

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
RENATO PAREDE SARTORI

ANÁLISE DE RUÍDOS AUTOMOTIVOS POR PARÂMETROS PSICOACÚSTICOS

São Bernardo do Campo

2022

RENATO PAREDE SARTORI

ANÁLISE DE RUÍDOS AUTOMOTIVOS POR PARÂMETROS PSICOACÚSTICOS

Dissertação apresentada ao Centro
Universitário FEI, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Elétrica. Orientada pelo Prof.
Dr. Carlos Eduardo Thomaz.

São Bernardo do Campo

2022

Parede Sartori, Renato.

Análise de ruídos automotivos por parâmetros psicoacústicos / Renato Parede Sartori. São Bernardo do Campo, 2022.

111 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz.

1. ruídos parasitas. 2. automotivo. 3. psicoacústica. 4. classificador.
5. ID3. I. Eduardo Thomaz, Carlos, orient. II. Título.

Aluno(a): Renato Parede Sartori

Matrícula: 120109-4

Título do Trabalho: Análise de ruídos automotivos por parâmetros psicoacústicos

Área de Concentração: Processamento de Sinais e Imagens

Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Data da realização da defesa: 29/08/2022

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

O aluno fez a apresentação oral da sua dissertação em 45 minutos e depois respondeu satisfatoriamente as questões levantadas pelos examinadores, mostrando conhecimento do problema, dos materiais e dos métodos usados. A banca fez sugestões de alteração no texto para melhor compreensão da análise exploratória realizada. Ao final, o aluno foi aprovado por unanimidade.

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒

REPROVADO ☐

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Prof. Dr. Vanderlei Cunha Parro

Prof. Dr. Ivan Roger Scansani Gregori

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Dedico este trabalho a minha família e a todos os professores pelo ininterrupto apoio.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha família por sempre ter incentivado os estudos desde meus primeiros anos de vida.

Ao Centro Universitário FEI por continuar investindo de forma ininterrupta na educação e oferecendo aos alunos acesso a uma estrutura sempre diferenciada e inovadora.

Aos professores Ivandro Sanchez e Carlos Eduardo Thomaz pela confiança e apoio durante esses 2 anos e principalmente por continuar acreditando na importância da educação no desenvolvimento de nosso país, contribuindo de forma ativa na formação e aperfeiçoamento de nossos profissionais.

A Stellantis por fornecer acesso a toda infra-estrutura de laboratórios e por proporcionar o estudo de caso apresentando neste trabalho.

Especialmente aos colegas Marcelo Starling, Wagner Duarte, Irlei de Paulo e João Paulo Sabioni da Engenharia por ter auxiliado em todas as etapas de parametrização dos equipamentos, aquisição de dados e reprodução dos ruídos durante a análise subjetiva.

Finalmente a minha esposa e filha por apoiarem e incentivarem todas as horas de estudo, amizade e carinho ao longo dessa trajetória.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	14
1.2 TRABALHOS RELACIONADOS	15
1.2.1 Metodologia para avaliação e determinação de índices de conforto acústico em engenharia automobilística	16
1.2.2 Avaliação da qualidade sonora de um ciclo típico de operação de um refrigerador	18
1.2.3 Desempenho de métodos de avaliação do conforto acústico no interior de aeronaves...	22
1.2.4 Criação de Índice de Qualidade para ruídos no interior de veículos para avaliação de sinais do tipo rattle (chocalho)	25
1.3 OBJETIVOS	26
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	26
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	28
2.1 RUÍDOS AUTOMOTIVOS	28
2.1.1 Mecanismo do Squeak e Rattle	29
2.1.2 Identificação e controle do S&R	29
2.1.2 Definição dos ruídos do tipo Squeak.....	30
2.1.3 Definição dos ruídos do tipo Rattle	31
2.2 QUALIDADE SONORA	33
2.3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO.....	36
2.3.1 Diferencial semântico	36
2.3.2 Escala de resposta ER.....	37
2.3.3 Comparação pareada	37
2.3.4 Estimativa de magnitude	38
2.3.5 Posto de ordem	38
2.4 AUDIÇÃO HUMANA.....	38
2.4.1 Mascaramento.....	42
2.4.2 Banda Crítica	43
2.4.3 Conforto acústico.....	44

2.3 PSICOACÚSTICA.....	46
2.4 PARÂMETROS PSICOACÚSTICOS.....	47
2.4.1 Loudness.....	48
2.4.2 Roughness.....	50
2.4.3 Sharpness.....	50
2.4.4 Fluctuation strenght.....	51
2.4 REGRESSÃO LINEAR	51
2.5 ÁRVORES DE DECISÃO	53
2.5.1 Seleção de atributos.....	56
2.5.2 Algoritmo ID3	57
3 MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1 AQUISIÇÃO DOS SINAIS	60
3.1.1 Instrumentação	60
3.1.2 Gravação dos sinais	63
3.1.2 Processamento dos sinais	67
3.2 ANÁLISE OBJETIVA.....	68
3.3 ANÁLISE SUBJETIVA.....	70
3.3.1 Escolha do Júri	71
3.1.2 Sala de teste	72
3.3.3 Reprodução dos sinais sonoros.....	74
4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS.....	80
4.1 RESPOSTA DA ANÁLISE OBJETIVA	80
4.2 RESPOSTA DA ANÁLISE SUBJETIVA.....	81
4.3 CLASSIFICADOR ID3.....	87
5 CONCLUSÃO.....	94
REFERÊNCIAS	97

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Impacto dos ruídos na satisfação dos clientes automotivos.....	13
Figura 2 - Classificação do nível de irritabilidade por especialistas.....	15
Figura 3 - Transformação do som em sensações psíquicas pelo sistema auditivo.....	16
Figura 4 - Parâmetros psicoacústicos extraídos dos 12 compressores testados.....	19
Figura 5 - Fluxograma representativo do sistema de reprodução sonora de refrigeradores.....	20
Figura 6 - Sistema de reprodução da avaliação de conforto acústico em aeronaves.....	23
Figura 7 - Projeção das medidas objetivas e subjetivas do som, obtidas com a ER, no primeiro plano fatorial.....	24
Figura 8 - (a) Dois objetos em contato sujeitos a uma força normal e uma força horizontal / (b) força de fricção nas superfícies de contato.....	30
Figura 9 - Nível de pressão sonora do ruído variando com a temperatura.....	31
Figura 10 - Nível de pressão sonora do ruído variando com a umidade.....	31
Figura 11 - (a) objeto colidindo contra uma superfície parada / (b) colisão entre dois objetos...	32
Figura 12 - (a) δ em função do tempo / (b) δ em função da frequência.....	32
Figura 13 - Processo da percepção auditiva.....	33
Figura 14 - Exemplo de uma possível escala diferencial semântico.....	36
Figura 15 - Exemplo de uma possível escala diferencial semântico discreta com 5 pontos.....	37
Figura 16 - Divisão entre o sistema periférico da audição e o sistema central da audição.....	39
Figura 17 - Processamento do som nos seres humanos.....	39
Figura 18 - Sistema periférico de audição (orelha e o início do nervo auditivo).....	40
Figura 19 - Exemplo hipotético no qual um mascarador aumenta o limiar de audição para um sinal em 16dB.....	42
Figura 20 - Limites de mascaramento	43
Figura 21 - Mascaramento de tons puros.....	43
Figura 22 - Largura da banda crítica em função da frequência central.....	44
Figura 23 - Correlação entre ruído, vibrações e percepção humana.....	45
Figura 24 - Esquema da transformação do evento sonoro em percepção sonora.....	47
Figura 25 - Curva de igual sonoridade.....	49
Figura 26 - Estrutura macro de uma árvore de decisão.....	53
Figura 27 - Exemplo de uma árvore de decisão binária.....	54
Figura 28 - Exemplo de uma árvore de decisão não binária.....	54

Figura 29 - Medida da entropia para exemplos positivos variando entre 0 e 1.....	57
Figura 30 - Metodologia aplicada para correlacionar a avaliação subjetiva com a objetiva.....	59
Figura 31 - Módulo de aquisição de sinais Siemens Scadas.....	60
Figura 32 - Suporte duplo e microfones para simular uma aquisição binaural.....	61
Figura 33 - Calibrador dos microfones.....	61
Figura 34 - Aquisição dos ruídos parasitas em um meio físico (veículo).....	62
Figura 35 - Vista aérea da pista de teste em Porto Real para usada para gravação dos ruídos.....	63
Figura 36 - Pista de teste utilizada para aquisição dos ruídos com diferentes pavimentos.....	64
Figura 37 - Regiões do veículo com ruídos.....	65
Figura 38 - Parâmetros de aquisição utilizados na aquisição dos ruídos.....	66
Figura 39 - Software utilizado para tratamento dos sinais.....	68
Figura 40 - Exemplo de análise dos sinais aquisitados.....	68
Figura 41 - Configuração para extração dos parâmetros Loudness e Sharpness.....	69
Figura 42 - Configuração para extração dos parâmetros Roughness e Fluctuation.....	69
Figura 43 - Valores médio extraídos para cada métrica psicoacústica.....	70
Figura 44 - Sala de reprodução usada para o teste de júri.....	73
Figura 45 - Esquema do sistema de reprodução dos sinais de ruídos.....	74
Figura 46 - Sequência de reprodução da fase subjetiva.....	76
Figura 47 - Exemplo de vídeo gravado sobre os diferentes pavimentos.....	77
Figura 48 - Escala SAE (Society of Automotive Engineers) para análises subjetivas.....	78
Figura 49 - Cruzamento das respostas com a escala SAE e classificação de ruídos.....	79
Figura 50 - Extração dos parâmetros psicoacústicos: (a) loudness, (b) roughness, (c) sharpness e (d) Fluctuation.....	80
Figura 51 - Perfil dos participantes (a) Gênero, (b) faixa etária.....	81
Figura 52 - Avaliação subjetiva para cada ruído (Júri e Especialistas).....	82
Figura 53 - Média e dispersão da avaliação subjetiva.....	83
Figura 54 - Posição de cada júri sobre a ação de reclamação.....	84
Figura 55 - Divergência (outliers) das notas dos jurados e a questão sobre levar o veículo à concessionária.....	85
Figura 56 - Correlação entre as avaliações dos Especialistas e Júri.....	86
Figura 57 - Limites de aceitação para as métricas loudness e sharpness.....	87
Figura 58 - Construção da árvore do classificador em nível parcial	91
Figura 59 - Construção da árvore final do classificador.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros subjetivos e objetivos “x” variáveis de regressão-calçamento.....	17
Tabela 2 - Critérios de avaliação usados durante a reprodução dos sons.....	20
Tabela 3 - Modelos de predição obtidos para o grupo sem experiência.....	21
Tabela 4 - Modelos de predição obtidos para o grupo com experiência.....	21
Tabela 5 - Valores calculados para os valores psicoacústicos com o software Artemis.....	23
Tabela 6 - Parâmetros psicoacústicos considerados no estudo.....	48
Tabela 7 - Equipamentos utilizados para a aquisição dos sinais.....	60
Tabela 8 - Ruídos gravados para as análises objetivas e subjetivas.....	66
Tabela 9 - Correção das médias de irritabilidade após retirada dos “outliers”.....	86
Tabela 10 - Conversão das métricas psicoacústicas em atributos categóricos.....	88
Tabela 11 - Conjunto de treinamentos do classificador ID3.....	88
Tabela 12 - Conjunto de treinamentos do classificador para loudness aceitável.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AES	Audio Engineering Society
ANN	Artificial Neural Networks
CAE	Computer-aided engineering
DIN	Deutsches Institut für Normung
ISO	International Organization for Standardization
NPS	Nível de Pressão Sonora
NVH	Noise, Vibration and Harshness
SAE	Society of Automotive Engineers
ICA	Índice Conforto Acústico
ID3	Dicotomizador Iterativo 3
RMSE	Root-Mean Square deviation
ER	Escala de Resposta
BSR	Buzz, Squeak and Rattle
S&R	Squeak and Rattle
SPL	Sound Pression Level

RESUMO

Os ruídos parasitas em veículos novos/seminovos possuem um grande impacto na satisfação dos clientes brasileiros. A indústria automobilística já detectou esta particularidade de nosso mercado em que a presença destes ruídos é diretamente relacionada a qualidade/robustez dos produtos. Devida a esta importância as empresas vêm ampliando o investimento na detecção e caracterização nessa área, embora grande parte ainda usam o método tradicional através de rodagens com especialistas tanto na fase de projetos quanto durante a produção em massa ao longo do ciclo de vida do veículo. O presente estudo consiste em desenvolver uma metodologia para investigar a relação de parâmetros da psicoacústica com a irritabilidade dos clientes. A primeira etapa deste desenvolvimento foi a aquisição dos sinais realizada diretamente sobre veículos nas pistas de teste do grupo Peugeot Citroën na cidade de Porto Real e da Fiat na cidade de Betim. Esta atividade consistiu na gravação de dez sinais sonoros dentre as interfaces que mais provocam insatisfação/irritação dos clientes. Posteriormente esses sinais foram utilizados em duas análises exploratórias, subjetiva e objetiva. A análise subjetiva foi realizada com a participação de 52 colaboradores sem conhecimentos específicos sobre o tema. Todo o controle acústico, térmico, assim como distância entre os voluntários e o equipamento de reprodução foram baseados em estudos científicos afins. A avaliação dos áudios pelo júri foi conduzida através de uma reprodução auto-guiada permitindo que cada participante escolhesse a sequência de áudio. A avaliação seguiu a escala métrica de subjetividade da SAE(Society of Automotive Engineers). Por sua vez a análise objetiva consistiu em extrair dos sinais de áudio os parâmetros da psicoacústica como Loudness, Roughness, Sharpness e Fluctuation Strenght. Nessa etapa utilizou-se o software TestLAB para a extração dos parâmetros. A análise de dados consistiu inicialmente no cruzamento dos dados obtidos do júri através da audição com as notas fornecidas pelos especialistas do setor para cada um dos ruídos gravados. Como desenvolvimento final, um classificador sobre o impacto de cada ruído na satisfação dos clientes, usando o algoritmo de inteligência artificial ID3(Iterative Dichotomiser 3) foi implementado com o objetivo de reduzir a subjetividade quando comparado aos sistemas tradicionais empregados atualmente no setor automobilístico. Os experimentos exploratórios desta dissertação indicam que há correlação entre as métricas psicoacústicas com o nível de irritabilidade provocado pelos sinais assim como uma regra geral de classificação dos tipos de ruídos automotivos considerados.

Palavras chave: ruídos parasitas, automotivo, psicoacústica, classificador, ID3.

ABSTRACT

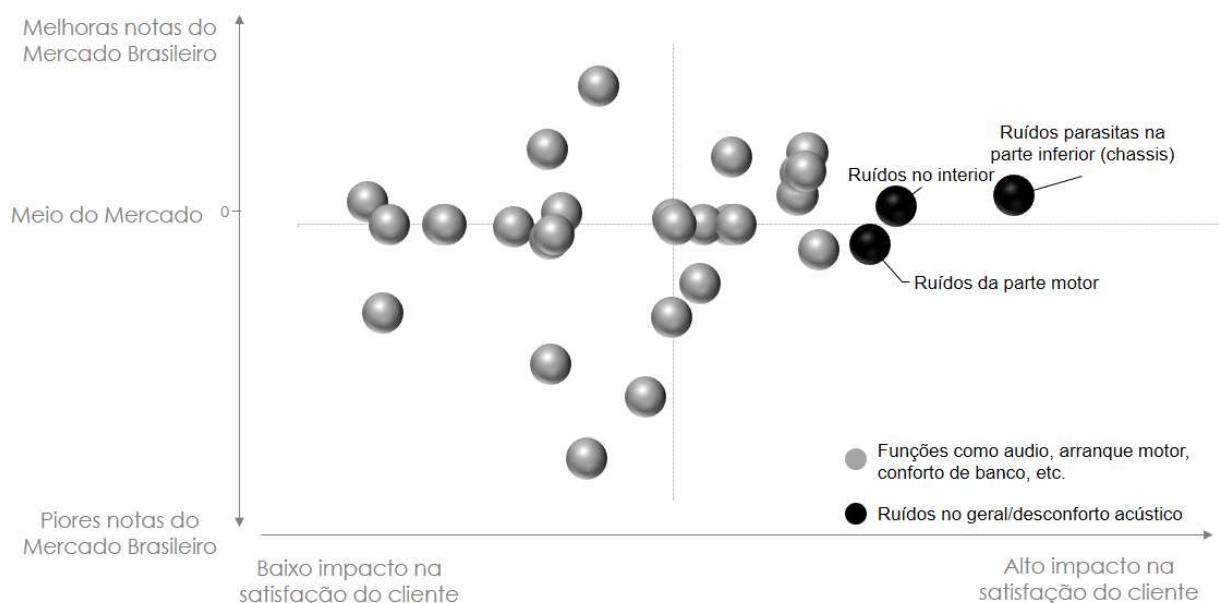
Abnormal noises in new/used cars have an important impact on Brazilian customer satisfaction. The automobile industry has already detected this particularity in our market where the presence of these noises is directly related to the quality/robustness of the products. Due to this importance, industries have been increasing investment in detection and characterization in this area, although most companies still use the traditional method through runs with specialists both in the project phase and in mass production during the cars' life cycle. This study consists of a methodology development to investigate the relation of psychoacoustics parameters with the irritability of clients. The first stage of this experiment was the acquisition of the signals carried out directly from one vehicle on the test tracks of the Peugeot Citroën group in the city of Porto Real and Fiat in the city of Betim. This activity consisted of recording ten noise sounds among the interfaces most impactful on customer dissatisfaction/irritation. Later, these signals were used in two exploratory analysis, subjective and objective. The subjective analysis was carried out with the participation of 52 employees without specific knowledge on the subject. All room parameters as acoustic and thermal control as well as the distance between the volunteers and the reproduction equipment were based on related scientific studies. The audio jury was evaluated through a self-guided playback allowing each participant to choose an audio sequence. The subjectivity metric scale used on the assessment was based on SAE(Society of Automotive Engineers) parameters. The objective analysis consisted of extracting from the signals recorded the parameters of psychoacoustics such as Loudness (parameter correlated to sound intensity), Roughness (harshness), Sharpness (spectral sensitive) and Fluctuation Strength (low frequency modulation). In this phase, the TestLAB software was used to recover the parameters from the vehicle. The analysis initially consisted of confronting the juries by listening and data provided by industry experts for each of the recorded noises. As a final development, a classifier on the impact of each noise in customer satisfaction using an ID3(Iterative Dichotomiser 3) artificial intelligent algorithm was implemented with the aim of reducing subjectivity when compared to traditional systems currently used in the automotive sector. The exploratory experiments of this dissertation indicate that there is a correlation between the psychoacoustic metrics and the irritability of the signals as well as a general rule for classifying parasitic automotive noises.

Keywords: abnormal noises, automotive, psychoacoustics, classifier ID3.

1 INTRODUÇÃO

Os clientes automotivos brasileiros são reconhecidos globalmente por não tolerarem a presença de ruídos parasitas em veículos novos. Eventos estes provenientes de diversas interfaces e originados por falhas durante a montagem, não conformidade de componentes ou até mesmo erros de projetos como a incompatibilidade entre materiais, principalmente plásticos. Pesquisas recentes de 2018 e 2019 entre as maiores montadoras do país com mais de 3000 clientes realizadas por consultoria especializada (IPSOS) demonstram que os ruídos são os problemas mais impactantes na satisfação dos clientes, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Impacto dos ruídos na satisfação dos clientes automotivos



Fonte: IPSOS, 2019

À medida que o mercado de produtos se torna mais competitivo, os consumidores aumentam o nível de exigência quanto aos requisitos apresentados por um produto de boa qualidade. De fato, o consumidor pode decidir a escolha entre dois produtos baseado na sensação sonora proporcionada pelos mesmos (BODDEN, 2000).

Nesse contexto, as montadoras e fornecedores do setor estão aumentando o rigor tanto na concepção quanto na validação de seus produtos com o objetivo de reduzir a probabilidade do surgimento de ruídos parasitas durante os primeiros meses de utilização dos veículos. Diversos novos meios de traduzir a voz do cliente em requisitos técnicos estão sendo aplicados

para assegurar que todos os ruídos prioritários sejam tratados no desenvolvimento de novos projetos.

1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

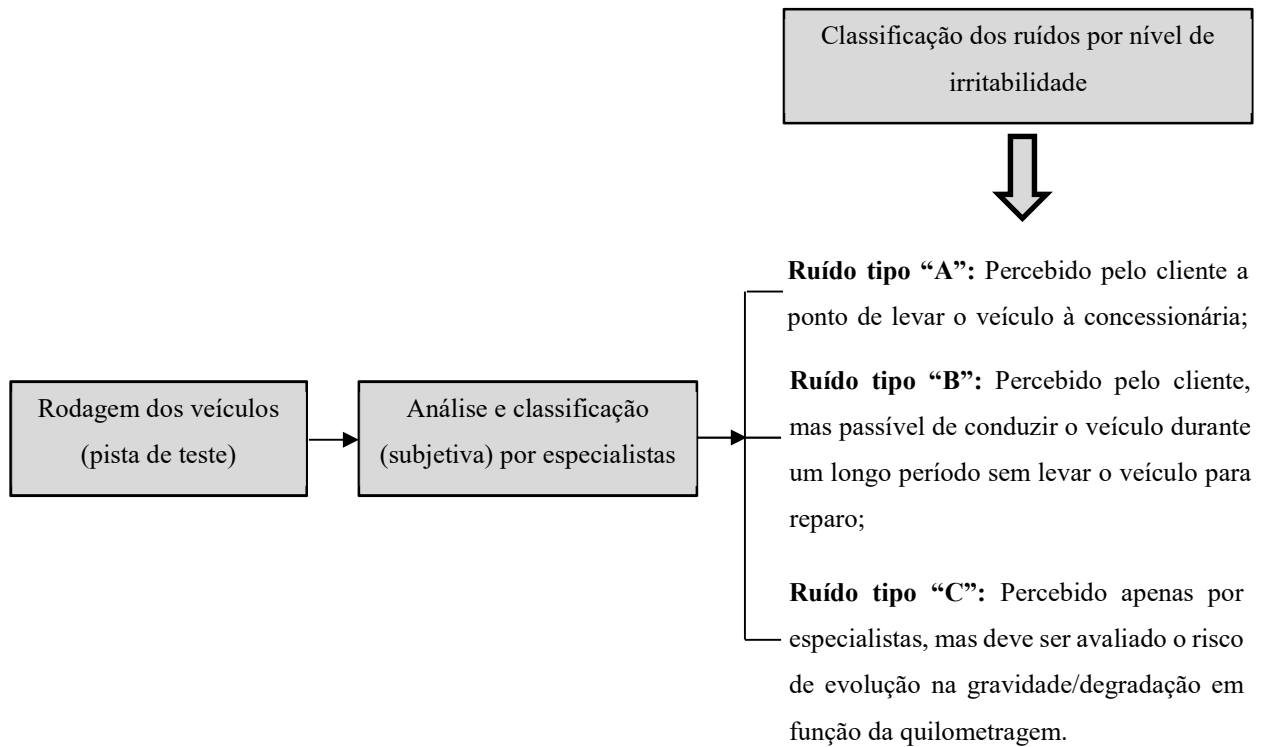
A percepção da qualidade do som não se baseia apenas no sinal físico puro, mas depende também de outras modalidades sensoriais e até de fatores não sensoriais. A avaliação da qualidade do som torna-se, assim, em uma tarefa complexa e multidisciplinar. Métodos para avaliar a qualidade do som não podem ser restritos somente ao próprio sinal acústico. Outras modalidades e o histórico do assunto devem ser considerados. Para uma aplicação em ambiente industrial as respectivas necessidades e restrições devem ser consideradas: os métodos de análise precisam ser eficientes em termos de tempo, disponibilizar os resultados com a precisão esperada e fornecer propostas de melhorias do produto (BODDEN, 2000).

Em busca de uma aceitação maior por parte dos clientes, busca-se um controle mais rigoroso dos níveis de ruído global dos produtos, bem como, dos detalhes no conteúdo de frequência e variações de tempo de exposição para cada tipo de ruído. Também há uma preocupação crescente por parte das empresas em ter conhecimento de como os diferentes tipos de ruído afetam as pessoas e até mesmo como diferentes pessoas são afetadas por um mesmo tipo de sinal sonoro (BAARS, LENZI e NUNES, 2002).

Com o passar dos anos, um grande avanço pôde ser observado na redução da emissão sonora provocada pelas partes mecânicas e principalmente nos motores dos veículos permitindo, desta forma, que os passageiros percebam com maior facilidade os ruídos parasitas no interior da cabine. Basicamente, esses ruídos são classificados em dois grupos: squeak (ruídos de atrito entre duas superfícies) e rattle (contato intermitente entre dois componentes do veículo).

No que tange a análise de ruídos parasitas no ambiente automotivo, atualmente os ensaios de detecção e caracterização realizados pelas montadoras consistem em rodagens por pistas que simulam diversos tipos de terrenos enfrentados pelos clientes como paralelepípedo, pedras de rio, asfalto com pavimentos de diferentes rugosidades, lombadas e valetas. Essas rodagens são acompanhadas por dois especialistas posicionados: um como condutor e outro como passageiro no banco traseiro. O propósito destas rodagens é classificar, segundo a opinião do cliente representado pelos especialistas, os ruídos em função do nível de irritabilidade. A classificação é realizada em função do nível de percepção e pode ser dividida em três grupos de defeitos pré-estabelecidos, conforme ilustrado pela Figura 2.

Figura 2 - Classificação do nível de irritabilidade por especialistas



Fonte: AUTOR

Este processo de detecção e caracterização dos ruídos possui uma certa limitação quanto a precisão. Toda a decisão sobre o nível de irritabilidade é tomada através de uma curta rodagem e apenas com a opinião de especialistas baseada essencialmente na intensidade sonora de cada sinal, uma vez que nenhum equipamento de análise espectral é usado neste procedimento.

1.2 TRABALHOS RELACIONADOS

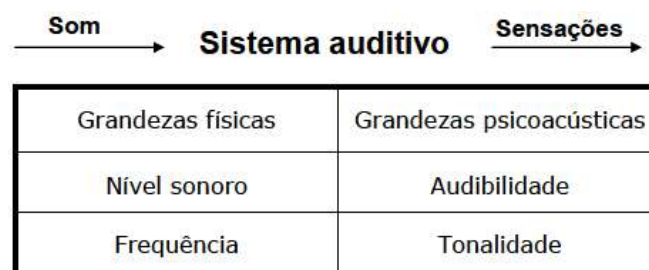
Nesta subseção introdutória são descritos trabalhos relacionados assim como a relação com a análise exploratória proposta nessa dissertação. Em particular, são considerados para essa abordagem as referências [BRIZON, 2012], [DEMOLINER, 2010], [BITENCOURT, 2008] e [WEISCH, 1997].

1.2.1 Metodologia para avaliação e determinação de índices de conforto acústico em engenharia automobilística

Em [BRIZON, 2012], uma metodologia para avaliar o conforto vibroacústico em veículo é apresentada. A proposta deste trabalho foi realizar uma correlação entre a análise psicoacústica veicular, avaliação de desempenho vibroacústico e avaliação subjetiva.

O trabalho em questão propõe que somente a pressão sonora não é o suficiente para descrever a sensação de agradabilidade do interior de um veículo. A qualidade sonora é determinada pela harmonia de diferentes componentes espectrais. Características físicas não lineares do ouvido humano fazem com que o som percebido não esteja diretamente relacionado ao nível sonoro inicialmente gerado. O conhecimento dos aspectos físicos e psicoacústicos da audição humana são essenciais para o entendimento da qualidade sonora e técnicas relacionadas para a sua avaliação. Para a autora o som é caracterizado por grandezas físicas, enquanto que as sensações são caracterizadas por grandezas psicoacústicas, sendo o sistema auditivo o responsável por transformar sons em sensações psíquicas, conforme ilustrada na Figura 3.

Figura 3 - Transformação do som em sensações psíquicas pelo sistema auditivo



Fonte: BISTAFA, 2006.

Ainda, segundo a autora, no que se refere a determinação e uso dos parâmetros psicoacústicos na indústria automotiva, verifica-se que estão sendo largamente empregados em aplicações como:

- Identificação das principais fontes de ruído;
- Estabelecimento de metas para emissão de ruído de componentes;
- Avaliação de alternativas durante o desenvolvimento de componentes;
- Determinação de sons mais agradáveis de acordo com a opinião do cliente;
- Avaliação de produtos da concorrência.

Ainda em [BRIZON, 2012], os parâmetros psicoacústicos escolhidos foram: Loudness, Sharpness, Fluctuation Strenght e Roughness. Os dados objetivos foram extraídos de 5 veículos devidamente equipados e testados em um circuito estabelecidos pela autora. Os valores absolutos dos parâmetros psicoacústicos foram extraídos pelo software Artemis da Head Acoustic HmgB. Os dados subjetivos foram levantados através de um júri composto por 33 pessoas, sendo 23 com conhecimentos técnicos sobre o setor automobilístico e 10 especialistas em NVH (termo em inglês empregado no setor automotivo referente as áreas de Ruído, Vibração e Aspereza). A avaliação subjetiva foi decomposta em 3 etapas mesclando questionários e notas em escalas comumente utilizadas no setor automotivo como a da SAE (organização responsável pelos estudos em engenharia de automóveis).

Como resultado de maior importância para este trabalho foi a confirmação de que as medidas convencionais de engenharia, tradicionalmente utilizadas pelo setor automotivo, são insuficientes para caracterização do conforto acústico veicular. Valores objetivos do nível de intensidade sonora de um ruído e índice de articulação, parâmetros usuais para caracterização de veículos, mostraram-se ineficientes devido a grande variação nas análises subjetivas sobre o conforto acústico realizadas com o júri.

Para cada tipo de pista foi aplicada uma regressão linear múltipla entre as notas subjetivas do júri e os valores objetivos dos parâmetros utilizados na análise exploratória. Desta forma, foram obtidas diversas equações que descrevem o ICA (Índice de Conforto Acústico) de cada tipo de pavimento demonstrando a correlação entre as variáveis. A Tabela 1 demonstra um exemplo para o pavimento de calçamento.

Tabela 1 - Parâmetros subjetivos e objetivos versus variáveis de regressão-calçamento

Veículo	Nota	Loudness (Sone)	Roughness (Asper)	Sharpness (Acum)	Fluctuation Strenght	Kurtosis	Índice de Articulação (%)	Nível de ruído dB(A)
A	3,42	38,25	1,93	1,11	0,01825	2,575	64,6	75,3
B	3,45	43,4	2,065	1,17	0,02105	2,53	58,8	77,6
C	3,88	38,85	1,865	1,085	0,01705	2,72	67,7	76,75
D	4,27	37,2	1,855	1,135	0,02155	2,79	65,8	76,55
E	3,64	44,2	2,035	1,235	0,0228	2,51	59,1	76,95

Fonte: BRIZON,2012

A equação 1.1 descreve a correlação entre os valores obtidos:

$$ICA_{2-\text{calçamento}} = 4,57R + 86,42FS + 0,18NR - 2,69 \quad (1.1)$$

Na qual:

R = é a aspereza calculada pela métrica “roughness”

FS = é a modulação calculada pela métrica “fluctuation streng”

NR = é o nível de ruído em dB(A)

Apesar de utilizar parâmetros psicoacústicos para determinar o ICA (Índice de Conforto Acústico) o trabalho proposto em [BRIZON, 2012] possui diferenças importantes em relação ao objetivo desta dissertação uma vez que aqui, busca-se a eliminação da subjetividade imposta pelas análises de ruídos parasitas e a implementação de um classificador inteligente para inferência de uma regra geral a partir dos dados.

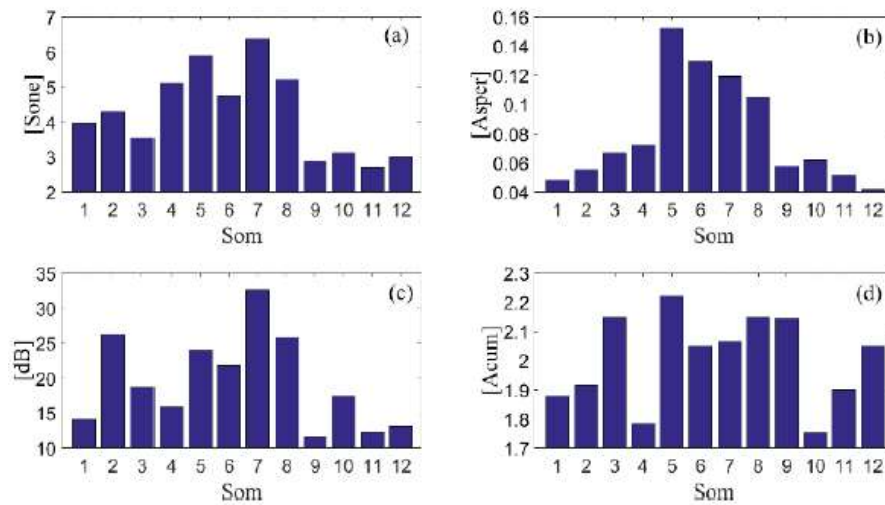
1.2.2 Avaliação da qualidade sonora de um ciclo típico de operação de um refrigerador

O trabalho apresentado em [DEMOLINER, 2010] estabeleceu uma correlação entre os níveis de potência sonora de um refrigerador típico e compressores de características distintas de funcionamento (níveis de ruído, de vibrações e de pulsações) com as respostas subjetivas de um júri utilizando parâmetros psicoacústicos como Loudness, Roughness, Sharpness Tonalidade e Razão tom-ruído. Outro dado importante demonstrado nesta análise exploratória foi a criação de modelos matemáticos de predição para avaliações subjetivas de um júri.

