

**UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**SISTEMA DE ANÁLISE DE RUÍDO E VIBRAÇÃO**

Área de Engenharia Elétrica

por

Rodrigo Ferreira Lima Avanse

Débora Meyhofer Ferreira  
Orientadora

Itatiba (SP), Dezembro de 2009

**UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**SISTEMA DE ANÁLISE DE RUÍDO E VIBRAÇÃO**

Área de Engenharia Elétrica

por

Rodrigo Ferreira Lima Avanse

Monografia apresentada à Banca Examinadora  
do Trabalho de Conclusão do Curso de  
Engenharia Elétrica para análise e aprovação.  
Orientadora: Débora Meyhofer Ferreira

Itatiba (SP), Dezembro de 2009

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE EQUAÇÕES.....</b>	<b>vii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>ix</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
2.1.1. Objetivo Geral.....	1
2.1.2. Objetivos Específicos.....	1
<b>2.2. METODOLOGIA.....</b>	<b>2</b>
<b>2.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....</b>	<b>2</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>3</b>
<b>3.1. VIBRAÇÃO.....</b>	<b>3</b>
3.1.1. Definição de vibração.....	3
3.1.2. Origem da vibração.....	4
3.1.3. Quantificando o nível da vibração.....	5
<b>3.2. SENSORES PIEZOELÉTRICO.....</b>	<b>5</b>
3.2.1. Esquema prático de um Acelerômetro.....	6
3.2.2. Tipos de Acelerômetros.....	6
3.2.3. Características de um acelerômetro (sensibilidade, massa e range).....	7
3.2.4. Escolhendo uma posição de montagem para o acelerômetro.....	8
3.2.5. Montando o acelerômetro.....	9
3.2.6. Influências ambientais aos acelerômetros.....	10
3.2.7. Calibração dos acelerômetros.....	11
3.2.8. Um calibrador simples.....	12
<b>4. PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS.....</b>	<b>12</b>
4.1.1. Transformada de Fourier.....	12
4.1.2. Cálculo da DFT.....	16
4.1.3. Transformada Rápida de Fourier.....	18
<b>5. INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL.....</b>	<b>22</b>
5.1.1. Definição.....	22
5.1.2. Dispositivos de aquisição e controle: hardware.....	23
5.1.3. Aquisição de dados.....	23
5.1.4. LabView ( Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench).....	24
<b>6. PROJETO.....</b>	<b>26</b>
I. Teste de ruído na linha de produção.....	26
II. Definição do equipamento de teste objetivo de ruído.....	27
III. Estrutura física do equipamento.....	27

<b>IV.</b>	<b>Lógica de funcionamento .....</b>	<b>28</b>
<b>V.</b>	<b>Localização dos acelerômetros.....</b>	<b>28</b>
<b>VI.</b>	<b>Construção de um supervisor de planta e interface homem-máquina...</b>	<b>29</b>
<b>VII.</b>	<b>Definição das faixas de frequências características.....</b>	<b>30</b>
<b>VIII.</b>	<b>Definição dos limites máximos.....</b>	<b>31</b>
<b>IX.</b>	<b>Acompanhamento dos valores obtidos.....</b>	<b>36</b>
<b>X.</b>	<b>Ressonância de estruturas.....</b>	<b>36</b>
<b>XI.</b>	<b>Definição das frequências de propagação no interior do veículo.....</b>	<b>36</b>
<b>XII.</b>	<b>Análise da propagação de alguns componentes do mecanismo.....</b>	<b>38</b>
<b>7.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>41</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>42</b>

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

LABVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
FFT	Fast Fourier Transform
DFT	Discret Fourier Transform
TF	Transformada de Fourier
RMS	Root Mean Square
USB	Universal Serial Bus

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de um sistema mecânico .....	4
Figura 2. Tipos e Modelos de Acelerômetro .....	7
Figura 3. Posição de Montagem do acelerômetro .....	9
Figura 4. Curva de resposta de montagem do acelerômetro .....	10
Figura 5. DFT de 8 pontos .....	20
Figura 6. Diagrama da borboleta.....	20
Figura 7. Comparação no número de operações entre DFT e FFT .....	21
Figura 8. Painel frontal.....	25
Figura 9. Diagrama de blocos .....	25
Figura 10. Localização dos acelerômetros .....	28
Figura 11. Tela Labview - Painel Frontal .....	29
Figura 12. Tela Labview – Diagrama de Blocos.....	30
Figura 13. Estudo estatístico da faixa de frequência de 30 a 90 Hz.....	32
Figura 14. Estudo estatístico da faixa de frequência de 100 a 400 Hz.....	32
Figura 15. Estudo estatístico da faixa de frequência de 200 a 340 Hz.....	33
Figura 16. Estudo estatístico da faixa de frequência de 500 a 800 Hz.....	33
Figura 17. Estudo estatístico da faixa de frequência de 700 a 1000 Hz.....	33
Figura 18. Estudo estatístico da faixa de frequência de 2400 a 3000 Hz.....	34
Figura 19. Estudo estatístico da faixa de frequência de 3200 a 3800 Hz.....	34
Figura 20. Estudo estatístico da faixa de frequência de 4000 a 5000 Hz.....	34
Figura 21. Comportamento de um motor aprovado em relação aos limites especificados.....	35
Figura 22. Comportamento de um motor aprovado em relação aos limites especificados.....	35
Figura 23. Mecanismo limpador montado no veículo com os acelerômetros acoplados.....	37
Figura 24. Microfone no interior do veículo.....	37
Figura 25. Medição com microfone no interior do veículo (frequência de propagação).....	38
Figura 26. Gráfico da frequência de resposta.....	39
Figura 27. Gráfico da frequência de resposta após a alteração da dureza do amortecedor.....	40

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Faixas de frequencia analisadas com os níveis máximos permitidos.....	31
---	----

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (3.1) .....	13
Equação (3.2) .....	13
Equação (3.3) .....	13
Equação (3.4) .....	13
Equação (3.5) .....	14
Equação (3.6) .....	14
Equação (3.7) .....	14
Equação (3.8) .....	14
Equação (3.9) .....	15
Equação (3.10) .....	15
Equação (3.11) .....	16
Equação (3.12) .....	16
Equação (3.13) .....	17
Equação (3.14) .....	18
Equação (3.15) .....	19
Equação (3.16) .....	19
Equação (3.17) .....	20
Equação (3.18) .....	21

## RESUMO

Avanse, Rodrigo Ferreira Lima. Sistema de Análise de Ruído e Vibração. Itatiba, 2009. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade São Francisco, Itatiba, 2009.

Nos tempos de hoje a detecção de ruídos e vibrações muitas das vezes são de responsabilidade de um ser humano, onde julga subjetivamente a intensidade do ruído e da vibração através de padrões pré-determinados onde podem ocorrer algumas falhas na análise até mesmo por muitas vezes por falta de experiência.

Este projeto consiste no estudo e na aplicação, aquisição e análise de ruído e vibração utilizando sensores piezoelétricos (acelerômetros) que captam a vibração e demonstram esta vibração em frequências em função do tempo e em frequências em hertz para cada faixa é estipulado um limite máximo a ser seguido e através da captação dos sinais de frequência pelos acelerômetros, utilizando o software LABVIEW, onde passa por um condicionador de sinal, é convertido o sinal analógico em sinal digital.

**Palavras-chave:** ruído, vibração, LABVIEW.

## **ABSTRACT**

This project consists on a methodology studies and application, acquisition and analyses of noise and electric vibration using piezoelectric sensors (accelerometers) that they catch the vibration and they demonstrate this vibration in frequencies in function of the time and in frequencies in hertz for each band is stipulated a maximum limit to be followed and through the capitation of the signals of frequency from the accelerometers, using the LABVIEW software, where it passes for a signal conditioner where the analogical signal is converted into digital signal.

*Keywords: Fast Fourier Transform, noise, vibration.*

# 1. INTRODUÇÃO

Nos tempos de hoje a detecção de ruídos e vibrações muitas das vezes são de responsabilidade de um ser humano, onde julga subjetivamente a intensidade do ruído e da vibração através de padrões pré-determinados onde podem ocorrer algumas falhas na análise até mesmo por muitas vezes por falta de experiência.

Através de análise de Transformada Rápida de Fourier e frequências conhecidas é feita análise através do software LABVIEW onde são gravados os dados e calculados todas as curvas de frequência e comparada às especificações e retornando ao usuário um resultado mais eficiente e objetivo.

Este tipo de análise hoje é muito importante para a indústria automobilística, hospitalar, aeronáutica, utilizando este método é possível detectar ruídos, ressonâncias que muitas vezes incomodam o usuário e o ser humano, somente pela sua audição e tato não é possível realizar a detecção ficando assim sempre uma dúvida da real análise e do resultado final.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo análise de ruído e vibração utilizando sensores piezoelétricos e software LABVIEW para aquisição de dados.

### 2.1.2. Objetivos Específicos

Para conseguir alcançar o objetivo desse trabalho de implementar a medição de ruído e vibração foram estabelecidos alguns objetivos específicos como descritos a seguir:

- Aprimoramento dos conhecimentos de ruído e vibração;
- Aperfeiçoamento dos conhecimentos em relação a transformadas de Fourier;
- Aprendizado sobre instrumentação Virtual;
- Utilização do software LABVIEW

## **2.2. METODOLOGIA**

Este projeto se baseou em pesquisas de livros e sites sobre os assuntos envolvendo ruído e vibração, LABVIEW, processamento digital de sinais e instrumentação virtual. Em seguida foi elaborado um programa no software LABVIEW e implementado todo o conhecimento adquirido em pesquisa e com isso colhido os resultados e analisados.

## **2.3. ESTRUTURA DO TRABALHO**

O trabalho foi estruturado da seguinte forma:

No Capítulo 1 é apresentada a fundamentação teórica de vibração e sensores piezoelétricos.

Já o Capítulo 2 demonstra as ferramentas para os cálculos e análises tendo em foco o processamento digital de sinais.

O Capítulo 3 trata-se a instrumentação virtual e a utilização do software LABVIEW, explicando sua estrutura e funcionalidade onde foi muito importante para o desenvolvimento do projeto.

E por fim, no capítulo 4, o projeto e os resultados alcançados com a implantação do sistema de medição de ruído e vibração.

## **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A seguir apresenta-se a fundamentação teórica de como processar um sinal da melhor forma possível. Além disso, será visto teorias sobre ruído, vibração, sensores piezoelétricos e o funcionamento do software LABVIEW.

### **3.1. VIBRAÇÃO**

Desde que o homem começou a construir máquinas para o uso industrial, e especialmente desde que os motores foram usados para energizá-los, os problemas da redução da vibração e a isolamento vêm ocupando engenheiros.

Gradualmente, como as técnicas de redução da vibração e isolamento transformaram-se numa parte integral do projeto, a necessidade para a medida exata e a análise da vibração mecânica cresceu. Esta necessidade foi satisfeita pela maior parte, para as máquinas lentas e robustas, pela experiência de ouvir e tocar de cada engenheiro, ou por instrumentos óticos simples que medem o deslocamento vibratório.

Na última década uma nova tecnologia de medir vibração foi desenvolvida que é apropriada para uma alta investigação e moderna. Utilizando acelerômetros piezoelétricos para converter o movimento vibratório em um sinal elétrico.

#### **3.1.1. Definição de vibração**

Vibração é uma oscilação mecânica sobre um ponto de referência. Vibração é um fenômeno diário, nós encontramos em nossas casas, durante o transporte e no trabalho.

O número de vezes de um ciclo completo de um movimento que ocorre durante o período de um segundo é chamado de frequência e medido em hertz (Hz).

Todos os sistemas mecânicos contêm os três componentes básicos: mola, amortecedor, e massa. Quando cada uma destes é exposta por sua vez a uma força constante reagem com um deslocamento constante, uma velocidade constante e uma aceleração constante respectivamente.

