

# Relatório de Estágio

## UFCG 2010.1



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Engenharia de NVH (Ruídos, vibrações e asperezas)

Ana Júlia Rodrigues Fernandes de Oliveira

|                              |                                 |
|------------------------------|---------------------------------|
| <b>Data da Apresentação</b>  | 05/04/2010                      |
| <b>Professor Orientador:</b> | Raimundo Carlos Silvério Freire |
| <b>Área:</b>                 | Telecomunicações                |

Ana Júlia Rodrigues Fernandes de Oliveira

# Engenharia de NVH (Ruídos, vibrações e asperezas)

Relatório de estágio supervisionado realizado na empresa Ford e submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Campina Grande, Paraíba  
Abril de 2010

# Relatório de estágio :Engenharia de NVH (Ruídos, vibrações e asperezas)

Data de Aprovação:        \_\_ / \_\_ / \_\_

BANCA EXAMINADORA:

Raimundo Carlos Silvério Freire  
Universidade Federal de Campina Grande  
**Professor Orientador**

Professor Convidado  
Universidade Federal de Campina Grande  
**Avaliador**

Campina Grande – PB,  
Abril de 2010

## Sumário

|  |    |
|--|----|
| Resumo.....  | 02 |
| Introdução.....                                    | 03 |
| Capítulo 1- Som e ruído.....                       | 04 |
| 1.1- Propriedades físicas do som.....              | 04 |
| 1.2 – Unidade de medição.....                      | 07 |
| 1.3-Fontes de som.....                             | 08 |
| 1.4-Propagação e medição total.....                | 09 |
| 1.5- Tipos de ruído.....                           | 13 |
| 1.5.1- Ruído Branco.....                           | 13 |
| 1.5.2- Ruído Rosa.....                             | 14 |
| Capítulo 2-Vibração.....                           | 15 |
| 2.1- Fontes de excitação.....                      | 17 |
| 2.2- Graus de Liberdade .....                      | 17 |
| 2.3- Quanto a existência ou não de forçamento..... | 17 |
| 2.4- Quanto a linearidade.....                     | 18 |
| 2.5- Quanto a previsibilidade de ocorrência.....   | 19 |
| 2.6- Propriedades mais importantes.....            | 19 |
| Capítulo 3-Medicao de NVH.....                     | 21 |
| 3.1- Escala em decibéis.....                       | 21 |
| 3.2- Domínio do tempo e da Frequência.....         | 22 |
| 3.3- Estados transientes e estacionários.....      | 24 |
| 3.4- Ressonâncias.....                             | 25 |
| 3.5- Ordens.....                                   | 26 |
| 3.6- Watterfall.....                               | 28 |
| 3.7- Velocidade do Motor, ordem e frequência.....  | 28 |
| 3.8- Domínio Modal.....                            | 29 |
| 3.9- Psicoacústica e qualidade do som .....        | 30 |
| 3.10- Ferramentas para avaliação do som.....       | 30 |
| 3.11- Fonte – Caminho – Resposta.....              | 30 |
| Capítulo 4-Powertrain NVH.....                     | 34 |
| 4.1- Subsistemas.....                              | 34 |
| 4.1.1- Acelerador.....                             | 34 |
| 4.1.2- Filtro.....                                 | 35 |
| 4.1.3- Ventilação do motor e da transmissão.....   | 37 |
| 4.1.4- Subsistema de escapamento.....              | 39 |
| 4.1.5- Subsistema de combustível.....              | 41 |
| 4.1.6- Coxins do motor.....                        | 41 |
| Capítulo 5-Prevencao Diagnostico e Controle.....   | 43 |
| 5.1- Isolamento.....                               | 43 |
| 5.2- Barreira de Isolamento Acústico.....          | 44 |
| 5.3- Amortecimento estrutural.....                 | 45 |
| Capítulo 6- CAE.....                               | 46 |
| Capítulo 7-Materiais e Métodos.....                | 47 |
| Conclusão.....                                     | 49 |
| Bibliografia.....                                  | 50 |

## Resumo

O presente relatório de estágio é objeto de estudo de uma disciplina de estágio supervisionado do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, realizado na empresa Ford South America Operations – FSAO. O estágio é na área de Desenvolvimento do Produto, no setor de Powertrain NVH (Noise Vibration and harshness – Ruído vibração e aspereza).

O Assunto tratado no relatório será a parte teórica sem detalhes profundos das atividades realizadas na empresa, pelo motivo dessas atividades e os programas (projetos) relacionados a estas serem confidenciais. O relatório é composto no primeiro e segundo capítulo da teoria de som e de vibrações, seguida por um esclarecimento dos termos e teorias necessárias para desenvolvimento do trabalho no dia a dia da empresa.

No capítulo quatro tem-se uma rápida explicação dos componentes de powertrain, e para finalizar, algumas soluções de problemas de NVH e uma explicação do que é CAE (simulação), parte muito importante para a área de NVH.

O Estágio foi composto de uma etapa intensiva de treinamentos, (na área de powertrain mais geral e na área específica de NVH), da análise de ruídos e vibrações de um projeto de um carro novo que é desenvolvido atualmente na empresa, e da conclusão desta análise, sugerindo soluções quando necessário, e quando não, aprovando os subsistemas.

## Introdução

NVH vem do ingles “noise vibration and harshness” e refere-se a:

- Ruído: o que se ouve
- Vibração: o que se sente e se vê (ou seja, o movimento)
- Aspereza

NVH interior se refere a ruídos, vibrações e sensações que os ocupantes do veículo sentem, tais como o ruído da cabine, do volante e as vibrações do banco e do chão. Em contraste, NVH exterior refere-se ao ruído que irradia fora do veículo e inclui o ruído de passagem. Coletivamente, os ruídos NVH interior e exterior, vibrações e sensações são conhecidas como os fenômenos de NVH.

As fontes mais comuns dos fenômenos de NVH são o motor, a transmissão, os freios, sistema de escape, ventiladores de refrigeração, o alternador, e o fluxo de ar ao redor do veículo.

Engenharia de NVH é o campo de medição e modificação de ruído e características das vibração produzida por estas diferentes fontes no veículo. “Um objetivo-chave da engenharia NVH é garantir conforto aos ocupantes do veículo”.

## Capítulo 1- Som e ruído

O som é uma parte comum da nossa vida cotidiana que nós raramente apreciamos todas as suas funções. Ele fornece experiências prazerosas, como ouvir música ou escutar o canto dos pássaros. Ele permite a comunicação falada e pode alertar ou advertir-nos, por exemplo, com o toque de um telefone ou uma sirene. E ainda mais, o som também nos permite fazer avaliações e diagnósticos de qualidade, como identificar o ruído das válvulas de um carro, ou o ranger de uma roda, etc.

Muitas vezes em nossa sociedade moderna, o som nos incomoda. Muitos sons são desagradáveis ou indesejados - estes são chamados de ruído. No entanto, o nível de aborrecimento não depende apenas da qualidade do som, mas também da nossa atitude para com ele. Por exemplo, o tipo de música apreciada por algumas pessoas poderia ser considerado como ruído por outros, especialmente se ele for alto. Mas o som não precisa ser alto para incomodar. Um assoalho rangendo, um arranhão em um papel, ou o som intermitente de uma torneira pingando pode ser tão irritante quanto o ruído alto do trovão. O julgamento de intensidade dependerá também da hora e do dia. Por exemplo, um maior nível de ruído será tolerado durante o dia do que em noite.

O Som também pode danificar e destruir. Um estrondo sônico pode quebrar janelas e fazer cair as paredes de gesso. Mas o caso mais lamentável é quando o som causa danos ao mecanismo projetado para recebê-lo, o ouvido humano.

O som é definido como qualquer variação de pressão que o ouvido pode detectar variando dos mais fracos até aos níveis sonoros que podem prejudicar a audição.

O estudo do som é chamado psicoacústica e abrange todos os domínios de produção do som, da propagação do som até a recepção de som.

### 1.1 - Propriedades físicas do som

O ruído é uma parte inevitável da vida cotidiana, e o desenvolvimento tecnológico resultou em um aumento no nível de ruído das máquinas, fábricas, tráfego, etc. Por isso é importante que os passos para a redução de ruído sejam tomados, de modo que o ruído torne-se algo que possamos aceitar. Nesta luta contra o ruído, temos que ser capazes de avaliar adequadamente o ruído, ou seja, realizar medição de som de confiança. No entanto, antes de medições de ruído serem realizadas, é importante estar familiarizado com a terminologia e os princípios básicos da medição do som.

Antes de descrever as propriedades físicas do som, vamos fazer uma analogia entre o som, outra quantidade física muito conhecida: o calor.

Um aquecedor elétrico produz uma certa quantidade de energia por unidade de tempo Joule / s] ou seja, ele tem uma certa potência em W [Watt = Joule / seg]. Esta é uma medida básica de quanto calor pode produzir e é independente do ambiente. Os fluxos de energia longe do aquecedor podem elevar a temperatura em outras partes da sala e esta temperatura pode então ser medido com um termômetro simples em ° C ou ° F. No entanto, a temperatura em um determinado ponto não depende apenas da potência do aquecedor e a distância entre o aquecedor, mas também da quantidade de calor absorvido pelas paredes, e a quantidade de calor transferido através das paredes e janelas para o ambiente.

Uma fonte sonora produz certa quantidade de energia sonora por unidade de tempo [Joule / seg], ou seja, ele tem uma potência de som em certos Ws [Watt = Joule / seg]. Esta é uma medida básica de quanta energia acústica pode produzida, e é independente de seu ambiente. Os fluxos de energia sonora distantes da fonte dão origem a uma certa pressão do som na sala. Quando a pressão do som é medida, não depende apenas da potência da fonte e da distância entre a origem e o ponto de medição, mas também da quantidade de energia sonora absorvida pelas paredes e do montante de energia sonora transferido através das paredes e janelas, etc.

Quando o som é produzido por uma fonte de som com uma potência de som, P, ocorre uma transferência de energia da fonte para as moléculas de ar adjacentes. Esta energia é transferida para as moléculas periféricas. Assim, a energia se espalha para longe da fonte, diferente das ondulações em um lago. A taxa na qual este fluxo de energia se propaga em uma determinada direção por uma determinada área é chamada de intensidade do som, I.

A energia que passa por um ponto específico na área em torno da fonte vai dar origem a uma pressão sonora, p, naquele ponto. r é a densidade do ar, c é a velocidade do som.

Note que a intensidade sonora é uma grandeza vetorial - tem magnitude, e direção.

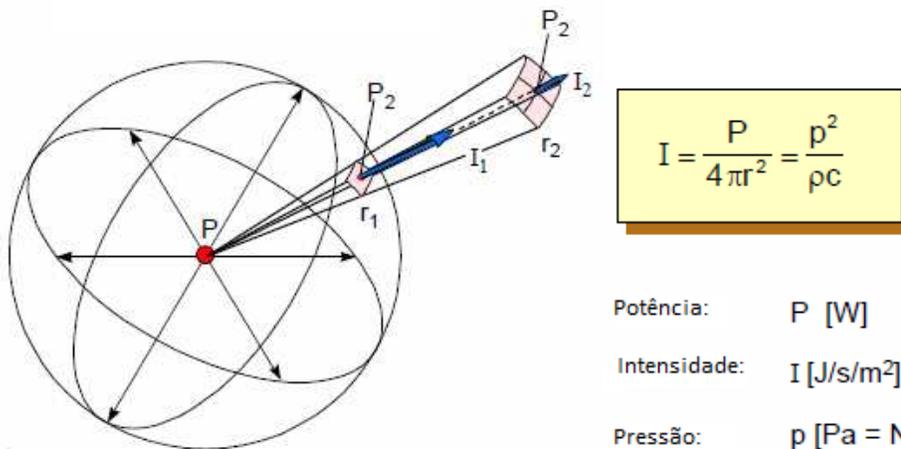


Figura 1 – Potencia, Intensidade e Pressão do som

Intensidade de som e de pressão sonora pode ser medida diretamente por instrumentação adequada. Potência do som pode ser calculada a partir dos valores

medidos dos níveis de pressão sonora ou intensidade do som e com um conhecimento da área sobre a qual as medições foram feitas. O principal uso dessas medições é para a avaliação do ruído das máquinas, etc.

Intensidade do som é utilizada principalmente para localização e avaliação das fontes de ruído. Quando se trata de avaliação da nocividade e aborrecimento de fontes de ruído, a pressão sonora, é um parâmetro importante.

Quando uma fonte sonora, como um diapásão vibra, ele causa variações de pressão no ar circundante. A emissão destas variações de pressão podem ser comparadas com as ondas em um lago causadas por uma pedra jogada na água. A ondulação se propaga a partir do ponto onde a pedra entra. No entanto, a água em si não se afasta do centro. A água fica onde está, se movendo para cima e para baixo para produzir as ondulações circulares sobre a superfície. O som faz a mesma coisa. A pedra é a fonte, a lagoa é o ar, e as ondulações são os resultados da onda sonora.

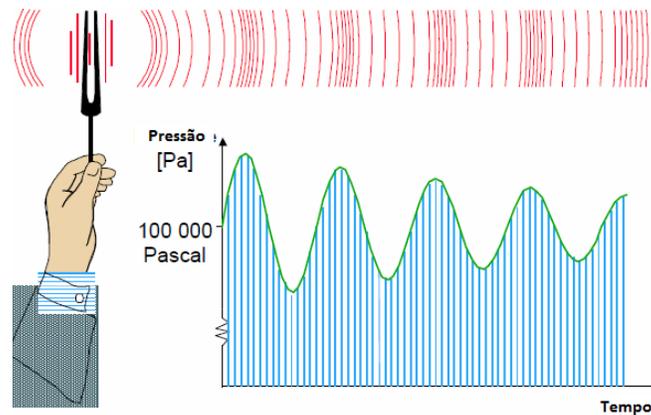


Figura 2 – Vibração de pressão do diapásão

As vibrações de pressão acústica são sobrepostas em torno pressão de ar que tem um valor de  $10^5$  Pascal.

## 1.2- Unidade de medição

Em comparação com a pressão do ar estático, este som audível tem variações de pressão muito pequenas, variando de cerca de 20 mPa ( $10^{-6}$  Pa) a 100 Pa. 20 MPA é o som que pode ser ouvido por uma pessoa comum e é portanto, chamado de limiar de audição. A pressão sonora de aproximadamente 100 Pa é tão alto que causa dor, e por isso é chamado de limiar da dor. A relação entre estes dois extremos é mais de um milhão para 1. A aplicação direta de escalas linear, em Pa, para a medição do som pressão leva à utilização de números enormes. Além disso, o ouvido não responde de forma linear, mas logarítmica a cada estímulo.

Por estes motivos, expressamos os parâmetros acústicos como uma relação logarítmica do valor medido para um valor de referência - a relação logarítmica já detalhada acima, chamada decibel ou apenas dB.

