

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**DIAGNÓSTICO DE FALHA DE IGNIÇÃO EM
VEÍCULOS AUTOMOTIVOS ATRAVÉS DE VIBRAÇÃO DE
SMARTPHONE**

por

Nayara Formiga Rodrigues

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal
da Paraíba para obtenção do grau de Mestre.*

NAYARA FORMIGA RODRIGUES

**DIAGNÓSTICO DE FALHA DE IGNIÇÃO EM
VEÍCULOS AUTOMOTIVOS ATRAVÉS DE VIBRAÇÃO DE
*SMARTPHONE***

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Professor Abel Cavalcante Lima Filho

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

R696d Rodrigues, Nayara Formiga.

Diagnóstico de Falha de Ignição em Veículos Automotivos
Através de Vibração de Smartphone / Nayara Formiga
Rodrigues. - João Pessoa, 2019.

58 f. : il.

Orientação: Abel Filho.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Acelerômetro de um smartphone. 2. Detecção. 3.
Falhas. 4. Fourier. 5. Wavelet. 6. Pistão. I. Filho,
Abel. II. Título.

UFPB/BC

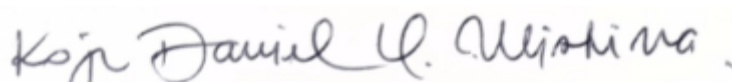
DIAGNÓSTICO DE *FALHA DE IGNIÇÃO* EM VEÍCULOS AUTOMOTIVOS ATRAVÉS DE VIBRAÇÃO DE *SMARTPHONE*

Por

Nayara Formiga Rodrigues

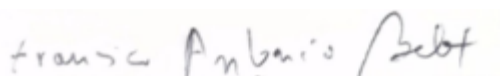
Dissertação aprovada em 31 de julho de 2018

Período letivo 2018.1



Prof. Dr. Prof. Dr. KOJE DANIEL VASCONCELOS MISHINA – UFPB

Examinador Externo



Prof. Dr. FRANCISCO ANTÔNIO BELO – UFPB

Examinador Interno



Prof. Dr. ABEL CAVACANTE LIMA FILHO – UFPB

Orientador

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais. Os amores da minha vida. Pedacinho do meu céu encarnado. Pelo apoio e amor incondicional. Sem eles eu não estaria aqui.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao meu Orientador, o Professor Doutor Abel Cavalcante Lima Filho, pelas contribuições, que foram de imensa utilidade, pela cordialidade com que sempre me recebeu, pela paciência e dedicação a cada um dos seus orientandos.

Aos meus pais, Zilmar e Josinaldo, e a minha irmã Polianna. Pelo amor e apoio que só um amor genuíno, o qual não compreende, mas tenta e respeita, apoia, chora e celebra verdadeiramente cada vitória. Sem dúvidas, sem esses personagens eu não teria forças para chegar até aqui.

À minha tia, Inês, a minha prima-irmã, Clara, a minha sobrinha postiça, Beatriz, e a minha Vó Inês, por todo amor e por acreditarem em mim incondicionalmente. Além do meu primo-irmão, Diego, e ao meu avô, José, (*in Memoriam*), que tanto contribuíram com sua sabedoria inata, o amor não morre jamais.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

Aos professores e funcionários do programa de pós-graduação em engenharia mecânica da UFPB.

À todas as pessoas, amigos queridos que me auxiliaram, de forma direta ou indireta, para que eu concluísse o presente trabalho.

E principalmente a Deus, inteligência e causa primária de todas as coisas, que nos torna iguais e infinitamente capazes de realizar o que muitas vezes é visto por nós como impossível.

DIAGNÓSTICO DE *MISSFIRE* EM VEÍCULOS AUTOMOTIVOS ATRAVÉS DE VIBRAÇÃO DE *SMARTPHONE*

RESUMO

Segundo dados do RENAVAM, o Brasil conta atualmente com uma frota de mais de 42 milhões de veículos automotivos. No ano de 2010 foram registrados 182.900 acidentes em vias públicas no Brasil, sendo 7.073 com vítimas fatais. Além das falhas que ocasionam acidentes, existem aquelas que fazem com que os carros percam a capacidade de locomoção, causando transtornos aos seus passageiros e submetendo-os aos perigos inerentes das estradas. Grande parte dos acidentes é causada por falhas mecânicas que podem acontecer em diferentes partes do automóvel e poderiam ser evitadas com um diagnóstico adequado. Atualmente os veículos automotivos não possuem capacidade de detecção para a maioria das falhas mecânicas aos quais os mesmos estão susceptíveis. A detecção de falhas em pistões (*misfire*) é uma delas. Além de prejudicar o funcionamento do carro esse tipo de falha causa degradação do motor e aumenta a emissão de gases nocivos. O objetivo desse trabalho é a implementação de uma técnica de processamento para detecção de falhas em pistões de um motor automotivo, através da leitura da medição do sinal de vibração, realizada pelo sensor acelerômetro de um *smartphone*. Atualmente é possível programar sistemas completos para simulação de características técnicas que são encontradas em sistemas reais. No presente trabalho também foi validado o método em estudo através da análise do sinal medido através do *MATLAB*, utilizando como ferramentas a Transformada Rápida de Fourier e Análise Wavelet Multiresolução.