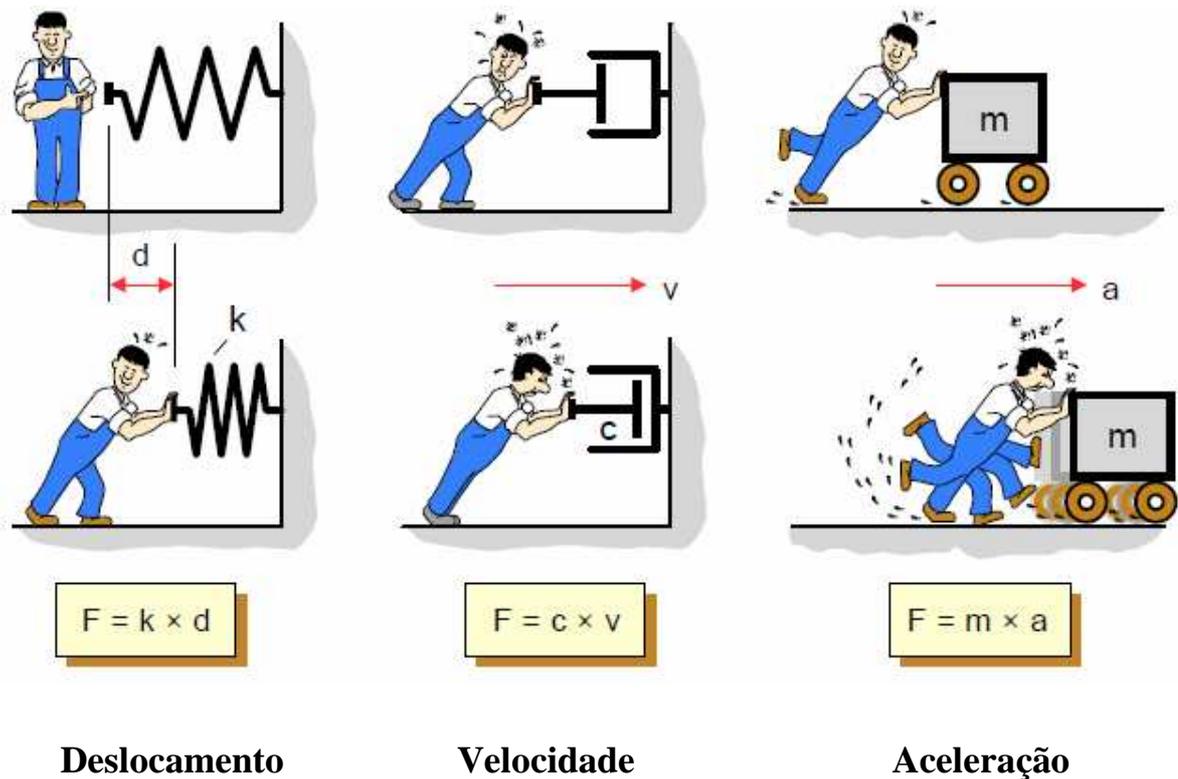


Figura 1. Componentes de um sistema mecânico

Fonte: Brüel & Kjør Technical Review – No.2 – 1996

### 3.1.2. Origem da vibração

Na prática é muito difícil evitar a vibração. Ocorre geralmente por causa dos efeitos dinâmicos, fricção entre as peças e forças externas em movimento. Frequentemente, pequenas vibrações insignificantes podem excitar as ressonantes frequências de outras partes estruturais e ser amplificadas em fontes principais de ruído e vibração.

Às vezes de qualquer forma, a vibração mecânica executa um trabalho útil. Por exemplo, nós geramos a vibração intencionalmente em alimentadores de componentes, em compactadores de concreto, e em brocas de rocha. As máquinas de teste de vibração são usadas extensivamente para passar um nível controlado de vibração aos produtos e aos subconjuntos onde se necessita examinar sua resposta física ou funcional e verificar sua resistividade aos ambientes da vibração.

Uma exigência fundamental em todo o trabalho da vibração está no projeto das máquinas que utilizam suas energias ou na criação da manutenção direta de produtos mecânicos correntes, é a habilidade de obter uma descrição exata da vibração pela medida e pela análise.

### **3.1.3. Quantificando o nível da vibração**

A amplitude da vibração, que é a característica que descreve a severidade da vibração, pode ser quantificada em diversas maneiras. O relacionamento entre o nível pico-a-pico, o nível de pico, o nível médio e o nível RMS de uma senóide. O valor pico-a-pico é o que indica a curva máxima da onda, uma quantidade útil onde, por exemplo, o deslocamento vibratório de uma peça da máquina é crítica para o stress máximo ou considerações mecânicas do afastamento.

O valor de pico é particularmente para indicar o nível de choques de curta duração. Os valores de pico indicam somente que nível máximo ocorreu.

O valor médio retificado faz exame da história do tempo da onda, mas é considerado de interesse prático limitado porque não tem nenhum relacionamento direto com qualquer quantidade física útil.

O valor do RMS é a medida mais relevante da amplitude porque faz exame da história do tempo da onda e dá um valor da amplitude que seja relacionado diretamente ao índice de energia, e conseqüentemente as habilidades destrutivas da vibração.

## **3.2. SENSORES PIEZOELÉTRICO**

Hoje em dia o transdutor é um sensor muito utilizado para obtenção de medidas de vibração e tem aplicação também como acelerômetro piezoelétrico. Exibe características versáteis melhores do que qualquer outro tipo de transdutor de vibração. Tem a frequência muito larga e escalas dinâmicas com linearidades boas durante todas as escalas. É relativamente robusto e de confiança de modo que suas características remanesçam estáveis sobre um período de longo tempo.

Adicionalmente, o acelerômetro piezoelétrico auto-gerador, de modo que não necessite uma fonte de alimentação. Não há nenhuma peça que se movimente, e finalmente, sua saída proporcional da aceleração pode ser integrada para dar a velocidade e o deslocamento sinais proporcionais. O coração de um acelerômetro é a fatia do material piezoelétrico, geralmente um material cerâmico ferroelétrico artificial polarizado, que exhibe o efeito piezoelétrico original. Quando é um stress mecânico, na tensão, compressão ou cisalhamento é gerada uma carga elétrica dentre os pólos que proporciona à força aplicada.

### 3.2.1. Esquema prático de um Acelerômetro

Em esquemas práticos de um acelerômetro, o elemento piezoelétrico é arranjado de modo que quando o conjunto é vibrado a massa aplique uma força ao elemento piezoelétrico que é proporcional a aceleração vibratória. Isto pode ser visto da lei, Força = Massa x Aceleração.

Para as frequências que se encontram abaixo da frequência de ressonância do sistema completo massa-mola, a aceleração da massa será a mesma aceleração da base, e o valor do sinal de saída será conseqüentemente proporcional à aceleração.

Duas configurações estão comumente utilizadas:

- **O tipo de compressão** onde a massa exerce uma força compressiva no elemento piezoelétrico.
- **O tipo de tesoura** onde a massa exerce uma força de tesoura no elemento piezoelétrico

### 3.2.2. Tipos de Acelerômetros

As maiorias de fabricantes têm uma escala larga dos acelerômetros, em primeiro instante podem ser demais para se fazer uma fácil escolha. Um grupo pequeno de tipos “de uso geral” irá satisfazer maioria das necessidades. Estes estão disponíveis com cabos e conectores montados e têm sensibilidades na escala 1 a 10 milivolt por  $m/s^2$ . A maioria dos tipos tem sua sensibilidade normalizada como 1 ou 10 milivolt/ $ms^2$  para simplificar a calibração do sistema de medição.

Os acelerômetros restantes têm suas características indicadas para uma aplicação particular e que pesam somente 0,5 a 2 gramas. Por exemplo, para a elevação em nível ou medidas de alta frequência e para o uso em estruturas, nos painéis, etc.

Outros tipos especiais da finalidade otimizadas para: medida simultânea em três planos mutuamente perpendiculares; altas temperaturas; níveis muito baixos de vibração; alto nível de impacto; calibração de outros acelerômetros por comparação; e para a monitoração permanente em máquinas industriais.



Figura 2. Tipos e Modelos de Acelerômetro

Fonte: Brüel & Kjær Technical Review – No.1 – 1988

### 3.2.3. Características de um acelerômetro (sensibilidade, massa e range).

A sensibilidade é a primeira característica considerada normalmente. Idealmente nós gostaríamos de um elevado nível de saída, mas aqui nós temos que comprometer porque a sensibilidade elevada envolve normalmente um conjunto piezoelétrico relativamente grande e conseqüentemente uma unidade relativamente grande e pesada.

Em circunstâncias normais a sensibilidade não é um problema crítico porque os pré-amplificadores modernos são projetados para aceitar estes sinais do nível baixo. A massa dos acelerômetros torna-se importante ao medir em objetos claros. A massa adicional pode significativamente, alterar os níveis e as frequências da vibração no ponto de medição.

Em regra geral, a massa do acelerômetro não deve ser mais que um décimo da massa dinâmica da parte vibratória em que é montada.

Quando se deseja medir níveis normalmente baixos ou elevados de aceleração, a escala dinâmica do acelerômetro deve ser considerada. O limite mais baixo não é determinado normalmente diretamente pelo acelerômetro, mas pelo ruído elétrico dos cabos e dos circuitos

conectando do amplificador. Este limite é normalmente tão baixo quanto um centésimo de miliamper/s<sup>2</sup> com instrumentos de uso geral.

O limite superior é determinado pela força estrutural do acelerômetro. Um acelerômetro de uso geral típico é 50000 a 100 000 m/s<sup>2</sup>, é bom para uso de escalas dos choques mecânicos. Um acelerômetro projetado especialmente para a medida dos choques mecânicos pode ser linear até 1000km/s<sup>2</sup> (100000 g).

#### **3.2.4. Escolhendo uma posição de montagem para o acelerômetro**

O acelerômetro deve ser montado de modo que o sentido de medição desejado coincida com sua linha central principal da sensibilidade. Os acelerômetros são também ligeiramente sensíveis às vibrações no sentido transversal, mas este pode normalmente ser ignorado porque a sensibilidade transversal é tipicamente menos de 1% da sensibilidade principal da linha central.

A razão para a vibração de medição no objeto ditará geralmente a posição do ponto de medição. Tenha como exemplo uma carcaça de um rolamento. Aqui, as medidas da aceleração estão sendo usadas monitorar a condição de giro do eixo e do rolamento. O acelerômetro deve ser posicionado para manter um trajeto direto para a vibração do rolamento.

O acelerômetro “A” (figura 3) detecta assim o sinal das vibrações excedentes predominantes do rolamento vindo de outras peças da máquina, mas o acelerômetro “B” (figura 3) detecta a vibração do rolamento, modificada provavelmente pela transmissão através de uma junção, misturada com os sinais de outras peças da máquina.

Do mesmo modo, o acelerômetro “C” (figura 3) é posicionado em um trajeto mais direto do que o acelerômetro “D”(figura 3).

É impossível indicar uma regra geral, mas porque no exemplo, para o rolamento mostrado, podemos ganhar a informação valiosa para monitorar finalidades medindo ambos no sentido axial e um dos sentidos radiais, geralmente esse se espera ter a rigidez a mais baixa.

A resposta de objetos mecânicos às vibrações forçadas é um fenômeno complexo, de modo que um possa esperar, especialmente em altas frequências, medir níveis da vibração e espectro significativamente diferentes da frequência, mesmo em pontos adjacentes ou no mesmo elemento da máquina.

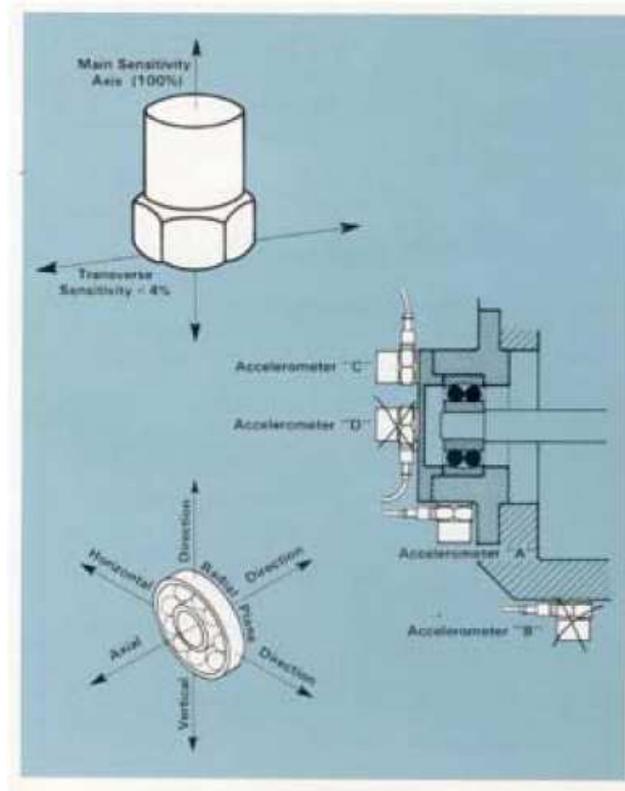


Figura 3. Posição de Montagem do acelerômetro

Fonte: Brüel & Kjær Technical Review – No.1 – 1988

### 3.2.5. Montando o acelerômetro

O método de montar o acelerômetro a ponto de medição é um dos fatores mais críticos em obter resultados exatos das medidas de vibração práticas.

A montagem incorreta resulta em uma redução na frequência de ressonância, que pode severamente limitar a escala de frequência útil do acelerômetro. A montagem ideal é por um parafuso prisioneiro colocado em uma superfície plano, liso como mostrado na Figura 4. Uma camada fina de graxa aplicou-se à superfície de montagem antes de apertar o acelerômetro melhorará geralmente a rigidez da montagem.

O furo na peça deve ser suficientemente profundo de modo que o parafuso prisioneiro não seja forçado na base do acelerômetro. O desenho da parte superior na Figura 4 mostra uma curva de resposta típica de um acelerômetro de uso geral montado com um parafuso prisioneiro reparando em uma superfície plana. A frequência ressonância alcançada é quase tão elevada como a 32kHz montado a frequência de ressonância alcançada sob a calibração onde a superfície da montagem é absolutamente plana e lisa.

Um método alternativo geralmente usado da montagem é o uso de uma camada fina de cera para fixar o acelerômetro no lugar. Como pode ser visto a curva de resposta, a frequência de ressonância é reduzida ligeiramente (a 29kHz). Porque a cera se torna macia em altas temperaturas, o método é restringido aproximadamente a 40°C. Com superfícies limpas, a cera é usada para níveis de aceleração de até aproximadamente 100 m/s<sup>2</sup>.