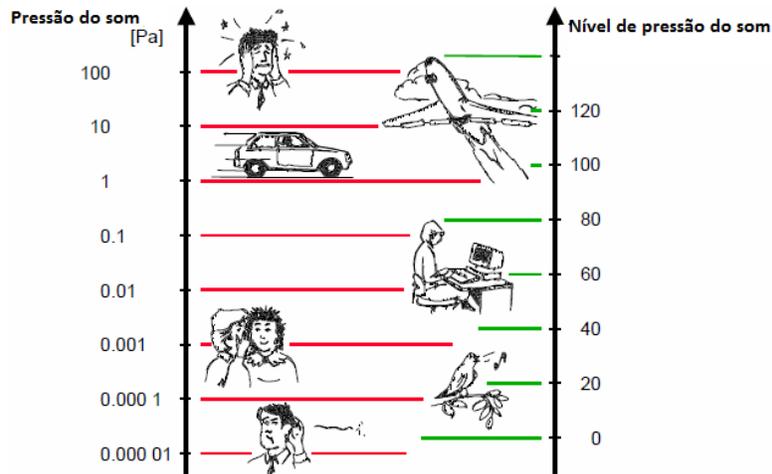


Figura 3 – Escala de pressão do som X Nível de pressão do som

A vantagem de usar dB é claramente vista quando uma escala em dB é desenhada na ilustração anterior. A escala linear com a seus grandes e pesados números é convertida em uma escala muito mais controlável de 0 dB no limiar de audição (mPa 20) a 130 dB no limiar da dor.

Um aumento de 3 dB na pressão (correspondente a 1,4 vezes) é perceptível. Uma mudança de 10 dB ou 3,16 vezes é percebida como duas vezes mais alto. Não existe uma relação linear entre o nível de intensidade sonora em dB e a percepção pelo homem.

Em vez de usar a fórmula de conversão entre os valores de pressão e dB níveis (ou vice-versa) é possível usar um gráfico simples para a conversão. O gráfico aqui é baseado em valores dB e MPa e as linhas tracejadas dar uma exemplo de como converter 1 Pa a 94 dB.

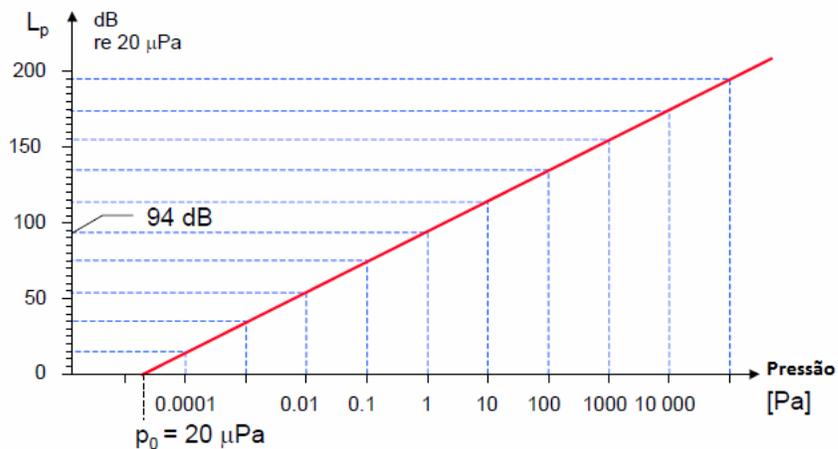


Figura 4 – Conversão de Pressão para dB

A conversão também pode ser feita com o auxílio de uma tabela como a mostrada. Observe que ela opera com valores positivos e negativos de dB. Para valores de pressão <1, os valores são negativos e para razões de pressão > 1, os valores são

positivos. Ao comparar dois níveis de pressão sonora medido, onde a referência é o mais quieto, a fonte terá uma medida positiva de dB e vice-versa.

| Taxa de Pressão | - db + | Taxa de Pressão | Taxa de Pressão | - db + | Taxa de Pressão |
|-----------------|--------|-----------------|-----------------|--------|-----------------|
| 1.00            | 0.0    | 1.000           | 0.501           | 6      | 1.995           |
| 0.989           | 0.1    | 1.012           | 0.447           | 7      | 2.239           |
| 0.977           | 0.2    | 1.023           | 0.398           | 7      | 2.512           |
| 0.966           | 0.3    | 1.035           | 0.355           | 9      | 2.818           |
| 0.955           | 0.4    | 1.047           | 0.316           | 10     | 3.162           |
| 0.944           | 0.5    | 1.059           | 0.251           | 12     | 3.981           |
| 0.933           | 0.6    | 1.072           | 0.200           | 14     | 5.012           |
| 0.923           | 0.7    | 1.084           | 1.158           | 16     | 6.310           |
| 0.912           | 0.8    | 1.096           | 0.126           | 18     | 7.943           |
| 0.902           | 0.9    | 1.109           | 0.100           | 20     | 10.000          |
| 0.891           | 1.0    | 1.122           | 0.0316          | 30     | 31.62           |
| 0.841           | 1.5    | 1.189           | 0.0100          | 40     | 100             |
| 0.794           | 2.0    | 1.259           | 0.0032          | 50     | 316.2           |
| 0.708           | 3.0    | 1.413           | $10^{-3}$       | 60     | $10^3$          |
| 0.631           | 4.0    | 1.585           | $10^{-4}$       | 80     | $10^4$          |
| 0.562           | 5.0    | 1.778           | $10^{-5}$       | 100    | $10^5$          |

Figura 5 – Tabela de conversão de Taxa de pressão para dB

### 1.3- Fontes de som

A fonte que olhamos mais cedo é chamada de uma fonte pontual e, para tal fonte, foi definido que a pressão do som cai à metade de seu valor quando a distância para a fonte é dobrada. Isto corresponde a uma queda na pressão sonora de 6 dB.

Outro tipo de fonte é a fonte linear, que poderia ser comparado a um tubo fluido turbulento, ou a uma estrada com um fluxo de tráfego.

A pressão sonora de um fonte linear cai cerca de 3 dB com a duplicação da distância com relação a fonte, isto ocorre porque o som se espalha a partir da fonte como uma onda com uma direção perpendicular à linha da origem.

O tipo mais raro de ruído é o que tem como fonte uma fonte plana. Uma fonte plana será, em princípio constituída por uma energia que é irradiada para um tubo de criação de uma onda plana. Supondo que não houve nenhuma perda de energia através das paredes do tubo, a intensidade, ou seja, a energia acústica que flui através do tubo, é independente da distância da fonte. Desde que a intensidade seja a mesma em toda parte o tubo, o nível de pressão sonora não vai cair com o aumento da distância do pistão.

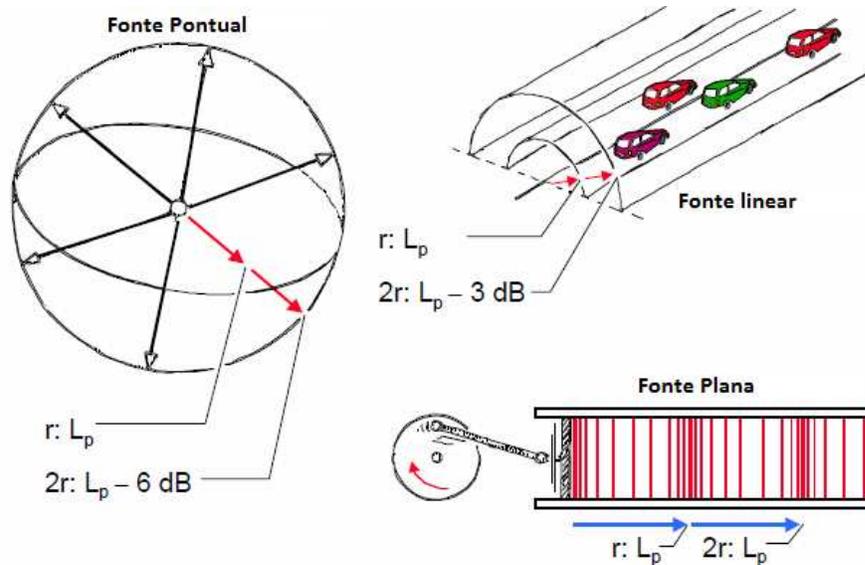


Figura 6 – Fontes de som

### 1.4- Propagação e medição total

Quando o som irradiado em uma sala atinge a superfície, ou seja, paredes, teto e piso, parte da energia será refletida e algumas serão absorvidas, e outra transmitida através das superfícies.

Em uma sala com superfícies refletoras duras, toda a energia será refletida e uma só, chamada de campo difuso terá a energia sonora distribuída uniformemente em toda a sala. Este espaço de superfícies duras é chamado de uma sala de reverberação.

Em uma sala com superfícies altamente absorventes toda a energia será absorvida pela as superfícies e a energia sonora na sala se espalhará para longe da fonte como se a fonte estivesse em um campo livre. Este espaço é chamado de uma sala anecóica.

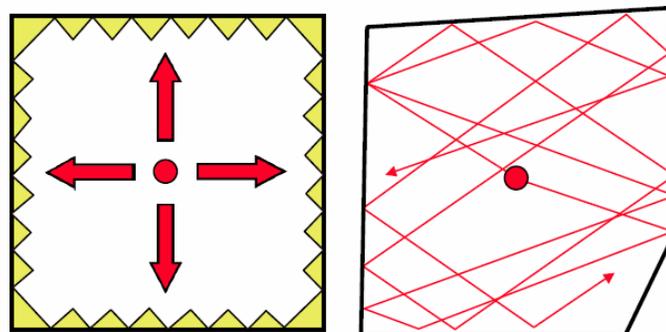


Figura 7 – Propagação em uma sala anecóica e em uma sala reverberação

Em um campo de pressão, quando o comprimento de onda é longo quando comparado com as dimensões do recinto, a pressão é uniforme no recinto. Isso é usado em calibradores de pressão sonora.

Na prática, a maioria das medições de som nem são feitas em quartos que são anecóicos nem reverberantes. Isto torna difícil encontrar a posição correta de medição

em que a emissão de ruído a partir de uma dada fonte deve ser medido.

A prática normal é dividir a área em torno de uma fonte de ruído, por exemplo uma máquina em três campos diferentes:

Campo próximo.

Campo livre.

Campo reverberante.

O campo próximo é a área mais próxima à máquina, onde o nível de pressão pode variar significativamente com uma pequena mudança na posição. A área estende-se a uma distância inferior ao comprimento de onda da menor frequência emitida a partir da máquina, ou ao menos duas vezes maior que a dimensão da máquina. Medições da pressão do som nesta região devem ser evitadas.

No campo livre o som se comporta como se a céu aberto, sem refletir superfícies de interferência com a sua propagação. Isto significa que nesta região o nível de som cai 6 dB com a duplicação da distância da fonte.

No campo reverberante, as reflexões das paredes e outros objetos podem ser tão forte como o som direto da máquina.

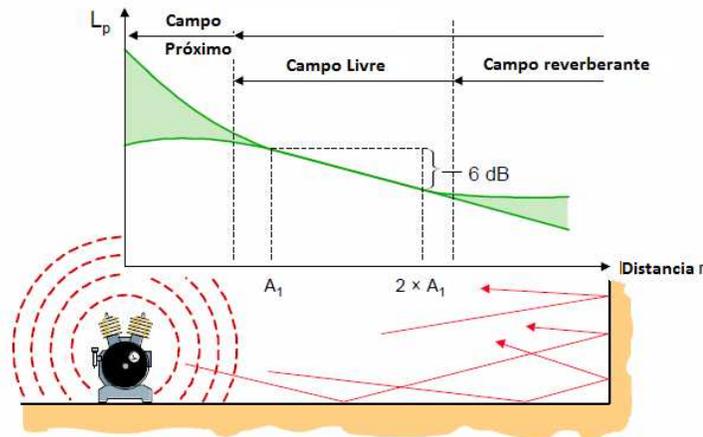


Figura 8 – Campos ao redor de uma fonte

O índice de pressão sonora  $L_p$  de uma superfície refletora será "espelhado" e devem ser considerados dois níveis de pressão com a mesma magnitude e fase. Assim, a pressão sonora próxima à superfície  $L$  será duplicada:  
 $L = L_p + 6\text{dB}$

Quando duas fontes irradiam energia sonora, ambas contribuem para o nível de pressão sonora nos arredores das fontes. Se eles irradiam a mesma quantidade de energia para um ponto equidistante de ambas as fontes, é considerado então que a intensidade sonora nesse ponto será duas vezes mais elevado do que quando apenas uma fonte de radiação está irradiando.

Observe que o resultado ao adicionar a contribuição de duas (ou mais) fontes de som não é a soma numérica dos valores individuais dB. No exemplo aqui, se  $x$  é de 50 dB o nível de pressão sonora total, quando ambas as fontes estiver operando será 53 dB.

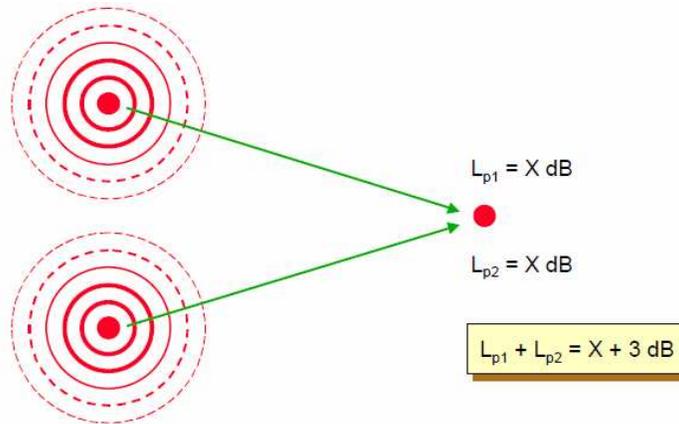


Figura 9 – Soma de duas fontes

Se existir a contribuição de duas fontes diferentes, o nível de pressão sonora total pode ser encontrado através da conversão dos valores individuais em dB para valores lineares, acrescentando estas e convertendo de volta para dB. Mas um método um tanto mais fácil é usar a curva simples para além dos níveis de dB.

Para utilizar a curva deve-se proceder como segue:

1. Calcular a diferença,  $DL$ , entre os dois níveis de pressão sonora.
2. Utilizar a curva para encontrar  $L +$ .
3. Adicionar ao mais alto nível para conseguir o nível total. No exemplo mostrado aqui  $DL = 4 \text{ dB}$  qual  $L +$  é encontrado para ser 1,4 dB e  $L_t = 56,4 \text{ dB}$ . Note-se que uma diferença de  $DL = 0$  corresponde à situação mostrada na ilustração anterior, em 3 dB foi adicionada ao nível causada por um fonte sozinho.

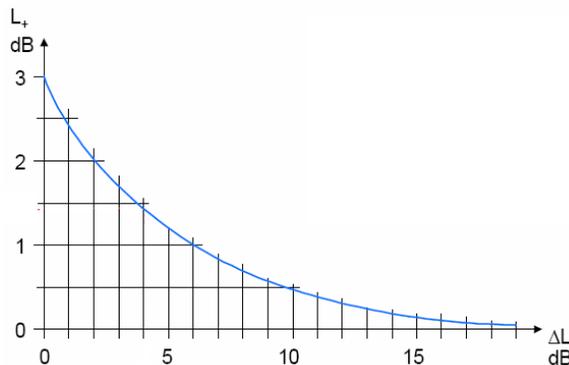


Figura 10 – Gráfico para auxiliar subtração de ruídos

Se a diferença entre os dois níveis de pressão sonora for superior a 10 dB, a participação dos ruídos de origem podem ser descartada.

