

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Marlon Casagrande
RODRIGUES..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 10.06.2011


.....
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Marlon Casagrande Rodrigues

**Estudo da influência dos parâmetros de injeção
de combustível no ruído emitido por motores
Diesel, fazendo uso do planejamento
multivariado de experimentos**

Campinas, 2011

Marlon Casagrande Rodrigues

Estudo da influência dos parâmetros de injeção de combustível no ruído emitido por motores Diesel, fazendo uso do planejamento multivariado de experimentos

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Automobilística.

Área de Concentração: Projetos

Orientador: Prof. Dr. Roy Edward Bruns

Campinas

2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

R618e Rodrigues, Marlon Casagrande
Estudo da influência dos parâmetros de injeção de combustível no ruído emitido por motores diesel, fazendo uso do planejamento multivariado de experimentos / Marlon Casagrande Rodrigues. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Roy Edward Bruns.
Dissertação de Mestrado (Profissional) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Superfície de resposta - Metodologia. 2. Superfície de resposta (Estatística). 3. Planejamento fatorial . I. Bruns, Roy Edward. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Study of the influence of the fuel injection parameters on the noise emitted by diesel engines, using the multivariate design of experiments

Palavras-chave em Inglês: Response surface - Methodology, Response surface (Statistics), Factorial design

Área de concentração: Projetos

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística

Banca examinadora: Ines Joeques, Anderson Vicente Borille

Data da defesa: 10.06.2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL

**Estudo da influência dos parâmetros de injeção
de combustível no ruído emitido por motores
Diesel, fazendo uso do planejamento
multivariado de experimentos**

Autor: Marlon Casagrande Rodrigues
Orientador: Prof. Dr. Roy Edward Bruns

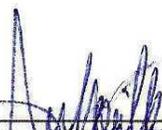
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta dissertação:



Prof. Dr. Roy Edward Bruns
UNICAMP/CAMPINAS



Profa. Dra. Ines Joekes
UNICAMP/CAMPINAS



Prof. Dr. Anderson Vicente Borille
ITA/SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

Campinas, 10 de junho de 2011.

Dedico este trabalho aos meus pais, João Rodrigues Valverde e Cleusa Casagrande Rodrigues que sempre me deram apoio e incentivo para conquistar meus objetivos.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais e irmão pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

À Camila pelo apoio e compreensão nos momentos difíceis deste curso.

Ao meu orientador, que me mostrou os caminhos a serem seguidos.

A todos os professores e colegas que ajudaram para a conclusão deste trabalho.

À MWM Motores Diesel pela oportunidade.

Aos amigos Georges, Alexandre e Mauro, pelas valiosas discussões técnicas e incentivo.

Ao amigo e parceiro de curso, Jorge, pelos estudos e discussões durante todo o curso e preparação deste documento.

*Sessenta anos atrás eu sabia tudo, hoje sei que nada sei.
A educação é o descobrimento progressivo da nossa ignorância.*

Autor: William James Durant

Resumo

Nos últimos anos a emissão de ruído tem sido decisiva para aceitação de veículos no mercado, não somente devido à legislação, mas também no que diz respeito à satisfação do cliente. Por este motivo as empresas fabricantes de veículos e ou motores de combustão interna têm sido obrigadas a dar uma atenção especial às emissões de ruído para poderem competir com suas concorrentes. Neste trabalho realizou-se estudo da influência dos parâmetros de injeção de combustível do motor MWM 6.12 TCE no nível de ruído emitido pelo motor Diesel na condição de marcha lenta, por meio da técnica de planejamento multivariado de experimentos. Foram escolhidas duas técnicas de medição indireta de ruído (ruído de combustão e aceleração na saia do bloco) para serem utilizadas como variável resposta do planejamento de experimentos. Para verificação da eficácia dos planejamentos realizou-se ensaios qualitativos e quantitativos de ruído propriamente dito. Foi feito um planejamento fatorial fracionário 2^{8-4} para fazer uma triagem de oito fatores de acordo com seus efeitos nas respostas aceleração na saia do bloco e ruído de combustão. Os fatores com efeitos mais significativos, pressão do *rail*, ponto de injeção principal, ponto de pré-injeção 2 e débito da pré-injeção 2, foram investigados usando um planejamento composto central e superfícies de respostas foram determinadas para cada uma das respostas.

Os resultados mostraram que apenas a variável resposta vibração na saia do bloco apresentou resultados satisfatórios para esta condição específica do motor tanto nos testes quantitativos como qualitativos (redução de 2 dB e melhora na qualidade sonora respectivamente). Após verificação da influência dos parâmetros de injeção no ruído emitido verificou-se também a influência destas alterações no consumo de combustível e emissões dos gases de escape e foi observado que existem influências significativas nas emissões dos gases de escape.

Palavras Chave: Superfície de resposta - Metodologia; Superfície de resposta (Estatística); Planejamento Fatorial.

Abstract

In recent years the noise level has been decisive for acceptance of vehicles on the market, not only because of legislation but also with regard to customer satisfaction. For this reason the manufacturers of vehicles and internal combustion engines have been forced to give special attention to the emission of noise to compete with their competitors. In this work, the influences of fuel injection parameters on the noise level of the MWM 6.12 TCE diesel engine emitted under low idle condition were determined using multivariate statistical design of experiments. Two techniques for the indirect measurement of noise, combustion noise and engine crankcase vibration, were chosen as the response variables for the experimental design. To check design effectiveness both qualitative and quantitative noise measurements were carried out. A 2^{8-4} fractional factorial design was performed to screen eight factors according to their effects on engine crankcase vibration, and combustion noise. The factors with the most significant effects, rail pressure, pre-injection point, main injection point and the pre-injection delivery, were investigated using a central composite design and response surfaces were determined for each response.

The results showed that only the engine crankcase vibration showed satisfactory results for this particular engine condition in both the quantitative and qualitative analyses (reduction of 2 dB and an improvement in sound quality, respectively). After verification of the influences of the injection parameters on the noise the influences of these changes on fuel consumption and exhaust emissions were also analyzed. Significant influences were observed on the exhaust gas emissions.

Keywords: Response surface - Methodology; Response Surface (statistical); factorial design.

Lista De Figuras

Figura 3.1 - Esquema de combustão do motor de combustão interna.....	9
Figura 3.2 - Esquema do sistema biela/manivela dos motores alternativos.....	9
Figura 3.3 - Esquema dos quatro tempos do motor.....	11
Figura 3.4 – Sistema de injeção “Common Rail”.....	12
Figura 3.5 - Contribuição dos dois tipos de ruído no ruído total emitido pelo motor Diesel.....	16
Figura 3.6 – Demonstração da influência dos parâmetros de injeção na curva de pressão de combustão.....	17
Figura 3.7 - Representação esquemática de uma onda sonora de um alto falante.....	22
Figura 3.8 - Curva de atenuação A.....	23
Figura 3.9 - Representação esquemática da Pressão Acústica.....	24
Figura 3.10 - Limites da audição humana.....	25
Figura 3.11 - Representação esquemática de um experimento.....	30
Figura 3.12 – Gráfico de um Experimento fatorial sem interação entre os fatores.....	35
Figura 3.13 – Gráfico de um Experimento fatorial com interação entre os fatores.....	35
Figura 3.14 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos.....	42
Figura 3.15 - Câmeras semi-anecóica e reverberante.....	48
Figura 3.16 - Sonda para medição de intensidade sonora com dois microfones.....	49
Figura 4.1 – Processo de análise do ruído de combustão do Indiset.....	56
Figura 4.2 - Localização do acelerômetro colado na saia do bloco para medição da vibração.....	57
Figura 4.3 - Malha para medição de intensidade sonora.....	65
Figura 5.1 - Gráfico de probabilidade normal dos efeitos para variável resposta ruído na saia do bloco.....	70
Figura 5.2 - Gráfico de probabilidade normal dos efeitos para a variável resposta ruído de combustão.....	71
Figura 5.3 – Correlação entre as variáveis resposta ruído de combustão e aceleração no bloco.....	72
Figura 5.3 – Comportamento da variável resposta ruído de combustão quando os fatores B e E são mantidos constantes.....	80

Figura 5.4 – Comportamento da variável resposta ruído de combustão quando os fatores A e E são mantidos constantes.	81
Figura 5.5 – Comportamento da variável resposta aceleração no bloco quando os fatores E e F são mantidos constantes.	82
Figura 5.6 – Comportamento da variável resposta aceleração no bloco quando os fatores A e B são mantidos constantes.	83
Figura 5.7 – Aceleração na saia do bloco VS ruído de combustão.	84

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Experimento fatorial com dois níveis e dois fatores	32
Tabela 3.2 - Experimento 2^2 com os respectivos resultados	33
Tabela 3.3 - Experimento 2^2 com interação entre os efeitos	33
Tabela 3.4 - Resultados de um planejamento fatorial 2^3 para estudar a significância dos efeitos	37
Tabela 3.5 – Coeficiente de contraste de um planejamento fatorial 2^3 para estudar a significância dos efeitos das interações	37
Tabela 3.6 – Valores dos efeitos para cálculo da significância dos efeitos.....	38
Tabela 3.7- Valores de efeitos para estudo dos gráficos de probabilidade acumulada	40
Tabela 3.8- Correspondência entre os valores dos efeitos e os valores de probabilidade cumulativa.	41
Tabela 3.9 - Exemplo de planejamento do tipo circunscrito.	45
Tabela 3.10 - Exemplo de planejamento do tipo inscrito.	46
Tabela 3.11 - Planejamento do tipo face centrada.....	46
Tabela 4.1 - Níveis definidos para os fatores que irão ser utilizados no experimento de triagem.	54
Tabela 4.2 - Especificações da sala dinamométrica utilizada.	58
Tabela 4.3 - Condições de contorno do motor para garantir qualidade dos resultados.....	59
Tabela 4.4 - Especificações dos sensores utilizados.....	59
Tabela 4.5 - Matriz do planejamento de triagem de fatores em ordem padrão.	60
Tabela 4.6 - Níveis escolhidos para os fatores do experimento de otimização.	62
Tabela 4.7 - Matriz do planejamento que foi realizado para otimização com foco em redução de ruído.....	63
Tabela 4.8 - Especificação dos sensores utilizados para medição de potência sonora por meio de intensidade sonora.	64
Tabela 4.9 - Configuração do dinamômetro utilizado para medições de emissões de gases de escape.....	67
Tabela 5.1 - Aceleração no bloco do motor e ruído de combustão obtidos para o planejamento de triagem de fatores.	68

Tabela 5.2 - Efeitos calculados para os resultados de aceleração na saia do bloco.....	69
Tabela 5.3 - Efeitos calculados para os resultados de ruído de combustão.....	71
Tabela 5.4 - Resultados obtidos para as variáveis respostas ruído de combustão e aceleração na saia do bloco, no planejamento composto central de otimização.....	73
Tabela 5.5 - Configuração dos parâmetros de injeção otimizados para variável resposta ruído de combustão.....	74
Tabela 5.6 - Configuração dos parâmetros de injeção otimizados para variável resposta ruído de combustão.....	74
Tabela 5.7 - Análise de Variância para variável resposta ruído de combustão.....	75
Tabela 5.8 - Bloco dos Coeficientes Estimados da Regressão para variável resposta ruído de combustão.....	77
Tabela 5.9 - Bloco referente à Análise de Variância para variável resposta Vibração na saia do bloco.....	79
Tabela 5.10 - Bloco dos Coeficientes Estimados da Regressão para variável resposta vibração na saia do bloco.....	79
Tabela 5.11 - Resultados dos testes de intensidade sonora para as configurações de parâmetros de injeção escolhidas.....	85
Tabela 5.12 – Resultados do teste de júri.....	86
Tabela 5.13 – Resultados dos testes de emissões.....	87
Tabela 5.14 – Resultados para consumo de combustível.....	88

Nomenclatura

Siglas e abreviações

FFT - Transformada rápida de Fourier

PMS – Ponto Morto Superior

PMI - Ponto Morto Inferior

NP - Normal de produção

SUV's – Veículos Utilitários Esportivos

NVH – Ruído, Vibração e Aspereza

MANOVA – Analise de Variância Múltipla

ECU – Unidade de Controle Eletrônica

APMS – Antes do Ponto Morto Superior

DPMS – Depois do ponto Morto Superior

HC – Hidrocarbonetos

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

NOX – Óxidos de Nitrogênio

NO₂ – Dióxido de Nitrogênio

NO – Monóxido de Nitrogênio

MP – Material Particulado

CNTP – Condições Normais de Pressão e Temperatura

NI – Nível de Intensidade Sonora

NPS – Nível de Pressão Sonora

NPW – Nível de Potência Sonora

NBR – Norma Brasileira

ISO – International Organization for Standardization

EPef – Erro Padrão dos Efeitos

IC – Intervalo de Confiança

Ef – Efeito

RSM – Metodologia de Superfície de Resposta

CCC – Planejamento do tipo Circunscritos

CCI – Planejamentos do tipo Inscritos

CCF – Planejamentos do tipo Face Centrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.2	Estrutura da dissertação.....	3
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	4
3	CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	8
3.1	Motores.....	8
3.1.1	Motor Diesel.....	8
3.1.2	Sistema de Injeção de combustível.....	11
3.1.3	Parâmetros de injeção de combustível.....	13
3.1.4	Ruído em motores.....	14
3.1.5	Emissão de gases de escape em motores Diesel.....	18
3.2	Parâmetros para avaliação acústica.....	21
3.2.1	Geração do som.....	21
3.2.2	Atributos do som.....	25
3.2.3	Propagação do som.....	26
3.2.4	O decibel (dB).....	27
3.2.5	NI, NPS e NPW.....	27
3.2.6	Ruído e legislação.....	29
3.3	Planejamento de experimentos.....	30
3.3.1	Planejamento Fatorial.....	32
3.3.1.1	Cálculo dos Efeitos.....	32
3.3.1.2	Cálculo da significância dos efeitos quando os experimentos possuem réplicas.....	36

3.3.1.3	Verificação da significância dos efeitos quando os experimentos não possuem réplicas 40	
3.3.2	Planejamento Fatorial 2^k	42
3.3.3	Planejamento Fatorial Fracionado 2^{k-p}	43
3.3.4	Superfície de resposta.....	44
3.3.5	Planejamentos Box-Behnken e Box-Wilson ou composto central.....	44
3.4	Potencia Sonora por meio de Intensidade Sonora.....	47
3.5	Qualidade Sonora.....	50
4	METODOLOGIA.....	53
4.1	Definição dos Fatores.....	53
4.2	Definição dos Níveis dos Fatores.....	54
4.3	Variável Resposta.....	54
4.3.1	Ruído de combustão por meio da pressão de combustão.....	55
4.3.2	Aceleração na saia do bloco.....	57
4.4	Descrição do Ensaio.....	58
4.5	Planejamento de Triagem dos Fatores.....	60
4.6	Planejamento de Otimização.....	61
4.6.1	Fatores do Planejamento de Otimização.....	61
4.6.2	Níveis dos Fatores para o Planejamento de otimização.....	62
4.6.3	Planejamento escolhido para otimização.....	62
4.7	Ensaio para Validação da Metodologia Utilizada.....	64
4.7.1	Potência Sonora por meio da Intensidade Sonora.....	64
4.7.2	Qualidade sonora por meio de teste de júri.....	65
4.7.2.1	Avaliação dos jurados.....	66
4.8	Ensaio para verificação do impacto causado no consumo de combustível e nas emissões de gases de escape.....	67

5	RESULTADOS	68
5.1	Resultados do Planejamento de Triagem dos Fatores	68
5.2	Resultados do Planejamento de Otimização.....	73
5.2.1	Análise da qualidade do modelo.....	75
5.2.2	Análise das superfícies de resposta	80
5.3	Resultados das medições de intensidade sonora.....	85
5.4	Resultados do teste de júri.....	86
5.5	Resultados dos testes de emissões e consumo de combustível	87
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
	REFERÊNCIAS	91
	ANEXO A – Tabela da distribuição t-Student.....	93
	ANEXO B – Tabela da distribuição F.....	94

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais para as empresas competirem de forma mais efetiva, elas precisam atender às necessidades do cliente ao longo do tempo, melhor que seus concorrentes (BRIGANTINI, 2008).

Com todas as facilidades existentes atualmente sobre o globo terrestre, os veículos são o meio de transporte mais comum. Porém, os mesmos estão aumentando de forma tão acelerada que estão se tornando um problema para os seres humanos, pois os carros, caminhões, tratores, entre outros, tem inúmeras fontes que geram uma grande quantidade de ruído. Estes ruídos, se não controlados adequadamente, podem causar danos aos seres humanos, e isso faz com que as leis fiquem cada vez mais rígidas. Então cientistas trabalham para tornar estes meios de transporte úteis e saudáveis, para que seu uso seja benéfico aos seres humanos (CONZATTI, 2002).

Nos últimos anos, a emissão de ruído tem sido decisiva para aceitação de veículos no mercado, não somente devido à legislação, mas também no que diz respeito à satisfação do cliente. Por este motivo as empresas fabricantes de veículos têm sido obrigadas a dar uma atenção especial às emissões de ruído para poderem competir com suas concorrentes. A melhoria do conforto dos veículos e o controle dos ruídos envolvem aumento de horas de trabalho no projeto, assim como um aumento de custo agregado, desafiando os conhecidos objetivos de redução de custo e tempo de desenvolvimento. Para permanecerem competitivas, as empresas estão desenvolvendo uma nova estratégia a fim de atender essa necessidade da população e, simultaneamente, responder às exigências de mercado quanto à agilidade, qualidade e valor final do produto (MACHADO, 2003).

Uma das maiores fontes de ruído dos veículos atuais é o motor de combustão interna e, portanto este item deve receber grande atenção no que diz respeito a ruído, para que as necessidades do cliente possam ser atingidas.

Para a engenharia automotiva, surge a necessidade de reduzir o número de testes e obter veículos com grande qualidade. Devido a essa necessidade novas tecnologias vêm sendo utilizadas: testes virtuais, planejamento de experimentos, entre outros. O planejamento de experimentos tem tido um papel importante, devido à possibilidade de se estudar vários fatores simultaneamente, minimizando o número de testes e custos, e tem auxiliado, também, na análise estatística dos resultados proporcionando aos consumidores produtos de maior qualidade e custos otimizados (BARROS NETO *et. al.* 2007). Esta metodologia tem sido usada em diversas áreas incluindo: indústria química, indústria de polímeros, indústria automobilística, farmacêutica entre outras (ERIKSSON, 2008).

No desenvolvimento acústico, o profissional precisa estar ciente das expectativas do consumidor. Algumas vezes esta expectativa não é mensurável e o fator humano se torna importante (GERGES, 2005). O caminho está na compreensão dos fenômenos de geração, propagação e percepção do ruído pelo usuário. Cada uma dessas parcelas necessita de uma metodologia diferente de controle.

1.1 Objetivos

O presente trabalho visa contribuir com informações que podem conduzir ao conhecimento necessário para aplicação de planejamento multivariado de experimentos e estudar o ruído emitido por motores Diesel. O objetivo principal deste trabalho é realizar o estudo da influência dos parâmetros de injeção no nível de ruído emitido pelo motor MWM 6.12TCE Diesel, na condição de marcha lenta, fazendo uso das técnicas de planejamento multivariado de experimentos. A pesquisa será focada no estudo dos parâmetros de injeção com maior influência no ruído de combustão, na condição de marcha lenta, com o objetivo de conseguir uma redução quantitativa (redução de potência sonora), e também melhoria na qualidade sonora.

Os objetivos secundários são: verificar a eficácia das técnicas de medição indireta do ruído emitido pelo motor (vibração na saia do bloco e ruído de combustão); realizar revisão das metodologias de análise de ruído, tanto quantitativas como qualitativas; estudar as formas de

ruído e seus principais componentes e também avaliar os efeitos causados no consumo de combustível e emissão de gases de escape devido à alteração dos parâmetros de injeção.

1.2 Estrutura da dissertação

O capítulo 1 (Introdução) tem como finalidade informar sobre a importância e pertinência do tema com os objetivos e estrutura a serem abordados no decorrer do trabalho.

Já no capítulo 2 (Revisão Bibliográfica) encontram-se as publicações e obras diversas que fundamentaram o trabalho.

O capítulo 3 (Conceitos fundamentais) apresenta alguns dos conceitos necessários para compreensão do estudo desenvolvido.

No capítulo 4 (Metodologia) é apresentada toda metodologia para realização da análise experimental.

No capítulo 5 (Resultados) são demonstrados os resultados obtidos nas análises experimentais.

A Conclusão e Sugestões para trabalhos futuros, no capítulo 6, avaliam os resultados obtidos, situando o tema na conjectura atual do desenvolvimento tecnológico.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Para realização deste trabalho levou-se em consideração diversos outros trabalhos e divulgações sobre temas pertinentes ao estudo em questão. Abaixo, estão listados alguns dos trabalhos que servem como referência para o presente desenvolvimento.

Glyniadakis (2009) estudou o efeito vibro acústico da engrenagem com sistema de redução de folga automático no ruído de batida de dentes (*rattle*) relativo à engrenagem do compressor de ar. Para verificar a percepção do usuário do veículo, fez uso das técnicas de qualidade sonora por meio do teste de júri. Apresentou as etapas a serem cumpridas e algumas técnicas estatísticas para interpretação dos resultados. Suas principais conclusões foram: diminuição do nível global, tanto de vibração da tampa quanto da pressão sonora, em virtude do uso da engrenagem redutora de folga. Baseado no teste de júri concluiu que a engrenagem NP (normal de produção) é mais barulhenta e desagradável que a engrenagem com sistema de redução de folga.

Pacheco e Zannin (2002) estudaram o efeito do ruído de combustão, com diferentes tipos de combustíveis, e demonstraram que o ruído de combustão é gerado dentro da câmara e que depende da velocidade da queima, do rendimento volumétrico e do tipo de combustível. Já o ruído mecânico, segundo eles, é gerado pelas partes girantes do motor. Para verificação dos diferentes níveis de ruído emitidos por diferentes combustíveis fizeram uso da técnica de obtenção de potência sonora por meio de intensidade sonora, demonstrando a validade desta técnica para motores de combustão interna. Suas conclusões foram que o método de intensidade sonora é seguro para identificação de fontes de ruído de combustão em motores automotivos. Uma vez garantida à precisão das medições pela análise dos indicadores de campo, o método demonstrou claramente quais foram as faces do motor que apresentaram maiores níveis do ruído total e do ruído de combustão, usando os diferentes tipos de combustíveis de competição. E por meio destes resultados, pode-se classificar e tirar importantes conclusões sobre o ruído de combustão. Finalmente, observaram que o método de intensidade sonora pode ser utilizado para obtenção do ruído de combustão por meio do ruído total do motor – soma entre o ruído mecânico com o ruído de combustão, e assim, auxiliar no desenvolvimento de novos projetos de motores e na comparação do ruído de combustão usando diferentes tipos de combustíveis.

Stücklschwaiger, Hargreaves e Beidl (1999) mostraram em seu trabalho como fazer um motor Diesel se tornar uma atrativa alternativa para veículos SUV's (Sport Utility Vehicle) por meio de calibração do sistema de injeção e isolamento das vibrações, para tanto estudaram as múltiplas influências do sistema de injeção no nível de ruído emitido por motores de combustão interna e mostraram que na condição de marcha lenta os motores apresentam, quase que na totalidade, ruído de combustão e muito pouco ruído mecânico. Concluíram que os aspectos de NVH (noise, vibration and harshenes) devem ser considerados no início do desenvolvimento de um motor Diesel, que o sistema de injeção e o trem de válvulas são sistemas que tem influência significativa no ruído mecânico e no ruído de combustão. Verificaram também que o refinamento do veículo e acerto da coxinzização, podem fazer com que motores Diesel se tornem uma solução atrativa para SUV's.

Lourenço (2007) utilizou as técnicas de planejamento de experimentos para auxiliar no desenvolvimento da combustão de motores Diesel utilizando como resposta as emissões dos gases de escapamento e como fatores os parâmetros de injeção de combustível. Demonstrou como analisar os resultados de um planejamento de experimento e a superfície de respostas e discutiu as vantagens da utilização do planejamento de experimentos na indústria automotiva, que são redução de tempo e custos.

Suas conclusões foram: Ferramentas estatísticas de modelamento podem ser amplamente utilizadas em desenvolvimento de combustão, em motores Diesel e em diversas outras áreas. A aplicação de planejamento de experimentos possibilita encontrar uma solução otimizada para um determinado problema com um tempo de desenvolvimento significativamente menor. planejamento de experimentos do tipo fatorial são úteis no início de um determinado desenvolvimento para conhecer os fatores realmente significativos em estudo. Planejamento de experimentos fracionados deve ser utilizado quando o número de fatores a ser analisado é relativamente elevado. Planejamentos de experimentos para determinar as superfícies de resposta possibilitam a análise de fatores com comportamentos lineares e não lineares. Análises descritivas e gráficas devem ser feitas em conjunto para um maior aproveitamento das informações obtidas no experimento.