De acordo ainda com [DEMOLINER, 2010], para avaliar a qualidade sonora devem ser levados em consideração outros parâmetros além da pressão sonora, tais como psicoacústicos, físicos e característica do ambiente. A psicoacústica tem importância especial quando se avalia a qualidade sonora de um produto ou ambiente.

Com relação a etapa objetiva desse estudo, foram obtidos sinais sonoros do ciclo completo, desde a partida do compressor até seu desligamento, para cada uma das 12 amostras de compressores testados e instalados no refrigerador sob as mesmas condições. Este ensaio foi realizado conforme a norma ISO 3741. Os dados objetivos foram extraídos utilizando as bibliotecas padrão do MatLab:

Figura 4 - Parâmetros psicoacústicos extraídos dos 12 compressores testados



Fonte: DEMOLINER, 2010

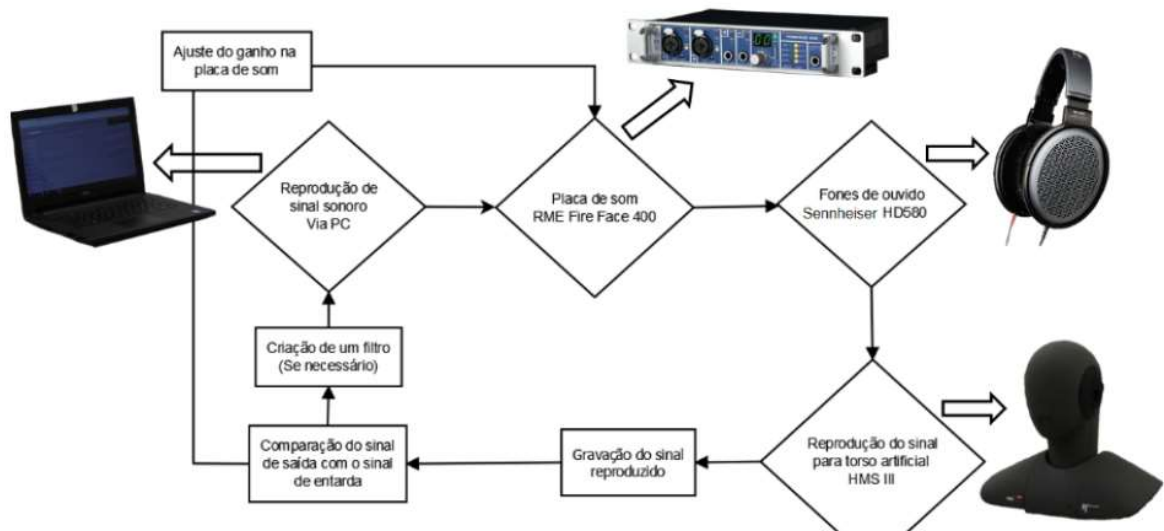
Para o autor é importante que o júri seja o mais representativo possível, similar aos consumidores do produto. A escolha do jurado deve ser baseada primeiramente na sua familiaridade com o produto, experiência em ensaios anteriores e outros aspectos tais como idade e sexo. A familiaridade com o produto é um fator importante a ser observado, pois pode gerar expectativas em relação ao mesmo influenciando nos resultados dos ensaios. A experiência em ensaios anteriores é outro fator importante a ser considerado, pois um jurado treinado percebe com mais clareza nuances nos sons que um jurado sem experiência. Um jurado com muita experiência tende a valorizar aspectos que não são tão importantes ao usuário final, dessa forma, o autor recomenda que para se ter uma maior fidelidade com o usuário final recomenda-se usar jurados com pouca ou nenhuma experiência. O júri foi composto por 60 indivíduos que foram separados em 2 grupos: grupo 1 (G1) com 27 indivíduos com experiência em acústica, no qual 89,9 % eram do sexo masculino (24 homens) e 11,1% do sexo feminino (3 mulheres) e grupo 2 (G2) composto por 33 indivíduos sem experiência em acústica, no qual 54,4 % eram do sexo masculino (18 homens) e 45,6% do sexo feminino (15 mulheres). A média de idade dos participantes do G1 foi de 26,9 anos e do G2 de 29,7 anos.

Para a reprodução dos áudios a sala foi preparada para apresentar baixo nível de ruído de fundo de forma que o mesmo não cause julgamentos equivocados do júri. O ambiente de teste também foi preparado para acomodar o júri de forma confortável com controle de luminosidade, temperaturas entre 20 a 24 °C e com umidade relativa próxima a 50%.

O ajuste do sistema de reprodução foi realizado em uma câmara semi-aneecóica, na qual foi utilizado um ruído branco como sinal de entrada o qual foi reproduzido para o manequim

via fones de ouvido. A diferença de amplitude entre o sinal de entrada e saída foi ajustada no ganho da placa de som. Os sons foram apresentados em sequência aleatória e avaliados via questionário, no qual o indivíduo realizava a avaliação de cada som em uma escala discreta de 5 pontos.

Figura 5 - Fluxograma representativo do sistema de reprodução sonora de refrigeradores



Fonte: DEMOLINER, 2010

Cada som tinha duração de 12 segundos, e, dessa forma, o ensaio teve duração de aproximadamente 20 minutos, na qual 5 minutos foram referentes a ambientação do indivíduo. A avaliação destes sons seguiu três critérios:

Tabela 2 - Critérios de avaliação usados durante a reprodução dos sons

Pergunta
Quão desagradável é este som?
Quão intenso (forte) é este som?
Quão agudo é este som?

Fonte: DEMOLINER, 2010

Para a escolha dos modelos matemáticos mais adequados para cada critério avaliado, foram levados em consideração a representatividade, a complexidade (quantidade de parâmetros psicoacústicos), os coeficientes de determinação e o erro médio quadrático do

modelo. As Tabelas 3 e 4 descrevem respectivamente os modelos obtidos para os grupos sem e com experiência acústica.

Tabela 3 - Modelos de predição obtidos para o grupo sem experiência

Modelo de predição	R^2	R_{aj}^2	$RMSE$
$DG1_2 = 0,12 + 0,47L + 12,84R$	0,82	0,80	0,501
$DG1_3 = 0,07 + 0,3L + 12,45R + 0,04T$	0,84	0,82	0,472
$DG1_4 = 0,09 + 0,3L + 12,61R + 0,03T + 0,01TNR$	0,84	0,82	0,470
$IG1_2 = -0,61 + 0,81L + 6,47R$	0,95	0,94	0,300
$IG1_3 = -0,60 + 0,84L + 6,54R - 0,01T$	0,95	0,94	0,298
$IG1_4 = -0,58 + 0,84L + 6,76R - 0,02T$	0,95	0,94	0,293
$+ 0,01TNR$	0,68	0,65	0,593
$AG1_2 = 0,18 + 0,07T + 0,34L$	0,70	0,67	0,520
$AG1_3 = -0,28 + 0,07T + 0,23L - 4,65S$	0,76	0,73	0,517
$AG1_4 = -3,71 + 0,06T + 0,37L + 2,07S - 2,65R$			

Fonte: DEMOLINER, 2010

Tabela 4 - Modelos de predição obtidos para o grupo com experiência

Modelo de predição	R^2	R_{aj}^2	$RMSE$
$DG2_2 = 1,01 + 0,37L + 10,55R$	0,65	0,61	0,622
$DG2_3 = 1,04 + 0,48L + 10,81R + 0,03T$	0,66	0,62	0,612
$DG2_4 = 1,55 + 0,47L + 11,47R - 0,03T - 0,26S$	0,66	0,62	0,611
$IG2_2 = -1,24 + 0,89L + 7,64R$	0,91	0,90	0,439
$IG2_3 = -1,22 + 0,96L + 7,78R - 0,02T$	0,91	0,90	0,434
$IG2_4 = -1,26 + 0,95L + 7,38R + 0,01T$	0,92	0,91	0,422
$- 0,03TNR$	0,65	0,62	0,653
$AG2_2 = 0,53 + 0,1T + 0,19L$	0,84	0,82	0,446
$AG2_3 = -5,22 + 0,08T + 0,15L + 3,11S$	0,86	0,85	0,411
$AG2_4 = -6,69 + 0,08T + 0,35L + 3,79S - 8,95R$			

Fonte: DEMOLINER, 2010

Na qual:

DGx = modelos referente a desagradabilidade sonora

IGx = modelos referente a intensidade sonora

AGx = modelos referente a agudeza sonora

L = intensidade calculada pela métrica “loudness”

R = aspereza calculada pela métrica “roughness”

S = agudeza calculada pela métrica “sharpness”

T = sensação de tonalidade

TNR = razão tom-ruído

O trabalho apresentado por [DEMOLINER, 2010], apesar de ser aplicado ao segmento de linha branca, possui importante correlação com os objetivos desta dissertação principalmente referente a utilização dos parâmetros psicoacústicos para descrever modelos que descrevam a satisfação do cliente quanto a qualidade sonora. Entretanto não possui um classificador inteligente para avaliar de forma automática com uma regra geral a irritabilidade de novos ruídos.

1.2.3 Desempenho de métodos de avaliação do conforto acústico no interior de aeronaves

Em [BITENCOURT, 2008], a autora propõe implementar uma metodologia para avaliar o conforto acústico no interior de aeronaves partindo de uma análise subjetiva com a aplicação de 5 métodos de avaliação. Os métodos utilizados foram: escala de resposta, estimativa de magnitude, diferencial semântico, comparação pareada e ordenamento. De acordo com a autora, na área da acústica, principalmente em estudos associados à indústria automotiva, estes métodos estão sendo utilizadas com o intuito de avaliar a percepção subjetiva do ruído.

Sobre a etapa objetiva deste trabalho foi realizado um detalhamento sobre 3 áudios captados no interior da cabine com a extração das métricas psicoacústicas Roughness, Sharpness, Tonality, Fluctuation Strenght e Loudness. Os valores extraídos desses áudios com o suporte do software Artemis podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores calculados para os valores psicoacústicos com o software Artemis

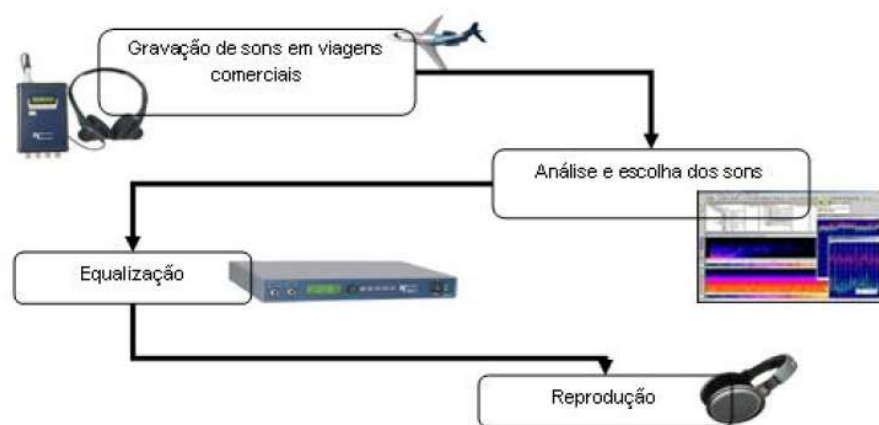
Sons	Intensidade de Flutuação (Vacil)	Loudness (soneGD)	Roughness (asper)	Sharpness (acum)	Tonalidade (tu)
A	0,029	39,5	0,07	1,755	0,14
B	0,005	41,5	0,06	1,605	0,09
C	0,006	40,25	0,07	1,685	0,02

Fonte: BITENCOURT, 2008

Em relação a parte subjetiva, um questionário sobre os 3 áudios A, B e C foi aplicado para um público de 60 pessoas, 43 do sexo masculino e 17 do feminino. As idades variaram entre 18 e 53 anos, com média de 26,25 anos e desvio padrão de 6,29 anos. Todos haviam viajado pelo menos uma vez de avião.

Foi configurado um sistema de reprodução de baixas frequências capaz de transmitir a sensação de vibração na poltrona na qual o indivíduo é submetido ao teste, aproximando assim o ambiente de teste ao ambiente real. Idem para o sistema sonoro. O sistema implantado foi composto de um subwoofer (auto-falante para reprodução de baixas frequências) embaixo da poltrona. A Figura 6 ilustra de forma macro o fluxograma de reprodução adotado.

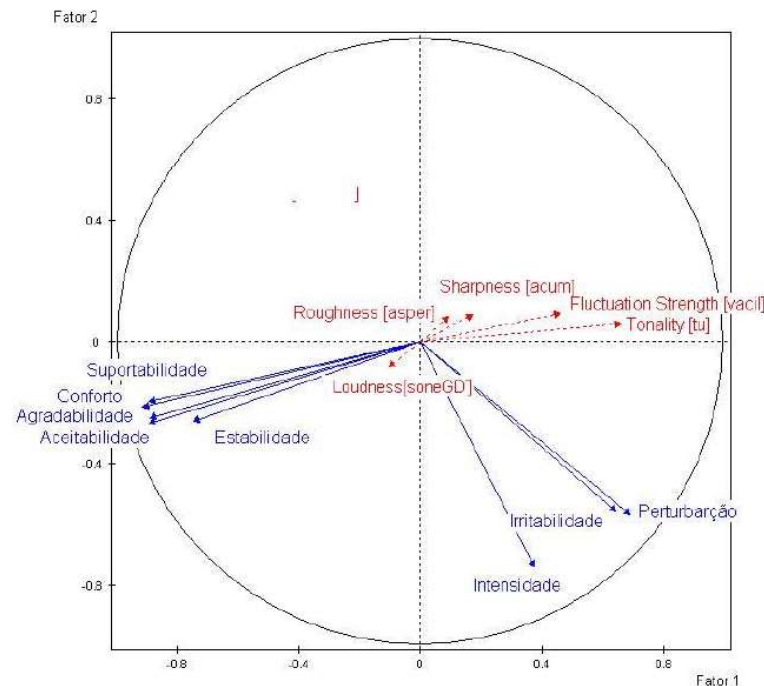
Figura 6 - Sistema de reprodução da avaliação de conforto acústico em aeronaves



Fonte: BITENCOURT, 2008

Para observar a relação entre os modelos psicoacústicos e as avaliações feitas para os sons A, B e C foi processada a Análise de Componentes Principais que possibilitou a representação gráfica da matriz de correlações, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Projeção das medidas objetivas e subjetivas do som, obtidas com a ER(Escala de Resposta), no primeiro plano fatorial



Fonte: BITENCOURT, 2008

É possível verificar que os modelos de Loudness, Roughness e Sharpness estão pouco correlacionados uma vez que a seta é pequena. O modelo de tonalidade é o que parece representar melhor a relação entre os atributos subjetivos do grupo do conforto, suportabilidade, agradabilidade, aceitabilidade e estabilidade. O modelo de Flutuação também apresenta uma correlação significativa com os diferentes grupos avaliados. Nota-se, com os resultados do estudo dos métodos, que o som pior avaliado foi o som com menor Loudness. Nesse caso, é válido mencionar que, apesar do menor valor de Loudness, possivelmente a percepção da flutuação e da tonalidade tenham sido mais consideradas quando o som C foi avaliado além do que a tonalidade pode ser percebida como maior volume. Na sequência do trabalho a autora desenvolveu um software para operacionalização dos ensaios com os métodos para avaliação subjetiva do conforto com o objetivo de automatizar a coleta de dados, reprodução dos sinais e análise objetiva dos áudios estudados. Como conclusão, a análise exploratória apresentada por Bitencourt (2008) demonstra que as métricas psicoacústicas são úteis para a caracterização de diversos eventos sonoros e de como o ouvido humano os transformam em percepções, mas não são suficientemente precisos e nem abrangentes para todo tipo de fenômeno.

1.2.4 Criação de Índice de Qualidade para ruídos no interior de veículos para avaliação de sinais do tipo rattle (chocalho)

Em [WEISCH, 1997], o autor realizou um experimento para a criação de um índice de qualidade sonora do interior de um veículo para avaliação de ruído tipo “rattle”. A análise subjetiva foi realizada com aproximadamente 70 pessoas que inicialmente avaliaram 25 gravações digitais de veículos e configurações diferentes. Cada indivíduo fez a comparação das gravações em pares e elegeu um ordenamento em relação ao nível da qualidade sonora.

Através de um processo de comparação, os dados fornecidos para avaliação subjetiva dos indivíduos foram correlacionados com parâmetros psicoacústicos medidos a partir das mesmas gravações às quais o júri foi submetido. Por meio de uma técnica de regressão múltipla, a combinação de parâmetros mais representativa foi estabelecida.

Foram selecionados 61 parâmetros psicoacústicos, desde os mais utilizados como níveis de pressão sonora até parâmetros novos para uma definição mais detalhada sobre o grau de modulação, periodicidade, etc.

Para encontrar a correlação entre os dados objetivos e os subjetivos, uma regressão múltipla gradual foi aplicada focando na descrição ótima da classificação subjetiva individual dos conjuntos mais representativos, buscando minimizar o erro quadrático. Esse método gerou a melhor combinação de parâmetros e os fatores correspondentes para se construir um índice final de conforto ou desconforto sonoro, conforme equação 1.2:

$$Y_s = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + e = Y_0 + e \quad (1.2)$$

Na qual:

Y_s = vetor da classificação subjetiva

x_i = vetores dos parâmetros objetivos

b_i = coeficiente de regressão

e = vetor de resíduos

Y_0 = vetor de dados objetivos (algoritmo)

Os parâmetros significativos encontrados para a determinação do índice de qualidade para avaliação de ruído do tipo rattle foram:

- Loudness: em sone de acordo com a norma ISO 532;
- Soma dos níveis de modulação: modulação calculada para cada banda de oitava com pesos de acordo com a sensibilidade humana;

- Preferred Periodicity: periodicidade em Hz determinada por análise de espectro;
- Sharpness: em acum de acordo com ZWICKER e FASTL (1999), calculado a partir do diagrama de loudness.

Uma relação com R^2 igual a 0,88 foi encontrada entre o índice estudado e as classificações subjetivas para veículos do mesmo modelo. Para veículos de categorias diferentes o índice encontrado foi de R^2 igual a 0,77. A partir desse estudo, o autor desenvolveu uma ferramenta que permite aperfeiçoar a qualidade sonora para percursos de pavimentos não ideais.

1.3 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo geral implementar uma metodologia para caracterizar ruídos automotivos parasitas em função do nível de irritabilidade do cliente usando métricas psicoacústicas e um classificador inteligente implementado pela inferência de uma regra geral a partir dos dados categorizados.

Mais detalhadamente, os objetivos específicos são:

- Estabelecer uma correlação entre a análise subjetiva efetuada com um júri de não especialista e métricas psicoacústicas;
- Implementar uma metodologia de classificação de ruídos automotivos com o algoritmo ID3 em função do nível de irritabilidade dos clientes;
- Reduzir a subjetividade presente na metodologia aplicada atualmente no setor automotivo baseada somente na opinião de especialistas;

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Essa análise exploratória é estruturada em 5 capítulos distintos. Na introdução é descrita a motivação da escolha do tema, os principais trabalhos relacionados e a definição dos objetivos gerais e específicos.

No segundo capítulo é apresentada uma fundamentação teórica sobre o tema, detalhando inicialmente a teoria sobre ruídos automotivos, formas de irradiação/condução, bem como, as principais fontes. Na sequência uma abordagem sobre a teoria da qualidade sonora é descrita juntamente com a fisiologia do sistema auditivo humano. Uma breve explicação sobre

psicoacústica também se faz presente neste capítulo, assim como, alguns métodos de avaliação. Por fim uma conceituação sobre árvores de decisão para exemplificar a definição do classificador implementado nessa dissertação.

Os materiais e métodos são descritos no terceiro capítulo. Iniciando com o detalhamento do processo utilizado para a aquisição dos sinais de ruídos com a explicação desde a instrumentação do veículo até a fase propriamente de gravação dos sinais em pistas de testes padronizadas. Na sequência o capítulo aborda os passos seguidos para a extração das métricas psicoacústicas dos sinais gravados, o que é definido como análise objetiva. Para concluir, a análise subjetiva com a definição do júri e descrição da forma de avaliação é discutida.

O quarto capítulo detalha os resultados obtidos em ambas as análises objetiva e subjetiva. Nesta etapa também é demonstrada a correlação entre essas duas avaliações e a precisão do classificador para apontar o nível de irritabilidade de cada sinal de ruído.

As conclusões são citadas no quinto capítulo seguidas das recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta conceitos fundamentais explorados nesta dissertação e contextualizados no tema em questão.

2.1 RUÍDOS AUTOMOTIVOS

Segundo Pang (2017) os ruídos automotivos podem ser classificados em duas categorias de acordo com o tempo e sua duração de ocorrência: ruído contínuo e ruído transiente. O ruído contínuo refere-se ao ruído que dura um tempo relativamente longo ou é presente o tempo todo, como ruído do motor e ruído do vento. O ruído transitório refere-se ao ruído que vem e depois desaparece em um curto espaço de tempo. O ruído transitório é um som anormal, comumente chamado de parasita no segmento automotivo.

Em geral, o ruído contínuo acompanha os usuários do veículo durante todo o tempo de utilização do mesmo. Possuem suas próprias características como ordens, velocidade e ressonância que são analisados por teorias e métodos já consolidados, conhecidos e empregados nas áreas de NVH presentes nas montadoras de automóveis.

Os ruídos transientes são denominados como BSR: Buzz, Squeak e Rattle. Buzz é o som gerado pela ressonância estrutural do veículo. Squeak é gerado pelo atrito entre dois objetos e o rattle é induzido pelo impacto intermitente entre dois componentes.

Esse trabalho será focado nos ruídos de S&R (squeak e rattle). Alguns destes ruídos possuem uma duração muito curta, como apenas 10 ms, normalmente são excitados em função do tipo de pavimento, podem ocorrer apenas uma ou várias vezes e seu surgimento também é influenciado em função do ambiente (temperatura, exposição ao sol, etc).

Mais detalhadamente, o rattle é induzido pelo impacto de dois objetos e as frequências correspondentes são relativamente baixas, enquanto o squeak é gerado pelo atrito entre dois objetos e as frequências dependem de seus materiais, pressão superficial e outros fatores.

Como já mencionado na introdução deste trabalho, os clientes brasileiros não toleram os ruídos de S&R. Os clientes correlacionam diretamente esses ruídos com a qualidade e robustez do veículo. Em veículos novos as ocorrências desses eventos podem impactar diretamente a performance de vendas de um certo modelo. Segundo a empresa de consultoria J. D. Power, o S&R é um dos fatores mais importantes na criação de uma impressão negativa da qualidade do produto. Veículos com muitos problemas de S&R estão gradualmente perdendo sua competitividade no mercado. Os clientes consideram um produto de boa qualidade os

veículos com quilometragem acima de 50.000km com baixa ocorrência de ruídos (equivalente a 4 anos de uso).

Além do problema de imagem, os eventos de S&R possuem um grande impacto nos custos de garantia para as montadoras, uma vez que todos os reparos durante esse período são de responsabilidade das empresas.

A maioria dos problemas S&R são induzidos pela excitação dos pavimentos. O squeak e rattle podem ser gerados em muitos componentes de um veículo, especialmente dirigindo em pavimentos com asfalto rugoso, paralelepípedo, estradas off-road e pedras de rio. Os principais componentes geradores destes ruídos são: painel de instrumentos, volante e coluna de direção, portas, porta malas e elementos da suspensão.

2.1.1 Mecanismo do Squeak e Rattle

De acordo com Pang (2017), eventos de S&R são induzidos pelo movimento relativo. As características dinâmicas e o mecanismo acústico do squeak e do rattle são considerados um fenômeno físico altamente não linear. Fatores que influenciam o S&R incluem recursos materiais e estruturais. As características do material incluem seu atrito, impacto, temperatura e umidade, etc. As estruturais incluem as características como rigidez dinâmica do ponto de contato, características de força de impacto ou de atrito, etc. Por se tratar de um problema não linear, é extremamente complexo estabelecer um modelo matemático.

As causas raízes de surgimento do S&R em um veículo podem ser: rigidez estrutural de carroceria insuficiente, incompatibilidade de materiais (no caso de atrito), erros de projeto na implantação de componentes não respeitando a distância mínima entre os mesmos e problemas de conformidade na fabricação e montagem das peças.

2.1.2 Identificação e controle do S&R

De forma geral, a identificação e o controle do S&R passam por três etapas. Na primeira, os problemas de S&R são identificados após a venda dos veículos e em seguida migram para uma base de “lições apreendidas”. Ainda nessa etapa as plantas de produção recebem esse retorno das concessionárias e aplicam melhorias e/ou controles adicionais em seus produtos/processos para conter essas falhas antes da venda dos próximos lotes de veículos. Na segunda etapa, já contando com essa base de lições apreendidas, as metas para o S&R são configuradas no desenvolvimento de novos veículos e os problemas são identificados e

solucionados durante os testes da fase de validação sobre os protótipos e/ou primeiros veículos representativos de série. Na terceira etapa, o controle do S&R é movido para o estágio inicial de desenvolvimento de projetos em que se aplicam diversos testes via CAE e outros métodos analíticos para evitar que os erros já identificados em campo se repitam em um novo veículo.

2.1.2 Definição dos ruídos do tipo Squeak

O squeak é gerado pelo atrito entre dois objetos em contato um com o outro e sujeitos a forças externas. A força de atrito é induzida nas superfícies de contato podendo provocar um movimento relativo entre as duas superfícies. Se os coeficientes de atrito das duas superfícies não forem compatíveis, um rangido será gerado.

A Figura 8 mostra que o objeto A é colocado acima do objeto B e está sujeito a uma força normal F_N e uma força horizontal F . A força de atrito existe nas superfícies de contato dos objetos, desta forma, a força de atrito F_f é expressa como:

$$F_f = \mu F_N \quad (2.1)$$

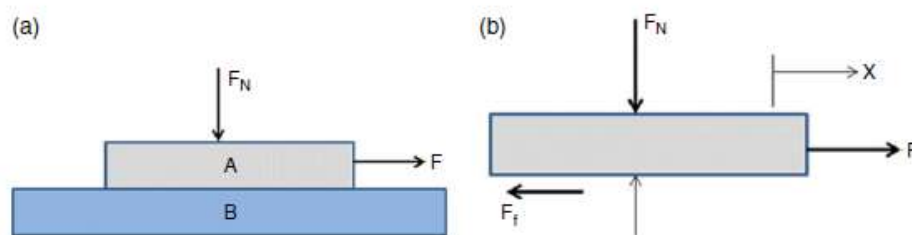
Na qual, μ é o coeficiente de atrito. Quando os objetos A e B estão relativamente parados, μ é o coeficiente de atrito estático e é indicado como μ_s e quando eles têm movimento relativo, μ é o coeficiente de atrito dinâmico e anotado como μ_d . A força de atrito pode ser expressa como:

$$F_d = \mu_d F_N, \quad X > 0 \quad (2.2)$$

$$F_s = \mu_s F_N, \quad x = 0$$

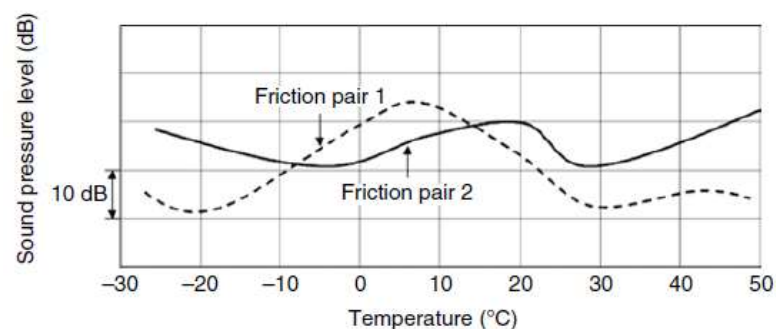
Na qual X e x são o deslocamento e velocidade do objeto A respectivamente.

Figura 8 - (a) Dois objetos em contato sujeitos a uma força normal e uma força horizontal / (b) força de fricção nas superfícies de contato



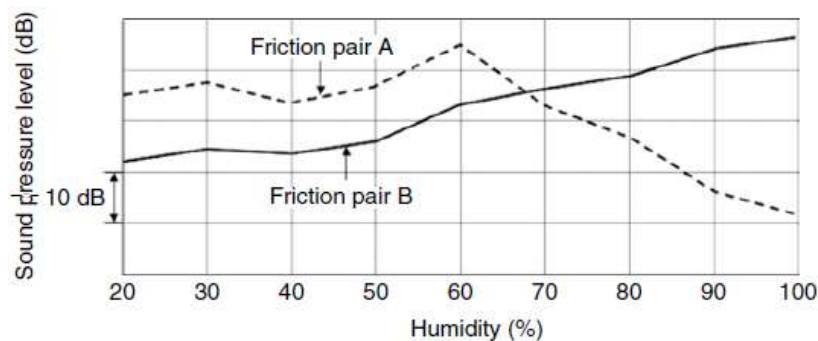
Os principais fatores que afetam o ruído do tipo squeak são: temperatura, umidade, frequência de excitação, velocidade de deslizamento, pressão de contato e as características dos materiais envolvidos. Importante o conhecimento do comportamento de cada material em um determinado ambiente para a correta definição dos materiais a serem utilizados para cada tipo de aplicação. Apenas como título de exemplo, as Figuras 9 e 10 mostram respectivamente como o Nível de Pressão Sonora pode variar em função da temperatura e umidade.

Figura 9 - Nível de pressão sonora do ruído variando com a temperatura



Fonte: PANG, 2017

Figura 10 - Nível de pressão sonora do ruído variando com a umidade



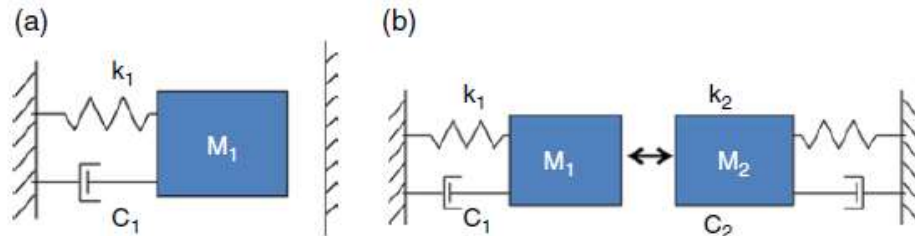
Fonte: PANG, 2017

2.1.3 Definição dos ruídos do tipo Rattle

Dois objetos adjacentes sujeitos a forças externas se colidem e na sequência se separam. Durante o ciclo de impacto e separação, um som conhecido como rattle é gerado. Nos veículos a excitação induzida pelo pavimento das rodagens é a principal fonte de indução dos ruídos tipo rattle. As principais causas raízes para surgimento deste tipo de ruído são: vão insuficiente entre dois componentes que possuem movimento relativo, rigidez insuficiente e perda de estrutura

dos componentes/peças. A Figura 11 mostra a cinemática de surgimento de um ruído do tipo rattle.

Figura 11 - (a) objeto colidindo contra uma superfície parada / (b) colisão entre dois objetos



Fonte: PANG, 2017

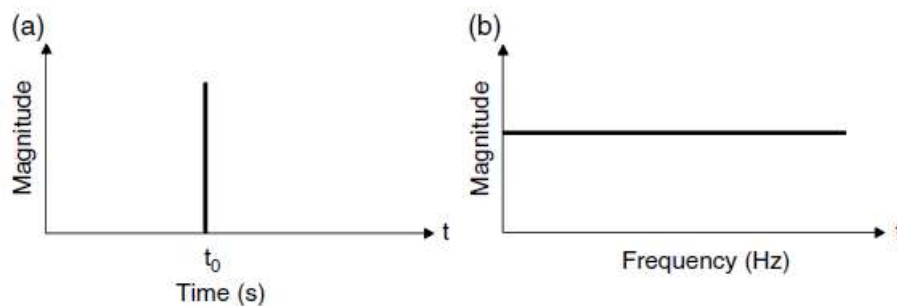
O impacto mais extremo ocorre em um momento que pode ser expresso pela função δ , conforme:

$$\delta(t - t_0) = 0, \quad t \neq t_0 \quad (2.3)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0) dt = 1$$

Essa função é chamada de $\delta(t - t_0)$. A Figura 12 (a) mostra seu gráfico no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência.

Figura 12 - (a) δ em função do tempo / (b) δ em função da frequência



Fonte: PANG, 2017

A função δ obtida pela transformada de Fourier pode ser expressa como:

$$F(\omega) = \int \delta(t - t_0) e^{-j\omega t} dt = 1 \quad (2.4)$$

Conforme demonstrado na Figura 12(b), a função δ no domínio da frequência é uma linha horizontal. A amplitude é a mesma para todas as frequências.