Em alguns casos é necessário subtrair os níveis de ruído. Isso poderia, por exemplo, ser o caso em que as medições do ruído de uma máquina especial, são realizadas na presença de ruído de fundo. Em seguida, é importante saber se o ruído medido é devido ao ruído de fundo, ruído da máquina, ou a influência combinada. O procedimento para fazer o ensaio é o seguinte:

1. Medida do efeito combinado do ruído da máquina e ruído de fundo,  $L_{S+N}$ .
2. Desligar a máquina e medir o ruído de fundo,  $L_N$ . Na maioria dos casos, é possível desligar a máquina sob teste, enquanto o ruído de fundo, normalmente, não pode ser desligado.
3. Finalmente calcular a diferença,  $DL = L_{S+N} - L_N$  e utilizar a seguinte curva simples para encontrar o correto nível de ruído causado pela máquina.

Se a DL é menor que 3 dB, o ruído de fundo é demasiado elevado para uma precisão de medição e o nível de ruído correto não pode ser encontrado até que o ruído de fundo seja reduzido. Se, por outro lado, a diferença é maior que 10 dB, o ruído de fundo pode ser ignorado. Se a diferença for entre 3 dB e 10 dB, o nível de ruído correto pode ser encontrado lendo o valor de DL sobre os eixos horizontal e depois lendo o valor de correção, L-off no eixo vertical. O nível de ruído causado por corrigir a máquina é agora encontrado subtraindo-L de  $L_{S+N}$ .

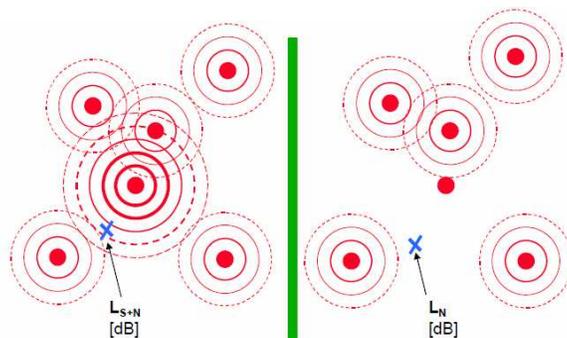


Figura 11 – Ruído medido na presença de muito ruído de fundo (esquerda) e o mesmo ruído subtraindo-se o ruído de fundo(direita).

A gama de audição humana é de 0 dB ( $2 \times 10^{-5}$  Pa = Limiar de audição) a 14 dB (limiar da dor)

## 1.5- Tipos de ruído

Os ruídos podem ser classificados de acordo com a frequência na qual eles se apresentam. Os principais tipos de ruído para o presente estudo são os ruídos branco e ruídos rosa.

### 1.5.1- Ruído branco

O **ruído branco** é um tipo de ruído produzido pela combinação simultânea de sons de todas as frequências. O adjetivo *branco* é utilizado para descrever este tipo de ruído em analogia ao funcionamento da luz branca, dado que esta é obtida por meio da combinação simultânea de todas as frequências cromáticas.

Por conter sons de todas as frequências, o ruído branco é frequentemente empregado para mascarar outros sons (imagine o seguinte exemplo: numa conversação entre duas pessoas, seu cérebro consegue captar claramente a voz do interlocutor e compreendê-la. Mesmo com três ou quatro interlocutores isso ainda é possível. Entretanto, se 1000 pessoas falam simultaneamente, não há como seu cérebro captar uma voz isoladamente. O efeito de 1000 pessoas falando simultaneamente, assim como o de um ventilador que é ligado em seu quarto para mascarar a conversa entre duas pessoas no quarto ao lado, ajuda a ilustrar algumas das aplicações do ruído branco). Acredita-se ainda que o ruído branco quando ouvido em volume baixo seja relaxante e por isso ele costuma ser utilizado em consultórios dentários e clínicas de psicologia para acalmar os pacientes.

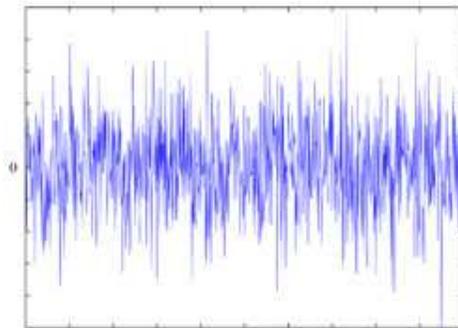


Figura 12 – Forma de onda de um ruído branco

### 1.5.2- Ruído rosa

Ruído Rosa ou Ruído de  $1/f$  é um sinal ou um processo onde o espectro de frequências como a densidade espectral de potência é inversamente proporcional à frequência do sinal. O termo originou-se pelas características desse ruído serem intermediárias entre o ruído branco ( $1/f^0$ ) e o ruído vermelho ( $1/f^2$ ), mais conhecido como ruído Browniano.

Na literatura científica o termo ruído de  $1/f$  ( $1/f$  noise em inglês) é algumas vezes referenciado para descrever um conjunto de sinais cujo espectro de potência do sinal é dado pela fórmula,

$$S(f) \propto 1/f^\alpha \quad (1)$$

onde  $f$  é a frequência com  $0 < \alpha < 2$ , onde  $\alpha$  usualmente aproxima-se de 1. O ruído do tipo "1/f" ocorre amplamente na natureza e é considerado de interesse em várias aplicações. Por sua característica de representar um ruído natural é frequentemente utilizado na acústica como simulador de programação sonora.

O ruído rosa caracteriza-se por manter a potência (energia) igual entre todas as oitavas sonoras (e também em qualquer outra escala logarítmica). Em termos de uma banda de frequência constante, o ruído rosa decai numa razão de 3 dB por oitava. Em altas frequências o ruído rosa nunca se torna dominante tal qual o ruído branco que possui energia constante em função da frequência (o ruído branco é rico na programação de altas frequências).

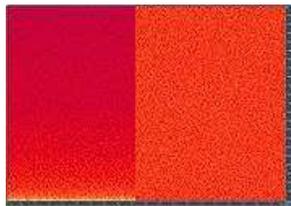


Figura 13 – Ruído rosa (esquerda) e ruído branco (direita) em um espectro de FFT

O sistema auditivo humano percebe as frequências conforme a escala de Bark e tem alta sensibilidade nas frequências de 2-4-kHz. A percepção da diferença entre o ruído rosa e o ruído branco é facilmente perceptível aos ouvidos humanos mesmo considerando que as maiores diferenças encontram-se nos extremos do espectro de frequências.

Equalizadores gráficos também dividem os sinais em bandas logarítmicas de frequências e sinalizam a potência em oitavas; engenheiros de NVH utilizam o ruído rosa para calibrar os sistemas de áudio ponderado a acústica do ambiente afim de obter uma resposta plana do conjunto sonoro.

Do ponto de vista teórico, a produção de um verdadeiro sinal de ruído rosa é impossível pois a energia desse sinal seria infinita, assim como para o ruído branco. Esses sinais são aproximados dentro da banda de frequências desejadas.

## Capítulo 2 - Vibração

Podemos encontrar a vibração no dia a dia, pois a maioria das atividades humanas envolve alguma forma de vibração. Os efeitos de vibração são geralmente indesejáveis, pois:

- Interfere nas funções das máquinas
- Causa carregamentos dinâmicos e aceleram o processo de fadiga
- Pode causar falha catastrófica
- Agride o homem e o meio ambiente

Por exemplo, nós escutamos porque o tímpano vibra, nós vemos porque ondas luminosas se propagam, a respiração está associada à vibração dos pulmões, os batimentos cardíacos são movimentos vibratórios do coração, a fala se fundamenta na vibração das cordas vocais e os movimentos humanos envolvem oscilações de braços e

pernas. E em muitos outros campos da atividade humana, fenômenos apresentam variáveis cujo comportamento é oscilatório (economia, biologia, química, física, etc.)

Já na engenharia, as aplicações das vibrações mecânicas são de grande importância nos tempos atuais. Projetos de máquinas, estruturas, motores, turbinas, sistemas de controle e outros, exigem que questões relacionadas a vibrações sejam levadas em conta.

Os primeiros estudos de vibrações em engenharia foram motivados pelo problema de balanceamento em motores. O desbalanceamento pode ser tanto devido a problemas de projeto como de fabricação e manutenção. O desbalanceamento em motores diesel, por exemplo, pode transmitir vibrações de tal grandeza através do solo que criam desconforto ambiental. As rodas de locomotivas podem sair até um centímetro dos trilhos devido a desbalanceamentos. Em turbinas, os engenheiros ainda não foram capazes de resolver uma grande parte dos problemas originados em pás e rotores. As estruturas projetadas para suportar máquinas centrífugas pesadas (motores, turbinas, bombas, compressores, etc.) também estão sujeitas a vibração. É possível que partes dessas estruturas sofram fadiga devido à variação cíclica de tensões induzidas.

A vibração também causa desgaste mais rápido de mancais de deslizamento, mancais de rolamento e engrenagens, provocando ruído excessivo. Em máquinas, a vibração provoca o afrouxamento de parafusos. Em processos de usinagem, a vibração pode causar trepidação, conduzindo a um pobre acabamento superficial. A literatura é rica de exemplos de falhas em sistemas causadas por vibrações excessivas em virtude de ressonância. Um destes exemplos é o da ponte de Tacoma Narrows nos Estados Unidos, que inaugurada em julho de 1940 colapsou em 7 de novembro do mesmo ano quando entrou em ressonância induzida pelo vento.

Em virtude dos efeitos devastadores que podem surgir em máquinas e estruturas, os testes vibratórios se tornaram um procedimento padrão no projeto e desenvolvimento da maioria dos sistemas em engenharia.



Figura 14 – Ilustração de um teste de vibração

Em muitos sistemas de engenharia, o ser humano atua como parte integrante do mesmo. A transmissão de vibração para o ser humano resulta em desconforto e perda de eficiência. Vibrações de painéis de instrumentos podem produzir mal funcionamento ou dificuldade de leitura de medidores. Portanto, um dos propósitos importantes do estudo de vibração é a redução dos níveis vibratórios através de projeto e montagem adequados das máquinas. Nesta interface, o engenheiro tenta projetar a máquina para que a mesma apresente níveis vibratórios baixos, enquanto o engenheiro estrutural tenta projetar a base da máquina de forma a assegurar que o efeito da vibração não se transmita.

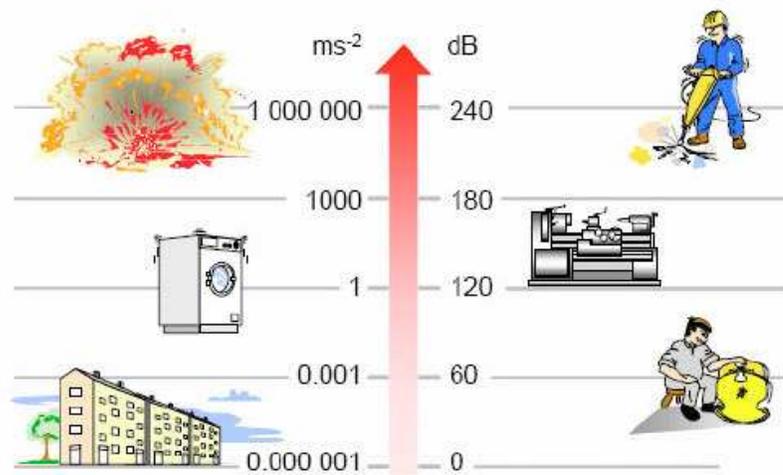


Figura 15 – Escala de níveis de vibrações

A vibração também pode ser utilizada com proveito em várias aplicações industriais. Esteiras transportadoras, peneiras vibratórias, compactadores, misturadores, máquinas de lavar e outras, utilizam a vibração em seu princípio de funcionamento.

A vibração de um sistema envolve a conversão de energia potencial em energia cinética e vice-versa. Se o sistema for amortecido, alguma energia é dissipada em cada ciclo de vibração, a qual deve ser reposta por uma fonte externa se um estado de vibração permanente deva ser mantido.

## 2.1- Fontes de excitação

Existem várias fontes de excitação que são as "causadoras" da vibração. Entre elas podemos citar

- Forças Internas do Mecanismo - motores
- Forças Elétricas – motores e geradores
- Vibração transmitida através do piso
- Excitação do Vento

Qualquer movimento que se repete ao considerarmos um certo intervalo de tempo pode ser analisado como vibração ou oscilação. A vibração, portanto, é o estudo do movimento de oscilação de um corpo em torno de uma posição de equilíbrio, bem como das forças e/ou momentos a ele associadas.

## 2.2- Graus de Liberdade:

O Grau de Liberdade indica o número de coordenadas necessárias para descrever o movimento de um dado sistema.

As coordenadas podem ser de movimento linear (translação) e angular (rotação). Os modelos podem ser simples de um grau de liberdade, ou seja, se movimentam em apenas uma direção, e complexos quando descritos por vários graus de liberdade, ou seja, têm a possibilidade de se movimentar em várias direções.

Sistemas vibratórios reais normalmente são complexos, e podem ter muitos graus de liberdade.

Portanto os movimentos devem ser descritos através de diferentes coordenadas que caracterizarão os movimentos de rotação e translação. As coordenadas são usadas para identificarmos o movimento no espaço.

**Sistemas discretos:**

Também chamados de sistemas com parâmetros concentrados. Os sistemas discretos: possuem um número finito de GDL parâmetros (propriedades físicas) concentrados modelados matematicamente por equações diferenciais ordinárias (EDO)

**Sistemas Contínuos:**

Também chamados de sistemas com parâmetros distribuídos. O sistemas contínuos: possuem um número infinito de GDL parâmetros (propriedades físicas) distribuídos ao longo da massa modelados matematicamente por equações diferenciais parciais (EDP) Sempre que possível, devemos discretizar o sistema contínuo, para simplificar a modelagem matemática.

**2.3- Quanto à existência ou não de forçamento:**

**Vibrações livres (ou naturais):**

Este tipo de vibração ocorre em situações em que a massa do sistema estrutural é deslocada de sua posição de equilíbrio e então liberada. São causadas por condições iniciais (deslocamento inicial e/ou velocidade inicial ocasionadas por um carregamento inicial).

**Vibração Forçada ou Regime Permanente:**

Este tipo de vibração ocorre quando uma força persistente atua a todo instante no sistema, portanto são causadas por uma força ou torque externo; as oscilações persistem durante a aplicação dos mesmos e, uma vez cessadas essas solicitações, o sistema entra em vibração livre (amortecida).

**Vibrações sem amortecimento:**

Não há perda de energia por atrito. Se a vibração for livre, não haverá diminuição da amplitude da vibração e o sistema vibrará indefinidamente. Se a vibração for forçada, a excitação reporá energia no sistema, podendo ocorrer até aumento da amplitude da vibração.

**Vibrações com amortecimento:**

Este é o caso real, geralmente não gostamos das vibrações e usamos amortecedores para amortizar a amplitude das vibrações. Há perda de energia por atrito.

Se a vibração for livre, haverá sempre diminuição da amplitude da vibração e o sistema tenderá a parar na posição de equilíbrio. Se a vibração for forçada, poderá haver ou não diminuição da amplitude da vibração, porque a excitação repõe energia no sistema.

## 2.4- Quanto à linearidade:

### Vibrações lineares:

Obedecem ao Princípio da Superposição, ou seja, existe uma proporcionalidade entre excitação e resposta. No sistema linear existe proporcionalidade entre causa (excitação) e efeito (resposta).