Brito (2006) estudou a técnica da intensimetria e apresentou os erros associados à medição do nível de potência sonora de máquinas e equipamentos de pequeno porte ligados à construção

civil, a partir do desenvolvimento de novos índices de campo de modo que possam ser eliminados, minimizados ou implementadas correções no resultado final.

Nóbrega e Vivacqua apresentaram em seu trabalho um estudo comparativo de gráficos de probabilidade normal para análise de experimentos não replicados, mostraram que experimentos não replicados são muito úteis na indústria devido à redução de custo e tempo, porém, sem replicação não é possível obter uma estimativa do erro. Como alternativa para avaliação da significância dos efeitos utilizam-se os gráficos de probabilidade.

Galdamez (2002) utilizou as técnicas de planejamento de experimentos para melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos. Para isso utilizou planejamentos fatoriais fracionados e metodologias de superfície de resposta além de análise de variância. Com seu estudo foram identificados os parâmetros de controle do processo que mais ocasionaram problemas de qualidade, assim como conseguiu determinar os melhores valores ou níveis de ajustagem dos fatores para minimizar os problemas.

Machado (2003) apresentou em seu trabalho a análise experimental do ruído no habitáculo de ônibus urbano na cidade de Curitiba e apresentou o levantamento estatístico de uma avaliação de exposição ao ruído por usuários do sistema de transporte coletivo. Demonstrou, também, conceitos de acústicas, tais como definição do som, limites da audição humana e tipos de ruído. Concluiu em seu trabalho que os níveis de ruído no habitáculo dos ônibus estudados, “ligeirinho” e bi-articulado, com motores central ou traseiro, atendem às normas de ruído ocupacional, mas geram um grau de insatisfação em cerca de 62% dos usuários do transporte coletivo, no município de Curitiba. O motor gera no habitáculo um ruído de 38 a 78dB (A), estando o ruído interno, em valores médios, em 76dB (A) o que mostra ser o ruído fonte importante em sua vizinhança, juntamente com outras fontes, incluindo as externas. Assim, tanto aquele interno quanto o externo, o que se denota é que, de maneira geral, juntamente com outras fontes, contribui de forma substancial para a insatisfação e decréscimo da qualidade de vida de toda a comunidade.

Pecula (2010) estudou o ruído de engrenagens (whine noise), do sistema de distribuição de um motor Diesel, assim como a influência do erro de transmissão neste ruído. Utilizou como forma de avaliação dos resultados a qualidade sonora por meio do teste de júri e o método

utilizado foi o diferencial semântico. Em seu trabalho constatou a importância do erro de transmissão para o ruído de engrenamento. Com os testes de júri, conseguiu avaliar a percepção do ouvido humano, sujeito ao ruído de um motor que pode apresentar níveis diferentes de ruído de engrenamento, onde constatou que é perceptível a diferença, no que diz respeito ao incômodo gerado pelo ruído de engrenamento, nas condições em que o teste de júri foi conduzido.

Andrade (2007) estudou a técnica do diferencial semântico para avaliação de fenômenos acústicos no interior de aeronaves. Para tanto utilizou dois estudos distintos: um primeiro estudo da semântica de descritores para som e vibração e um segundo específico de construção da medida para avaliação de sons no interior de aeronaves. O primeiro estudo resultou em uma lista de avaliadores aptos a caracterização de fenômenos acústicos no interior de aeronaves. Já o segundo estudo obteve como produto uma escala de diferencial semântico composto por quatro fatores que após procedimentos estatísticos como o coeficiente de confiabilidade Alfa de Cronbach e a análise de variância multivariada (MANOVA), apresentou parâmetros de validade satisfatórios. A partir do conjunto de análises foi proposto ao final da pesquisa um modelo bi-dimensional da avaliação do evento acústico no interior de aeronaves, a primeira dimensão constituiu-se pelos fatores intercorrelacionados: Avaliação, Adequação e Intensidade, relacionadas a aspectos da natureza afetiva avaliativa do objeto, e a segunda dimensão pelos fatores Estabilidade e Adequação, ligada a aspectos técnicos avaliativos do fenômeno acústico no interior de aeronaves.

Macedo (2007) estudou os efeitos das formulações, temperatura e taxa de queima nas propriedades físico-mecânicas das massas cerâmicas para fabricação de telhas utilizando planejamento de experimentos e concluiu que graças ao planejamento de experimentos foi possível obter uma formulação ótima.

3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

3.1 Motores

3.1.1 Motor Diesel

Motor Diesel é uma máquina térmica. Máquinas térmicas são dispositivos que transformam energia térmica em energia de trabalho (BRUNETE, 1983). A obtenção do trabalho ocorre devido a uma sequência de processos realizados por uma substância chamada fluido ativo.

As máquinas térmicas podem ser classificadas:

a) Quanto a fonte de energia térmica,

- 1) Combustão
- 2) Energia elétrica
- 3) Atômica.

b) Quanto ao comportamento do fluido ativo,

1) Motores de combustão externa – quando a combustão processa-se externamente ao fluido ativo, que é apenas o veículo da energia térmica. Exemplo: máquinas a vapor.

2) Motores de combustão interna – quando o fluido ativo participa diretamente da combustão. Exemplo: Motor Diesel conforme figura 3.1.

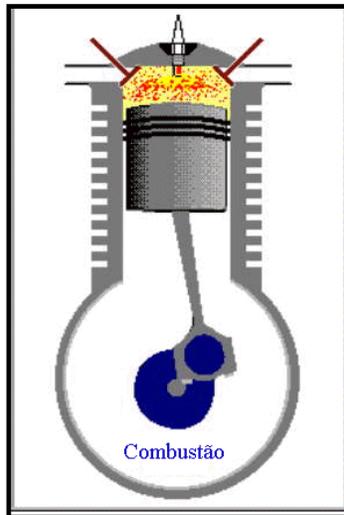


Figura 3.1 - Esquema de combustão do motor de combustão interna

Vê-se que o fluido ativo (mistura ar-combustível), participa diretamente do processo de combustão dentro do cilindro.

c) Quanto a forma de se obter trabalho,

1) Motores alternativos - o trabalho é obtido pelo movimento alternativo de um pistão, transformando em rotação contínua, por um sistema biela/manivela, conforme figura 3.2. Exemplo: motor Diesel.

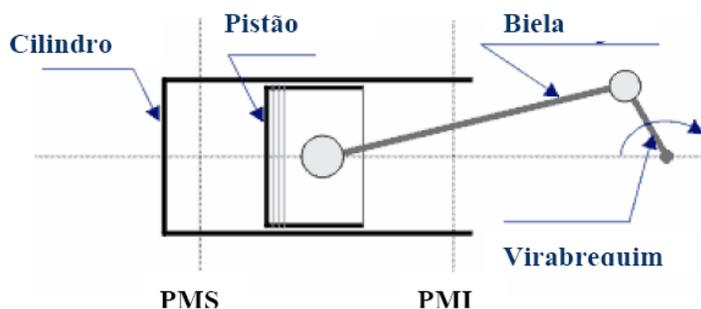


Figura 3.2 - Esquema do sistema biela/manivela dos motores alternativos

2) Motores rotativos – o trabalho é obtido diretamente por um movimento de rotação. Exemplo: turbinas a gás.

3) Motores de impulso – o trabalho é obtido pela força de propulsão gerada por gases expelidos em alta velocidade. Exemplo: Motor a jato de foguetes.

d) Quanto a ignição,

1) Motores de ignição por faísca: nos quais a combustão no fluido ativo inicia-se graças à faísca que salta entre os eletrodos de uma vela. Tal faísca atinge a mistura combustível-ar, previamente dosado (por carburador ou sistema de injeção) e admitido por meio da válvula de admissão.

2) Motores de ignição espontânea -- nos quais o pistão comprime somente ar, até que o mesmo atinja uma temperatura suficientemente elevada para que, ao injetar o combustível, tenha-se início a ignição espontânea.

e) Quanto ao número de tempos do ciclo de operação,

1) Motores quatro tempos: neste tipo de motor o pistão percorre quatro vezes o seu curso para que seja cumprido um ciclo, lembrando que tempo é um curso do pistão, por isso quatro tempos. Os quatros tempos são os seguintes:

Admissão: o pistão se movimenta do ponto morto superior (PMS) ao ponto morto inferior (PMI). Durante quase todo o ciclo de admissão, ar filtrado é induzido para dentro do cilindro.

Compressão: o ar que foi induzido para dentro do cilindro é comprimido durante a movimentação do pistão do PMI para o PMS. No caso dos motores Diesel o ar existente dentro do cilindro é comprimido e aquecido a uma temperatura normalmente acima da temperatura de auto-ignição do combustível que é injetado no cilindro próximo ao PMS.

Expansão: Com a queima do combustível, a energia em forma de calor é liberada aumentando a pressão dentro do cilindro. Esta liberação de energia aumenta a pressão no cilindro que é aplicada à superfície do pistão fazendo com que ele retorne ao PMI, é neste ciclo que a expansão dos gases produz trabalho aplicando pressão à superfície do pistão.

Escape: onde os produtos da combustão são expelidos para o sistema de escape e consequentemente para a atmosfera.

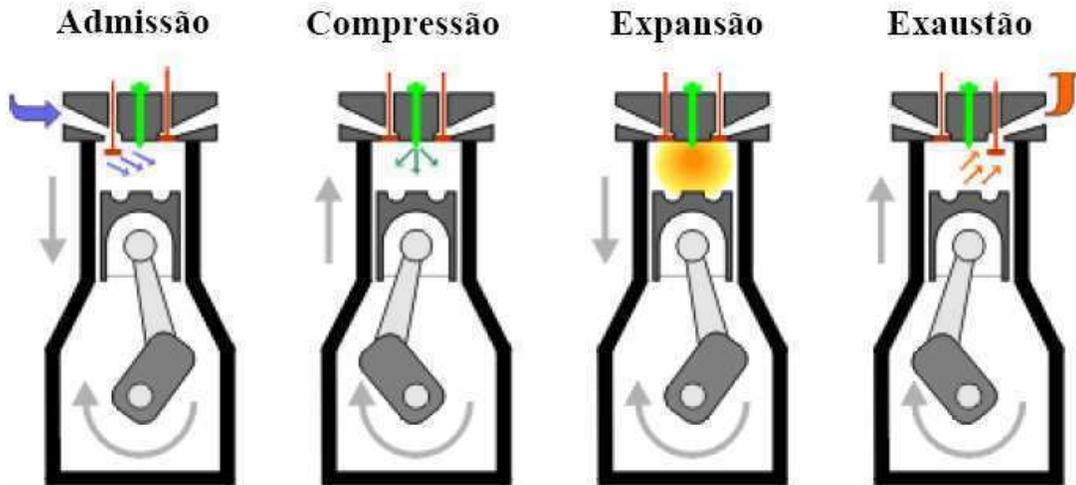


Figura 3.3 - Esquema dos quatro tempos do motor. (LOURENÇO, 2008)

2) Motores dois tempos: neste tipo de motor o pistão percorre duas vezes o seu curso para que seja cumprido um ciclo. Os processos que ocorrem nos motores quatro tempos também ocorrem, porém são sobrepostos.

3.1.2 Sistema de Injeção de combustível

Motores Diesel atingem alto desempenho e excelente consumo de combustível comprimindo o ar existente dentro do cilindro a elevadas pressões e injetando uma pequena quantidade de combustível no ar altamente comprimido. Temperaturas geradas durante a compressão do ar fazem com que esta pequena quantidade de combustível pulverizado evapore. Misturar o combustível pulverizado com o ar quente existente na câmara de combustão, faz com

que o combustível vaporizado atinja sua temperatura de auto-ignição e queime, liberando assim a energia antes armazenada.

O sistema de injeção de combustível é responsável pela injeção de combustível dentro do cilindro do motor para que ocorra a combustão, e todos os parâmetros de injeção são controlados por ele. Existem inúmeros sistemas de injeção de combustível utilizados nos motores de combustão interna, mas para o caso específico do trabalho em questão será estudado o sistema de injeção conhecido como *common rail*, mostrado na figura 3.4.



Figura 3.4 – Sistema de injeção *Common Rail*. (BOSCH, 2004)

Vê-se que o sistema de injeção em questão é composto por bomba de alta pressão (1), *rail* ou acumulador de pressão (2), bicos injetores (3), tubos de alta pressão (4), sensores e atuadores (5), e ECU (6) (unidade de controle eletrônica).

A ECU é responsável por controlar o sistema de injeção, ela recebe os sinais dos sensores e envia para os atuadores e assim todos os parâmetros de injeção são controlados, a bomba de alta

pressão é responsável por gerar vazão suficiente para acumular pressões da ordem de 1800 bar dentro do acumulador de pressão, o acumulador de pressão mantém o combustível sob alta pressão para que ele seja pulverizado dentro do cilindro, os bicos injetores são responsáveis pela injeção do combustível pulverizado dentro da câmara de combustão dando início assim a combustão e os tubos de alta pressão são responsáveis pelo transporte do combustível sob pressão da bomba para o acumulador, e do acumulador para os bicos.

3.1.3 Parâmetros de injeção de combustível

Os principais parâmetros de injeção de combustível de motores Diesel com sistema de injeção *common rail* são os seguintes:

a) ponto de injeção principal é o instante onde se inicia a injeção principal de combustível. Sua unidade é em ângulo, da árvore de manivelas, tendo como referência a posição do pistão no PMS como zero grau no tempo motor, (tempo de compressão).

b) ponto da pré-injeção é o instante onde se inicia a pré-injeção de combustível. É chamada de pré-injeção por se dar antes da injeção principal de combustível. Sua unidade também é em ângulo, da árvore de manivelas, tendo como referência a posição do pistão no PMS como zero grau no tempo motor.

c) ponto da pós-injeção é o instante onde se inicia a pós-injeção de combustível. É chamada de pós-injeção por se dar após a injeção principal de combustível. Sua unidade também é em ângulo, da árvore de manivelas, tendo como referência a posição do pistão no PMS como zero grau no tempo motor.

Tanto para a injeção principal como a pré e pós- injeções, quando os ângulos de injeção são antes do ponto morto superior (APMS) são considerados positivos, e quando são depois do ponto motor superior (DPMS) são considerados negativos.

d) pressão de injeção (pressão de *rail*) é a pressão a qual o combustível está submetido durante sua injeção na câmara de combustão e sua unidade é bar.

e) débito da pré-injeção é a quantidade de combustível utilizada na pré-injeção. Sua unidade é em mg/injeção.

f) débito da pós-injeção é a quantidade de combustível utilizada na pós-injeção. Sua unidade é em mg/injeção.

3.1.4 Ruído em motores

Os veículos automotores operam em uma ampla faixa de velocidades, condições de carga e tipos de estradas. Esta amplitude de utilização e a própria natureza do veículo e seus subsistemas propiciam a existência de esforços dinâmicos periódicos ou não, causadores de ruídos e vibrações (MADUREIRA, 2004).

Os ruídos e vibrações presentes nos veículos apresentam-se em uma enorme gama de frequências de 0 Hz até ao extremo perceptível auditivamente de 20 kHz. Nesta gama de frequências a sensibilidade das pessoas apresenta respostas variadas, designadas por oscilações com frequências baixas, inferiores a 20 Hz, por vibrações em frequências mais altas e por ruídos na faixa de 20 a 20.000 Hz.

Segundo Madureira (2004) pode-se classificar os ruídos e vibrações da seguinte maneira:

as oscilações de 0 a 20 Hz ocorrem principalmente pelos movimentos do veículo e de sua suspensão causados pelos obstáculos e irregularidades do pavimento.

as vibrações entre 10 e 200 Hz originadas no motor e em todos os componentes rotativos dos subsistemas moto-propulsores.

os ruídos na faixa de 20 Hz a 20 kHz originados no motor pelos processos de admissão, combustão e escapamento e pelos esforços dinâmicos periódicos presentes no moto-propulsor. Estes ruídos tanto podem ser propagados pelo ar, como pela estrutura do veículo, eventualmente encontrando componentes que por ressonância recriam ruídos.

Observa-se que o motor é uma das fontes mais importantes de ruído dos veículos atuais e, portanto este item deve receber grande atenção no que diz respeito ao assunto.

O processo gerador de ruídos nos motores pode ser descrito separando-o nas quatro etapas seguintes (DECTONG *et al*, 1982).

1) são produzidas no interior do motor pressões e esforços dinâmicos variáveis e periódicos devidos a combustão, ao mecanismo biela-manivela, ao cabeceamento dos pistões e aos mecanismos de injeção, comando de válvulas e acionamento de acessórios.

2) tais esforços propagam-se por toda a estrutura do motor gerando vibrações localizadas em diversas regiões.

3) as vibrações da estrutura transmitem-se às paredes externas do motor.

4) as superfícies externas do motor ao vibrarem produzem os ruídos que se propagam pelo ar, chegando aos ouvidos das pessoas.

Sendo assim, pode-se dizer que existem basicamente dois tipos principais de ruídos em motores, (PACHECO *et al*, 2002):

- ruído mecânico: é o ruído gerado pelas partes girantes do motor.

- ruído de combustão: é o ruído gerado pela variação brusca da pressão dos gases.

Estes dois tipos de ruídos podem contribuir em proporções distintas em cada rotação e condição de carga do motor como mostra a figura 3.5 (STUCKLSCHWAIGER *et al*, 1999).

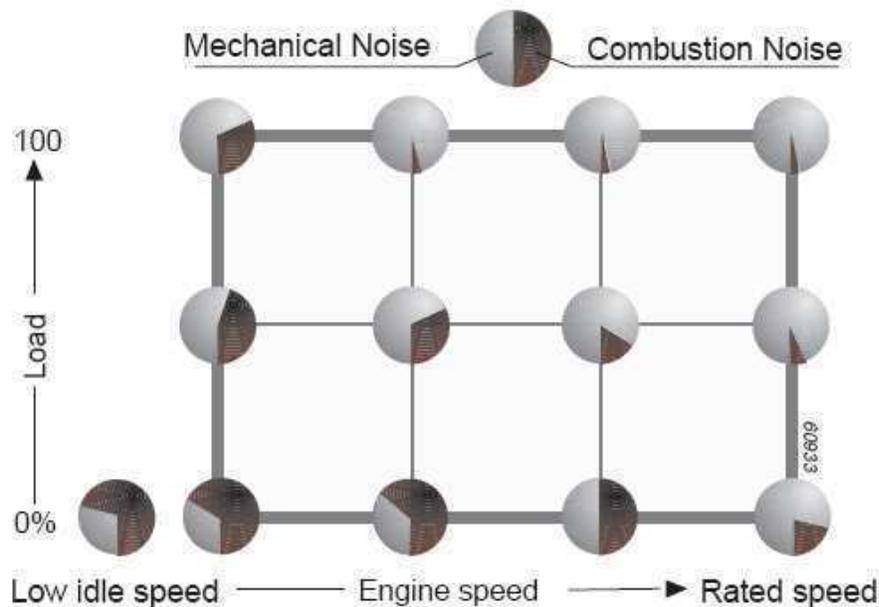


Figura 3.5 - Contribuição dos dois tipos de ruído no ruído total emitido pelo motor Diesel.
(STUCKLSCHWAIGER *et al*, 1999).

Vê-se que o ruído mecânico se faz mais presente em rotações e cargas maiores, onde a influência das partes girantes no ruído total se mostra mais efetiva. Já em condições de rotações menores e cargas menores o ruído de combustão se mostra predominante no ruído total. É importante salientar que existem também os ruídos causados por escoamento de fluídos.

Os motores do ciclo Diesel têm como principal causa de ruído a rápida elevação de pressão que se dá ao término do retardamento da combustão. O combustível que foi acumulado na câmara durante o tempo de injeção, entra em combustão praticamente num único instante, quando as reações químicas que ocorrem em preparação à combustão se completam.

A taxa de elevação de pressão causa impacto nos componentes do mecanismo biela-manivela, especialmente quando as folgas existentes se anulam. Pancadas do pistão contra a parede do cilindro, na passagem pelo PMS, também são causa de ruídos. Os impactos são transmitidos a estrutura do motor, que pelas vibrações resultantes propaga as pressões sonoras ao ambiente. Devido a este processo de geração de ruído torna-se importante o trabalho com os

parâmetros de injeção, visando uma combustão mais suave reduzindo a taxa de crescimento de pressão.

Uma prática comum para redução da taxa de liberação de calor e pressão de combustão é a utilização de uma injeção piloto ou pré-injeção de combustível, pois a taxa de liberação de calor de uma pré-injeção é muito pequena para produção de um considerável gradiente de pressão.

A figura 3.6 mostra como os parâmetros de injeção podem influenciar na curva de combustão.

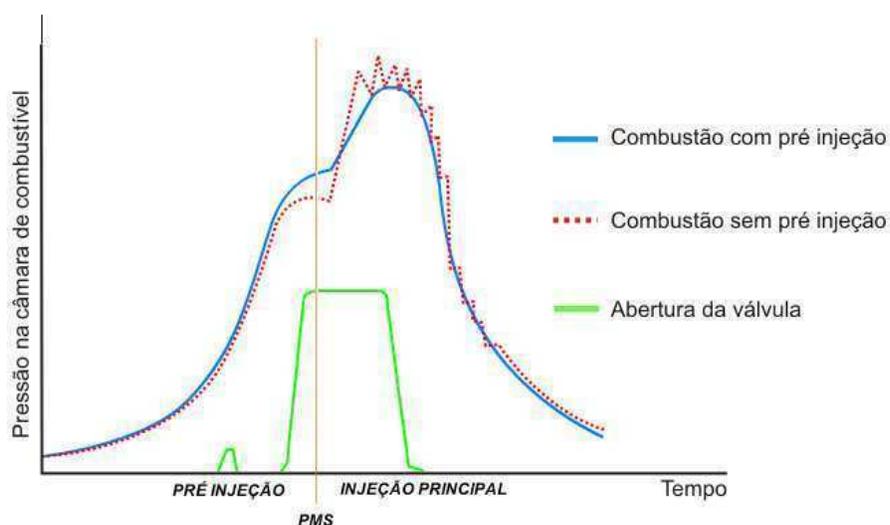


Figura 3.6 – Demonstração da influência dos parâmetros de injeção na curva de pressão de combustão. (MWM, 2002)

Vê-se que a curva azul é mais suavizada que a curva vermelha devido ao fato de existir a pré- injeção de combustível fazendo com que a taxa de elevação de pressão seja reduzida. Pode-se verificar que a curva vermelha logo após o PMS sofre uma elevação brusca de pressão enquanto a curva azul começa a sofrer a elevação de pressão antes do PMS e essa elevação vai ocorrendo gradualmente deixando a curva mais suavizada.

Os ruídos gerados pelo motor podem ser percebidos de duas formas distintas:

Quantitativamente: por meio da medição com microfones pode-se obter um valor expresso geralmente em dB, mas existem também as métricas para qualidade sonora (*loudness*, *sharpness* e etc).

Para se obter resultados quantitativos existem algumas técnicas como:

- pressão sonora
- potência sonora
- intensidade sonora.

Qualitativamente: por meio de um teste de júri atribuindo-se notas a parâmetros subjetivos como, por exemplo, ruído agradável ou desagradável.

3.1.5 Emissão de gases de escape em motores Diesel

A combustão no motor Diesel, além de gerar o ruído como dito acima gera também a emissão de gases. Os principais gases e resíduos da combustão são apresentados a seguir:

Hidrocarbonetos (HC): consistem basicamente de moléculas de combustível decompostas e óleo lubrificante. As principais fontes das moléculas de combustível decompostas, são a mistura ar/combustível e tamanho excessivo de partículas (gotas) de combustível geradas ao final da injeção. Em geral, hidrocarbonetos não queimados são relacionados à região de mistura ar/combustível relativamente pobre, geometria do spray de combustível, quantidade de combustível injetada nas paredes do cilindro e pós-injeção. Obviamente, o projeto do motor e as condições de operação têm também um papel importante na formação e oxidação das moléculas de hidrocarbonetos. (LOURENÇO, 2008).

Monóxido de Carbono (CO): é um produto intermediário da combustão dos hidrocarbonetos. Formado principalmente devido à combustão incompleta que ocorre devido à falta de oxidantes e às baixas temperaturas. Durante a combustão, quando esta se dá de forma completa, ocorre a oxidação de CO em CO₂ por reações entre o CO e vários oxidantes. Se estas

reações são incompletas devido à falta de oxidantes ou devido à baixa temperatura, não ocorre a oxidação do CO, fazendo assim com que o motor emita grandes quantidades deste gás.

A combustão de misturas ar/combustível, ricas, normalmente produzem grandes quantidades de CO, mas como a combustão em motores Diesel é normalmente pobre, e tem ar em abundância, as emissões de CO nos motores Diesel são extremamente baixas.