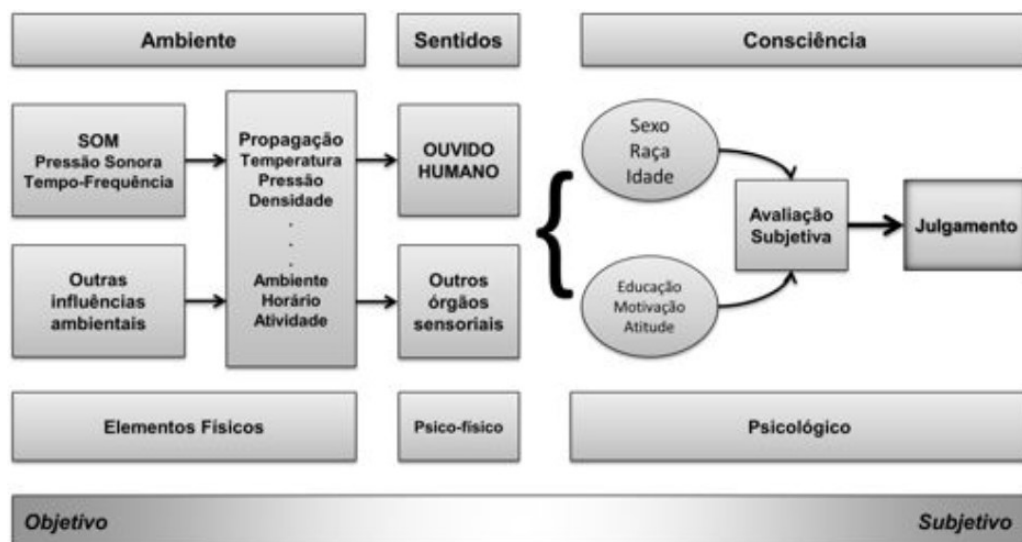
O veículo está sujeito a excitações de frequência de amplo espectro. Desta forma, os ruídos do tipo rattle também podem provocar sinais em uma ampla faixa de frequência estando na maior parte dentro da faixa de 200-2000Hz.

Os principais fatores que afetam o ruído do tipo rattle são: vão de implantação dos componentes/peças, combinação de materiais entre duas peças com risco de contato, problemas de conformidade nos fornecedores e erros de montagem nas montadoras.

2.2 QUALIDADE SONORA

Segundo Sánchez (2012), o termo Qualidade Sonora faz referência ao grau de correlação obtido entre os elementos objetivos e subjetivos que interagem em um evento auditivo. As características físicas do som como amplitude, frequência e fase, junto aos aspectos relativos à sua propagação são correlacionados às particularidades da recepção e interpretação humana. Elementos físicos, psico-físicos e psicológicos participam e influenciam na percepção e julgamento final das informações auditivas (GENUIT, 2002).

Figura 13 - Processo da percepção auditiva



Fonte: SANCHÉZ, 2012

Na Figura 13, os itens do lado objetivo como pressão sonora, estrutura tempo-frequência do fenômeno sonoro e características do meio de propagação influenciam os elementos objetivos/subjetivos como o ouvido humano e suas particularidades, os que por sua vez são

função de características específicas do receptor como sexo, raça, idade, experiência, educação, entre outros. Por fim, a interpretação e julgamento do fenômeno auditivo dar-se-á logo após a combinação dos fatores. Uma vez que a natureza dos elementos que participam no citado processo é de caráter multi-disciplinar, a avaliação da qualidade sonora de um determinado evento auditivo se torna complexa. O estudo da qualidade sonora deve abranger todos os conceitos relativos a ela de forma integral, sem separar os elementos envolvidos no processo (SANCHÉZ,2012).

Por décadas, engenheiros acústicos de desenvolvimento de produto estiveram engajados em reduzir a energia acústica emitida pelo produto. A lógica para os esforços, em termos dos níveis de emissão, era quanto mais silencioso melhor (BLAUERT e JEKOSCH, 1997).

Aos poucos a avaliação sonora passou a ser relacionada com a satisfação do cliente, sendo essa última considerada como critério definitivo para a qualidade a ser julgada, como foi o caso na indústria automobilística. Entretanto, não foi somente o consumidor final do produto, o cliente, que ganhou um voto no ciclo de qualidade. O conceito se estendeu e passa a ser ilustrado nesse momento através de vários exemplos: Do ponto de vista de engenheiros de “product-sound”, os sons possuem melhores qualidades quando podem ser projetados e implementados; para o ponto de vista dos economistas, os sons têm maior qualidade quando podem ser economicamente viáveis; já para o ponto de vista da sociedade, tais sons tem melhor qualidade quanto menos interfira com o ambiente (BLAUERT e JEKOSCH, 1997).

Para Mathias (1995), o objetivo do design de qualidade sonora é o de alcançar o som veicular ideal no máximo de condições operacionais possíveis. O desafio da obtenção da boa qualidade sonora consiste em transferir o som ideal (objetivo) à prática efetiva para um aceitável custo-benefício.

Segundo Auwaraer (1996), existem alguns passos consecutivos a serem seguidos para um processo de engenharia de qualidade sonora, são esses:

- Avaliação da qualidade sonora;
- Diagnóstico da qualidade sonora e identificação do problema;
- Identificação do problema físico e modelagem;
- Solução de engenharia de qualidade sonora.

Para uso prático, no entanto, a função de análise de sinal tem sido empregada para calcular e avaliar um número de parâmetros, os quais se supõem estarem relacionados com a

qualidade sonora. Em muitos casos práticos, visto a relativa importância dos parâmetros aplicáveis para as dimensões perceptuais, uma análise estatística é realizada para correlacionar o resultado da avaliação subjetiva com uma combinação de métricas de qualidade sonora (AUWARAER, 1996). Para essa finalidade o autor agrupou várias técnicas conforme mostrado a seguir:

- Análise de correlação: que considera a relação com os efeitos de uma fonte ou componente particular. Nesta categoria, os componentes críticos do sinal sonoro são relacionados a outros sinais mensuráveis que são mais ligados as causas físicas do problema;
- Análise do caminho de transferência: que considera a contribuição de diferentes espaços abertos e /ou fontes de estrutura de suporte para a resposta sonora;
- Análise numérica e experimental: que considera as características próprias do sistema da estrutura e do espaço acústico.

Com a identificação do problema de qualidade sonora e a compreensão de sua relação com os fenômenos acústicos parte-se então para uma solução de engenharia.

Quando as técnicas discutidas por Auwaraer (1996) são usadas para determinação das fontes, caminhos de transferência e propriedades do sistema mecânico-acústico, o modelo construído poderá ser aplicado também para desenhar e validar soluções. Basicamente, isso é feito através da re-síntese do som após a modificação de alguns elementos e, então, reavaliando ele subjetivamente, através de sessões de escuta ou através de métricas objetivas (BRIZON, 2012).

Em relação a qualidade sonora no segmento automotivo, tenta-se identificar quais aspectos de um som definem sua qualidade. Essa é a principal atividade da maioria das pessoas envolvidas em testes de ruído e vibração. Avaliar somente os sinais acústicos por si não permite a correta identificação de sua qualidade. Os envolvidos usarão palavras como “zumbido”, barato, luxuoso e fraco para descrever a qualidade sonora. Não existem ferramentas puramente objetivas que consigam traduzir a voz do cliente referente a qualidade. Desta forma é necessário a aplicação de testes subjetivos (OTTO 2001).

Desenvolver o veículo integrando os aspectos corretos de conforto acústico impacta diretamente no apelo de vendas e consequentemente na lucratividade das montadoras. Nos tópicos seguintes serão abordadas diversas técnicas de análises subjetivas e objetivas assim como formas de correlacionar ambas na criação de modelos matemáticos que possibilitem uma maior precisão de classificação do nível de irritação dos ruídos nesse segmento.

2.3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

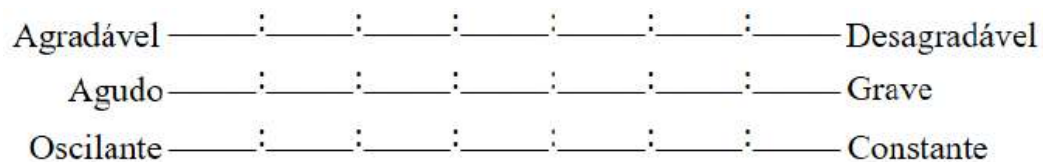
Uma das etapas mais complexas em um trabalho que envolva análises subjetivas sonora é a implementação de uma relação que permita extrair com robustez os dados estatísticos das respostas de um júri sobre a sensação auditiva para cada som reproduzido. A seguir, serão abordados alguns métodos de avaliação amplamente aplicados nesta área.

2.3.1 Diferencial semântico

Este método foi desenvolvido por Osgood, Suci e Tannenbaum (1975) para medir o significado conotativo por meio de uma escala. O método consiste na aplicação de adjetivos bipolares nos extremos dessa escala como: alto/baixo; forte/fraco e intenso/suave.

Segundo Demoliner (2017), o mais complexo na aplicação desse método na área de qualidade sonora é a escolha dos adjetivos bipolares que sejam devidamente compreendidos pelo júri. A Figura 14 mostra um exemplo de diferencial semântico para avaliação de um fenômeno.

Figura 14 - Exemplo de uma possível escala diferencial semântica



Fonte: PAUL, 2009

Para a avaliação do som com a utilização desta técnica faz-se necessário o estudo do campo semântico específico, buscando palavras ou adjetivos que expressem as dimensões próprias do som. Toda a descrição do som, mesmo definições objetivas, precisa ser adequada e composta por palavras compartilhadas comumente pelos participantes. Na avaliação subjetiva do som, a necessidade da semântica apropriada é fundamental para que os instrumentos de medida sejam aplicáveis e os resultados sejam válidos (Pasquali, 2007).

Os tratamentos dos dados estatísticos desse método podem ser realizados através de uma regressão linear e fatorial.

2.3.2 Escala de resposta ER

Inicialmente aplicada em psicologia, este método foi adaptado pela engenharia no qual o júri após avaliar o som reproduzido atribui uma posição em uma escala. No caso deste trabalho, esta escala pode ser utilizada, por exemplo, para se determinar o nível de irritação de um determinado ruído. A Figura 15 representa uma possível escala de resposta.

Figura 15 - Exemplo de uma possível escala diferencial semântica discreta com 5 pontos



Fonte: PAUL, 2009

Em geral os sons são reproduzidos em uma determinada sequência sem a realização de repetições. Este é um método simples de ser realizado e oferece uma resposta quantitativa direta (BECH, 1987).

Este é um método rápido e simples, uma vez que a maioria das pessoas está habituada com o processo de avaliação. Além disso, fornece uma informação quantitativa direta sobre as diferenças entre um som e outro. Sua dificuldade consiste na padronização das escalas de resposta definidas pelo júri (OTTO, 2001).

2.3.3 Comparação pareada

Neste método os sons são reproduzidos aos pares e é solicitado ao júri que o mesmo escolha um dos sinais de acordo com um critério pré-determinado. Devido a essa obrigação em escolher sempre um dos sons este é denominado como um método de avaliação forçado. Segundo Demoliner (2017), este método pode ser realizado de três maneiras:

- Avaliação de detecção: O jurado escolhe se uma determinada característica do som é detectável em um dos sons apresentados. Utiliza-se esse método para determinar limiares;
- Método do critério de avaliação: Os jurados realizam a escolha de um dos sons baseados em algum critério. Os critérios a serem utilizados podem ser o de sensação de agudeza ou sensação de intensidade, por exemplo. Deve ser tomado cuidado especial para que o jurado compreenda o significado de cada um dos critérios;
- Método da similaridade dos sons: Nesta metodologia os jurados estimam a similaridade entre os sons. Após serem feitas as avaliações é montada uma grade numerada sobre a linha na qual os jurados realizam as marcas e na sequência são convertidas em números.

A desvantagem do método de comparação pareada é que os pares crescem com o número de sons ao quadrado, tornando o processo de avaliação extremamente custoso e demorado. Para contornar essa desvantagem pode-se utilizar uma análise por blocos incompletos, através da seleção apropriada dos pares de sons que formarão os blocos. Essa seleção deve ser realizada por um pesquisador com experiência no assunto (OTTO, 2001).

2.3.4 Estimativa de magnitude

Neste método o jurado deve atribuir um número a algum atributo do som que esteja sendo avaliado.

Teoricamente não existe limite nem para o número de sons a ser avaliado, nem para a escala de avaliação (LIMA, 2005). Essa falta de limite gera uma grande variabilidade das respostas e impõe a necessidade de uma normalização das respostas antes do aprofundamento das análises. Mesmo com a possibilidade em aplicar uma normalização nas respostas, esse método é mais indicado para avaliadores treinados, pois dessa forma obtém-se uma variabilidade menor e resultados mais consistentes (FRANCESCO, PANERO e ROSSI, 2003).

2.3.5 Posto de ordem

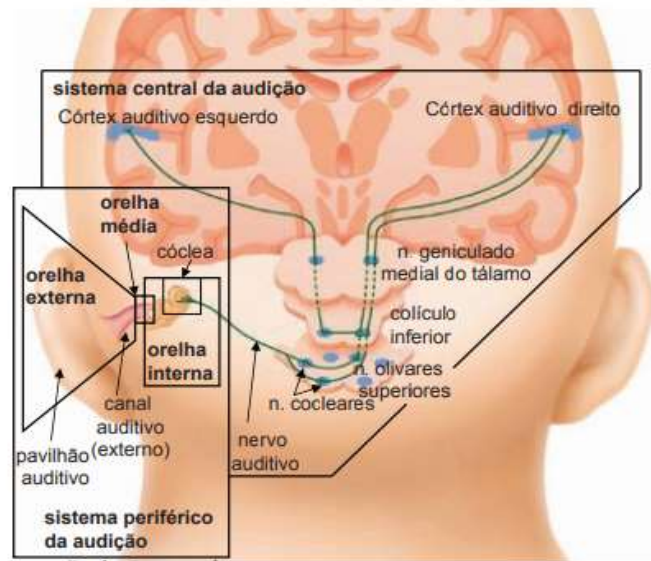
Este método somente deve ser usado em avaliações subjetivas em que o tamanho da amostra é pequeno uma vez que consiste apenas em ordenar os sons pelos jurados de acordo com algum critério de avaliação (ordenar o som do mais para o menos intenso). O aumento no tamanho da amostra impacta diretamente na precisão das avaliações do jurado devido as dificuldades em memorizar as características de cada sinal sonoro reproduzido.

Deste método não podem ser extraídas informações quantitativas sobre as avaliações, impossibilitando a correlação das respostas dos jurados com parâmetros objetivos. O principal uso desse método é para análises iniciais rápidas da preferência do consumidor com relação a algum produto em um conjunto de produtos (ROSSI e NICOLINI, 2008).

2.4 AUDIÇÃO HUMANA

De acordo com Paul (2014), o sistema auditivo pode ser dividido em duas partes: sistema periférico e sistema central de audição, conforme ilustrado na Figura 16. Devido à complexidade do sistema central este não será tratado em detalhes nessa dissertação.

Figura 16 - Divisão entre o sistema periférico da audição e o sistema central da audição

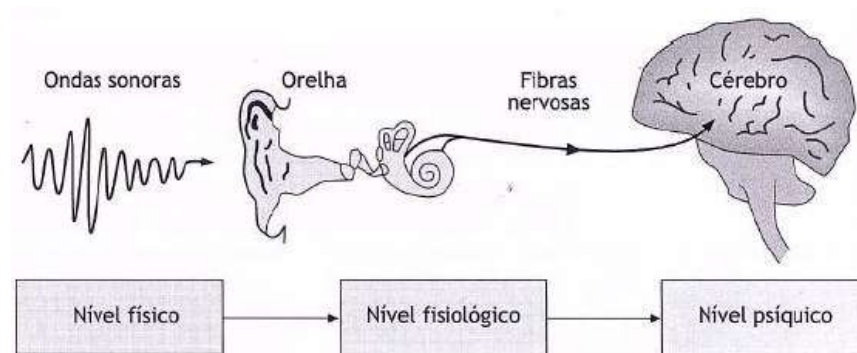


Fonte: PAUL, 2014.

O sistema periférico de audição é composto pela orelha e as conexões por neurônios que levam aos córtices auditivos, este já parte do sistema auditivo central. O sistema periférico é o responsável pela recepção do estímulo físico do som, caracterizado por pressão sonora e frequência, a transformação do mesmo em impulsos nervosos (carga elétrica) e sua condução até os córtices auditivo.

A Figura 17 resume o processo de processamento do som pela audição humana. As informações no nível físico do som, na forma de ondas sonoras, são captadas, processadas e codificadas em nível fisiológico pela orelha, e enviadas ao cérebro pelas fibras nervosas auditivas. No nível psíquico, o cérebro interpreta as informações recebidas e determina seu significado e importância (BRIZON, 2012).

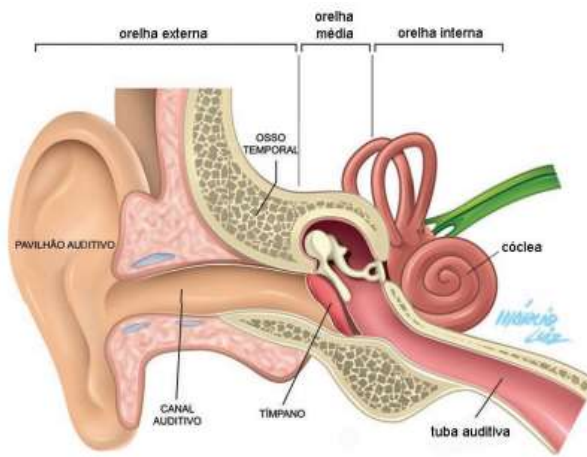
Figura 17 - Processamento do som nos seres humanos



Fonte: BISTAFA, 2006.

A orelha como um todo tem duas funções: receber o som e transformá-lo em sinais nervosos. Ela é composta por orelha externa, orelha média e orelha interna. A membrana timpânica separa a orelha externa da média e a janela oval e a janela redonda separam a orelha média da orelha interna. Toda a orelha é um sistema que tem muitas funções em um volume de apenas 17 cm³ podendo ser considerada uma obra prima de engenharia (PAUL, 2014). Esse sistema é ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Sistema periférico de audição (orelha e o início do nervo auditivo)



Fonte: PAUL, 2014.

Em mais detalhes:

- Orelha externa: é um órgão especializado em concentrar as ondas sonoras na cavidade do ouvido e pelo canal auditivo. Este é um tubo de mais ou menos 3 cm de comprimento, fechado na parte interna pelo tímpano (BRIZON, 2012);
- Orelha média: é composta pela membrana timpânica, a cavidade timpânica com três ossículos entrelaçados por músculos e tendões, e a tuba auditiva (antigamente chamado de tubo de Eustáquio). Desempenha funções como a de atuador do reflexo acústico;
- Orelha interna: é composta pelo sistema vestibular, este compreendendo os canais semicirculares e o sistema coclear, de grande importância para a audição.

O som pode ser transmitido de duas formas: via aérea ou via óssea.

De acordo com Fernandes (2009), sobre a audição via aérea, as transformações do som em impulsos elétricos ao cérebro passam pelos seguintes processos:

- As ondas sonoras chegam até o pavilhão auditivo e são conduzidas ao canal auditivo (meato acústico externo). Além de conduzir o som ao canal auditivo, o pavilhão também ajuda na localização da fonte sonora;
- As ondas sonoras percorrem o canal auditivo e incidem sobre o tímpano (membrana timpânica), fazendo-o vibrar com a mesma frequência e amplitude da energia do som. As ondas sonoras (pressão) são transformadas em vibração;
- A vibração do tímpano é transmitida para o cabo do martelo que faz movimentar toda a cadeia ossicular;
- A vibração do martelo é transmitida para a bigorna e para o estribo, através de um sistema de alavancas que aumentam em 3 vezes a força do movimento, diminuindo em 3 vezes a amplitude da vibração;
- A vibração da platina do estribo é transmitida sobre a janela oval, que está em contato com o líquido do ouvido interno. A vibração é transformada em ondas de pressão no líquido. Como a relação entre as áreas do tímpano e da janela oval é de 14:1, ocorre uma nova amplificação do som pela redução da área;
- A vibração no líquido da cóclea é, portanto, uma onda sonora (longitudinal) semelhante à onda sonora que chegou ao pavilhão auditivo, com a mesma frequência, porém com a amplitude reduzida de 42 vezes (3×14) e a pressão aumentada de 42 vezes.

Sobre a audição via óssea, segundo Brizon (2012), as vibrações da energia sonora podem chegar ao ouvido interno (cóclea) através dos ossos do corpo humano, principalmente da caixa craniana. Um exemplo disto é o barulho que escutamos quando mastigamos ou coçamos a cabeça.

A audição por via óssea acontece quando as ondas sonoras chegam até os ossos da cabeça, fazendo-os vibrar. Esta vibração é conduzida pelos ossos até os ossículos do ouvido médio e diretamente até a cóclea, provocando ondas nos líquidos internos e provocando a sensação da audição. A audição por via aérea é muito mais sensível que por via óssea; como exemplo, se nós eliminássemos a audição aérea de uma pessoa, ela escutaria um nível sonoro com, aproximadamente, 60 dB de atenuação.

Estudos demonstram que os ossos do crânio vibram de forma diferente para diversas bandas de frequência. Para sons graves, próximos a 200 Hz, o crânio vibra como um corpo rígido. Para frequências em torno de 800 Hz a caixa craniana se deforma na direção anterior posterior, e para 1500 Hz a deformação é lateral. Outro mecanismo importante na audição por

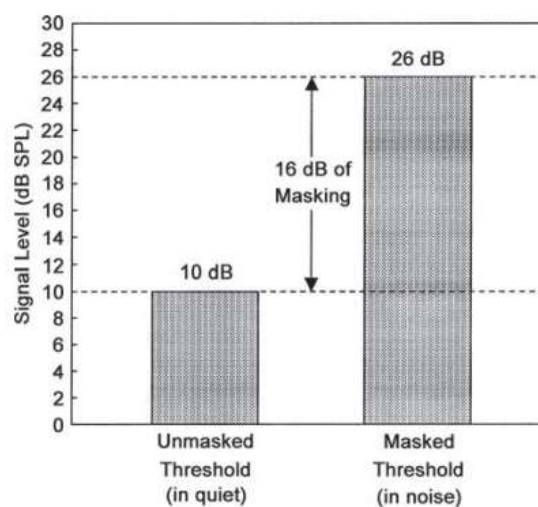
via óssea é a vibração que chega ao ouvido através da mandíbula, que é ligada diretamente no osso temporal (FERNANDES, 2009).

2.4.1 Mascaramento

Segundo Paul (2014), o mascaramento é um fenômeno auditivo muito importante. Ele pode acontecer no domínio da frequência e/ou no tempo. Em ambos os casos, ele pode ser total ou parcial. Tons puros podem ser mascarados por ruído de banda, por tons puros, ou por tons complexos. De forma geral, esses fenômenos podem ser classificados em mascaramento energético e informacional. O grupo do energético compreende o mascaramento simultâneo, incluindo o remoto e comodulation masking release, temporal e por fim o mascaramento central.

O mascaramento é o fenômeno de elevação do limiar da audição para um som particular na presença de um outro som dito mascarador e também a quantidade pela qual a intensidade do estímulo mascarador deve ser maior que a intensidade do sinal para que este seja mascarado conforme demonstrado na Figura 19. Em muitos casos a magnitude do mascaramento depende principalmente do espectro e da intensidade, e é explicado pela fisiologia da audição, principalmente padrões de excitação e largura de banda crítica.

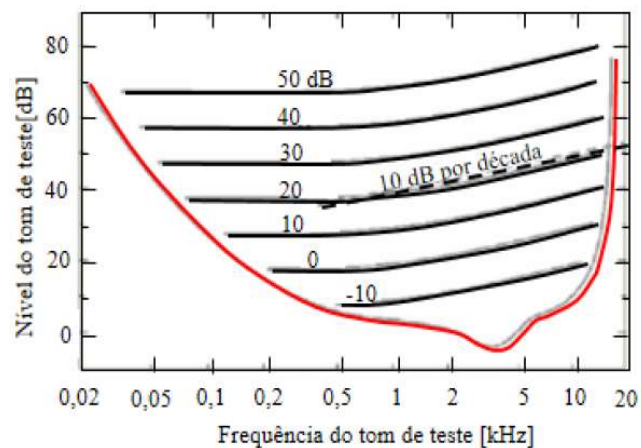
Figura 19 - Exemplo hipotético no qual um mascarador aumenta o limiar de audição para um sinal em 16dB



Fonte: PAUL, 2014

Limites de mascaramento de um tom de teste mascarado por um ruído branco em vários níveis de intensidade podem ser visualizados na Figura 20. A linha vermelha do contorno inferior representa o limiar da audição.

Figura 20 - Limites de mascaramento

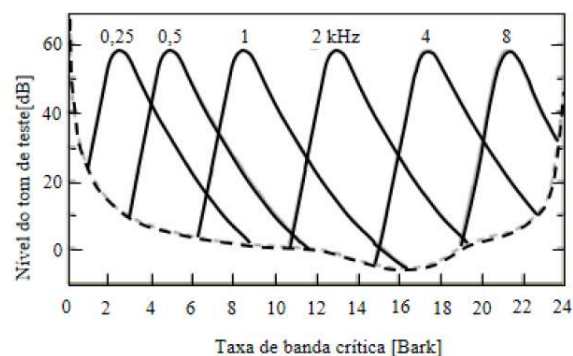


Fonte: FASTL e ZWICKER, 1999

Observa-se que para frequências acima de 500 Hz as curvas de mascaramento crescem em função do incremento de frequência, em uma taxa de aproximadamente 10 dB por década.

Na Figura 21, visualiza-se o mascaramento de tons puros por ruídos com larguras de banda crítica centrados nas frequências de 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz e 8 kHz.

Figura 21 - Mascaramento de tons puros



Fonte: FASTL e ZWICKER, 1999

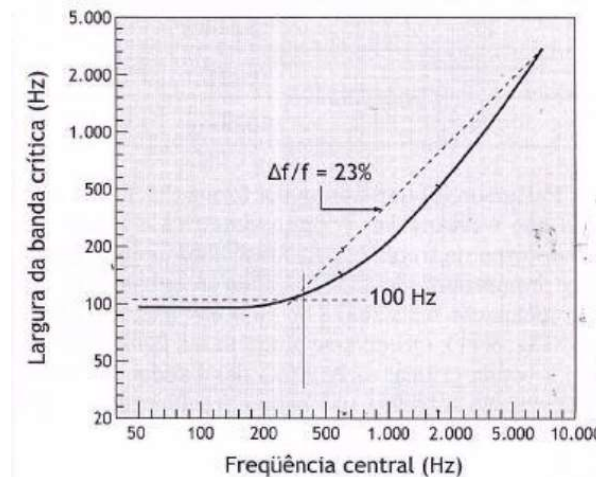
2.4.2 Banda Crítica

De acordo com o mecanismo de audição, tons puros de diferentes frequências colocam em movimento vibratório diferentes pontos da membrana basilar. Tons puros de alta frequência vibram pontos próximos a base e tons puros de baixas frequências vibram pontos próximos ao

ápice da membrana basilar. Embora cada frequência seja mapeada num ponto específico da membrana basilar, ocorre que esse ponto não consegue vibrar sem que uma faixa da membrana ao seu redor vibre junto. Essa faixa é denominada banda crítica (BISTAFA, 2006).

A largura da banda crítica é determinada pelas propriedades da membrana basilar. Algumas aproximações práticas são utilizadas para determinação da banda crítica como apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Largura da banda crítica em função da frequência central.



Fonte: BISTAFA, 2006.

2.4.3 Conforto acústico

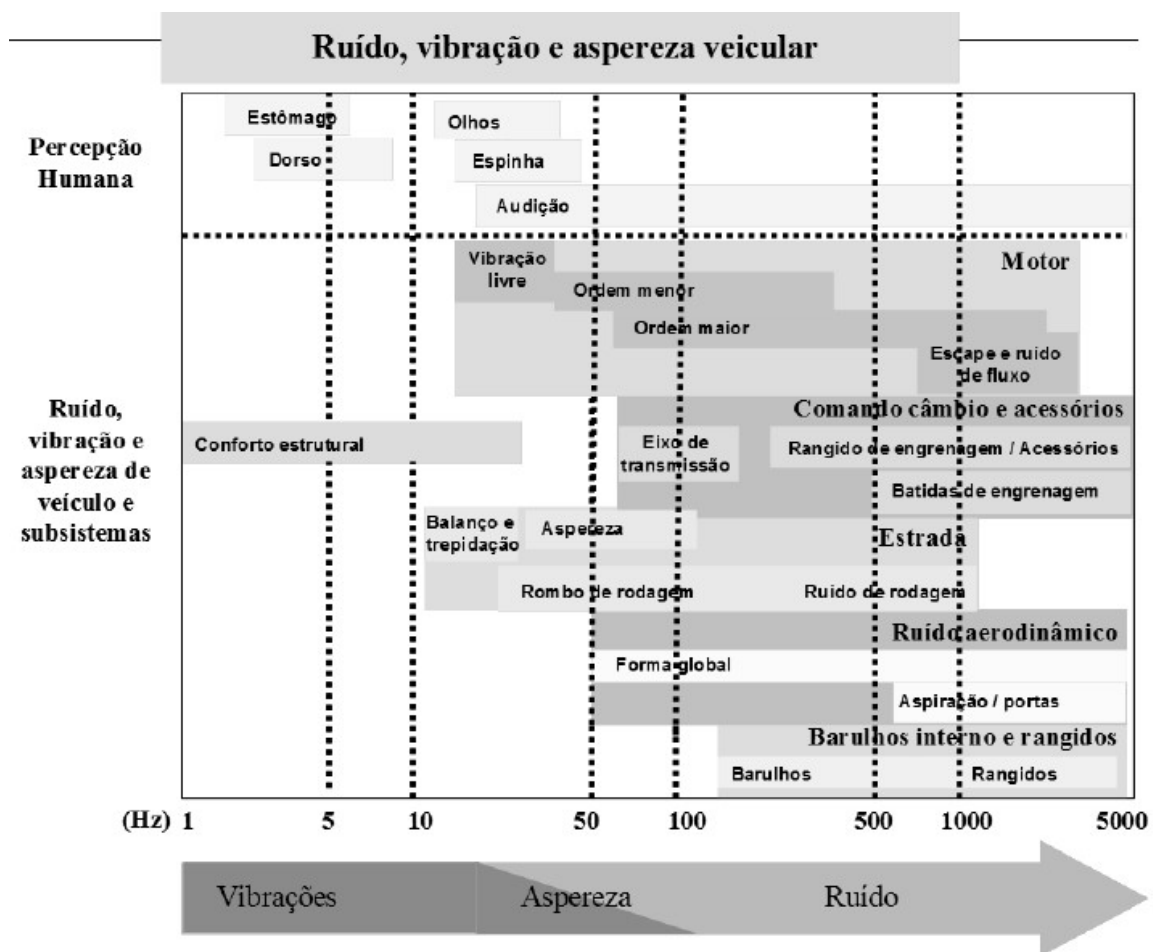
A sensação de conforto acústico dentro de um veículo está relacionada, principalmente, a dois fatores: às características dos sons emitidos pelo veículo e à forma como o ser humano percebe e julga esses sons. Tais fatores correspondem, respectivamente, às duas extremidades no processo de geração e percepção acústica. A última depende, em parte, do histórico do indivíduo em relação a sua experiência auditiva. Há indivíduos que são mais atentos aos sons que o veículo gera, outros não. O som do motor pode, por exemplo, parecer fascinante para um jovem. O som do movimento do retrovisor pode fazer os adultos se lembrarem dos antigos filmes de ficção científica. O som emitido pelo movimento do vidro pode incomodar bastante os mais críticos (BRIZON e MEDEIROS, 2010).

Se por um lado temos uma série de características da fonte de ruído como composição espectral, distribuição temporal, e os próprios níveis de intensidade, por outro temos uma gama de atributos fisiológicos e psicológicos particular de cada indivíduo na percepção do conforto (BISTAFA, 2006).

Seguindo a linha de pesquisa com origem na psicoacústica, outras técnicas foram desenvolvidas. A mais difundida é a “Qualidade Sonora”, voltada para qualidade acústica do produto. As avaliações subjetivas também evoluíram com o tempo. A reprodução dos ruídos em laboratório utilizando sistemas de aquisição dedicados, que simulam a audição binaural (escuta realizada pelos dois ouvidos), é uma ferramenta fundamental e permite que um júri avalie comparativamente diversas condições de um mesmo veículo ou encontre diferenças entre veículos (OTTO, 2001).

Conforto acústico, capacidade de comunicação no interior do veículo e integridade física dos ocupantes são questões que devem ser trabalhadas de forma abrangente e integradas. Vale ressaltar que aliado a essas questões tem-se também que não é possível dissociar a percepção acústica da percepção vibracional, sendo essa última um importante parâmetro a ser considerado durante as avaliações (BRIZZON, 2012). A Figura 23 ilustra uma correlação entre ruído, vibração e percepção humana.

Figura 23 - Correlação entre ruído, vibrações e percepção humana



Fonte: NVH - Fiat automóveis, 2012.

2.3 PSICOACÚSTICA

A psicoacústica é uma área científica que estuda a percepção sonora por meio de testes empíricos, aplicados a um grupo de indivíduos modelo, com análise estatística dos resultados. A psicoacústica, então, estuda a resposta subjetiva e psicológica de atributos físicos, ou acústicos, do som. A base dessa relação é o mecanismo fisiológico de escuta, que entende-se aqui, principalmente, como o aparato mecânico do ouvido (PORRES, 2012).

