim, como existem 30 voluntários que realizam 3 sessões, têm-se globalmente 90 escalas como mostrados na figura.

Os voluntários que participaram nesse projeto eram colaboradores do Grupo PSA. Eles foram classificados de duas maneiras diferentes: ingênuos e peritos.

Num primeiro momento, o estudo será realizado com **voluntários ingênuos**, ou seja, são participantes que não têm conhecimento de dinâmica veicular e de simulação de direção. O primeiro objetivo do estudo é de analisar o comportamento de voluntários ingênuos em veículo real a fim de determinar se existem diversos estilos de aceleração durante as decolagens. O estilo de aceleração é definido pelo perfil de aceleração produzido pelos voluntários ingênuos em veículo real. Se existem vários tipos de perfil, devem-se determinar classes de perfil (ou seja, perfis com as mesmas características) que serão testados por **voluntários peritos da dinâmica veicular**. Trata-se de voluntários capazes de quantificar, notar e comparar diferentes acelerações. O segundo objetivo da fase com os voluntários

ingênuos é determinar um jogo de parâmetros da lei de comando mais realista, que será validada em seguida pelos peritos.

Para a segunda fase do estudo com voluntários peritos, a ser realizada em 2014, as 8 condições de teste serão avaliados no simulador de duas maneiras. Primeiro, por comparação por pares, como na fase de testes com voluntários ingênuos, onde o voluntário expert deve avaliar qual aceleração é mais próxima daquela experimentada na situação de referência e qual a mais forte. Num segundo momento, os especialistas devem quantificar, para cada condição do teste, a diferença sentida em relação à aceleração realizada na situação de referência (quanto menor a nota, respectivamente maior, mais o voluntário julga que o estímulo é próximo, respectivamente distante, da situação de referência). A escala de notas é limitada de 0 (idêntico ao da situação de referência) a 10 (muito diferente). Os especialistas devem repetir o processo acima tantas vezes quanto o número de classes de perfil de aceleração especificada na fase em veículo com voluntários ingênuos.

3 COLABORAÇÃO DO PRESENTE TRABALHO AO PROJETO SOBRE O APERFEIÇOAMENTO DA LEI DE CONTROLE DO SIMULADOR DE DIREÇÃO SHERPA²

Essa parte do presente texto apresenta a contribuição do TCC ao projeto apresentado na seção 2.3. Com o objetivo de que as comparações perceptivas entre as acelerações produzidas em veículo real e em simulador de direção sejam validas, deve-se utilizar o mesmo tipo de veículo tanto no simulador quanto na realidade. Assim, do ponto de vista de dinâmica veicular, o carro utilizado no simulador é idêntico ao veículo real (o modelo virtual de dinâmica veicular é construído seguindo o comportamento dinâmico do veículo real). Embora esse modelo já existisse na base de dados do simulador, há outras informações sensoriais que devem corresponder à realidade, como o ruído produzido pelo motor no habitáculo do veículo. Dado que o som do habitáculo do C3 HDI 70HP não existia na base de dados acústicos do simulador, **o primeiro objetivo do trabalho foi integrar o ruído motor do veículo ao simulador de direção.**

Uma vez os equipamentos prontos, foi iniciado o estudo por meio da realização dos testes pelos voluntários. Dada a duração longa dos testes (6h por voluntário), um plano experimental foi implantado a fim de aperfeiçoar o tempo de realização de teste. Assim, um experimentador assistia os voluntários no veículo real. **O segundo objetivo do trabalho é assistir os participantes realizarem os testes no simulador.**

Ao fim dos testes, os dados recolhidos são pós-tratados e analisados por especialistas em Estatística e Análise de Dados. **O terceiro objetivo do trabalho é definir métodos algorítmicos e logísticos que facilitem a aquisição, o pós-tratamento e a análise dos dados, assim como determinar métricas que possibilitem a comparação de diversos perfis de aceleração.**

3.1 Objetivo 1 – Integração do ruído habitáculo ao simulador de direção

O ruído percebido dentro do habitáculo de um veículo é composto de duas fontes principais: o ruído devido ao grupo motopropulsor (GMP) e o ruído devido à aerodinâmica e ao rolamento.

- **Ruído GMP** – O GMP comprehende o motor assim como câmbio. O ruído motor é complexo de ser estudado pois é resultado de uma radiação acústica proveniente de diversas fontes. No entanto, para simplificar, considera-se que seu espectro seja diretamente ligado ao período dos eventos que ocorrem no ciclo motor (ou seja, devido à rotação do virabrequim) e mais especificamente às explosões nos cilindros.
- **Ruído aerodinâmico e de rolamento** – Embora o motor participe fortemente do ruído global no habitáculo do veículo, ele não é a única contribuição sonora existente. A acústica do veículo é igualmente determinada por outras contribuições não desprezíveis: o ruído de rolamento (devido à interação pneu – asfalto) e o ruído aerodinâmico (resultado do escoamento de ar em torno da carroceria). O ruído de rolamento e o ruído aerodinâmico são importantes pois, a uma velocidade elevada, suas contribuições predominam na percepção do ruído habitáculo global. Para uma velocidade inferior a 50 km/h, o GMP é considerado como a fonte sonora principal no habitáculo. Acima dessa velocidade, os ruídos de rolamento e o ruído aerodinâmico são predominantes. Para velocidades acima de 100 km/h, o ruído aerodinâmico é o mais importante.

O ruído habitáculo contribui à percepção da dinâmica do veículo, daí a importância que o ruído habitáculo seja coerente com o ruído de um veículo real. Assim, para garantir melhores condições de simulação, devemos integrar o ruído motor produzido pelo motor do veículo ao simulador de direção. Para tanto, deve-

se realizar medidas acústicas com o veículo real em pistas de teste. Essas medidas foram feitas na Ferté Vidame, complexo pertencente ao grupo PSA Peugeot Citroen. Para registrar as medidas, matérias específicos são utilizados, como a cabeça acústica da fig. 15 produzida pela companhia *HEADAcoustics* que permite medir os barulhos do meio ambiente segundo a constituição física da cabeça de uma pessoa. Esse sistema é constituído de dois microfones posicionados dentro das orelhas de um manequim, A cabeça registra o barulho do habitáculo e integra os fatores perceptivos bi neural (registro do som da orelha esquerda e direita). Assim, para realizar essas medidas, a cabeça é posicionada no banco da frente, no lugar do passageiro.



Figura 15 : cabeça acústica utilizada para registrar os ruídos do veículo.



Figura 17 : Tomada diagnóstica do veículo.



Figura 16 : Adaptador CAN-USB.

A orelha que se encontra mais próxima do vidro sofre um fenômeno de reverberação mais forte. A reverberação é a persistência do som numa região embora a fonte sonora original não exista mais, ela consiste de uma mistura de reflexões entre o som e o vidro do carro resultando num som confuso. Sabendo que o som registrado no veículo pela cabeça acústica corresponde ao assento do passageiro, mas que o som reproduzido no simulador deve corresponder ao condutor, deve-se inverter as vias esquerda e direita a fim que a orelha do condutor mais próxima do vidro do carro (orelha esquerda) receba o som registrado pela orelha da cabeça que estava mais próxima do vidro também (orelha direita).

Esses dados acústicos devem ser sincronizados com outras informações que são essenciais para a reprodução do som no simulador: a velocidade do veículo e a rotação do motor (RPM). Essas duas informações são adquiridas via conexão CAN (adaptador CAN-USB conectado à tomada diagnóstica do veículo – ver figuras 16 e 17), junto com a porcentagem de curso do pedal de aceleração. A aceleração do veículo é calculada em seguida derivando-se a velocidade do veículo em tempo real.

Os dados registrados pela cabeça acústica e via CAN são adquiridos via uma central dedicada, o *Octobox* também da empresa *HEADAcoustics* (ver figura 18) conectada a um computador. O registro ocorre a uma frequência de amostragem de 44100 Hz. Essa frequência foi escolhida a fim de poder registrar todas as componentes acústicas do ruído.



Os dados são salvos em formato *.hdf (formato do programa

Figura 18 : Octobox da empresa HeadAcoustics.

HeadAcoustics).

A fim de extrair os dados necessários à simulação, as medidas acústicas foram realizadas seguindo situações de direção específicas.

- **Desaceleração** – Desaceleração a partir da velocidade de 130 km/h até parada completa do veículo, cortando-se o motor e lançando o registro sonoro. O objetivo nesse caso é de registrar somente o ruído aerodinâmico/rolamento (sem o ruído motor) em função da velocidade do veículo.
- **Plena carga em segunda marcha/terceira marcha ou 100% do curso do pedal de aceleração** - Aceleração produzida quando se pisa completamente no pedal de aceleração em segunda marcha ou terceira marcha.
- **75%, 50%, 25% do curso do pedal de aceleração** – Pisa-se no pedal de aceleração até uma porcentagem dada e registra-se o comportamento das medidas mantendo sempre a mesma porcentagem de curso do pedal de

aceleração e mantendo sempre a mesma marcha (geralmente segunda marcha); Para isso, usam-se calços que correspondam às porcentagens de interesse 25%, 50% e 75%.