Óxidos de Nitrogênio (NO_x): nas emissões de gases em motores Diesel, o óxido nítrico (NO) é normalmente o mais abundante óxido de nitrogênio e constitui de 70% a 90% do total de NO_x . O Dióxido de nitrogênio (NO_2) também aparece em níveis significativos.

Para os dois compostos principais das emissões de NO_x , NO formado a partir do processo de combustão e o NO_2 formado a partir do NO. Existem vários mecanismos responsáveis pela formação do NO no processo de combustão, e estes mecanismos são fortemente afetados pela temperatura, pressão, condições da chama e concentrações dos demais componentes na combustão. (LOURENÇO, 2008).

Aumentar a carga em motores Diesel, naturalmente aspirados, implica em um aumento na quantidade de combustível injetada para a mesma quantidade de ar induzida a uma rotação constante. Quanto maior a quantidade de combustível queimado, mais calor é gerado e pode-se observar um aumento significativo de temperatura no cilindro. Maiores temperaturas produzem energia suficiente para que ocorram os mecanismo de reações químicas, causando assim maiores formações de NO_x . (LOURENÇO, 2008).

Aumentando-se a pressão de injeção, tende-se a melhorar a atomização do combustível. A presença de partículas menores devido a uma melhor atomização, melhora a eficiência da combustão, liberando assim maior quantidade de calor e conseqüentemente aumentando a temperatura no cilindro. Em geral, altas temperaturas levam a maiores formações de NO.

Material Particulado (MP): Definido como qualquer partícula presente no sistema de escape de um motor de combustão interna que pode ser retida em um filtro, com temperaturas iguais ou inferiores a 52°C . Assim o material particulado não é uma espécie fisicamente bem definida.

Em geral, o material particulado é obtido a partir de substâncias orgânicas e inorgânicas induzidas ao motor junto ao ar e ao combustível. Os principais constituintes do material

particulado são as partículas de carbono resultantes dos processos de combustão heterogêneos nos motores Diesel. Poeira, presente no ar ambiente ou material inorgânico presente nos combustíveis ou nos aditivos podem aparecer como forma de material particulado no sistema de escape. Também, metais provenientes de desgaste dos componentes do motor podem ser levados pelo óleo lubrificante e eventualmente migrarem para o sistema de escape onde podem ser retidos no filtro de material particulado. (LOURENÇO, 2008).

A presença de enxofre no combustível e óleo lubrificante contribui para a formação das partículas de sulfato que por sua característica de reter umidade, podem dobrar a sua massa, aumentando assim a quantidade do material particulado retido no filtro.

Finalmente, hidrocarbonetos evaporados e seus derivados são também incluídos nas emissões de material particulado. Esta fração, também chamada de fração orgânica solúvel, é composta basicamente de derivados de óleo lubrificante presentes nos hidrocarbonetos.

O óleo lubrificante presente na câmara de combustão proveniente de desgaste excessivo na parede do cilindro e desgaste de anéis de pistão podem ser a fonte principal de consumo de óleo lubrificante nos motores Diesel, além da sua enorme contribuição para a presença de óleo lubrificante não queimado na fração de material particulado, constituindo também a fração orgânica solúvel.

Fumaça: a presença de fumaça no sistema de escape dos motores Diesel são um indicativo de uma combustão pobre, resultante de uma relação ar/combustível extremamente baixa ou combustível parcialmente evaporado, durante condições de partida a frio. A emissão de fumaça, especialmente quando na forma de fumaça preta é um dos principais vilões dos motores Diesel, dando a eles a reputação de serem motores extremamente sujos. (LOURENÇO, 2008).

A fumaça pode estar em forma de partículas, tanto sólidas como líquidas suspensas nos gases presentes no sistema de escape dos motores Diesel, obstruindo e refletindo a luz, bem como limitando sua visibilidade. A fumaça pode ser classificada como:

Branca: consistindo em uma mistura de combustível e partículas de óleo lubrificante não queimadas. Este tipo de fumaça é geralmente chamado de fumaça líquida.

Preta: consistindo em partículas sólidas de carbono resultado de uma combustão completa do combustível. Este tipo de fumaça é geralmente chamado de fumaça sólida ou fumaça quente.

Em casos onde existe um consumo excessivo de óleo lubrificante, a fumaça emitida apresenta uma coloração azul ou cinza. A presença deste tipo de fumaça é um indicativo de que o motor precisará ser submetido à manutenção. Porém, combustível não queimado pode também apresentar coloração azulada se o tamanho da partícula de combustível ultrapassar 0,5 micrometros. Por outro lado, a presença de fumaça branca é principalmente resultado de baixas temperaturas na câmara de combustão durante o período de injeção de combustível. Este fenômeno é facilmente observado durante partidas a frio ou em altas altitudes. Esta fumaça branca tende a desaparecer quando o motor finalmente aquece. Além disso, a fumaça branca pode também ser resultado de injeções muito atrasadas ou provenientes de uma falha de projeto, onde o motor apresenta taxa de compressão muito baixa. As causas principais de fumaça preta excessiva são a falta de manutenção dos filtros de ar e dos injetores. Estas partículas apresentam tamanho na ordem de 0,02 a 0,12 micrometros. (LOURENÇO, 2008).

3.2 Parâmetros para avaliação acústica

3.2.1 Geração do som

O fato de que corpos em vibração produzam sons é familiar na experiência cotidiana. Para que o efeito atinja nossos ouvidos, ele precisa ser transmitido por um meio material, ou seja, em uma atmosfera que não haja meio material, não há propagação do som. (GERGES, 2005).

O som se propaga por um meio material sem que haja transporte de matéria de um ponto a outro, e isto já é uma indicação de sua natureza ondulatória. Devido à reflexão do som, um eco é manifestado. Pode-se inferir que a transmissão do som através da atmosfera corresponde à propagação de ondas.

Vibrações de superfície de sólidos produzem perturbações no ar e desta forma o som é gerado. Em geral, qualquer processo que provoca flutuações no ar pode gerar ondas sonoras. Em todos os casos a fonte sonora pode ser representada por uma superfície vibrante. (GERGES, 2005).

Uma onda sonora é um distúrbio mecânico em um gás, líquido ou sólido, que viaja a partir de uma fonte com uma velocidade definida. Pode-se utilizar um alto-falante vibrando para frente e para trás no ar a uma frequência f para demonstrar o comportamento do som. As vibrações causam aumentos e diminuições locais na pressão, em relação à pressão de repouso conforme figura 3.7. Estes aumentos de pressão, chamados compressões e diminuições chamadas de rarefações, se propagam como uma onda longitudinal, isto é, uma onda na qual ocorre a variação de pressão na mesma direção que a onda viaja. As compressões e rarefações podem também ser descritas pelas variações de densidade e pelos deslocamentos das partículas relativamente às suas posições de equilíbrio. (GERGES, 2005).

Na prática a geração do ruído é causada pela variação da pressão ou da velocidade das moléculas do meio. O som é uma forma de energia que é transmitida pela colisão das moléculas do meio, umas contra as outras, sucessivamente.

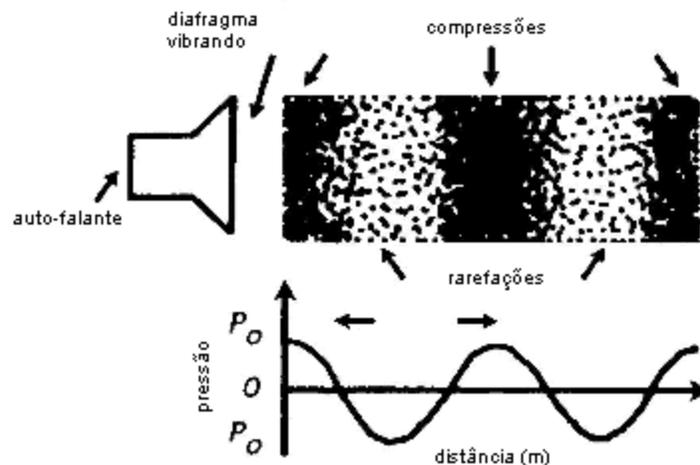


Figura 3.7 - Representação esquemática de uma onda sonora de um alto falante

A taxa de ocorrência da flutuação completa de pressão é conhecida como frequência. Esta é dada em ciclos por segundo, ou ainda Hertz (Hz). O ouvido humano é capaz de ouvir na faixa de frequência de 20 Hz a 20000 Hz, porém é importante considerar que o ouvido humano não é igualmente sensível ao longo de toda esta faixa de frequência. (GERGES, 2005).

Devido a este fato existem curvas de correções, que no caso do ouvido humano a mais utilizada na indústria automobilística é conhecida como curva “A”, conforme figura 3.8.

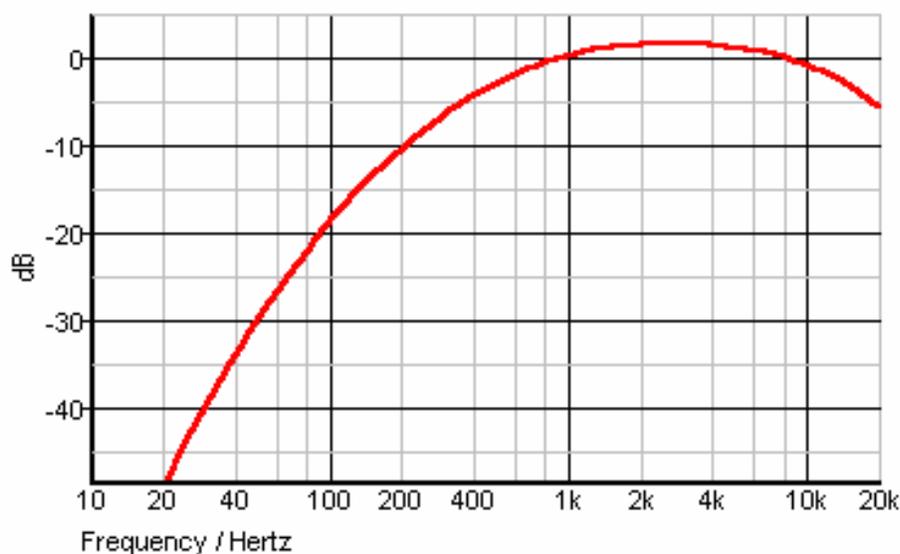


Figura 3.8 - Curva de atenuação A.

Vê-se que na faixa de frequência entre 1kHz e 6kHz o ouvido humano percebe de forma amplificada os ruídos, já abaixo de 1kHz e acima de 6kHz acontece o contrário, os ruídos são percebidos de forma atenuada.

Infrasom são ondas mecânicas que se situam em uma faixa de frequência entre 0,5Hz a 2,0Hz de frequência, inaudíveis, e seu meio usual é o líquido, muito utilizado no levantamento de prognósticos médicos.

Ultra-som são ondas mecânicas que situadas em uma faixa de frequência acima de 20kHz não são perceptíveis a sensibilidade do ouvido humano, são utilizados para comunicação e

sinalização. Tem como método de excitação a voz humana e a dos animais, apitos e instrumentos musicais.

Hiper-som são ondas mecânicas que situadas em uma faixa de frequência de um meio elástico, superior a 1.000 MHz, não são perceptíveis a sensibilidade do ouvido humano. São utilizados para comunicação e sinalização.

A amplitude de pressão acústica $P(t)$ se refere a magnitude da flutuação de pressão total $P_t(t)$ em comparação com a pressão atmosférica estática P_A (≈ 1000 milibar em CNTP), como mostra a figura 3.9. (GERGES, 2005).

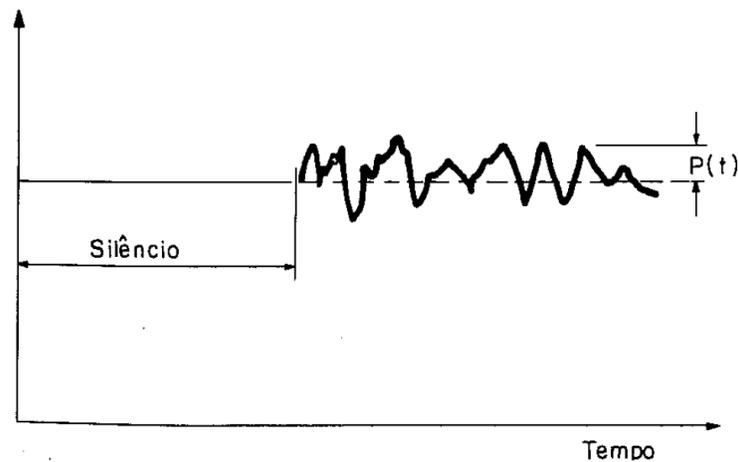


Figura 3.9 - Representação esquemática da Pressão Acústica. (GERGES, 2005)

Vê-se que na região do gráfico onde não existe variação de pressão não há ruído, ou seja, é uma região de silêncio.

Uma pequena variação de pressão acústica pode produzir um ruído desconfortável ($\approx 10^{-1}$ milibar), por outro lado o ouvido pode detectar uma pressão de 2×10^{-7} milibar, na faixa de frequência entre 1000 Hz e 4000 Hz, que é a faixa mais sensível. (GERGES, 2005).

A figura 3.10 mostra os limites de audição e algumas variáveis de sons em suas respectivas bandas de frequência.

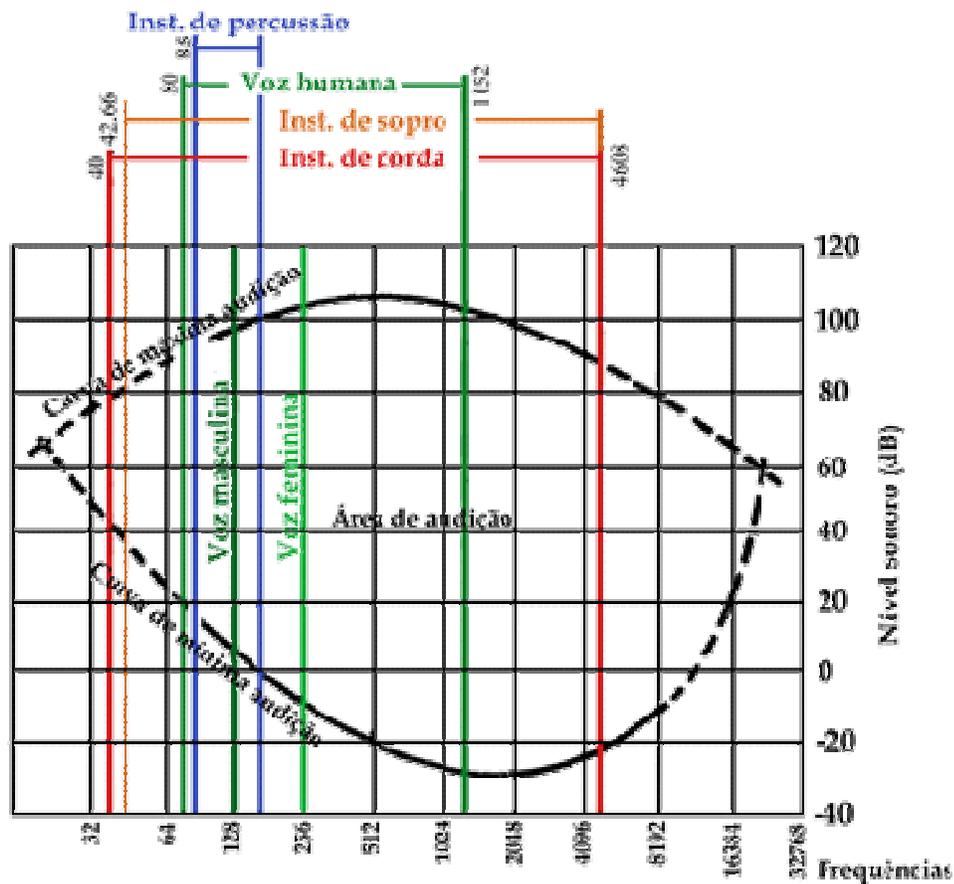


Figura 3.10 - Limites da audição humana.

3.2.2 Atributos do som

O ouvido humano distingue os sons de acordo com três atributos: altura, intensidade e timbre. Além desses três atributos, é importante, por vezes, levar-se em conta a duração do som. Entende-se por duração de um som o intervalo de tempo durante o qual esse som é audível para o ser humano. Timbre, intensidade e altura podem ser explicados por meio das grandezas físicas que caracterizam as ondas sonoras.

A altura do som depende tão somente da frequência, por exemplo, encurtando-se uma lâmina elástica presa na borda de uma mesa, aumenta-se a frequência de suas vibrações e,

consequentemente, constata-se que o som emitido se torna mais agudo. A altura é a qualidade que permite classificar os sons em agudos e graves. Está relacionada com a sequência das vibrações sonoras, isto é, com a frequência do som, o que caracteriza se um som é agudo ou grave.

Pelo timbre, também designado por qualidade de som, estabelecem-se diferenças entre sons da mesma altura e que possuem a mesma intensidade, mas que são percebidos como diferentes. O timbre se relaciona diretamente com a composição harmônica da onda sonora, isto é, sua forma, e permite identificar a procedência do som; seja ele emitido por uma pessoa ou por um instrumento musical. É o que distingue uma nota musical executada num violino, de uma mesma nota executada por outro instrumento, como saxofone ou piano, por exemplo. Isso também pode ser verificado em sons tocados em instrumentos iguais, mas de fabricação e qualidade diferentes.

A intensidade diz respeito à amplitude da onda sonora, a qual caracteriza a variação de pressão do meio em que se verifica a sua propagação. É chamado *loudness* a avaliação subjetiva que o indivíduo faz de um determinado som, de acordo com a sua intensidade. Constitui, portanto, um dos aspectos psicológicos ou atributos do som. O termo *pitch*, assim como o *loudness*, também constitui um aspecto psicológico do som. Sua avaliação é pessoal, não sendo definida por instrumento de medição, e sim, pelo ouvido humano. É uma das dimensões que permite distinguir e classificar as sensações auditivas, conforme suas frequências. Às frequências maiores, atribui-se um *pitch* alto e para as frequências menores, um *pitch* baixo.

3.2.3 Propagação do som

Teoricamente o som se propaga em ondas esféricas a partir de uma fonte pontual, a menos que haja presença de obstáculos na trajetória de propagação ou em campo aberto com ventos ou gradientes de temperatura causando a não uniformidade do meio. Para que um obstáculo altere a propagação do som ele deve ter sua dimensão comparável com o comprimento de uma onda de som. Portanto, para impedir a passagem do som uma barreira deve ter dimensões de três a cinco vezes o comprimento de onda envolvido. (GERGES, 2005).

3.2.4 O decibel (dB)

O ouvido humano é capaz de perceber uma grande faixa de frequência, e por isso verificou-se a dificuldade de se expressar todos esses valores numa escala linear, então utiliza-se a escala logarítmica.

O decibel (dB) é uma medida da razão entre duas quantidades, sendo usado para uma grande variedade de medições em acústica, física e eletrônica. O decibel é muito usado na medida da intensidade de sons. É uma unidade de medida adimensional, semelhante à percentagem. A definição do dB é obtida com o uso do logaritmo. (GERGES, 2005).

Uma intensidade sonora I pode ser expressa em decibel através da equação:

$$I_{dB} = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

onde I é a intensidade acústica e I_0 é a intensidade de referência,

Outro aspecto importante da escala dB é que ela apresenta uma correlação com a audibilidade humana, melhor que a escala linear (N/m^2). Um dB é a menor variação que o ouvido humano pode perceber e um acréscimo de 3 dB corresponde dobrar a intensidade. (GERGES, 2005).

3.2.5 NI, NPS e NPW

Dentre os parâmetros acústicos que podem ser utilizados no estudo da propagação do ruído ambiental destacam-se o nível de pressão sonora, o nível de potência sonora e o nível de intensidade sonora. (GERGES, 2005).

O nível de pressão sonora de um equipamento é obtido através de um medidor de pressão sonora, mas é altamente influenciável por fatores como a reflexão, difração, absorção e difusão

sonora, produzidos por paredes e objetos em um campo fechado e pela distância entre a fonte de ruído e o medidor em um campo aberto. (GERGES, 2005).

Pode-se concluir então que o nível de pressão sonora é uma característica de uma fonte em uma dada condição meteorológica e de contorno, não podendo ser extrapolado para uma outra condição.

O nível de pressão sonora é dado por:

$$NPS = 10 \log \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \log \frac{P}{P_0}, \quad (2)$$

onde $P_0 = \sqrt{\rho * c * I_0} = 0,00002 N / m^2$ é o valor de referência e corresponde ao limiar da audição em 1000 Hz, ρ é a densidade do ar e c é a velocidade do som no ar.

O nível de intensidade sonora de uma fonte geradora de ruído é definido como sendo a razão do fluxo normal da energia acústica através de uma unidade de área. A determinação do nível de intensidade sonora como grandeza vetorial pode ser obtida através do produto da pressão sonora pela velocidade instantânea de uma partícula em uma dada direção e sentido.

O nível de intensidade acústica NI é dado por:

$$NI = 10 \log \frac{I}{I_0}, \quad (3)$$

onde I é a intensidade acústica em $Watt/m^2$ e I_0 é a intensidade de referência = $10^{-12} Watt/m^2$, que corresponde a intensidade de um tom de 1000 Hz, levemente audível pelo ouvido humano normal.

O nível de potência sonora é uma característica intrínseca da fonte, não sendo influenciado pelas características dos campos abertos e fechados, válido em qualquer situação. O conhecimento do nível de potência sonora de um equipamento é uma ferramenta muito valiosa na caracterização de uma fonte de ruído.

O nível de potência sonora NWS é dado por:

$$NWS = 10 \log\left(\frac{W}{10^{-12}}\right), \quad (4)$$

onde W é a potência sonora (Watt) e 10^{-12} é a potência de referência.

3.2.6 Ruído e legislação

Hoje em dia o principal requisito legal para veículos no que diz respeito a ruído é o ruído de passagem (*Pass By Noise*), que consiste na medição do nível máximo de pressão sonora emitida pelo veículo em aceleração sob condições determinadas conforme NBR 15145 e com limites conforme resolução do CONAMA 272. Não existem requisitos legais para emissão de ruído apenas para o motor de combustão interna.

Existem algumas normas orientativas para efeito de comparação entre produtos tais como:

- Ruído de ponta de escape (NBR 9714)
- Ruído interno de veículos (NBR 9079)
- Potência sonora por meio de pressão sonora (ISO 3744)
- Potência sonora por meio de intensidade sonora (ISO 9614)

Porém existem também alguns limites contratuais que devem ser obedecidos no desenvolvimento dos produtos, estes limites contratuais nada mais são que exigências dos clientes. Estas exigências podem ser de forma quantitativa (com limites a serem obtidos) ou qualitativa (qualidade sonora).

3.3 Planejamento de experimentos

O planejamento de experimentos tem como principal função melhorar a qualidade dos produtos e ou processos, avaliando um maior número de variáveis e ainda assim reduzindo o número de testes e otimizando o uso de recursos, (GALDAMEZ, 2003). Um experimento nada mais é do que certo número de fatores F , atuando sobre o sistema em estudo e produzindo as respostas R , conforme figura 3.11(BARROS NETO et. al. 2007).

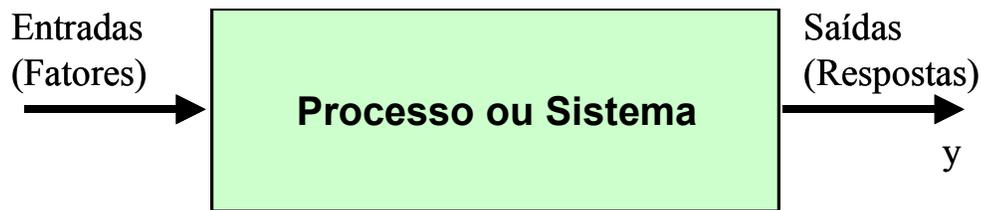


Figura 3.11 - Representação esquemática de um experimento.

Em um experimento os fatores ou variáveis de entrada atuam sobre o sistema produzindo mudanças nos valores das respostas seguindo uma função matemática desconhecida, e o objetivo de um planejamento de experimentos é descobrir essa função, (BARROS NETO et. al. 2007). Pode-se então dizer que um experimento é um teste ou uma série de testes, nos quais alterações propositalmente são feitas nos fatores do processo ou sistema e pode-se observar e identificar as consequências destas alterações nas variáveis respostas, (LOURENÇO, 2008).

Ao iniciar-se um planejamento de experimentos precisam-se definir primeiramente quais são os fatores e as respostas de interesse, (BARROS NETO et. al. 2007).

Fatores: que são as variáveis que sofrem alterações em um experimento, ou seja, sofrem mudanças de forma controlada com o objetivo de observar seu impacto sobre a variável resposta. Um fator pode ser qualitativo ou quantitativo. Durante o planejamento de um determinado experimento, alguns métodos podem ser utilizados para identificar os fatores. Entre eles podem-

se destacar os mais importantes: mapeamento do processo, teorias científicas, conhecimentos da engenharia, experiência da equipe, *brainstorming* e diagrama de causa e efeito *Ishikawa*.