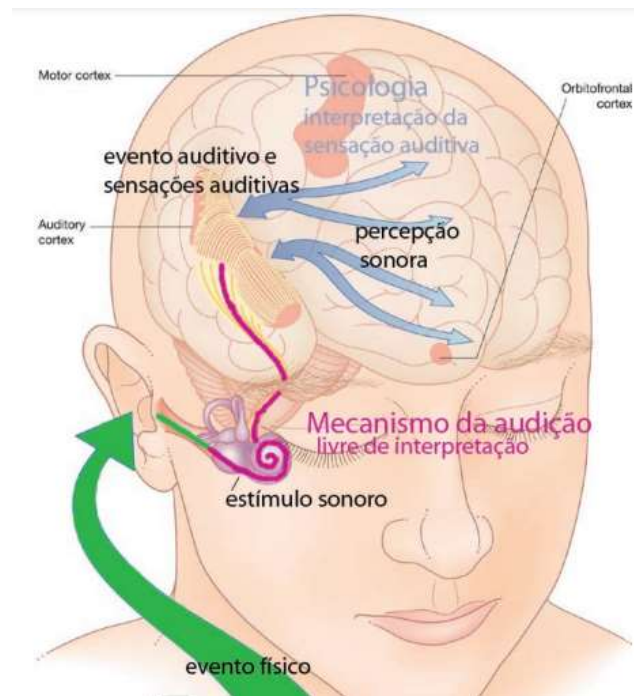
O sistema auditivo humano possui grande habilidade em receber sinais, que não é determinada somente pela relação qualitativa entre som e sensação auditiva, mas também pela relação quantitativa entre estímulos acústicos e sensações auditivas (FASTL e ZWICKER, 1999).

Pode-se investigar os fenômenos psicoacústicos através de medições experimentais e modelos que simulam alguns aspectos medidos da audição humana. O processamento de sinais do sistema auditivo e as sensações auditivas geradas no ser humano (volume, por exemplo) são alguns dos estudos realizados em psicoacústica. A partir desses conhecimentos pode-se gerar modelos psicoacústicos (PAUL, 2009).

Em psicoacústica, deseja-se correlacionar características físicas do evento sonoro com psicologia e a fisiologia do sistema auditivo, de forma que as sensações auditivas possam ser relacionadas à percepção sonora do ser humano. As sensações auditivas são geradas por ondas mecânicas, as quais chegam ao tímpano, criando um estímulo como já explicado nas seções anteriores deste capítulo. Este estímulo passa por um mecanismo de transformação de amplitude e, por fim, sendo transformado em um sinal elétrico (WERNER, 2015). Antes que haja a percepção sonora, o sinal percorre toda a cadeia de ossículos (estribo, martelo e bigorna) na orelha média e a membrana basilar (banco de filtros).

A Figura 24 apresenta um esquema da transformação de um evento sonoro em percepção sonora.

Figura 24 - Esquema da transformação do evento sonoro em percepção sonora



Fonte: PAUL, 2014.

Sendo assim, o mecanismo da audição compreende dois processos principais: a transformação dos estímulos físicos em impulsos nervosos e o processamento desses impulsos para gerar as sensações auditivas (PAUL, 2014). O primeiro processo pode ser decomposto em sub-processos, tais como, a recepção do som pelo aparelho auditivo, a condução do som pelo canal auditivo e, subsequentemente, pelos ossículos da orelha média, a transformação da vibração em impulsos nervosos pelas células ciliadas no órgão de Corti e o envio dos impulsos nervosos ao córtex auditivo.

2.4 PARÂMETROS PSICOACÚSTICOS

Os parâmetros psicoacústicos serão extraídos a partir de um determinado ruído com o objetivo de compor a análise objetiva. A Tabela 6 descreve os parâmetros usados nesta investigação e a sensação auditiva que os mesmos quantificam.

A definição das métricas psicoacústicas a serem utilizadas foi baseada em dois princípios. O primeiro, referenciando experiências anteriores usando como base estudos na mesma área como Brizon (2012), Rossi (2008) e Vikram (2017), todos com o foco em correlacionar análises subjetivas de audição com parâmetros objetivos de métricas

psicoacústicas para determinar o nível de agradabilidade ou irritabilidade de um determinado ruído/evento sonoro. O segundo fator de decisão são estudos como de Paul (2014) que procuram descrever os principais fatores que impactam na sensação auditiva. Fatores esses relacionados a percepção de volume, para qual a métrica escolhida foi o loudness. Fator relacionado ao impacto do espectro sonoro / agudeza para o qual a métrica sharpness foi a escolhida e por fim, fator relacionado a modulação do sinal na qual duas métricas foram selecionadas e classificadas em função da faixa de frequência que atuam. Fluctuation strenght $f < 20\text{Hz}$ e roughness para $f > 15\text{Hz}$. A Tabela 1 descreve os parâmetros utilizados nessa investigação.

Tabela 6 - Parâmetros psicoacústicos considerados no estudo

Parâmetro	Sigla	Sensação auditiva
Loudness	L	Intensidade
Roughness	R	Aspereza
Sharpness	S	Agudeza
Fluctuation Strenght	FS	Flutuação

Fonte: AUTOR

2.4.1 Loudness

O loudness, L , tem como unidade o phon¹ e pertence ao grupo de parâmetros psicoacústicos correlacionados a intensidade sonora. Segundo Zwicker e Fastl (1999) as comparações de intensidade podem levar a resultados mais precisos do que estimativas de magnitude. Por esta razão, a medida do nível de sonoridade/intensidade foi criada para caracterizar a sensação de volume de qualquer som.

Segundo Chang, Wu e Hung (2013) a principal diferença entre a sensação de volume e nível de intensidade é o fator de escala. Para um nível de 40 dB com frequência de 1000 Hz tem-se a sensação de volume de 1 sone. Quando o sinal com mesma frequência é aumentado 10 dB a sensação de volume é dobrada (2 sones) ou possui um incremento de 10 phons.

As Equações 2.5 e 2.6 mostram a relação de transformação de phon para sone e sone para phon respectivamente:

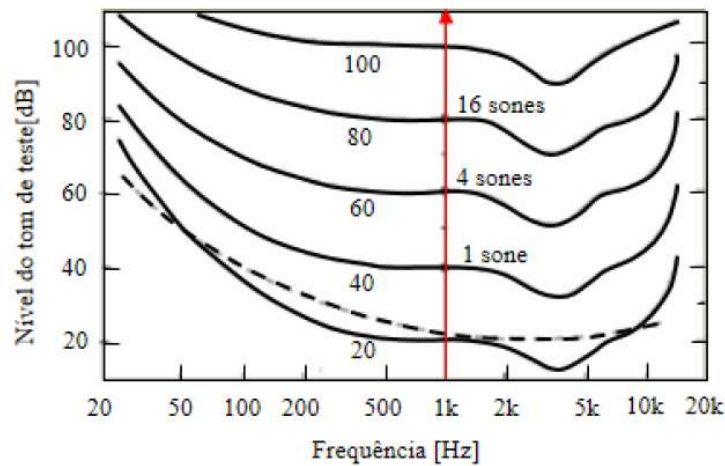
$$\text{sone} = 2^{\left(\frac{\text{phon}-40}{10}\right)} \quad (2.5)$$

¹ Conceito proposto por Stanley Smith Stevens em 1936. É a unidade principal para quantificar a audibilidade.

$$phone = 40 + \log_2(sone) \quad (2.6)$$

A Figura 25 mostra as curvas chamadas de contornos de intensidade igual (sensação de volume). Essas curvas conectam pontos de mesmo volume na área de audição. A linha pontilhada representa o limiar de audição.

Figura 25 - Curva de igual sonoridade



Fonte: FASTL e ZWICKER, 2006

Observa-se que as curvas possuem valores tendendo ao nível de pressão sonora de 1 kHz. A partir dessa definição tem-se a curva na qual o limite de sensação de loudness (limiar da audição) é alcançado, com valor de 3 phons, pois no limite do silêncio tem-se 3 dB em 1 kHz (FASTL e ZWICKER, 2006).

Segundo Zwicker e Fastl (2006), o loudness é calculado através da Equação 2.7 em função da Escala Bark (z) que é a unidade de frequência da chamada escala da taxa de banda crítica:

$$L = \int_0^{24Bark} L' dz \quad (2.7)$$

O termo L' da Equação 2.8 é chamado de loudness específico, e é calculado conforme:

$$L' = 0,08 \left(\frac{I_{LS}}{I_0} \right)^{0,23} \left[\left(0,5 + 0,5 \frac{I}{I_{LS}} \right)^{0,23} - 1 \right] \quad (2.8)$$

Na Equação 2.8, I_{LS} corresponde a intensidade sonora no limiar da audição, I_0 corresponde a intensidade de referência ($10^{-12} W/m^2$).

O algoritmo de loudness implementado neste trabalho é baseado no modelo de Zwicker e Fastl (2006), segundo a Norma ISO 532-1.

2.4.2 Roughness

O parâmetro psicoacústico de roughness, R , está relacionado com a modulação do som em amplitude ou frequência. Essa sensação começa a ser percebida a partir da frequência de modulação de 17 Hz e atinge seu valor máximo em torno de 70 Hz, decrescendo para valores mais altos de frequência de modulação. Sua unidade é o asper. Asper é a sensação produzida por um tom puro de 60 dB com frequência de 1 kHz, 100% modulado em amplitude na frequência de 70 Hz. O parâmetro de roughness tem três fatores importantes para sua determinação: amplitude, grau e frequência da modulação. A sensação de roughness ocorre através de uma mudança rápida na frequência de modulação entre as frequências de 15 Hz e 300 Hz, excluindo a necessidade de uma modulação periódica exata, sendo importante apenas que o espectro de modulação esteja entre 15 Hz e 300 Hz. O roughness pode ser considerado individualmente, ignorando as demais sensações auditivas (FASTL, ZWICKER, 2006).

A equação 2.9 descreve a equação proposto por Fastl e Zwicker (2006) para calcular o roughness:

$$R = 0,3 f_{mod} \int_0^{24Bark} \Delta L_E(z) dz \quad (2.9)$$

na qual R é o roughness expresso em asper, ΔL_E é a amplitude de modulação levando em conta os efeitos de mascaramento e f_{mod} a frequência de modulação em Hz.

2.4.3 Sharpness

O parâmetro psicoacústico de sharpness, S , de unidade acum, quantifica a agudeza de um áudio e está relacionado a sensação de agradabilidade sonora. Valores de alta frequência possuem grande energia de sharpness.

O sharpness pode ser compreendido como uma ponderação do loudness. O sinal de referência para o sharpness é um ruído com frequência centrada em 1 kHz e com um nível igual

a 60 dB e largura de banda igual a uma banda crítica. De acordo com Aures (1985), pode ser calculado a partir do loudness específico L' como expresso na equação 2.10:

$$S = 0,55935 \frac{\int_0^{24Bark} L' e^{0,171z} dz}{1000 \ln\left(\frac{L+20}{20}\right)} \quad (2.10)$$

na qual S é o sharpness e z é o índice de banda crítica e L o loudness conforme a ISO 532-1.

2.4.4 Fluctuation strenght

A intensidade de flutuação está relacionada com a percepção de flutuação no nível do som ou irregularidades que podem ocorrer devido à modulação do sinal para frequências de 1 a 20 Hz. Nessa faixa de frequência o som é percebido como uma variação de volume (amplitude) ao longo do tempo. Tipicamente um som com essa característica tende a ser percebido mais forte do que um som contínuo com a mesma amplitude. A unidade utilizada para representar a intensidade de flutuação é o vacil. Frequências de modulação de 4 Hz são mais sensíveis ao ouvido humano. Sirenes de ambulância possuem uma frequência de modulação de 4 Hz (BITENCOURT, 2008).

A equação 2.11 descreve um modelo para o cálculo de fluctuation strenght F em vacil.

$$F = \frac{0,008 \int_0^{24} \Delta L(z) dz}{\left(\frac{f_{mod}}{4}\right) + \left(\frac{4}{f_{mod}}\right)} \quad (2.11)$$

Na qual:

f_{mod} = é a frequência de modulação em Hz

$\Delta L(z)$ = é a profundidade de mascaramento

2.4 REGRESSÃO LINEAR

A técnica de regressão linear é uma das metodologias mais aplicadas em problemas como o apresentado nessa dissertação para demonstrar a influência de cada um dos parâmetros na resposta final do cliente/jurado.

A análise de regressão consiste na realização de uma análise estatística com o objetivo de verificar a existência de uma relação funcional entre uma variável dependente com uma ou mais variáveis independentes.

A equação 2.12 fundamental da regressão linear pode ser aplicada por exemplo para demonstrar a correlação entre os dados objetivos e os subjetivos levantados através da análise do júri.

$$Y_s = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + e \quad (2.12)$$

Na qual:

Y_s = vetor da classificação subjetiva

x_i = vetores dos parâmetros objetivos

b_i = coeficiente de regressão

e = vetor de resíduos

O coeficiente de determinação global R^2 global será usado para mensurar o nível de significância do modelo encontrado e pode ser obtido pela equação 2.13.

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_E}{SQ_T} \quad (2.13)$$

Segundo Demoliner (2017) o coeficiente de determinação R^2 pode levar a equívocos, pois a sua maximização não necessariamente implica em uma melhora do modelo de regressão. Por este motivo, muitos usuários preferem utilizar o coeficiente de determinação global ajustado, R_{aj}^2 , dado pela equação 2.14:

$$R_{aj}^2 = 1 - \frac{SQ_E/(n-p)}{SQ_T/(n-1)} \quad (2.14)$$

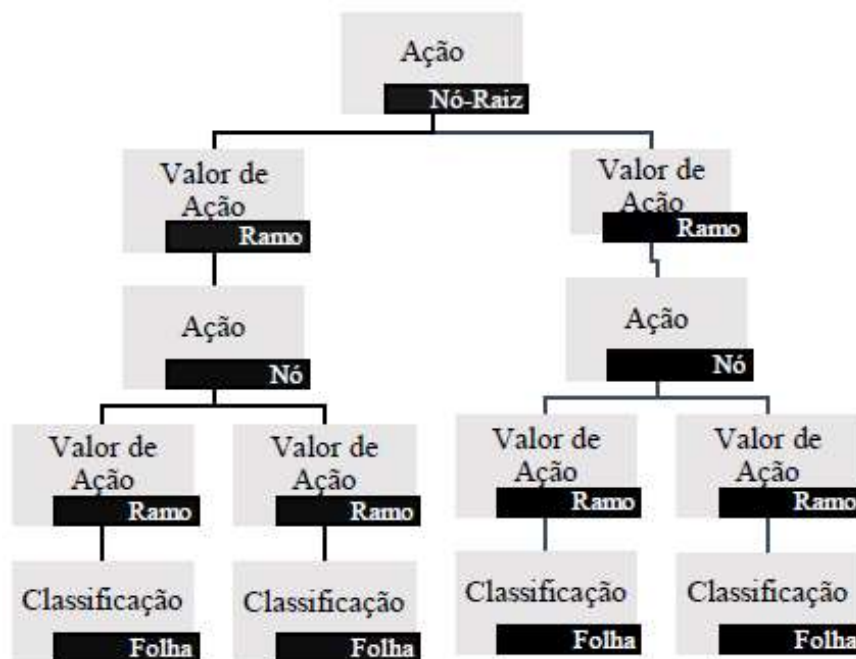
sendo n o número de variáveis utilizadas no modelo e $(n - p)$ o número de graus de liberdade do erro.

Uma vez que $SQ_E/(n - p)$ é o valor da média quadrática do erro e $SQ_T(n - 1)$ é uma constante, R_{aj}^2 terá seu valor maximizado se uma nova variável for adicionada ao modelo, e a mesma reduzir o erro quadrático médio (RMSE) (MONTGOMERY e RUNGER, 2012).

2.5 ÁRVORES DE DECISÃO

Árvores de decisão são modelos computacionais utilizados em problemas de predição supervisionada, em que um conjunto de atributos é utilizado para prever o valor de um atributo de saída, sendo o mapeamento destas entradas para a saída denominado modelo preditivo. A árvore de decisão tem esse nome porque o modelo preditivo é representado numa estrutura semelhante a uma árvore. A estrutura é sempre lida de forma descendente, iniciando-se pelo nó da raiz. Cada nó interno representa uma quebra baseada nos valores de um atributo de entrada. Os nós terminais de uma árvore são chamados folhas, que representam o resultado predito (SIMÕES, 2008). A Figura 26 ilustra a estrutura genérica de uma árvore de decisão.

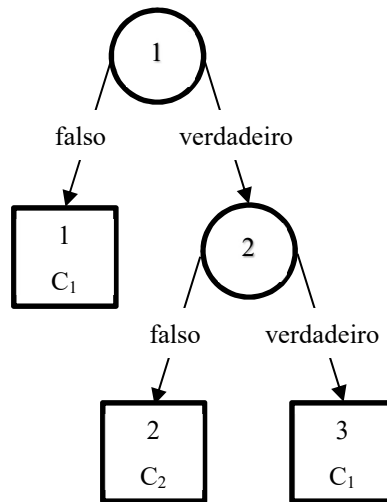
Figura 26 - Estrutura macro de uma árvore de decisão.



Fonte: FERREIRA, 2018.

De acordo com Paula (2002), as árvores de decisão podem ser divididas em binárias e não binárias. O modelo mais simples é conhecido como árvore binária em que somente dois ramos deixam cada nodo e somente um ramo entra em qualquer nó. Em uma árvore binária há “n” nodos terminais e “n-1” não terminais. Na construção de árvores binárias, é normalmente utilizada a convenção de realizar decisões verdadeiras em ramos da direita e decisões falsas no ramo da esquerda como demonstrado na figura 27.

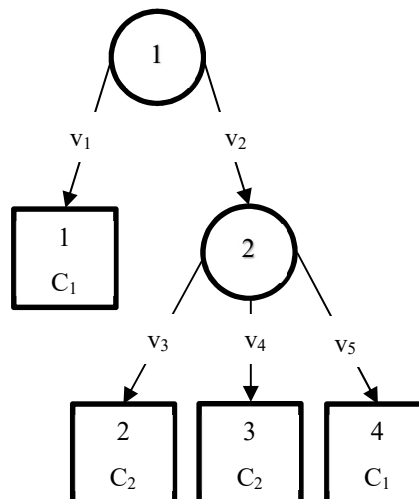
Figura 27 - Exemplo de uma árvore de decisão binária.



Fonte: WEISS, 1991.

Ainda segundo Paula (2002), as árvores de decisão não binárias são as com maior amplitude de aplicação. Neste tipo de árvore, mais do que dois ramos deixam um nó. Assim como as árvores binárias, somente um ramo entra num nó. A figura 28 ilustra uma árvore de decisão não binária, na qual o nó 2 possui três ramos. Nesta tipologia de árvore, um teste realizado em um nó resulta na divisão de dois ou mais conjuntos disjuntos que cobrem todas as possibilidades, isto é, todo novo caso deve pertencer a um dos subconjuntos disjuntos.

Figura 28 - Exemplo de uma árvore de decisão não binária.



Fonte: WEISS, 1991.

Independentemente do tipo de árvore de decisão, todos os caminhos são mutuamente exclusivos. Para cada novo caso, um e somente um caminho na árvore deverá ser satisfeito.

De acordo com Simões (2008), na árvore de decisão, o processo de classificação de dados se dá em dois passos: treinamento (ou aprendizado) que é caracterizado pela construção de um modelo que descreve um conjunto predeterminado de classes de dados, e teste, que se refere à análise de desempenho do modelo. O algoritmo de treinamento constrói a árvore de decisão recursivamente, de cima para baixo, identificando o atributo mais importante (atributo divisor ou de teste), isto é, aquele que faz a maior diferença para a classificação das amostras disponíveis (atributo que possui o maior ganho de informação). No teste, o modelo construído é testado e deverá classificar um novo conjunto de amostras, independentemente daquelas usadas no treinamento. Como este conjunto também possui as classes conhecidas, após a classificação, pode-se calcular o percentual de acertos, comparando as classes previstas pelo modelo com as classes esperadas (ou conhecidas). Este percentual é conhecido como acurácia do modelo para o conjunto de teste em questão. Se a acurácia for considerável aceitável, o modelo pode ser usado na classificação de amostras desconhecidas futuras. Além deste critério de avaliação, ainda podemos avaliar o desempenho, a robustez, a escalabilidade e a interpretabilidade. O desempenho avalia os custos computacionais envolvidos na geração e na utilização do modelo. A robustez é a habilidade de o modelo fazer previsões corretas em amostras com atributos faltando ou com ruídos. A escalabilidade é a habilidade de construir um modelo eficiente a partir de grandes quantidades de dados. A interpretabilidade é a habilidade de tornar compreensível o conhecimento gerado pelo modelo.

Ainda de acordo com Simões (2008), as vantagens principais das árvores de decisão são que elas fazem decisões levando em considerações as regras que são mais relevantes, além de serem compreensíveis para a maioria das pessoas. Ao escolher e apresentar as regras em ordem de importância, as árvores de decisão permitem aos usuários ver, na hora, quais fatores mais influenciam os seus trabalhos. Tornam-se cruciais quando há necessidade de explicar as razões por detrás de uma determinada tomada de decisão. No entanto, árvores de decisão podem apresentar desvantagem com relação ao desempenho quando as classificações são mal elaboradas pelo usuário. Sendo assim, é necessário utilizar técnicas de compactação da árvore para podar possíveis condições desnecessárias. Além disso, possui pouca robustez a dados de grande dimensão. Sua exatidão é afetada por atributos pouco relevantes e alguns algoritmos ainda tem dificuldade em lidar com dados contínuos.

Atualmente as árvores de decisão são aplicadas nas mais diversas áreas como Astronomia, Finanças, Farmacologia, Física, Medicina e, obviamente, Engenharia.

2.5.1 Seleção de atributos

A seleção de atributos é normalmente utilizada para redução da dimensão, de modo a condensar dados nos quais grandes quantidades de informações devem ser analisadas e, portanto, a classificação ou diagnóstico são difíceis. A seleção de atributos consiste em selecionar um subconjunto de informação que é suficiente para caracterizar e/ou modelar a informação para o objetivo de classificação (FERREIRA, 2018).

A seleção randômica de atributos leva a árvores extensas. Em amostras reais, muitos atributos contêm ruídos. Este tipo de processo de seleção randômica de atributos despende muito tempo na escolha de atributos irrelevantes (PAULA, 2002).

Experiências com problemas reais mostram que diversas funções de avaliação tendem a uma boa escolha de atributos úteis, gerando inclusive árvores pequenas (WEISS, 1991).

Existem diversos modelos de seleção de atributos disponíveis sendo que um dos mais antigos e largamente utilizado é o algoritmo ID3 baseado no ganho de informação (Gain). Neste modelo a entropia é a medida conhecida como base geradora. O ganho pode ser conceituado como a redução esperada da entropia, tendo, como função, a seleção de atributos utilizados no particionamento de um conjunto de dados.

A entropia é dada pela equação 2.15 que determina o número de exemplos de S pertencentes à classe p_j , podendo o atributo ter m possíveis valores.

$$Entropia(S) = \sum_{j=1}^m - p_j \log_2 p_j \quad (2.15)$$

Na qual:

S = conjunto de exemplos

m = número de classes

p_j = é a proporção de S pertencer à classe j , tendo:

$$p_j = \frac{|S_j|}{|S|} \quad (2.16)$$

Na qual:

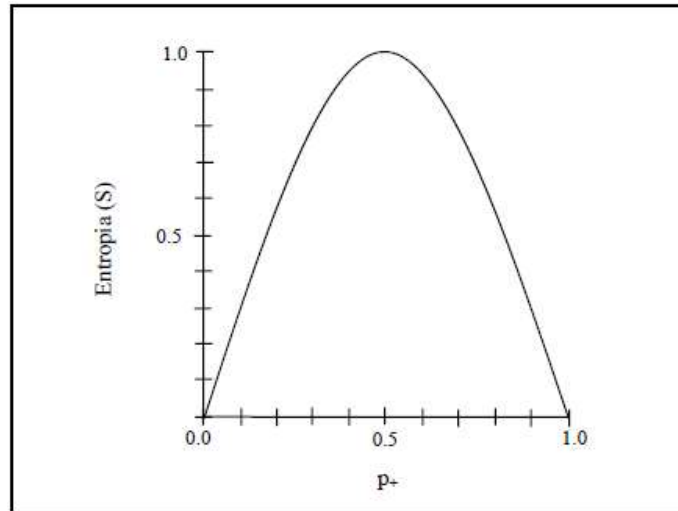
$|S_j|$ = é o número de exemplos classificados na j -ésima partição

$|S|$ = é o número total de exemplos do conjunto S

Com base na medida da entropia, uma classificação é considerada perfeita se todos os membros de um conjunto S pertencem a uma mesma classe, sendo a entropia igual a zero ou igual a 1. Por exemplo, se todos os membros são positivos, $p_+ = 1$, então $p_- = 0$ (zero). Se o conjunto

contiver números diferentes de exemplos positivos e negativos, a entropia estará entre 0 (zero) e 1 (um) (GARCIA, 2002).

Figura 29 - Medida da entropia para exemplos positivos variando entre 0 e 1



Fonte: MITCHELL, 1997

O ganho de informação resultante da adoção de uma partição baseada num dado atributo será assim dado por:

$$Ganho(S, A) = Entropia(S) - \sum_{j=1}^m \frac{|S_j|}{|S|} Entropia(S_j) \quad (2.17)$$

Na qual:

$|S_j|$ = é o conjunto de S no qual o atributo A tem o valor j

$Ganho(S, A)$ = é o ganho do atributo A sobre o conjunto S

2.5.2 Algoritmo ID3

O algoritmo ID3 (Itemized Dichotomizer 3) foi desenvolvido pelo pesquisador de inteligência artificial J. Ross Quinlan durante a década de 70. O algoritmo desenvolvido por Quinlan aprendeu, através de um pequeno conjunto de treinamento, como organizar e processar um amplo conjunto de dados. Ele utilizou a estratégia de dividir para conquistar, combinado com a lógica dicotômica para produzir resultados impressionantes em relação ao baixo tempo de processamento (GESTWICKI, 1997).

O ID3 é um sistema de aprendizado supervisionado que constrói árvores de decisão a partir de um conjunto de exemplos. Os atributos dos conjuntos podem ser numéricos ou simbólicos. As classes têm de ser mutuamente disjuntas: Não existem exemplos inconsistentes. O ID3 gera descrições que classifica cada objeto corretamente no conjunto de treinamento, isto é, gera regras de classificação fortes (SIMÕES, 2008).

Este algoritmo utiliza para pesquisa a estratégia top-down que busca só parte do espaço de pesquisa, garantindo que uma simples, mas não necessariamente a mais simples, árvore seja encontrada. Uma árvore simples pode ser gerada por uma seleção conveniente de atributos (HOLSHEIMER, 1994). No ID3, uma informação baseada em heurística é usada para selecionar esses atributos. A heurística seleciona o atributo que provê o maior ganho de informação, isto é, o atributo que minimiza a informação necessária no resultado das sub-árvores para classificar os elementos.

O ID3 foi desenvolvido visando à resolução de problemas que contenham atributos categóricos. Este algoritmo necessita que os valores dos atributos não possuam ruídos, sendo assim, estes valores devem ser tratados previamente. Ele adota o critério ganho de informação para a escolha da característica (atributo) a ser atribuído a cada nodo. A estrutura da árvore gerada pelo algoritmo é bastante simples. Cada atributo permite a divisão do conjunto de treino num número de subconjuntos igual a sua cardinalidade (GARCIA, 2003).

De acordo com Oliveira (2001), para a formação da árvore de decisão o conjunto de treinamento T é dividido em subconjuntos T_i no qual esta divisão é feita de acordo com o atributo A , escolhido para raiz da árvore, e seus possíveis valores distintos do atributo. Cada T_i conterá apenas os objetos de T com valores v_i de A e consequentemente cada T_i será menor que T . Sendo que, a partir do atributo raiz A partem os ramos rotulados com os possíveis valores distintos de A para cada subconjunto T_i . A idéia básica é dividir e conquistar, isto é, proceder com esta escolha da raiz e consequentemente com a divisão do conjunto em subconjuntos para cada T_i , um por vez (estratégia de busca top down e hill climber), até encontrar uma folha para este. O resultado final será uma árvore para T , pois esta renderá subconjuntos até que satisfaçam a exigência de uma classe para uma folha, ou seja, até que nestes subconjuntos tenham objetos pertencentes apenas a uma única classe, logo uma folha é encontrada.

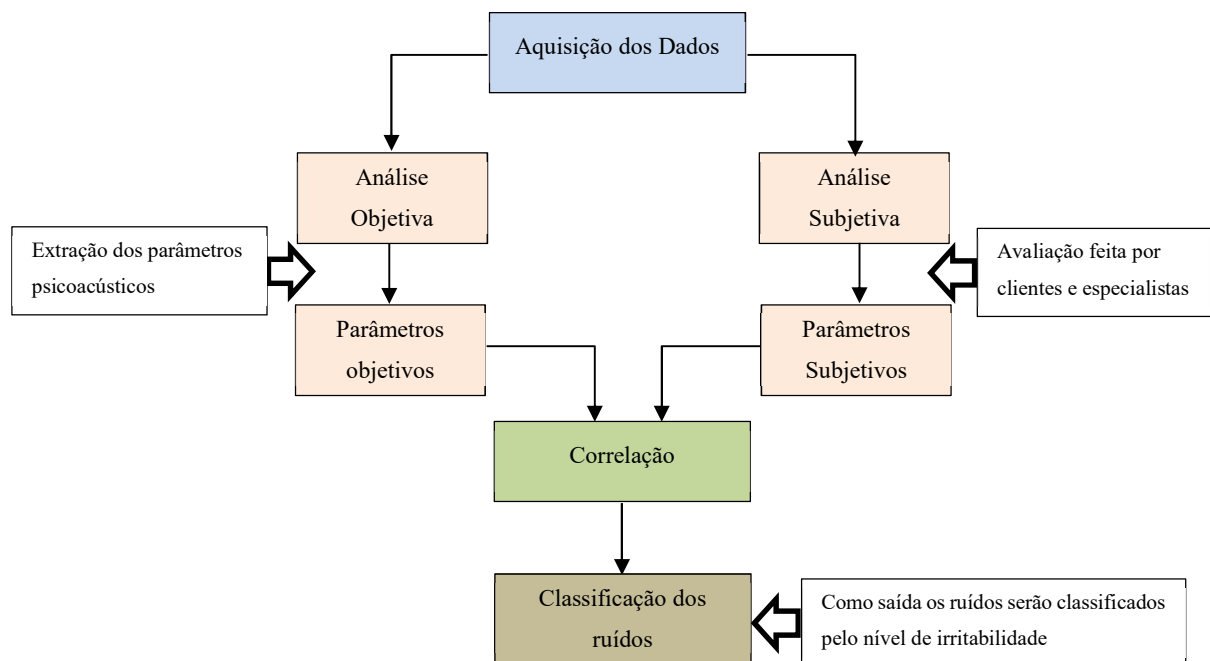
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritas as etapas da fase prática desta análise exploratória. De uma forma geral esta análise exploratória pode ser dividida em:

- Fase 1: Aquisição dos sinais/ruídos parasitas em um veículo através de rodagens em pista de testes com diversos pavimentos. Essas rodagens foram realizadas nas pistas da FIAT em Betim e da Peugeot Citroën em Porto Real;
- Fase 2: Extração das métricas psicoacústicas dos sinais obtidos na fase 1 e reprodução desses sinais para um júri com o objetivo de classificar os ruídos em uma escala de irritabilidade;
- Fase 3: Correlação entre as análises subjetivas e objetiva para a criação dos modelos matemáticos;
- Fase 4: Classificação dos ruídos de acordo com o nível de irritabilidade através do algoritmo ID3.

A Figura 30 ilustra a metodologia implementada para a realização das quatro fases acima mencionadas.

Figura 30 - Metodologia aplicada para correlacionar a análise subjetiva com a objetiva



Fonte: AUTOR

3.1 AQUISIÇÃO DOS SINAIS

A aquisição dos sinais foi obtida através de rodagens em veículos C4 Cactus e 2008 da empresa Peugeot Citroën em pistas de testes nas cidades de Porto Real/RJ e Betim/MG simulando ruídos em diversos tipos de pavimentos presentes no território nacional.

3.1.1 Instrumentação

A instrumentação dos veículos contou com o suporte dos especialistas das equipes de NVH das cidades nas quais ocorreram as gravações e os instrumentos utilizados são descritos na Tabela 7.

Tabela 7 - Equipamentos utilizados para a aquisição dos sinais

Equipamento	Fabricante	Modelo
Microfone 1/2"	Brüel & Kjaer	4189-A-021
Scadas Mobile 40CH	Siemens	SCM
Calibrador	Brüel & Kjaer	4231

Fonte: AUTOR

O módulo de aquisição utilizado foi o Siemens Scadas Mobile de 40 canais, 24bits e até 208KHz de taxa de amostragem. A Figura 31 ilustra uma imagem do módulo utilizado na gravação dos sinais.

Figura 31 - Módulo de aquisição de sinais Siemens Scadas



Fonte: AUTOR

Para captação dos ruídos foram utilizados quatro microfones da empresa Brüel & Kjaer modelo 4189-A-021 e um suporte duplo para posicionar os microfones na mesma posição das orelhas dos ocupantes do veículo simulando uma audição binaural. A Figura 32 mostra os suportes e microfones utilizados.