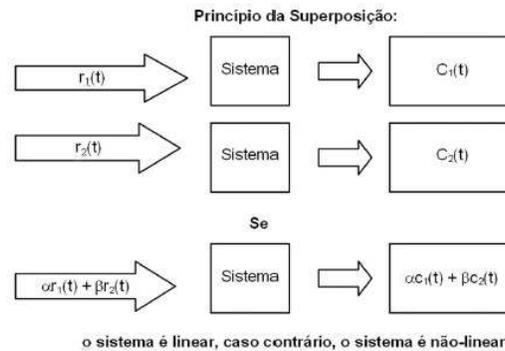


Figura 16 – Princípio da superposição

No caso de vibração linear, o modelo matemático é composto por um sistema de equações diferenciais ordinárias lineares, EDOL's, de fácil solução analítica.

### Vibrações não-lineares:

Não obedecem ao Princípio da Superposição. Já no caso de vibração não-linear, o modelo matemático é composto por um sistema de EDO não-linear, de difícil ou mesmo impossível solução analítica. No caso não-linear, podemos atacar o problema de acordo com o procedimento ilustrado na figura.

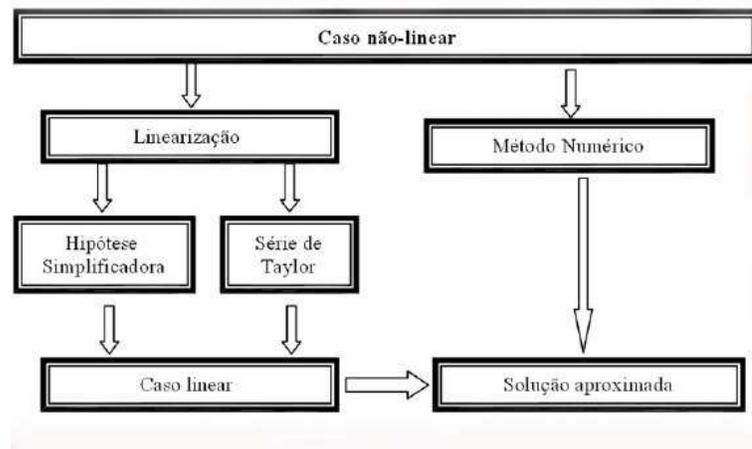


Figura 17 – Organograma para sistemas não lineares

## 2.5- Quanto à previsibilidade de ocorrência:

### Vibrações determinísticas:

São fenômenos dinâmicos descritos por uma relação matemática explícita. O movimento de componentes de sistemas mecânicos pode ser representado por um sinal composto por uma única frequência ou por sinais que contenham várias componentes em frequências, ocorrendo diferentes frequências simultaneamente.

Sinais determinísticos podem ser decompostos em  $n$  componentes de frequência, sendo a primeira componente a frequência fundamental. A senoide é um caso particular de sinal determinístico que contém somente a frequência fundamental.

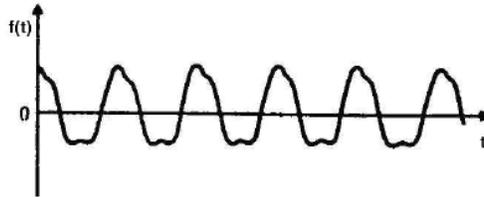


Figura 18 – Sinal determinístico: onda senoidal

Na vibração determinística a excitação é conhecida e a resposta é previsível

#### **Vibração aleatória:**

Não são representados por relações matemáticas explícitas, mas podem ser analisados através de ferramentas estatísticas (médias, desvio padrão, probabilidade, etc...). Um sinal aleatório é aquele cujo valor num instante futuro não pode ser previsto através de uma relação matemática explícita.,

Sinais aleatórios são aqueles que não tem componentes periódicos e harmônicos relacionados. A análise de sinais aleatórios requer o uso de ferramentas estatísticas.

O espectro de um sinal aleatório estacionário apresenta uma distribuição contínua com a frequência.

#### **2.6- Propriedades mais importantes**

As propriedades mais importantes dos sistemas mecânicos sob o aspecto da vibração são a elasticidade, a inércia e o amortecimento.

Isso porque a vibração é, em essência, um processo de troca de energia mecânica, nas formas de energia cinética (associada à velocidade) e energia potencial (associada à deformação e à gravidade).

A elasticidade é uma característica que se relaciona com a capacidade do sistema de armazenar energia potencial elástica.

A inércia, por sua vez, se liga à capacidade de armazenamento de energia cinética e, também, energia potencial gravitacional.

O amortecimento, finalmente, provoca as perdas de energia em função das resistências passivas provocadas pelo atrito.

#### **Definição de Amortecimento:**

Fenômeno através do qual se dá a dissipação de energia mecânica sob forma de calor e/ou som. Chama-se amortecimento o processo pelo qual a energia é retirada do sistema elástico, fazendo com que a amplitude da vibração diminua ao longo do tempo. A energia é consumida

por atrito entre as peças móveis do sistema e/ou pelo atrito interno entre as moléculas das peças do sistema, havendo uma dissipação de energia mecânica sob forma de calor ou som.

Um amortecedor, pois, é o componente do sistema elástico que opõe-se ao movimento vibratório, dissipando energia e fazendo com que as vibrações livres desapareçam, depois de um certo tempo.

Na modelagem, consideramos que o amortecedor não tem nem massa e nem rigidez. Os amortecedores podem ter amortecimento:

*Fluido:*

É o amortecimento que mais ocorre na prática da Engenharia. Ele resulta do atrito fluido, isto é, aquele que acontece entre um sólido (uma peça) e um fluido (um óleo lubrificante, por exemplo) interposto entre as peças móveis do sistema elástico. Assim, o atrito que ocorre entre um eixo e o seu mancal de deslizamento, quando há lubrificação, é um atrito fluido; o atrito que ocorre entre o corpo de uma máquina e o ar atmosférico também é um atrito fluido. O amortecimento fluido, por sua vez, pode ser subdividido em viscoso e turbulento.

*Seco*

Também denominado amortecimento constante ou de Coulomb. É o que ocorre quando o atrito é seco, isto é, quando atritam entre si dois sólidos sem lubrificação.

## Capítulo 3 - Medição de NVH

Um dos desafios de medir e analisar os fenômenos NVH são a grande escala na qual os sons e vibrações aparecem. A medição e análise exige observação de pequenos sinais (baixa frequência) na presença de grande porte de sinais (alta frequência). Isto é necessário devido à capacidade do ouvido humano para processar sinais em uma vasta gama de frequências.

Analisa-se então a relação entre o maior e o menor sinal, e é utilizando uma escala de medição linear de amplitude que se limita esta escala. Como mostrado no Gráfico B, uma escala logarítmica da amplitude, comprime os sinais de grande amplitude e expande os de pequenas amplitudes, para que possamos mostrar uma ampla faixa para a análise. É por isso que usamos a logarítmica de decibéis (dB) para medir a escala de sons e vibrações.

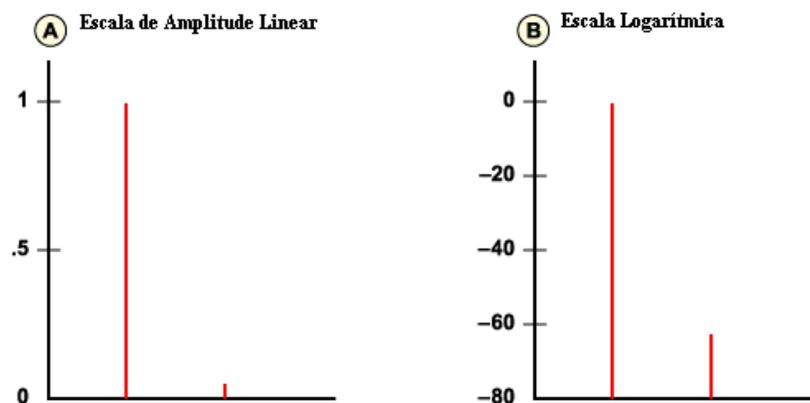


Figura 19 – Escala de amplitude linear (esquerda) e escala logarítmica (direita)

### 3.1 Escala em Decibéis

O decibel (dB) é uma representação logarítmica de uma relação de amplitude. O logaritmo da razão da amplitude de uma medida de referência é 20 vezes a base de 10. No caso do som, as unidades de medida de pressão são referências e é geralmente o limite de audição.

Na escala dB, 0 dB corresponde aproximadamente o limiar normal do ouvido humano e cerca de 140 dB corresponde ao limiar da dor.

A fórmula para o cálculo do nível de pressão sonora (NPS), em decibéis (dB) é:

$$\text{SPL} = 20 \log \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (2)$$

Adição de decibéis (dB) requer alguns cuidados. Como a escala dB é uma de relação logarítmica, não podemos adicionar diretamente os níveis de dB (isto é, algebricamente). Para adicionar dois valores dB, temos de aplicar as regras de logaritmos como segue:

$$\begin{aligned}
 dB_1 + dB_2 + \dots + dB_n &= 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \\
 &= 10 \log \left( 10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_n}{10}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

### 3.2- Domínio do tempo e da frequência

O domínio do tempo é usado para observar como a amplitude de um som ou vibração varia ao longo do tempo.

O eixo x do gráfico no domínio do tempo representa o tempo e o eixo y representa a amplitude do som (ou deslocamento para a vibração), como mostrado:

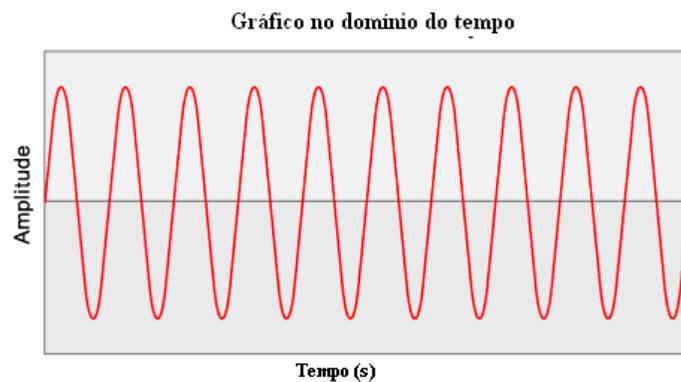


Figura 20 – Gráfico da amplitude do som no domínio do tempo

Instrumentos comumente usados para a gravação do sinal elétrico de um som ou vibração no domínio do tempo, são:

- Microfones
- Acelerômetros
- Sonda de condutividade e de pressão

O domínio do tempo é útil para analisar os eventos de som e vibração, que variam com o tempo, como um evento transitório. No entanto, quando informações adicionais são necessárias na análise de sons e vibrações, o domínio da frequência é frequentemente utilizado.

Frequência é o número de vezes que um evento se repete por unidade de tempo. É normalmente expressa em ciclos por segundo, o equivalentemente a hertz (Hz). Por exemplo, 1 Hz significa que um evento se repete uma vez por segundo e 2 Hz significa que um evento se repete duas vezes por segundo. Com relação à vibração, frequência refere-se à taxa de repetição do movimento periódico causado pela vibração. Este movimento pode ser medido como deslocamento, velocidade ou aceleração.

Frequência tem uma representação um pouco diferente para o som. Os seres humanos percebem o som quando as flutuações na pressão do ar fazem as estruturas da orelha vibrar. A taxa na qual a pressão do ar oscila de alta para baixa ou de baixa para alta é a frequência. Como mostrado aqui, a pressão máxima é chamada de compressão e a pressão mínima é chamada de rarefação. Um ciclo consiste então em intervalo de uma compressão à próxima compressão. A onda de som que aparece aqui tem uma frequência de 10 ciclos por segundo.

A fórmula para o cálculo de frequência é:

$$f = \frac{1}{T} \tag{4}$$

onde T é o período.

Enquanto que para powertrain NVH as ondas que representam os níveis de som e vibração são complexas, o matemático, JB Fourier, descobriu que a onda pode ser representada por uma soma de movimentos senoidais. Isso permite que um sinal complexo possa ser decomposto em um conjunto de ondas seno simples.

No domínio da frequência, cada onda senoidal aparece como uma linha vertical com uma altura que representa a amplitude do som ou vibração na frequência correspondente. Quando todas as linhas que representam cada onda senoidal são colocadas juntas, o resultado é chamado de espectro de o sinal.

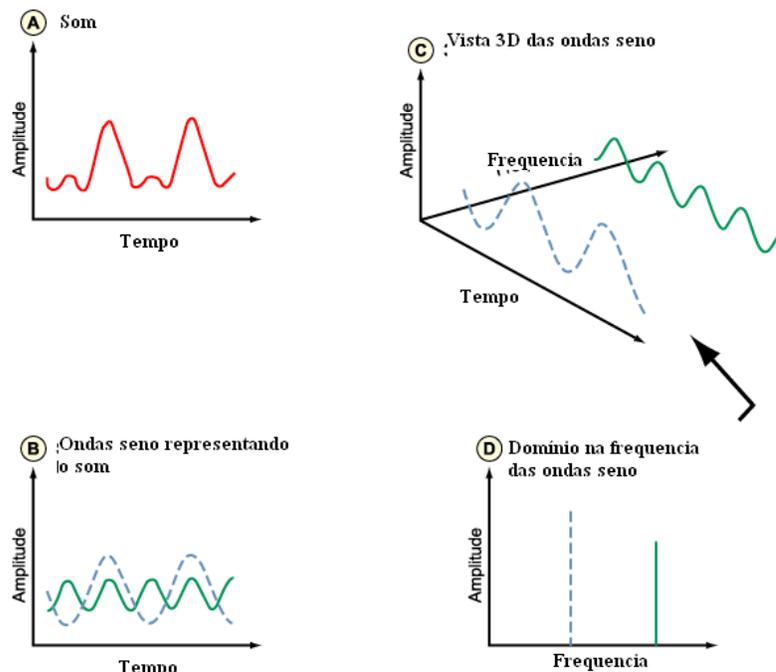


Figura 21 – Gráficos da onda seno, da amplitude do som e relações entre elas

Sons e vibrações em Powertrain podem ser decompostos, mas trata-se de um conceito muito forte, porque o espectro de frequências resultante fornece informações que ajudam a identificar as fontes que compõem a som ou vibração.

O gráfico mostra um exemplo de decomposição do sinal de vibração do eixo. A análise do domínio da frequência permite identificar as engrenagens, rolamentos, eixos ou que estão associados a cada vibração correspondente. Isto permite a análise das fontes e desenvolvimento das técnicas adequadas de controle de ruído. Neste exemplo, o desbalanceamento foi o que mais contribuiu para a vibração geral.