Variável resposta: uma variável observada ou medida em um determinado experimento, ou seja, o resultado do experimento. Um experimento pode ter uma ou mais variáveis respostas, devendo ela ser efetiva para quantificar os resultados desejados.

O próximo passo é definir qual o objetivo do experimento para escolher o melhor planejamento. Objetivos diferentes precisam de planejamentos diferentes.

Após conhecidos estas etapas precisa-se também definir alguns conceitos básicos:

Níveis: os fatores sofrem variações em seus valores e esses valores são chamadas de níveis. O nível pode ser associado a pontos em uma escala numérica para um fator quantitativo ou uma opção específica de um fator qualitativo incluído no experimento. Durante a seleção dos níveis, alguns erros podem ser cometidos como a seleção de níveis muito próximos ou muito distantes entre si.

Variável ruído: durante o experimento, algumas variáveis podem não ser totalmente controladas pelo pesquisador, a essas variáveis são dadas o nome de variável ruído. As variáveis ruído podem afetar uma variável resposta em um determinado experimento, mas ainda assim elas não são de interesse como fator. Os efeitos das variáveis ruído podem ser minimizados. Basicamente são duas as formas de minimizá-los, mantendo-os constantes ou medindo-os, levando-se em conta seus efeitos durante a análise das variáveis respostas.

Quando o problema a ser analisado envolve dados sujeitos a erros experimentais causados por variáveis ruído, os métodos estatísticos são a única maneira de realizar as análises quantitativas. Contudo, existem dois aspectos aplicados a qualquer problema experimental: o planejamento de experimentos e a análise estatística dos dados.

3.3.1 Planejamento Fatorial

Nos experimentos fatoriais, todas as combinações possíveis entre os níveis dos fatores são investigadas. Neste caso o experimento recebe o nome de fatorial completo (*full factorial*). Por exemplo, se existem níveis a de um fator A e níveis b de um fator B, cada réplica contém todas as combinações ab. Quando os fatores seguem um arranjo segundo uma estratégia de experimento fatorial, normalmente são denominados de arranjos cruzados. (BARROS NETO et. al. 2007).

A Tabela 3.1 mostra um experimento simples, ou seja, um experimento fatorial com dois fatores, com dois níveis para cada fator. Chamam-se estes níveis de baixo e alto e são indicados por -1 e +1, respectivamente.

Tabela 3.1 - Experimento fatorial com dois níveis e dois fatores

<i>Ensaio</i>	<i>Fator A</i>	<i>Fator B</i>
1	1	1
2	-1	1
3	1	-1
4	-1	-1

3.3.1.1 Cálculo dos Efeitos

O efeito de um fator é definido como sendo uma alteração em uma determinada variável resposta, produzida por uma alteração no nível deste fator. Isso é chamado de efeito principal (*main effect*), porque se refere aos fatores principais em um determinado experimento. Considerando o exemplo da tabela 3.2, o efeito principal para o fator A pode ser calculado como sendo a média dos resultados do fator A, no nível +1, menos a média dos resultados do fator A no nível -1.

Tabela 3.2 - Experimento 2^2 com os respectivos resultados

<i>Ensaio</i>	<i>Fator A</i>	<i>Fator B</i>	<i>Resposta</i>
1	-1	-1	50
2	1	-1	30
3	-1	1	80
4	1	1	60

Numericamente temos:

$$A = \frac{60+30}{2} - \frac{80+50}{2} = -20 \quad (5)$$

Isto indica que na média o valor da variável resposta sofre uma redução de 20 unidades, quando o fator A muda do seu nível mais baixo, -1, para o nível mais alto, +1.

Em alguns experimentos pode-se descobrir que as diferenças nas variáveis respostas entre os níveis de um fator não são as mesmas para todos os níveis de um outro fator. Quando isto ocorre, pode-se dizer que existe interação entre os fatores. Por exemplo, considerando o experimento fatorial com dois fatores, mostrado na Tabela 3.3, no nível baixo do fator B (B-), o efeito de A, seria:

$$A = 50 - 20 = 30 \quad (6)$$

E no nível “alto” do fator B (B+), o efeito de A seria:

$$A = 12 - 40 = -28 \quad (7)$$

Tabela 3.3 - Experimento 2^2 com interação entre os efeitos

<i>Ensaio</i>	<i>Fator A</i>	<i>Fator B</i>	<i>Interação AB</i>	<i>Resposta</i>
1	-1	-1	+	20
2	1	-1	-	50
3	-1	1	-	40
4	1	1	+	12

Como o efeito de A depende do nível escolhido do fator B, pode-se observar que existe interação entre A e B. A magnitude do efeito da interação é a diferença média entre esses dois efeitos, ou seja:

$$AB = \frac{(-28 - 30)}{2} = -29 \quad (8)$$

Outra forma de verificar-se o efeito da interação entre as variáveis é verificar o sinal da interação multiplicando-se os sinais das linhas do planejamento, conforme tabela 3.3. E o cálculo dos efeitos ocorre da mesma forma que para os efeitos principais, sendo a média dos resultados com sinal positivo (+) menos a média dos resultados com sinal negativo (-), ou seja:

$$AB = \frac{12 + 20}{2} - \frac{40 + 50}{2} = -29 \quad (09)$$

Estes conceitos podem ser ilustrados graficamente. A figura 3.12 mostra os dados das variáveis respostas do experimento, mostrado anteriormente na tabela 3.2, o fator A para os dois níveis do fator B. Observe que as linhas A- e A+ são paralelas, indicando ausência de interação entre os fatores A e B. Similarmente, a figura 3.13 mostra os dados das variáveis respostas do planejamento de experimentos mostrado anteriormente na tabela 3.3, mas neste caso, as linhas A- e A+ não são paralelas, indicando interação entre os fatores A e B. (BARROS NETO *et. al.* 2007).

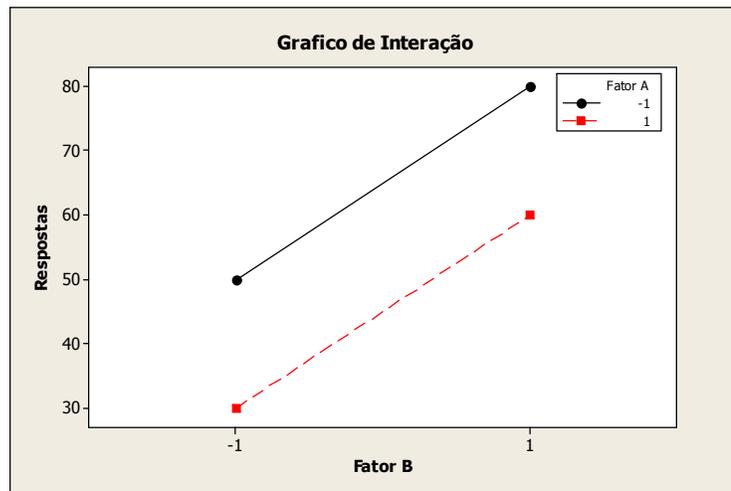


Figura 3.12 – Gráfico de um Experimento fatorial sem interação entre os fatores

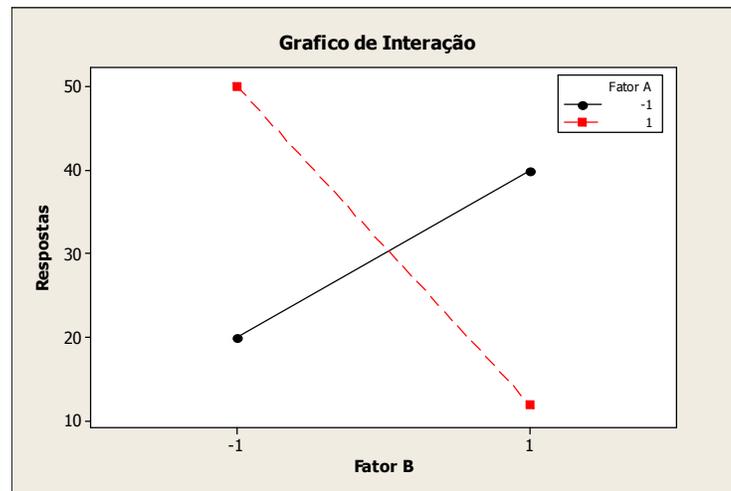


Figura 3.13 – Gráfico de um Experimento fatorial com interação entre os fatores

Existe outra maneira de ilustrar o conceito de interação utilizando uma representação via modelo de regressão, onde para os dois fatores mencionados nos gráficos ter-se-ia:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + \varepsilon , \tag{10}$$

onde y é a variável resposta, os b_s são os parâmetros cujos valores serão determinados, x_1 é a variável que representa o fator A, x_2 é a variável que representa o fator B, e ε é o termo que representa o erro aleatório. As variáveis x_1 e x_2 são definidas em uma escala codificada de -1 a +1 (equivalente aos níveis baixo e alto dos fatores A e B), e x_1x_2 representa a interação entre x_1 e x_2 .

Para o experimento ilustrado na Tabela 3.3, tem-se os efeitos principais de A e B como sendo $A = 1$ e $B = -9$. As estimativas de b_1 e b_2 são a metade do valor dos efeitos principais correspondentes, ou seja, $b_1 = 1/2 = 0.5$ e $b_2 = -9/2 = -4.5$. O efeito da interação -29:

Então, o valor do coeficiente da interação no modelo de regressão é $b_{12} = -14.5$. O parâmetro b_0 é estimado pela média das quatro respostas, ou seja:

$$b_0 = \frac{12 + 40 + 50 + 20}{4} = 30.5 \quad (11)$$

Portanto, o modelo de regressão é:

$$y = 30.5 + 0.5x_1 - 4.5x_2 - 14.5x_1x_2 \quad (12)$$

3.3.1.2 Cálculo da significância dos efeitos quando os experimentos possuem réplicas

Quando os ensaios realizados possuem réplicas é possível se estimar o erro experimental e, a partir daí, avaliar significância estatística dos efeitos, (BARROS NETO et. al. 2007). A tabela 3.4 apresenta um experimento fatorial 2^3 com uma réplica, para que seja mostrado o cálculo da significância dos efeitos.

Tabela 3.4 - Resultados de um planejamento fatorial 2^3 para estudar a significância dos efeitos

<i>Ensaio</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>Resposta</i>	<i>Réplica</i>	<i>Média</i>
1	-1	-1	-1	56	52	54
2	1	-1	-1	85	88	86,5
3	-1	1	-1	49	47	48
4	1	1	-1	64	62	63
5	-1	-1	1	65	61	63
6	1	-1	1	92	95	93,5
7	-1	1	1	57	60	58,5
8	1	1	1	70	74	72

A partir da matriz do planejamento pode-se formar a tabela de coeficientes de contraste, multiplicando-se os sinais das colunas apropriadas para obter as colunas correspondentes as interações, conforme tabela 3.5, (BARROS NETO *et. al.* 2007).

Tabela 3.5 – Coeficiente de contraste de um planejamento fatorial 2^3 para estudar a significância dos efeitos das interações

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>	<i>Resposta</i>	<i>Réplica</i>	<i>Média</i>
-	-	-	+	+	+	-	56	52	54
+	-	-	-	-	+	+	85	88	86,5
-	+	-	-	+	-	+	49	47	48
+	+	-	+	-	-	-	64	62	63
-	-	+	+	-	-	+	65	61	63
+	-	+	-	+	-	-	92	95	93,5
-	+	+	-	-	+	-	57	60	58,5
+	+	+	+	+	+	+	70	74	72

Para cálculos dos efeitos utiliza-se o procedimento apresentado no item 3.3.1.1 deste trabalho, utilizando-se os valores médios dos resultados. A tabela 3.6 mostra o valor dos efeitos para este planejamento.

Tabela 3.6 – Valores dos efeitos para cálculo da significância dos efeitos

<i>Fator</i>	<i>Efeito</i>
A	22,88
B	-13,88
C	8,88
AB	-8,63
AC	-0,88
BC	0,88
ABC	-0,13

Após o cálculo dos efeitos inicia-se o cálculo da estimativa do erro, em primeiro lugar calcula-se a estimativa conjunta da variância de uma observação individual:

$$\hat{V}(y) = s^2 = \sum d_i^2 / 2N, \quad (13)$$

onde d_i é a diferença entre duas observações correspondentes ao i -ésimo ensaio e N é o número de ensaios com sinais positivos ou número de ensaios com sinais negativos.

Desta forma tem-se:

$$s^2 = \frac{(56 - 52)^2 + (85 - 88)^2 + (49 - 47)^2 + (64 - 62)^2 + (65 - 61)^2 + (92 - 95)^2 + (57 - 60)^2 + (70 - 74)^2}{2 * 8}$$

$$s^2 = 5,2$$

Tirando a raiz quadrada deste valor tem-se o erro experimental, (BARROS NETO et.al.2007).

$$s = 2.28$$

Com base nestes dados pode-se obter a variância de cada efeito conforme a equação:

$$V(\text{efeito}) = V(\bar{y}_+ - \bar{y}_-) = V(\bar{y}_+) + V(\bar{y}_-) = \frac{s^2}{N} + \frac{s^2}{N}, \quad (14)$$

onde $V(\bar{y}_+)$ é a estimativa de variância das respostas com sinal positivo, e $V(\bar{y}_-)$ é a estimativa de variância das respostas com sinal negativo.

Portanto tem-se:

$$V(\text{efeito}) = \frac{s^2}{8} + \frac{s^2}{8} = \frac{s^2}{4} = \frac{5,2}{4} = 1,30$$

O erro padrão do efeito é obtido extraindo-se a raiz quadrada do $V(\text{efeito})$ e, portanto é:

Erro padrão do efeito (EPef)= 1,14

Agora é necessário calcular o intervalo de confiança para os valores dos efeitos:

$$IC = Ef \pm t_{\text{ensaios}}(EPef) \quad (15)$$

onde IC é o intervalo de confiança, Ef é o valor do efeito, t_{ensaios} é o valor da distribuição t Student (ANEXO A) para um nível de 95% de confiança e número de graus de liberdade igual ao número de ensaios, e EPef é o erro padrão dos efeitos.

Tem-se então:

$$IC = Ef \pm 2,306 * (1,14) = Ef \pm 2,63 \quad (16)$$

De posse de todos estes valores pode-se verificar a significância estatística dos efeitos. Na prática deve-se considerar estatisticamente significativos os efeitos cujas estimativas forem superiores em valor absoluto ao produto do erro padrão pelo ponto da distribuição de Student, (BARROS NETO *et. al.* 2007).

Neste exemplo pode-se observar que os efeitos com significância estatística são os efeitos dos fatores A, B, C e a interação AB.

3.3.1.3 Verificação da significância dos efeitos quando os experimentos não possuem réplicas

Nestes casos o pesquisador pode realizar as análises por meio de gráficos normais, que são uma técnica alternativa para distinguir, nos resultados de um planejamento, os valores que correspondem realmente aos efeitos daqueles valores que ocorrem devido apenas ao erro experimental, (BARROS NETO *et. al.* 2007). Para a construção destes gráficos, a probabilidade de uma distribuição normal é projetada no eixo das ordenadas e os valores dos efeitos são projetados nas abscissas. Os efeitos com valores devido ao erro experimental ficam posicionados próximos a uma reta centrada em zero. A identificação dos efeitos significativos se faz de forma a observar quais são os efeitos que estão mais distantes da linha de referência. Para melhor ilustrar estes conceitos será apresentado exemplo de gráfico de probabilidade construído com os valores dos efeitos de um fatorial completo 2^4 conforme tabela 3.7.

Tabela 3.7- Valores de efeitos para estudo dos gráficos de probabilidade acumulada

<i>Fator</i>	<i>Efeito</i>
A	22.87
B	-14.12
C	8.87
D	0.87
AB	-8.62
AD	0.87
BD	0.87
AC	-0.62
BC	-0.62
CD	0.37
ABC	0.87
ACD	-0.62
ABD	-0.12
BCD	0.37
ABCD	0.37

De posse dos valores dos efeitos, o primeiro passo para construção do gráfico de probabilidade acumulada é ordenar os efeitos de forma crescente e associá-los a um valor de probabilidade acumulada, conforme tabela 3.8.

Tabela 3.8- Correspondência entre os valores dos efeitos e os valores de probabilidade cumulativa.

<i>Ordem</i>	<i>Efeito</i>	<i>Região de probabilidade cumulativa</i>	<i>Ponto Central</i>	<i>Z</i>
1	-14,125	0 - 6,67	3,33	-1,838
2	-8,625	6,67 - 13,33	10	-1,282
3	-0,625	13,33 - 20,00	16,67	-0,9673
4	-0,625	20,00 - 26,67	23,33	-0,728
5	-0,625	26,67 - 33,33	16,67	-0,5244
6	-0,125	33,33 - 40,00	23,33	-0,3406
7	0,375	40,00 - 46,67	30	-0,168
8	0,375	46,67 - 53,33	36,67	0
9	0,375	53,33 - 60,00	43,33	0,168
10	0,875	60,00 - 66,67	50	0,3406
11	0,875	66,67 - 73,33	56,67	0,5244
12	0,875	73,33 - 80,00	63,33	0,728
13	0,875	80,00 - 86,67	70	0,9673
14	8,875	86,67 - 93,33	76,67	1,282
15	22,875	93,33 - 100	96,67	1,838

Segundo Barros Neto *et al* (2007), a maneira mais cômoda para traçar o gráfico é a utilização de um dos programas computacionais disponíveis, mas caso isto não seja possível, pode-se usar uma escala linear comum, colocando no eixo das abscissas os valores dos efeitos, e nos eixos das ordenadas os valores *Z* da distribuição normal padronizada das probabilidades cumulativas (na última coluna da tabela) .

A figura 3.14 mostra o gráfico de probabilidade traçado com os valores dos efeitos e os valores *Z* da distribuição normal padronizada.

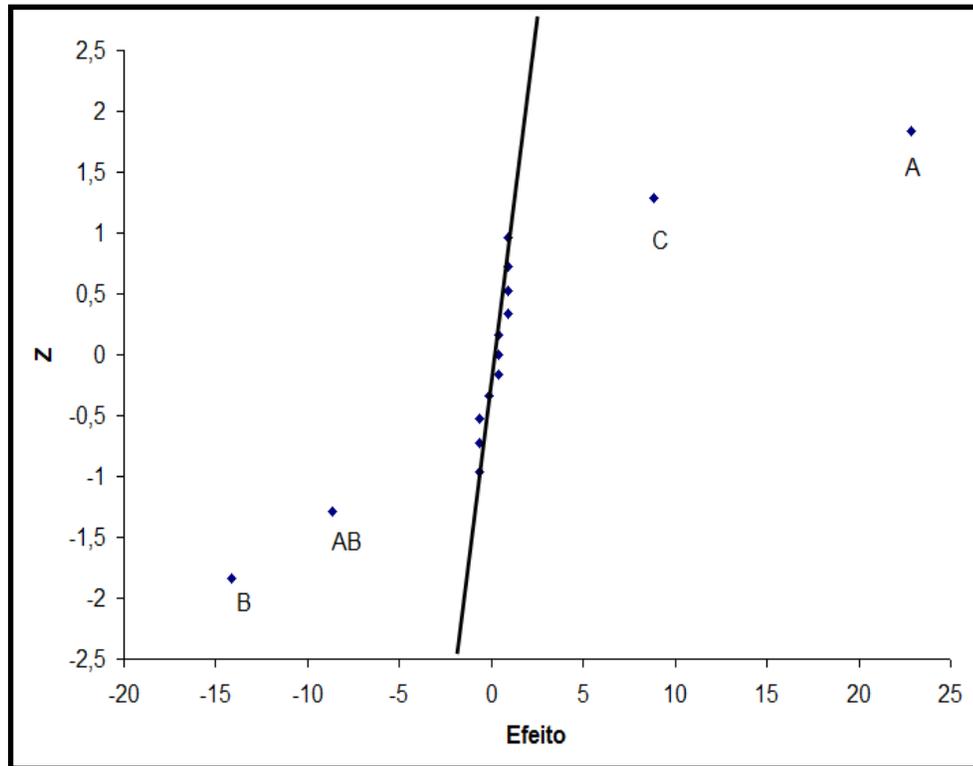


Figura 3.14 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos

Vê-se que os efeitos A, B, C e AB encontram-se mais distanciados da reta, indicando que os mesmos têm significâncias estatísticas nas variáveis respostas, já os demais fatores estão próximos da reta e representam apenas erro experimental.

3.3.2 Planejamento Fatorial 2^k

Geralmente, se existirem k fatores, cada um deles com dois níveis, o experimento fatorial terá 2^k combinações. Planejamentos fatoriais do tipo 2^k são extremamente úteis no início de um determinado desenvolvimento. Quando se deseja investigar diversos fatores e o pesquisador não possui experiência suficiente para afirmar se todos estes fatores são ou não relevantes para o experimento em questão; o fatorial 2^k fornece o menor número de combinações onde o efeito de cada fator e todas as possíveis interações podem ser avaliadas. (BARROS NETO *et. al.* 2007).

Este tipo de experimento possibilita ao pesquisador estudar fatores qualitativos e quantitativos. Por apresentar somente dois níveis para cada fator, admite-se que as variáveis respostas apresentam comportamento linear.

3.3.3 Planejamento Fatorial Fracionado 2^{k-p}

Quando o número de fatores k aumenta, o número de testes também aumenta significativamente, tornando o experimento inviável devido ao tempo e custos envolvidos. Neste caso pode-se realizar o planejamento fatorial fracionado para se obter a informação desejada com um número reduzido de ensaios. Segundo Barros Neto *et.al.* (2007), isso é possível por dois motivos:

a) o número de interações de ordem alta aumenta dramaticamente com o número de fatores. Na maioria dos casos, essas interações têm valores pequenos e são destituídas de qualquer importância prática. Se em um determinado experimento, interações deste tipo podem ser desprezadas, informações sobre os efeitos principais e interações de ordens baixas, como primeira e segunda ordens, podem ser obtidas por meio de um experimento que englobe apenas uma fração do experimento completo. Experimentos fatoriais fracionados estão entre os mais utilizados.

b) quando o número de fatores aumenta, crescem as chances de que um ou mais deles não afete significativamente a resposta.

Experimentos fatoriais fracionados são muito úteis quando uma grande quantidade de fatores está sendo estudada e deseja-se identificar quais deles realmente têm efeitos significativos e permitem a obtenção da informação desejada em menor tempo e investimento reduzido. (BARROS NETO *et. al.* 2007).

3.3.4 Superfície de resposta

Segundo Myers *et. al.* (1995), a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) é normalmente utilizada para refinar modelos obtidos por meio do planejamento de experimentos fatoriais, especialmente se durante o processo de desenvolvimento do experimento o pesquisador suspeitou que a resposta tem comportamento não linear.

A diferença entre uma equação que segue um modelo quadrático do planejamento de superfície de resposta e a que segue um modelo linear de um planejamento fatorial é a adição de termos quadráticos que permitem ao pesquisador modelar também superfícies que apresentam curvatura, (LOURENÇO, 2008).

3.3.5 Planejamentos Box-Behnken e Box-Wilson ou composto central

Existem vários tipos de planejamento de Superfície de Resposta entre eles os mais comumente usados são:

- Planejamento *Box-Behnken*
- Planejamento *Box-Wilson* ou Composto Central

Para um mesmo número de fatores, planejamentos *Box-Behnken*, apresentam um número um pouco menor de combinações quando comparados aos planejamentos *Box-Wilson*, o que os torna um pouco mais econômicos e rápidos. Este tipo de experimento também é muito útil quando se conhece os limites do domínio experimental. Por exemplo, em um determinado motor quando se define os limites de pressão de combustão e temperatura de escape de um determinado motor e não se deseja ultrapassá-los. Neste tipo de planejamento, nunca irão existir combinações com todos os fatores em seus níveis alto, + ou baixo - evitando pontos extremos no domínio experimental.

Planejamentos do tipo *Box-Wilson* ou Composto Central, têm a vantagem de poderem ser executados em blocos sequenciais. Primeiro pode-se executar um planejamento fatorial para

investigação do modelo linear e em seguida pode-se realizar os pontos axiais que somados aos pontos do fatorial podem ser usados para determinar um modelo quadrático.

Os planejamentos *Box-Wilson* ou Composto Central podem ser divididos em três tipos:

Circunscrito (CCC): Planejamentos do tipo circunscritos representam a forma original dos planejamentos do tipo Composto Central, onde os pontos axiais estão a uma distância α do centro do cubo em função do número de fatores e características do planejamento. Os pontos axiais estabelecem novos limites para os níveis $-$ e $+$, para todos os fatores do experimento. Este tipo de planejamento tem 5 níveis. A tabela 3.9 exemplifica um planejamento do tipo circunscrito com $\alpha=1,41$ onde os cinco níveis são $+1,-1,+1,41,-1,41$ e 0 (ponto central).

Tabela 3.9 - Exemplo de planejamento do tipo circunscrito.