Figura 32 - Suporte duplo e microfones para simular uma aquisição binaural



Fonte: AUTOR

Como preparação da gravação, uma ambientalização-calibração dos microfones foi realizada através de um emissor modelo 4231 do fabricante Brüel & Kjaer que emite um sinal de 1KHz durante 10 segundos com uma pressão sonora de 94dB, conforme mostrado na Figura 33.

Figura 33 - Calibrador dos microfones



Fonte: AUTOR

Para o experimento, foram posicionados 4 microfones na altura de cada orelha dos ocupantes do veículo, sendo um par na posição do condutor e outro par na posição do passageiro traseiro direito. Essa configuração foi escolhida para captar ruídos na parte frontal e traseira.

A disposição dos microfones também seguiu as diretrizes das normas internas do grupo PSA Peugeot Citroën uma vez que antes da instrumentação todos os veículos foram separados de acordo com análises prévias de especialistas que confirmaram a presença de ao menos um ruído. Esses ruídos serão previamente classificados nas três categorias explicadas anteriormente: “A”, o cliente leva o veículo imediatamente à concessionária, “B”, o cliente aguarda uma revisão para reclamar do defeito e “C”, ruído não perceptível. Essa classificação inicial será posteriormente comparada ao retorno da análise subjetiva realizada com o júri.

Para reduzir os riscos de mascaramento dos ruídos, somente um defeito foi simulado e capturado durante cada gravação. A Figura 34 ilustra o posicionamento dos microfones usados durante as rodagens na pista de teste.

Figura 34 - Aquisição dos ruídos parasitas em um meio físico (veículo).



Fonte: AUTOR

3.1.2 Gravação dos sinais

As rodagens para simulação e gravação dos sinais foram realizadas com veículos 0km no mesmo padrão realizado para os veículos de produção e os defeitos foram induzidos simulando uma condição real de utilização do veículo pelo cliente. A Figura 35 mostra as pistas utilizadas com as marcações sobre as regiões específicas onde foram simulados os ruídos.

Figura 35 - Vista aérea da pista de teste em Porto Real usada para gravação dos ruídos



Fonte: AUTOR

Os ruídos foram simulados em diferentes tipos de pavimento envolvendo asfalto rugoso, lombadas, paralelepípedo, pedras de rio e valetas. As rodagens seguiram as normas internas da empresa com a velocidade segundo as marcações já determinadas nas margens de cada tipo de pavimento. Os veículos utilizados foram separados pela equipe de qualidade devido a presença de ao menos um ruído. As rodagens de detecção basicamente consistem em uma volta na pista com dois especialistas, sendo um na posição condutor e outro como passageiro traseiro lado direito. Ao detectar a presença de um ruído os veículos foram separados para posterior instrumentação. Para cada sinal foram gravadas de duas a quatro amostras com duração de até 60 segundos considerando o mesmo ponto de início do ruído. Nos parágrafos seguintes são detalhadas as razões para gravação destas duas a quatro amostras para que o efeito de mascaramento do sinal seja tratado.

Cada tipo de pavimento/obstáculo submete o veículo a uma determinada frequência de excitação, porém para cada sinal gravado apenas um ruído parasita foi simulado/capturado. A Figura 36 ilustra os diferentes tipos de pavimento utilizados nessa investigação.

Figura 36 - Pista de teste utilizada para aquisição dos ruídos com diferentes pavimentos



Fonte: AUTOR.

As amostras devem ser preparadas de tal modo que possam reproduzir ao júri a mesma sensação sonora do momento das rodagens. Desta forma, as gravações ocorreram com o emprego da técnica binaural, ou seja, utilização de dois microfones para representar o sistema auditivo humano.

Todos os sinais usados em um determinado teste de audição devem ser gravados usando a mesma sensibilidade e configurações de equalização no sistema de aquisição. Isso reduz a probabilidade de erro induzido durante as gravações. Assegurando as mesmas configurações/hardware durante todo o processo de gravação permite que os sinais sejam reproduzidos posteriormente através de fones de ouvido ou alto-falantes calibrados no volume sem a necessidade de nenhuma compensação adicional de amplitude. Outro benefício desta prática é que ela garante que o próprio ruído/interferência do sistema de gravação seja exatamente o mesmo durante todos os sinais coletados evitando adicionar mais uma variável na precisão da análise subjetiva com o júri, uma vez que diferentes configurações de microfones e/ou sistemas de gravação terão diferentes níveis de ruído de fundo. Esse ruído indesejado, que varia entre as gravações realizadas com diferentes sensibilidades, pode afetar a percepção dos estímulos sonoros ou distrair o jurado durante as audiências da análise subjetiva (OTTO, 2001).

Nas rodagens realizadas nas pistas de testes foram gravados dez sinais sonoros de ruídos. Segundo os trabalhos apresentados por Otto (2001) e Rossi (2010), cada gravação deverá ter uma duração de até 60 segundos e os eventos de ruídos parasitas deverão ter a duração de 3 a 5 segundos sendo repetidos durante toda gravação ao menos cinco vezes para que o júri consiga perceber esses eventos transitórios durante a reprodução do sinal.

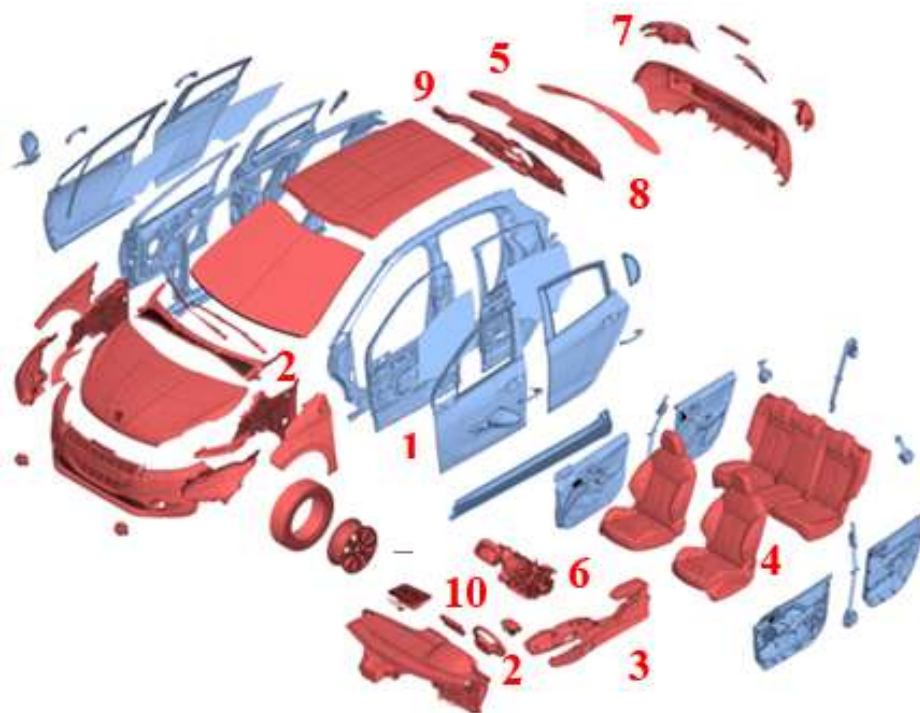
Os dez sinais foram gravados em três dias distintos, porém sempre respeitando as mesmas condições climáticas, como temperatura entre 18° a 22° e ausência de chuvas para que esse ruído de fundo não interfira no julgamento do júri durante a análise subjetiva.

As interfaces dos veículos que originaram os ruídos foram baseadas em possíveis problemas apresentados durante uma produção normal da planta. Entretanto, para evitar o efeito de mascaramento dos próprios ruídos, as rodagens foram realizadas simulando somente um defeito a cada gravação.

Todos os ruídos gravados estão dentro da classificação “Squeak” e “Rattle” e foram detectados por especialistas respeitando a classificação (ruídos do tipo A, B ou C) descrita na figura 2.

A Figura 37 ilustra as regiões do veículo que originaram os sinais gravados e a Tabela 8 descreve as interfaces.

Figura 37 - Regiões do veículo com ruídos



Fonte: AUTOR

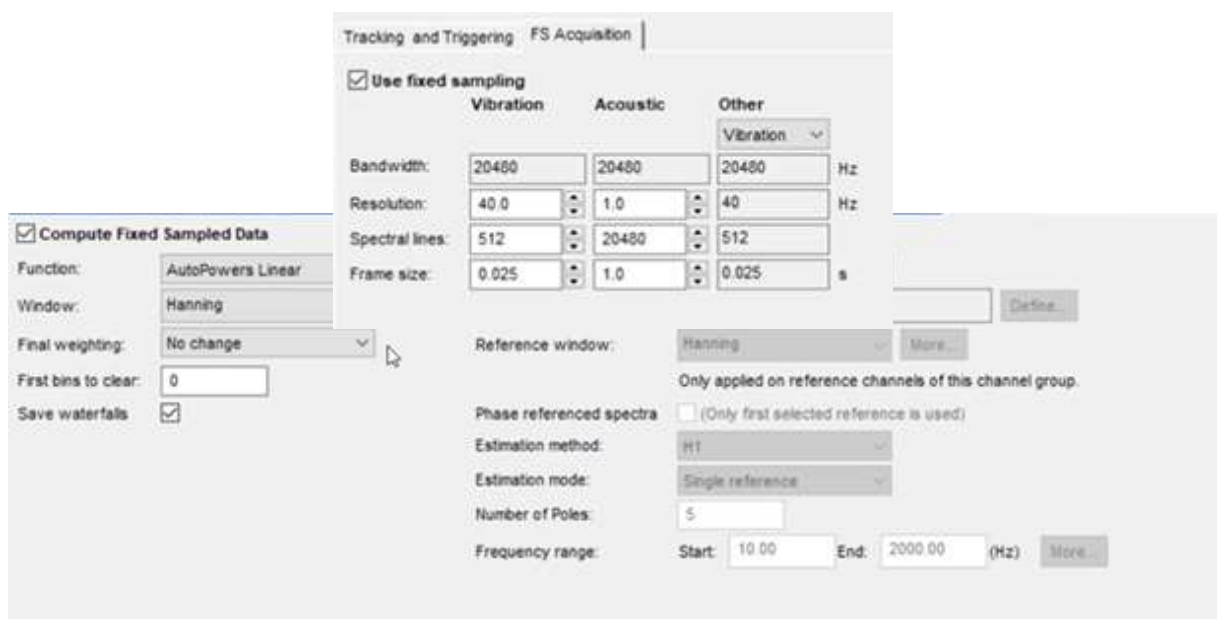
Tabela 8 - Ruídos gravados para as análises objetivas e subjetivas

Interface	Tipo	Modo de Falha
(1) Pannel de porta	Rattle	Objeto solto internamente na porta do passageiro
(2) Caixa de direção	Rattle	Ruído ao girar o volante
(3) Console central	Squeak	Console central raspando com tampa lateral
(4) Banco dianteiro direito	Squeak	Estrutura do banco com rangido ao sentar
(5) Tampa porta malas	Rattle	Tampa do porta malas com folga
(6) Difusor do ar condicionado	Rattle	Folga no eixo das aletas internas
(7) Lanterna traseira	Squeak	Lanterna com contato com a lateral do veículo
(8) Macaco	Rattle	Macaco do veículo mal fixado
(9) Porta malas objeto	Rattle	Objeto solto no porta malas
(10) Central Multimídia	Squeak	Capa da central multimídia raspando no painel

Fonte: AUTOR

Os ruídos gravados foram armazenados em arquivos no formato do próprio software da Siemens respeitando a duração de até 60 segundos. Os parâmetros de aquisição usados durante a gravação dos sinais nas pistas de testes podem ser visualizados na Figura 38.

Figura 38 - Parâmetros de aquisição utilizados na aquisição dos ruídos



Fonte: AUTOR

3.1.2 Processamento dos sinais

Segundo Otto (2001), as amostras dos sinais gravados e preparados adequadamente, não garantem por completo uma avaliação subjetiva correta, mas amostras de áudio mal gravadas ou editadas de forma incorreta, podem arruinar um teste com júri.

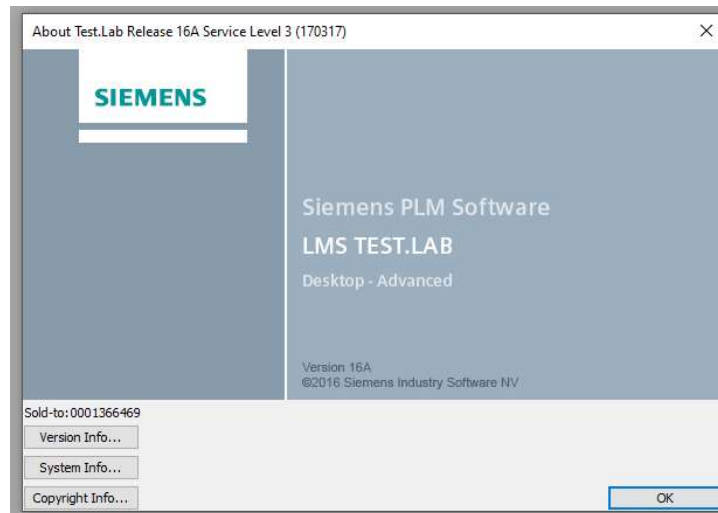
A primeira etapa do processamento dos sinais é a triagem propriamente dita para certificar que o áudio representa de forma fidedigna a rodagem que originou o ruído. Durante a triagem inicial foi verificado se os áudios não incluíam nenhum outro ruído mascarador fora o sinal simulado para não induzir uma imprecisão na análise subjetiva (efeito mascaramento).

Obviamente como estamos analisando ruídos automotivos gravados durante rodagens que simulam uma condição de uso real, sempre teremos a presença de outros sinais no mesmo áudio. Entretanto, como objetivo neste trabalho é buscar representar uma situação mais próxima possível da utilização do cliente, esses sinais não serão isolados do sinal de ruído para os arquivos de reprodução para o júri. Exemplo, se o sinal de ruído foi obtido através de uma rodagem em um asfalto rugoso, o sinal de fundo proveniente deste pavimento não será eliminado da gravação.

Diferentemente dos sinais a serem reproduzidos para o júri, os arquivos que serão submetidos à análise objetiva precisam de um processamento para isolar ou ao menos amenizar o ruído de fundo do sinal em análise. Para aplicar esse filtro, de duas a quatro amostras do mesmo sinal (dependendo da complexidade em isolar o ruído), mas gravadas em rodagens, diferentes foram sobrepostas para identificar a faixa de frequência do ruído em análise e buscar atenuar a amplitude das demais presentes no sinal.

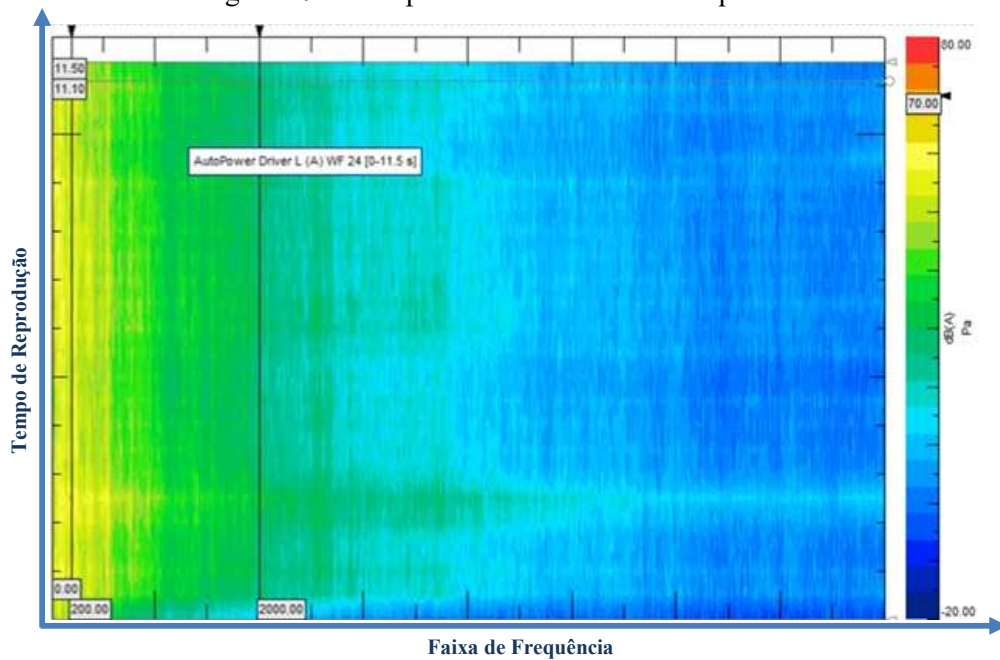
A Figura 39 ilustra uma imagem do software LMS Test Lab da empresa Siemens usado para tratamento e triagem dos sinais sonoros e a Figura 40 demonstra a análise de sinais para certificar que para cada áudio gravado não exista o mascaramento por outro ruído parasita.

Figura 39 - Software utilizado para tratamento dos sinais



Fonte: AUTOR

Figura 40 - Exemplo de análise dos sinais aquisitados



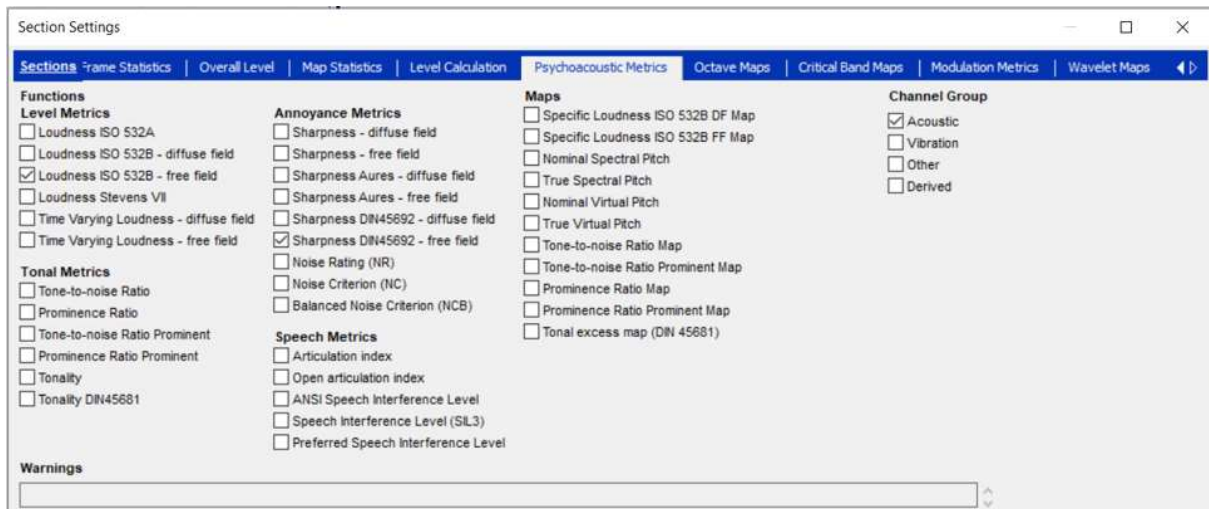
Fonte: AUTOR

3.2 ANÁLISE OBJETIVA

A análise objetiva consiste na extração dos parâmetros psicoacústicos dos sinais de ruídos obtidos nas pistas de testes. Para essa etapa utilizou-se o software Simcenter TestLAB da Siemens. Após a gravação dos sinais, através da mesma ferramenta, deve-se configurar os

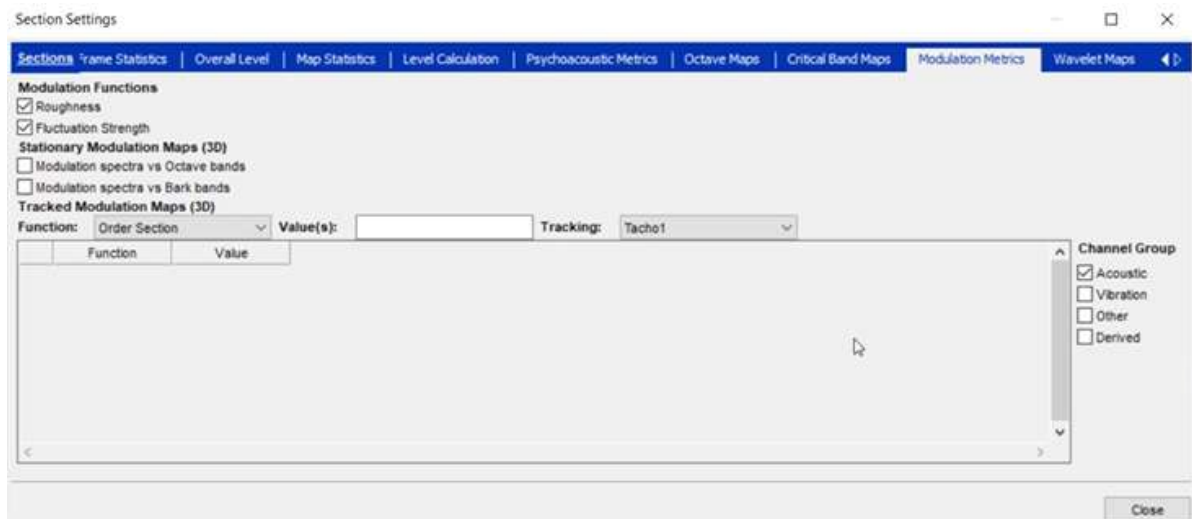
parâmetros de interesse. Para esse estudo, foram selecionadas 4 métricas conforme ilustrado nas Figuras 41 e 42.

Figura 41 - Configuração para extração dos parâmetros Loudness e Sharpness.



Fonte: AUTOR

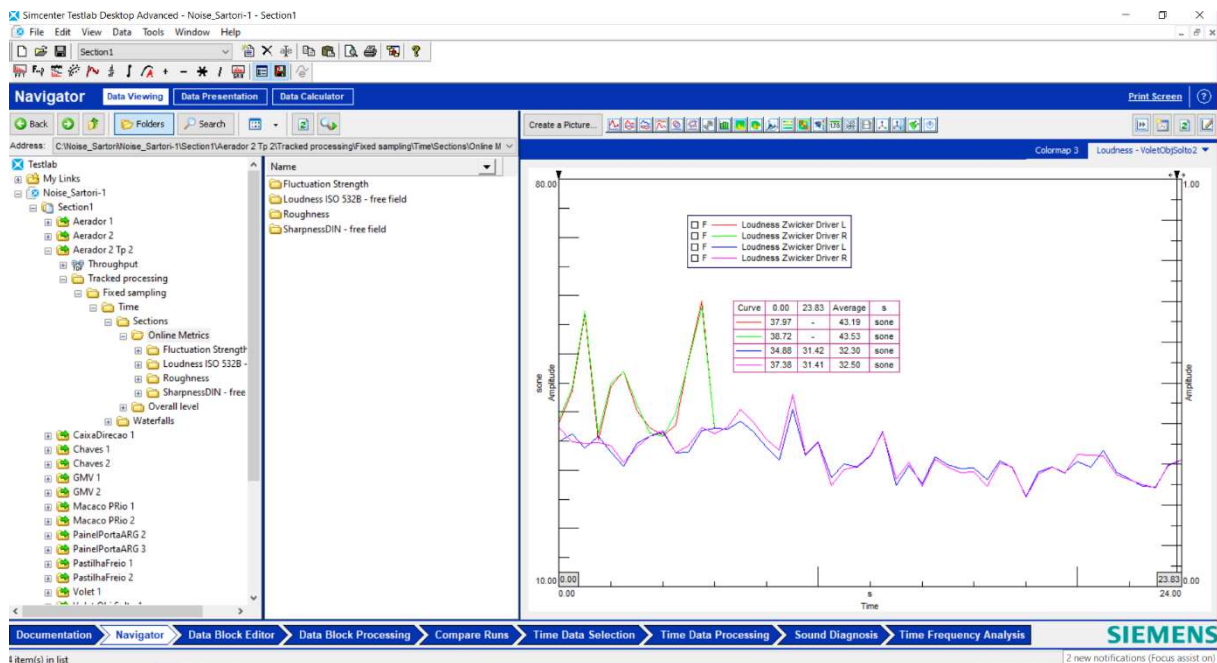
Figura 42 - Configuração para extração dos parâmetros Roughness e Fluctuation.



Fonte: AUTOR

Em continuação a configuração para extração das métricas, a próxima etapa é a seleção do período em que o software irá realizar o cálculo dos valores para os parâmetros de Loudness, Sharpness, Roughness e Fluctuation Strenght. Para essa atividade foram utilizados os arquivos após o processamento dos sinais, uma vez que, durante a gravação nas pistas de testes outros sinais como ruídos aerodinâmicos e pavimento estão presentes e podem interferir nos valores dos parâmetros. Para todos os ruídos, foram utilizados como valores de referência a média durante o período de reprodução dos sinais, conforme ilustrado na Figura 43.

Figura 43 - Valores médios extraídos para cada métrica psicoacústica.



Fonte: AUTOR

3.3 ANÁLISE SUBJETIVA

Análises subjetivas são realizadas na área de qualidade sonora quando se deseja obter respostas aos eventos sonoros apresentados e, posteriormente, uma análise estatística. Os testes de júri podem ser realizados para um grupo de pessoas ou individualmente. As avaliações subjetivas são importantes, pois trazem características dos eventos sonoros como: adjetivação e ordenamento, as quais não são possíveis por meio de análises objetivas (LEITE; PAUL, 2006).

Nesta sub-seção são abordadas todas as fases implementadas para a realização do ensaio subjetivo, desde a escolha dos participantes até a reprodução dos sinais contendo os ruídos e subsequente avaliação do jurado.

3.3.1 Escolha do Júri

Diversos trabalhos envolvendo testes com jurados como Demoliner (2017), Brizon (2012) e Rossi (2010) apresentam estudos envolvendo números próximos de 60 participantes para uma análise subjetiva representativa. Este trabalho se baseará no estudo apresentado por Otto (2001) já adaptado ao setor automobilístico e usado com frequência pelas empresas Ford e General Motors dos Estados Unidos.

De acordo com Otto (2001), normalmente, 25 a 50 participantes é um número apropriado de jurados para estudos de escuta nos quais se utilizam os funcionários da empresa. Se somente os potenciais clientes forem usados para compor o júri, o número de participantes deve estar na faixa de 75 a 100. Os clientes têm maior variabilidade em suas respostas do que os funcionários e o percentual de respostas a serem descartadas por problemas de compreensão da análise tende a ser maior. Em relação a demografia, deve-se buscar um equilíbrio entre homens e mulheres e a faixa etária deve estar de acordo com o público alvo do produto em análise. No caso deste estudo buscou-se uma faixa etária de 24 a 50 anos o que representa o cliente médio do seguimento B-SUV.

Outro fator importante na escolha dos jurados é a sua experiência no tema a ser analisado. Neste trabalho optou-se por não selecionar especialistas no assunto seguindo as orientações do estudo demonstrado por Otto (2001), uma vez que especialistas neste tipo de análise tendem a captar sinais que um cliente comum não daria a importância a ponto de reclamar da qualidade do veículo e/ou levá-lo a uma concessionária para o devido reparo.

Para efetivação dos participantes na avaliação subjetiva um questionário convite foi elaborado conforme apresentado no Apêndice “A” e enviado internamente para um grupo de colaboradores. O objetivo deste questionário foi entender a experiência prévia dos possíveis participantes em ruídos parasitas. O propósito foi selecionar as pessoas que percebem e confirmam desconforto com a presença destes eventos em seus veículos e não buscar profissionais da área de acústica. Questões simples como se o colaborador escuta em seu veículo ruídos parasitas e se a presença desses eventos o irrita a ponto de reclamar da qualidade ou até mesmo a levar o veículo para reparo nas concessionárias, foram usadas como filtro na seleção dos participantes. De acordo com Otto (2001), experiência passada no assunto é

fundamental para obter um conjunto válido de respostas em uma análise subjetiva realizada por um júri.

Ainda segundo Otto (2001), uma boa prática é ter uma margem de 20% em relação a quantidade de participantes convidados devido às ausências neste tipo de evento sem uma comunicação prévia. Para esse trabalho em questão, o email convite foi enviado para 60 colaboradores dos quais 57 confirmaram a presença, 54 participantes responderam positivamente quanto ao desconforto na presença de ruídos e 52 participaram efetivamente do teste de jurados sendo 28 homens e 24 mulheres. As idades variaram de 26 a 48 anos sendo a média de 39 anos. Os participantes foram divididos em dois grupos por questão de facilidade na realização da avaliação subjetiva sendo que 40 estavam presentes na planta da Peugeot-Citroën na cidade de Porto Real/RJ e 12 na planta da Fiat na cidade de Betim/MG.

Devido a limitações de equipamentos específicos no momento da avaliação dos jurados, a performance auditiva de cada participante não foi previamente verificada. Entretanto, no convite enviado via email, uma questão sobre problemas de perda auditiva foi adicionada no questionário.

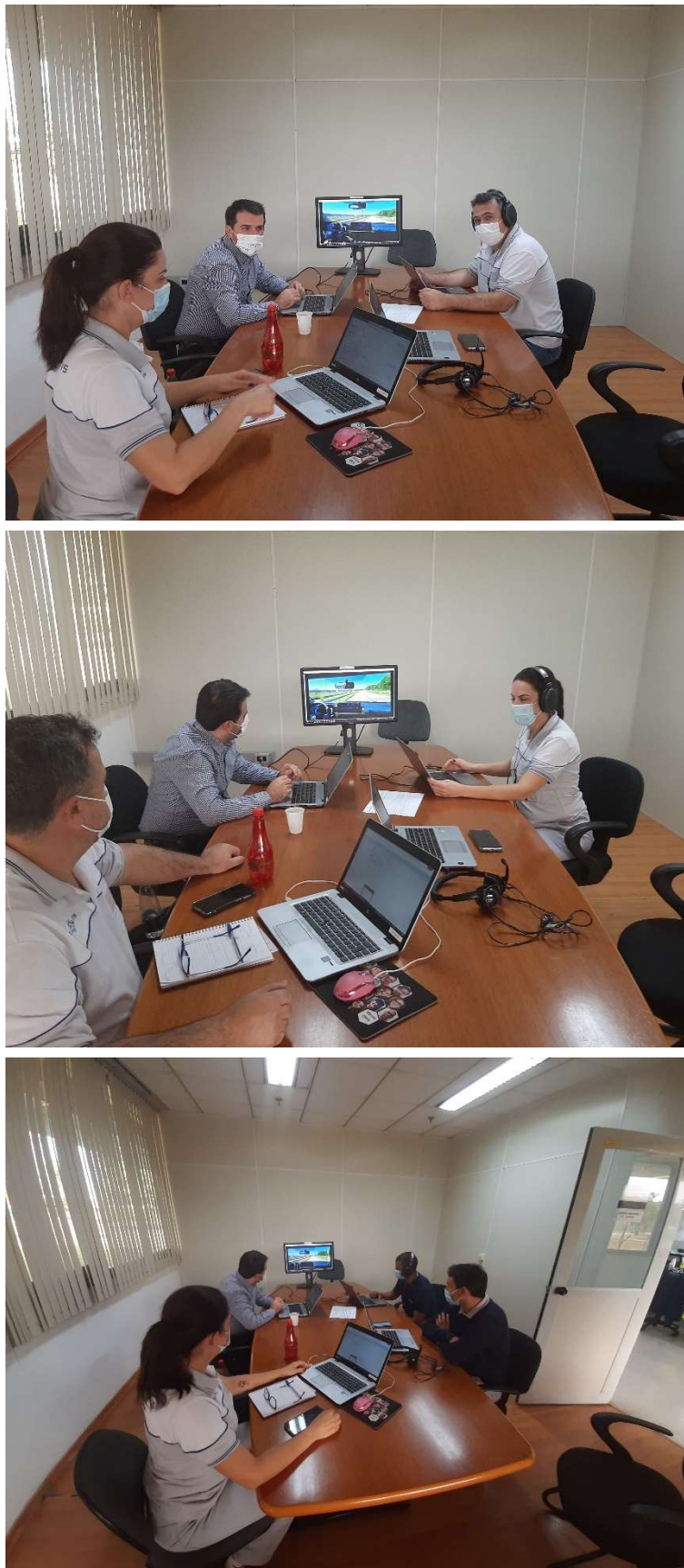
3.1.2 Sala de teste

Os locais escolhidos para a realização da análise subjetiva com o júri possuíam dimensões retangulares de 6m por 4m e 7m por 3,5m respeitando assim as especificações preconizadas pela AES (1999).

Outro trabalho importante no segmento automotivo com especificações do ambiente de audição é apresentado por Otto (2001), determinando que uma sala utilizada para análises subjetivas envolvendo um júri deve ter uma dimensão retangular não inferior a 20m². A sala de audição deve ter altura mínima de 2,1m.

Segundo Pellegrini (2005), o primeiro requisito para o ambiente de teste é o baixo valor do nível de ruído de fundo para que o mesmo não interfira no julgamento dos jurados. Assim, deve-se tomar um cuidado especial com possíveis fontes de ruído, tais como computadores, lâmpadas fluorescentes, aparelhos de ar-condicionado entre outros. Quanto a apresentação e características da sala de teste, é recomendado que esta seja tão natural quanto possível, sendo equipada com cadeiras e fones de ouvido confortáveis, tendo cores neutras e iluminação moderada, com o objetivo de evitar ao máximo que o jurado desvie sua atenção e acabe por afetar o resultado dos testes. A Figura 44 exibe uma das salas utilizadas para o ensaio na planta de Porto Real.