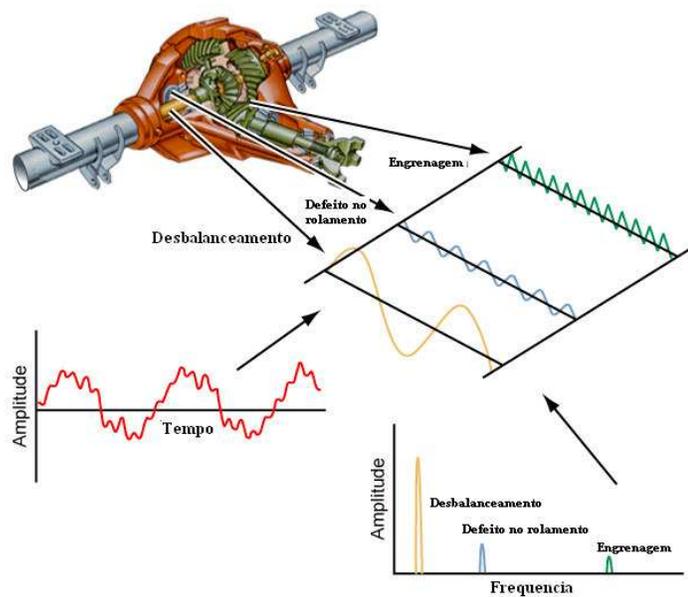


Figura 22 – Decomposição do sinal de vibração do eixo

Para decompor sinais no domínio da frequência ou usar o domínio do tempo para analisá-los, muitas vezes depende se estes fenômenos estão em estado estacionário ou transiente.

### 3.3- Estados Transientes e Estacionários

O estado de equilíbrio refere-se a uma condição de operação, onde sons e vibrações não mudam nem em amplitude nem na frequência com o tempo.

Os gráficos abaixo mostram um exemplo de um sinal de estado estacionário no domínio do tempo e da frequência. Como mostra o gráfico no domínio da frequência, um fenômeno em estado estacionário tem um espectro de frequências discretas. A análise dos sinais no estado estacionário no domínio da frequência fornece informações mais detalhadas do que é evidente no domínio do tempo, particularmente quando se trata de sons complexos e vibrações. Portanto,

normalmente usam o domínio da frequência para analisar os fenômenos de estado estacionários.

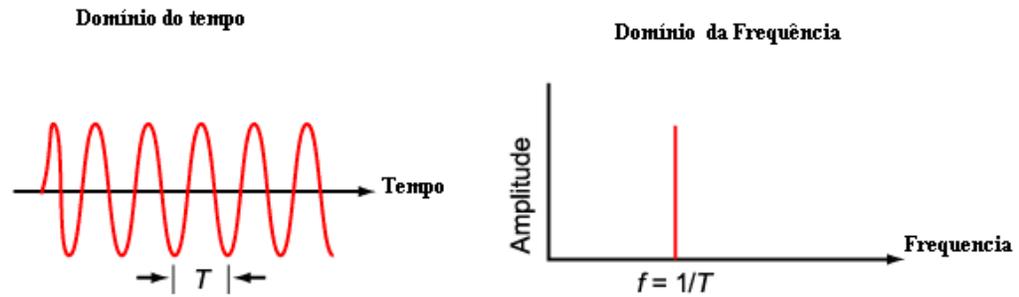


Figura 23 – Sinal estacionário no domínio do tempo e da frequência

Estado transiente refere-se a uma condição de funcionamento, onde sons e vibrações têm mudanças na amplitude ou na frequência com o tempo. Fenômenos transientes ocorrem tipicamente sobre durações de curto espaço de tempo. Um exemplo de um fenômeno transiente é a vibração que pode ocorrer na transmissão quando ocorre mudanças de marcha.

Os gráficos abaixo mostram um exemplo de um sinal transiente no domínio do tempo e da frequência. Como mostra o gráfico no domínio da frequência, um fenômeno transiente tem um espectro de frequência contínua. Nós normalmente usamos o domínio do tempo para analisar sinais transientes porque a análise no domínio da frequência, muitas vezes requer técnicas de tratamento especial e tem limitações para os eventos que têm curtas durações de tempo.

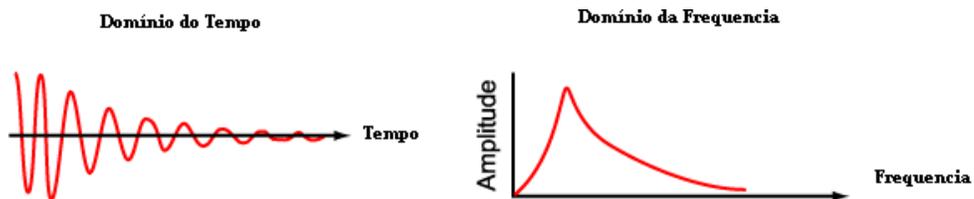


Figura 24 – Sinal transiente no domínio do tempo e da frequência

### 3.4- Ressonâncias

Cada estrutura tem característica e frequências naturais que dizem respeito somente à sua massa e suas propriedades de rigidez. Estas são as frequências em que a estrutura é mais propensa a vibrar e ou a emitir som. A ressonância ocorre quando a estrutura está com as suas frequências naturais.

Ressonância é como um amplificador, pois maximiza som e amplitudes de vibração. Portanto, é fundamental determinar as frequências naturais de um projeto de powertrain para ser capaz de minimizar o efeito das ressonâncias.

A seguinte fórmula para um simples modelo massa mola é usado na maioria das vezes para calcular a frequência natural:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

Onde k é a constante elástica, e m a massa em kgs.

**Ressonância Estrutural** → A ressonância estrutural envolve um sólido como o principal meio de vibração. Entender essas ressonâncias estruturais é fundamental na concepção de um sistema de propulsão. Ressonâncias descontrolada podem levar a sons indesejáveis e a sentimento de vibração pelo ocupante. Em casos extremos, grandes amplitudes de vibração causada por ressonâncias podem levar a falhas no sistema.

**Ressonância Acústica** → Uma ressonância acústica envolve ar ou outros fluidos como o principal meio de vibração. Exemplos de ressonâncias acústicas são o ar vibrando dentro de uma cabine do veículo, e a coluna de ar vibrando em um sistema de escape.

Para powertrain, ressonâncias acústicas ocorrem principalmente nos componentes tubulares do sistema de admissão de ar, sistema de escape, e sistemas hidráulicos. Para estes sistemas, as ressonâncias acústicas controlam a freqüência e a amplitude dos sons irradiadas.

Seja ela estrutural ou acústica, as ressonâncias podem causar problemas de NVH powertrain quando as freqüências de excitação powertrain são iguais às freqüências naturais do sistema. Estas freqüências de excitação são rastreadas com ordens de powertrain.

### 3.5- Ordens

Uma ordem é o número de ciclos de oscilação de som ou vibração por uma rotação do eixo.

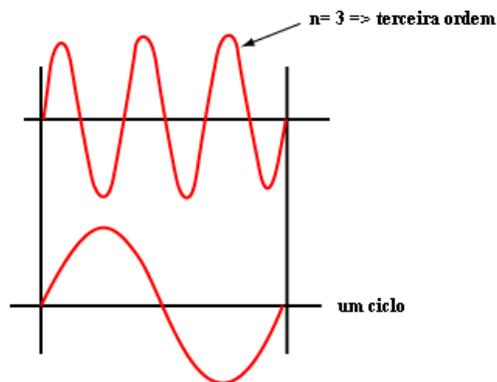


Figura 25 – Onda de terceira ordem (em cima) e onda de referencia (embaixo)

Outra maneira de definir uma ordem é dizer que é um som ou vibração que ocorre em um múltiplo de uma freqüência de referêcia, onde a freqüência de referêcia é a freqüência de rotação do eixo. No caso da ordem de 3, a sua freqüência é de 3 vezes a freqüência do eixo de rotação. Assim, se o eixo gira 10 vezes por segundo (ou 10 Hz), então a freqüência ordem 3 é de 30 Hz.

Para a análise de NVH powertrain, som e vibração são comumente medidos em ciclos por rotação do virabrequim do motor, pois o motor é a fonte de excitação dominante. Conversão de frequência para a ordem faz o monitoramento dos efeitos de excitação serem detectados mais facilmente. Para converter de volta para a frequência, nós simplesmente multiplicamos o número de ordem da frequência de rotação do eixo. Agora que foi introduzido o conceito de ressonâncias e ordens, vamos ver como eles se encaixam na análise de NVH powertrain.

Ordens são relacionadas com as forças dos mecanismos de powertrain e são esperadas com base no conhecimento de engenharia de projeto de powertrain. Ressonâncias dizem respeito à concepção da estrutura da motorização e são, por vezes inesperadas, dependendo do grau de análise estrutural inicial concluída.

O objetivo da análise de NVH é medir a amplitude dos sons e vibrações produzidas pelo projeto de powertrain e que apontam para o desempenho das ordens e ressonâncias. Saber se as ordens e ressonâncias estão causando problemas, ajuda a desenvolver melhorias no projeto.

Para coletar os dados de análise de NVH, temos um conjunto de medidas usando sensores (microfones e acelerômetros) colocado na motorização e diversos pontos de ensaio do veículo. Medimos os dados no domínio do tempo e convertemos para o domínio da frequência, para que possamos identificar com mais facilidade as ordens e ressonâncias.

O gráfico mostra os dados no domínio da frequência em duas velocidades do motor (6000 rpm e 1000 rpm) para um motor V6. Enquanto as ordens dos motores e suas amplitudes podem ser identificadas, o efeito de ressonância pode ser visto apenas quando a faixa de velocidade completa é pesquisada. Para o levantamento, uma gama de velocidades completa com uma única exibição dos dados, é plotado um “Waterfall plot”.

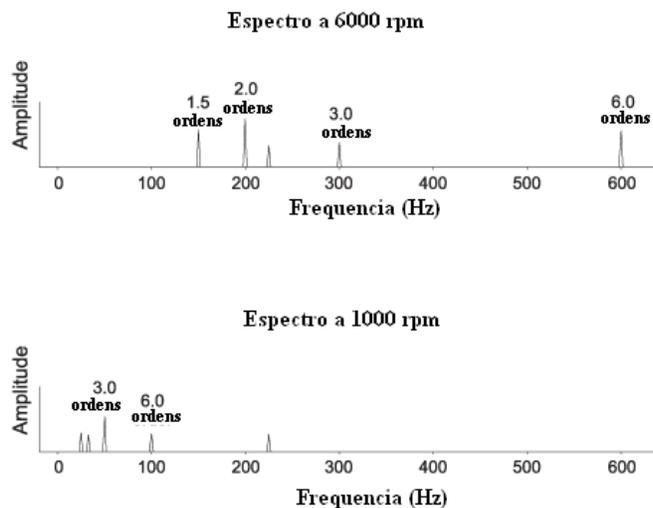


Figura 26 – Dados no domínio do tempo de um motor de seis cilindros

### 3.6- Waterfall plot

O Waterfall plot é o primeiro passo na análise de NVH powertrain que nos permite identificar facilmente as ordens e as ressonâncias.

Lembre-se que um espectro é um enredo de um som ou frequência do sinal de vibração. O Waterfall plot é uma série de espectros adquiridos em um intervalo de operação. Altas amplitudes ocorrem freqüentemente quando as ordens cruzam freqüências de ressonância.

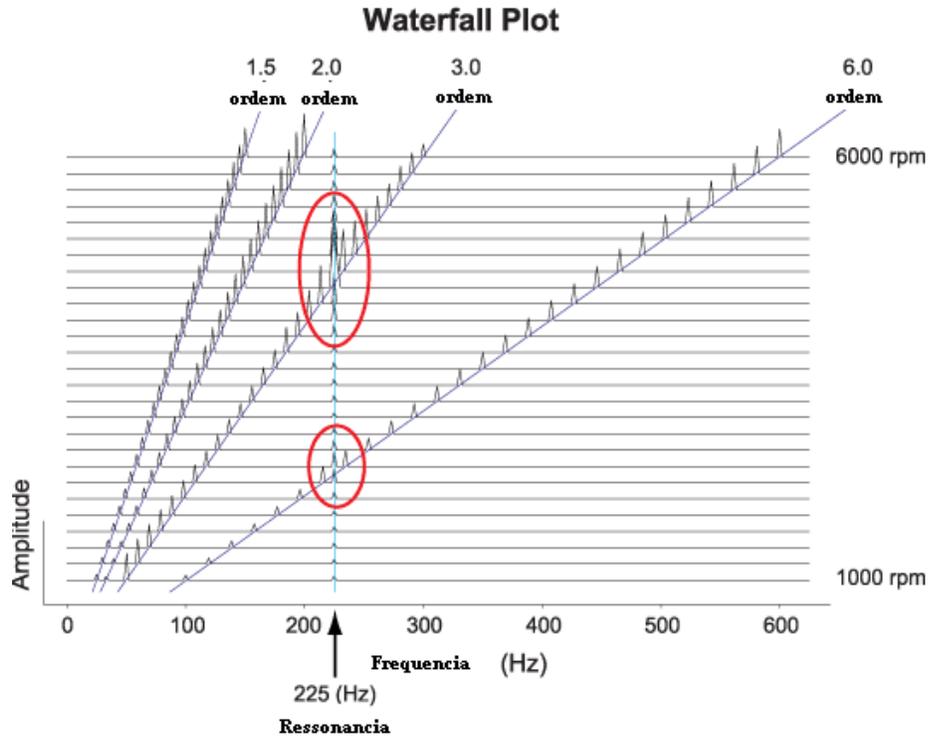


Figura 27 – Waterfall Plot

### 3.7- Velocidade do motor, ordem e freqüência

Para numericamente relacionar ordem, freqüência de ressonância e velocidade do motor, usamos esta fórmula:

$$\text{Velocidade do motor} = (\text{freqüência de ressonância} * 60) / \text{ordem}$$

Esta fórmula permite determinar a velocidade do motor em que uma ordem intercepta uma freqüência de ressonância

### 3.8- Domínio Modal

Uma vez que nós identificamos os problemas de ressonância, usamos análise modal para estudar a estrutura e desenvolver estratégias de projeto para mitigar os problemas de ressonância. Para realizar a análise modal, usamos o domínio modal.

Para explicar o domínio modal e sua relação com o tempo e a frequência, vamos usar um exemplo de um diapasão. A vibração mecânica de um diapasão provoca ondas de som como representado no Gráfico A. Essas ondas de som também pode ser representado no domínio da frequência, como mostrado no Gráfico B.

Os picos de vibração no gráfico B, cada uma corresponde a um modo de vibração. A modalidade é a tendência natural de um componente ou subsistema de entrar em ressonância. Uma estrutura vibrante pode ser caracterizada pela soma de seus modos de vibração.

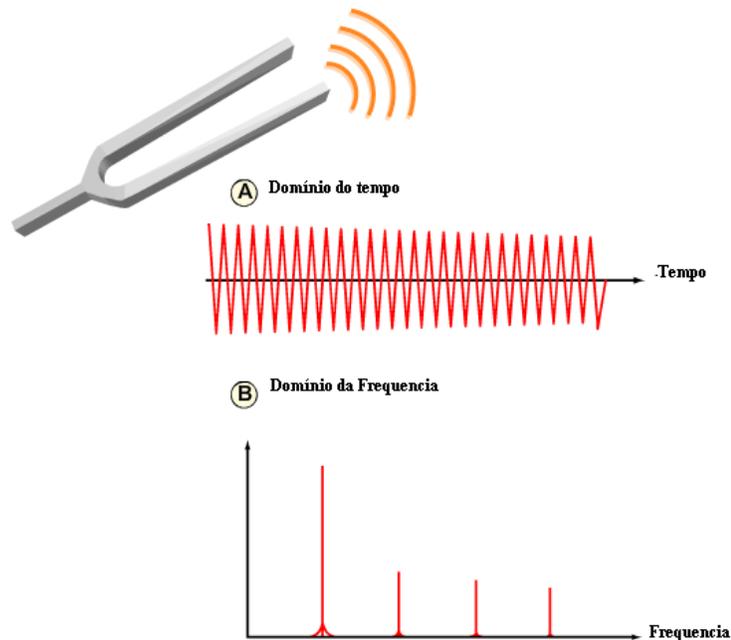


Figura 28 – Vibração do diapasão no domínio do tempo e da frequência

Modos os quais ocorrem a ressonância são uma função da própria estrutura. Agora vamos olhar para os dois tipos de modos: modos de corpo rígido e flexível.