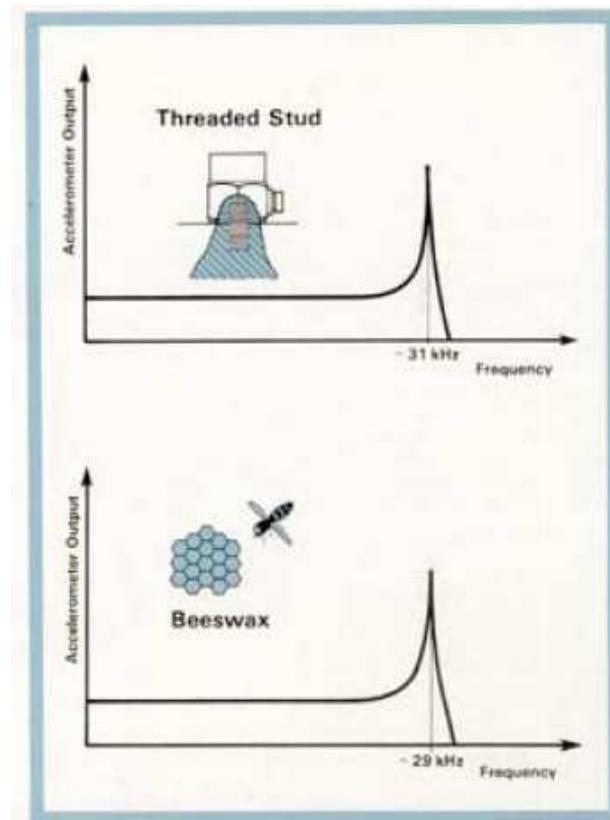


Figura 4. Curva de resposta de montagem do acelerômetro

Fonte: Brüel & Kjær Technical Review – No.1 – 1988

### 3.2.6. Influências ambientais aos acelerômetros

Os acelerômetros de uso geral podem tolerar temperaturas até 250°C. Em temperaturas muito altas a cerâmica piezolétrica começa a despolarizar de modo que a sensibilidade seja alterada permanentemente. Tal acelerômetro pode ainda ser usado após a re-calibração se a despolarização não for tão severa. Para temperaturas até 400°C, os acelerômetros com um cerâmico piezoelétrico especial estão disponíveis.

Todos os materiais piezoelétricos são dependentes de temperatura de modo que toda sua variação resulte em uma mudança na sensibilidade do acelerômetro. Para esta razão todos os acelerômetros são entregues com uma sensibilidade contra a curva de calibração da temperatura de

modo que os níveis medidos possam ser corrigidos para a mudança na sensibilidade do acelerômetro ao medir nas temperaturas significativamente mais elevadas ou abaixo do que 20°C.

Os acelerômetros piezoelétricos exibem também uma saída variando quando sujeitos à temperatura com pequenas flutuações, chamadas transientes da temperatura, no ambiente de medição.

Este é normalmente somente um problema onde há nível muito baixo de vibração ou nível muito baixo da frequência onde estão sendo medidas. O tipo moderno acelerômetros da tesoura tem uma sensibilidade muito baixa aos transientes da temperatura.

Quando os acelerômetros devem ser reparados às superfícies com mais altas temperaturas do que 250°C, uma arruela do dissipador de calor e da mica pode ser introduzida entre a base e a superfície de medição. Com temperaturas de superfície de 350 a 400°C, a base do acelerômetro pode ser presa abaixo de 250°C por este método.

### **3.2.7. Calibração dos acelerômetros**

Cada acelerômetro é fornecido individualmente calibrado de fábrica e é acompanhado por uma carta detalhada da calibração. Onde os acelerômetros são armazenados e operados dentro de seus limites ambientais especificados, não são sujeitos aos choques, às temperaturas, etc. Haverá uma mudança mínima nas características sobre um período de tempo longo. Os testes mostram que as características mudam menos de 2%, mesmo períodos do excesso de diversos anos.

Entretanto, no uso normal, os acelerômetros são sujeitos freqüentemente ao tratamento completamente violento que pode resultar em uma mudança significativa nas características e às vezes mesmo em danos permanentes. Quando deixado cair em um assoalho concreto da altura da mão um acelerômetro pode ser sujeito a um choque de muitos milhares do G. É sábio conseqüentemente fazer uma verificação periódica da calibração da sensibilidade. Isto é normalmente suficiente confirmar que o acelerômetro não foi danificado.

### **3.2.8. Um calibrador simples**

Um dos meios os mais convenientes de executar uma verificação periódica da calibração é usando fonte chaveada geradora de uma vibração. Isto é um pequeno shaker que possa ser ajustada para vibrar em precisamente  $10 \text{ m/s}^2$ .

A calibração da sensibilidade de um acelerômetro é verificada prendendo ao shaker e anotando sua saída quando vibrada em  $10 \text{ m/s}^2$ . Alternativamente um acelerômetro pode ser reservado para o uso como uma referência. Isto é montado ao shaker com o acelerômetro a ser calibrado. A relação de suas saídas respectivas quando vibrada será proporcional a suas sensibilidades, e como a sensibilidade do acelerômetro da referência é sabida. A sensibilidade do acelerômetro desconhecido pode exatamente ser determinada.

Uma aplicação útil para o calibrador portátil é verificar de uma instalação de medição ou de análise completa antes que as medidas estejam feitas. O acelerômetro de medição é transferido simplesmente do objeto de medição ao calibrador e vibrado em um nível de  $10 \text{ m/s}^2$ . A leitura de saída do medidor pode ser verificada se um nível ou o registrador de fita adesiva estiverem sendo usados, o nível da calibração  $10 \text{ m/s}^2$  pode ser gravado para a referência futura.

## **4. PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS**

Com a evolução tecnológica e o desenvolvimento dos computadores digitais de alta capacidade, a Transformada Discreta de Fourier tornou-se uma ferramenta matemática muito usada em processamento de sinais, pois realiza a transição entre as variáveis tempo e frequência. O objetivo deste capítulo é apresentar de forma resumida as principais propriedades da Transformada de Fourier e apresentar técnicas computacionais para sua determinação na forma discreta, a DFT, e seus algoritmos rápidos e muito usados, chamados de FFT.

### **4.1.1. Transformada de Fourier**

A transformada de Fourier é um método matemático que converte o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, explicitando assim suas várias componentes harmônicas.

A transformada de Fourier é uma operação linear e baseia-se na assertiva de que qualquer sinal ou função pode ser representado por uma combinação linear de um conjunto completo de funções básicas, que possuam a propriedade de ortogonalidade (funções trigonométricas, funções

exponenciais complexas, polinômios de Legendre, etc.). Um conjunto de funções ortogonais mais utilizados para a representação de um sinal é o conjunto das funções exponenciais complexas, que aparecem de forma compacta na expressão da Transformada de Fourier (TF) para diferentes tipos de sinais, como apresentado a seguir:

Sinais Contínuos Periódicos:

$$X(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n e^{jn\omega t} \quad t \leq t \leq t_1 + T$$

Equação (3.1)

$$X_n = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} X(t) e^{-jn\omega t} .dt$$

n=..., -1, 0, 1,...

Equação (3.2)

Onde:  $\omega = 2\pi/T$  T – período do sinal x(t)

A equação (3.1) é denominada série de Fourier, que é um caso particular da TF, e  $X_n$  é o coeficiente n da serie.

Sinais Contínuos Aperiódicos:

$$X(t) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} .d\omega$$

Equação (3.3)

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) e^{-j\omega t} .dt$$

Equação (3.4)

As equações (3.3) e (3.4) são conhecidas como o par de transformada de Fourier e podem ser simbolicamente representadas por:

$$X(\omega) = \mathcal{F} [x(t)] - \text{Transformada direta}$$

Equação (3.5)

$$x(t) = \mathcal{F}^{-1} [X(\omega)] - \text{Transformada inversa}$$

Equação (3.6)

$X(\omega)$  é conhecida como densidade espectral e geralmente é uma função contínua de  $\omega$ .

Sinais Discretos Periódicos:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=\langle N \rangle} X[k] \cdot e^{j \frac{2\pi nk}{N}}$$

Equação (3.7)

$$X[k] = \sum_{n=\langle N \rangle} x[n] \cdot e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}$$

Equação (3.8)

$N$  – Numero de amostras por período do sinal.

As expressões (3.7) e (3.8) juntas são conhecidas como o par de Transformada Discreta de Fourier (DFT) e quase sempre são series complexas.

Sinais discretos Aperiódicos:

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \sum_{-\pi}^{\pi} X[\Omega] \cdot e^{j\Omega n} \cdot d\Omega$$

Equação (3.9)

$$X[\Omega] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot e^{-j\Omega n}$$

Equação (3.10)

Onde:  $[\Omega] = 2\pi/N$  com  $N \rightarrow \infty$

$K = \langle N \rangle$

Observando as expressões da transformada de Fourier conclui-se que há similaridades entre os seguintes casos:

- 1- Sinal periódico (contínuo ou discreto) tem espectro discreto.
- 2- Sinais aperiódico (contínuo ou discreto) têm espectro contínuo.

Dos quatro casos apresentados, a transformação mais conveniente para obter o espectro de amplitude de um sinal real é a DFT, pelas seguintes razões:

- Todo sinal real pode ser discretizado para cálculos digitais precisos;
- A transformação do sinal discreto periódico gera um espectro de valores discretos;
- Os algoritmos FFT permitem calcular a DFT de forma rápida e eficiente.

Para se aplicar a DFT (válida para sinais periódicos e discretos) em sinais da rede elétrica, que são contínuos e até mesmo aperiódicos dentro de intervalos grandes de observação, duas condições devem ser consideradas:

- 1- O sinal deverá ser discretizado dentro de um intervalo de tempo  $T_a$  finito, correspondente a pelo menos 1 período da fundamental ( $T_a \geq 1/f_1$ );

2 – O sinal amostrado será considerado periódico, sendo um período a forma observada no intervalo de tempo  $T_a$  ( $T_a = T$ ).

Evidentemente que ao transformar um sinal resultante da discretização de um sinal contínuo para o domínio da frequência, o espectro obtido (do sinal discreto) será apenas uma aproximação do espectro original (do sinal contínuo). Isto ocorre devido às operações de limitação no tempo e amostragem do sinal contínuo para a aplicação da DFT.

Para uma interpretação adequada dos resultados, deve-se ainda ressaltar que a condição de periodicidade imposta a um sinal aperiódico, considerando que um período corresponde ao sinal medido durante o intervalo de tempo  $T_a$ , significa que o espectro obtido valerá apenas este intervalo, nada podendo ser afirmado fora dele.

Assim, com o sinal devidamente caracterizado, podemos aplicar a transformação desejada (DFT) determinando e interpretando adequadamente o espectro de amplitude do sinal de tensão ou corrente do sistema elétrico desejado.

#### 4.1.2. Cálculo da DFT

Reescrevendo as expressões do par de transformada discreta de Fourier para uma seqüência periódica de  $N$  amostras, tem-se:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \cdot W_N^{-kn} \quad 0 \leq n \leq N-1$$

Equação (3.11)

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot W_N^{kn} \quad 0 \leq k \leq N-1$$

Equação (3.12)

Onde:  $W_{N=} e^{-j\frac{2\pi}{N}}$  - Deslocamento angular

A DFT direta (equação 3.12) é a representação de Fourier para seqüência finitas de valores e corresponde a amostras da Transformada de Fourier do sinal, igualmente espaçadas em frequência.

Sendo  $x[n]$  uma série complexa de valores temporais (caso geral), a equação 3.12 pode ser escrita da seguinte forma:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} \{ R_e[x[n]] \cdot R_e[W_N^k] - I_m[x[n]] \cdot I_m[W_N^k] + j(Re[x[n]] \cdot I_m[W_N^k] + I_m[x[n]] \cdot R_e[W_N^k]) \}$$

Equação (3.13)

A partir da equação (3.13) temos que, para cada valor de  $k$ , o cálculo direto de  $X[k]$  requer  $4N$  multiplicações reais e  $4N-2$  adições reais. Desde que  $X[k]$  é calculado para  $N$  diferentes valores de  $k$ , o cálculo da DFT de uma seqüência  $x[n]$  requer multiplicações reais e  $N \cdot ( )$  adições reais ou multiplicações complexas e  $N \cdot (N-1)$  adições complexas. Em um computador digital o tempo computacional e a quantidade de memória requerida para o cálculo de dados numéricos são aproximadamente proporcionais ao número de operações aritméticas, e quanto maior for o valor de  $N$ , mais cálculos serão exigidos para obtermos a DFT.

Portanto, procedimentos computacionais que reduzam o número de multiplicações e adições no cálculo da DFT são de grande interesse.

No ano de 1965 J.W. Cooley e J.W. Tukey publicaram um trabalho sobre o cálculo da DFT através de um algoritmo computacional, que reduzia consideravelmente o número de operações aritméticas. A publicação deste artigo produziu outros trabalhos que aplicavam a DFT em processamento de sinais e resultou em uma família de algoritmos conhecidos como “fast Fourier Transform” ou algoritmos FFT.