Figura 44 - Sala de reprodução usada para o teste de júri.



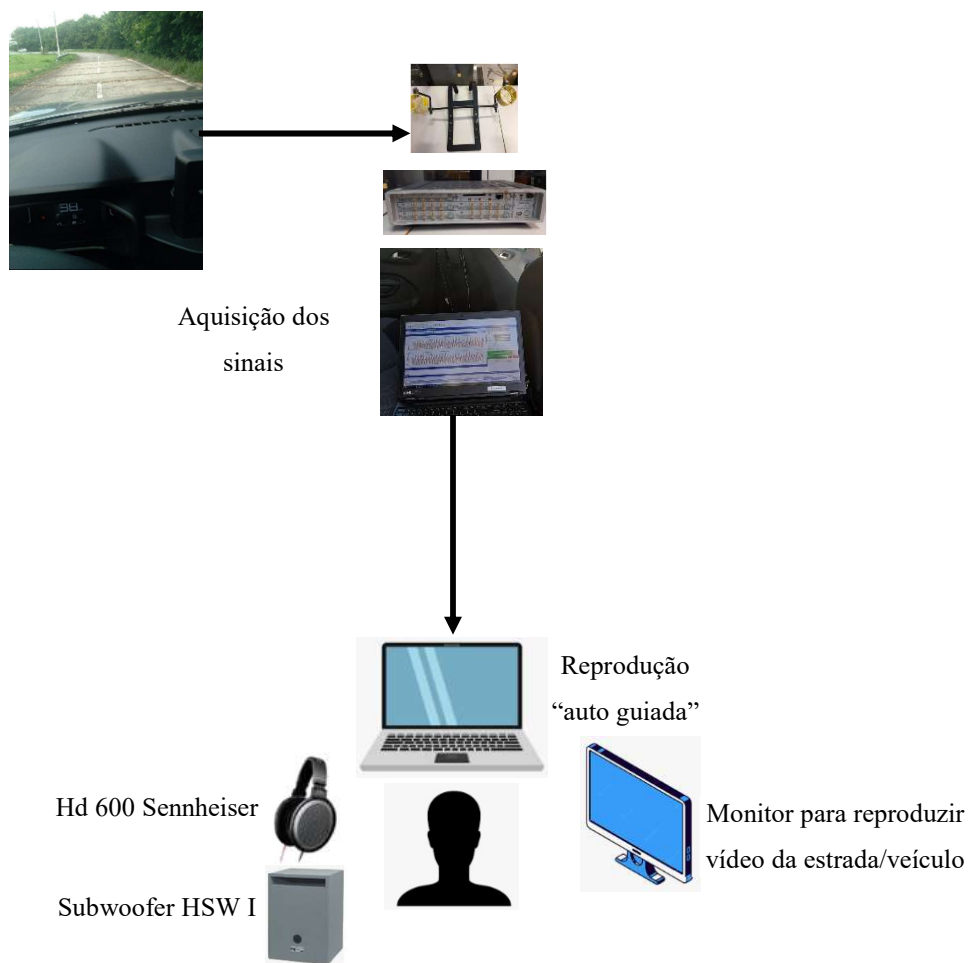
Fonte: AUTOR

Em relação a temperatura e humidade, o ambiente da análise subjetiva deverá estar controlado com uma temperatura entre 22⁰C e 24⁰C e humidade relativa do ar entre 45% a 55%. A sala também não deverá conter nenhum tipo de odor característico para evitar distrações do júri (OTTO, 2001).

3.3.3 Reprodução dos sinais sonoros

A etapa de reprodução deve conseguir passar ao jurado com fidelidade as características dos áudios de ruídos gravados nas pistas de testes para evitar qualquer interferência do sistema na avaliação dos jurados. A Figura 45 ilustra o esquema adotado neste trabalho.

Figura 45 - Esquema do sistema de reprodução dos sinais de ruídos



Fonte: AUTOR

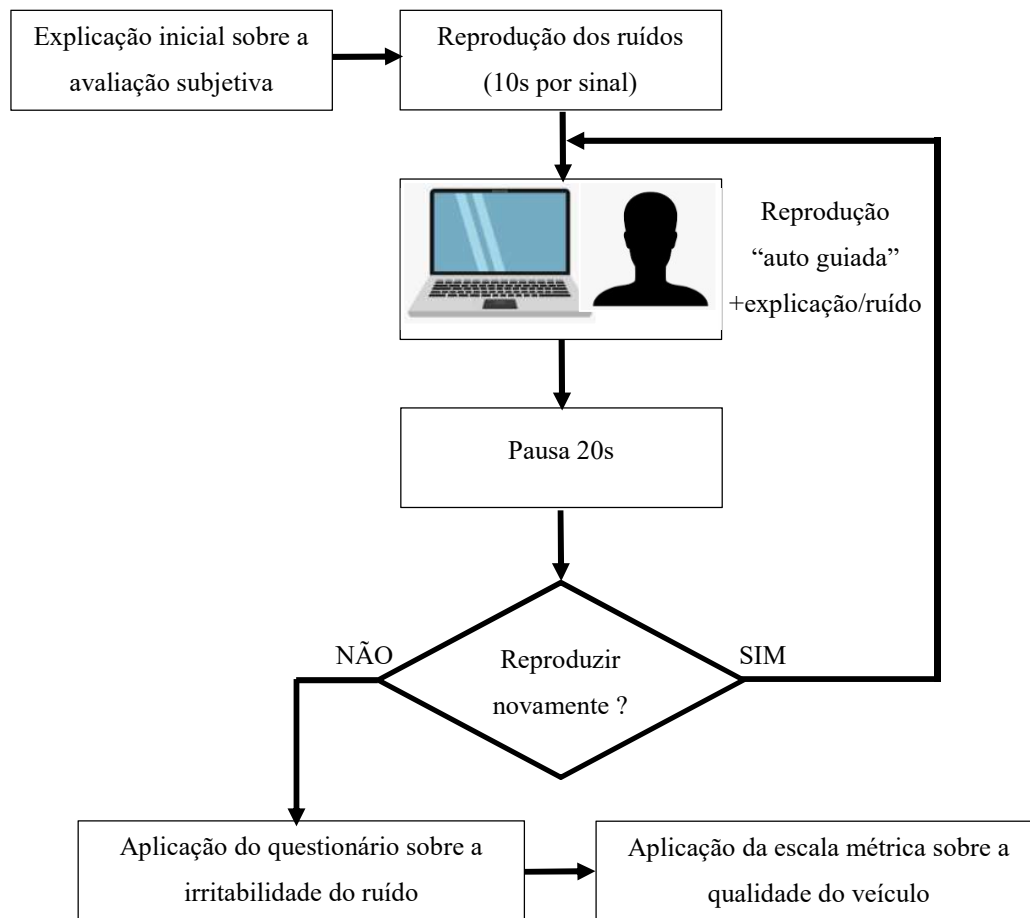
Normalmente em análises subjetivas como a proposta neste trabalho, os sinais de áudio passam por tratamentos específicos antes da reprodução, como por exemplo apresentado por Pellegrini (2005) no qual o autor optou por corrigir o loudness para equalizar o nível em todos os ruídos. Como o loudness é um dos parâmetros psicoacústicos a serem levados em consideração pelos jurados, podendo ser um fator decisivo no nível de irritabilidade, a equalização não será aplicada.

Para assegurar a representatividade da sensação auditiva durante a fase da reprodução e evitar qualquer interferência de possíveis frequências reverberadas pela sala de teste, optou-se pela utilização de headphones modelo Hd 600 da Sennheiser ligados simultaneamente com o subwoofer Head-Acoustics modelo HSW I. Os headphones priorizam as médias e altas frequências, enquanto o subwoofer as baixas frequências.

Em relação a duração da etapa de reprodução e avaliação dos sinais pelo jurado, de acordo com Otto (2001), o ideal é que não ultrapasse 45 minutos para evitar que o júri comece a entrar em uma fase de desconforto afetando diretamente sua avaliação sobre os sinais em análise. Esse tempo máximo será respeitado visto que nesse trabalho em questão serão reproduzidos 10 sinais com até 60 segundos de duração, sendo permitido no máximo 3 repetições dos sinais auditivos. Segundo Bittencourt (2008), antes de iniciar a etapa de reprodução, um processo de familiarização deve ser aplicado para que o jurado entenda e se habitue com as características dos áudios a serem analisados. Essa etapa durou 100 segundos considerando uma reprodução de 10 segundos para cada um dos 10 sinais gravados.

Outro fator fundamental em análises subjetivas envolvendo júri é a sequência de reprodução dos sinais de áudio. Segundo Pellegrini (2005), o descuido deste ponto pode introduzir erros sistemáticos ao processo de avaliação e levar a resultados errôneos influenciando toda a conclusão do experimento. O método adotado neste trabalho foi baseado na diretiva de análise subjetiva apresentado por Otto (2001) denominado Testes Auto-guiados possibilitando que cada júri tenha o controle da reprodução, escolhendo a sequência e se deseja ou não repetir o áudio (até o limite de 3 vezes). Desta forma, a reprodução dos ruídos não obedecerá a uma determinada ordem podendo impactar diretamente a opinião do júri sobre o nível de irritabilidade de cada sinal. A Figura 46 ilustra a sequência de reprodução adotada nessa análise exploratória.

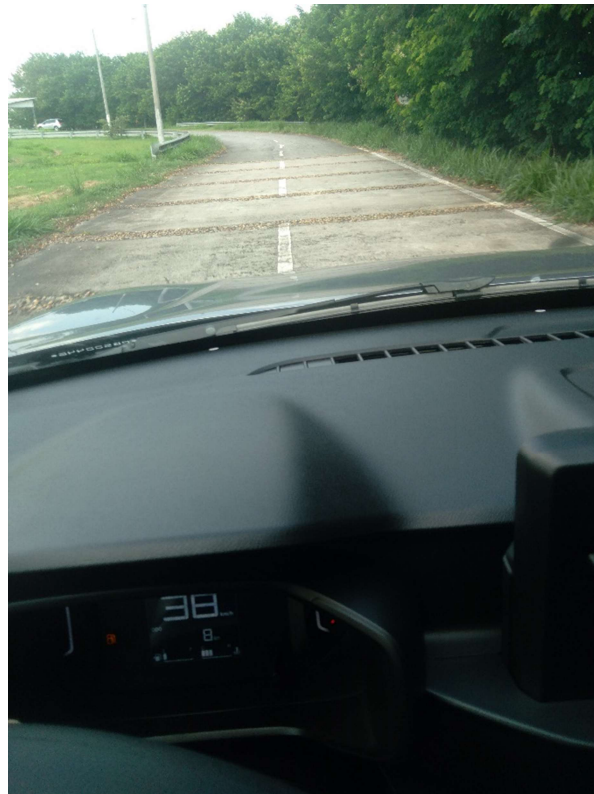
Figura 46 - Sequência de reprodução da fase subjetiva



Fonte: AUTOR

Segundo Lima e Gerges (2004), o uso de estímulos visuais na sala de testes, de forma a aproximá-la do ambiente real são válidos, pois dessa forma acredita-se que se obtêm respostas do júri mais próximas das sensações que o consumidor terá na utilização final do produto. Para estímulos visuais pode-se utilizar simuladores, para que o jurado se sinta na situação real de uso do produto. Desta forma para cada sinal sonoro reproduzido um vídeo gravado com a visão do condutor será exibido aos jurados. A Figura 47 mostra uma imagem do vídeo representando o percurso com pavimento de asfalto rugoso e depressões.

Figura 47 - Exemplo de vídeo gravado sobre os diferentes pavimentos.



Fonte: AUTOR

Durante a fase de escutas, os participantes da análise subjetiva foram submetidos ao método de avaliação denominado Escala de Resposta, no qual foi atribuída uma nota para cada áudio reproduzido de 1 a 10 segundo a escala métrica sugerida pela SAE em testes subjetivos com a presença de um júri. A resposta foi baseada na pergunta sobre a qualidade do veículo:

- Caso o seu veículo apresente o ruído da gravação, como você avaliaria a sua qualidade?

A Figura 48 ilustra a métrica aplicada na avaliação dos participantes do júri, assim como, qual o grau de conhecimento necessário para detectar cada nível de ruído apresentado.

Figura 48 - Escala SAE para análises subjetivas.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INACEITÁVEL				LIMITE	ACEITÁVEL				
EVENTO PERCEBIDO POR									
TODOS CLIENTES		MAIORIA CLIENTES		ALGUNS CLIENTES	CLIENTES DETALHISTAS		ESPECIALISTAS		NÃO PERCEBIDO

Fonte: STRANDEMAR, 2005

Na sequência das respostas da escala métrica o jurado foi submetido a uma questão com três possíveis respostas quanto a irritabilidade que o ruído ocasiona referente a ação do participante reclamar ou não da presença destes eventos em seus respectivos veículos. O objetivo desta questão é cruzar a coerência do impacto do evento com a resposta dada na escala métrica.

- Caso o seu veículo apresente o ruído da gravação, qual ação você tomaria?
 - O ruído é tão irritante a ponto de levar o veículo de forma imediata a concessionária somente para reparo do evento em questão;
 - O ruído é irritante, mas passível de conviver no dia a dia porém deveria ser tratado caso o veículo esteja na concessionária para uma revisão ou outro serviço qualquer;
 - O ruído é levemente percebido e com baixo nível de irritabilidade a ponto do participante não lembrar de solicitar o tratamento do mesmo quando o veículo estiver na concessionária para uma revisão o outro serviço qualquer.

Lembrando que a pergunta acima está diretamente relacionada a classificação dos ruídos usada internamente na empresa Peugeot Citroën para avaliar o nível de irritabilidade de seus clientes. Como já descrito, são três tipos de ruídos considerados: Tipo A (cliente leva imediatamente o veículo na concessionária), Tipo B (cliente reclama, mas aguarda uma oportunidade de o veículo estar na concessionária para fazer o reparo) e Tipo C (cliente não percebe ou não reclama).

Para concluir a avaliação, as notas atribuídas juntamente com as respostas sobre a irritabilidade e classificação interna dos ruídos foram cruzadas com a escala métrica sugerida

pela SAE para buscar e retirar da pesquisa dados que se diferenciam drasticamente dentro do retorno obtido dos participantes da análise subjetiva, dados conhecidos como “outliers”. A Figura 49 mostra esse cruzamento de dados.

Figura 49 - Cruzamento das respostas com a escala SAE e classificação de ruídos

NOTA REFERENTE A QUALIDADE DO VEÍCULO									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INACEITÁVEL				LIMITE	ACEITÁVEL				
CLASSIFICAÇÃO INTERNA DE RUÍDOS PEUGEOT CITROËN									
RUÍDO TIPO A				RUÍDO TIPO B	RUÍDO TIPO C				
NÍVEL DE IRRITAÇÃO									
CLIENTE LEVA O VEÍCULO NA CONCESSIONÁRIA				RECLAMA NA REVISÃO	CLIENTE NÃO RECLAMA				

Fonte: AUTOR

As respostas divergentes, como notas de 1 a 4 com respostas que indicam que o cliente não reclamaria do ruído, foram retiradas da pesquisa por serem consideradas outliers, como será visto no próximo capítulo. Do total de 52 avaliações obtidas através da análise subjetiva, 4 respostas foram retiradas por serem consideradas divergentes, totalizando desta forma 48 retornos válidos.

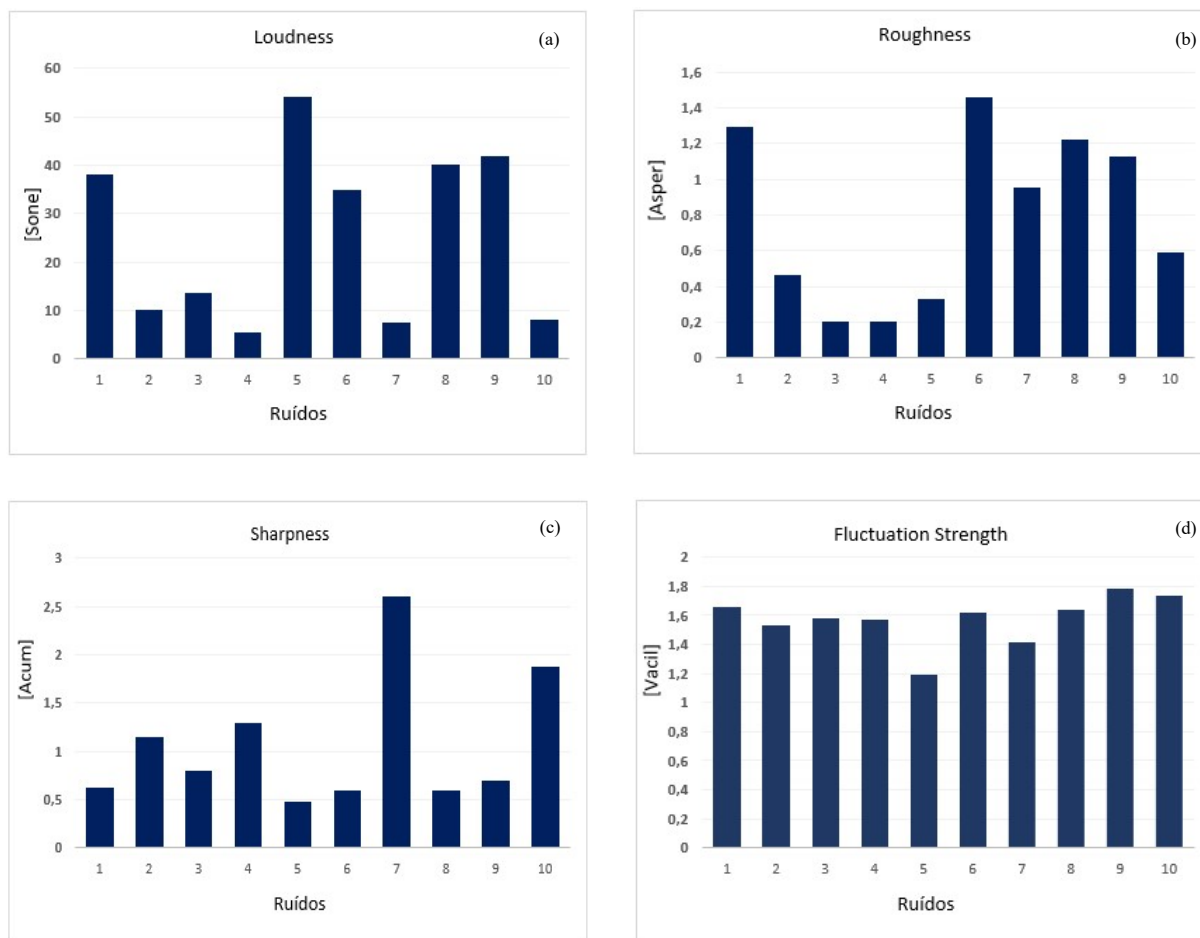
4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados todos os resultados dos experimentos numéricos e práticos realizados. Esse capítulo será composto por três tópicos principais envolvendo a análise objetiva, subjetiva, demonstrando o resultado das enquetes com o júri, e, por fim, a elaboração do classificador.

4.1 RESPOSTA DA ANÁLISE OBJETIVA

Na Figura 50 são mostrados os resultados para as quatro métricas psicoacústicas utilizadas para cada um dos dez áudios de ruídos gravados nas pistas de testes e usados como base para esta análise exploratória.

Figura 50 - Extração dos parâmetros psicoacústicos: (a) loudness, (b) roughness, (c) sharpness e (d) fluctuation strength.



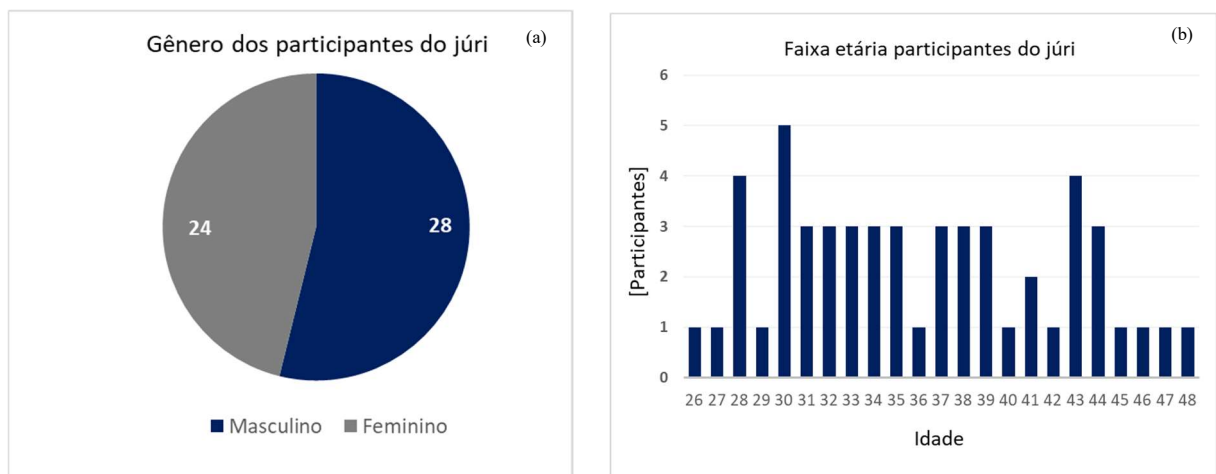
Fonte: AUTOR

Todas as quatro métricas psicoacústicas foram calculadas através da média dos sinais de ruídos gravados nas pistas de testes e submetidos posteriormente ao tratamento para redução do efeito de mascaramento. Para todos os sinais foi possível isolar um trecho de ao menos 7,5 segundos com o sinal de ruído considerado puro sem a interferência dos demais sinais gravados como o efeito do pavimento. Evidentemente mesmo os arquivos tendo a duração de até 60 segundos, os valores médios das métricas foram calculados somente durante o período em que o sinal de ruído foi considerado limpo.

4.2 RESPOSTA DA ANÁLISE SUBJETIVA

As respostas subjetivas foram obtidas através de uma audição envolvendo inicialmente 52 jurados com perfil ilustrado na Figura 51.

Figura 51 - Perfil dos participantes (a) gênero, (b) faixa etária.



Fonte: AUTOR

A audição do júri ocorreu em três dias consecutivos e respeitou a sequência de reprodução descrita na Figura 52. A primeira etapa consistiu em obter as notas de 1 a 10 em relação a Qualidade do Veículo caso o mesmo apresentasse o ruído reproduzido. A Figura 54 demonstra as respostas dos 52 jurados assim como a correlação em relação ao tipo de ruído (A, B ou C) e a média entre todas as notas.

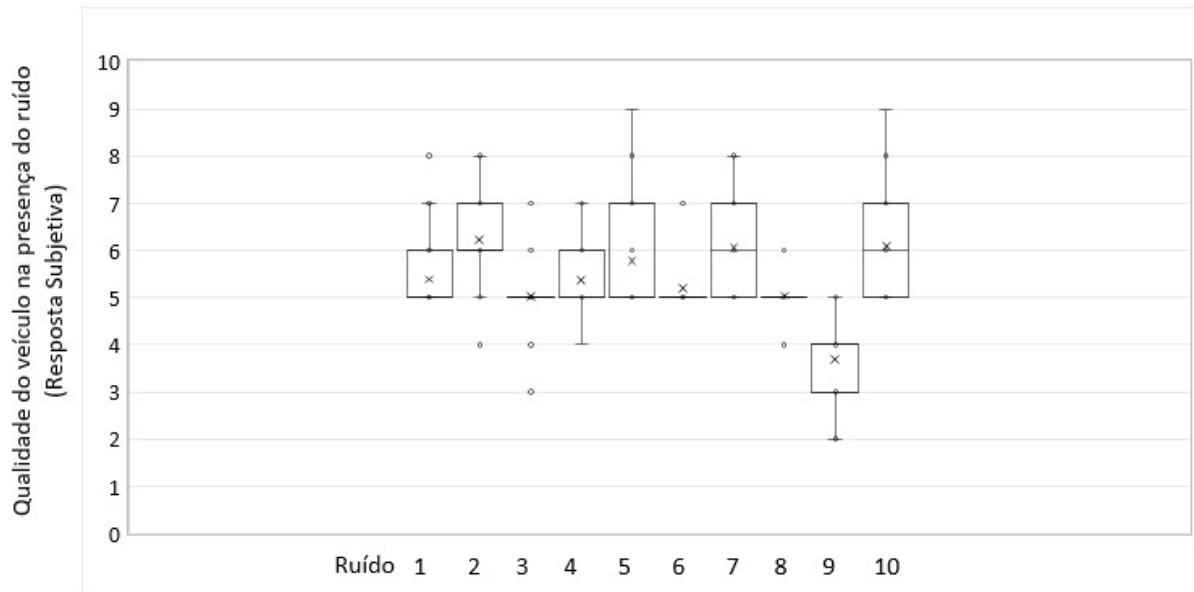
Figura 52 - Avaliação subjetiva para cada ruído (Júri e Especialistas).

Sinal de ruído	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
Especialistas	B	B	B	B	B	B	B	B	A	B										
Júri 1	C	6	C	8	B	5	B	5	B	5	B	5	B	5	A	4	C	6		
Júri2	C	7	C	5	C	7	C	6	B	5	B	5	C	6	B	5	B	5		
Júri 3	B	5	B	5	B	5	C	6	B	5	B	5	C	6	B	5	A	4	B	5
Júri 4	B	5	C	6	C	7	C	7	B	5	B	5	B	5	B	5	B	5	B	5
Júri 5	B	5	C	7	C	6	C	7	B	5	B	5	B	5	B	5	B	5	B	5
Júri 6	B	5	C	7	B	5	C	7	B	5	C	7	B	5	B	5	A	3	C	6
Júri 7	B	5	C	7	C	7	B	5	B	5	B	5	C	7	B	5	A	3	B	5
Júri 8	B	5	C	6	C	7	C	7	C	6	B	5	C	6	A	4	A	4	C	7
Júri 9	B	5	C	6	B	5	B	5	B	5	B	5	C	7	B	5	A	3	B	5
Júri 10	B	5	C	7	C	7	C	6	C	7	B	5	C	7	B	5	A	3	B	5
Júri 11	B	5	C	7	C	7	C	6	B	5	C	7	B	5	B	5	A	4	B	5
Júri 12	B	5	C	7	C	6	C	7	B	5	B	5	B	5	B	5	A	2	C	6
Júri 13	B	5	C	6	C	6	C	6	C	8	B	5	B	5	B	5	A	4	C	6
Júri 14	C	6	B	5	C	6	B	5	C	9	B	5	C	6	B	5	A	4	C	7
Júri 15	C	6	A	4	C	6	C	7	B	5	B	5	C	6	C	6	A	4	C	6
Júri 16	C	7	C	6	C	6	C	7	C	7	B	5	B	5	B	5	A	3	B	5
Júri 17	B	5	C	6	C	6	B	5	B	5	C	7	B	5	B	5	A	4	B	5
Júri 18	C	6	C	7	B	5	C	6	C	6	B	5	C	7	B	5	B	5	B	5
Júri 19	C	6	C	7	B	5	B	5	B	5	B	5	C	7	B	5	B	5	B	5
Júri 20	C	8	C	6	B	5	C	7	C	6	B	5	C	6	B	5	A	4	B	5
Júri 21	B	5	C	8	C	7	C	7	B	5	B	5	B	5	B	5	A	3	C	7
Júri 22	B	5	C	7	B	5	C	7	B	5	B	5	C	7	B	5	A	3	B	5
Júri 23	B	5	C	6	C	7	B	5	B	5	B	5	B	5	A	4	A	4	C	7
Júri 24	B	5	C	6	C	7	C	7	C	7	B	5	C	6	B	5	A	4	B	5
Júri 25	B	5	C	6	C	7	C	6	B	5	B	5	B	5	B	5	B	5	C	7
Júri 26	C	6	C	7	C	7	C	6	B	5	B	5	C	7	B	5	A	4	C	7
Júri 27	B	5	B	5	B	5	C	6	C	5	B	5	C	8	B	5	A	2	C	7
Júri 28	B	5	B	5	C	7	C	6	B	5	B	5	B	5	B	5	A	2	C	7
Júri 29	B	5	B	5	C	7	B	5	C	6	B	5	C	7	B	5	A	3	B	5
Júri 30	B	5	C	6	B	5	B	5	C	7	B	5	C	7	B	5	A	3	C	7
Júri 31	C	6	C	7	C	6	C	6	B	5	B	5	C	7	B	5	A	4	B	5
Júri 32	C	6	C	7	C	6	C	6	B	5	B	5	C	6	B	5	A	4	C	7
Júri 33	B	5	C	7	C	6	B	5	B	5	B	5	B	5	B	5	A	3	C	8
Júri 34	B	5	C	6	B	5	C	6	B	5	B	5	C	7	C	6	B	5	B	5
Júri 35	B	5	C	6	B	5	C	7	C	7	B	5	C	6	B	5	A	3	C	7
Júri 36	B	5	B	5	C	7	C	7	B	5	C	7	B	5	B	5	A	3	B	5
Júri 37	B	5	C	6	C	7	C	6	C	6	B	5	C	6	C	6	A	4	C	7
Júri 38	B	5	B	5	C	6	C	6	B	5	B	5	B	5	B	5	A	4	C	8
Júri 39	C	6	C	6	B	5	C	6	C	6	B	5	B	5	B	5	A	4	C	8
Júri 40	B	5	C	7	B	5	B	5	C	7	B	5	C	6	C	6	B	5	B	5
Júri 41	B	5	C	6	C	6	C	6	C	7	B	5	B	5	B	5	A	4	C	6
Júri 42	B	5	C	7	C	6	C	6	B	5	B	5	C	8	B	5	A	4	C	8
Júri 43	B	5	C	6	C	6	C	7	B	5	B	5	C	7	B	5	A	4	C	7
Júri 44	B	5	C	6	C	6	C	6	C	7	B	5	C	7	B	5	A	2	C	7
Júri 45	B	5	C	6	C	6	C	6	C	8	B	5	B	5	B	5	A	4	C	8
Júri 46	B	5	B	5	C	6	C	6	B	5	B	5	C	7	B	5	A	3	C	6
Júri 47	B	5	C	6	B	5	C	7	C	8	B	5	C	8	B	5	A	4	C	6
Júri 48	C	6	C	7	C	6	C	6	C	8	B	5	B	5	B	5	A	4	C	8
Júri 49	C	7	C	7	C	7	B	5	B	5	B	5	C	7	B	5	A	3	C	6
Júri 50	C	6	C	6	C	7	C	7	C	7	C	7	C	6	B	5	A	4	C	7
Júri 51	B	5	C	8	B	5	B	5	B	5	B	5	C	7	B	5	A	4	C	9
Júri 52	B	5	B	5	C	6	C	6	B	5	B	5	C	6	B	5	A	2	B	5
Média	5,38	6,21	6,02	6,06	5,77	5,19	6,04	5,04	3,69	6,17										
Irritabilidade	B	C	C	C	B	B	B	B	A	C										

Fonte: AUTOR

Nas etapas seguintes, a análise subjetiva por júri consistiu em validar as respostas e buscar possíveis erros de interpretação ou distração que compromettesse o retorno da audição. A Figura 53 mostra a dispersão na avaliação dentre os 52 participantes para cada sinal de ruído reproduzido.

Figura 53 - Média e dispersão da avaliação subjetiva.



Fonte: AUTOR

Conforme ilustrado na Figura 53, não existem grandes variações entre as respostas do júri para cada sinal de ruído reproduzido. Esse tipo de análise é importante em avaliações envolvendo notas subjetivas para confirmar que as médias não estão sendo formadas por notas extremas, o que pode ser considerado como um erro de interpretação do ensaio pelo jurado. Divergências essas conhecidas como outliers e que podem até mesmo invalidar todo ensaio de audição.

Como parte final da análise subjetiva, aplicou-se a questão sobre a ação do cliente levar ou não o veículo na concessionária na presença do ruído. Como resposta, o júri deveria selecionar uma das três opções: O ruído é tão irritante a ponto de o cliente levar imediatamente o veículo à concessionária (I) / O ruído é irritante, mas o cliente esperaria o momento de uma revisão para reclamar (R)/ O cliente não percebe ou não reclamaria do ruído (N). A Figura 54 demonstra a posição de cada jurado para todos os sinais reproduzidos.

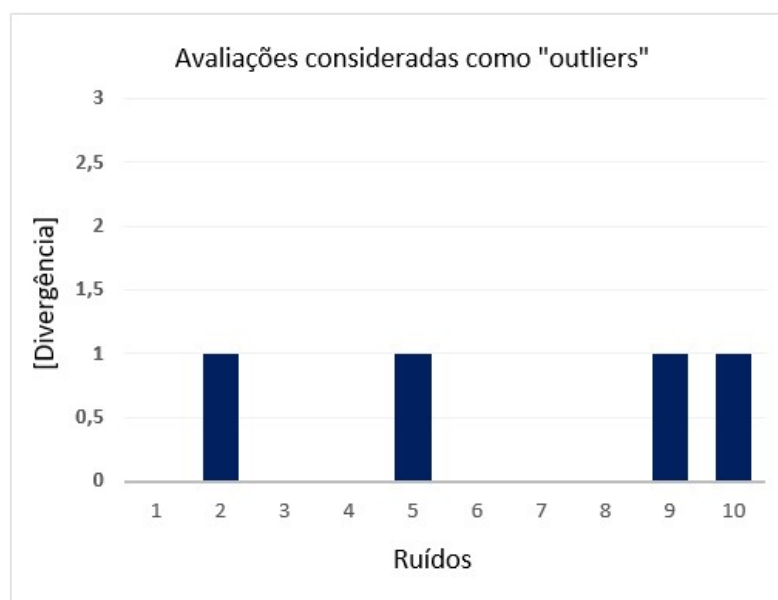
Figura 54 - Posição de cada júri sobre a ação de reclamação.