- **“Retro” ou 0% do curso do pedal de aceleração** – Procura-se atingir a rotação do motor máxima (em torno de 5000 RPM) e em seguida deve-se soltar o pedal de aceleração e iniciar o registro das medidas sem cortar o motor e sem trocar de marcha até parada total do veículo. Essas três medidas são úteis para registrar o ruído GMP em função do curso do pedal de aceleração e da rotação do motor.

Para exportar os dados brutos para outros formatos específicos, utiliza-se o software ARTEMIS. Depois de realizar todas as etapas de exportação de dados, obtém-se:

- **Arquivos de som em formato *.wav** – São arquivos que serão utilizados pelo simulador para que ele possa reproduzir o som do veículo real. Por outro lado, para se servir do som do veículo, é necessário realizar um tratamento dos arquivos *.wav que será explicado em seguida.
- **Níveis do som da relha esquerda e direita em dB** - São arquivos Excel que contêm os níveis de som da orelha esquerda e direita em Decibel (dB). Esses dados serão utilizados para calibrar o volume do som no simulador a fim de obter níveis sonoros próximos aos da realidade.
- **Velocidade e Rotação do motor** – São arquivos EXCEL que contêm a velocidade do veículo e a rotação do motor em função do tempo.

3.1.1 Integração do ruído habitáculo ao simulador de direção

O ruído habitáculo de um veículo é composto pelo ruído GMP e ruídos aerodinâmico e de rolamento. Esses componentes acústicos são distinguidos uns dos outros pelas suas estruturas freqüenciais diferentes mostrados nas fig. 19 e 20. O ruído GMP é um composto de harmônicos, dos quais um é a freqüência fundamental, representado no espectro abaixo pelo harmônico de maior energia (traçado a 40 dB). O ruído aerodinâmico/rolamento é composto por ruído branco na fig. 19.

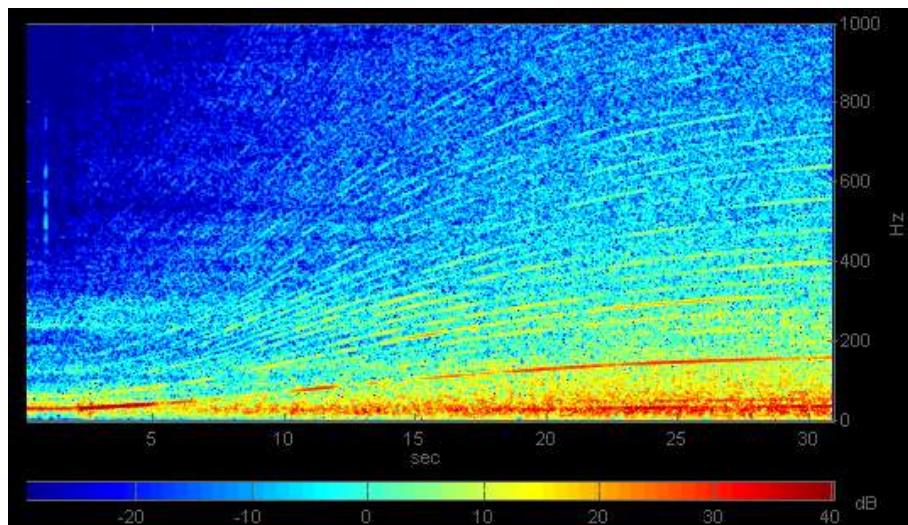


Figura 19 : Espectro do ruído GMP junto com o ruído de rolamento/aerodinâmico.

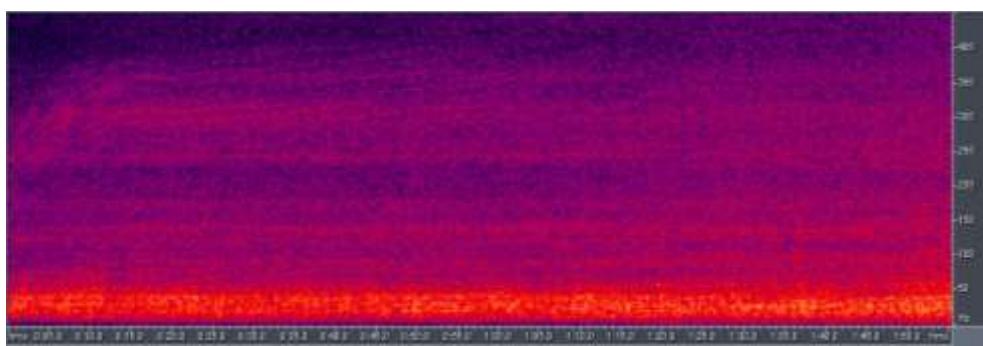


Figura 20 : Espectro do ruído Aerodinâmico/rolamento.

Para integrar o ruído habitáculo ao simulador de direção, as duas componentes do ruído são tratados separadamente e de maneiras diferentes. Assim, para o ruído GMP, utilizam-se as medidas registadas para diferentes cargas

do pedal de aceleração (100%, 75%, 50%, 25%, 0%). De fato, a partir desses dados, uma interpolação é calculada para outros valores do curso do pedal de aceleração. Antes de interpolação, estes dados são pós-tratados para isolar o ruído GMP do ruído aerodinâmico/rolamento. Isto é possível graças a um software específico, chamado *Análise Aditiva*, o que, em primeiro lugar, remove todo ruído branco dos sinais (tudo de origem não harmônica) e em segundo lugar leva em conta apenas os cinquenta primeiros múltiplos da freqüência fundamental (os primeiros cinqüenta harmônicos). Para constituir sinal do ruído GMP a partir de um espectro dado, deve-se somar a frequência fundamental e todos os harmonicos disponíveis (os 50 harmônicos extraídos representados na fig. 21).

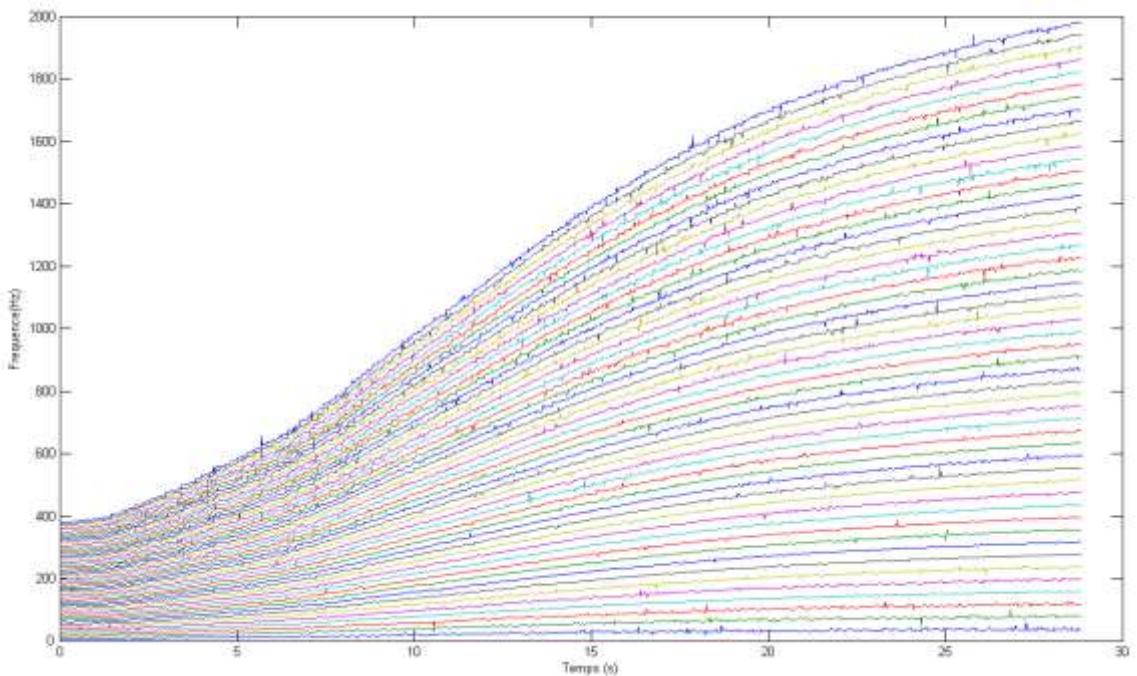


Figura 21 : Curvas de frequência obtidas após a Análise Aditiva. As curvas representam os cinquenta primeiros harmônicos que serão levados em conta para a sintetização do ruído GMP.

A figura 22 mostra a extração do ruído GMP utilizando somente os harmônicos da fig. 21.