### 4.1.3. Transformada Rápida de Fourier

O papel das DFT's como ferramenta computacional é grandemente ampliado pela disponibilidade de algoritmos eficientes para avaliar a DFT direta e inversa. Esses algoritmos são chamados coletivamente como transformada rápida de Fourier ou algoritmos FFT.

A FFT é um método matemático para calcular a DFT, processando grande número de amostras de uma seqüência  $x[n]$  em tempo mínimo.

O princípio básico desse algoritmo é a decomposição da DFT de uma seqüência de comprimento  $N$  (3.12) em pequenas e sucessivas DFT's. A forma como este princípio é implementado leva a uma variedade de diferentes algoritmos, que explorando as propriedades de simetria e periodicidade do fator  $W_N$  reduzem o número de operações aritméticas, sendo divididos em duas classes:

- Dizimação no tempo que decompõe a seqüência  $x[n]$  em pequenas e sucessivas subseqüências para calcular a transformada.
- Dizimação na frequência que se baseia na quebra da seqüência  $x[n]$  e uma posterior quebram na seqüência  $X[k]$  sucessivamente para obter a transformação.

Analisando o algoritmo de dizimação no tempo para o caso de  $N$  ser uma potência inteira de

2, tem-se  $N^{2^v}$ .

Como  $N$  é par, calcula-se  $X[k]$  (equação 3.12), separando  $x[n]$  em duas seqüência de  $N/2$  amostras, consistindo uma seqüência de pontos pares e a outra de pontos ímpares de  $x[n]$ .

$$X[k] = \sum_{n \text{ par}} x[n] W_N^{nk} + \sum_{n \text{ ímpar}} x[n] W_N^{nk}$$

Equação (3.14)

Substituindo  $n=2r$  para  $n$  par e  $n=2r+1$  pra  $n$  ímpar, obtém-se

$$X[k] = \sum_{r=0}^{\left(\frac{N}{2}\right)-1} x[2r] W_N^{2rk} + \sum_{r=0}^{\left(\frac{N}{2}\right)-1} x[2r+1] W_N^{(2r+1)k}$$

Equação (3.15)

Como  $W_N^2 = (e^{-j2\pi/N})^2 = W_{N/2}$ , cada somatória da expressão acima se torna uma DFT de tamanho  $N/2$ , com a primeira soma de pontos pares e a segunda soma de pontos ímpares da seqüência original  $x[n]$ , ou seja:

$$X[k] = \sum_{r=0}^{\left(\frac{N}{2}\right)-1} x[2r] W_{N/2}^{2rk} + \sum_{r=0}^{\left(\frac{N}{2}\right)-1} x[2r+1] W_{N/2}^{(2r+1)k}$$

Equação (3.16)

Se  $N/2$  é ainda um número par, podemos continuar o processo de quebra da seqüência calculando a DFT de  $N/4$  pontos. Esta quebra continua até termos a expressão da DFT de dois pontos.

Para uma seqüência de 8 pontos tem-se o cálculo completo da DFT, que pode ser representado pelo gráfico de fluxo mostrado na figura 5:

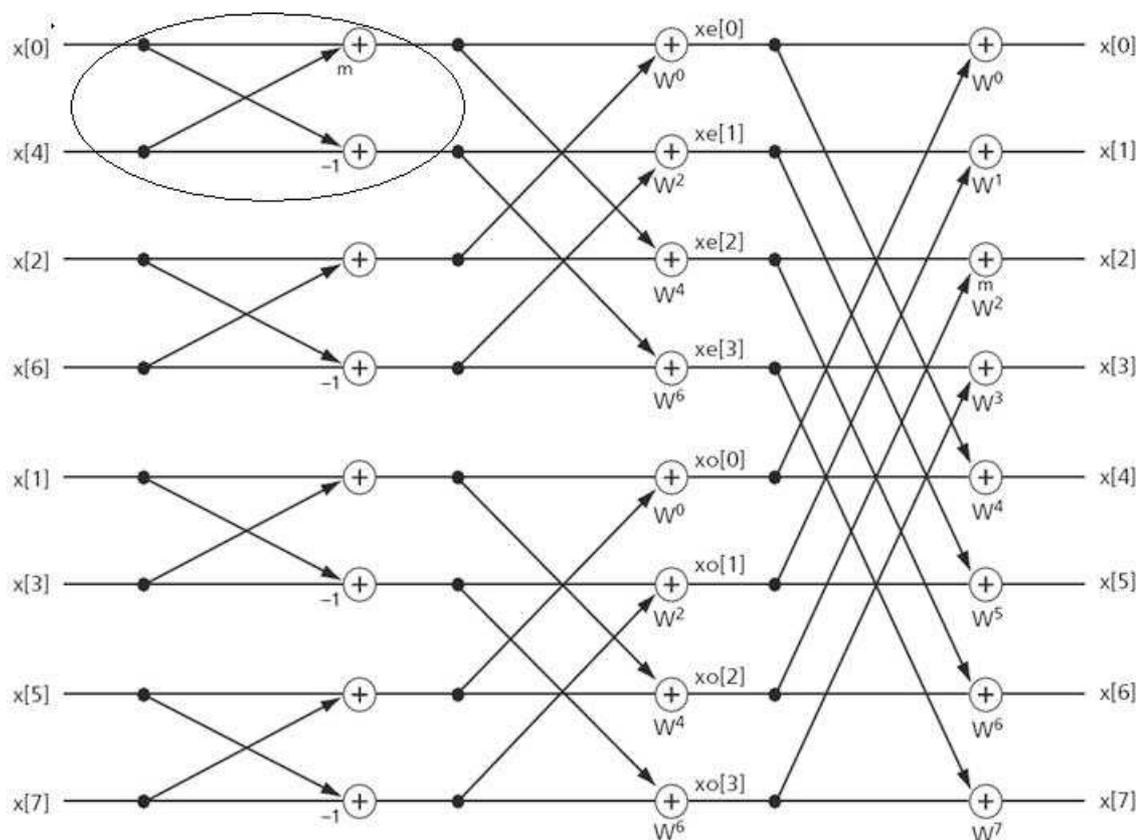


Figura 5. DFT de 8 pontos

Fonte: Proakis, John G.;Manolakis, Dimitris G. - Digital Signal Processing – Third edition

A parte destacada deste gráfico é a DFT de dois pontos [x(0) e x(4)], denominada borboleta (“butterfly”), pois lembra o formato de uma borboleta conforme mostrado na figura 6.

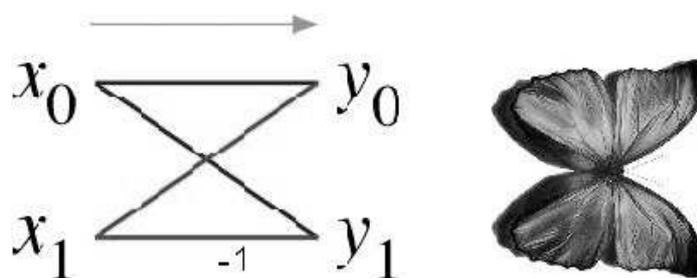


Figura 6. Diagrama da borboleta

Fonte: Proakis, John G.;Manolakis, Dimitris G. - Digital Signal Processing – Third edition

A DFT de dois pontos pode ser representada pela seguinte equação:

$$X_{m+1}(p) = X_m(p) + W_n^r \cdot X_m(q)$$

Equação (3.17)

$$X_{m+1}(q) = X_m(p) - W_N^r \cdot X_m(q) \quad E$$

Equação (3.18)

Onde: m - Estágio da DFT – m=1, 2, ...v;

p, q- Numero da amostra;

r - Expoente que varia de acordo com o estágio a ser feito.

No caso da DFT de 8 pontos ( $2^3$ ) tem-se 3 estágios até a obtenção dos valores de X[K].

O algoritmo de dizimação na frequência é semelhante ao anterior, sendo que as operações quebram a sequência X[K] até a DFT de 2 pontos. Para qualquer dos dois métodos a redução no número de operações aritméticas, comparada com o método direto da DFT, é de  $N^2$  para  $N/2$  multiplicações complexas e  $N(N-1)$  para  $N \cdot \log_2 N$  adições complexas. A diferença no número de operações aritméticas entre o método da DFT e o método direto é mostrado na figura 6.

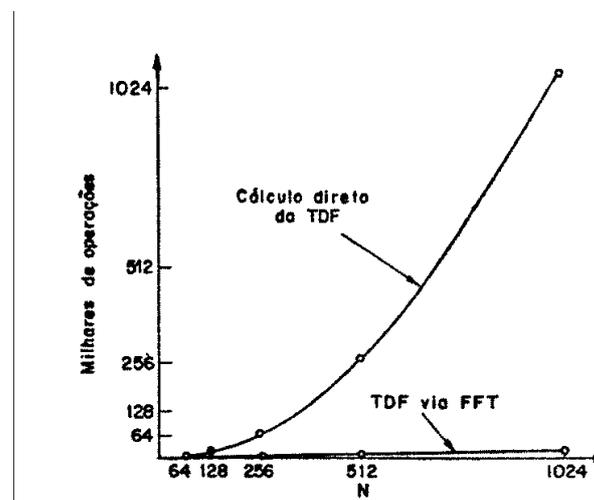


Figura 7. Comparação no número de operações entre DFT e FFT

Fonte: Proakis, John G.; Manolakis, Dimitris G. - Digital Signal Processing – Third edition

A FFT pode ser realizada para qualquer número de amostras N, mas sua eficiência é maior quando N é uma potência inteira de 2, levando a algoritmos chamados de FFT radix 2.

## 5. INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL

### 5.1.1. Definição

A instrumentação virtual consiste em implantar uma ferramenta de programação adequada, um equipamento de aquisição, que junto a um computador pessoal, executam as tarefas de instrumentos tradicionais que é usado no dia a dia. Muitos instrumentos analógicos ou digitais podem ser concentrados de maneira virtual em um único instrumento virtual, e com isso reduzindo custos e espaço. Com a rápida evolução dos computadores, os instrumentos virtuais se tornam cada vez mais rápidos e mais tecnológicos e ainda possuem a vantagem de serem, no caso de uso comum computador portátil, levados a qualquer lugar sem muitos esforços. Ela é composta por computador pessoal, um software de programação e dispositivos de aquisição e controle.

Um instrumento real é um aparelho dotado de uma forma geral de: sensores, que convertem grandezas de diversos tipos em sinais elétricos; transdutores, que alteram uma variável física; painel de controle que contem os botões, as chaves, os indicadores, os mostradores; painel de conexão que contém os terminais aos quais se conecta os sensores, os atuadores através de cabos ou fios.

A transdução da grandeza física genérica para a forma elétrica é requerida em instrumentos cujo funcionamento é eletrônico. Em geral o painel de controle opera eletronicamente, bem como o processamento do sinal. Esses instrumentos são usados fazendo as conexões dos cabos de ligação com os demais dispositivos através do painel de conexões e opera o instrumento através do painel frontal. Por isso, podemos dizer que o conjunto desses painéis constitui a interface conceitual entre o instrumento (real) e o usuário.

Já o instrumento virtual pode ser definido como um sistema que é formado por um computador equipado com placas de medidas e um software de desenvolvimento.

Um programa executado no computador torna o instrumento ou o controlador acessível ao operador por meio de uma interface gráfica. Essa interface tem botões, chaves, mostradores, indicadores, painéis de exibição de gráficos, etc, apresentados como objetos interativos, animados sob ação do operador através de cursor do mouse. O instrumento conectado ao computador pode ser desde um equipamento completo, como um osciloscópio, por exemplo, ou mesmo um simples sensor como um termopar usado para medir temperatura.

Se acoplarmos, por exemplo, ao computador um osciloscópio digital que não tenha a função de análise espectral, podemos obter os dados do sinal adquiridos pelo osciloscópio, processá-los no computador usando-se um algoritmo de FFT e assim realizar uma análise espectral do sinal.

### **5.1.2. Dispositivos de aquisição e controle: hardware**

O hardware associado ao computador pessoal para se ter um instrumento virtual pode ser dividido em duas categorias: dispositivos de aquisição de dados e dispositivos de controle de instrumentos.

Os dispositivos de aquisição de dados agem entre o computador e o mundo exterior. Estes dispositivos de aquisição de dados agem entre o computador e o mundo exterior. Estes dispositivos funcionam primeiramente como um conversor dos sinais analógicos em sinais digitais, fazendo com que o computador possa interpretá-los. Sendo estes sinais obtidos pelos sensores ou transdutores dos fenômenos da natureza envolvidos em cada experiência laboratorial.

O controle de instrumentos pelo computador é realizado, quando o computador é responsável por monitorar e controlar os instrumentos utilizados nas experiências laboratoriais via comunicação digital de dados, onde se requer o uso de interfaceamento e transmissão de sinais digitais.

### **5.1.3. Aquisição de dados**

Existem uma variedade de hardware disponível que você pode acoplar no computador ou acessar através de uma rede. Estes dispositivos oferecem uma enorme gama de possibilidades de aquisição de dados a um custo muito baixo do que utilizar dispositivos dedicados.

Para se obter um sinal desejado, podem-se usar sensores ou transdutores que são responsáveis por transformar grandezas físicas em uma grandeza que possa ser adquirida por uma placa de aquisição.