Ordem Padrão	X1	X2
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	-1,41	0
6	1,41	0
7	0	-1,41
8	0	1,41
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0

Inscrito (CCI): planejamentos do tipo inscritos devem ser utilizados quando os limites estabelecidos no início do experimento devem ser realmente respeitados. Ou seja, planejamentos inscritos nada mais são do que planejamentos circunscritos em escala reduzida, onde os fatores do planejamento circunscritos são divididos por α . Este tipo de planejamento também tem 5 níveis. A tabela 3.10 exemplifica um planejamento do tipo circunscrito com $\alpha=0,7$ onde os cinco níveis são $+1,-1,+0,7,-0,7$ e 0 (ponto central).

Tabela 3.10 - Exemplo de planejamento do tipo inscrito.

Ordem Padrão	X1	X2
1	-0,7	-0,7
2	0,7	-0,7
3	-0,7	0,7
4	0,7	0,7
5	-1	0
6	1	0
7	0	-1
8	0	1
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0

Face Centrada (CCF): nos planejamentos do tipo face centrada os pontos axiais estão posicionados exatamente no centro de cada face do cubo e neste caso $\alpha = \pm 1$. Este tipo de experimento pode ser aplicável a experimentos cujos fatores possuem 3 níveis. A tabela 3.11 exemplifica um planejamento do tipo face centrada onde os níveis são +1, -1 e 0 (ponto central)

Tabela 3.11 - Planejamento do tipo face centrada

Ordem Padrão	X1	X2
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	-1	0
6	1	0
7	0	-1
8	0	1
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0

3.4 Potencia Sonora por meio de Intensidade Sonora

Segundo Brito (2006), o nível de potência sonora é uma característica intrínseca da fonte, não sendo influenciado pelas características dos campos abertos e fechados, válido em qualquer situação, sendo assim muito importante ser conhecido. Existem duas principais técnicas de obtenção desta grandeza:

- Potência sonora por meio de pressão sonora
- Potência sonora por meio de intensidade sonora.

Para se obter a potência sonora por meio de pressão sonora são necessárias câmaras especiais (anecóicas, semi-anecóicas e reverberantes), conforme figura 3.15, devido ao fato da pressão sonora se tratar de uma grandeza altamente influenciável por fatores como reflexão, difração, absorção e difusão sonora, produzidos por paredes e objetos em um campo fechado e pela distância entre a fonte de ruído e o medidor em um campo aberto. A necessidade de salas especiais dificulta sua utilização.

Por este motivo, grandes pesquisadores ao longo dos anos desenvolveram a técnica da intensimetria, na qual se pode obter o nível de potência sonora, por meio da intensidade sonora sem a necessidade de câmaras especiais.

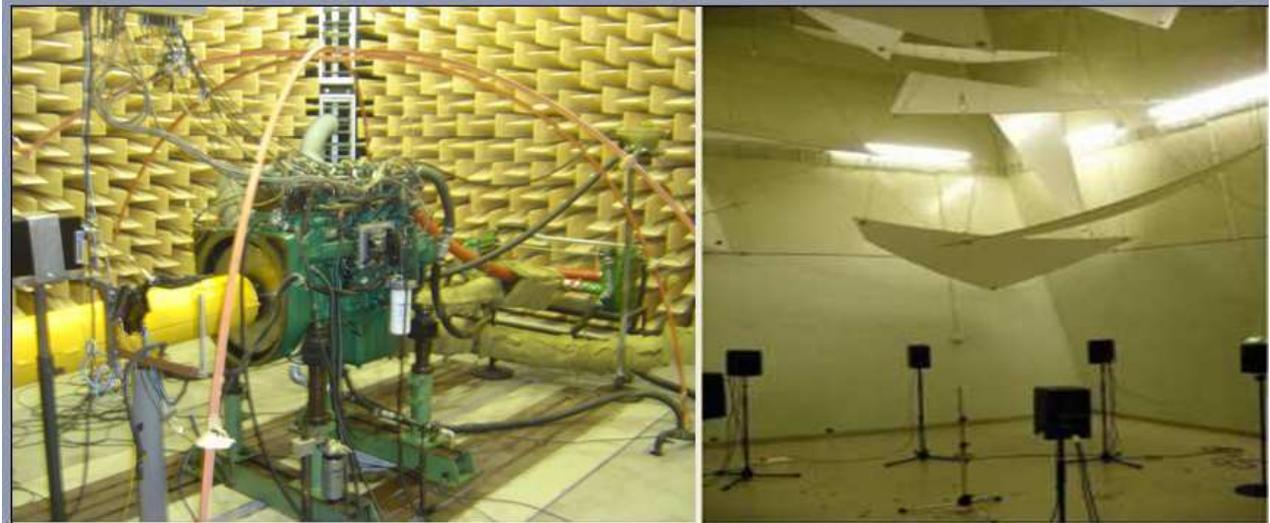


Figura 3.15 - Câmeras semi-aneecóica e reverberante.

Vê-se que as câmaras semi- anecóicas, a esquerda, possuem em suas paredes cones de material especial para absorver as ondas sonoras e eliminar a reflexão, permitindo assim o uso de pressão sonora para obtenção de potência sonora. Já a direita, observa-se que as câmaras reverberantes, que são compostas de paredes altamente reflexivas e não paralelas e têm por objetivo a criação de um campo acústico difuso, ou seja, a energia sonora deve ser distribuída uniformemente no volume da câmara. Ainda segundo Brito (2006), a determinação do nível de intensidade sonora, como grandeza vetorial, pode ser obtida por meio do produto da pressão sonora pela velocidade instantânea de uma partícula, em uma dada direção e sentido.

Pode-se obter de uma maneira relativamente simples a pressão sonora de uma fonte, sendo que o mesmo não ocorre com a velocidade instantânea da partícula. Para se obter a velocidade instantânea da partícula usa-se a equação do movimento de fluidos não viscosos. Olson (1932), mostrou por meio desta equação que o produto da densidade do fluido pela variação da velocidade da partícula em um espaço de tempo, é igual ao gradiente da pressão sonora, em uma dada distância conhecida. O gradiente do nível de pressão sonora pôde ser obtido por meio do uso de dois microfones separados por uma distância pré-estabelecida, conforme figura 3.16 e, conhecendo a densidade do fluido, determina-se à variação da velocidade da partícula e conseqüentemente o nível de intensidade sonora. Estando estes microfones posicionados de

maneira perpendicular ao fluxo de energia sonora, obtêm-se o valor máximo do nível de intensidade sonora. Esta técnica de obtenção do nível de intensidade sonora de uma fonte é conhecida por intensimetria.

A capacidade da intensimetria de mensurar as características vetoriais da intensidade sonora permite determinar o valor máximo do vetor intensidade, quando os microfones estiverem na posição perpendicular ao mesmo. Fazendo a integração do vetor intensidade sonora pela área da superfície de um volume pré-definido, que envolva a fonte de ruído, pode-se obter o nível de potência sonora da fonte analisada. O sistema de medição, em teoria, não é influenciado por ondas sonoras refletidas ou irradiadas por outras fontes, que são externas ao volume que define a superfície de medição. Estas ondas, por estarem em uma fase diferente das ondas irradiadas diretamente pela fonte sonora analisada, não são captadas pela sonda. Esta característica possibilita a obtenção do nível de potência sonora de fontes de ruído durante seu funcionamento normal, em seu local de trabalho, sem necessidade de salas especiais.

Existem hoje em dia duas normas que são utilizadas: a ISO 9614-1 (1993), que realiza a medição com pontos discretos, e a ISO 9614-2 (1995), que realiza a medição por método de varredura.

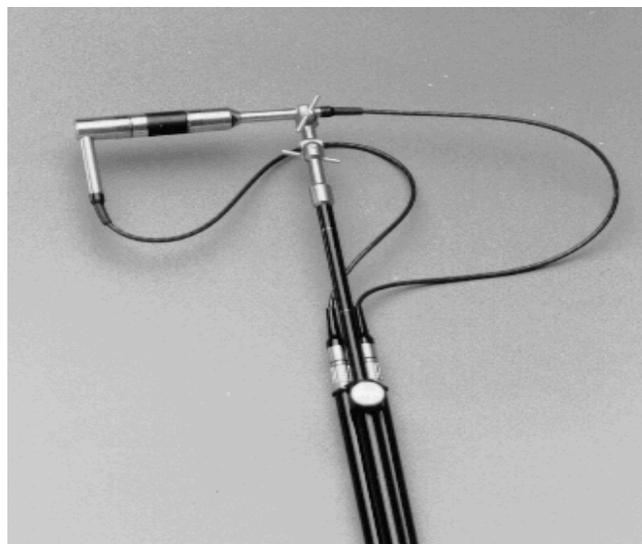


Figura 3.16 - Sonda para medição de intensidade sonora com dois microfones

3.5 Qualidade Sonora

Segundo Gerges (2005), pode-se definir qualidade sonora como o sujeito que avalia, interage com o produto por meio da percepção humana. Em outras palavras como o sujeito percebe e responde sensorialmente quando exposto a um som.

Nem sempre uma redução no nível de potência sonora é percebido pelo consumidor como uma melhora na qualidade sonora.

Algumas vezes alguns tipos de ruído estão diretamente ligados aos seus produtos e agradam os consumidores que não desejam redução ou qualquer outra mudança no ruído emitido por estes. Dois exemplos clássicos são as motos e os carros esportivos (Ferrari). Seus ruídos emitidos são altos, mas seus consumidores adoram, tornando-se um diferencial no produto, Gerges (2005).

Desta maneira fica a critério do engenheiro optar entre tornar um produto tão silencioso quanto possível, (e torcer para que os consumidores realmente queiram um produto mais silencioso) ou, então, explorar as características sonoras e utilizá-las como um diferencial. Embasar o engenheiro para a tomada de decisão é um dos papéis da psicoacústica.

Existem algumas técnicas para o estudo da qualidade sonora, entre elas o teste de júri que tem como objetivo principal resultados que representem a opinião dos consumidores. Para este tipo de ensaio tem-se que realizar alguns preparativos, como a seguir:

Gravação Binaural – A gravação e reprodução binaural constitui a base tecnológica da análise da qualidade sonora, permitindo uma gravação autêntica de situações sonoras e permitindo uma reprodução destas situações quando desejável. Assim o conceito de gravação e reprodução binaural levou a criação da 1ª cabeça artificial, em 1973, e por sua vez, posteriormente, aos torsos padronizados vendidos comercialmente hoje em dia.

Sala de teste – A sala deve possuir baixo nível de ruído para que não interfira no julgamento dos sujeitos de teste. Durante as avaliações é desejável que os sujeitos de teste estejam livres de influência de outros sujeitos. A decoração da sala deve ser o mais natural possível, cadeiras e fones de ouvidos confortáveis. Pintura de cor neutra e iluminação moderada com temperatura entre 20 e 24°C.

Sujeito de teste – A escolha do sujeito deve basear-se em sua familiaridade com o produto e na sua experiência em ensaios. Como regra geral, o sujeito de teste deve representar com alguma fidelidade o consumidor final. O número de sujeitos está diretamente relacionado à representatividade dos resultados. A utilização de 20 a 50 sujeitos de teste é considerada apropriada para ensaios realizados com funcionários, enquanto são necessários de 75 a 100 sujeitos de teste no caso de consumidores potenciais.

Uma etapa de treinamento precede ao teste, sendo que o objetivo é permitir aos sujeitos de teste a naturalização aos procedimentos e sons utilizados na validação e também ao ambiente de teste.

Preparação da amostra – Gravações ou edições mal feitas na amostra do som podem arruinar o ensaio, então se recomenda uma gravação com faixa dinâmica maior que 90dB. A gravação deve ser feita durante a utilização do produto e em ambientes com baixo nível de ruído de fundo.

Preparação do ensaio – A duração do ensaio é um fator importante, visto que a fadiga do júri tende a aumentar com esta. Então, o ideal é que o ensaio não seja superior a 40 minutos. A reprodução do som por auto-falantes pode ser realizada, porém fatores como posição dos alto falantes e a resposta em frequência da sala podem afetar a percepção do júri. Tais fatores são minimizados em uma condição de campo livre ou com a utilização de fones de ouvidos.

Para a utilização de fones de ouvido, é necessária cautela na apresentação de imagens aos sujeitos de teste. Para resultados mais autênticos os sons devem ser reproduzidos no local em que foram gravados ou em ambientes de simulação ou *mock-ups*, que se aproximem o máximo possível do ambiente real. Qualquer alteração feita com o objetivo de incrementar o contexto visual no qual o som é reproduzido é considerada como melhoria. Quando a reprodução do som no ambiente real, simuladores ou *mock-ups* for inviável, estímulos visuais como, por exemplo, vídeos ou figuras podem controlar a expectativa dos júris, mantendo o foco destes no produto sob teste.

Para este tipo de ensaio existem alguns métodos de avaliação como a seguir:

Ordenamento ou posto de ordem – É solicitado aos sujeitos de teste que ordenem os sons de acordo com algum critério de avaliação.

Vantagens – método de maior simplicidade, com análises rápidas.

Desvantagens – podemos concluir qual é mais ou menos incômodo, porém como não há informações quantitativas sobre os sons, não é possível quantificar diferenças entre eles.

Escalas de resposta – é atribuída, pelo sujeito de teste, uma nota a cada som.

Vantagens – método rápido e simples, fornecendo uma informação quantitativa da diferença entre os sons.

Desvantagens – dificuldade na padronização das escalas de resposta do júri.

Comparações pareadas – os sons são apresentados aos pares, solicitando que o julgamento seja baseado no par apresentado.

Vantagens – útil para determinação de limiar.

Desvantagens – como o número de pares cresce com o quadrado do número de sons o método torna-se mais demorado e oneroso.

Diferencial semântico – a avaliação é realizada por meio de uma escala contendo de cinco a nove pontos e possuindo um par de adjetivos bipolares (antônimos). O sujeito escolhe um dos pontos da escala de acordo com a que melhor representa sua impressão.

Vantagens – diferentemente das comparações pareadas que se foca em um único atributo dos sons, no diferencial semântico essa avaliação pode ser realizada com vários atributos de uma só vez.

Desvantagens – número de pares por ensaio limitado.

Estimativa de magnitude – o júri atribui um número a algum atributo do som.

Vantagens – como não existe limite todos os números estarão dentro da escala.

Desvantagens – sem padronização das respostas dos sujeitos, e estes sendo inexperientes, torna-se um método de difícil execução, necessitando treino e prática.

4 METODOLOGIA

4.1 Definição dos Fatores

Antes do início de qualquer atividade experimental foi necessário um estudo prévio para definição dos fatores e seus níveis que seriam estudados nas análises experimentais.

Para tanto, é importante lembrar que nenhum método sofisticado de matemática ou estatística pode substituir:

- a) o conhecimento sobre a natureza do problema a ser investigado.
- b) o bom senso, nem sempre senso comum.

Para definição dos fatores foi realizado estudo preliminar com pessoal responsável por calibração de motores na empresa em questão, e como o intuito deste trabalho é estudar os efeitos dos parâmetros de injeção no ruído em marcha lenta do motor, foi aconselhado que fossem utilizados os seguintes fatores:

- A = Pressão de *rail*;
- B = Ponto de injeção principal;
- C = Ponto da pré-injeção 1;
- D = Débito da pré-injeção 1;
- E = Ponto da pré-injeção 2;
- F = Débito da pré-injeção 2;
- G = Ponto da pós- injeção;
- H = Débito da pós- injeção

4.2 Definição dos Níveis dos Fatores

Para definição dos níveis foi utilizado o conhecimento do departamento de calibração de motores da MWM International, que são mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Níveis definidos para os fatores que irão ser utilizados no experimento de triagem.

Fator	Nível (+)	Nível (-)
Pressão de rail (bar)	1000	500
Ponto de Injeção Principal (grau)	10	0
Ponto da Pré-Injeção (grau)	15	10
Debito da Pré-Injeção 1 (mg/inj)	1,5	0,5
Ponto da Pré-Injeção 2 (grau)	15	10
Debito da Pré-Injeção 2 (mg/inj)	1,5	0,5
Ponto da Pós-Injeção (grau)	15	10
Debito da Pós-Injeção (mg/inj)	1,5	0,5

É importante salientar que a distância entre os níveis escolhidos não pode ser muito grande, para que modelos simples possam descrever o comportamento, e nem muito pequenos, para não ser mascarado por erros experimentais.

4.3 Variável Resposta

Seria inviável trabalhar com a pressão sonora, devido ao ambiente de medição: sala de teste com baixa capacidade de absorção sonora, e vários motores funcionando nas salas ao lado, causando grande variação da pressão sonora. Uma alternativa seria utilizar a técnica de potência sonora por meio de intensidade sonora, porém esta técnica aumenta muito o tempo de execução de cada experimento do planejamento. Sendo assim optou-se pela medição indireta do ruído emitido pelo motor.

Considerando que em marcha lenta a maior contribuição do ruído não é o mecânico e sim o de combustão, utilizou-se este ruído como uma das variáveis respostas, (STUCKLSCHWAIGER *et. al.* .1999).

Como a aceleração na saia do bloco de um motor Diesel está relacionada com a emissão de ruídos, (VRETOS *et. al.* 2007), utilizou-se como outra variável resposta a aceleração na saia do bloco.

4.3.1 Ruído de combustão por meio da pressão de combustão

Um modo de analisar a pressão de combustão é por meio do seu espectro, ou seja, analisar no domínio da frequência. Para tanto, pode-se utilizar desde um analisador de espectros usual, comumente usado em vibrações e ruídos ou um equipamento dedicado a pesquisa de combustão como, por exemplo, o *Indiset AVL*, modelo 620. Neste estudo utilizou-se o equipamento citado por conta da facilidade de observação dos resultados.

O processo de análise do ruído de combustão do *Indiset AVL 620* é exemplificado na figura 4.1.

Combustion Noise Process Analysis

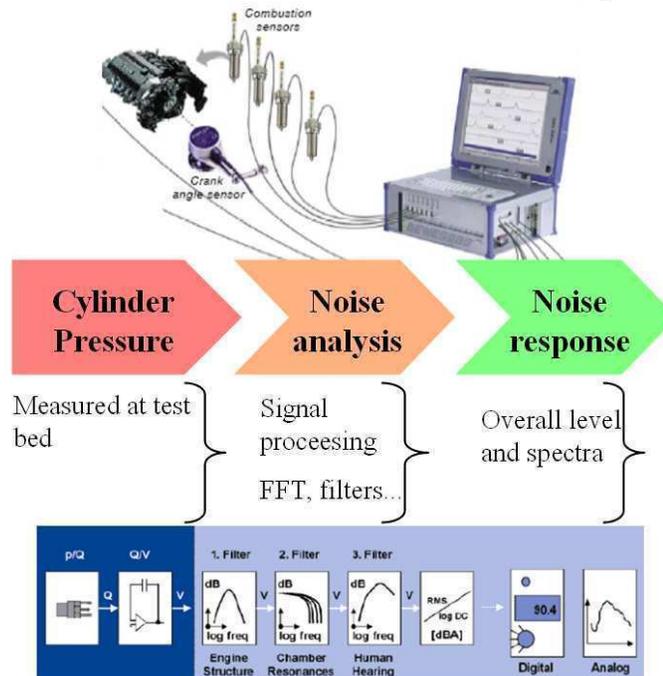


Figura 4.1 – Processo de análise do ruído de combustão do Indiset.(AVL, 1998)

Vê-se que a análise do ruído de combustão é realizada conforme o seguinte processo:

- o sinal de carga do sensor de pressão de combustão, em pico *Coulomb*, é amplificado, ou seja, é transformado num nível de tensão, em Volts, proporcional ao nível da pressão;
- então é amostrado com uma taxa de 10 kHz e transformado do domínio do tempo para a frequência, através da FFT;
- posteriormente é filtrado, primeiramente por um filtro de atenuação estrutural, que tem por objetivo simular a atenuação que a estrutura, no caso o bloco do motor, causa no sinal da pressão;
- o segundo filtro é um filtro passa baixa que visa minimizar as ressonâncias da pressão na câmara onde o sensor esta posicionado;
- o terceiro filtro é o da escala A, que tem por objetivo simular a atenuação do ouvido humano;

f) assim temos duas saídas possíveis, uma digital e outra analógica. Ou seja, um valor que representa o ruído de combustão global e outra que representa seu espectro.

4.3.2 Aceleração na saia do bloco

Esta técnica consiste na medição de aceleração na saia do bloco conforme figura 4.2.

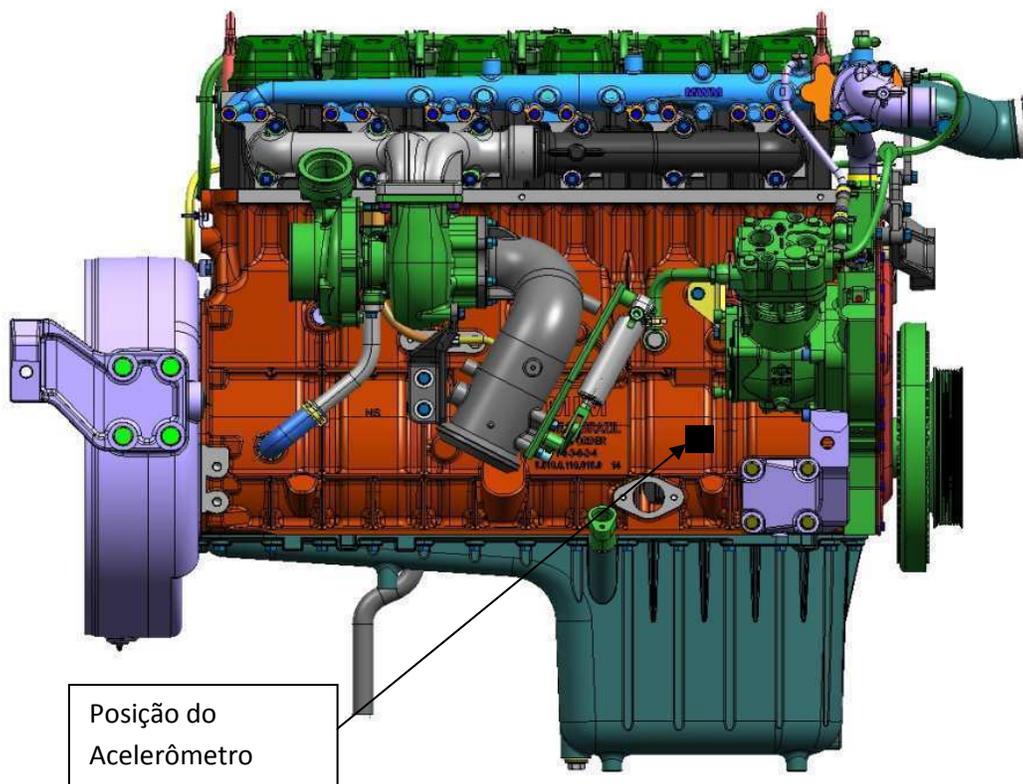


Figura 4.2 - Localização do acelerômetro colado na saia do bloco para medição da vibração.

Vê-se que o acelerômetro foi posicionado em uma região específica da saia do bloco, região esta que devido aos esforços decorrentes da combustão sofre pequenas movimentações.

Por meio da aceleração no bloco é possível se estimar o nível emitido de ruído, devido ao fato de que a pressão de combustão causa um impacto na cabeça do pistão. Tal impacto é transmitido para a biela, que logo em seguida transfere este esforço para o virabrequim.

O virabrequim por sua vez está ligado ao bloco por meio de seus mancais que ao receber os esforços gerados pela combustão transfere para suas paredes em forma de vibração. A vibração nas paredes do bloco provoca movimentação das partículas de ar e por consequência ruído. Assim, se for possível reduzir o impacto na cabeça do pistão, será possível então reduzir a vibração na saia do bloco e como consequência reduzir o ruído emitido pelo motor.

4.4 Descrição do Ensaio

Para realização dos primeiros ensaios experimentais foi necessária a utilização do motor MWM 6.12 TCE, instalado em sala dinamométrica, devido à dificuldade de captação de recursos os ensaios foram realizados com apenas uma amostra de motor. Todos os ensaios foram realizados com combustível Diesel euro V.

A sala de teste é equipada com os seguintes instrumentos conforme tabela 5.2.

Tabela 4.2 - Especificações da sala dinamométrica utilizada.

Equipamento	Especificação
Dinamômetro	Schenk W400
Bancada de Controle	Schenk XCV
Software de controle da bancada	Elipse

Para que fosse possível alterar os parâmetros de injeção do motor conforme desejado para realização do planejamento multivariado de experimentos utilizou-se o software INCA.

Para que em todos os ensaios do experimento, o motor estivesse nas mesmas condições de temperaturas e pressões, evitando possíveis mascaramentos nos resultados do planejamento de experimentos, foram criadas algumas situações de contorno, conforme tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Condições de contorno do motor para garantir qualidade dos resultados.