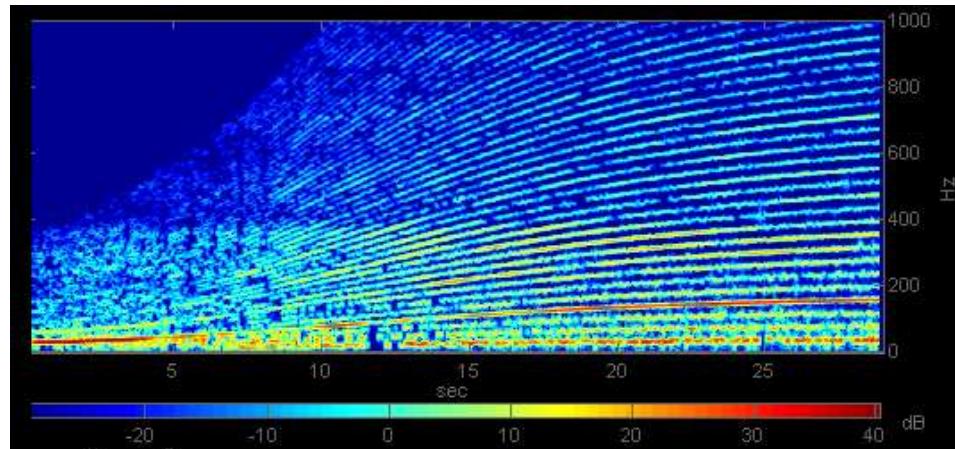


Figura 22 : Espectro do ruído GMP apóas a Análise Aditiva.

Este procedimento é repetido para cada nível de curso do pedal de aceleração (100%, 75%, 50%, 25% e 0%) e para cada orelha (direita e esquerda). No final, obtém-se 10 arquivos que contêm som como mostrado na fig. 22 em função da velocidade do motor. Estes arquivos são utilizados no simulador de direção com um software chamado *Hartis*, o qual interpola a rotação do motor produzida pelo veículo simulado e o conteúdo destes arquivos de áudio.

Para o ruído aerodinâmico e de rolamento usamos as medições registradas durante a fase de desaceleração. No entanto, como as pistas de teste da Ferté Vidame não são longas o suficiente para permitir que o veículo desacelere de 130 km/h a 0 Km/h, devemos repetir os registros três vezes para diferentes faixas de velocidade :

- De 130 km/h até 70 km/h;
- De 80 km/h até 30 km/h;
- De 50 km/h até 0 km/h.

Assim, é necessário juntar os três arquivos *.wav registrados a fim de obter um único arquivo cuja velocidade varie de 130 km/h até 0 km/h. Para tanto, utilizar-se o software *Adobe Audition*, mostrado na fig. 23.

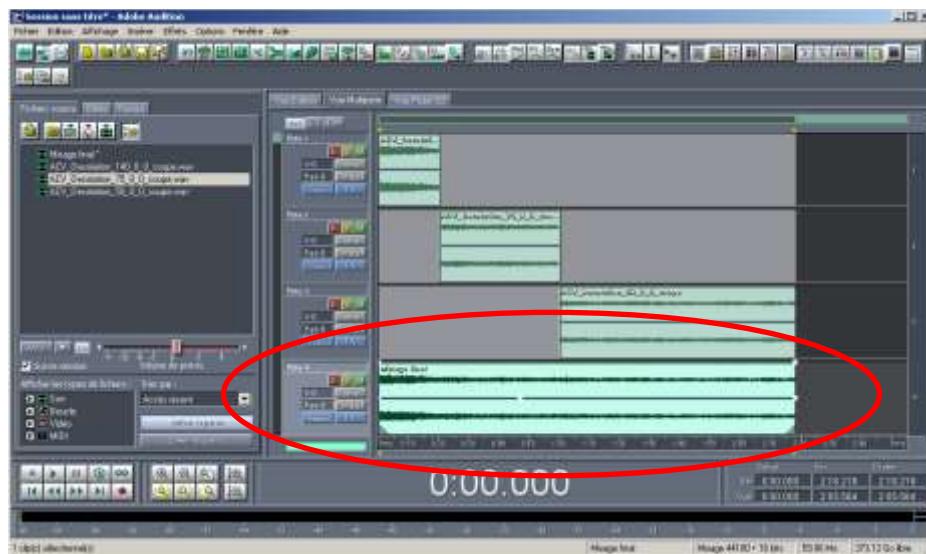


Figura 23 : Software Adobe Audition utilizado para juntar os três arquivos *.wav. A via circulada em vermelho pela elipse é o arquivo resultante da justaposição das outras vias, resultando assim num áudio que corresponde a uma velocidade partindo de 130 km/h até 0 km/h.

Este novo arquivo é usado no simulador pelo software Hartis para interpolar o ruído aerodinâmico /rolamento e a velocidade gerada em tempo real pelo veículo simulado, como mostrado na fig. 26. No entanto, *Hartis* não utiiza toda a curva de velocidade mostrada na fig. 24, mas apenas alguns de seus pontos representantes de sua forma. Além disso, é necessário que a velocidade seja sempre crescente, por isso, em primeiro lugar, precisa-se transpor os dados do arquivo de modo que a velocidade aumente, como mostrado na fig. 25.

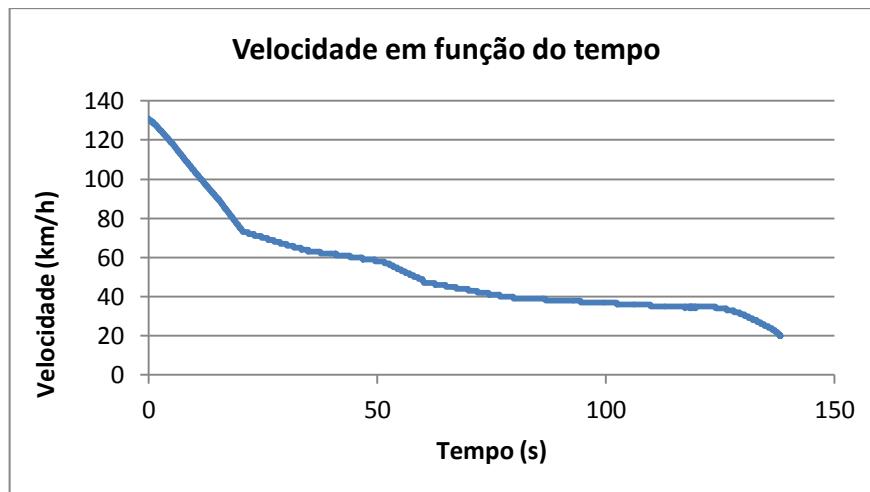


Figura 24 : Curva obtida após junção dos três arquivos gerados em pista de teste.



Figura 25 : Curva de velocidade trasposta em função do tempo e pontos de referência utilizados pelo software Hartis.

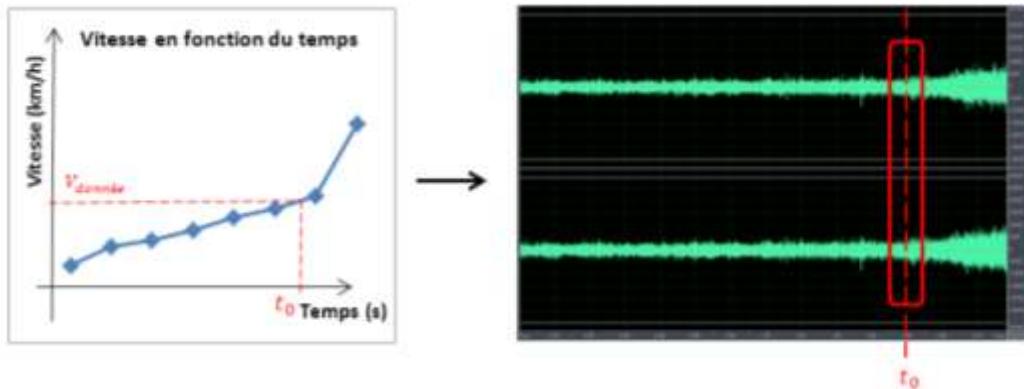


Figura 26 : A partir de um instante t_0 determinado sobre a curva de velocidade, Hartis determina qual será o som reproduzido no simulador.

Enfim, depois ter detalhado como o ruído motor e o ruído de rolamento/aerodinâmico são reproduzidos no simulador, o esquema da fig. 27 resume a integração desses dois tipos de ruído.

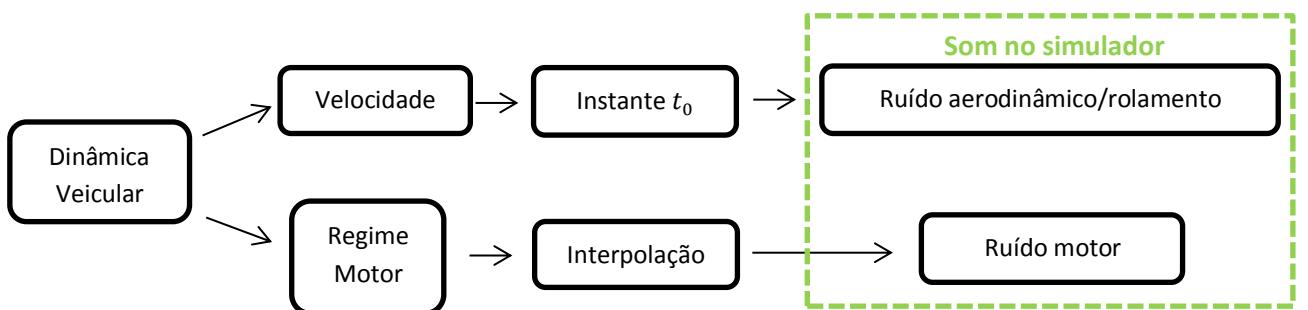


Figura 27 : Esquema explicativo do funcionamento de Hartis.