Mas no momento do uso de sensores e transdutores deve-se tomar cuidado, pois esses sinais podem ser de alto valor, com ruídos, muitos baixos e por isso torna-se necessário condicionar os sinais para uma aquisição de dados. O condicionamento de sinais maximiza a exatidão do sistema, permitindo que os sensores operem corretamente e garantindo segurança no sistema. Esses dispositivos podem amplificar os sinais baixos, atenuarem sinais altos, amostrar sinais elétricos simultaneamente, alimentar transdutores ou sensores ativos entre outras funções.

Além disso, os dispositivos incluem entradas ou saídas analógicas, entradas ou saídas digitais, contadores, temporizadores e filtros. A grande diversidade de placas e de dispositivos pode incluir qualquer uma destas características ou uma combinação delas.

Hoje o mercado possui varias plataformas para aquisição de dados: Plataforma distribuída, o próprio PC, plataformas portáteis, módulos PXI/CompacPCI.] A plataforma de aquisição de dados distribuídos é baseada em módulos de entrada e saída de dados Ethernet. A plataforma portátil possui comunicação via porta USB. Já os módulos PCI/Compac/PCI são plataformas mais robustas, que possui um computador dedicado especificamente para controlar os dispositivos de aquisição.

#### **5.1.4. LabView ( Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)**

Como as linguagens tradicionais não podem estabelecer facilmente a comunicação entre computador e as conexões dos dispositivos de medições, foram criadas linguagens de programação como, por exemplo, o Lab View que trabalha utilizando instrumentação virtual. O LABVIEW possibilita um ambiente de programação gráfica que combina a programação flexível.

Nessa linguagem os diagramas de blocos demonstram a lógica estabelecida para resolver um determinado problema, por meio da conexão de ícones utilizados para programar uma determinada rotina.

Quando se trata de uma tarefa maior, o programador geralmente divide em tarefas menores e mais fáceis de resolver. Estas tarefas menores são mais manejáveis e fáceis de testar, já que as dependências que podem causar comportamentos inesperados estão reduzidas. Assim, pode-se desenvolver um instrumento virtual que resolve cada uma das tarefas menores, juntando-as então em um sistema completo para resolver a tarefa maior.

O LabVIEW trabalha com subVI (sub virtual instrument), possibilitando diversos tipos de argumentos como entrada e obtendo como saída um ou vários argumentos processados. Estes argumentos podem ser variáveis, string, matrizes, gráficos e diversos outros parâmetros disponíveis na linguagem de programação, portanto a possibilidade de reuso destes VI's torna o desenvolvimento de um novo VI mais fácil. Nele o ambiente gráfico de desenvolvimento oferece uma linguagem de programação flexível e com funcionalidades e configurações especificamente projetadas para aplicações de medidas e automação. Ele foi criado pela National Instruments, para ser um ambiente de programação voltado ao desenvolvimento de aplicações, utilizando o conceito de instrumentação virtual. A linguagem de programação visual é chamada de linguagem G (de

Graphics, numa referencia à linguagem C). O LabVIEW é então, uma linguagem de programação gráfica, que usa ícones em vez das linhas de comandos para criar as suas aplicações. Contrasta com as linguagens de programação, baseadas em linhas de comando, em que as instruções determinam a ordem de execução do programa e usa fluxo de dados dentro do programa, em que o fluxo de dados por meio dos nós no diagrama de blocos determina a ordem de execução dos VI's e das funções.

O LabVIEW é uma linguagem muito apropriada para o desenvolvimento de interfaces com o usuário, interagindo com o programador por meio de duas telas separadas: o painel frontal (figura 8) e o diagrama de blocos (figura 9). No painel frontal, os botões, os indicadores e os gráficos podem ser alcançados para o controle direto do usuário. Já no diagrama de blocos, o fluxo de dados e as funções de controle podem ser desenvolvidos através do código fonte gráfico que define a funcionalidade do VI.

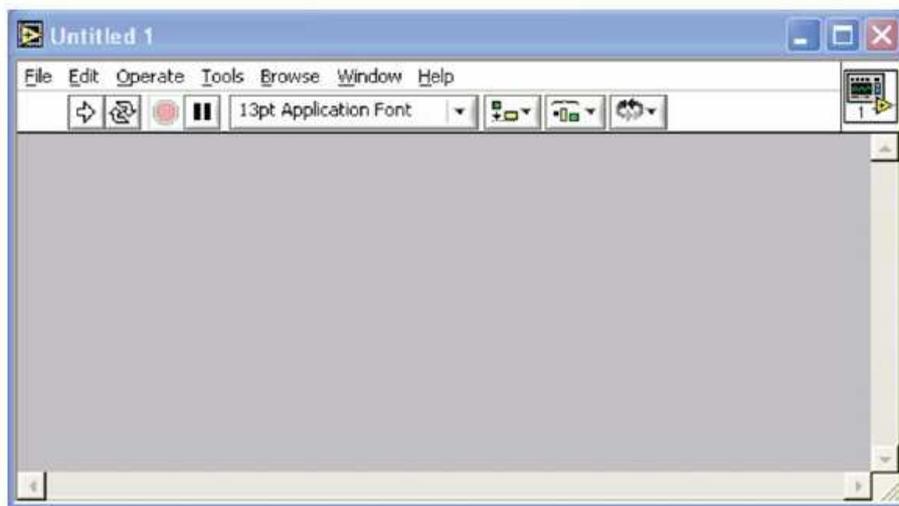


Figura 8. Painel frontal

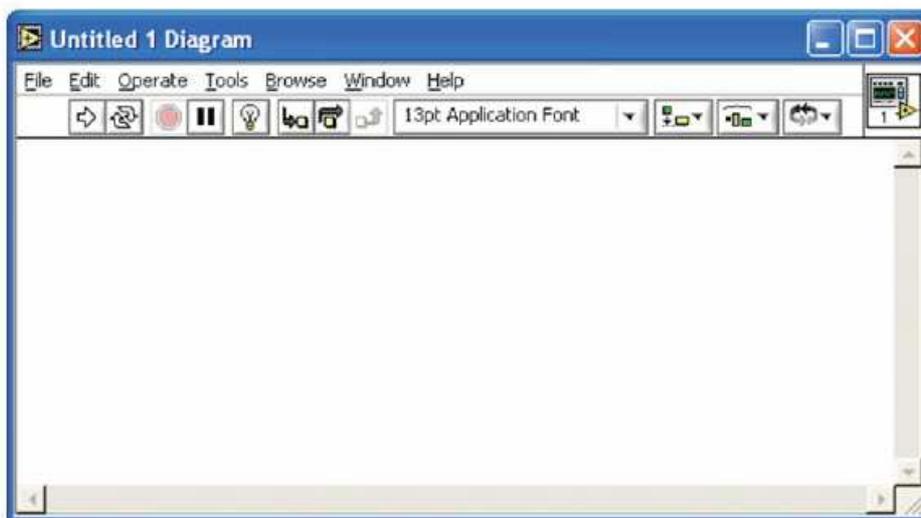


Figura 9. Diagrama de blocos

O painel frontal é a parte do VI, que define a relação de usuário. Esta interface com o usuário é desenvolvida por meio de controles e indicadores, que são os terminais interativos de entrada e de saída do VI, respectivamente. Os controles são botões, chaves seletoras, e outros mecanismos de entrada que simulam mecanismos de entrada no instrumento virtual, fornecendo dados ao diagrama de blocos. Os indicadores são gráficos, leds, e outros tipos de saída que simulam mecanismos da saída no instrumento virtual, apresentando os dados que o diagrama de blocos adquiriu ou gerou.

O diagrama de blocos é desenvolvido através de representações gráficas de funções para controlar os objetos do painel frontal. As representações gráficas de funções para controlar os objetos do painel frontal. As representações gráficas de funções para controlar os objetos do painel podem ser operações matemáticas, lógicas ou estruturas de programação (while loop, for loop, case structure, etc.) e os objetos do painel frontal são os terminais presentes no diagrama de blocos dos respectivos controles e indicadores.

## **6. PROJETO**

### **I. Teste de ruído na linha de produção**

Por se tratar de um item de conforto para o cliente, o ruído é uma das características mais críticas evidenciadas no processo de fabricação de motores de limpadores de pára-brisas, sendo assim, é muito importante que se estabeleça um bom critério de controle.

Atualmente a maneira de se controlar tal característica é o teste subjetivo no interior de uma cabine com certa isolamento acústica. Sendo assim, na própria linha de montagem, um operador designado a realizar o teste final nos motores (performance e ruído) deixa o mesmo em funcionamento por aproximadamente vinte segundos e através de sua experiência aprova ou rejeita o produto. As peças aprovadas continuam no fluxo de produção e passam para um posto onde é realizada a medição de corrente e velocidade.

Com este fluxo atual, é freqüente o aparecimento de dúvidas, então o operador deve comparar a peça duvidosa com alguns padrões de limite máximo aceitável, o que acaba por gerar incertezas.

Ainda no processo atual, e mesmo após a aprovação do motor no teste final, corre-se o risco de existir algum defeito novo no motor, e que se amplifique no interior do veículo, e venha a ressonar causando incômodo.

Logo, além da dependência do ouvido humano (sujeito a equívocos), outros pontos negativos são a falta de dados objetivos em caso de uma reclamação do cliente, e a dificuldade para análise da causa raiz dos problemas encontrados.

Evidenciou-se assim a necessidade de uma evolução tecnológica para a análise de tal característica, o que deu início a um estudo para a definição de um equipamento de teste de ruído objetivo. Visando ganhar em produtividade, incluiu-se a este equipamento o teste de performance, porém este não é o foco deste trabalho.

## **II. Definição do equipamento de teste objetivo de ruído**

Para a construção do equipamento em questão foi necessária a elaboração de uma plataforma de automação dedicada ao tratamento de sinais e que possuísse um sistema de supervisão para possibilitar uma boa interface homem-máquina.

A construção deste sistema de coleta e visualização de dados foi construída utilizando-se o software LABVIEW, o que gerou um sistema simples de operar e muito confiável.

Para tal foi necessário aplicar e aprimorar os conhecimentos obtidos em sala de aula através das disciplinas voltadas justamente ao desenvolvimento de sistemas capazes de controlar e automatizar processos.

## **III. Estrutura física do equipamento**

A estrutura básica do equipamento é composta por um microcomputador, base para apoio dos produtos a serem testados, dois acelerômetros capazes de adquirir sinais de vibração propagados pelo motor em funcionamento, placas de aquisição de sinais e uma impressora de etiquetas, além de todos os outros componentes de acionamento dos motores que ficam no interior de um armário de comando, sensores necessários para a execução do ensaio e de segurança do operador.

Os acelerômetros juntamente com as placas de aquisição de dados compõem a parte mais importante de todo o sistema, responsável por transmitir ao sistema os dados de vibração captados de cada motor. Além de enviar os dados ao sistema, a placa eletrônica em questão possui um módulo que transforma as medições de vibração e frequências em som, que por sua vez é amplificado e mostrado ao operador.

#### IV. Lógica de funcionamento

O operador deve alocar o motor em sua base de apoio, composta também por um chicote de alimentação de maneira a posicionar a peça para possibilitar o início do ciclo de teste que deve ser feito apertando-se um botão.

O motor entrará em funcionamento e uma base superior com apoios de borracha fixará o motor, de maneira a garantir um bom contato entre os acelerômetros posicionados estrategicamente e a peça. O acelerômetro começa a ler os sinais de vibração e durante um tempo pré-estabelecido começa a fazer uma média dos valores. Após o final deste período os valores obtidos são comparados com os valores limites e caso todos os valores estejam abaixo, a peça será aprovada e a impressora emitirá uma etiqueta, caso contrário, a peça será segregada.

#### V. Localização dos acelerômetros

A localização dos acelerômetros se dá de maneira estratégica para o produto em questão. Em um motor temos o giro de um induzido que é uma fonte potencial causadora de ruído e deslocamento do mesmo no sentido longitudinal provocado pelo atrito. Logo, a posição dos acelerômetros se dá da seguinte maneira:

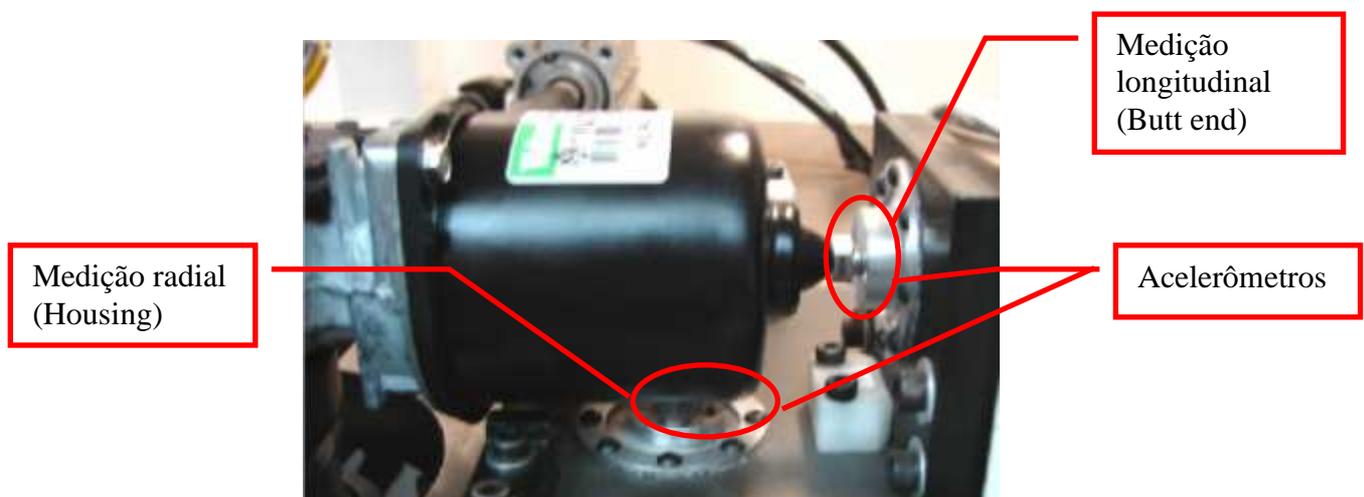


Figura 10. Localização dos acelerômetros

## VI. Construção de um supervisor de planta e interface homem-máquina

A construção de toda a parte de software teve como objetivo criar uma interface de fácil operação e visualização dos resultados, o que acarretará em agilidade durante a produção.