**Modos de corpo rígido** são modos de vibração de estruturas onde a estrutura vibra como uma unidade sólida e rígida, sem dobrar ou mudar de forma. Um exemplo de um modo de corpo rígido é motor em marcha lenta.

**Modos flexíveis** são modos de vibração de estruturas onde a estrutura vibra como uma unidade flexível que se dobra, torce, ou deforma em alguma outra forma

complexa. Modos flexíveis comuns de sistemas de powertrain incluem flexão e torção (ou torcer) modos.

### **3.9- Psicoacústica e qualidade do som**

Psicoacústica é o estudo científico da percepção humana a reação dos sons. Refere-se a qualidade do som, se os sons são agradáveis ou irritantes. Engenharia de qualidade de som envolve a aplicação dos conhecimentos derivados da pesquisa psicoacústica para gerenciar a qualidade do som de um produto. Este produto geralmente envolve a criação de sons que a maioria dos ouvintes vão considerar agradável.

Dentro da indústria automobilística, engenharia de qualidade de som significa projetar sistemas e componentes de veículos para obter um equilíbrio desejável de frequência e nível sonoro. Qualidade do som do Powertrain é a qualidade geral de som da contribuição do sistema propulsor do veículo. Boa qualidade de som do conjunto propulsor aumenta a impressão de clientes de qualidade do produto e pode transmitir esportividade e poder.

Inversamente, má qualidade de som do conjunto propulsor pode dar a impressão de veículo má qualidade de construção ou de convencer o cliente de que algo está errado com o propulsor.

### **3.10- Ferramentas para avaliação do som**

As principais ferramentas utilizadas para estudar medidas de qualidade de som dos veículos são a cabeça de gravação binaural e a avaliação do júri de qualidade de som.

A cabeça binaural é um "sensor" de montagem sob a forma de uma cabeça humana genérica e ombros. A cabeça binaural duplica o campo de som em torno de um ouvinte humano quando colocado em uma posição normalmente ocupada por uma pessoa. O som que entra na cabeça binaural é medido por microfones, gravado digitalmente, e depois reproduzido para análise do júri.

### **3.11- Fonte – caminho – resposta**

O modelo fonte-caminho-resposta que aparece aqui é um modelo genérico para descrever os fenômenos complexos como NVH são gerados, transferidos e percebidos. É o quadro que relaciona os fenômenos ao hardware do veículo. Compreender este relacionamento é fundamental para diagnosticar e resolver questões de NVH.

#### **Fonte**

Cada som ou vibração começa com uma força de entrada (ou o mecanismo de excitação) que é a raiz do som ou vibração. Esta força é chamada de entrada ou fonte.

Em princípio, podemos reduzir os problemas de NVH, reduzindo a excitação de entrada ou fonte. Portanto, é muito importante para identificar corretamente a fonte.

### **Caminho**

Depois de excitado pela fonte, os fenômenos de NVH são transmitidos ao longo dos trajetos. Esses caminhos são as respostas do sistema à fonte. Em alguns casos, o caminho pode amplificar a fonte de entrada.

Por exemplo, uma força de agitação do motor pode excitar um propulsor que dobra o modo, e amplifica a força de entrada. Esta força amplificada, em seguida, viaja através de vários componentes, como os coxins do motor e o quadro, e resulta em ruídos e vibrações indesejáveis.

Em alguns casos, podemos alterar ou modificar um caminho para reduzir a amplificação ao longo do mesmo. Portanto, a identificação do caminho adequado é importante. Os caminhos do som podem ser o ar, ou a estrutura, ou ambos.

#### ***Airborne***

Caminhos Airborne são a transferência de energia acústica através do ar como o meio do caminho. Um exemplo de um caminho aéreo envolve o ruído do escape pelo tubo de escape, que viaja através do ar antes de atingir o interior do veículo.

#### ***Structure-Borne***

*Transmitido pela estrutura de som e vibração caminhos envolvem transferência de energia de vibração através da estrutura antes de atingir o ocupante do veículo.*

Agora vamos ver como esses caminhos são medidos

### **Medição de ruído acústico**

A função de transferência acústica é usada para quantificar a eficácia de um veículo para atenuar o som de entrada no ar. Esta função de transferência é a relação entre o som medido a um ponto interior do veículo (como o ouvido do motorista) sobre a pressão sonora em um local especificado fora da cabine (como no compartimento do motor). A função de transferência acústica é representada através da seguinte equação:

Função de transferência acústica =  $p_0/p_1$

Esta relação é chamado de nível de redução de ruído (NRL).

### Função de Transferência Acústica

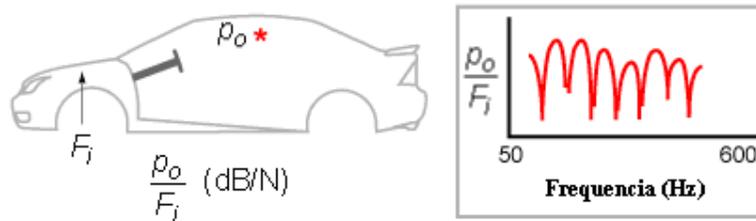


Figura 29 – Função de transferência acústica

### Medição de som e vibração estrutural

A medição de som ou vibração estrutural é medida de acordo com a taxa de ruído ou vibração em uma parte do veículo, sobre a força aplicada em outra parte.

### Função de Transferência do Som



### Função de Transferência de Vibração

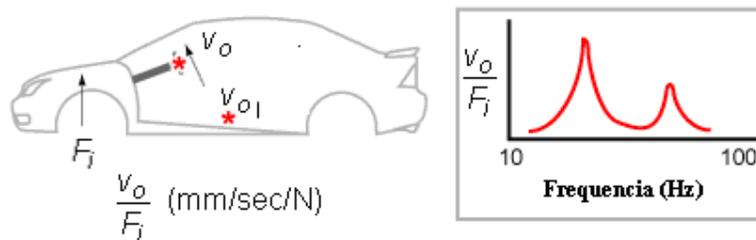


Figura 30 – Funções de transferencias estruturais

Para medir som ou vibração transmitido pela estrutura , usamos as funções de transferência

Função de transferência do som:  $p_0/f_1$

Função de transferência da vibração:  $v_0/f_1$

Onde  $p_0$  é a pressão do som,  $v_0$  é a velocidade e  $f_1$  é a força de entrada da fonte.

### **Resposta**

Uma vez excitados com a fonte e transmitidos ao longo de caminhos, os fenômenos de NVH atingem indivíduos dentro e / ou fora do veículo. Os sons resultantes ou vibrações que os ocupantes do veículo e /ou pedestres percebem são chamados de respostas. Por exemplo: a vibração do volante é uma resposta.

## Capítulo 4- Powertrain NVH

Powertrain NVH refere-se a qualquer som, vibração, ou a sensação que seja resultado da excitação de um subsistema powertrain. Exemplos de NVH powertrain são:

- O ruído do motor em marcha lenta;
- Ruído do motor durante a condução;

Estes fenômenos de powertrain apresentados representam apenas os estados de erro. Ou seja, eles são indesejáveis e causam insatisfação do cliente. Mas nem todos os fenômenos NVH powertrain são indesejáveis. O Mustang V8, por exemplo, tem um potente som de escape e é um exemplo de qualidade de som. Ou seja, ele é um som que os clientes desejam, pois gera sentimentos de poder.

Existem NVH powertrain desejáveis, e estes podem surpreender e encantar os clientes, enquanto que os powertrain NVH indesejáveis são questões básicas de qualidade. Quando metas de NVH powertrain indesejáveis são alcançadas, os clientes geralmente não percebem, no entanto, os clientes percebem quando NVH de som desejáveis são alcançados. Por isso, é fundamental que a engenharia de powertrain NVH inclua o projeto não só para reduzir os ruídos e vibrações indesejáveis, mas também para alcançar a qualidade de som desejável.

### 4.1- Subsistemas do Powertrain

Este estágio irá focar em NVH interior no que se refere ao conjunto powertrain. Agora que foram esclarecidos os conceitos de ruído e de vibração, vamos esclarecer quais são os componentes do powertrain.

#### 4.1.1- Acelerador

A função básica do acelerador é comunicar a demanda de aceleração do veículo pelo motorista do carro. Isto é feito através do controle do fluxo de ar / fluxo de combustível, em resposta a entrada dada pelo controlador no pedal. É feito de forma diferente dependendo do tipo de motor (a gasolina ou a diesel).

As funções de comando do acelerador devem ser sempre entregue durante a vida útil do veículo, enquanto em condições de funcionamento do motor do compartimento ambiental de funcionamento, tais como em extremos de temperatura e umidade, e da lama, neve, ou gelo. Além disso, o subsistema não deve transmitir NVH indesejáveis de volta para o condutor como o ruído audível ou vibração do pé no pedal.

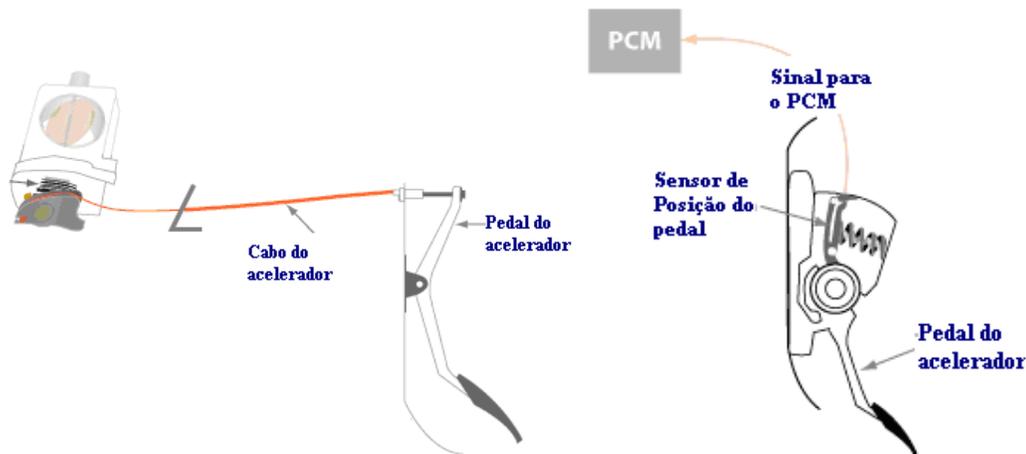


Figura 31 – Esquema do acelerador mecânico (esquerda) e eletrônico (direita)

O acelerador pode impactar no NVH veículo através de ruído audível, ou vibração no pedal tanto no acelerador mecânico como no acelerador eletrônico.

Com relação ao ruído audível o acelerador mecânico o gera quando o movimento do motor, resulta no contato do cabo do acelerador com os outros componentes do compartimento do motor. E no acelerador eletrônico ocorre atrito interno entre os componentes móveis no mecanismo atuador.

Já o problema de vibração no pedal em aplicações mecânicas (o zumbido) é causado por um componente do motor estar em ressonância, e causa vibração no núcleo do fio do cabo do acelerador. Aumentar o comprimento do cabo normalmente irá dissipar vibrações e mascarar o problema. Em algumas situações, uma mola ou outro isolador de vibração está incorporado no cabo de ligação ao pedal do acelerador para evitar a transmissão destas vibrações. E em aplicações eletrônicas o zumbido é causado pela ressonância no painel de instrumentos. Essas vibrações normalmente não podem ser mascaradas por modificações no pedal.

#### 4.1.2- Filtro de Ar

A função básica do subsistema de indução de ar é de fornecer ar filtrado para o motor. Esta função deve ser realizada, apesar da chuva forte, neve e gelo, ou quando as condições do ar ambiente estão contaminadas com a poeira, sujeira, sal, ou detritos da estrada. O sistema de indução de ar deve:

- Minimizar o aumento da temperatura do ar filtrado sobre a temperatura do ar ambiente
  - Minimizar a restrição do fluxo de ar
- Gerenciar NVH associados com o som da entrada de ar, shell-irradiada, e transmitido pela estrutura de fontes

Um subsistema de indução de ar típico inclui o seguinte itens:  
Tubo de entrada de ar - retira a ar sujo  
Bandeja e cobertura do limpador de ar  
Filtro de ar  
Ressonador (es) (ou seja, câmara de expansão, [s])  
Tubo de saída – limpa as rotas de ar para o sistema de admissão do motor  
Grampos, trincos, fixadores roscados, juntas e isoladores

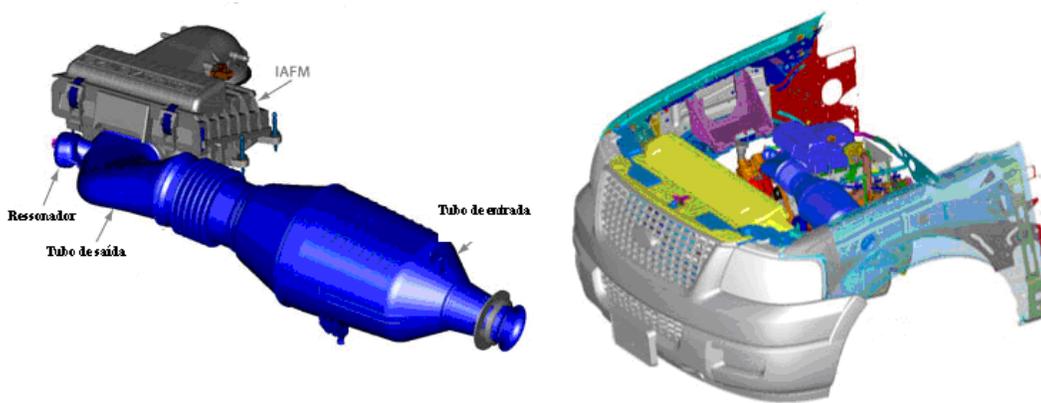


Figura 32 – Filtro de ar isolado (esquerda) e dentro do veículo (direita)

A entrada de ar é encaixado ao IAFM, e este está encaixado no motor. O motor tem a responsabilidade pela IAFM, que inclui a montagem do filtro de ar. O projeto do programa de veículos e o engenheiro de lançamento tem a responsabilidade para o resto do sistema AIS.

Com relação ao NVH, o sistema de indução de ar deve controlar o som criado por bombear ar para o motor.

O motor funciona como uma bomba para sugar o ar no coletor. O pulsar do fluxo de ar coincide com a seqüência de ignição do motor e os resultados de ruído interno e externo.

Uma análise CAE frontal é a melhor abordagem para controlar níveis de ruído do filtro. Simulações de fluxo de ar podem ser usadas para identificar a freqüência e a amplitude do som em vários locais ao longo dos dutos de ar e identificar o tamanho do ressonador, a sua localização e a geometria do orifício para reduzir o nível de som.