3.2 Objetivo 2 – Assistência aos voluntários em simulador de direção

Dada a duração relativamente longa do experimento, é essencial ter dois experimentadores durante um dia de testes. Um experimentador é responsável pela fase onde os voluntários conduzem do veículo e, paralelamente, um outro experimentador é responsável pela condução do simulador de direção (ver Tabela 4).

Dia de teste		
08h00	Voluntário 1 - Veículo	
	Voluntário 1 - Simulador	Voluntário 2 - Veículo
10h00	Voluntário 3 - Veículo	Voluntário 2 - Simulador
	Voluntário 3 - Simulador	
12h00	Almoço	
13h00	Voluntário 4 - Veículo	
	Voluntário 4 - Simulador	Voluntário 5 - Veículo
15h00	Voluntário 6 - Veículo	Voluntário 5 - Simulador
	Voluntário 6 - Simulador	

Tabela 4 : Atividades realizadas durante um dia de teste completo.

Uma vez a etapa em veículo terminada, os voluntários voltavam para o simulador. Antes de iniciar os testes, eles tomam conhecimento dos dispositivos de segurança e devem assinar uma folha de comparecimento. Posteriormente, eles começam a fase de familiarização, que consiste de duas idas e voltas na estrada virtual. Uma vez concluída a fase de familiarização, o voluntário começa a fazer comparações entre a direção real e virtual a cada par de condições de simulação. A tarefa do experimentador é o de prestar assistência à pessoa, garantindo que ela repita a tarefa ao longo do experimento, além de garantir que cada voluntário siga o plano experimental determinado para cada um dos participantes., como

mostrado na fig. 28.Caso os voluntários ficassem cansados, pausas eram realizadas ao longo do teste.

Número do par	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14														
Condições	1	2	3	1	8	7	4	1	8	6	5	1	7	6	6	1	8	5	7	1	5	7	1	8	5	6	3	2
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28														
	8	4	2	4	4	7	2	5	6	4	6	2	4	5	7	2	8	3	2	8	3	7	4	3	3	6	5	3

Figura 28 : Plano experimental para um voluntário dado. Cada voluntário realiza 28 comparações, e para cada comparação, eles deveriam escolher qual das acelerações é mais próxima da experimentada no veículo real e qual das acelerações é mais forte.

O experimentador deve também registrar as respostas dos voluntário preenchendo uma tabela que cruza as oito condições em linhas e colunas. A interseção de uma linha e uma coluna representa um par de comparação. Esta tabela será utilizada para a análise de dados pelo método de *Bradley Terry Luce*. Assim, temos duas tabelas por voluntário e por dia de teste: uma tabela com as respostas para a primeira pergunta e uma outra com as respostas à segunda pergunta. Como os voluntários realizam os testes três vezes, obtêm-se 6 tabelas por voluntário. As tabelas devem ser preenchidas com zeros (0) e uns (1). A casa é preenchida com um "1" se o voluntário escolhe a condição da linha como sendo mais realista. A casa é preenchida com "0" se o sujeito prefere a condição da coluna como o mais realista.

Condições	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1							1
2		1			1			0
3	1		1			0	1	
4	0		0	1			1	
5	1		1		1		0	
6	0	0		0		1		
7	1	1			1		1	
8		0	0	1	0	1		1

Figura 29 : Exemplo de tabela preenchida com respostas fictícias dadas por um voluntário.

3.3 Objetivo 3 – Aquisição e tratamento dos dados do estudo

Durante a realização das acelerações pelos voluntários, algumas informações da dinâmica veicular são registradas. No veículo, os dados são:

- Curso do pedal de aceleração e sua derivada em função do tempo;
- Velocidade e sua derivada (aceleração) em função do tempo;
- Regime motor e sua derivada em função do tempo.

No simulador, além das informações da dinâmica veicular mencionadas anteriormente, deve-se registrar os parâmetros de simulação (C_1, C_2, F_c), o número da condição de simulação (de 1 a 8) e o número do par de comparação (de 1 a 28) a fim de facilitar o tratamento dos dados.

No veículo, os dados são registrados em tempo real no formato *.txt via um adaptador CAN conectado à tomada diagnóstica do carro (fig. 16) a uma frequência de amostragem de 100 Hz. Cada arquivo *.txt contém dois perfis de aceleração (ver fig. 30 – curva vermelha) como a pista onde os testes foram realizados era suficientemente longa para a realizações de duas decolagens. Ao fim dos dois perfis de aceleração, os voluntários faziam meia volta. Assim, para cada voluntário, no mínimo 10 arquivos *.txt eram gravados (ou seja, eles realizavam no mínimo 20 acelerações).

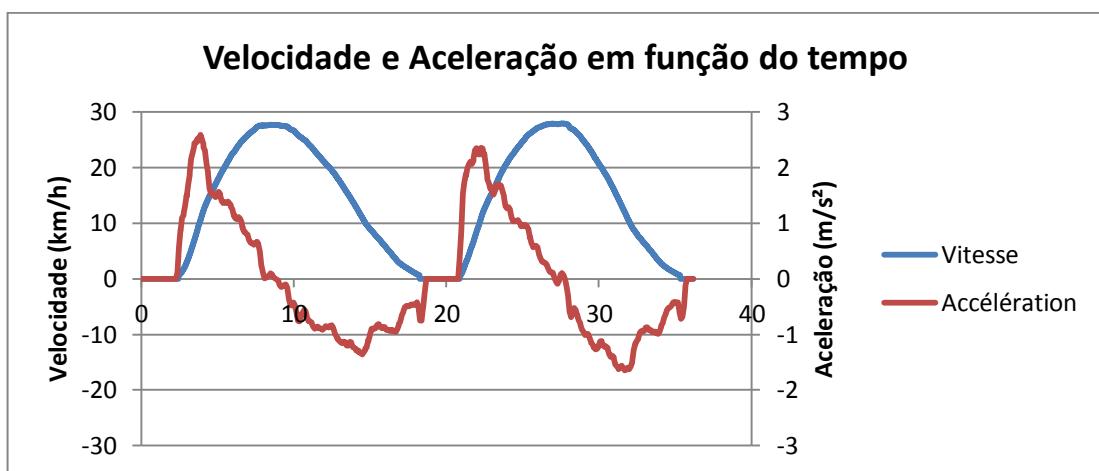


Figura 30 : Dois perfis de velocidade e aceleração contidos em um arquivo *.txt.

No simulador, os dados são registrados em tempo real no formato *.csv via o software de controle do simulador, SCANeR™ (produzido pela *Oktal*) a uma frequência de 100 Hz. O arquivo *.

Como a via virtual onde são realizados os testes é modelada a partir do comprimento de estrada real, ela também permite a realização de apenas duas decolagens. No entanto, os dados são armazenados em um único arquivo desde o início até ao fim da simulação pois esta gravação não pode ser interrompida durante a execução da simulação.

Para evitar meias voltas no simulador, o que pode atrapalhar a percepção do movimento do condutor, um truque visual foi concebido por engenheiros do Sherpa²: a rota virtual é multiplicada no cenário visual e suas partes são justapostos, uma após a outra sobre o percurso do veículo, mas cada peça é girado 180 ° em relação à parte anterior, o que corresponde a metade de uma, como mostrado na fig. 31. No entanto, graças a um truque visual, o motorista vê apenas uma via de cada vez. Para passar de uma parte para a outra, o condutor deve se colocar em uma área pré-definida que está marcada por cones no cenário visual. De fato, o software detecta a posição do veículo e passa para a próxima cena visual (a parte seguinte da estrada rotacionada em 180 °) quando o veículo está parado completamente na área pré-definida. Assim, depois de duas acelerações atingindo a velocidade de 30 Km/h, existe uma terceira que corresponde à colocação do veículo na área pré-definida como mostrado na fig. 32.



Figura 31 : Vista superior das vias justapostas. O quadrado vermelho determina a zona onde o condutor deve parar o veículo a fim de permitir que a cena visual passe à parte seguinte.

Enfim, o tratamento e a análise dos dados, assim que a exportação dos dados em *.mat ou *.xls é feita com o software *Matlab*

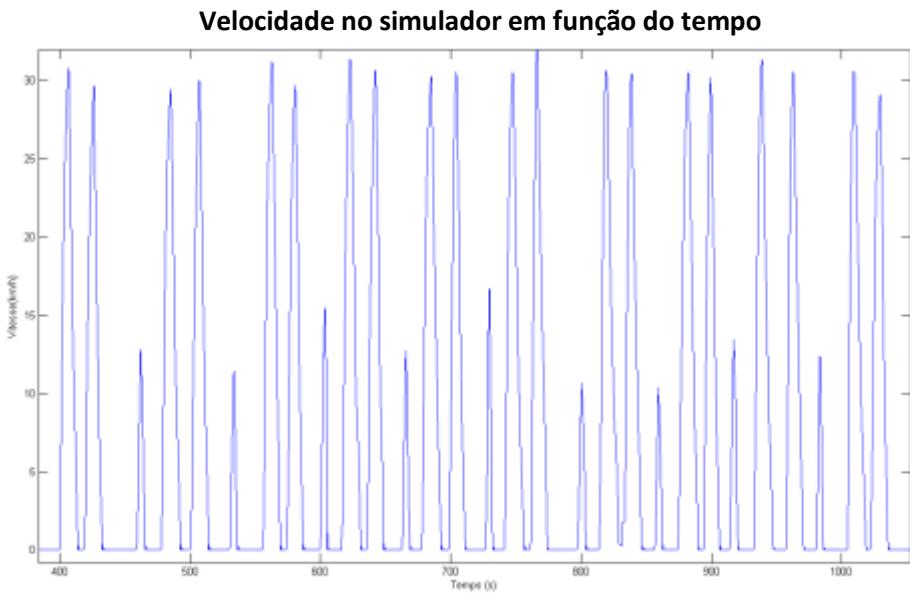


Figura 32 : Registro dos perfis de velocidade no simulador.