O sistema personalizado foi todo desenvolvido em LABVIEW, software facilmente programável após a obtenção de conhecimentos na própria Universidade São Francisco.

A tela destinada ao teste de ruído objetivo possui um gráfico para o sinal de vibração, outro para o sinal de tempo. Estes se repetem por duas vezes: Housing radial e Butt end. Existe ainda um outro campo destinado a mostrar as possíveis causas de falha, uma tabela para os valores de limite, um indicador de número da peça testada e outro de tempo de teste.

Além disso, existe um display que fica verde caso o motor seja aprovado ou vermelho para rejeitado.

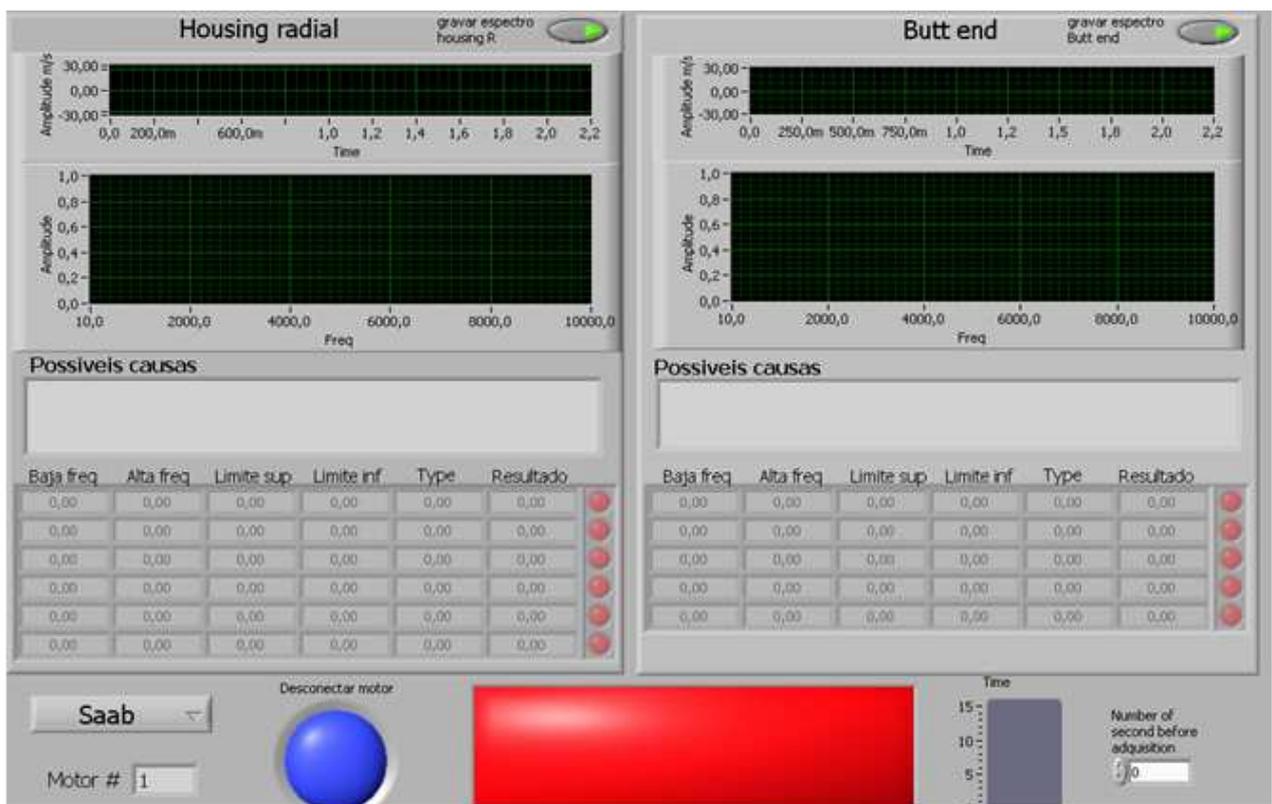


Figura 11. Tela Labview - Painel Frontal

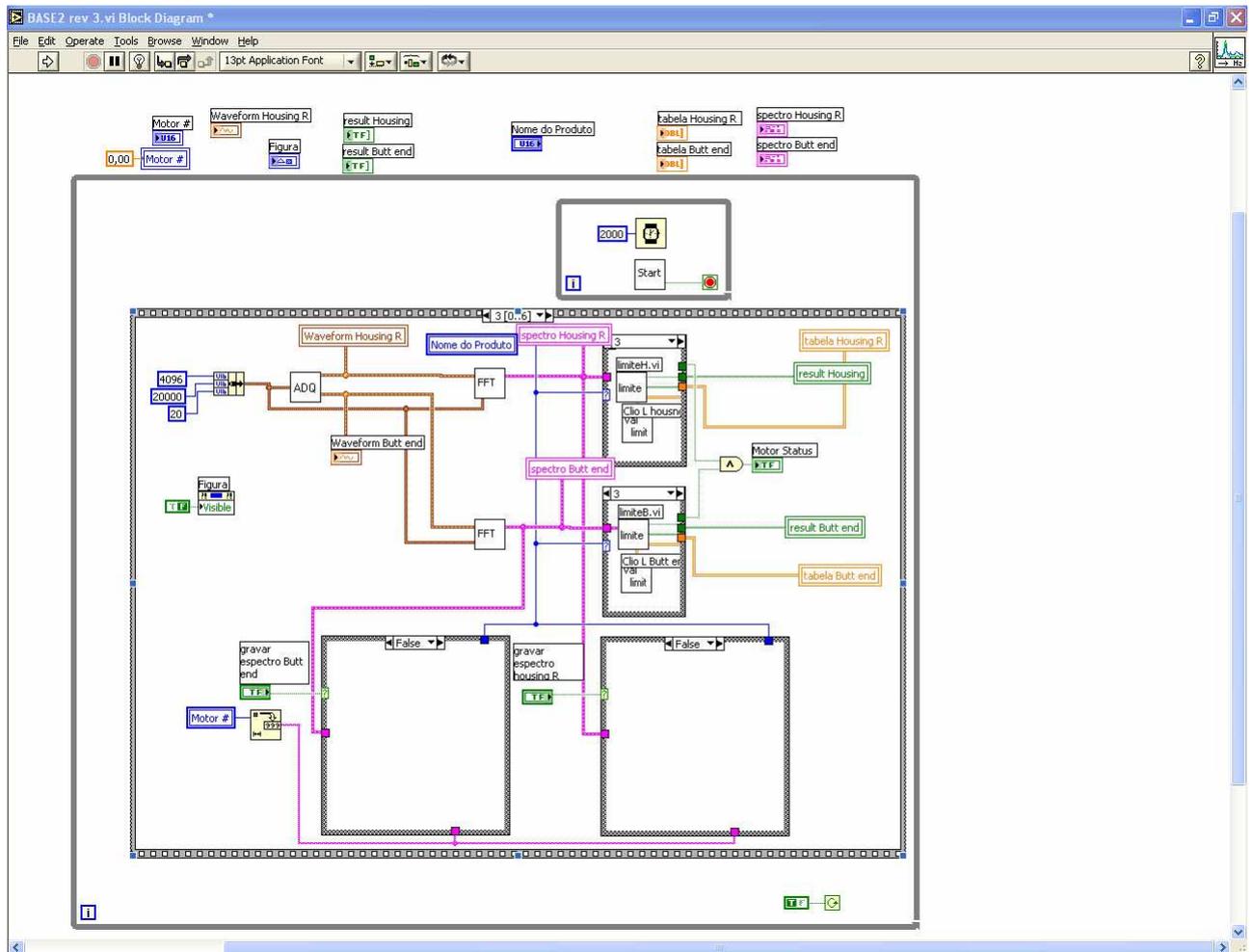


Figura 12. Tela Labview – Diagrama de Blocos

## VII. Definição das faixas de frequências características

Para se definir as frequências características foi necessário simular alguns defeitos e comparar peças boas de acordo com as normas específicas, e peças ruins podendo assim evidenciar a faixa mais adequada.

A frequência natural de um motor varia entre 30 e 90 Hz, e é caracterizada pelo balanceamento do induzido (corpo de maior massa no motor).

As baixas frequências que variam de 100 a 500 Hz são provenientes do contato entre o eixo principal e as rótulas, e ainda podem acusar um problema de flecha no eixo. Este tipo de problema não gera um ruído excessivo, porém muita vibração, que no interior do veículo é propagada interferindo no conforto do usuário.

Frequências entre 500 e 2500Hz representam problemas referentes ao ruído magnético, que podem até interferir em outros componentes do veículo.

Já as altas frequências se iniciam em torno de 2500 Hz e vão até 5000Hz. Estas também se relacionam com o ruído magnético.

As frequências mais altas vão de 5000Hz até 10000Hz, e são relativas ao ruído proveniente do atrito entre as escovas e o coletor do motor.

## VIII. Definição dos limites máximos

Visando se definir os limites máximos para cada banda de frequência, que assegurasse que todas as peças ruins fossem reprovadas, foi elaborado um estudo estatístico comparando os valores obtidos através de peças boas e peças ruins. A análise foi muito criteriosa, visto que em algumas frequências, a peça ruim apresentava valores menores que os apresentados pelos motores aprovados.

Para isso, foi necessário se dividir algumas das frequências anteriormente citadas no capítulo VII, o que gerou os seguintes parâmetros:

<b>Faixa de frequência (HZ)</b>	<b>Nível máximo permitido (mm/s<sup>2</sup>)</b>
30-90	30
100-400	160
200-340	60
500-800	100
700-1000	280
2400-3000	160
3200-3800	195
4000-5000	145

Tabela 1. Faixas de frequência analisadas com os níveis máximos permitidos.

Para a definição destes parâmetros, foi utilizado um software estatístico (minitab) para verificar a capacidade do processo através das medições realizadas em peças boas, como segue:

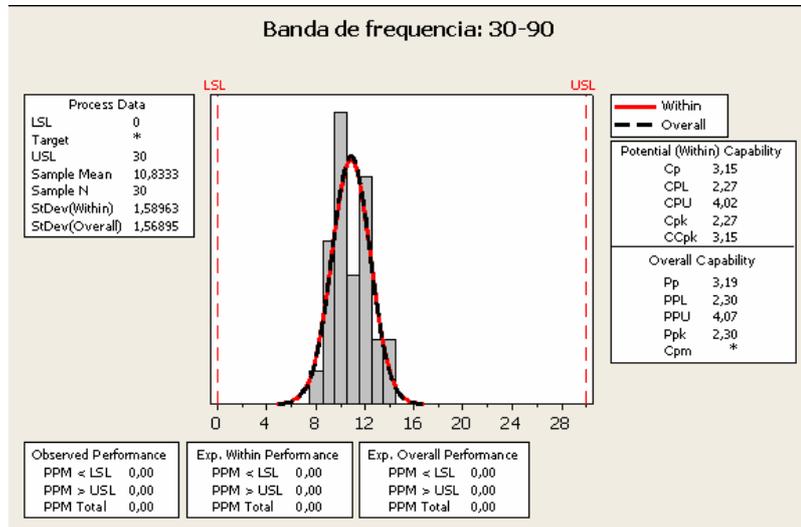


Figura 13. Estudo estatístico da faixa de frequência de 30 a 90 Hz

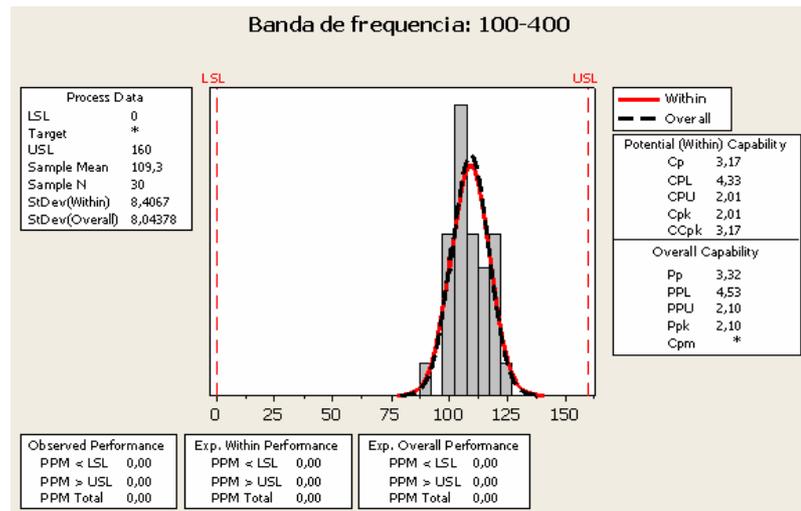


Figura 14. Estudo estatístico da faixa de frequência de 100 a 400 Hz

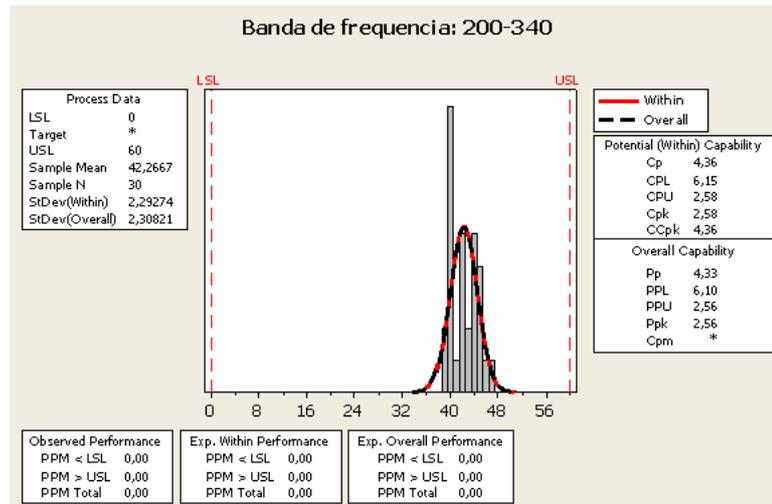


Figura 15. Estudo estatístico da faixa de frequência de 200 a 340 Hz

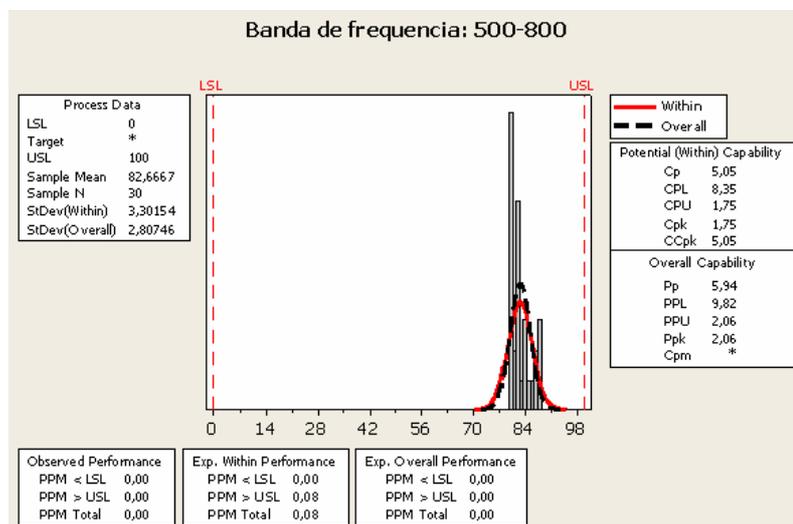


Figura 16. Estudo estatístico da faixa de frequência de 500 a 800 Hz

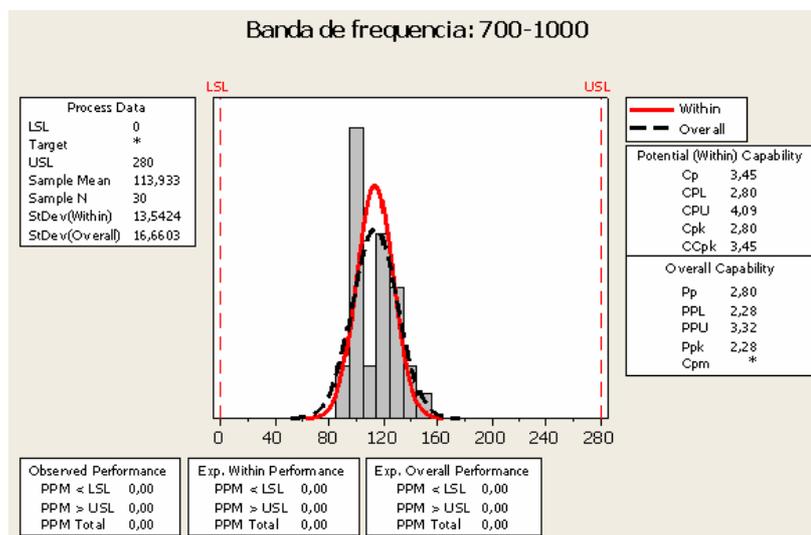


Figura 17. Estudo estatístico da faixa de frequência de 700 a 1000 Hz

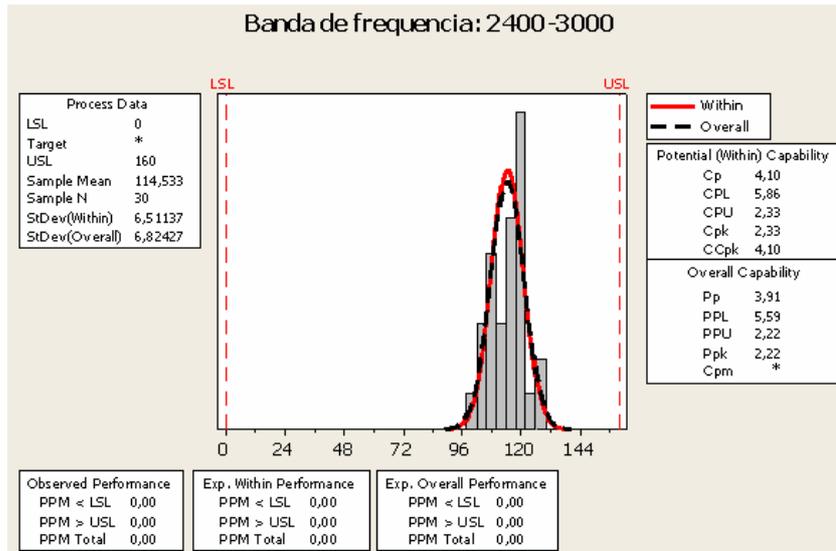


Figura 18. Estudo estatístico da faixa de frequência de 2400 a 3000 Hz

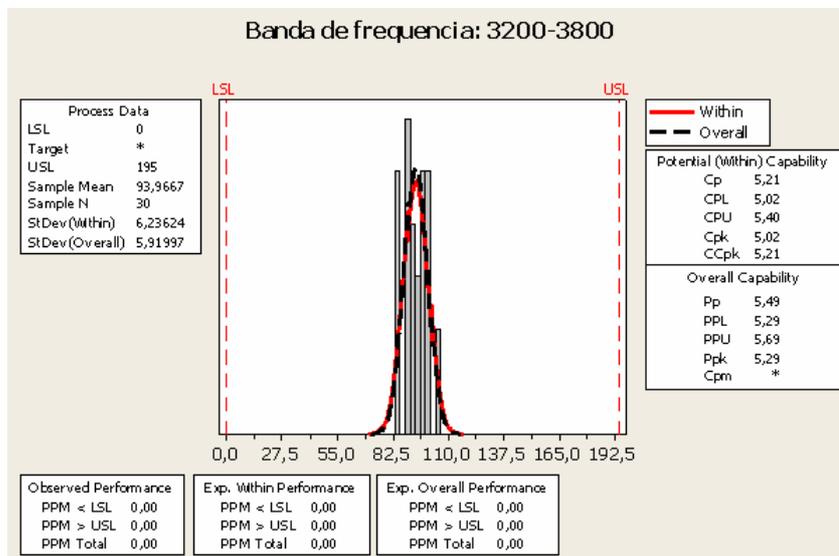


Figura 19. Estudo estatístico da faixa de frequência de 3200 a 3800 Hz

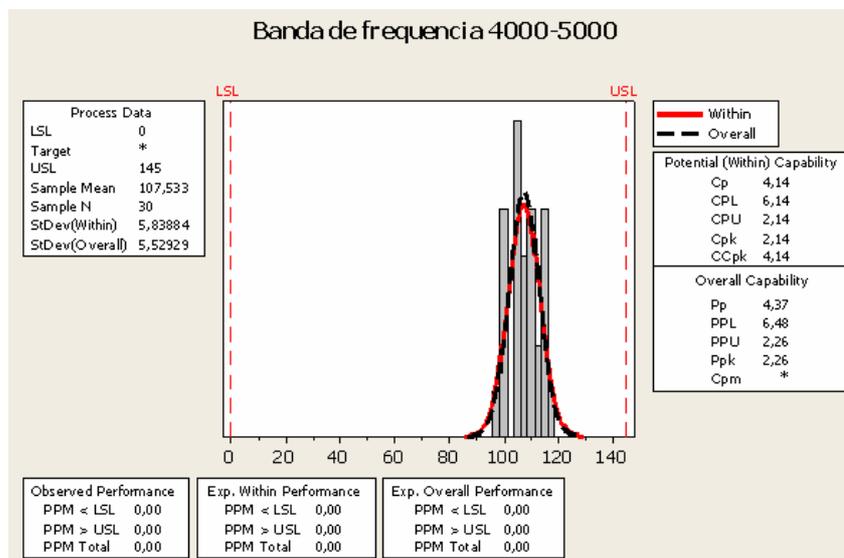


Figura 20. Estudo estatístico da faixa de frequência de 4000 a 5000 Hz

Os valores mínimos estabelecidos para Cpk e Ppk são, respectivamente 1,67 e 2 para um processo estável.

Desta maneira foi possível identificar que o processo era robusto o suficiente para distinguir uma peça boa de uma ruim através dos parâmetros e limites estabelecidos.

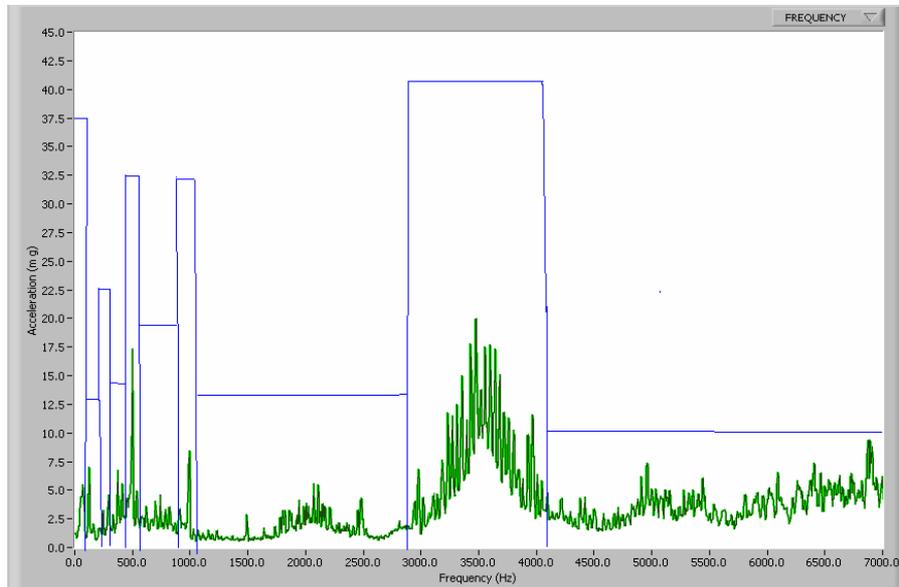


Figura 21. Comportamento de um motor aprovado em relação aos limites especificados.

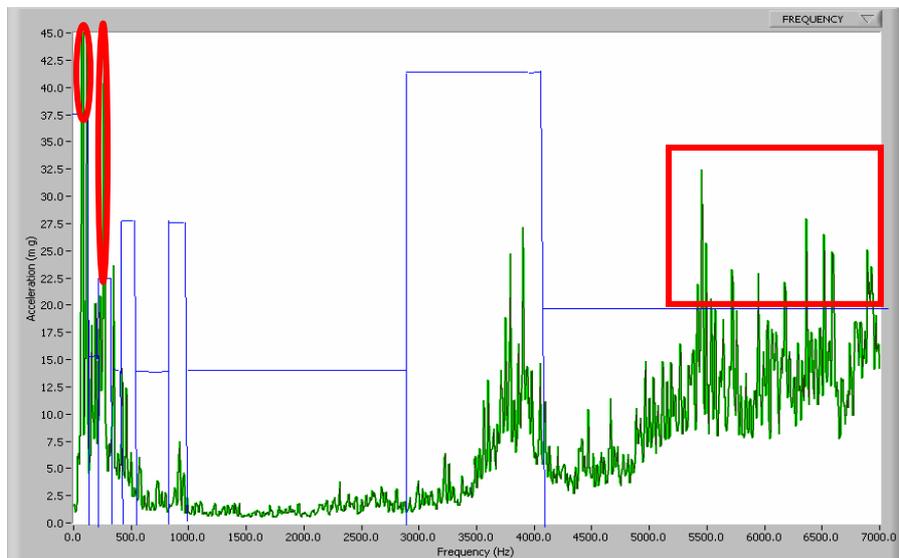


Figura 22. Comportamento de um motor reprovado em relação aos limites especificados

## **IX. Acompanhamento dos valores obtidos**

Com a finalidade de acompanhar as peças de produção com relação aos valores obtidos, foi criado um programa em LABVIEW capaz de fazer toda a análise estatística do processo. Sendo assim, periodicamente pode-se analisar a situação geral dos motores, e verificar a necessidade de se alterar algum parâmetro.