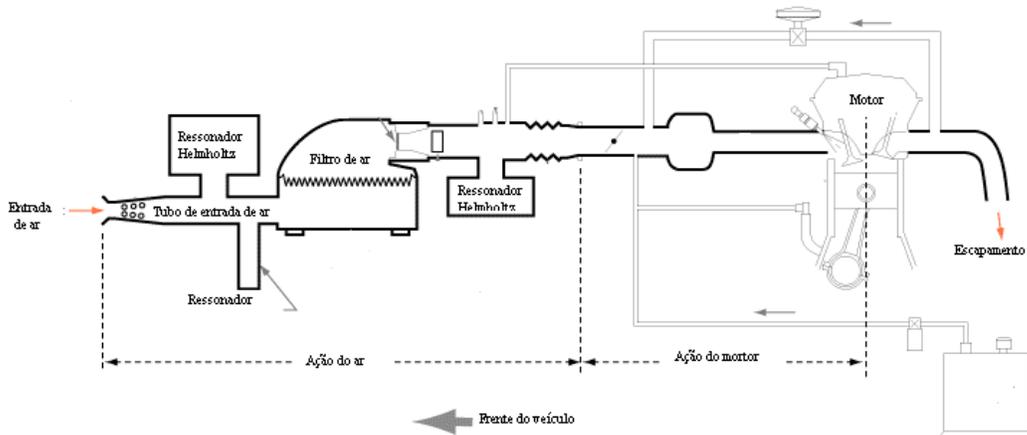


Figura 33 – Esquema da Transmissão

Quando uma ferramenta de simulação CAE não estiver disponível, o filtro pode ser usado para identificar os níveis de ruídos através de testes de laboratório. Nesses casos, os sensores são instalados ao longo do comprimento dos dutos de ar para medir a amplitude do som e conteúdo de frequência. O engenheiro de filtro de ar, em seguida, calcula o tamanho necessário do ressonador, a sua localização e a geometria do orifício para atingir o nível de som desejado. O tamanho do ressonador e o seu posicionamento são sempre muito intencionais.

Dois tipos de ruído interno estão associados com o fluxo de ar:

- Ressonância causadas pelo sistema de indução de ar. Superposição de ondas de som (devido a reflexões a partir de junções de tubos, descontinuidades, e da geometria do tubo) que amplifica os picos de som.

- Rumble / rugosidade que é causada pelo sistema de admissão do motor. É uma mistura de som desigual dos cilindros do motor que faz a modulação e a variabilidade da amplitude do som (ou seja, o contrário da lisura), resultando em rugosidade na qualidade do som.

Já com relação ao ruído externo, o bombeamento cíclico de ar provoca ondas de pressão sonora para propagar a entrada de ar e depois para o ar circundante. Os impactos do fluxo pulsante resultam em ruído.

#### 4.1.3- Ventilação do motor e da transmissão

Em um motor de combustão interna a gasolina, cerca de um terço da energia do combustível injetado é convertido em energia, um terço é expelido através do tubo de escape, e um terço permanece como o calor no motor. O calor do motor, se não for dissipado, iria derreter os pistões e o cilindro. Com o tempo, o processo de combustão pode produzir calor suficiente para derreter o bloco do motor inteiro.

Energia térmica também é criada em uma transmissão, a partir do fluido de corte e elementos de fricção. Sendo assim o calor retido no motor e gerado na transmissão automática precisa ser removido para evitar um superaquecimento e

danos aos componentes, o que é a função básica do motor e transmissão dos subsistemas de resfriamento.

O subsistema de resfriamento do motor transfere o excesso de calor para a atmosfera e para o compartimento de passageiros.

Subsistemas Powertrain de refrigeração são refrigerados a liquido: óleo refrigerante ou óleo de motor é utilizado para transportar o excesso de calor para longe do motor. O fluido da transmissão automática é utilizado para transportar o calor na transmissão automática.

As funções de remoção e transferência de calor devem ser realizadas sem exceder os limites de temperatura de arrefecimento de componentes (incluindo do refrigerante) ou restrições de peso e embalagem. Além disso, a pressão do subsistema de resfriamento deve ser mantida, o vazamento deve ser evitado, os requisitos de montagem e requisitos de manutenção devem ser atendidas, e as expectativas do cliente devem ser atendidas com relação ao desempenho do aquecedor.

Design e hardware do subsistema de resfriamento variam de acordo com o programa de veículos, mas geralmente incluem os componentes listados abaixo..

- Óleo Refrigerante,
- Bomba d'água,
- Termostato,  
Mangueiras e braçadeiras,
- Radiador,  
Ventilador do Motor ,
- Aquecedor / ventoinha do aquecedor,
- Reservatório refrigerante,
- Radiador de óleo do motor.

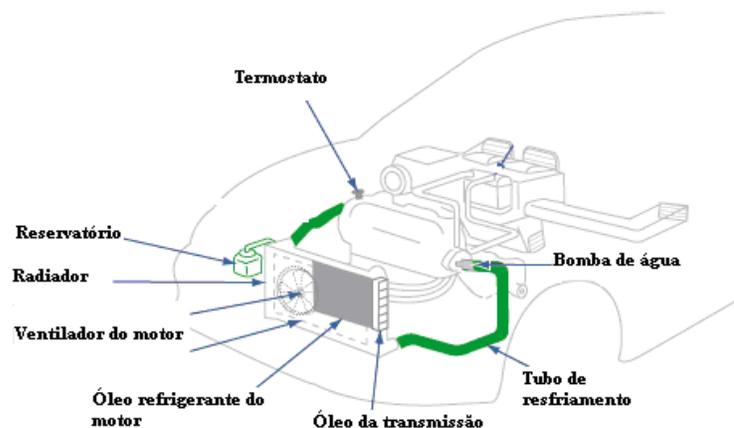


Figura 34 – Esquema do sistema de resfriamento do veículo

Metas de NVH para o programa de veículos são determinados e cascadeados (geralmente informalmente) para cada subsistema. O principal componente do motor e da transmissão de arrefecimento que afeta o NVH do veículo é o ventilador.

Os ventiladores são elétricos ou mecânicos e o desenho da lâmina destes é chegado considerando tanto o fluxo de ar como o impacto em NVH. Desequilíbrio do fan e run-outs podem induzir a vibração que pode ser sentida no volante e no banco. Estratégias para resolver problemas de NVH são: variar o número de lâminas, o espaçamento entre elas, a sua posição (que pode ser radial ou para trás / lâminas curvadas para frente), e modificar a parte do compartimento do motor onde o ar do ventilador é impactante.

Ventiladores elétricos são tipicamente equipados com motores de ímã permanente DC. Ventiladores simples com maiores níveis de potência (> 500 watts) usam um motor brushless. O ruído causado pelo movimento do ar do ventilador é maior do que o ruído provocado pelo motor.

Ventiladores elétricos são ligados / desligados pelo Powertrain Control Module (PCM) que é a estratégia que otimiza a operação do ventilador para fornecer a refrigeração necessária e para maximizar a economia de combustível. A operação on / off cria mais percepção do ruído do ventilador, devido à presença, e de repente, ausência de ruído.

Ventiladores mecânicos são conduzidos a mover fluido viscoso de uma câmara para outra. A ventoinha pode ser mecanicamente ou eletronicamente ativada. Devido ao elevado rastro de ar aumentar a pressão, ventiladores mecânicos têm um impacto maior de NVH do que ventiladores elétricos.

Como prática geral, ventiladores elétricos são utilizados em automóveis, veículos crossover, e alguns esportivos por causa de suas vantagens a economia de combustível. Ventiladores mecânicos são normalmente utilizados em caminhões e alguns veículos esportivos que têm um ciclo de trabalho mais graves e requerem mais capacidade de refrigeração.

#### **4.1.4- Subsistema de escape**

As funções básicas de um subsistema de escape são tratar a combustão dos subprodutos de CO, NOx e HCs para reduzir o nível das emissões, para atenuar o ruído, para atingir uma qualidade de som agradável, e para rotear os gases de escape para longe do compartimento de passageiros.

Estas funções devem ser realizadas dentro dos limites impostos pelas limitações do pacote e perda de potência aceitável. O subsistema deve:

- Não causar interferência de radiofrequência (RFI)
- Ter a durabilidade para suportar condições severas de ruído ambiente de altas e baixas temperaturas, fluidos corrosivos, e as cargas induzidas pelo uso do cliente

Um subsistema de exaustão típico inclui o seguinte hardware:

- Catalisador
- Ressonador
- Silenciador
- Pipes
- Articulações
- hardware Attachment (isoladores / suportes de gancho)
- Manifold

Uma das funções do sistema de escape que mais interessam no atual objeto de estudo é a atenuação do nível de Ruído sonoro, pois outra função do subsistema de escape é de reduzir o ruído sonoro associado ao processo de combustão.



Figura 35 – Esquema do sistema de escape com Muffler e com ressonador

Subsistemas de escape são projetados para reduzir a magnitude da pressão sonora. Em alguns casos, o desenho do subsistema de escape pode ajustar a saída para uma gama de frequências de som que é mais conveniente para o cliente. Em outros casos, o ruído do escape pode ser silenciado para quase inaudível.

O subsistema de escape tem um forte impacto sobre o atributo de NVH. E dividindo os mesmos em ruídos estruturais e acústicos, podemos concluir:

Ruídos estruturais

Fontes:

Alta frequência: Resultado do movimento do motor, de forças geradas durante a combustão e de forças resultantes dos locais de montagem, esse movimento é transmitido para o subsistema de escape, que é preso ao coletor do escape.

Baixa frequência: O propulsor também transmite as cargas para o subsistema de exaustão durante a aceleração, desaceleração, e quando mudam-se as marchas.

Controle:

Ruído transmitido pode ser controlado pelo amortecimento / sintonia com suportes, isoladores, e o uso ocasional de amortecedores de massa. As ferragens do subsistema de escape oferecem estrutura / força para resistir a essa carga.

Ruídos acústicos

Fonte: Motores de períodos de frequência de ordem  $n$ , devido a picos de ruído de combustão

Controle: Muffler / ressonador, atenuando, tratando e tornando mais agradável

Em alguns veículos, o tubo de escape atua como uma antena monopolo para transmitir ruídos. Se aumentarmos o comprimento do tubo de escape, o monopolo se

torna um transmissor RF mais eficiente na faixa de banda de rádio AM de 0,53-1,71 MHz.

Colocando o tubo de escape no chassi do veículo é uma maneira de mitigar este caminho de radiação. Outra abordagem é isolar eletricamente o tubo de escape através da inserção de uma bucha de alta resistência dielétrica no tubo de escape.

#### 4.1.5- Sistema de Combustível

Um sistema de combustível deve fornecer várias funções. Entre elas podemos citar:

- Armazenamento de combustível
- Fornecer combustível
- Indicação do nível de combustível
- Gerenciamento do vapor de combustível (motores a gasolina apenas)
- Possibilidade de reabastecimento

Estas funções devem ser executadas, a despeito do uso do cliente e as condições de ruído ambiente que podem afetar uma ou mais funções.

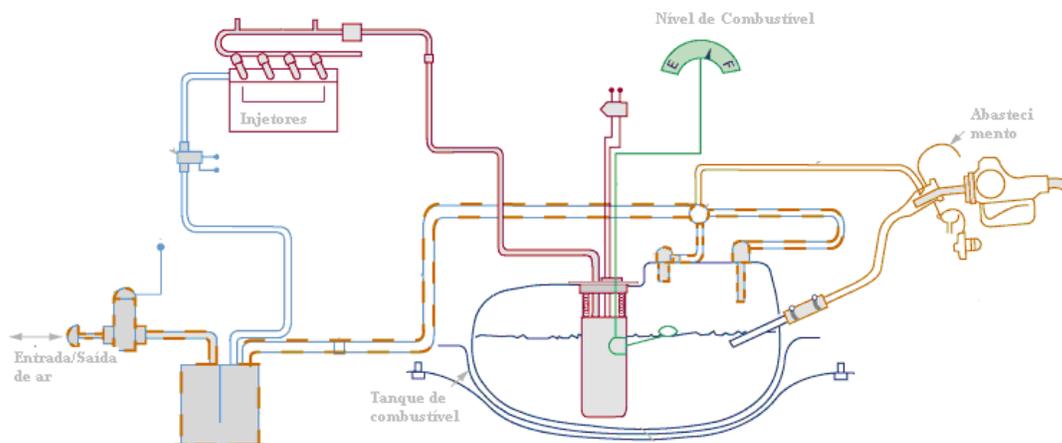


Figura 36 – Sistema de combustível

Cada cor representa uma parte do sistema: **Armazenar combustível**, **Fornecer Combustível**, **Indicar o nível de combustível**, **Possibilitar abastecimento**, e **Gerenciar os vapores de combustível**.

Este componente do powerplant não tem influencias significativas para o NVH do veículo.

#### 4.1.6- Coxins do motor

Os coxins do motor são definidos pela PowerPack de cada o veículo. (O PowerPack inclui o motor e outros subsistemas de powertrain como um pacote.) Um motor típico de montagem do sistema inclui o seguinte hardware:

- Cochins
- Brackets (pode ser incorporada no design de montagem)

- Fasteners (incluindo a montagem de suportes, suportes de motor e quadro, subframe, ou corpo)
- Amortecedores

Existem duas classificações de coxins que são classificados com base na orientação do virabrequim:

1. Orientação longitudinal do virabrequim do veículo (ou seja, Norte-Sul),
2. orientação Lateral do virabrequim no veículo (ou seja, Leste-Oeste),

As principais funções dos coxins do motor são:

- Apoiar o motor
- Controlar o movimento do grupo propulsor
- Reagir a torque do motor
- Isolar a vibração do grupo motopropulsor

Os coxins do motor dão o isolamento da excitação do motor, proporcionando uma diferença de impedância no motor-caixa do veículo, eles também auxiliam no isolamento de vibração do grupo do motopropulsor eliminando qualquer contato metal-metal que poderia conduzir a vibração / ruído audível.

O projeto dos coxins de um subsistema e a maneira como ele reage ao motor ou torque afetam diretamente a qualidade e métricas de NVH .

Se o suporte de estrutura cria uma vibração desagradável e não há tempo suficiente para reformular o suporte, os coxins são ligados a um suporte de montagem para mudar uma frequência de ressonância,

## Capítulo 5 - Prevenção, diagnóstico e controle de Powertrain

### Prevenção

A prevenção requer o conhecimento de como definir os requisitos de concepção para atender as expectativas de NVH. Design exigidos devem incluir técnicas de controle de NVH. Contamos com a engenharia assistida por computador (CAE) e da engenharia com base na experiência anterior e conhecimentos de NVH para analisar e otimizar o projeto de NVH, e fazer investimentos significativos de produção.

### Diagnóstico

O diagnóstico envolve a parte experimental e CAE para identificar o fenômeno quantitativamente em domínios do tempo e da frequência. Precisamos usar os métodos mais adequados e as ferramentas para analisar os sinais e caracterizar o fenômeno.

### Controle

Controle envolve a aplicação de técnicas de melhoria conhecidas para trazer o NVH chegar ao nível esperado. Atividades de controle de NVH podem começar após a análise e conclusão do diagnóstico de problemas.