3.3.1 Rotinas em *Matlab*

Como os dados brutos do veículo e do simulador são armazenados em diferentes formatos, deve-se criar duas rotinas diferentes mesmo que o tratamento destes dois tipos de dados seja semelhantes. Uma rotina processa os dados obtidos pelo veículo e uma segunda os dados do simulador.

As rotinas descritas a seguir foram desenvolvidas em *Matlab*. A rotina que processa os dados gravados em veículo concatena os arquivos *.txt e registra os dados em uma única variável *.mat que contém uma seqüência/encadernamento de perfis de aceleração (semelhante ao que é obtido em simulador)

Estes novos sinais requerem pré-tratamento para reduzir o ruído do sinal original (ver Figura 33). Assim, num primeiro momento, a rotina realiza uma média móvel no sinal levando em conta 20 passos/casas. Em seguida, aplica-se um filtro passa-baixo de 2 Hz ao sinal, de modo a reduzir ainda mais o ruído do sinal.

Accélération en fonction du Temps

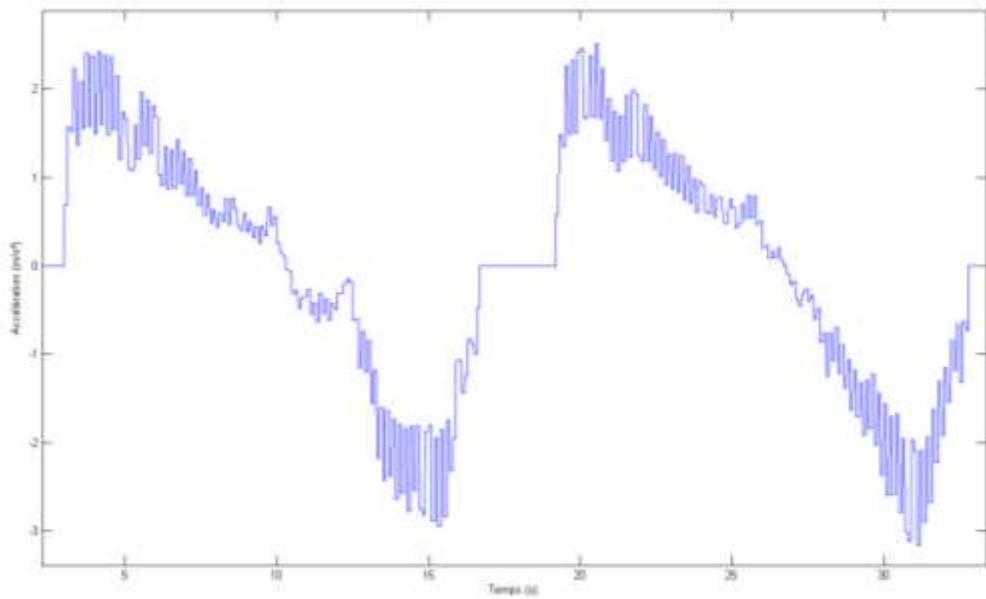


Figura 33 : Perfis de aceleração bruto registrados em veículo.

Aceleração em função do tempo

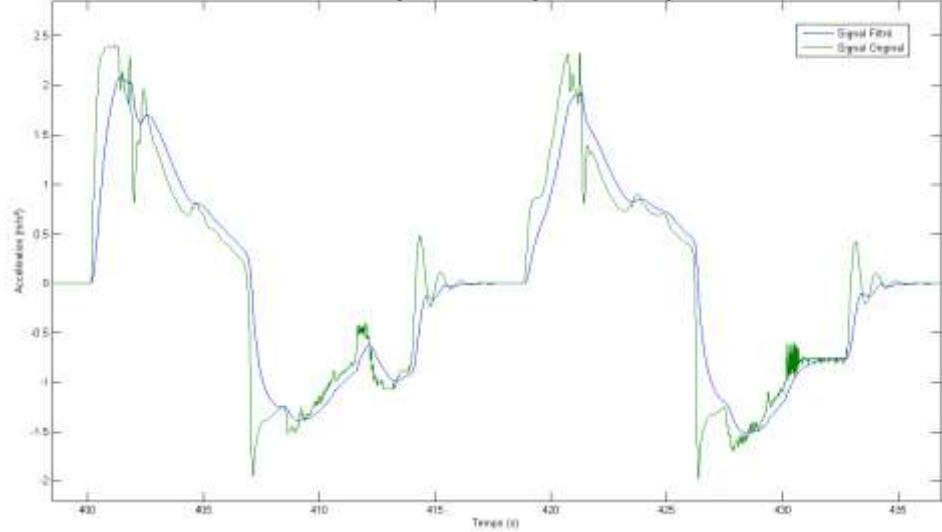


Figura 34 : As curvas representam o sinal de aceleração não filtrado (em verde) e o sinal de aceleração filtrado (em azul). O objetivo do filtro é retirar as vibrações do sinal de base para que seja possível de melhor analisar o comportamento das curvas de aceleração.

Assim, o passo seguinte é o de determinar separadamente cada perfil de aceleração fora do encadramento. Como os perfis de aceleração são sincronizados com os perfis de velocidade, o processo de separação é baseado nos perfis de

velocidade. De maneira resumida, a rotina detecta os pontos da curva de velocidade cujo módulo vale 5 km/h. Partindo desses pontos, o algoritmo procura a esquerda e a direita (ver fig. 35) os primeiros pontos cujo módulo da veocidade são inferiores a 0,01 km/h. Esses dois pontos determinam, então, um perfil de velocidade e de aceleração completos.

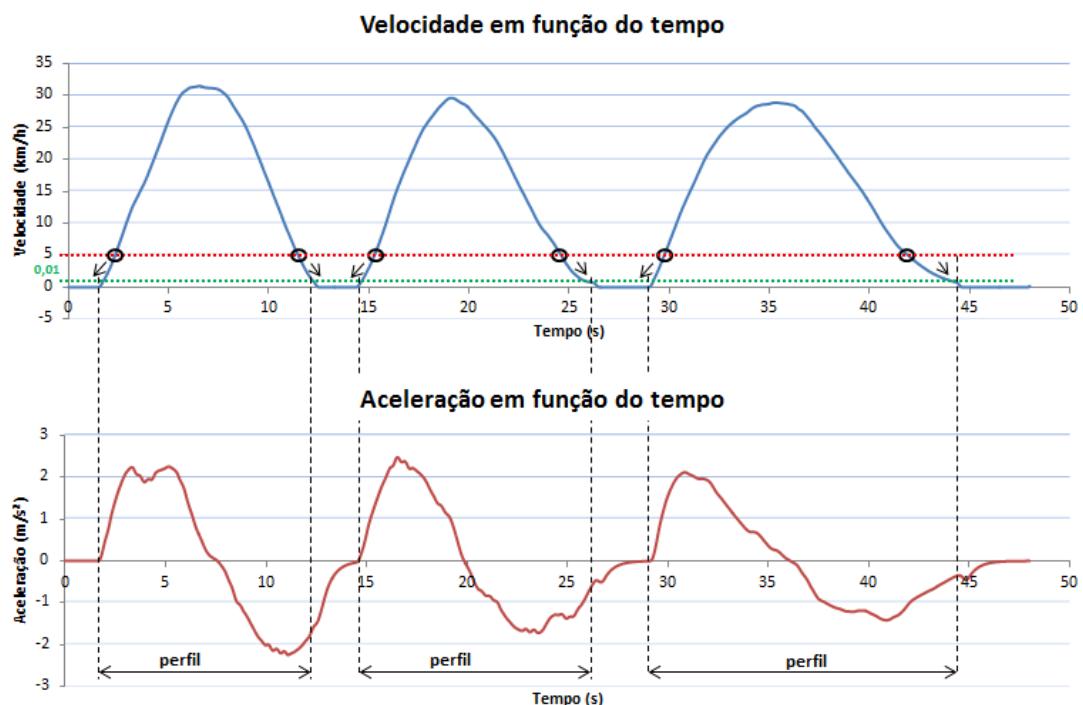


Figura 35 : A rotina determina os pontos circulados em preto. Em seguida, a partir desses pontos, o algoritmo procura a esquerda e a direita do perfil de velocidade os pontos cujo módulo da velocidade são inferiores a 0,01km/h. Uma vez esses pontos encontrados, a rotina determina os perfis de aceleração e velocidade.