Além disso, a definição das faixas de frequências foi muito importante visto que possibilita uma análise rápida para evidenciar possíveis problemas ou variações de componentes ou processos.

Quando uma peça é rejeitada, ela recebe uma etiqueta contendo o motivo de reprovação, direcionando a análise, e facilitando uma possível alteração nos parâmetros dos sub processos.

## **X. Ressonância de estruturas**

O ensaio de dinâmica estrutural é essencial no desenvolvimento de novas estruturas e na solução de problemas de propagação de ruído e vibração.

Tal ensaio é também conhecido como análise modal e consiste na medição da frequência de resposta de uma determinada estrutura, aplicando-se uma excitação com valor conhecido.

O efeito de ressonância é muito importante para a análise de ruído, visto que na frequência determinada, a estrutura tenderá a ampliar a vibração de entrada o que levará a um nível de ruído ainda mais alto.

## **XI. Definição das frequências de propagação no interior do veículo**

Visando analisar as frequências de ressonância e propagação de vibração para o interior do veículo, foi aplicada a análise modal das estruturas em questão.

Para tanto deve ser utilizado um equipamento chamado impact hammer que funciona como excitador. Ele possui um acelerômetro em sua extremidade, que possibilita filtrar as frequências de trabalho. Além disso, foram utilizados 4 acelerômetros para possibilitar a leitura da propagação.

Também foi utilizado um microfone no interior do veículo que possibilitou a análise das frequências que propagaram para o usuário.



Figura 23. Mecanismo limpador montado no veículo com os acelerômetros acoplados.



Figura 24. Microfone no interior do veículo.

Através das medições com o microfone no interior do veículo se observou que a frequência que mais facilmente se propaga está na faixa que varia entre 0 à 500 Hz. Este dado é muito importante, já que se pode comparar à ele a frequência de propagação de cada componente ou subconjunto do sistema.

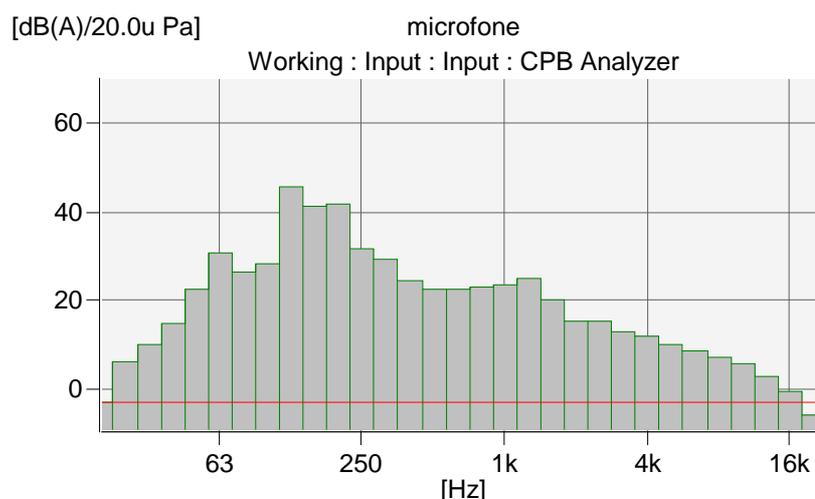


Figura 25. Medição com microfone no interior do veículo (frequencia de propagação).

Como se pode observar através da medição acima, no interior do veículo, as frequencias baixas se propagam bastante, enquanto que as altas praticamente não se anulam. A faixa de frequencia entre 0 à 500 Hz é facilmente visualizada.

É muito importante salientar que os valores obtidos neste estudo servirão como parâmetros de controle para o equipamento de ruído objetivo na linha de produção.

## **XII. Análise da propagação de alguns componentes do mecanismo**

Definida a faixa de frequencia que mais se propaga para o interior do veículo, deve-se encontrar a estrutura ou componente que mais interfere, para poder assim efetuar um estudo mais aprofundado visando à redução do nível sonoro propagado, e conseqüentemente o aumento da qualidade do produto para buscar a satisfação do cliente final.

Esta análise foi feita com o mecanismo completo, porém por se tratar de um produto já em fabricação, não seria possível uma alteração no design dos componentes, o que reforça a necessidade da realização do ensaio de ressonância em paralelo com o desenvolvimento do produto.

Com a presente dificuldade, as análises se concentraram em pequenos componentes como o amortecedor presente na região de fixação do mecanismo todo na carroceria. O amortecedor tem justamente a função de absorver possíveis vibrações provenientes do motor, filtrando-as e não deixando com que o ruído se propague para o interior da carroceria. Este componente possui uma dureza estabelecida, e que para o produto em análise não foi bem definida.

Através das medições de propagação de vibração, foi analisado que o amortecedor não estava funcionando como um filtro, visto que sua dureza encontrava-se muito elevada. Com a dureza elevada, a resistência encontrava-se alta, mas não absorvia a vibração, conforme gráfico da frequência de resposta da figura 26.

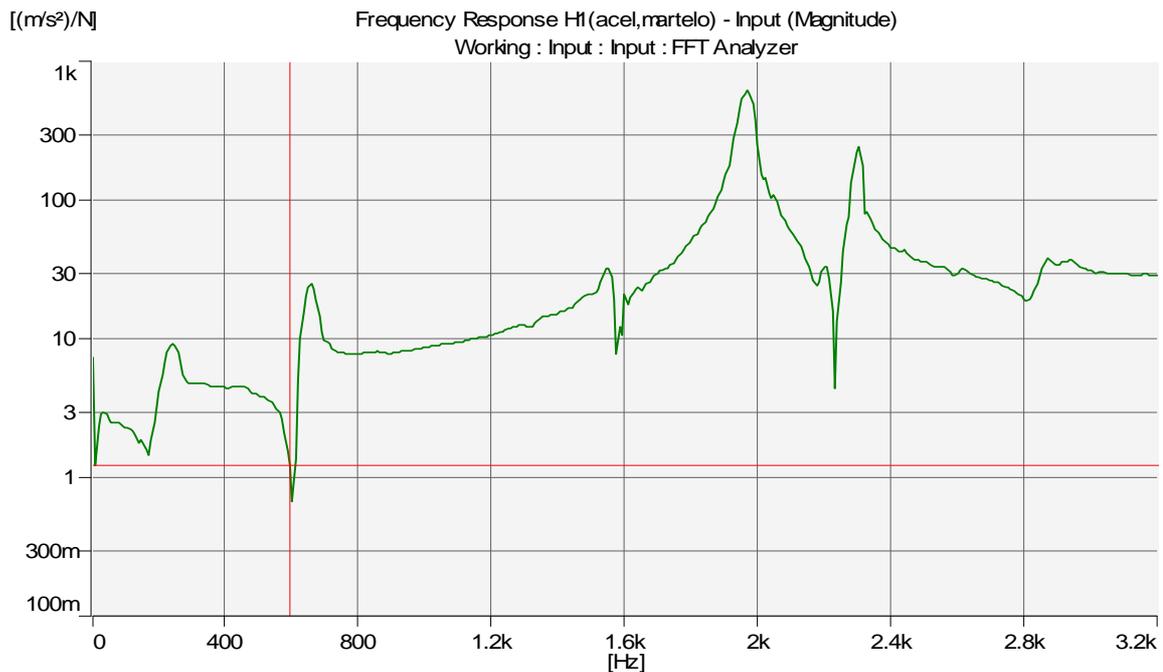


Figura 26. Gráfico da frequência de resposta.

No gráfico acima, cada pico é equivalente a uma frequência de ressonância. Como não se pode alterar o design dos componentes, o trabalho concentrou-se na redução da amplitude destes picos, principalmente os de baixa frequência (entre 0 e 500 Hz) que mais influenciariam no ruído perceptível pelo usuário. Para isto, foi proposta a alteração do valor de dureza do amortecedor, que passou a ser mais maleável.

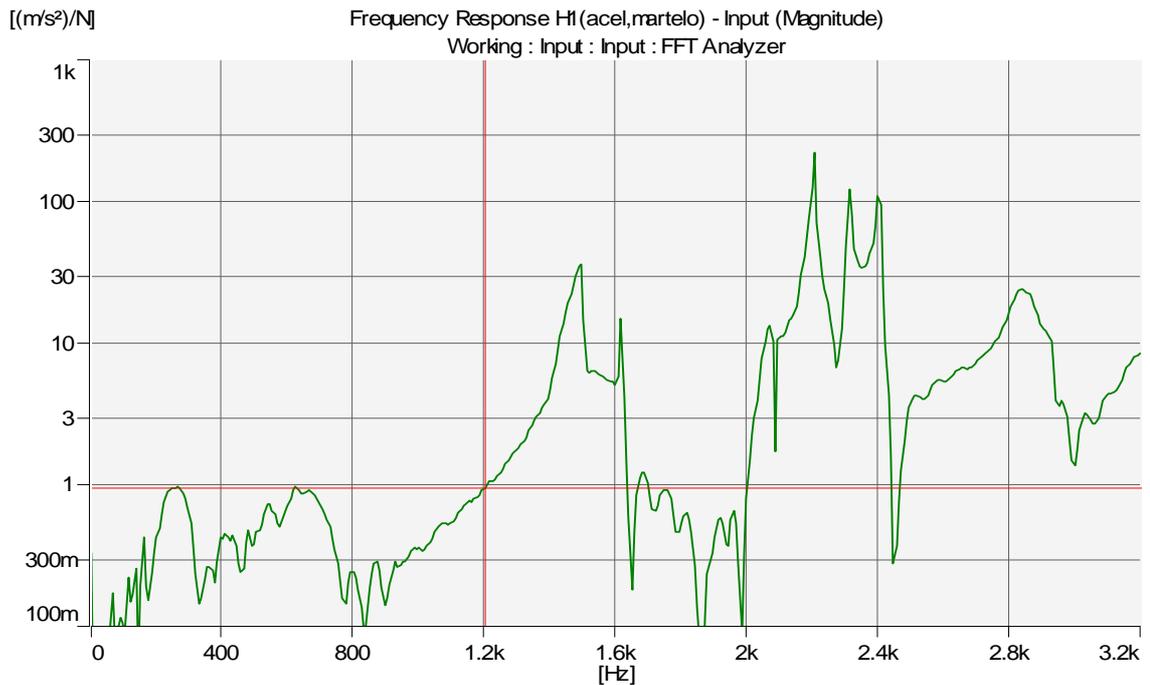


Figura 27. Gráfico da frequência de resposta após a alteração da dureza do amortecedor.

Após a alteração, foi evidenciado que a amplitude da ressonância obteve uma redução considerável. Isto quer dizer que o mecanismo ainda ressona, mas não amplia a vibração como antes. Dentro da faixa de frequência que se baseou o estudo, o valor de ressonância teve uma redução de aproximadamente 10  $[(m/s^2)/N]$  para 1  $[(m/s^2)/N]$ , uma redução muito significativa.

Este estudo será estendido para todos os demais mecanismos acionadores de limpador de pára-brisas, e também será implementado como ação preventiva no desenvolvimento de novos produtos.

## **7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O desenvolvimento deste trabalho permitiu o aprofundamento de conhecimentos no campo do processamento digital de sinais e instrumentação virtual.

Neste trabalho de pesquisa foram apresentadas informações fundamentais para a implementação de sistema de aquisição de dados, que visa contribuir com a automação em toda sua abrangência de aplicação e sua engenharia.

É importante destacar neste projeto que com a utilização do sistema de análise de ruído e vibração objetivamente diminuí-se as reclamações de cliente por esse tipo de problema e ajudou na detecção de problemas de componentes internos.

Este estudo será estendido para todos os demais mecanismos acionadores de limpador de pára-brisas, e também será implementado como ação preventiva no desenvolvimento de novos produtos.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Proakis, John G.;Manolakis, Dimitris G. - Digital Signal Processing – Third edition, Editora Prentice Hall
- [2] DOEBELIN, Ernest O. **Measurement Systems:** Application and Design, 5. ed. Boston, McGraw-Hill, 2004, 1078p.
- [4] Brüel & Kjær Technical Review – No.1 – 1988
- [5] Brüel & Kjær Technical Review – No.2 – 1996
- [6] PCB Piezotronics - <[http://www.pcb.com/techsupport/tech\\_accel.php](http://www.pcb.com/techsupport/tech_accel.php)> acesso em: 18/10/2009
- [7] Apostila LabVIEW Basics I e Basics II – June 2003 Edition
- [8] Fertis, D.G., “Mechanical and Structural Vibrations”, John Willey & Sons, New York, 1995
- [9] Preumont, A., “Vibration Control of Active Structures”, 2002