Grandeza	Valor
Temperatura do Óleo	Entre 80 e 85 graus Celsius
Temperatura da Água	Entre 80 e 82 graus Celsius
Rotação	Entre 745 e 750 rpm
Temperatura Ar Admissão	Entre 30 e 33 graus Celsius
Temperatura do Combustível	Entre 35 e 39 graus Celsius

O motor foi instrumentado com acelerômetro na saia do bloco, com sensor de pressão para leitura da pressão de combustão e alicate amperímetro para verificação das injeções, conforme especificados na tabela 4.4.

Para aquisição dos dados foi utilizado o LMS PIMENTO para aceleração na saia do bloco e o AVL INDISET para ruído de combustão.

Tabela 4.4 - Especificações dos sensores utilizados.

Equipamento	Especificação
Calibrador de Acelerômetro	Bruel e Kjaer 4294
Acelerômetro	PCB 2543
Sensor de Pressão	Kistler 4356
Alicate Amperímetro	CVBE 4567

Depois de tomadas todas as providências para que o motor estivesse em condições de realização dos ensaios deu-se início ao planejamento de experimentos para triagem de fatores.

4.5 Planejamento de Triagem dos Fatores

Inicialmente realizou-se um planejamento para determinar quais são os parâmetros de injeção, (fatores x) mais significativos para as variáveis respostas, ou seja, um planejamento de triagem de fatores.

Foi realizado então planejamento fatorial fracionado 2^{8-4} devido à facilidade por possuir reduzido número de testes e proporcionar resultados satisfatórios.

Com a redução do número de testes, além de redução drástica do tempo de execução do planejamento, temos também um grande ganho financeiro, tendo em vista que o dinamômetro é muito oneroso para a empresa.

A Tabela 4.5 mostra o planejamento que foi realizado para triagem dos fatores, mostrados na ordem padrão, mas é importante lembrar que o planejamento foi realizado em ordem aleatória.

Tabela 4.5 - Matriz do planejamento de triagem de fatores em ordem padrão.

Ordem Padrão	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1
4	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1
8	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1
9	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1
10	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1
11	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1
12	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
13	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
15	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1
16	1	1	1	1	1	1	1	1

4.6 Planejamento de Otimização

Depois que os fatores mais importantes foram selecionados iniciou-se realização do planejamento de otimização que visa obter a melhor combinação dos fatores para minimizar a variável resposta.

4.6.1 Fatores do Planejamento de Otimização

Os fatores que demonstraram maior influência no ruído de combustão e aceleração na saída do bloco foram selecionados para etapa seguinte do experimento:

A = Pressão de *rail*

B = Ponto de injeção principal

F = Débito da Pré Injeção 2

O fator ponto da pré injeção 2 não apareceu no planejamento de triagem como fator com influência nas variáveis resposta, porém após análise minuciosa decidiu-se utilizá-lo no planejamento de otimização, devido a seguinte consideração:

Por ter sido notado que o débito de pré injeção 2 tinha efeito significativo no ruído e tendo em vista que o débito da pré injeção 1 não apresentou efeito significativo, considerou-se que a localização da pré- injeção seria um fator importante a ser estudado, portanto serão utilizados os 3 fatores citados acima mais o fator Ponto da Pré-Injeção 2 (E).

4.6.2 Níveis dos Fatores para o Planejamento de otimização

Para definição dos níveis foi utilizado o conhecimento do departamento de calibração de motores da MWM *International*, que ficaram da seguinte maneira, conforme tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Níveis escolhidos para os fatores do experimento de otimização.

Fator	Nível (+)	Ponto Central (0)	Nível (-)
Pressão de Rail (bar)	1500	1000	500
Ponto de Injeção Principal (graus)	20	10	0
Debito da pré-injeção (mg/inj)	3,5	2,0	0,5
Ponto da pré-injeção (graus)	35	20	5

4.6.3 Planejamento escolhido para otimização

O planejamento realizado foi o cúbico de face centrada, conforme tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Matriz do planejamento que foi realizado para otimização com foco em redução de ruído.

Ordem Padrão	A	B	E	F
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	-1
9	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1
16	1	1	1	1
17	-1	0	0	0
18	1	0	0	0
19	0	-1	0	0
20	0	1	0	0
21	0	0	-1	0
22	0	0	1	0
23	0	0	0	-1
24	0	0	0	1
25	0	0	0	0
26	0	0	0	0
27	0	0	0	0
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0
30	0	0	0	0
31	0	0	0	0

Vê-se que este planejamento possui 31 ensaios, sendo 7 pontos centrais, que auxiliam no cálculo dos erros e na construção de modelos quadráticos.

Observação: Os ensaios foram realizados seguindo a mesma metodologia do experimento de triagem.

4.7 Ensaio para Validação da Metodologia Utilizada

4.7.1 Potência Sonora por meio da Intensidade Sonora

Após a identificação da melhor combinação de fatores e níveis para redução de ruído por meios indiretos, iniciou-se a verificação por meios diretos, utilizando-se a técnica de obtenção de potência sonora, por meio de intensidade sonora.

Para este teste utilizou-se somente a calibração inicial, (utilizada antes do experimento) e as calibrações finais, (escolhidas nos experimentos).

Foram realizados testes conforme a norma ISO 9614-1: a sonda foi montada com espaçador de 12,5mm e o range de frequência utilizado foi de 125 Hz até 10 kHz. E para obtenção dos resultados utilizou-se software comercial criado pela LMS, chamado *Teste Xpress*, com equipamentos utilizados conforme tabela 4.8

Tabela 4.8 - Especificação dos sensores utilizados para medição de potência sonora por meio de intensidade sonora.

Equipamento	Especificação
Sonda	GRAS 50AI-B
Microfones	GRAS 40 AK
Pré-Amplificadores	GRAS 26 AA
Calibrador de Fase dos microfones	GRAS 51 AB
Calibrador de microfones	Bruel & Kjaer 4230

O motor foi envolvido por um cubo de referência, mantendo-se uma distância de 0,3 m de cada face, com áreas laterais de 1,1 m² e 30 divisões, áreas frontal e traseira de 0,9 m² e 20 divisões e área do topo de 1,045m² e 24 divisões, conforme figura 4.3.



Figura 4.3 - Malha para medição de intensidade sonora.

4.7.2 Qualidade sonora por meio de teste de júri

Devido à indisponibilidade de um sistema de gravação binaural tipo torso, utilizou-se um sistema onde uma pessoa faz o papel do torso, vestindo os microfones e se posicionando no ambiente de medição. Os microfones ficam posicionados na parte externa de um fone de ouvido, um para cada lado. Vale lembrar que a posição dos microfones não deve variar entre os testes, caso contrário os arquivos de áudio terão diferenças de amplitudes do sinal e direcionalidade, o que poderá afetar as avaliações.

O Sistema *SQuadriga* e *BHS headset*, da *HeadAccustics*, foi utilizado com frequência de amostragem 48 kHz.

Foram utilizadas as mesmas combinações de fatores e níveis do item anterior.

A pessoa de 1,80m estava posicionada ao lado esquerdo do motor, dentro da sala de testes, a um metro de distância da superfície mais externa do motor, (neste caso o turbo compressor).

Foi tomado o cuidado de se evitar outros ruídos, a não ser o do funcionamento do motor, durante as aquisições.

Após a coleta de todas as configurações, as mesmas foram editadas utilizando o software Artemis, para que fosse selecionado apenas 5 segundos de cada configuração.

4.7.2.1 Avaliação dos jurados

A sala escolhida para a reprodução das amostras e avaliação dos jurados foi uma sala de treinamentos da planta de Santo Amaro da MWM *International* devido ao fato de ser uma sala com baixo ruído de fundo (50dB(A)), com temperatura e acomodações agradáveis.

Foram utilizados 20 sujeitos de teste, todos funcionários da MWM *International*. Dez eram engenheiros e dez mecânicos de teste, todos habituados em avaliações subjetivas.

Um treinamento foi realizado antes do teste da seguinte maneira:

Apresentado um som semelhante ao das amostras.

Apresentada a escala a qual deverá ser seguida para a atribuição das notas.

Apresentado os atributos que deverão ser julgados.

Para a preparação do ensaio foi utilizada uma foto do motor em questão, mostrada em um *notebook*, em frente ao avaliador enquanto os arquivos eram reproduzidos pelo mesmo sistema utilizado para a coleta das amostras. O método de ensaio escolhido foi o ordenamento ou posto de ordem, por ser o de maior simplicidade com análises e resultados obtidos mais rapidamente.

O critério de avaliação escolhido para ordenamento foi: do mais desagradável, (nota 1), para o menos desagradável, (nota 3).

4.8 Ensaio para verificação do impacto causado no consumo de combustível e nas emissões de gases de escape

Para verificação dos impactos causados foi necessário realizar teste com medições de emissão de gases de escapamento e medição de consumo de combustível.

Estes ensaios foram realizados em outro banco dinamométrico, devido à necessidade de análise dos gases emitidos pelo escapamento.

O banco dinamométrico em questão conta com uma configuração, conforme tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Configuração do dinamômetro utilizado para medições de emissões de gases de escape

Equipamento	Especificação
Dinamômetro	Schenk W400
Bancada de Controle	AVL – ENCON 400
Software de controle da bancada	AVL PUMA OPEM 1.3
Bancada para Analise dos Gases	HORIBA MEXA 7500 DEGR
Balança Para medição de Combustível	AVL 7335
Medidor de fumaça	AVL 4155

5 RESULTADOS

5.1 Resultados do Planejamento de Triagem dos Fatores

A Tabela 5.1 mostra os resultados de aceleração no bloco e os ruídos de combustão obtidos. Para a variável resposta vibração na saia do bloco, estes valores foram obtidos por meio de um processamento de sinais que utilizou o nível global do sinal, (nível global) na faixa de frequência de 10Hz até 10 kHz, e os valores são apresentados em RMS (raiz media quadrática), já para a variável resposta ruído de combustão foi utilizado o ruído total, que é apresentado pelo *INDISET 620*. Os 10 Hz foram escolhidos para que os possíveis ruídos DC fossem eliminados e 10 kHz por ser a capacidade de medição do acelerômetro.

Tabela 5.1 - Aceleração no bloco do motor e ruído de combustão obtidos para o planejamento de triagem de fatores.

Ordem Padrão	A	B	C	D	E	F	G	H	Aceleração no bloco (m/s ²)	Ruído de Combustão(dB A)
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	12,9	46,5
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	18,1	71,5
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	19,7	73,4
4	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	23	83,5
5	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	15,5	63,5
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	14,3	50,5
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	21,6	80
8	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	20,1	76,8
9	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	14,3	49,7
10	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	17,2	68,4
11	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	20,5	77,1
12	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	19,1	74
13	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	14,9	53,2
14	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	17,1	67,9
15	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	18	70
16	1	1	1	1	1	1	1	1	23,8	84,2

De posse destes dados iniciou-se o cálculo dos efeitos para verificação de quais fatores realmente têm influência significativa nas variáveis respostas. Os valores dos efeitos foram calculados conforme mostrado no capítulo 3, item 3.3.1.1.

A Tabela 5.2 apresenta os valores dos efeitos obtidos com os resultados de aceleração na saída do bloco.

Tabela 5.2 - Efeitos calculados para os resultados de aceleração na saída do bloco.

Fator	Efeito
A (pressão do rail)	1,91
B (ponto de injeção principal)	5,18
C (ponto da pré-injeção 1)	0,06
D (débito da pré-injeção 1)	-0,04
E (ponto da pré-injeção 2)	0,19
F (débito da pré-injeção 2)	2,21
G (ponto da pós-injeção)	1,19
H (débito da pós-injeção)	0,19
A*B	-0,36
A*C	-0,59
A*D	0,46
A*E	0,79
A*F	0,61
A*G	0,24
A*H	-0,71

Devido ao fato deste planejamento ter sido realizado sem réplicas, não foi possível obter uma estimativa direta do erro para julgar a significância dos efeitos. Sendo assim, foi utilizado o gráfico de probabilidade normal para avaliação da significância dos efeitos.

A figura 5.1 mostra o gráfico de probabilidade normal dos efeitos para a variável resposta aceleração na saída do bloco. Este gráfico foi plotado com o auxílio de um *software* comercial (*Minitab*, 2005), que utilizou a metodologia demonstrada no capítulo 3, item 3.3.1.3.

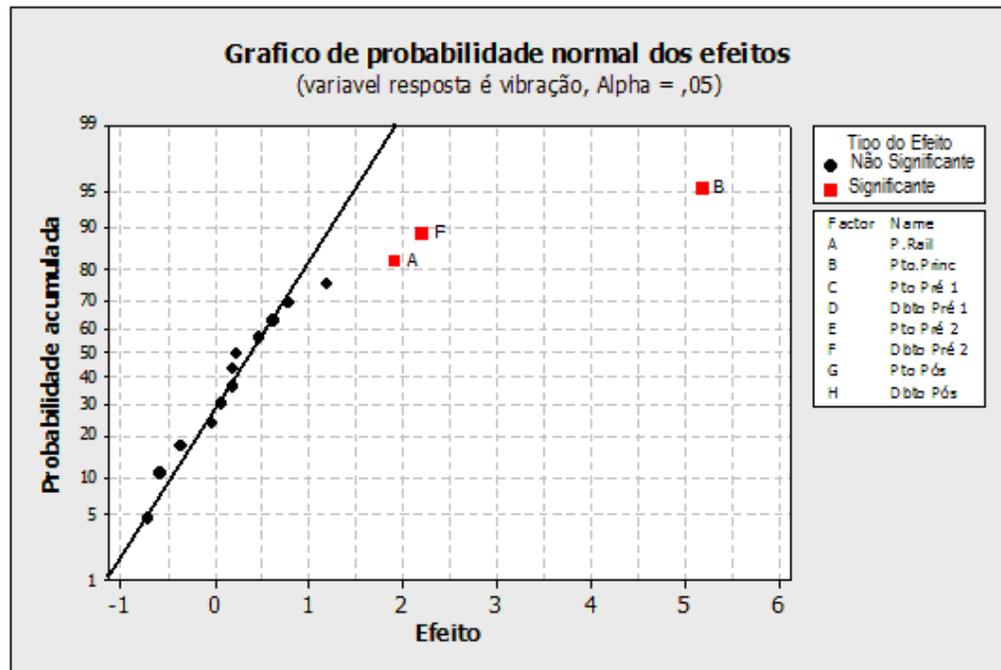


Figura 5.1 - Gráfico de probabilidade normal dos efeitos para variável resposta ruído na saída do bloco.

Vê-se que os efeitos B, F e A (Ponto de injeção principal, débito da pré- injeção 2 e pressão de rail) estão posicionados mais distantes da reta indicando que são estatisticamente significativos na variável resposta. Já os demais efeitos estão próximos a reta indicando que seguem uma distribuição normal, devido ao erro experimental, não tendo influência na variável resposta.

A Tabela 5.3 apresenta os valores dos efeitos obtidos com resultados de ruído de combustão.

Tabela 5.3 - Efeitos calculados para os resultados de ruído de combustão.

Fator	Efeito
A (pressão do rail)	7,93
B (ponto de injeção principal)	18,48
C (ponto da pré-injeção 1)	0,25
D (débito da pré-injeção 1)	-0,15
E (ponto da pré-injeção 2)	-0,48
F (débito da pré-injeção 2)	8,08
G (ponto da pós-injeção)	5,75
H (débito da pós-injeção)	-2,15
A*B	-3,43
A*C	-4,75
A*D	3,20
A*E	-0,43
A*F	1,23
A*G	0,50
A*H	-1,95

A figura 5.2 mostra o gráfico de probabilidade normal dos efeitos para a variável resposta ruído de combustão.

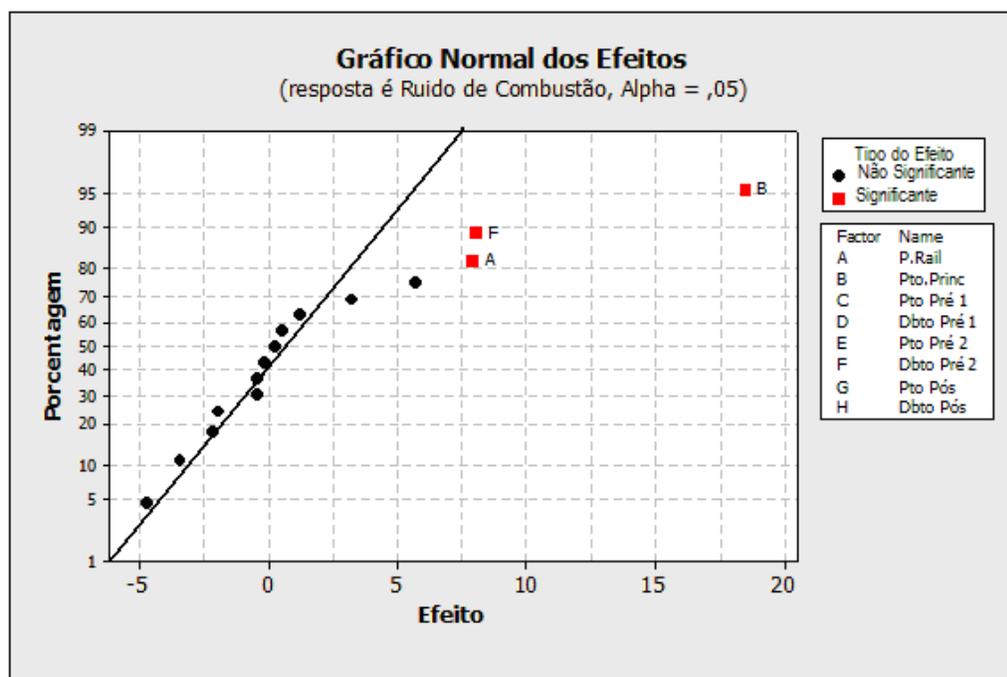


Figura 5.2 - Gráfico de probabilidade normal dos efeitos para a variável resposta ruído de combustão.

Vê-se que os efeitos B, F e A (Ponto de injeção principal, débito da pré- injeção 2 e pressão de *rail*) estão posicionados mais distantes da reta indicando que são estatisticamente significativos na variável resposta. Já os demais efeitos estão próximos a reta indicando que seguem uma distribuição normal, devido ao erro experimental, não tendo influência na variável resposta.

O gráfico 5.3 apresenta as duas variáveis resposta plotadas, os sinais + e - correspondem as variáveis A, B, E e F respectivamente.

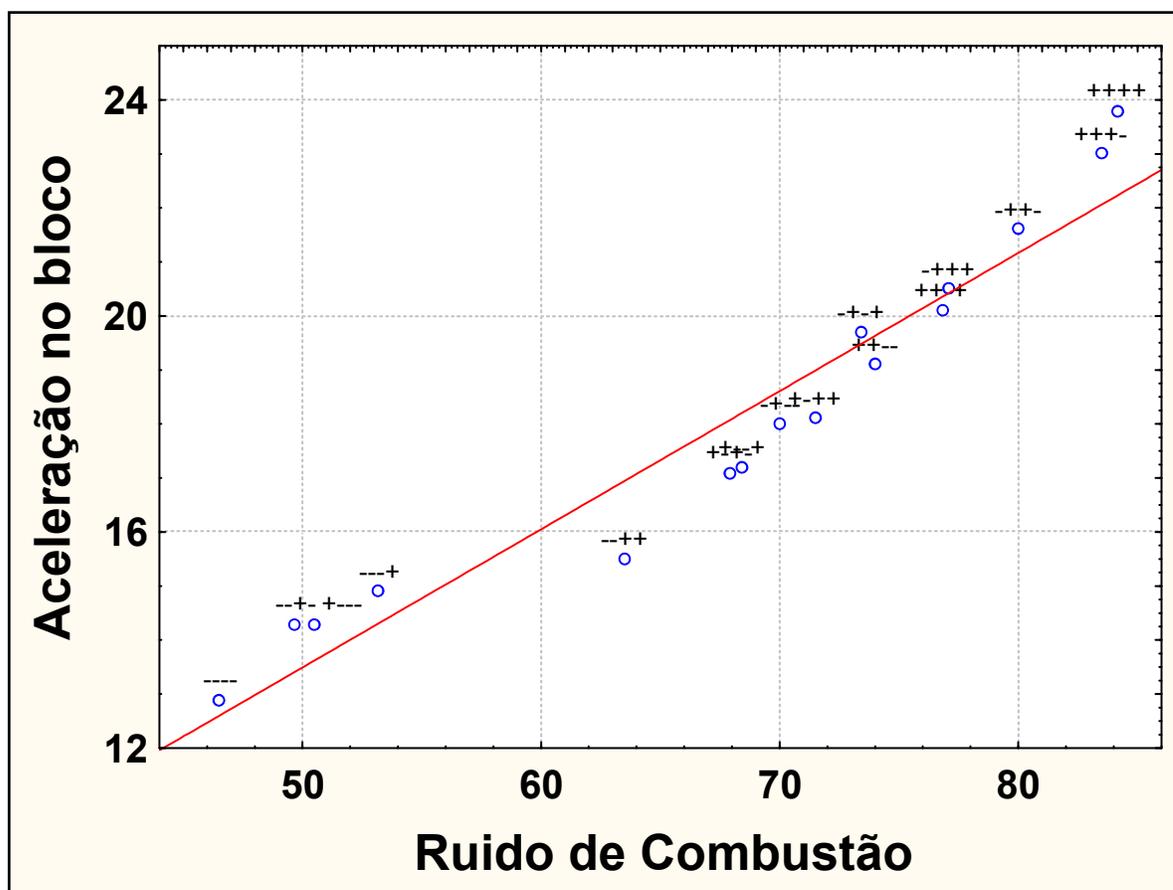


Figura 5.3 – Correlação entre as variáveis resposta ruído de combustão e aceleração no bloco.

Vê-se que os valores de ruído de combustão e aceleração no bloco possuem uma forte relação porque quando os valores de aceleração aumentam os valores de ruído de combustão

também aumentam. Nota-se também que nos quatro resultados que apresentaram valores de ruído e aceleração baixos o sinal da variável B sempre esta com sinal - indicando que esta variável pode ser a principal responsável por valores baixos nas variáveis resposta.

5.2 Resultados do Planejamento de Otimização

A tabela 5.4 apresenta os resultados referentes às variáveis respostas ruído de combustão e aceleração na saia do bloco, no planejamento composto central de otimização.

Tabela 5.4 - Resultados obtidos para as variáveis respostas ruído de combustão e aceleração na saia do bloco, no planejamento composto central de otimização.

Ordem Padrão	Ordem de Teste	A	B	E	F	Ruído de combustão (dB (A))	Aceleração no bloco (m/s ²)
1	17	-1	-1	-1	-1	50,2	9,81
2	11	1	-1	-1	-1	49,6	16,23
3	20	-1	1	-1	-1	52,3	9,68
4	8	1	1	-1	-1	50,8	16,48
5	3	-1	-1	1	-1	53,7	9,4
6	10	1	-1	1	-1	50	15,9
7	31	-1	1	1	-1	53,9	10,16
8	12	1	1	1	-1	52,2	16,05
9	29	-1	-1	-1	1	57,8	11,28
10	30	1	-1	-1	1	53,2	15,4
11	24	-1	1	-1	1	53,9	9,22
12	5	1	1	-1	1	51,5	15,45
13	27	-1	-1	1	1	58,9	11,78
14	15	1	-1	1	1	51,9	17,55
15	21	-1	1	1	1	56,3	10,25
16	26	1	1	1	1	49,5	16,81
17	19	-1	0	0	0	63,2	17,79
18	6	1	0	0	0	61,6	22,6
19	28	0	-1	0	0	56,3	14,26
20	23	0	1	0	0	53,5	12,8
21	9	0	0	-1	0	63,5	16,45
22	16	0	0	1	0	63,1	17,66
23	4	0	0	0	-1	61,8	18,59
24	22	0	0	0	1	62,1	18,38
25	25	0	0	0	0	62,7	18,27
26	7	0	0	0	0	63,8	18,95
27	13	0	0	0	0	63,6	18,4
28	2	0	0	0	0	63,5	18,7
29	18	0	0	0	0	62,4	18,97
30	1	0	0	0	0	63,4	18,95
31	14	0	0	0	0	63,7	18,77

Vê-se que a configuração dos parâmetros do ensaio 11 possibilitou o menor valor para a variável resposta aceleração na saída do bloco, e a configuração do ensaio 16 possibilitou o menor valor para a variável resposta ruído de combustão.

As tabelas 5.5 e 5.6 mostram cada uma das configurações otimizadas no planejamento de superfície de resposta.

Tabela 5.5 - Configuração dos parâmetros de injeção otimizados para variável resposta ruído de combustão.

Variável	Configuração
Pressão de Rail (bar)	1500 (+)
Ponto de Injeção Principal (grau)	20 (+)
Ponto da Pré Injeção (grau)	35 (+)
Débito da Pré Injeção (mg/inj)	3,5 (+)

Tabela 5.6 - Configuração dos parâmetros de injeção otimizados para variável resposta aceleração no bloco.