Ruído	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Júri reclamaria?										
I = imediato										
R = só na revisão										
N = não reclamaria										
Júri 1	N	N	R	R	R	R	R	R	I	N
Júri2	N	R	N	N	R	R	N	R	R	R
Júri 3	R	R	R	N	R	R	N	R	I	R
Júri 4	R	N	N	N	R	R	R	R	R	R
Júri 5	R	N	N	N	R	R	R	R	R	R
Júri 6	R	N	R	N	R	N	R	R	I	N
Júri 7	R	N	N	R	R	R	N	R	I	R
Júri 8	R	N	N	N	N	R	N	I	I	N
Júri 9	R	N	R	R	R	R	N	R	I	R
Júri 10	R	N	N	N	N	R	N	R	I	R
Júri 11	R	N	N	N	R	N	R	R	I	R
Júri 12	R	N	N	N	R	R	R	R	N	N
Júri 13	R	N	N	N	R	R	R	R	I	N
Júri 14	N	R	N	R	N	R	N	R	I	N
Júri 15	N	I	N	N	R	R	N	N	I	N
Júri 16	N	N	N	N	N	R	R	R	I	R
Júri 17	R	N	N	R	R	N	R	R	I	R
Júri 18	N	N	R	N	N	R	N	R	R	R
Júri 19	N	N	R	R	R	R	N	R	R	R
Júri 20	N	N	R	N	N	R	N	R	I	R
Júri 21	R	N	N	N	R	R	R	R	I	N
Júri 22	R	N	R	N	R	R	N	R	I	R
Júri 23	R	N	N	R	R	R	R	I	I	N
Júri 24	R	N	N	N	N	R	N	R	I	R
Júri 25	R	N	N	N	R	R	R	R	R	N
Júri 26	N	N	N	N	R	R	N	R	I	N
Júri 27	R	R	N	N	R	R	N	R	I	N
Júri 28	R	R	N	N	R	R	R	R	I	N
Júri 29	R	R	N	R	N	R	N	R	I	R
Júri 30	R	N	R	R	N	R	N	R	I	N
Júri 31	N	N	N	N	R	R	N	R	I	R
Júri 32	N	N	N	N	R	R	N	R	I	N
Júri 33	R	N	N	R	R	R	R	R	I	N
Júri 34	R	N	R	N	R	R	N	N	R	R
Júri 35	R	N	R	N	N	R	N	R	I	N
Júri 36	R	R	N	N	R	N	R	R	I	R
Júri 37	R	N	N	N	N	R	N	N	I	N
Júri 38	R	R	N	N	R	R	R	R	I	N
Júri 39	N	N	R	N	N	R	R	R	I	I
Júri 40	R	N	R	R	N	R	N	N	R	R
Júri 41	R	N	N	N	N	R	R	R	I	N
Júri 42	R	N	N	N	R	R	N	R	I	N
Júri 43	R	N	N	N	R	R	N	R	I	N
Júri 44	R	N	N	N	N	R	N	R	I	N
Júri 45	R	N	N	N	N	R	R	R	I	N
Júri 46	R	R	N	N	R	R	N	R	I	N
Júri 47	R	N	R	N	N	R	N	R	I	N
Júri 48	N	N	N	N	N	R	R	R	I	N
Júri 49	N	N	N	R	R	R	N	R	I	N
Júri 50	N	N	N	N	N	N	N	R	I	N
Júri 51	R	N	R	R	R	R	N	R	I	N
Júri 52	R	R	N	N	R	R	N	R	I	R

Fonte: AUTOR

Através do cruzamento das notas atribuídas de 1 a 10 com a resposta em relação a ação de levar o veículo à concessionária caso o mesmo apresentasse o ruído, tivemos 4 participantes desclassificados considerados como “outliers” totalizando 48 das 52 respostas como válidas. Nos ruídos 2, 5 e 10 temos notas de satisfação referente a qualidade do veículo que variam entre 8 e 9 e ao mesmo tempo respostas do júri indicando que levariam o veículo à concessionária. Para o ruído 9, considerado como tipo “A” tanto pelos especialistas quanto pela nota média do júri, tivemos um participante que atribui a nota de qualidade do veículo como 3, ou seja, inaceitável e ao mesmo tempo a resposta que não reclamaria do ruído. A Figura 55 ilustra as divergências de avaliações consideradas como outliers para cada sinal reproduzido.

Figura 55 - Divergência (outliers) das notas dos jurados e a questão sobre levar o veículo à concessionária.



Fonte: AUTOR

A Tabela 9 demonstra o impacto dos outliers nas médias dos jurados assim como na irritabilidade para cada ruído reproduzido. Conforme podemos observar, mesmo retirando-se os jurados com notas divergentes, não temos impactos no resultado final. Importante ressaltar que as respostas dos jurados foram desclassificadas apenas nas médias das notas para o ruído em que a avaliação foi considerada divergente entre a nota e a resposta sobre a questão de levar ou não o veículo para a concessionária caso o mesmo apresentasse o defeito em reprodução.

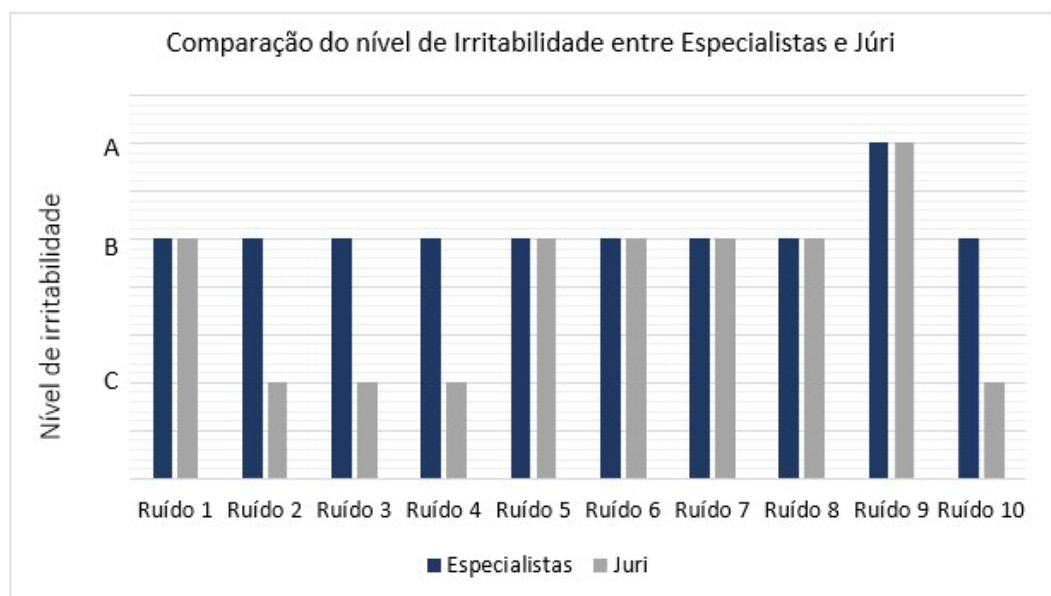
Tabela 9 - Correção das médias de irritabilidade após retirada dos “outliers”.

Ruído	Média com outliers	Irritabilidade com outliers	Média sem outliers	Irritabilidade sem outliers
2	6,21	C	6,06	C
5	5,77	B	5,62	B
9	3,69	A	3,65	A
10	6,17	C	6,00	C

Fonte: AUTOR

Quando correlacionados os valores médios das notas dos jurados convertidos em atributos categóricos (ruído tipo A, B e C) com as avaliações dos especialistas, temos quatro ruídos com classificações divergentes (Ruído_2, Ruído_3, Ruído_4 e Ruído_10), o que equivale a 40% do total. Para os quatro casos, as avaliações dos especialistas foram mais rigorosas do que a média do júri. Essa divergência é extremamente importante para justificar o objetivo desse projeto e demonstrar que uma análise objetiva pode direcionar com mais precisão as principais prioridades a tratar dispensando menos recursos humanos e econômicos em temas que o cliente não valoriza em seu dia a dia. Essa correlação é demonstrada pela figura 56.

Figura 56 - Correlação entre as avaliações dos Especialistas e Júri.



Fonte: AUTOR

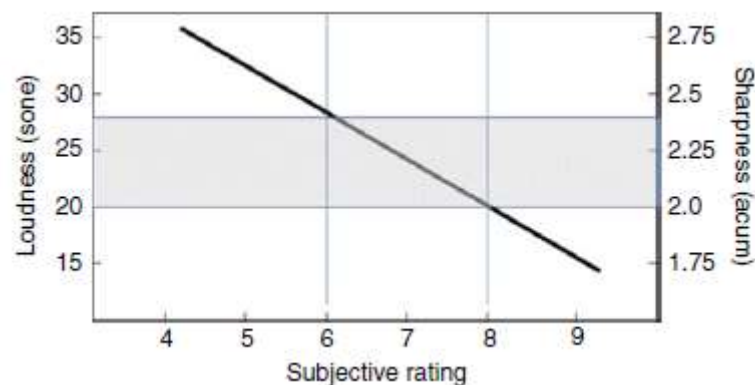
4.3 CLASSIFICADOR ID3

Como parte final deste trabalho foi desenvolvido o classificador ID3 usando os valores da seção de análise objetiva e subjetiva para formar o conjunto de treinamento com o objetivo de automatizar o nível de irritabilidade e indicar com precisão se um determinado ruído impactaria ou não na satisfação do cliente a ponto do mesmo levar o veículo a concessionária.

Primeiramente, faz-se necessário estabelecer uma correlação entre os valores das métricas extraídas na análise subjetiva e os atributos categóricos que serão utilizados na árvore de decisão, condição essa necessária para implementar o classificador do tipo ID3.

Para as métricas Loudness e Sharpness, a referência para essa correlação foi baseada em Pang (2017), conforme mostrado na Figura 57.

Figura 57 - Limites de aceitação para as métricas loudness e sharpness.



Fonte: PANG, 2017

Conforme discutido nos capítulos anteriores, a escala adotada nesse trabalho como referência para a análise subjetiva foi uma adaptação da escala SAE na qual valores <6 são considerados inaceitáveis, ou seja, o cliente reclamaria do ruído e valores >6 são considerados aceitáveis o que não levaria o cliente a reclamar do ruído.

Para as métricas Roughness e Fluctuation Strenght não existe na literatura um valor limite de aceitação envolvendo análises subjetivas com o propósito de avaliar o nível de irritabilidade acústica de sons modulando apenas esses parâmetros. Como o objetivo deste trabalho não está focado na determinação destes limites, mas, sim, em propor uma metodologia capaz de reduzir a subjetividade em análises de ruídos parasitas, os valores de conversão para os atributos categóricos foram baseados no trabalho de Rossi (2010) que mediu o nível de irritação sobre diversos ruídos do tipo squeak e rattle com um júri de 60 participantes. Os

valores médios das piores notas foram utilizados para compor o limite de aceitação do Roughness e Fluctuation Strenght. A Tabela 10 mostra a correlação final entre os valores das quatro métricas psicoacústicas e os atributos categóricos a serem utilizados no classificador.

Tabela 10 - Conversão das métricas psicoacústicas em atributos categóricos

	Inaceitável	Aceitável
Loudness(Sone)	>30,0	<=30,0
Sharpness(Acum)	>2,50	<=2,50
Roughness(Asper)	>1,10	<=1,10
Fluctuation(Vacil)	>1,55	<=1,55

Fonte: AUTOR

A Tabela 11 demonstra o conjunto de treinamento entre os valores das métricas psicoacústicas convertidas em atributos categóricos e a média das respostas subjetivas para cada um dos ruídos classificados em dois valores: Sim ou Não sobre a ação de reclamar do defeito em questão.

Tabela 11 - Conjunto de treinamentos do classificador ID3

Ruído	Loudness	Sharpness	Roughness	Fluctuation	Cliente reclamaria
1	Inaceitável	Aceitável	Inaceitável	Inaceitável	Sim
2	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Não
3	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Inaceitável	Não
4	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Inaceitável	Não
5	Inaceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Sim
6	Inaceitável	Aceitável	Inaceitável	Inaceitável	Sim
7	Aceitável	Inaceitável	Aceitável	Aceitável	Sim
8	Inaceitável	Aceitável	Inaceitável	Inaceitável	Sim
9	Inaceitável	Aceitável	Inaceitável	Inaceitável	Sim
10	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Inaceitável	Não

Fonte: AUTOR

O primeiro passo é o cálculo da entropia do sistema. Neste caso temos 10 exemplos (6 positivos e 4 negativos), $T = [6 + , 4 -]$, logo o valor final da entropia é:

$$info(T) = -\left(\frac{6}{10}\right) * \log_2\left(\frac{6}{10}\right) - \left(\frac{4}{10}\right) * \log_2\left(\frac{4}{10}\right) \quad (4.1)$$

$$info(T) = 0,970$$

Na sequência, calcula-se qual das métricas possui maior impacto no valor final da irritabilidade do cliente.

a) Loudness:

$$T_{inaceitável} = [5 + ,0-], T_{aceitável} [1 + ,4 -] \quad (4.2)$$

$$info(inaceitável) = -\left(\frac{5}{5}\right) * \log_2\left(\frac{5}{5}\right) - 0$$

$$info(inaceitável) = 0$$

$$info(aceitável) = -\left(\frac{1}{5}\right) * \log_2\left(\frac{1}{5}\right) - \left(\frac{4}{5}\right) * \log_2\left(\frac{4}{5}\right)$$

$$info(aceitável) = 0,721$$

Logo,

$$Ganho(info(T), loudness) = 0,970 - (0) - \left(\frac{5}{10}\right) * info(aceitável)$$

$$Ganho(info(T), loudness) = 0,609$$

b) Sharpness:

$$T_{inaceitável} = [1 + ,0-], T_{aceitável} [5 + ,4 -] \quad (4.3)$$

$$info(inaceitável) = -\left(\frac{1}{1}\right) * \log_2\left(\frac{1}{1}\right) - 0$$

$$info(inaceitável) = 0$$

$$info(aceitável) = -\left(\frac{5}{9}\right) * \log_2\left(\frac{5}{9}\right) - \left(\frac{4}{9}\right) * \log_2\left(\frac{4}{9}\right)$$

$$info(aceitável) = 0,991$$

Logo,

$$Ganho(info(T), sharpness) = 0,970 - (0) - \left(\frac{9}{10}\right) * info(aceitável)$$

$$Ganho(info(T), sharpness) = 0,078$$

c) Roughness

$$T_{inaceitável} = [4 + , 0 -] , T_{aceitável} [2 + , 4 -] \quad (4.4)$$

$$info(inaceitável) = -\left(\frac{4}{4}\right) * \log_2\left(\frac{4}{4}\right) - 0$$

$$info(inaceitável) = 0$$

$$info(aceitável) = -\left(\frac{2}{6}\right) * \log_2\left(\frac{2}{6}\right) - \left(\frac{4}{6}\right) * \log_2\left(\frac{4}{6}\right)$$

$$info(aceitável) = 0,918$$

Logo,

$$Ganho(info(T), roughness) = 0,970 - (0) - \left(\frac{6}{10}\right) * info(aceitável)$$

$$Ganho(info(T), roughness) = 0,419$$

d) Fluctuation:

$$T_{inaceitável} = [4 + , 3 -] , T_{aceitável} [2 + , 1 -] \quad (4.5)$$

$$info(inaceitável) = -\left(\frac{4}{7}\right) * \log_2\left(\frac{4}{7}\right) - \left(\frac{3}{7}\right) * \log_2\left(\frac{3}{7}\right)$$

$$info(inaceitável) = 0,985$$

$$info(aceitável) = -\left(\frac{2}{3}\right) * \log_2\left(\frac{2}{3}\right) - \left(\frac{1}{3}\right) * \log_2\left(\frac{1}{3}\right)$$

$$info(aceitável) = 0,918$$

Logo,

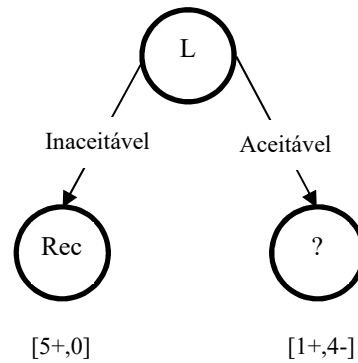
$$Ganho(info(T), fluctuation) = 0,970 - \left(\frac{7}{10}\right) * info(inaceitável) - \left(\frac{3}{10}\right) *$$

$$info(aceitável)$$

$$Ganho(info(T), fluctuation) = 0,005$$

Desta forma conclui-se que a métrica com maior ganho para a resposta final dos clientes é o Loudness (L). A construção da árvore parcial é ilustrada na Figura 58.

Figura 58 - Construção da árvore do classificador em nível parcial.



Fonte: AUTOR

O ramo “inaceitável” já está definido, ou seja, quando a métrica Loudness tiver um valor alto, o cliente reclamaria (Rec). Ao contrário, o ramo “aceitável” ainda está indefinido e nesse caso o processo deve continuar para o próximo nível da árvore com o subconjunto T_1 com os elementos $\{2,3,4,7,10\}$, conforme ilustrado na Tabela 12.

Tabela 12 - Conjunto de treinamentos do classificador para loudness aceitável

Ruído	Loudness	Sharpness	Roughness	Fluctuation	Cliente reclamaria
2	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Não
3	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Inaceitável	Não
4	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Inaceitável	Não
7	Aceitável	Inaceitável	Aceitável	Aceitável	Sim
10	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Inaceitável	Não

Fonte: AUTOR

a) Sharpness:

$$T_{inaceitável} = [1+, 0-], T_{aceitável} = [0+, 4-] \quad (4.6)$$

$$info(inaceitável) = -\left(\frac{1}{1}\right) * \log_2\left(\frac{1}{1}\right) - 0$$

$$info(inaceitável) = 0$$

$$info(aceitável) = -(0) - \left(\frac{4}{4}\right) \log_2\left(\frac{4}{4}\right)$$

$$info(aceitável) = 0$$

Logo,

$$Ganho(info(T), sharpness) = 0,970 - (0) - (0)$$

$$Ganho(info(T), sharpness) = 0,970$$

b) Roughness

$$T_{inaceitável} = [0 + ,0-] , T_{aceitável} [1 + ,4 -] \quad (4.7)$$

$$info(inaceitável) = 0$$

$$info(aceitável) = -\left(\frac{1}{5}\right) * \log_2\left(\frac{1}{5}\right) - \left(\frac{4}{5}\right) * \log_2\left(\frac{4}{5}\right)$$

$$info(aceitável) = 0,721$$

Logo,

$$Ganho(info(T), roughness) = 0,970 - (0) - \left(\frac{5}{5}\right) * info(aceitável)$$

$$Ganho(info(T), roughness) = 0,249$$

c) Fluctuation:

$$T_{inaceitável} = [0 + ,3-] , T_{aceitável} [1 + ,1 -] \quad (4.8)$$

$$info(inaceitável) = -(0) - \left(\frac{3}{3}\right) \log_2\left(\frac{3}{3}\right)$$

$$info(inaceitável) = 0$$

$$info(aceitável) = -\left(\frac{1}{2}\right) * \log_2\left(\frac{1}{2}\right) - \left(\frac{1}{2}\right) * \log_2\left(\frac{1}{2}\right)$$

$$info(aceitável) = 1$$

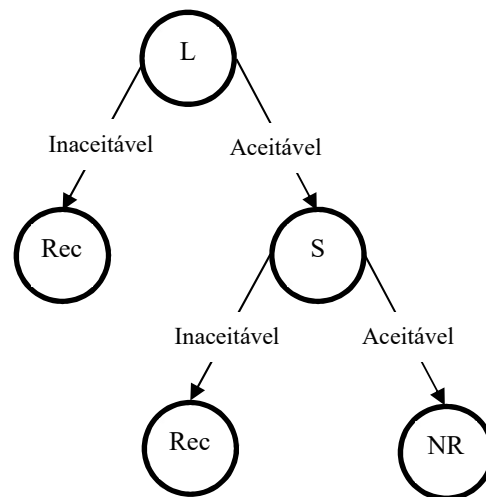
Logo,

$$Ganho(info(T), sharpness) = 0,970 - (0) - \left(\frac{2}{5}\right) * info(aceitável)$$

$$Ganho(info(T), sharpness) = 0,570$$

Neste nível do processo a métrica com maior ganho é o Sharpness. O ramo “inaceitável” já está definido como “Rec”, ou seja, o cliente reclamaria, assim como o ramo “aceitável” que não levaria o cliente a reclamar. A Figura 59 ilustra a árvore final.

Figura 59 - Construção da árvore final do classificador.



Fonte: AUTOR

A árvore final tem 100% de acurácia para o conjunto de treinamento e demonstra que os parâmetros Roughness e Fluctuation não interferem na decisão do cliente reclamar ou não do ruído reproduzido. Diferentemente, a métrica Loudness ligada a intensidade sonora e Sharpness que indica a agudeza do sinal estão fortemente relacionadas com a resposta do júri sendo decisivas na irritabilidade do cliente.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou duas importantes linhas conclusivas. Primeiramente foi comprovada a existência, para o grupo de sinais estudados e colaboradores participantes, de uma divergência de 40% em relação ao nível de irritabilidade dos ruídos apontados por especialistas do segmento comparado com a real avaliação de pessoas sem conhecimento prévio, consideradas como um cliente comum. Essa questão foi uma das principais motivações para elaboração deste projeto para que as ações sobre os ruídos sejam de fato focadas em problemas reais percebidos pelos clientes. A segunda linha conclusiva foi como identificar e quantificar as características dos ruídos para que esses sejam classificados de acordo com seu impacto na satisfação dos clientes. Das quatro métricas psicoacústicas investigadas, duas mostraram uma forte correlação com as reclamações, Loudness e Sharpness. Para ambos os grupos de ruídos “rattle” e “squeak” foi demonstrado que o ruído precisa “desviar a atenção dos passageiros” para que se torne irritante, e somente aqueles sinais com níveis de intensidade sonora e agudeza elevados foram apontados como problemas reais a ponto de o cliente reclamar do veículo em uma concessionária, seja de forma imediata, ou em uma revisão.

As métricas Roughness e Fluctuation, apesar de serem largamente utilizadas em análises acústicas no escopo deste trabalho, não obtiveram uma correlação significativa com o retorno das avaliações do júri. Os principais fatores para esta falta de correlação são as características dos sinais de ruídos parasitas uma vez que esses são intermitentes, normalmente com períodos de ocorrência curtos e dependem sempre de uma fonte externa de excitação para provocar o seu surgimento (rodagem em pavimentos irregulares, paralelepípedo, pedra de rio, etc). Caso o ruído em análise não tenha uma intensidade sonora suficientemente elevada para sobrepor os níveis de ruído característicos do próprio pavimento de excitação e/ou uma agudeza que passe a irritar os passageiros do veículo, esses sinais passarão despercebidos pela grande maioria dos clientes, conforme demonstrado na audição com o júri, diferentemente da visão dos especialistas que julgaram os ruídos como críticos, mesmo esses sendo quase totalmente mascarados pelos ruídos da fonte de excitação. Por outro lado, se avaliamos qualidade sonora, sinais contínuos ou com períodos mais longos de aparição, como troca de marcha, acústica do motor, pneus, sirenes de alarme etc., as métricas roughness ($>20\text{Hz}$) e fluctuation ($<15\text{Hz}$) continuam sendo extremamente úteis na caracterização destes eventos e posteriormente na correlação com a satisfação e/ou irritação dos clientes.

Em relação ao classificador do tipo ID3, apesar de demonstrar a correlação das métricas com resultados próximos a outros trabalhos no segmento, se mostrou muito sensível/limitado

para trabalhar com dados não lineares, principalmente na sensibilidade de conversão dos valores extraídos das métricas para atributos categóricos. A falta de precisão nessa atribuição pode mudar o resultado de forma substancial e trabalhar com somente dez sinais como o proposto neste trabalho impõe ao classificador essa alta sensibilidade. Outro fator importante que também afetou a precisão/sensibilidade do classificador foi a fase objetiva de extração dos dados sobre os áudios gravados. A filtragem buscou selecionar trechos de áudio com somente o ruído em questão e eliminar as demais frequências presentes. A precisão deste processo não foi objeto de estudo deste trabalho, mas certamente para uma aplicação industrial deverá ser aplicada outras metodologias para eliminar este mascaramento.

Conforme demonstrado neste trabalho apenas 2 das 4 métricas psicoacústicas possuem uma correlação com a análise subjetiva. Desta forma uma primeira proposta para estudos futuros seria estudar outras métricas como Índice de Articulação e Curtose. Outro ponto importante é o tipo do classificador, visto que o escolhido por esse trabalho, ID3, trabalha somente com atributos categóricos o que torna extremamente sensível a sua precisão devido a imprecisões durante a conversão dos valores obtidos das métricas psicoacústicas nos atributos categóricos.

Utilizar outras formas de estudar os sinais de ruídos como uma análise profunda FFT e assim extrair características de cada sinal que possam ser relacionadas com as respostas do júri e até mesmo no aprendizado do classificador do tipo ID3 poderia também ser um trabalho futuro promissor.

Adicionalmente, buscar formas mais eficazes e automatizadas para retirar o efeito do mascaramento dos sinais principalmente durante a extração dos parâmetros psicoacústicos seria um trabalho factível. A forma utilizada neste trabalho foi totalmente manual sobrepondo de 2 a 4 amostras do ruído e buscando eliminar todos os outros demais sinais. Esse método manual pode deixar alguns vestígios que impactam diretamente na análise objetiva e consequentemente no classificador ID3.

Para o estudo realizado nesta dissertação foram utilizadas dez amostras de áudio para fazer toda a análise subjetiva e consequentemente, o treinamento do classificador ID3. Desta forma um aumento na quantidade de amostras poderia ser implementado com o objetivo de aumentar a precisão dos resultados obtidos e definir de uma forma mais robusta os limites para transformar os atributos não categóricos dos parâmetros psicoacústicos em atributos categóricos.

Acredita-se, também, que outro trabalho futuro seria implementar uma fase de teste/industrial mais abrangente em uma aplicação real da metodologia apresentada nessa

dissertação e comparar os resultados obtidos do classificador do tipo ID3 com as avaliações do dia a dia apresentados pelos especialistas de ruídos.

Por fim, em termos de aplicação tecnológica, pode-se aumentar de forma considerável o alcance industrial destes conceitos para até mesmo um sistema completo de Inteligência Artificial. Este sistema poderia ser capaz de receber uma gravação de ruído obtida diretamente pelo cliente via celular através de um aplicativo de reclamação, alertando e direcionando à uma concessionária de forma automática para que o reparo fosse efetuado juntamente com as instruções. Ao mesmo tempo poderia-se realizar um auto-aprendizado deste novo ruído aplicando um monitoramento tanto durante a montagem dos novos veículos, utilizando-se de câmeras ao longo da linha de produção caso este defeito fosse proveniente de um erro provocado por um operador, quanto na fase de testes de qualidade, utilizando-se de sistemas de aquisição sonora em que esses veículos novos são submetidos a rodagens internas nas pistas de testes com o objetivo de identificar possíveis ruídos antes do transporte às concessionárias.

REFERÊNCIAS

- AES. Recommended practice for professional audio - Subjective evaluation of loudspeakers. Audio Engineering Society, 1999.
- ALMEIDA G., Redes neurais artificiais: Princípios básicos. Artificial Neural Networks: Basic Principles. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- ALVES, A. Análise objetiva e subjetiva de eventos sonoros anômalos de um refrigerador doméstico em uma cozinha. Universidade Federal de Santa Catarina, 2021.
- ALVES, J. Indução Automática de Árvores de Decisão. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- ANTUNES, M., Coutinho, A., Freitas, E., Paulo, J. Camadas de desgaste para a redução do ruído de tráfego-Avaliação do ruído em pavimentos em serviço, 2011.
- ANTUNES, M. Avaliação do ambiente sonoro em zonas urbanas: integração de aspectos qualitativos, 2011.
- ARAÚJO, F. Utilização da técnica de beamforming para a criação de mapas de parâmetros psicoacústicos dentro de um veículo automotivo. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- AURES, W. Sensory pleasantness: a function of sharpness, roughness and tonality, 1984.
- AUWERAER, H. V. d.; WYCKAERT, K.; HENDRIX, W. An engineering approach to sound quality. Symposium on International Automotive Technology - paper series 962491, p.223-232, 1996.
- BAARS, E.; LENZI, A.; NUNES, R. A. S. Sound Quality Of Hermetic Compressors and Refrigerators. International Compressor Engineering Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2002.
- BECH, S. Planning of listening test—choice of rating scale and test procedure. Proceedings of a Symposium on Perception of Reproduced Sound. [S.l.]: [s.n.]. 1987.
- BISTAFÁ S. R. Acústica aplicada ao controle de ruído, 2006.

BITENCOURT, R. Desempenho de métodos de avaliação do conforto acústico no interior de aeronaves. Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

BLAUERT, J.; JEKOSCH U. Sound-Quality Evaluation – A Multi-Layered Problem, 1997.

BODDEN, U. Perceptual Sound Quality Evaluation. Inter.noise. Nice: [s.n.]. 2000.

BRIZON, C.J.S., MEDEIROS, E.B. Improving the acoustic evaluation of motor cars. Proceedings of 20th International Congress on Acoustics – ICA 2010. PACS: 43.50.LJ,43.66.LJ. Sydney - Austrália, 2010.

BRIZON, C. Metodologia para avaliação e determinação de índices de conforto acústico em engenharia automobilística. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

CERRATO, G. Automotive sound quality, powertrain, road and wind noise. Sound Answers, Inc., Sound & Vibration, April, 2009.

CHANG, S. H.; WU, H. W.; HUNG, C. F. A Sound Quality Study of Household Electrical Appliances by Jury Test in Indoor Space. [S.l.], 2013.

DEMOLINER, G. Avaliação da qualidade sonora de um ciclo típico de operação de um refrigerador. Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

DIN45681. Determination of tonal components of noise and determination of a tone adjustment for the assessment of noise immissions. Berlim: German Institute for Standardization, 2006.

FASTL, H.; ZWICKER, E. Psychoacoustic, facts and models. [S.3.], 2006.

FRANCESCO, C.; PANERO, M.; ROSSI, G. Evaluation of the sound emitted by post-sorting machines with jury test methods. IMEKO World Congress. [S.l.]: [s.n.]. 9-11, 2003.

FERNANDES, J. C. Notas de aula. Disponível em <http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/acustica-ruídos-primeira-parte.doc>. Acesso em 10 jan 2009.

FERREIRA, A. Seleção de atributos usando árvores de decisão não binárias. Universidades Lusíada, 2018.

GARCIA, S. O uso de árvores de decisão na descoberta de conhecimento na área da saúde. Universidade do Rio Grande do Sul, 2003.

GENUIT, K. Sound quality aspects for environmental noise. In: INTERNOISE 2002. [S.l.: s.n], 2002.

GESTWICKI, P. ID3: History, Implementation and Aplications. Disponível em: <<http://www.fredonia.edu/students/nixo1903/>>. Acesso em 16 de Abril de 2022.

GONÇALVES, J. Otimização de parâmetros de materiais de atrito de sistemas de freio usando algoritmos genéricos. Universidade Federal de Santa Catarina , 2004.

HAYKIN, S. Neural Networks, a comprehensive foundation [S.1]: Prentice Hall Internation, 1999.

HOLSHEIMER, M & SIEBEL. Data Mining: the search for knowledge in databases, 1994.

IPSOS. Pesquisas entre as montadoras do país sobre a satisfação dos clientes após 3 meses de utilização de um veículo comprado “0km”. São Paulo, 2019.

ISO5321. Method for Calculating Loudness. [S.l.]: International Organization for Standardization, 2011. p. 16.

LEITE, R. P.; PAUL, S. Qualidade sonora: conceitos básicos ilustrados com um exemplo da área automotiva. Revista Acústica e Vibrações. n. 37, jun., 2006.

LIMA, F.R. Qualidade Sonora – Conceitos Básicos. In: Gerges, S. N. Y. (Org). Ruídos e Vibrações Veiculares. Florianópolis: Editora NR, 2005.

MATTHIAS, S.; MICHAEL, W.; NORBERT, A. Development of vehicle sound quality – Targets and methods. SAE Technical paper 951283, p.401-414, 1995.

MEHRGOU, M. A method to apply ISO 3745 for the sound power measurement of I.C. Engines in a limited space. Scania, 2016.

MENEZES, C. Impactos da implantação da ISO 20252:2006 em empresas de pesquisa de marketing, social e de opinião.

MITCHELL, T. Machine Learning. New York: McGraw-Hill, 1997.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, C. G. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. São Paulo: LTC, 2012.

OLIVEIRA, A. Avaliação do impacto das degradações no ruído pneu-pavimento. Universidade do Minho, 2016.