Cada perfil de aceleração é diretamente associado aos parâmetros de simulação (C_1, C_2, F_c), ao número de sua condição de simulação (de 1 a 8)e o número do par de comparação (de 1 a 28). Enfim, os perfis de aceleração são organizados e separados do encadeamento de perfis. No caso do simulador, obtém-se 20 perfis de aceleração. No caso do simulador, 56 perfis são obtidos. A figura 36 mostra os perfis obtidos no simulador para um voluntário dado.

Como o objetivo principal desse estudo é o de estudar a sensação de aceleração no período das decolagens, deve-se estudar somente a parte positiva

dos perfis de aceleração. Assim, despreza-se, para cada perfil de aceleração, tudo que é inferior a zero (ver fig. 37).

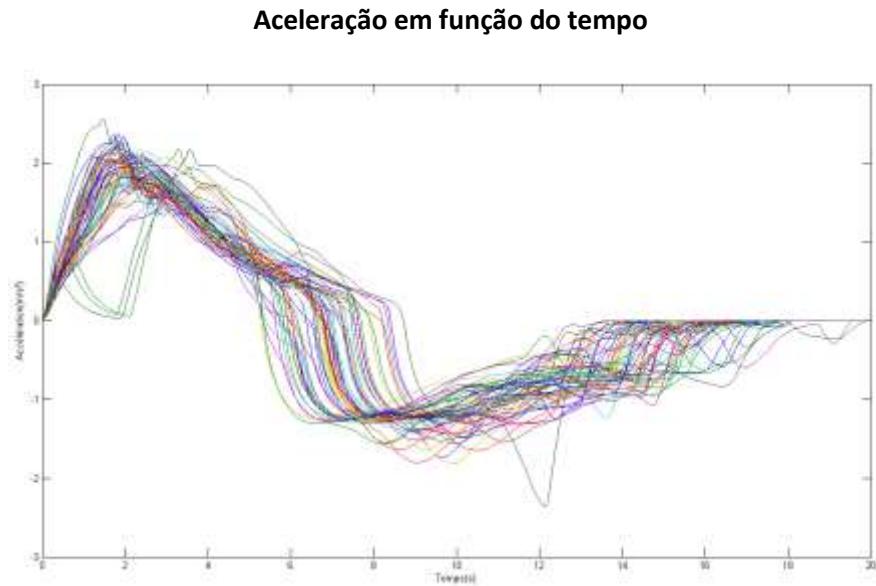


Figura 36 : A imagem mostra as 56 curvas de aceleração realizadas por um único voluntário. As curvas são traçadas uma sobre a outra para comparar suas formas e sua evolução no tempo.

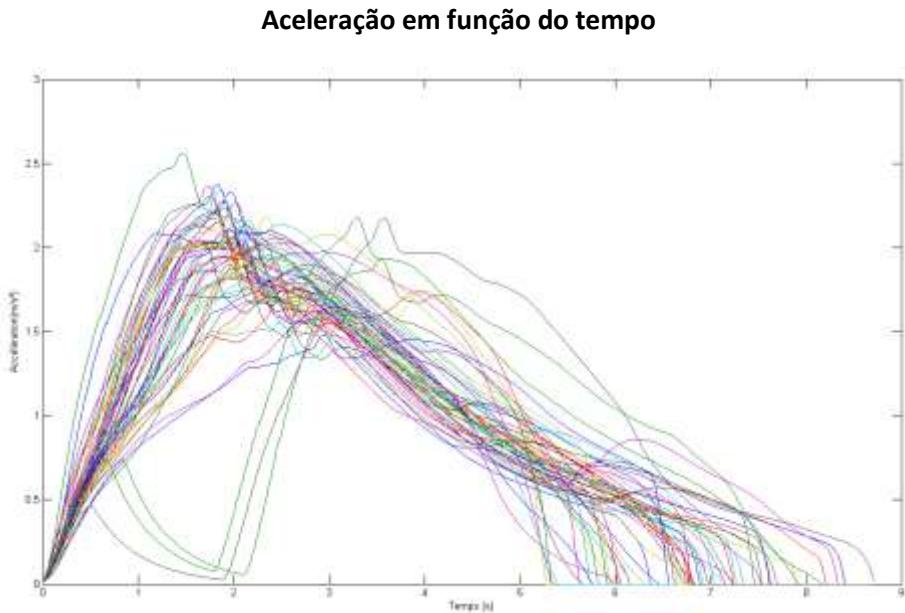


Figura 37 : Parte positiva dos perfis de aceleração.

Dado que os perfis de aceleração são curvas que são muito difíceis de analisar do ponto de vista estatístico, é importante determinar indicadores que caracterizam cada perfil de aceleração. Assim, em vez de estudar toda a curva de

aceleração em função do tempo, consideram-se pontos chave: o valor máximo do perfil de aceleração, o instante de tempo correspondente ao valor de aceleração máxima e o tempo total o perfil. No entanto, um perfil de aceleração não segue uma curva bem definida (ver fig. 38 - há pontos de máximo locais). Então, precisa-se encontrar uma curva de tendência do perfil. Assim, foram utilizados polinômios de interpolação de quarto grau para definir essas tendências, o que permite aproximar um único valor máximo do perfil de aceleração e seu instante associado como um indicador de tempo. Este ponto máximo é o valor máximo do polinômio de interpolação. Em consequencia, os pontos chave considerados para cada perfil de aceleração são (ver fig. 38).

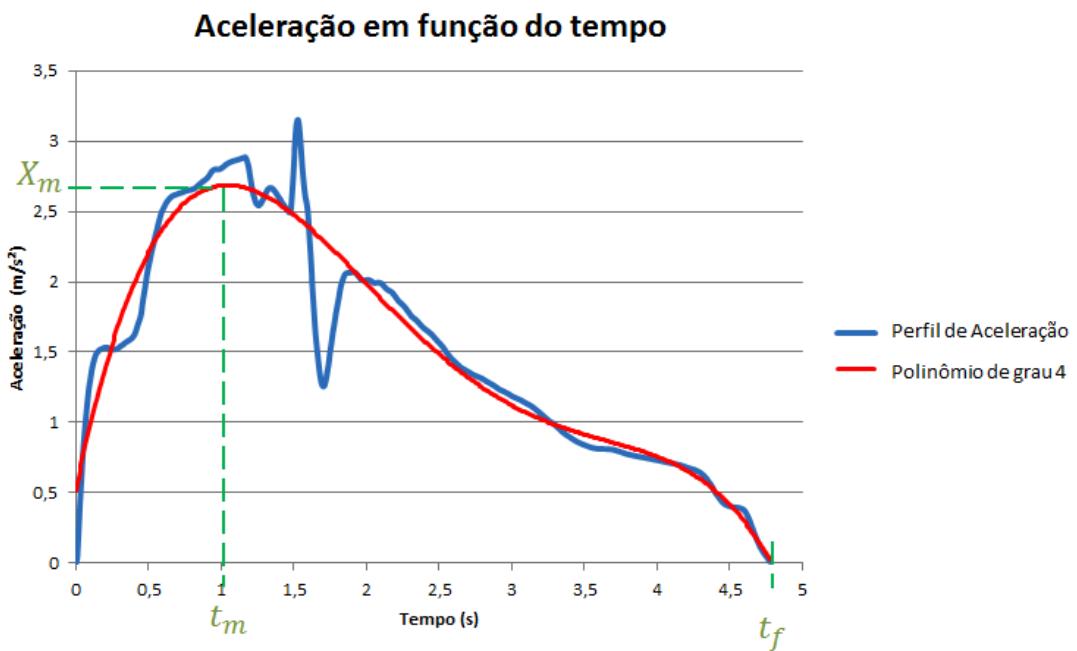


Figura 38 : A curva em azul representa o perfil de aceleração produzida pelo voluntário e a curva vermelha representa o polinômio de interpolação de grau 4 desse perfil. O valor máximo do polinômio de interpolação é X_m e o instante de tempo correspondente é t_m . A duração total da decolagem é t_f , ou seja, o instante onde a aceleração vale zero.

Com o intuito de mostrar que o grau do polinômio de interpolação é apropriado, deve-se traçar a distribuição das diferenças entre o polinômio de interpolação e o perfil de aceleração e obtermos uma distribuição próxima da Normal. Isso significa que as diferenças, em sua maioria, são próximas de zero. No eixo X traça-se o valor da diferença, e no eixo Y sua frequência, ou seja, o número

de vezes que essa diferença aparece na série de dados. De fato, a distribuição se aproxima da distribuição Gaussiana, como mostrada na fig. 39.