Variável	Configuração
Pressão de Rail (bar)	500 (-)
Pto Injeção Principal (grau)	20 (+)
Pto Pré Injeção (grau)	5,0 (-)
Débito Pré Injeção (mg/inj)	3,5 (+)

Vê-se que as duas configurações otimizadas são diferentes. Portanto, as duas serão testadas com medição de intensidade sonora para verificação da eficácia das duas técnicas de medição indireta de ruído.

5.2.1 Análise da qualidade do modelo

A análise da qualidade do modelo é composta por duas tabelas, onde primeiramente são analisadas as informações referentes à análise de variância para a variável em estudo, conforme Tabela 5.7, e posteriormente são analisados os coeficientes estimados da regressão conforme Tabela 5.8.

A primeira tabela Tabela 5.7 apresenta as principais informações sobre a análise de variância do experimento, que é o método mais utilizado para se avaliar numericamente a qualidade do ajuste de um modelo, (BARROS NETO *et. al.* 2007).

Neste bloco são apresentados fontes de variação e seus respectivos números de graus de liberdade, somas quadráticas e médias quadráticas, além dos valores referentes à estatística F e ao valor p , utilizados para determinar se os fatores são significativos ou não em relação a uma determinada variável resposta.

Tabela 5.7 - Análise de Variância para variável resposta ruído de combustão.

Fonte	GL	Seq SQ	Adj MQ	F	P
Regressão	14	863,18	61,65	89,25	0,00
Linear	4	79,03	19,75	28,60	0,00
Quadrática	4	746,53	186,63	270,17	0,00
Interação	6	37,61	6,26	9,07	0,00
Residual	16	11,05	0,69		
Falta de Ajuste	10	9,33	0,93	3,26	0,08
Erro Puro	6	1,74	0,28		
Total	30	874,23			

A coluna Fonte indica as fontes de variação, podendo ser elas provenientes da regressão (linear, quadráticas e de interação) e dos erros residuais (falta de ajuste e erro puro). O total equivale a somatória de todas as fontes de variação. As fontes do tipo regressão podem ser usadas para testar se os coeficientes no modelo são significativos na variável resposta ruído de combustão.

Na segunda coluna GL estão os graus de liberdade de cada fonte de variação. Como tem-se um total de 31 experimentos, o total de graus de liberdade é 30 (n-1).

A coluna SQ corresponde a soma quadrática entre todos os fatores e os respectivos erros, e é dividida em três:

1) Soma Quadrática da Regressão, que representa a soma dos quadrados dos desvios das previsões feitas pelo modelo em relação à média global. Esta soma quadrática pode ser dividida em três contribuições: termos lineares, quadráticos e termos de interação.

2) Soma Quadrática Residual, que representa a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores previstos e pode ser dividida em duas

Soma Quadrática devido ao erro puro que fornece uma medida do erro aleatório, ou seja, do erro inerente aos experimentos realizados, não tendo relação com o modelo ajustado. Este termo pode ser calculado quando há repetições para avaliação da reprodutibilidade dos ensaios e é igual a variância agregada das réplicas vezes o número de graus de liberdade correspondente.

Soma Quadrática devido à falta de ajuste, que fornece uma medida da falta de ajuste do modelo.

3) Soma Quadrática Total, que representa a soma dos quadrados dos desvios dos valores observados, em relação à média global.

A quarta coluna MQ corresponde as médias quadráticas que podem ser obtidos dividindo-se as somas quadráticas pelos números do grau de liberdade.

O valor da estatística F (coluna 5) para regressão é calculado dividindo-se o valor das médias quadráticas da regressão pela média quadrática residual, quando comparado a um valor F tabelado (ANEXO B), nos diz se um fator é significativo ou não. Como alternativa, o software fornece ainda o valor P que quando inferior ao valor de $\alpha = 0.05$, para um intervalo de confiança igual a 95%, indica que a fonte é significativa.

Os valores dos erros provenientes da falta de ajuste são os mais importantes indicativos da qualidade do modelo. Se não houver evidências de falta de ajuste podemos considerar que o modelo é representativo dos dados experimentais. Para verificar se não existe falta de ajuste

calcula-se o valor de F para falta de ajuste por meio da razão MQ da falta de ajuste e MQ do erro puro. Então se compara este valor ao valor de F tabelado para os graus de liberdade da falta de ajuste e erro puro; se o valor de F calculado for menor que o F tabelado não existiriam evidências da falta de ajuste e portanto o modelo pode ser considerado satisfatório.

No experimento pode-se observar que F calculado é 3,26 e o F tabelado é 4,06, indicando assim que o modelo gerado é representativo dos dados experimentais.

A segunda tabela Tabela 5.8 apresenta os coeficientes estimados da regressão.

Tabela 5.8 - Bloco dos Coeficientes Estimados da Regressão para variável resposta ruído de combustão.

Termo	Coef	EP Coef	T	P
Constante	63,27	0,24	256,62	0,00
Pressão Rail	-1,66	0,19	-8,47	0,00
Pto. Injeção Principal	-0,42	0,19	-2,18	0,04
Pto. Pré Injeção	0,37	0,19	1,90	0,07
Débito Pré Injeção	1,14	0,19	5,84	0,00
Pressão Rail*Pressão Rail	-0,84	0,51	-1,63	0,12
Pto. Injeção Principal*Pto. Injeção Principal	-8,34	0,51	-16,17	0,00
Pto. Pré Injeção*Pto. Pré Injeção	0,05	0,51	0,11	0,91
Débito Pré Injeção*Débito Pré Injeção	-1,29	0,51	-2,50	0,02
Pressão Rail*Pto. Injeção Principal	0,21	0,20	1,05	0,30
Pressão Rail*Pto. Pré Injeção	-0,63	0,20	-3,03	0,00
Pressão Rail*Débito Pré Injeção	-0,83	0,20	-4,00	0,00
Pto. Injeção Principal*Pto. Pré Injeção	-0,01	0,20	-0,09	0,92
Pto. Injeção Principal* Débito Pré Injeção	-1,01	0,20	-4,90	0,00
Pto. Pré Injeção*Débito Pré Injeção	-0,41	0,20	-2,01	0,06
	S=0,8311	R-Sq=98,7%	R-Sq(adj)=97,6%	

A segunda coluna da Tabela 5.8, chamada Coef, representa os coeficientes estimados para cada fator existente na primeira coluna, chamada Termo, utilizados na construção da regressão via polinômio de segunda ordem, a partir dos dados aquisitados nos experimentos. O método de regressão múltipla linear foi usado ajustando os coeficientes para minimizar a soma dos

quadrados dos desvios entre o valor experimental e o valor previsto pelo modelo, (BARROS NETO *et.al.* 2007).

A terceira coluna da Tabela 5.7, chamada EP Coef, corresponde ao erro padrão do coeficiente, ou seja, o valor estimado do desvio padrão do coeficiente para cada fator. Valores relativamente pequenos indicam estimativas mais precisas.

Dividindo-se o coeficiente estimado pelo seu respectivo erro padrão obtém-se o valor da quarta coluna chamada t . Se este valor t for maior que o valor crítico da distribuição t ao nível de 95% de confiança, para 16 graus de liberdade (número de experimentos no planejamento, menos o número de parâmetros no modelo, $31 - 15$), que é $2,12$, o coeficiente torna-se significativo neste nível.

Se o valor P , presente na quinta coluna, associado ao valor t for menor do que o valor α adotado ($\alpha = 0.05$ para um nível de confiança igual a 95%) pode-se concluir que o coeficiente é diferente de zero, ou seja, a relação entre um determinado fator ou a combinação de fatores e a variável resposta é estatisticamente significativa.

Para a variável resposta ruído de combustão em análise, seguindo o modelo de regressão e utilizando somente os termos com coeficientes significativos no nível de 95%, temos:

Ruído de combustão = $63,27 - 1,66 * \text{pressão rail} - 0,42 * \text{Pto Inj Principal} + 1,14 * \text{Dbto Pré Inj} - 8,34 (\text{Pto Inj Principal} * \text{Pto Inj Principal}) - 1,29 * (\text{Dbto Pré Inj} * \text{Dbto Pré Inj}) - 0,63 * (\text{pressão rail} * \text{Pto Pré Inj}) - 0,83 * (\text{pressão rail} * \text{Dbto Pré Inj}) - 1,01 * (\text{Pto Inj Principal} * \text{Dbto Pré Inj})$.

Já os valores $R-Sq$ ou R-quadrado corresponde a porcentagem de variação da variável resposta em relação ao modelo correspondente, a um ou mais fatores do experimento. Em geral, quanto maior o valor do $R-Sq$, melhor o modelo explica o experimento. $R-Sq$ apresentam valores entre 0 e 100% e são também conhecidos como coeficientes de determinação ou coeficientes de múltipla determinação. O valor de R-quadrado pode ser obtido por meio da razão entre SQ da regressão e SQ total.

O valor de S é a raiz quadrada do valor da media quadrática residual e representa uma estimativa do erro no modelo.

Tendo como base as diversas análises apresentadas, pode-se concluir que o modelo gerado para o planejamento em questão é estatisticamente significativo.

Para as respostas de aceleração na saída do bloco, as mesmas análises foram realizadas e verificou-se que o modelo gerado pelo experimento é estatisticamente significativo e que o modelo não sofre falta de ajuste no nível de 95% de confiança, conforme Tabela 5.9 e Tabela 5.10.

Tabela 5.9 - Bloco referente à Análise de Variância para variável resposta Aceleração na saída do bloco

Fonte	GL	Seq SQ	Adj MQ	F	P
Regressão	14	359,67	28,26	126,34	0,00
Linear	4	160,40	40,10	179,26	0,00
Quadrática	4	230,37	57,59	257,45	0,00
Interação	6	4,89	0,81	3,65	0,01
Residual	16	3,57	0,22		
Falta de Ajuste	10	3,10	0,31	3,91	0,05
Erro Puro	6	0,47	0,07		
Total	30	399,25			

Tabela 5.10 - Bloco dos Coeficientes Estimados da Regressão para variável resposta aceleração no bloco.

Termo	Coef	EP Coef	T	P
Constante	18,70	0,14	133,30	0,00
Pressão Rail	2,95	0,11	26,46	0,00
Pto. Injeção Principal	-0,26	0,11	-2,34	0,03
Pto. Pré Injeção	0,30	0,11	2,77	0,01
Débito Pré Injeção	0,21	0,11	1,90	0,07
Pressão Rail*Pressão Rail	1,50	0,29	5,13	0,00
Pto. Injeção Principal*Pto. Injeção Principal	-5,15	0,29	-17,57	0,00
Pto. Pré Injeção*Pto. Pré Injeção	-1,63	0,29	-5,56	0,00
Débito Pré Injeção*Débito Pré Injeção	-0,20	0,29	-0,69	0,49
Pressão Rail*Pto. Injeção Principal	0,16	0,11	1,41	0,17
Pressão Rail*Pto. Pré Injeção	0,07	0,11	0,60	0,55
Pressão Rail*Débito Pré Injeção	-0,18	0,11	-1,54	0,14
Pto. Injeção Principal*Pto. Pré Injeção	0,03	0,11	0,28	0,78
Pto. Injeção Principal* Débito Pré Injeção	-0,33	0,11	-2,80	0,01
Pto. Pré Injeção*Débito Pré Injeção	0,35	0,11	3,02	0,00
	S=0,47	R-Sq=99,1%	R-Sq(adj)=98,3%	

5.2.2 Análise das superfícies de resposta

A figura 5.3 mostra o comportamento da variável resposta ruído de combustão de acordo com a variação dos níveis dos fatores A (pressão de rail) e F (Débito da pré-injeção 2) quando os níveis dos fatores B (Ponto de injeção principal) e E (Ponto da pré-injeção 2) foram mantidos em 1(20 graus) e 0(20 graus) respectivamente.

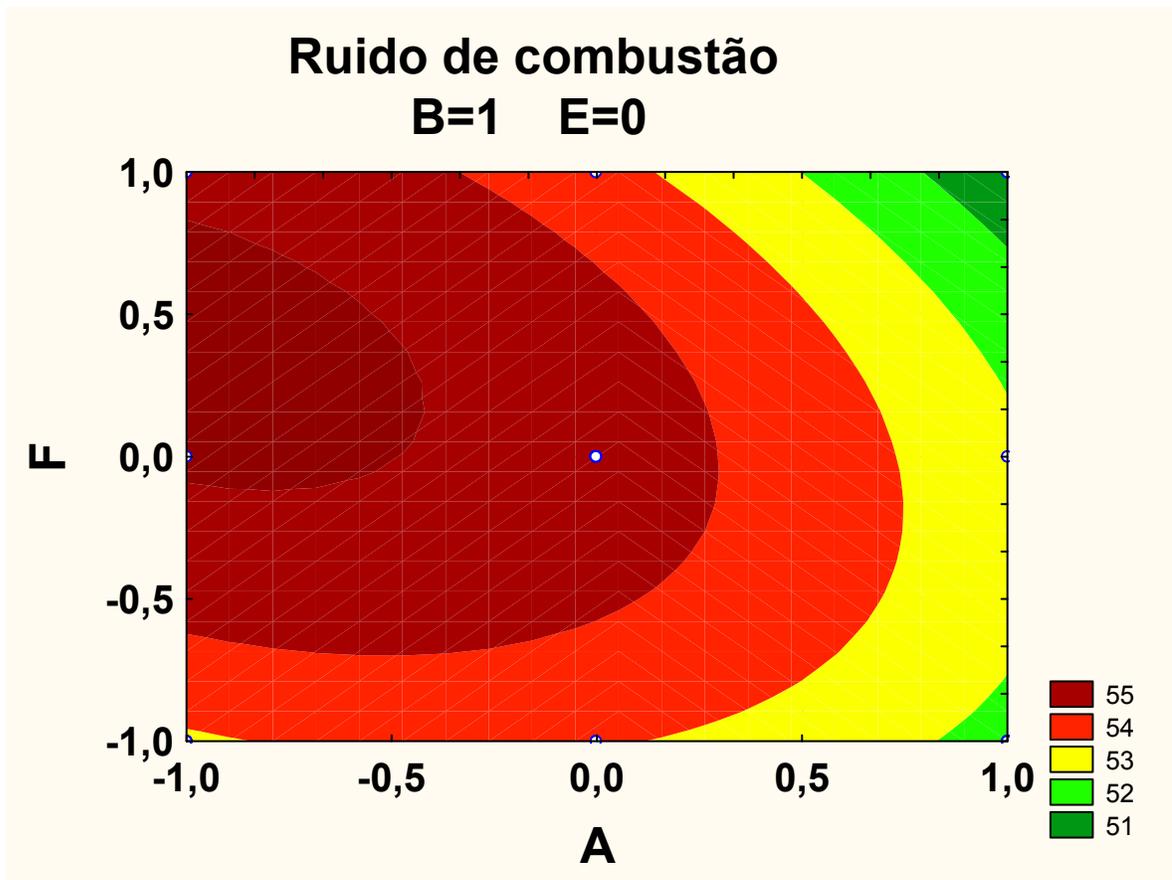


Figura 5.3 – Comportamento da variável resposta ruído de combustão quando os fatores B e E são mantidos constantes.

Vê-se que quando os níveis do fator A (pressão de *rail*) estão no nível 1(1500 bar) e os níveis do fator F (Débito da pré-injeção 2) estão nos níveis -1(0,5 mg/inj) e 1(3,5 mg/inj) os valores da variável resposta ruído de combustão são minimizados. Nota-se também que quando tem-se o fator A (pressão de rail) no nível -1(500 bar) e o fator F (Débito da pré-injeção 2) no nível 0(2,0 graus) tem-se o nível de ruído de combustão maximizado para o domínio experimental.

A figura 5.4 mostra o comportamento da variável resposta ruído de combustão de acordo com a variação dos níveis dos fatores B (Ponto de injeção principal) e F (Débito da pré-injeção 2) quando os níveis dos fatores A (pressão de rail) e E (Ponto da pré-injeção 2) foram mantidos em 0 (1000 bar e 2,0 respectivamente).

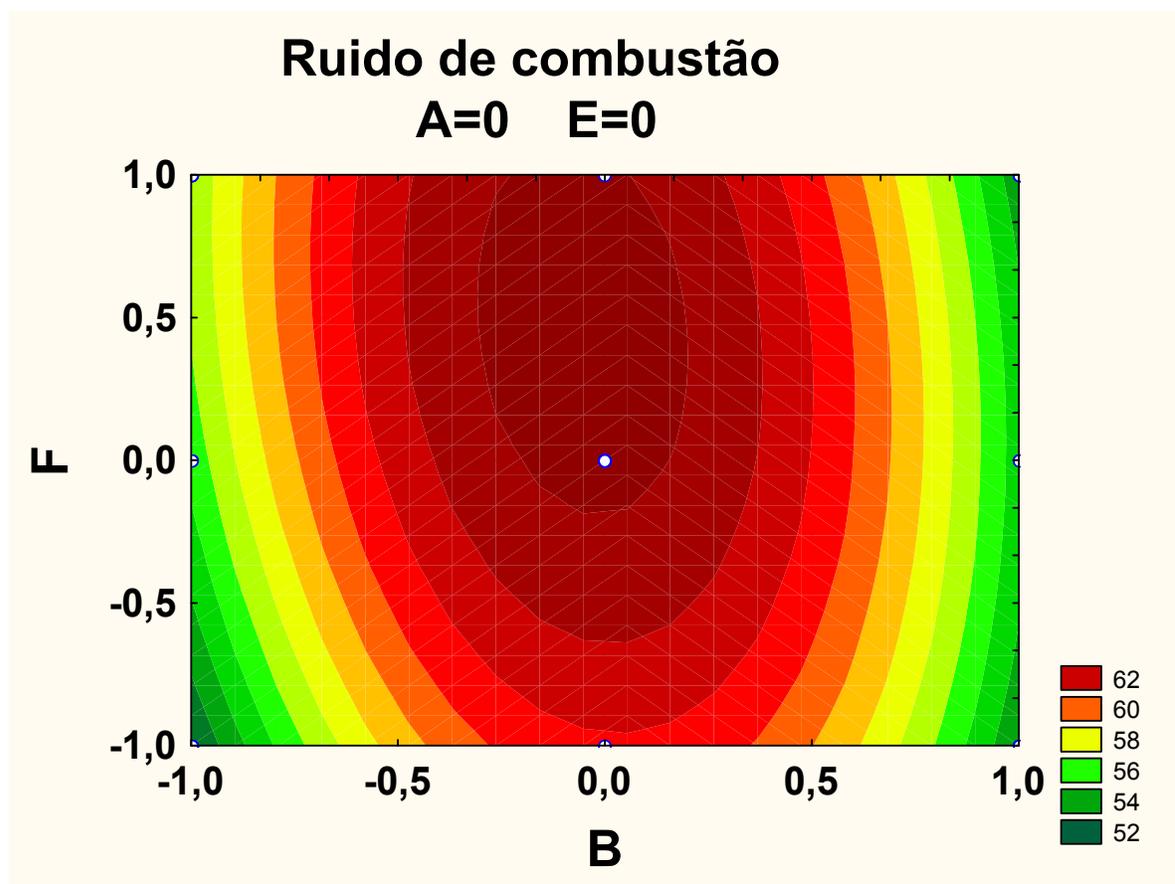


Figura 5.4 – Comportamento da variável resposta ruído de combustão quando os fatores A e E são mantidos constantes.

Vê-se que quando os níveis do fator B (Ponto de injeção principal) estão no nível 1(20 graus) ou -1(0 grau) e os níveis do fator F (Débito da pré-injeção 2) estão nos níveis -1(5 graus) ou 1(35 graus) os valores da variável resposta ruído de combustão são minimizados. Nota-se também que nos pontos centrais B (Ponto de injeção principal) em 0(10 graus) e F (Débito da pré-injeção 2) em 0(20 graus) a variável resposta é maximizada.

A figura 5.5 mostra o comportamento da variável resposta aceleração no bloco de acordo com a variação dos níveis dos fatores A (pressão de rail) e B (Ponto de injeção principal) quando os níveis dos fatores E (Ponto da pré-injeção 2) e F (Débito da pré-injeção 2) foram mantidos em 0 (2,0 mg/inj e 20 graus respectivamente).

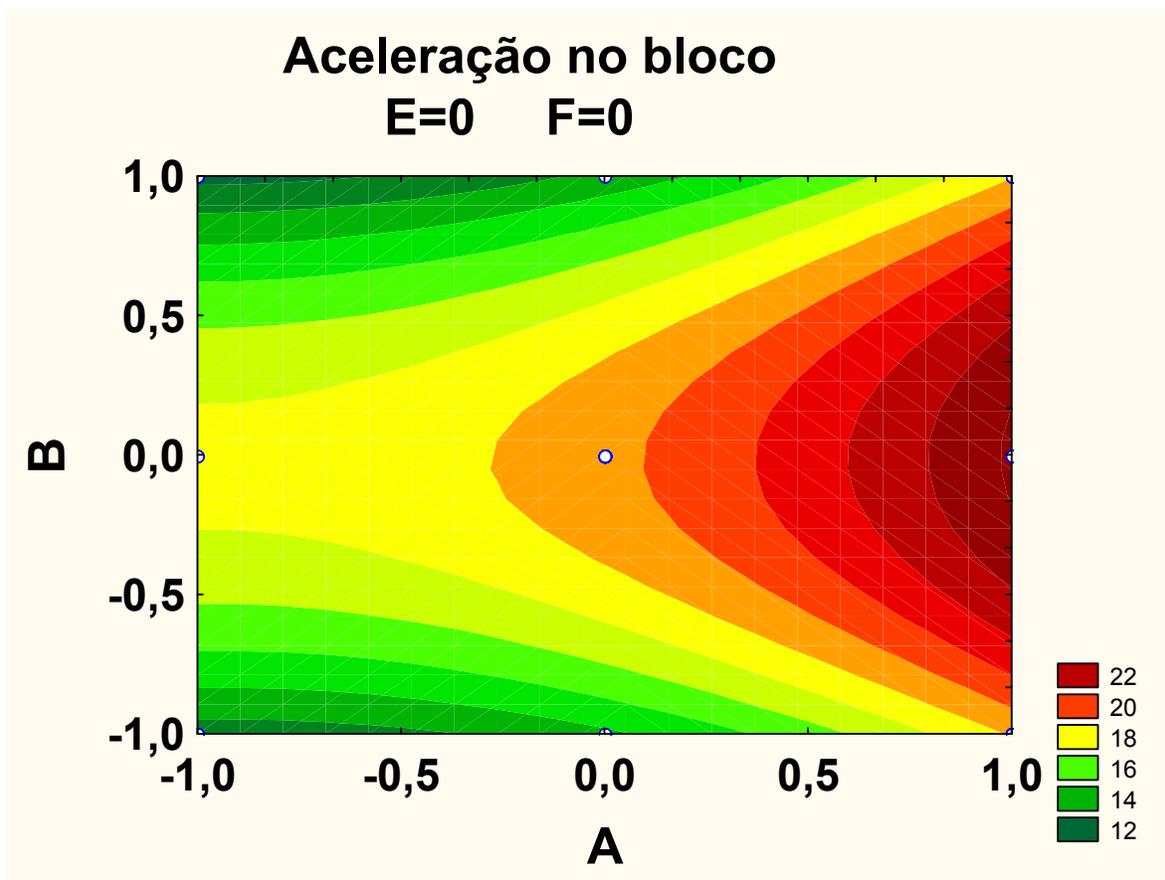


Figura 5.5 – Comportamento da variável resposta aceleração no bloco quando os fatores E e F são mantidos constantes.

Vê-se que quando os níveis do fator B (Ponto de injeção principal) estão no nível 1(20 graus) ou -1(0 grau) e os níveis do fator A (pressão de rail) estão no nível -1(500 bar) os valores da variável resposta ruído de combustão são minimizados. Nota-se também que quando o nível de A (pressão de rail) esta no 1(1500 bar) e B (Ponto de injeção principal) no ponto central 0(10 graus) a variável resposta é maximizada.

A figura 5.6 mostra o comportamento da variável resposta aceleração no bloco de acordo com a variação dos níveis dos fatores E (Ponto da pré-injeção 2) e F (Débito da pré-injeção 2) quando os níveis dos fatores A (pressão de rail) e B (Ponto de injeção principal) foram mantidos em -1(500 bar) e 1(20 graus) respectivamente.