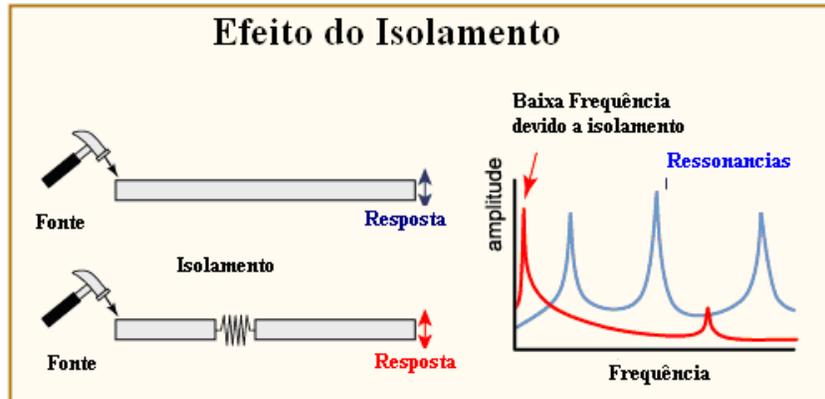
Técnicas comuns de controle de NVH incluem:

- Separação Modal
- Isolamento de vibrações
- Isolamento acústico / absorção
- Amortecimento estrutural
- Ruído Ativo / controle de vibração

### 5.1- Isolamento de vibrações

Isolamento de vibrações separa seções de uma estrutura ao longo do caminho. O isolamento é feito pela inserção de um componente (isolador) ou elemento estrutural muito menos rígido do que a estrutura original no caminho. A separação da via em duas seções isoladas impede a vibração da fonte de alcançar a resposta.

O gráfico mostra uma viga simples que representa um caminho de vibração estrutural e suas ressonâncias característica. Inserindo um isolador, modelada como uma mola macia, reduz a vibração no final de resposta sobre uma ampla faixa de frequência. Controlar o efeito de resposta de frequência de isoladores é chamada de sintonia do sistema.



#### Isolamentos no subsistema de escape

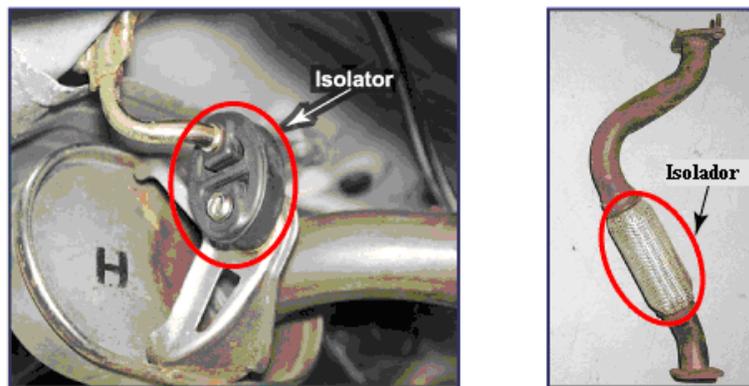


Figura 37 – Isolador estrutural simples

### 5.2- Barreira de Isolamento acústico

Isolamento acústico é um sistema de barreira (como o isolante do painel do veículo) que impede a passagem de som de uma área ruidosa para uma área mais calma.

Para NVH powertrain, usamos isolamento acústico para reduzir a quantidade de ruído do compartimento do motor para o interior do veículo (ou da cabine).

O obstáculo não é uma parede porosa ou painel que bloqueia o som, no entanto, a transmissão de energia sonora é barrada.

#### Painel de Isolamento de Som do Veículo



Figura 38 – Foto do painel de isolamento de som do veículo

### 5.3- Amortecimento Estrutural

Amortecimento estrutural é usado para eliminar ou reduzir a resposta de ressonância. Amortecimento funciona convertendo a energia cinética do movimento da vibração, em calor. O gráfico mostra o efeito de amortecimento usando um modelo simples massa-mola-amortecedor.

Observe que o efeito de amortecimento na amplitude de vibração é maior na frequência do sistema de ressonância.

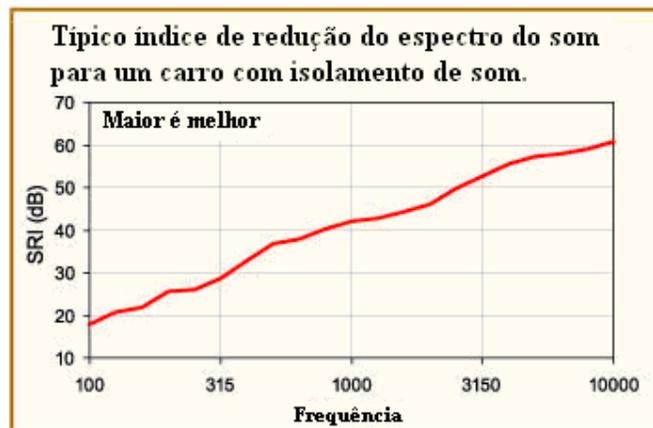
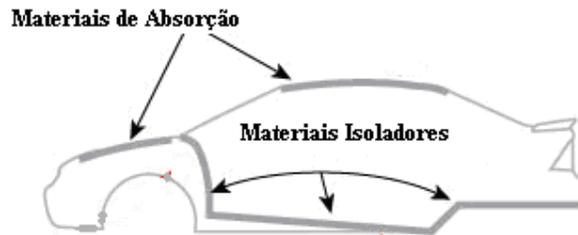


Figura 39 – Indicação da isolação acústica do carro

## Capítulo 6 - CAE

No passado, o projeto foi impulsionado principalmente pelos dados de testes, e CAE ajudava a resolver problemas descobertos por testes. Isso exigiu muitos protótipos caros para garantir um teste adequado. Devido à necessidade de redesenhar hardware e de fazer reteste, o número de engenheiros envolvidos (e os custos) aumentavam dramaticamente como o programa se aproximou da confecção do veículo.

As pressões competitivas têm impulsionado a necessidade de encurtar o tempo de desenvolvimento do produto e reduzir os custos de desenvolvimento. Ford adotou o Sistema de Desenvolvimento Global de Produtos (GPDS) para se manterem competitivas. GPDS encurta o ciclo de desenvolvimento, eliminando muitas das construções de protótipos e grande parte da engenharia de projeto experimental feito anteriormente passou a ser feito por simulação. CAE fornece avaliação do conceito de design, definição de metas, desenvolvimento de design e validação final. Os protótipos são utilizados para verificação do projeto de hardware e resolver um número mínimo de questões. Capacidades de CAE, especificamente o uso de ferramentas de NVH CAE, são um fator essencial no processo de engenharia.

Uso de CAE traz varias vantagens:

- Reduz o teste e o número de protótipos necessários
- Reduz os recursos do programa global necessário
- Diminui o tempo de desenvolvimento de produto
- Melhora a qualidade do produto

A Análise do sistema powertrain completo e avaliação de todos os fenômenos NVH possíveis com uma análise CAE única não são práticos. Portanto, a análise de CAE é dividido em análises de subsistema de acordo com os elementos envolvidos nos fenômenos de NVH particular. Realiza-se a separação a seguir:

- Análise de NVH do Powertrain
- Mecanismo de análise de NVH
- Análise de NVH do Driveline
- Análise de NVH do sistema de admissão de ar
- Análise de NVH do sistema de escape

## Capítulo 7 - Materiais e métodos

Usando as teorias explicadas neste relatório, o estágio consistiu em recolher os dados dos testes de ruído e vibração que são feitos na planta da Ford em TAUÍ – SP, e interpretá-los. Esta interpretação consistiu em, identificar qual o tipo de ruído, analisar este ruído ou vibração dentro do carro, ver se ele está de acordo com a estratégia de marketing da empresa (dependendo do projeto, o NVH do carro pode ter que ser líder, pode ter que ser igual o da concorrência, ou pode não ter muita influencia), comparar com os concorrentes ou com carros anteriormente projetados, e dá a conclusão.

Caso o projeto passe nos testes, o carro será aprovado pelo departamento de NVH, caso ele não passe, o departamento de NVH irá procurar o departamento específico do componente o qual não passou no teste, e irá trabalhar em conjunto para reduzir a resposta do mesmo.

Na figura 40 vemos um gráfico produzido por um aplicativo da empresa, no qual analisa as contribuições acústicas individuais de cada subelemento de powertrain. Podemos ver que o ruído no interior deste veículo é predominantemente acústico, pois a resultante (preta) está quase alinhada com o ruído acústico, e que dentro deste, o ruído gerado pelo subsistema de escapamento é o mais significativo.

Cabe ao engenheiro de NVH analisar cada resultado passado pelos técnicos que fazem medição, analisá-los para ver se estão condizentes e entrar com os dados devidamente no programa que irá traçar o gráfico.

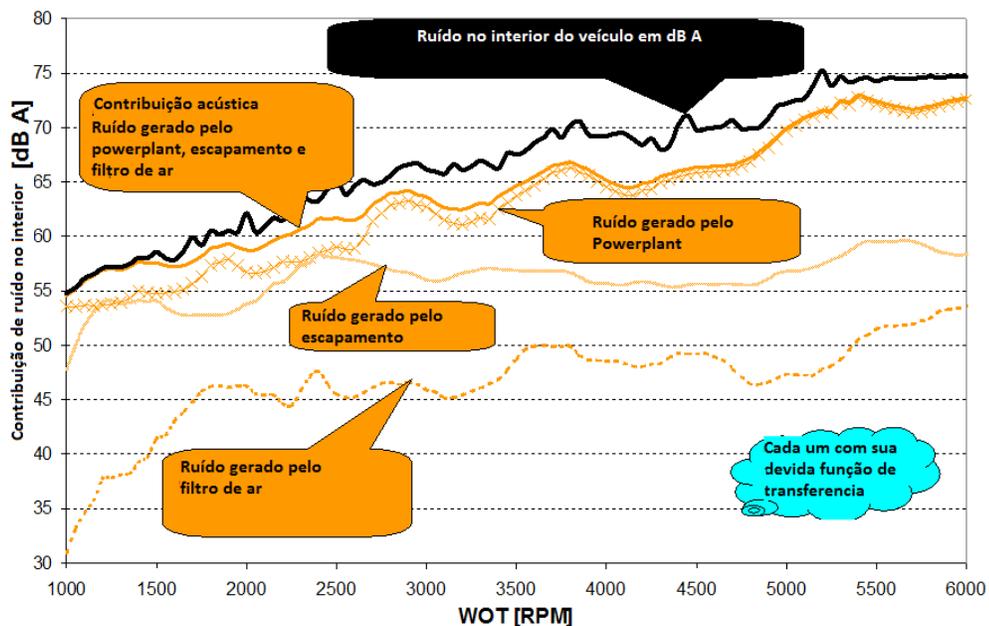


Figura 40 – Contribuição acústica gerada por contribuições individuais dos subsistemas do carro

Já com relação a figura 41, é um gráfico produzido pelo mesmo programa, mas que analisa as contribuições estruturais. Podemos ver que a força produzida pelo escapamento é desprezível, enquanto que a força produzida pelos coxins do motor é altamente significativa, então qualquer alteração nos coxins do motor, irá alterar a contribuição estrutural.

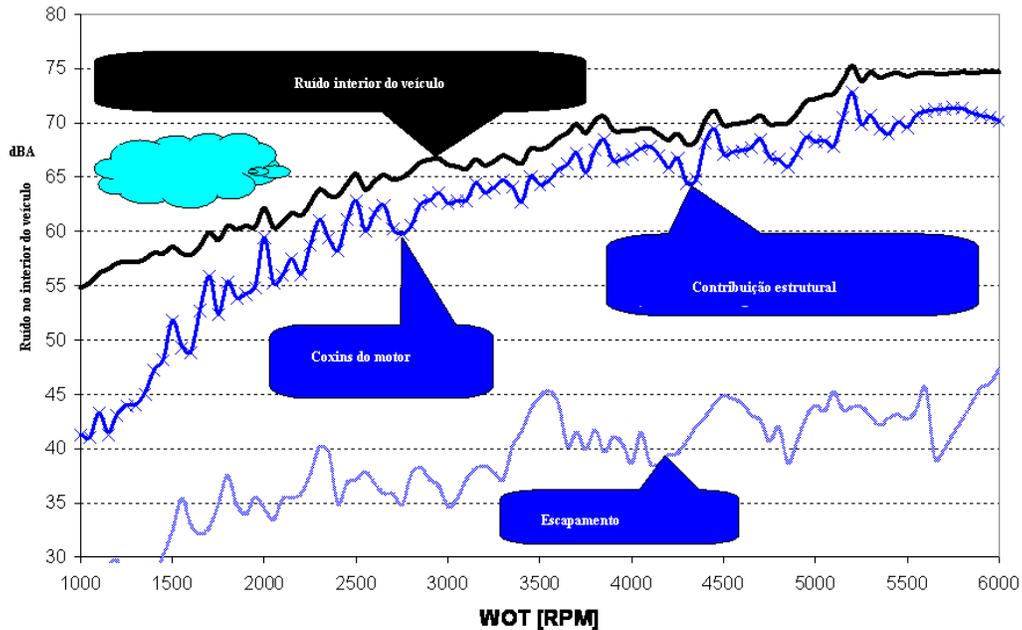


Figura 40 – Contribuição estrutural gerada por contribuições individuais dos subsistemas do carro

Depois da análise desses gráficos, faz-se a análise da estratégia de marketing do projeto para ver se é necessário melhorar (e propor soluções) ou se está dentro do desejado (e então é só aprovar). Este tipo de trabalho é realizado durante o planejamento e começo do desenvolvimento do programa.

Se o projeto está bem avançado, o trabalho é de fazer a integração de componentes (montando um protótipo), verificar como eles se comportam juntos, analisar suas respostas (no domínio da frequência) e verificar se continuam condizendo com o esperado pelo CAE.

## Conclusão

Inicialmente o objetivo do estágio seria apenas fazer treinamentos na área de engenharia de NVH, mas o estágio acabou se desenrolando muito bem, e trabalho práticos dentro da empresa foram realizados. Para isto foi necessário fazer mais alguns treinamentos da parte administrativa, de como os procedimentos devem ser realizados, e como se comportar e agir dentro da empresa, pois como se trata de uma empresa multinacional com vários centros de engenharia no mundo, todos os procedimentos são iguais para evitar duplo trabalho e para o trabalho ser desenvolvido mais rápido.

Pessoalmente o estágio me fez crescer muito por ter que conviver em uma grande empresa na qual se falam vários idiomas, que tem procedimentos administrativos rigorosos e nos faz organizar tudo com mais precisão, na qual existem diversas áreas e diversos assuntos na área de engenharia geral que eu posso aprender, e na qual eu trabalhei com tratamento de sinais na área automotiva, que é um assunto que me interessa bastante em um sistema que me dá prazer de trabalhar.

Então posso dizer que o estágio foi concluído com êxito e que este superou minhas expectativas com relação a empresa e ao assunto trabalhado.

## **Bibliografia**

D.Gillespie ,Thomas. **Fundamentals of Vehicle Dynamics** . Março 1992, SAE International,

Beranek. **Acoustics and vibrations - Noise and vibration**. 1992, Wiley.

Taylor, James. **Vibration Analysis Handbook**.2 edição, Novembro de 2003, VCI.

Dewey H. Hodges e G. Alvin Pierce. **Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity**. Cambridge