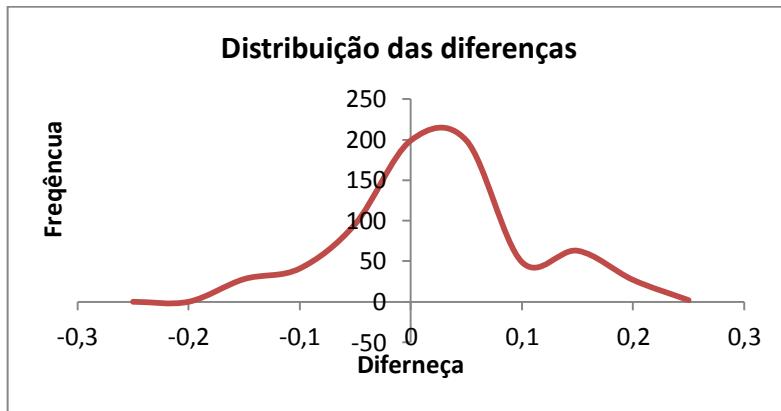


Figura 39 : Distribuição das diferenças entre o polinômio de interpolação e o perfil de aceleração. A forma dessa curva se aproxima da distribuição normal, o que indica que o polinômio de interpolação escolhido aproxima bem o perfil .

Ainda com o objetivo de facilitar a análise dos dados, além dos pontos chaves mencionados anteriormente, deve-se avaliar, para cada ponto do perfil de aceleração, a norma da diferença de seu valor com o do polinômio de interpolação e assim calcular sua média e desvio padrão dessa série de dados para cada perfil de aceleração.

Dada a grande quantidade de dados pós-tratados (no simulador de direção os voluntários reproduzem um total de $30 \times 3 \times 56 = 5040$ perfis de aceleração e em veículo $30 \times 3 \times 20 = 1800$ perfis de aceleração), deve-se encontrar uma maneira adequada de organizar todas essas informações e assim associar cada perfil a seus indicadores. Assim, são criadas duas tabelas.

- **Tabela “veículo”:** essa tabela contem $30 \times 3 \times 20 = 1800$ linhas pois 1800 perfis de aceleração são reproduzidos em veículo. A primeira coluna da tabela indica o número da decolagem do voluntário, indo de 1 a 20. A segunda coluna indica o número do voluntário e a terceira indica se é a primeira, segunda ou terceira vez que o voluntário se apresentava ao teste. As cinco colunas seguintes correspondem aos coeficientes do polinômio de interpolação do perfil de aceleração seguindo a ordem $a_4 \ a_3 \ a_2 \ a_1 \ a_0$, onde

o polinômio de interpolação de escreve $P(t) = a_4 \cdot t^4 + a_3 \cdot t^3 + a_2 \cdot t^2 + a_1 \cdot t^1 + a_0 \cdot t^0$. A nona e a décima colunas correspondem à média das diferenças entre o polinômio de interpolação e o desvio padrão dessas diferenças. As três últimas colunas correspondem a t_f, t_m, X_m , já explicados anteriormente.

- **Tabela “simulador”:** A tabela simulador contém $30 \times 3 \times 56 = 5040$ linhas pois 5040 perfis de aceleração são reproduzidos no simulador. A primeira coluna da tabela indica o número da condição de simulação indo de 1 a 8. As três colunas seguintes indicam os parâmetros de simulação para cada condição de teste. Em seguida, todas as colunas seguintes são iguais as da tabela veículo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma vez toda a informação organizada, ela pode ser analisada. Vale ressaltar que, dada a confidencialidade do presente relatório, nem todos os resultados podem ser colocados nesta sessão. Além disso, os valores numéricos aqui apresentados são apenas aproximativos dos valores realmente encontrados após o estudo.

Num primeiro momento, o estudo foi realizado com voluntários ingênuos, ou seja, são participantes que não têm conhecimento de dinâmica veicular e de simulação de direção. O primeiro objetivo dessa etapa é de analisar o comportamento de voluntários ingênuos em veículo real a fim de determinar se existem diversos estilos de aceleração durante as decolagens. O segundo objetivo da fase com os voluntários ingênuos é determinar um jogo de parâmetros da lei de comando mais realista, que será validada em seguida pelos peritos.

Para estudar o comportamento dos condutores no veículo real, como já discutido anteriormente, ao invés de estudar as curvas de aceleração como elementos contínuos, utilizaram-se os indicadores para realizar essa análise. Do ponto de vista dos indicadores a_4 a_3 a_2 a_1 a_0 , não se pode afirmar que as curvas de aceleração realizadas em veículo pelos voluntários pertençam a uma mesma classe pois o desvio padrão desses valores é muito alto quando comparado a seus valores médios. Praticamente, o desvio padrão apresenta a mesma ordem de grandeza dos valores médios dos coeficientes dos polinômios, como mostrado na tabela 5.

Veículo	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
Média	-0,022	0,33	-1,78	3,45	-0,05
Desvio Padrão	0,02	0,23	0,88	1,22	0,27

Tabela 5 : Comparação entre os valores médios e o desvio padrão dos coeficientes do polinômio interpolador

Por outro lado, ao analisarmos os indicadores t_f , t_m X_m , verifica-se que seus valores médios seguem uma mesma tendência, o que justifica os desvios padrão menores apresentados na tabela 6.

Veículo	$t_f(s)$	$t_m(s)$	$X_m(m/s^2)$
Média	7,0	1,60	2,16
Desvio Padrão	1,2	0,22	0,3

Tabela 6 : Comparação entre valores médios e desvio padrão dos indicadores t_f, t_m, X_m no veículo

Assim, apesar das acelerações em veículo real apresentarem diferentes comportamentos e não seguirem uma mesma tendência clara, as decolagens apresentam aproximadamente os mesmos valores de máximo, assim como o mesmo instante para o qual o máximo acontece, além de apresentarem durações aproximadas. Tal informação é importante pois, no tocante perceptivo da aceleração, os fatores que mais contribuem para a sensação de aceleração é exatamente o tempo que a aceleração leva até atingir seu máximo e a magnitude da aceleração máxima que, no caso do experimento, são próximos de um voluntário a outro. Então, do ponto de vista perceptivo, chega-se a conclusão de que o esboço do perfil de aceleração médio dos participantes é como mostrado na fig. 40, em que o ponto máximo da aceleração vale aproximadamente $2,2 \text{ m/s}^2$ ocorre no instante $t = 1,6\text{s}$.

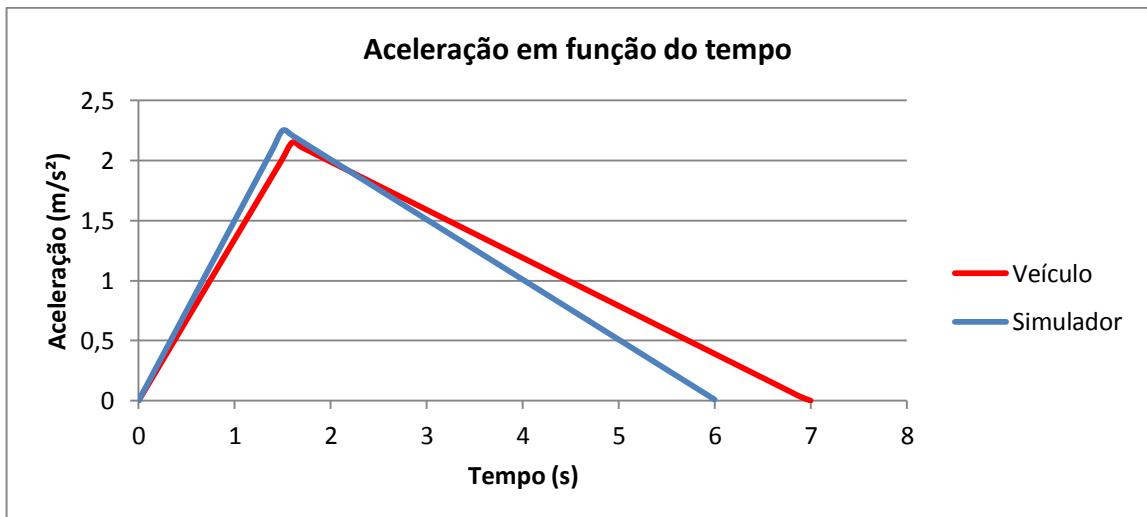


Figura 40 : Representação do ponto de vista perceptivo dos perfis de aceleração realizados em veículo real e em simulador

Vale ressaltar também que, no simulador de direção, os valores médios dos coeficientes do polinômio interpolador e seus desvios padrão apresentam a mesma ordem e grandeza, logo, esses valores não apresentam nenhuma tendência clara. Por outro lado, os valores máximos de aceleração, assim como os instantes de

tempo associados, são próximos de um voluntário a outro, conforme mostrado na tabela 7. Com relação à duração da decolagem no veículo real e em simulador de direção, dados os desvios padrão destas grandezas como sendo aproximadamente 1,5 s, pode-se inferir que os tempos de decolagens em ambos os casos são praticamente os mesmos.

SIMULADOR	$t_f(s)$	$t_m (s)$	$X_m (m/s^2)$
Média	5,7	1,5	2,3
Desvio Padrão	1,4	0,6	0,6

Tabela 7 : Comparação entre valores médios e desvio padrão dos indicadores t_f, t_m, X_m no simulador

Para o segundo objetivo da etapa realizada com voluntários ingênuos, os resultados obtidos para as constantes (C_1, C_2, F_c) são mostrados na tabela 8 (os dados são aproximados devido à confidencialidade das informações).