OLIVEIRA, L. Controle ativo de ruído em veículos e seu impacto na qualidade sonora. Universidade de São Paulo, 2007.

OLIVEIRA, N. Uma metodologia de uso de técnicas de indução para criação de regras de sistemas especialistas. Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

OSGOOD, C.E; SUCI, G.J.; TANNENBAUM, P.H. The measurement of meaning. The University of Illinois Press, Urbana, Chicago and London, 1975.

OTTO, N.; AMMAN S.; EATON, C.; LAKE, S. Guidelines for jury evaluations of automotive sounds. Sound and Vibration, p. 1-14, 2001.

PANG, J. Noise and Vibration Control in Automotive Bodies, 2017.

PASQUALI, L. Psicometria: teoria e Aplicações. Editora UNB, 1997.

PAUL, S. Avaliação e modelagem de qualidade sonora em aeronaves comerciais. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

PAUL, S. A fisiologia da audição como base para fenômenos auditivos. Convenção AES Brasil Expo 2014. São Paulo, 2014.

PAULA, M. Indução automática de árvores de decisão. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

PELLEGRINI, C. Avaliação da qualidade sonora de compressores herméticos utilizando redes neurais. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

PORRES, A. Modelos Psicoacústicos de Dissonância para Eletrônica ao Vivo. Universidade de São Paulo, 2012.

ROSSI, F.; NICOLINI, A. Squeaking noise psychoacoustic evaluation for car passengers. Proceedings of the 15th International Congress on Sound and Vibration, 2008.

ROSSI, F.; NICOLINI A. Psychoacoustic analysis of squeaking and rattling noises inside vehicle cabins, 2010.

SÁ, D.: Modelos baseados em redes neurais artificiais com aplicação em controle indireto de temperatura. Universidade Federal do Maranhão, 2015.

SÁNCHEZ, J. Controle acústico estrutural: projeto, simulação e análise de qualidade sonora. Escola de Engenharia de São Carlos, 2012.

SHIN, S. and Cheong, C. Experimental Characterization of Instrument Panel Buzz, Squeak, and Rattle (BSR) in a Vehicle. Journal of Applied Acoustics, 2010.

SIMÕES, A. Mineração de Dados baseada em Árvores de Decisão para Análise do Perfil de Contribuintes. Universidade de Pernambuco, 2008.

STANLEY, A. An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics, Informa Healthcare, 5th edition, 2010

STRANDEMAR, K. On Objective Measures for Ride Comfort Evaluation. Royal Institute of Technology, 2005.

VIKRAM T. Pawar, Sinhgad Academy of Engineering, Pune Automotive Buzz, Squeak and rattle (BSR) Detection and Prevention, 2017.

WEISCH, G.; STUCKLSCHWAIGER, W.; MENDONÇA, A. A.; MONTEIRO, N. T. S.; SANTOS, L. A. The creation of a car interior noise quality index for the evaluation of rattle phenomena. SAE Technical paper, 1997.

WEISS, S.; KULIKOWSKI, A. Computer systems that learn: Classification and prediction methods from statistics, neural nets, machine learning and expert systems. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1991.

WERNER, K. Caracterização de aspectos do timbre de pratos de percussão através de análises psicoacústicas. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Questionário/email convite para participação da audição da análise subjetiva

Os ruídos parasitas em veículos novos/seminovos possuem um grande impacto na satisfação dos clientes brasileiro. A indústria automobilística já detectou esta particularidade de nosso mercado em que a presença destes ruídos é diretamente relacionada a qualidade/robustez dos produtos.

Você está sendo convidado para participar de uma Audição para a aplicação de nova metodologia envolvendo parâmetros psicoacústicos com o objetivo de focar na sensação auditiva para mensurar o nível de irritabilidade para cada um dos dez ruídos a serem apresentados. Todos esses ruídos foram gravados em meios físicos nas pistas de teste. A duração máxima da audição será de 45 minutos.

Locais:

- a) Sala DIR / SAD – Porto Real;
- b) Laboratório NVH – Betim;

Para dar continuidade ao processo de participação favor retornar o email com as respostas abaixo:

- 1) Confirmar interesse em participar respondendo o email com SIM no título e informar no corpo de texto o número de celular para receber via whatsapp o detalhamento sobre hora e local da audição.
- 2) Em caso de interesse na participação, favor retornar com SIM/NÃO as três questões abaixo no mesmo corpo de email:
 - a) Escuta sons no mesmo volume que os demais membros de sua família?
[SIM / NÃO]
 - b) Apresenta zumbido em um ou ambos os ouvidos?
[SIM / NÃO]
 - c) Foi diagnosticado em algum exame com perda auditiva em um ou ambos ouvidos?
[SIM / NÃO]

APÊNDICE B - Questionário aplicado ao júri nas escutas / análise subjetiva

- 1) As notas de cada áudio poderão assumir as 3 categorias apontadas na tabela abaixo referentes ao nível de irritabilidade.

Tabela B1 - Escala aplicada na análise subjetiva

Notas possíveis									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INACEITÁVEL				LIMITE	ACEITÁVEL				

Após a escuta de cada ruído, avaliar com notas de 1 a 10 conforme critérios apontados na tabela anterior.

Tabela B2 - Entrada de notas do júri

[illegible]

- 2) Com base nos ruídos reproduzidos, qual seria sua reação em relação a reclamar ou não sobre o problema, segundos as possibilidades abaixo:
- a) Reclamaria de Imediato: o ruído é tão irritante a ponto de parar o veículo e levá-lo a concessionária;
 - b) Reclamaria em uma revisão: o ruído é incômodo mas poderia esperar uma revisão do veículo para poder fazer o reparo;
 - c) Não reclamaria. O ruído não incomoda ou é imperceptível;

Tabela B3 - Questionário sobre levar o veículo na concessionária na presença do ruído

[illegible]

APÊNDICE C - Curvas das métricas psicoacústicas

Figura C1 - Ruído painel de porta

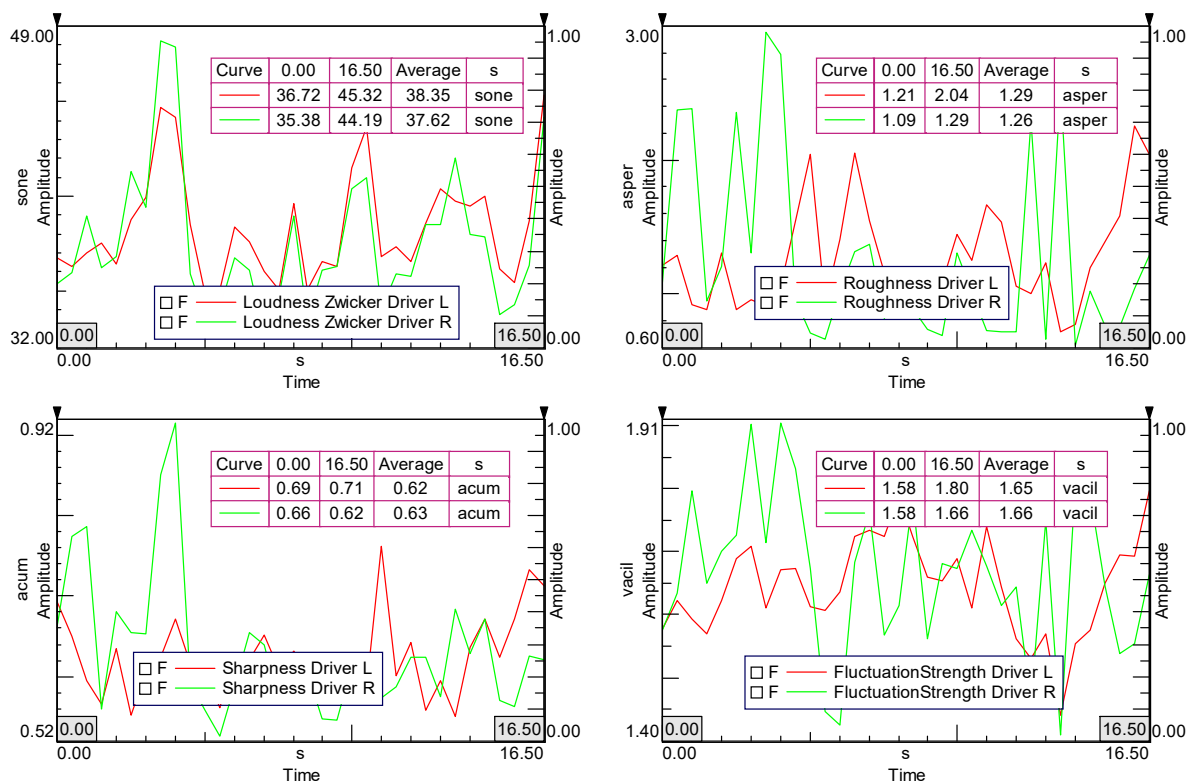


Figura C2 - Ruído caixa de direção

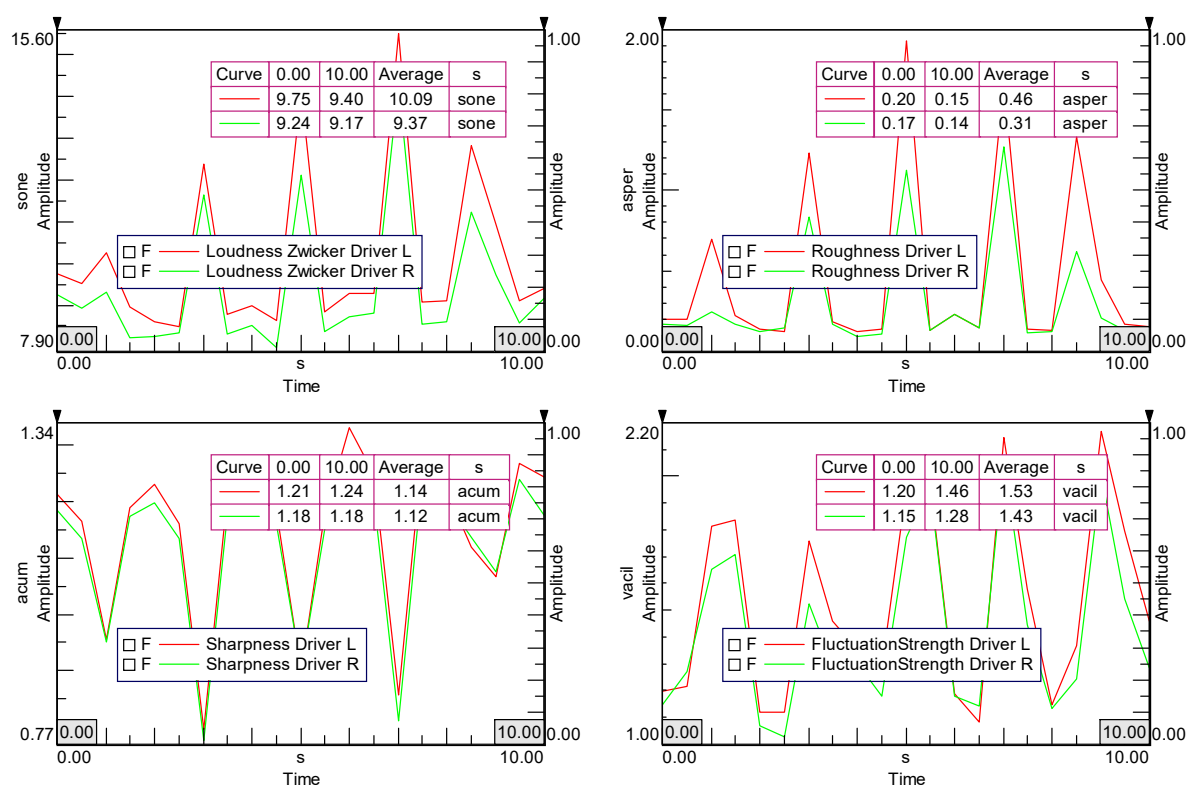


Figura C3 - Ruído console central

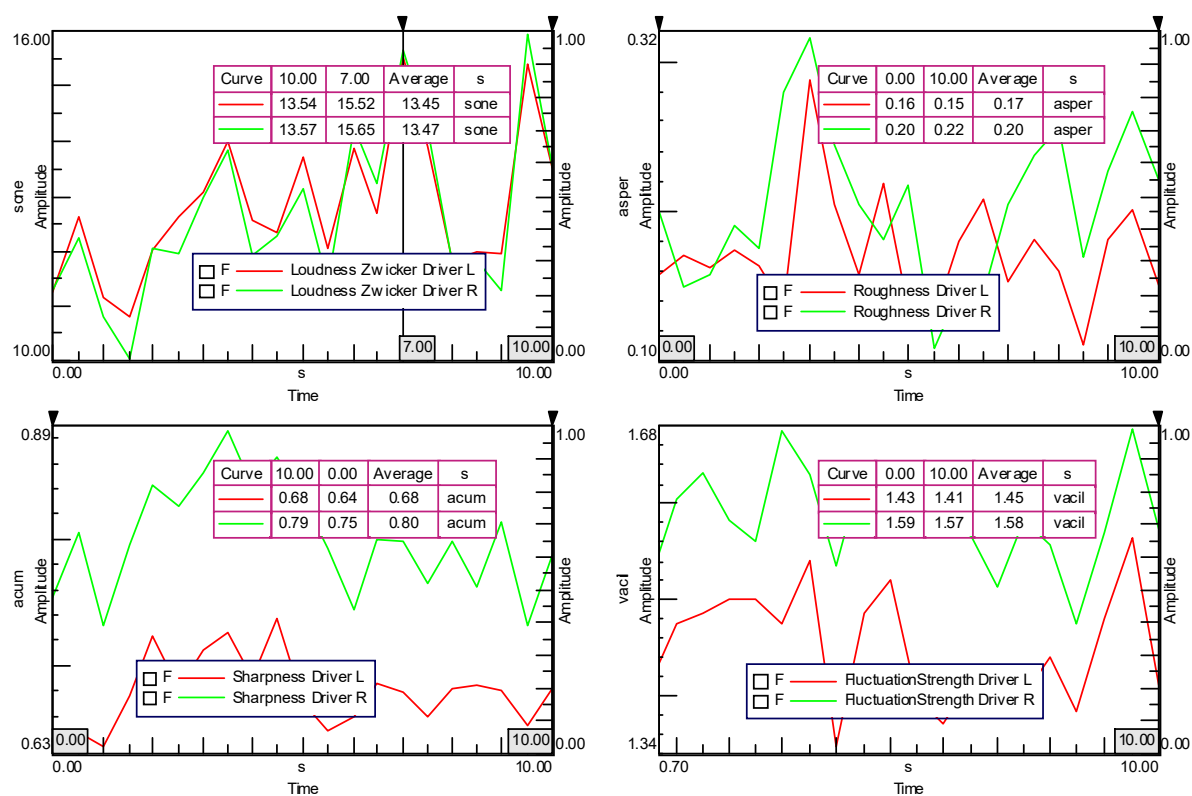


Figura C4 - Ruído no banco

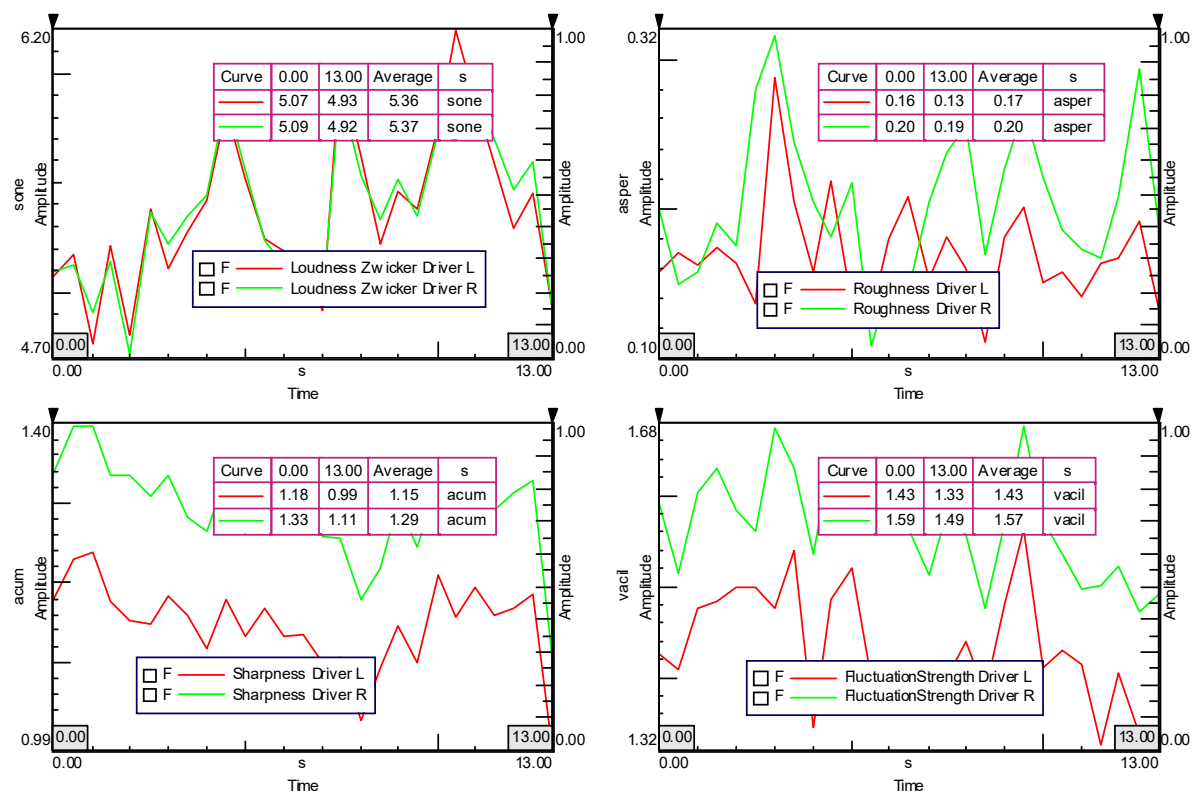


Figura C5 - Ruído tampa do porta malas

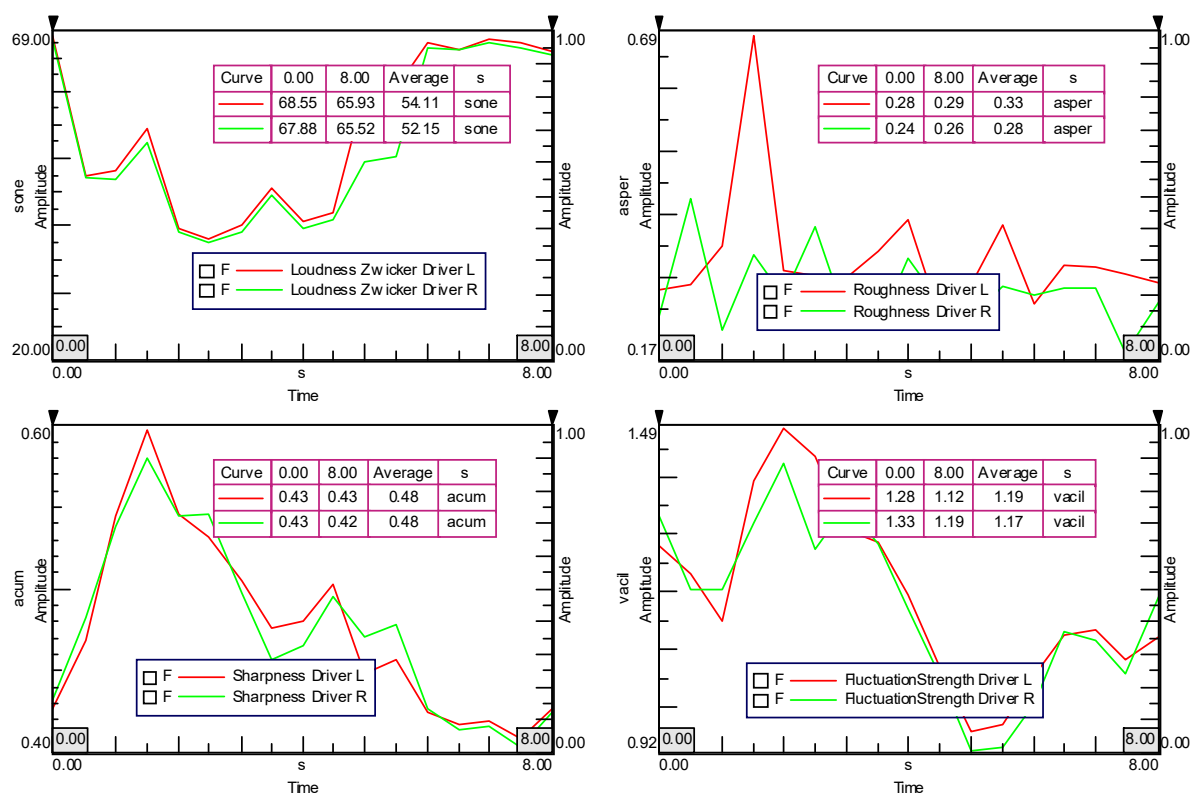


Figura C6 - Ruído difusor de ar

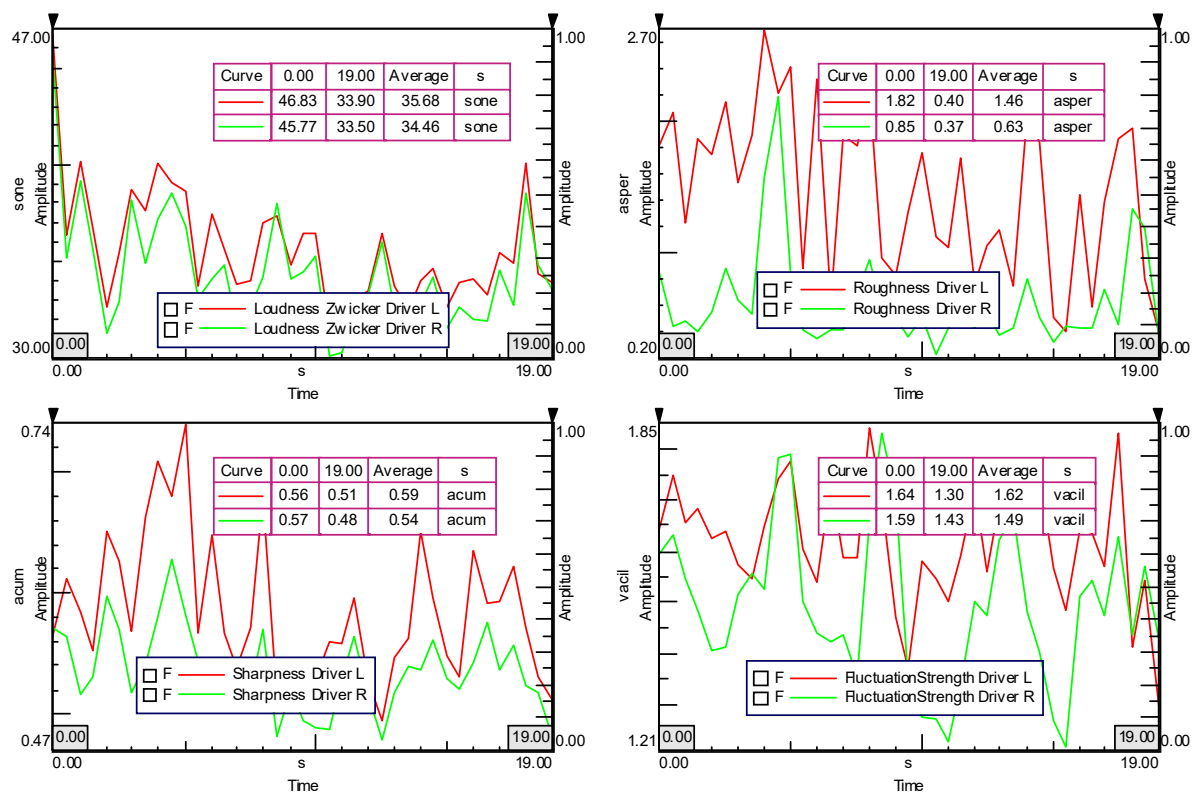


Figura C7 - Ruído lanterna traseira

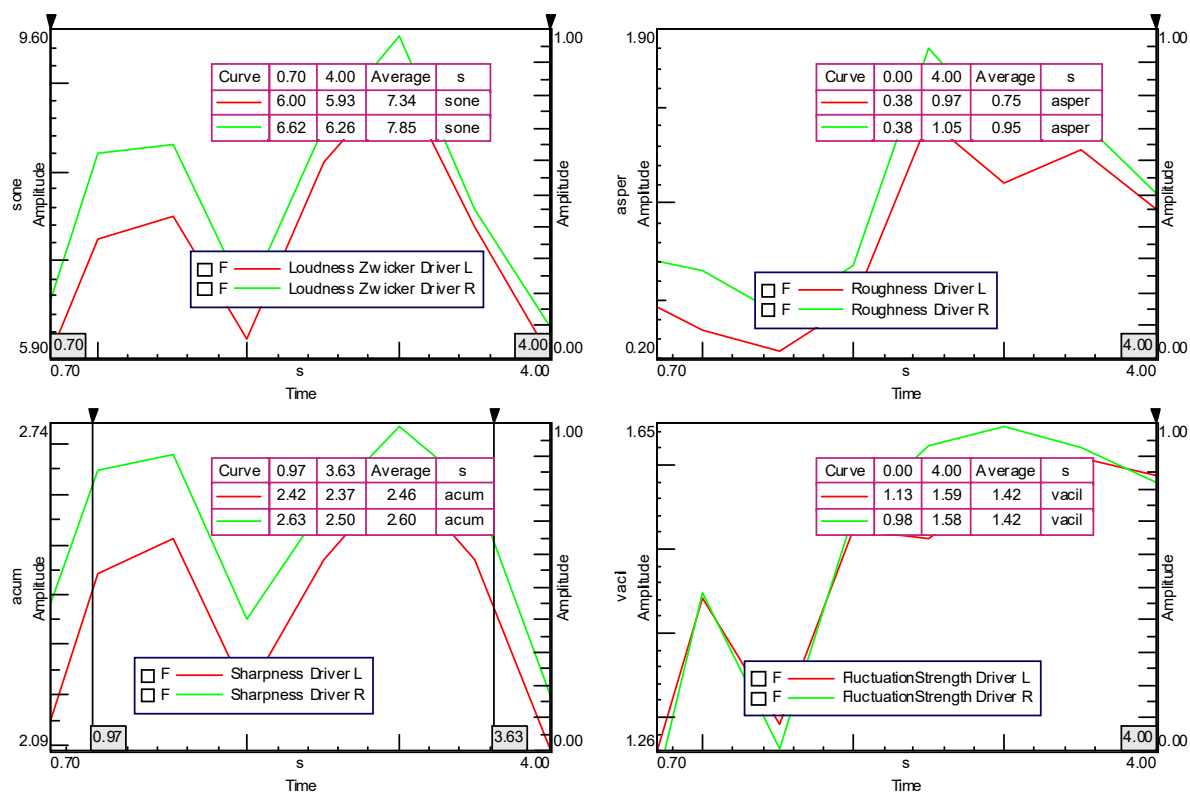


Figura C8 - Ruído macaco mal fixado

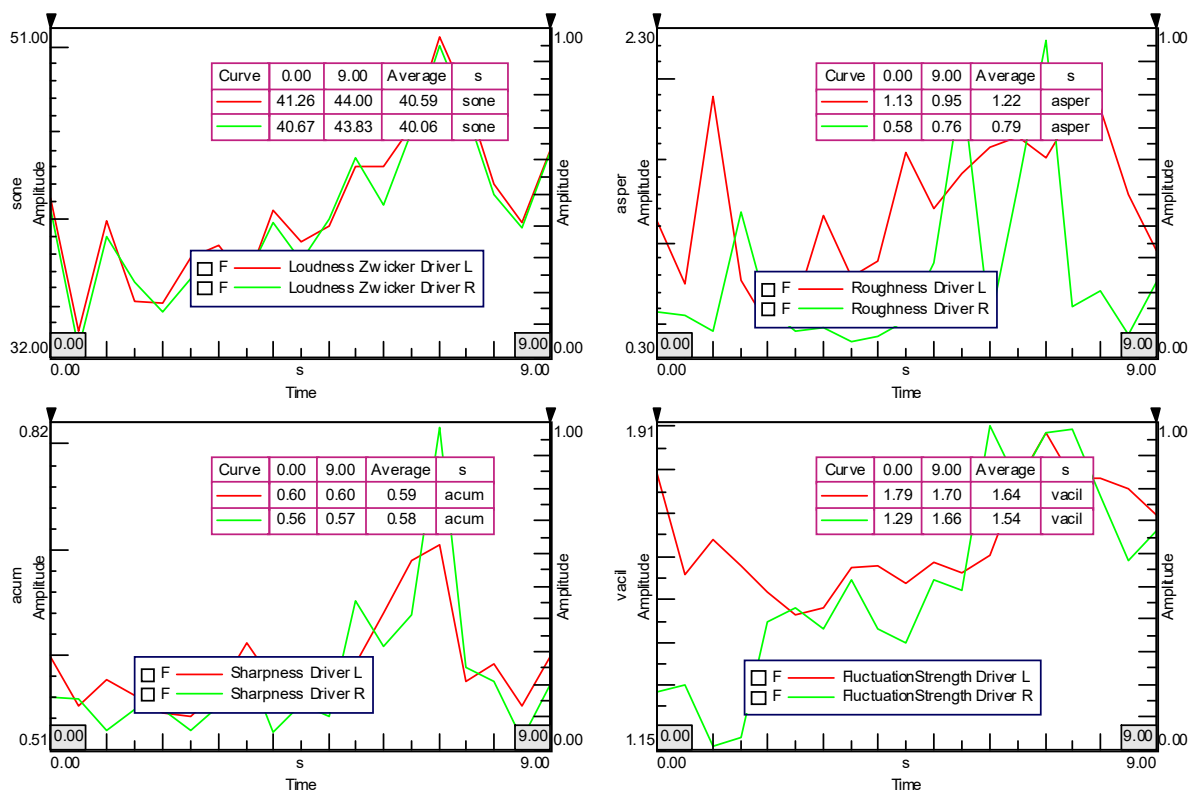


Figura C9 - Ruído objeto solto porta malas

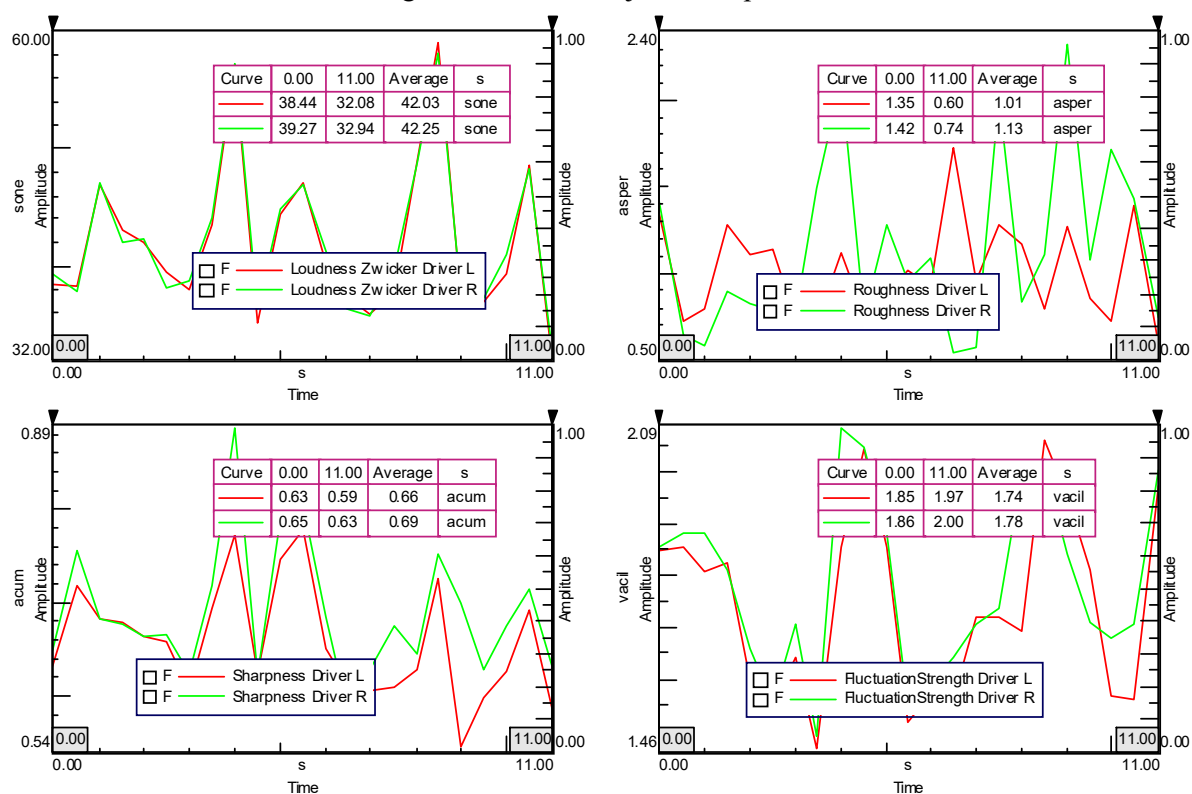


Figura C10 - Ruído central multimídia