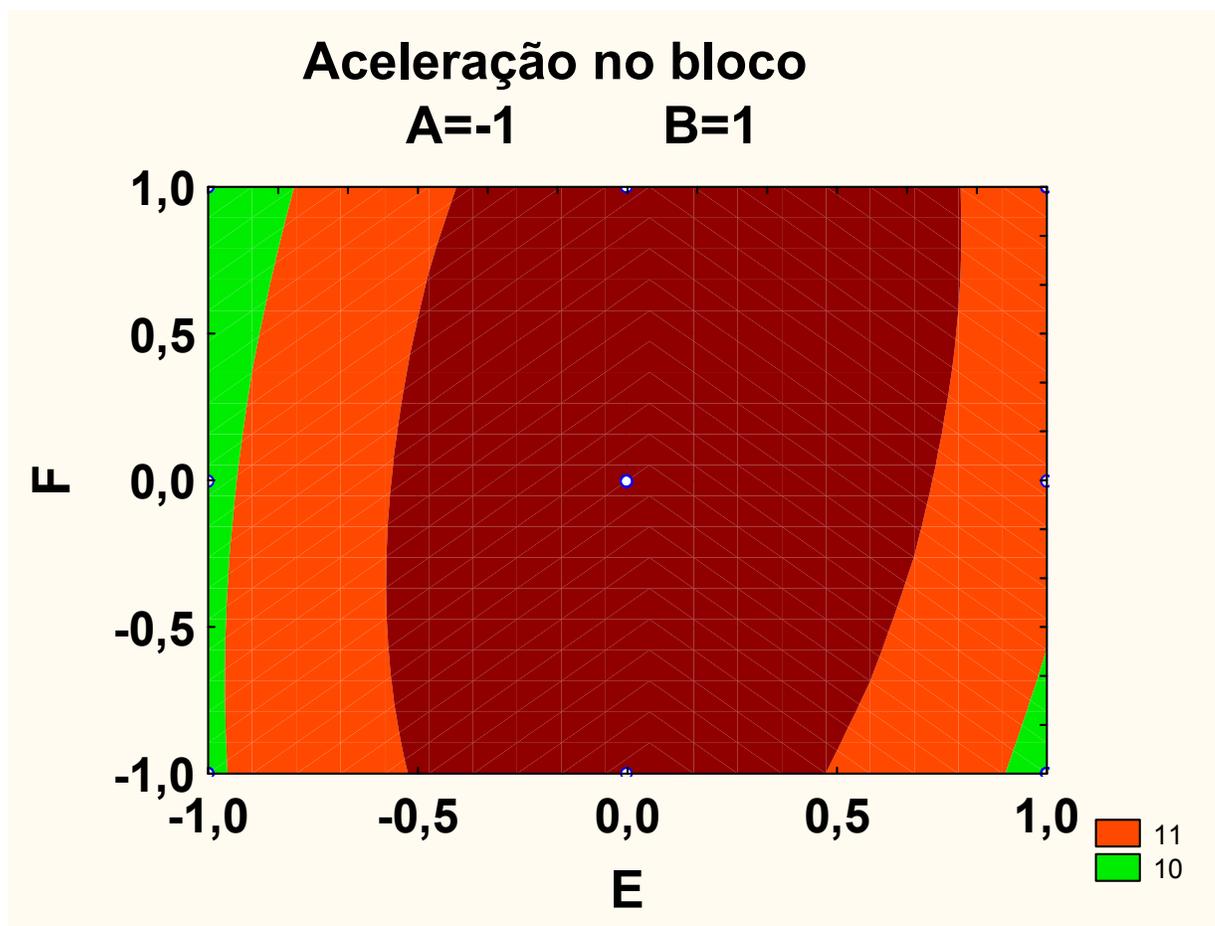


Figura 5.6 – Comportamento da variável resposta aceleração no bloco quando os fatores A e B são mantidos constantes.

Vê-se que quando os níveis do fator E (Ponto da pré-injeção 2) estão no nível 1(3,5 mg/inj) ou -1(0,5 mg/inj) e os níveis do fator F (Débito da pré-injeção 2) estão no nível -1(5 graus) os valores da variável resposta ruído de combustão são minimizados. Nota-se também que quando o nível de E (Ponto da pré-injeção 2) e F (Débito da pré-injeção 2) estão no ponto central 0(2,0 mg/inj e 20 graus respectivamente) a variável resposta é maximizada.

A figura 5.7 mostra um gráfico de aceleração na saia do bloco VS ruído de combustão para os experimentos do planejamento composto central. Os números correspondem aos números dos experimentos na tabela 5.4.

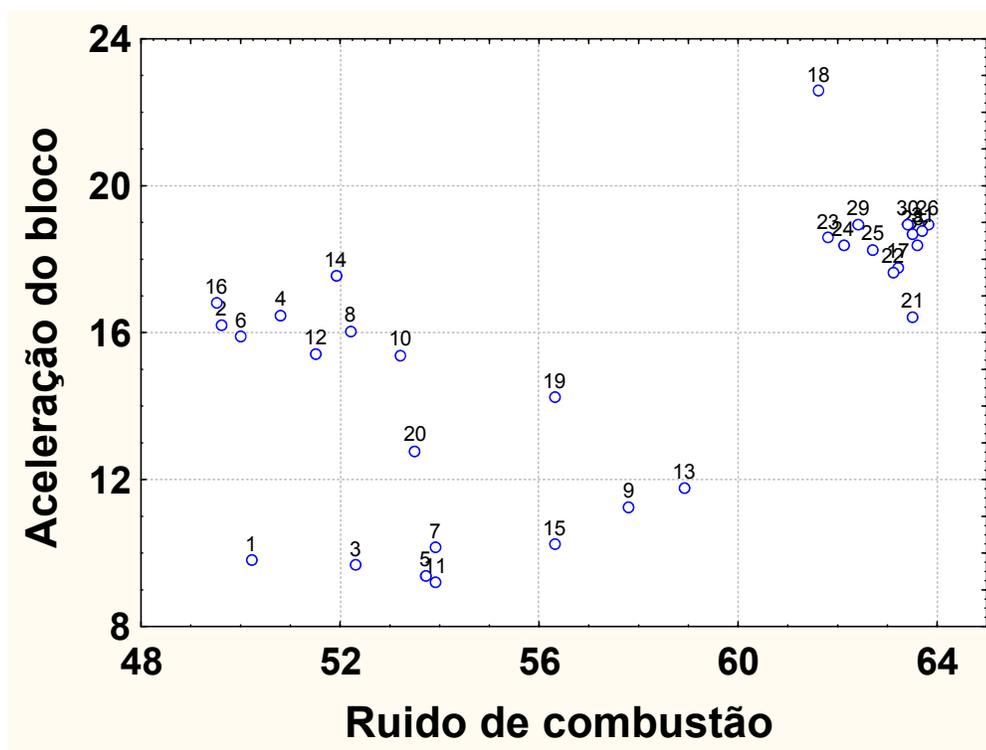


Figura 5.7 – Aceleração na saia do bloco VS ruído de combustão.

Vê-se que três grupos de pontos podem ser observados. Os experimentos com números ímpares entre 1 e 15 tem valores baixos de aceleração na saia do bloco, entre 8 e 12 m/s², e

valores de ruído de combustão entre 50 e 60 dB A. Todos os ensaios neste grupo foram feitos com o nível -1(500 bar) de pressão de *rail*. Os ensaios feitos no nível de 1500 bar para pressão de *rail*, números pares entre 2 e 16 tem aceleração na saia do bloco mais altos, entre 12 e 18 m/s², mas os valores de ruído de combustão são iguais ou menores que os valores obtidos quando utilizou-se 500 bar. Estas observações são consistentes com o grande efeito positivo da pressão do rail (2,95 na tabela 5.10) na aceleração na saia do bloco e um efeito negativo (-1,66) para o ruído de combustão. Os experimentos mais próximos do ponto central apresentam valores altos de aceleração na saia do bloco (entre 16 e 24 m/s²) e ruído de combustão entre 60 e 64 dB A.

5.3 Resultados das medições de intensidade sonora

Os resultados de potência sonora, por meio de intensidade sonora, nas três configurações de parâmetros de injeção podem ser vistas na tabela 5.11.

Nota: Os valores não foram mostrados por motivos de sigilo industrial.

Tabela 5.11 - Resultados dos testes de intensidade sonora para as configurações de parâmetros de injeção escolhidas

Configuração dos parâmetros de injeção	Valores de Potência sonora (dBA)
Configuração otimizada para ruído de combustão	↑ 0,8
Configuração otimizada para vibração na saia do bloco	↓ 2,0

↓ = diminuiu, ↑ = aumentou (em relação a calibração normal de produção)

Vê-se que foram conseguidos resultados satisfatórios para redução de ruído emitido pelo motor, na condição de marcha lenta, apenas para a variável resposta vibração na saia do bloco.

Foram conseguidos 2 dB (A) o que pode ser considerado uma melhoria significativa. Já para a variável resposta ruído de combustão houve um pequeno aumento no valor de potência sonora, indicando que para esta condição específica do motor é melhor utilizar-se a vibração na saia do bloco como variável resposta.

5.4 Resultados do teste de júri

Os resultados do teste de júri são apresentados na tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Resultados do teste de júri.

<i>Jurado</i>	<i>Calibração NP</i>	<i>Calibração Otimizada Ruído de Combustão</i>	<i>Calibração Otimizada Vibração no Bloco</i>
01	2	1	3
02	1	2	3
03	2	1	3
04	2	1	3
05	2	1	3
06	1	2	3
07	2	1	3
08	1	2	3
09	2	1	3
10	1	2	3
11	1	3	2
12	1	2	3
13	1	2	3
14	2	1	3
15	2	1	3
16	2	1	3
17	2	1	3
18	1	2	3
19	1	2	3
20	1	2	3

1= ruído mais desagradável, 3= ruído menos desagradável

Vê-se que os resultados quantitativos tiveram boa correlação com os resultados qualitativos. A calibração otimizada por meio de vibração na saia do bloco foi escolhida por 95% dos jurados como calibração menos desagradável, já as calibrações normal de produção e a calibração otimizada por meio de ruído de combustão não foram claramente identificadas no teste de júri, indicando que valores menores que um dB não são facilmente percebidos pelo ouvido humano.

5.5 Resultados dos testes de emissões e consumo de combustível

A tabela 5.13 apresenta os resultados obtidos para emissões de gases e fumaça nas três calibrações.

Nota: Os valores não foram mostrados por motivos de sigilo industrial.

Tabela 5.13 – Resultados dos testes de emissões

Configuração da calibração	HC (PPM)	NOX (PPM)	CO2(%)	CO (PPM)	O2 (PPM)	FUMAÇA (BOSCH)
Calibração otimizada para ruído de combustão	↑	↓	↔	↑	↔	↔
Calibração otimizada para vibração na saia do bloco	↑	↓	↔	↑	↔	↔

↓ = diminui, ↑ = aumentou e ↔ = manteve igual (em relação a calibração normal de produção)

Vê-se que os valores de *HC* e *CO* foram afetados substancialmente nas duas configurações propostas, o que é muito prejudicial ao motor.

Para o consumo de combustível os resultados são apresentados na tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Resultados para consumo de combustível

Configuração da calibração	Valores de Consumo (g/h)
Calibração otimizada para ruído de combustão	↓
Calibração otimizada para vibração na saia do bloco	↓

↓ = **diminui**, (em relação a calibração normal de produção)

Vê-se que os valores para consumo de combustível não foram afetados de forma negativa.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Verificou-se por meio dos resultados apresentados que a metodologia de medição de aceleração na saída do bloco pode ser aplicada para este caso específico em substituição a medição de ruído propriamente dito. Observou-se que a redução de aceleração conseguida nos experimentos resultou na redução de 2 dB (A) na potência sonora e melhoria na qualidade sonora, resultados que são considerados bastante significativos.

Observou-se ainda que a metodologia de ruído de combustão por meio da pressão de combustão, neste caso específico, não apresentou correlação com a potência sonora emitida pelo motor, apresentou um acréscimo de 0,8 dB (A). Acredita-se que o valor de ruído total que é apresentado pelo software não seja o mais recomendado para ser utilizado em trabalhos neste sentido, sugere-se a utilização dos valores em uma determinada faixa de frequência relacionada a estrutura do bloco do motor, para verificar-se a eficácia dos resultados.

Concluiu-se também que alguns dos fatores escolhidos para o primeiro planejamento de triagem de fatores não tem influência no ruído emitido por motores Diesel caso específico do ponto da pós-injeção e do débito da pós-injeção, porém, observou-se também que os quatro fatores que foram escolhidos no planejamento de triagem e utilizados no planejamento de otimização tem muita influência no ruído emitido.

Já o planejamento composto central de otimização mostrou o comportamento quadrático das variáveis respostas e também se mostrou uma ferramenta que pode ser muito útil para o desenvolvimento de motores de combustão interna, devido ao fato de proporcionar resultados satisfatórios com reduzido número de horas de trabalho, o que acaba reduzindo, como consequência, o custo agregado do desenvolvimento.

Outras conclusões sobre planejamento multivariado de experimentos são:

Ferramentas estatísticas de modelamento podem ser amplamente utilizadas em desenvolvimento de combustão nos motores Diesel e em diversas outras áreas;

A aplicação de planejamento de experimentos possibilita encontrar uma solução otimizada para um determinado problema com um tempo de desenvolvimento significativamente menor;

Planejamento de experimentos do tipo fatorial são úteis no início de um determinado desenvolvimento para conhecer os fatores realmente significativos em estudo;

Planejamento de experimentos fracionados devem ser utilizados quando o número de fatores a serem analisados são relativamente elevados;

Experimentos do tipo composto central possibilitam a análise de fatores com comportamentos lineares e não lineares permitindo a determinação das superfícies de resposta.

Em relação aos testes de júri para avaliação da melhoria na qualidade sonora concluiu-se que os resultados foram extremamente satisfatórios devido ao fato de ter sido verificado uma excelente correlação entre os resultados quantitativos e qualitativos;

Pode-se verificar também que a emissão de gases de escape sofreu um acréscimo considerável nos valores de hidrocarbonetos e monóxido de carbono indicando a necessidade de um trabalho adicional para minimizar estes efeitos. Já os valores de consumo de combustível sofreram uma redução indicando também a necessidade de trabalho adicional, pois esta redução provavelmente deve-se ao fato do aumento de hidrocarbonetos e monóxido de carbono.

Como sugestões para trabalhos futuros seguem :

Verificação da melhor faixa de frequência para ser utilizada no equipamento de medição de ruído de combustão, por meio de pressão de combustão;

Estudo em conjunto das variáveis de ruído e das variáveis de emissão de poluentes e consumo de combustível, para que seja encontrada uma solução otimizada para todas as variáveis resposta e como consequência uma configuração de parâmetros de injeção, que atenda tanto os requisitos de ruído como os requisitos de emissões de gases;

Realizar o estudo sugerido anteriormente em outras condições do motor para verificação da influência dos parâmetros de injeção em outras faixas de rotação, assim como verificar as parcelas de contribuição do ruído mecânico e do ruído de combustão em todas as condições do motor.

REFERÊNCIAS

BARROS NETO, B.; BRUNS, R.E.; SCARMINIO, I.S. **Como fazer experimentos**. 3. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2007. 480 p.

BRIGANTINI, J.A.D. **Proposta para melhoria do processo de desenvolvimento de produto de uma empresa fabricante de motores diesel**. 2008. 120p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, POLI-USP, São Paulo.

BRITO, L. A. P. F. **Correções na determinação do nível de potência sonora obtido através da técnica intensimetria**. 2006. 181p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas

BRUNETE, F.; GARCIA, O. **Motores de combustão interna**. 2. ed. São Bernardo do Campo: Editora da FEI, 1992. 395 p.

CONZATTI, A.F. **Estudo numérico e experimental dos filtros acústicos**. 2002. 140p. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.

ANDRADE, A. L. **A técnica do diferencial semântico para a avaliação de fenômenos acústicos no interior de aeronaves**. 2007. 105p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em psicologia, Florianópolis.

DECTONG,R.G.;PARSONS,N.E. Piston Slap Noise Reduction in a V Block Diesel Engine. SAE International, **SAE Technical Paper 820240**, 1982.

ERIKSSON, I. **Design of experiments: principles and applications**. [s.l.]: Umetrics Academy, 2008. 459 p.

GALDAMEZ, E.V.C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. 2002. 133p . Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Produção, Faculdade de Engenharia, USP, São Carlos.

GERGES, S.N.Y. **Ruídos e vibrações veiculares**. 1.ed. Florianopolis: NR, 2005.739 p.

GLYNIADAKIS, G.V. **Análise de redução do ruído de batida de dentes da engrenagem do compressor do motor diesel**. 2009. 98p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GLYNIADAKIS, G.V.; SOUZA, A. B.; PECULA, M. P.; RODRIGUES, M. C. Noise Source Identification Techniques Comparison. **SAE Paper 2008-36-0202**, 2008.

GLYNIADAKIS, G.V.; SOUZA, A. B.; PECULA, M. P.; RODRIGUES, M. C.; PRADA, A. T. Engine Timing System Whine Noise. **SAE Paper 2007-01-2526**, 2007.

LOURENÇO, A.A.M. **Planejamento de experimentos aplicados ao desenvolvimento de combustão em motores diesel**. 2008. 41p. Monografia (Especialização) – Departamento de estatística, Universidade Metodista de São Paulo, São Bernardo do Campo.

MACEDO, R.M.P.R. **Aplicação da metodologia de planejamento de experimentos para formulação de massas cerâmicas para telhas**. 2007. 117p. Tese (Doutorado) - Centro de Ciências Exatas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

MACHADO, A. **Análise experimental do ruído no habitáculo de ônibus urbano na cidade de Curitiba**. 2003. 139. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MADUREIRA, O.M. **Ruído em veículos**. 2004. 45p. Apostila de treinamento Smarttech

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1991. 649 p

MYERS, R. H.; MONTGOMERY D. C. **Response surface methodology**. New York, John Wiley & Sons, 1995.

NOBREGA, M. P.; VIVACQUA, C.A. **Estudo comparativo de gráficos de probabilidade normal para análise de experimentos fatoriais não replicados**. Departamento de Matemática e Estatística, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal

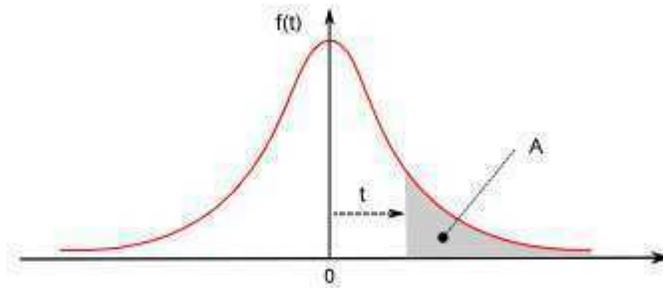
PACHECO, E. A.; BARBOSA, W. A.; ZANNIM, P. H.T. Quantificação do Ruído de Combustão Usando Três Tipos Diferentes de Combustíveis de Competição pelo Método de Intensidade Sonora. **XX Encontro da SOBRAC** . Rio de Janeiro 2002.

PECULA, M.M. **Estudo do erro de transmissão e ruído de engrenamento do sistema de distribuição de um motor diesel**. 2010. 87p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SANCHES, R.A. **Procedimento para o desenvolvimento de tecidos de malha a partir de planejamento de experimentos**. 2006. 212p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

STUCKLSCHWAIGER, W.; HARGREAVES, N.M. ; BEIDL, C.V.; NVH considerations to make modern Diesel engines in a attractive alternative for SUV powertrains. **SAE paper 1999-01-1772**. 1999.

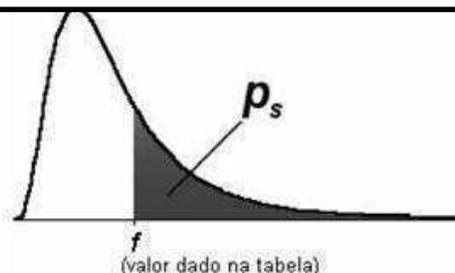
ANEXO A – Tabela da distribuição t-Student



GL	Fração p em por cento		
	90	95	99
1	6,31	12,71	63,66
2	2,92	4,30	9,92
3	2,35	3,18	5,84
4	2,13	2,78	4,60
5	2,02	2,57	4,03
6	1,94	2,45	3,71
7	1,89	2,39	3,50
8	1,86	2,31	3,36
9	1,83	2,26	3,25
10	1,81	2,23	3,17
11	1,80	2,20	3,11
12	1,78	2,18	3,05
13	1,77	2,16	3,01
14	1,76	2,14	2,98
15	1,75	2,13	2,95
16	1,75	2,12	2,92
17	1,74	2,11	2,90
18	1,73	2,10	2,88
19	1,73	2,09	2,86
20	1,72	2,09	2,85
25	1,71	2,06	2,79
30	1,70	2,04	2,75
35	1,70	2,03	2,72
40	1,68	2,02	2,70
45	1,68	2,01	2,62
50	1,68	2,01	2,68
100	1,660	1,984	2,626
∞	1,645	1,960	2,576

ANEXO B – Tabela da distribuição F

DISTRIBUIÇÃO F



		Degrees of freedom in numerator (df1)											
		p	1	2	3	4	5	6	7	8	12	24	1000
Degrees of freedom in denominator (df2)	1	0.100	39.88	49.50	53.59	55.83	57.24	58.20	58.91	59.44	60.71	62.00	63.30
		0.050	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	243.9	249.1	254.2
		0.025	647.8	799.5	864.2	899.6	921.8	937.1	948.2	958.6	976.7	997.3	1017.8
		0.010	4052	4999	5404	5624	5764	5859	5928	5981	6107	6234	6363
		0.001	405312	499725	540257	562668	576496	586033	593165	597954	610352	623703	638101
	2	0.100	8.53	9.00	9.16	9.24	9.29	9.33	9.35	9.37	9.41	9.45	9.49
		0.050	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.41	19.45	19.49
		0.025	39.51	39.00	39.17	39.25	39.30	39.33	39.36	39.37	39.41	39.46	39.50
		0.010	98.50	99.00	99.16	99.25	99.30	99.33	99.36	99.38	99.42	99.46	99.50
		0.001	998.38	998.84	999.31	999.31	999.31	999.31	999.31	999.31	999.31	999.31	999.31
	3	0.100	5.54	5.46	5.39	5.34	5.31	5.28	5.27	5.25	5.22	5.18	5.13
		0.050	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.74	8.64	8.53
		0.025	17.44	16.04	15.44	15.10	14.89	14.73	14.62	14.54	14.34	14.12	13.91
		0.010	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.05	26.60	26.14
		0.001	167.06	148.49	141.10	137.08	134.58	132.83	131.61	130.62	128.32	125.93	123.52
	4	0.100	4.54	4.32	4.19	4.11	4.05	4.01	3.98	3.95	3.90	3.83	3.76
		0.050	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	5.91	5.77	5.63
		0.025	12.22	10.65	9.98	9.60	9.36	9.20	9.07	8.98	8.75	8.51	8.26
		0.010	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.37	13.93	13.47
		0.001	74.13	61.25	56.17	53.43	51.72	50.52	49.65	49.00	47.41	45.77	44.09
	5	0.100	4.06	3.78	3.62	3.52	3.45	3.40	3.37	3.34	3.27	3.19	3.11
		0.050	6.81	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.68	4.53	4.37
		0.025	10.01	8.43	7.76	7.39	7.15	6.98	6.85	6.76	6.52	6.28	6.02
		0.010	18.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	9.89	9.47	9.03
		0.001	47.18	37.12	33.20	31.08	29.75	28.93	28.17	27.65	26.42	25.13	23.82
	6	0.100	3.78	3.46	3.29	3.18	3.11	3.05	3.01	2.99	2.90	2.82	2.72
		0.050	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.00	3.84	3.67
		0.025	8.81	7.26	6.60	6.23	5.99	5.82	5.70	5.60	5.37	5.12	4.86
		0.010	13.75	10.82	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.72	7.31	6.89
		0.001	35.51	27.00	23.71	21.92	20.80	20.03	19.46	19.03	17.99	16.90	15.77
	7	0.100	3.59	3.26	3.07	2.96	2.88	2.83	2.78	2.75	2.67	2.58	2.47
		0.050	5.59	4.74	4.36	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.57	3.41	3.23
		0.025	8.07	6.54	5.89	5.52	5.29	5.12	4.99	4.90	4.67	4.41	4.15
		0.010	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.47	6.07	5.66
		0.001	29.25	21.69	18.77	17.20	16.21	15.52	15.02	14.63	13.71	12.73	11.72
	8	0.100	3.46	3.11	2.92	2.81	2.73	2.67	2.62	2.59	2.50	2.40	2.30
		0.050	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.28	3.12	2.93
		0.025	7.57	6.06	5.42	5.05	4.82	4.65	4.53	4.43	4.20	3.95	3.68
		0.010	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.67	5.28	4.87
		0.001	25.41	18.49	15.83	14.38	13.48	12.86	12.40	12.05	11.19	10.30	9.36
	9	0.100	3.36	3.01	2.81	2.69	2.61	2.55	2.51	2.47	2.38	2.28	2.16
		0.050	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.07	2.90	2.71
		0.025	7.21	5.71	5.08	4.72	4.48	4.32	4.20	4.10	3.87	3.61	3.34
		0.010	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.11	4.73	4.32
		0.001	22.86	16.39	13.90	12.56	11.71	11.13	10.70	10.37	9.57	8.72	7.84