Parâmetros de Simulação - REALISMO	
C_1	0.5
C_2	0.05
Frequência de corte (Hz)	0.6

Tabela 8 : Resultados obtidos para os parâmetros C_1, C_2 e frequência de corte segundo o grau de realismo da simulação

Os resultados sugerem que para a pergunta “Qual a aceleração mais realista?”, os candidatos têm preferência por uma diminuição da frequência de corte até o valor de aproximadamente 0,6 Hz. Ou seja, **a simulação é tão mais realista quanto maior a parcela de aceleração reproduzida diretamente nos trilhos**. Além disso, o grau de realismo está diretamente associado a uma diminuição no fator de escala, já que os valores de C_1 e C_2 escolhidos pelos voluntários foram 0,5 e 0,05. Deste modo, **a aceleração em simulador de direção é de fato superestimada**, o que corrobora os estudos já realizados sobre o tema e, além disso, o fator de escala atual deve ser diminuído para atenuar ainda mais o módulo da aceleração para que a sensação experimentada pelo condutor seja mais próxima da realidade.

Para a pergunta “Qual a aceleração mais forte?”, os resultados foram os seguintes:

Parâmetros de Simulação - FORÇA	
C_1	0.5
C_2	0.0
Frequência de corte (Hz)	1.5

Tabela 9: Resultados obtidos para os parâmetros C_1 , C_2 e frequência de corte segundo a força da aceleração.

Percebe-se que os voluntários julgam a **aceleração como sendo mais forte quando a maior parte do sinal é reproduzida em basculamento**, já que a frequência de corte nesse caso vale aproximadamente 1,5 Hz. Além disso, nota-se que as variações no fator de escala são de fato percebidas pelos condutores, já que a aceleração é julgada mais forte quando temos ausência do fator C_2 e quadno C_1 é menor que o valor usado atualmente. Esses resultados corroboram novamente o fato da aceleração ser superestimada em simulador de direção.

Desse modo, para a segunda fase do projeto, que será realizada por voluntários peritos da dinâmica veicular (voluntários capazes de quantificar, notar e comparar diferentes acelerações), as 8 condições de teste serão avaliados no simulador de duas maneiras. Primeiro, por comparação por pares, como na fase de testes com voluntários ingênuos; num segundo momento, os especialistas devem quantificar, para cada condição do teste, a diferença sentida em relação à aceleração realizada na situação de referência (teste monádico). Os especialistas devem repetir o processo explicado tantas vezes quanto o número de classes de perfil de aceleração especificada na fase em veículo com voluntários ingênuos. No caso do experimento apresentado no trabalho, é aconselhável que os peritos repitam o procedimento apenas uma única vez, já que não houve consenso de classes de perfis durante a fase com voluntários ingênuos. Por outro lado, é recomendado que o perfil seguido por esses profissionais apresente um valor máximo (e seu instante de tempo correspondente) como mostrado na fig. 40.

5 CONCLUSÃO

O presente texto abordou os trabalhos realizados em um projeto sobre o aperfeiçoamento da sensação da aceleração longitudinal no simulador dinâmico de direção pertencente ao grupo *PSA Peugeot-Citroen*, cujo nome é SHERPA², e se localiza no centro técnico de *Vélizy Villacoublay*. A primeira etapa desse projeto utilizou voluntários não peritos de dinâmica veicular a fim de determinar a existência de diversos estilos de aceleração durante as decolagens em veículo real. Como segundo objetivo da etapa com condutores ingênuos, destaca-se a determinação do jogo de parâmetros de simulação que tornam a sensação de aceleração longitudinal mais próxima daquela vivenciada em um veículo real. Na etapa do projeto realizada em 2014 (que não está presente neste relatório), as classes de perfil de aceleração devem ser usadas por peritos em dinâmica veicular a fim de corroborar o jogo de parâmetros determinado pelos ingênuos.

A fim de possibilitar a realização do estudo, num primeiro momento, foi necessário integrar o ruído habitáculo ao simulador de direção. O ruído no interior do veículo contribui fortemente na percepção da aceleração longitudinal, o que coloca em evidência a importância dessa etapa do projeto. Para tanto, medidas acústicas foram realizadas em pista de teste seguindo um protocolo bem estabelecido.

Uma vez o ruído habitáculo de fato integrado ao simulador de direção, a bateria de testes realizada com voluntários pode ocorrer. Também nesta etapa, os voluntários seguiram um protocolo robusto a fim de minimizar perturbações estatísticas dos dados a fim de pudermos obter informações confiáveis e representativas da realidade.

Como resultados preliminares do estudo (alguns resultados foram omitidos devido à confidencialidade do presente trabalho), destaca-se a existência de um único perfil de aceleração realizado pelos voluntários. As acelerações em veículo real apresentaram diferentes comportamentos e não seguiram uma mesma

tendência clara, mas decolagens apresentam aproximadamente os mesmos valores de máximo, assim como o mesmo instante para o qual o máximo acontece, além de apresentarem durações aproximadas. Desde modo, para a **etapa do estudo utilizando voluntários peritos em dinâmica veicular, o perfil aconselhado** para a realização das comparações por pares (como na etapa com voluntários ingênuos) e do teste monádico deve seguir um perfil cujo **máximo seja em torno de 2,2 m/s²** e **seu instante de tempo associado seja 1,6 s.**

Também como resultado do estudo, destaca-se que a Lei de Controle utilizada atualmente deve sofrer alterações a fim de garantir que a sensação da aceleração longitudinal seja mais próxima da realidade. Desse modo, a tripla eleita pelos candidatos como sendo aquela cuja sensação é mais próxima da real foi ($C_1 = 0,5; C_2 = 0,05, F_c = 0,5$). Ou seja, **a aceleração é tão mais realista quando maior a parcela do sinal que é reproduzida em translação em trilho. Além disso, a aceleração é superestimada** e deve-se aplicar um fator de escala.

Com relação à força da aceleração, a tripla eleita pelos candidatos foi ($C_1 = 0,5; C_2 = 0,0, F_c = 1,5$). Assim, **a aceleração é considerada como sendo mais forte quanto maior a parcela do sinal reproduzido em basculamento**, pois a frequência de corte nesse caso é de 1,5 Hz. Deve-se ressaltar também que as perguntas “Qual a aceleração mais realista?” e “Qual a aceleração é mais forte?” apresentam uma correlação entre si. Enquanto os voluntários realizavam as comparações no simulador, os candidatos afirmavam que as condições de simulação cuja aceleração sentida por eles era mais forte que a sentida na realidade, eles julgavam tal condição como sendo menos realista. Desse modo, os as diferentes frequências de corte podem ser explicadas, já que **quanto menor a frequência de corte, maior a parcela do sinal de aceleração é reproduzida nos trilhos, mais realista é a aceleração e também ela é julgada menos forte**. Por outro lado, **quanto maior a frequência de corte, uma menos parte do sinal é reproduzida nos trilhos, e a sensação de aceleração é julgada como sendo mais forte**. Em

ambos os casos, o fator de escala deve ser aplicado devido à superestimação da aceleração longitudinal.

Evidentemente, o projeto sobre a aceleração longitudinal no SHERPA² representa um importante avanço para o estudo da percepção humano em simuladores de direção, já que os trabalhos desenvolvidos até o momento foram realizados para uma direção passiva, onde o condutor não exerce influência sob os comandos do simulador, enquanto que no presente projeto os condutores tinham total controle dos movimentos do simulador. Além disso, deve-se destacar que o projeto levou em conta apenas uma fase da direção, a decolagem. No entanto, **recomenda-se fortemente que em projetos futuros sejam estudadas a fases de frenagem e a percepção da aceleração lateral no simulador de direção.** Os voluntários fizeram diversas objeções durante as comparações com relação à fase de frenagem, afirmando que essa fase fazia com que eles sentissem náusea e dor de cabeça, possivelmente devido a alguma não correlação sensorial (o visual não corresponde com o que é reproduzido dinamicamente pelo simulador, por exemplo). Além disso, os voluntários ressaltavam que se sentiam perturbados quando giravam o volante e sentiam acelerações laterais, também alegando possível não correlação entre as sensações. Finalmente, de maneira global, a qualidade da simulação surpreendeu os voluntários, tanto na parte acústica, quanto na reprodução da cena visual, como nas sensações sentidas devido à movimentação do simulador.

6 REFERÊNCIAS

Mars, Franck (2001). *La désorientation spatiale en aéronautique : Apport des Neurosciences intégratives à la conception des postes de pilotage.* Tese de doutorado.

Prieur, Jean-Michel (2004). Orientation Spatiale : Référentiels égocentrique et géocentrique et intégration multi-sensorielle. Tese de doutorado.

Holly, J. E. et McCollum, G. (1996). *The shape of self-motion perception i. equivalence classification for sustained motions.* Neuroscience, 70(2):461_486.

Stratulat, Anca Melania (2011). *Multisensory Interaction study for the perception of car motion in driving simulator.* Tese de doutorado.

Bosch Bexroth B.V (2004). *Motion Cueing Tuning Manual*

Dittrich, Reginq et Hatzinger, Reinhold. *Fitting loglinear Bradley-Terry models (LLBT) for paired comparisons using the R package prefmod*