Palavras-chave - acelerômetro de um *smartphone*, detecção, falhas, Fourier, Wavelet, pistão.

DIAGNOSIS OF MISSFIRE IN AUTOMOTIVE VEICLES THOUGH VIBRATIONS OF SMARTPHONES

ABSTRACT

According to data from RENAVAM, Brazil currently has a fleet of more than 42 million vehicles. In 2010, 182,900 accidents were recorded on public roads in Brazil, of which 7,073 were fatal. In addition to the crashes that cause accidents, there are those that affect the cars' capacity of locomotion, causing inconvenience to their passengers and putting them at risk of eventual car crashes. Most accidents are caused by mechanical failures that can occur in different parts of the car and could be avoided with proper diagnosis. Currently, automotive vehicles lack mechanisms that can detect most mechanical failures to which they are susceptible. The detection of failures in pistons is one of them. Besides damaging the car's proper operation, this type of failure causes engine degradation and increases the emission of noxious gases. The aim of this work is the implementation of a processing technique for detection of pistons failures of an automotive engine by reading the measurement of the vibration signal performed by the accelerometer sensor of a smartphone. Currently, it is possible to program complete systems for simulation of technical characteristics that are found in real systems. In this paper it was also validated a method through the analysis of the signal measured through MATLAB, using tools such as the fast Fourier transform and the Wavelet Packet Transform (WTP).

Keywords - accelerometer sensor of a smartphone, detection, failures, Fourier, Wavelet, piston.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO.....	01
1.1 ESTADO DA TÉCNICA	02
1.2 OBJETIVOS	04
 CAPÍTULO II: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	05
_Toc1128020	
2.1 FUNCIONAMENTO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....	5
2.1.1. Motores de Ignição por Faísca ou Otto	6
2.1.2 Ciclo de Operação: Motores Alternativos a Quatro Tempos	9
2.1.3 Principais Irregularidades de Motores de Combustão Interna: Falhas Prematuras	12
2.2 PARTES CONSTITUINTES DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....	13
2.2.1 Falhas Prematuras em Pistões.....	16
2.3 DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM EQUIPAMENTOS.....	17
2.3.1 Diagnóstico Automático de Falhas em Equipamentos	17
2.3.1.1. Árvore de Falhas.....	18
2.3.1.2 Sistemas Periciais	18
2.3.1.3 Métodos Probabilísticos	18
2.4 DIAGNÓSTICO DE FALHAS VIA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS	18
2.4.1 Aquisição do Sinal de Vibração com o acelerômetro de um smartphone	19
2.5 ANÁLISE DE SINAIS	21
2.5.1 Amostragem de sinais	21
2.5.2 Transformada discreta de Fourier	22
2.5.3 Transformada de Wavelet	26
 CAPÍTULO III: MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1. ACELERÔMETRO DO CELULAR.....	29
3.2 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA	30
3.3 MÉTODO APLICADO.....	31
 CAPÍTULO IV: RESULTADOS E CONCLUSÃO	33

4.1 ANÁLISE DE FOURIER.....	33
4.2 ANÁLISE DE WAVELET	35
4.3.CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS.....	41
ANEXO A.....	

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Motor de Combustão Interna.....	06
Figura 2.2 Vista frontal da representação de um motor de combustão interna e suas partes constituintes enumeradas.....	07
Figura 2.3 Vista da representação de um motor de combustão interna e suas partes constituintes enumeradas.	08
Figura 2.4 Admissão: 1º Tempo do Ciclo Otto (gasolina).....	09
Figura 2.5 Compressão: 2º Tempo do Ciclo Otto (gasolina).....	10
Figura 2.6 Combustão: 3º Tempo do Ciclo Otto (gasolina)	11
Figura 2.7 Escape:: 4º Tempo do Ciclo Otto (gasolina)	12
Figura 2.8 Exemplos de Órgãos Estacionários dos Motores de Combustão Interna	13
Figura 2.9 Exemplos de Órgãos Móveis dos Motores de Combustão Interna ...	14
Figura 2.10 Órgãos Móveis dos Motores de Combustão Interna	20
Figura 2.11 Tela de Gráficos mostrando a grandeza aceleração com taxa de amostragem de 200 Hz.....	21
Figura 2.12 Amostragem de uma senóide.....	22
Figura 2.13 Sinal no tempo de um som adquirido do motor de um automóvel em funcionamento.....	23
Figura 2.14 Gráfico da Transformada de Fourier do sinal.....	24
Figura 2.15 Janelamento de um sinal digital.....	25
Figura 2.16 Janela de Hamming.....	25

Figura 2.17 Algoritmo de Mallat (Mallat 2017)	27
Figura 3.1 Smartphone Galaxy J7 Prime da fabricante Samsung.....	29
Figura 3.2 Tamanho de um acelerômetro utilizado em tablets e smartphones...	30
Figura 3.3. Parte Dianteira de um carro Ford Fiesta 2005.....	31
Figura 3.4 Tela de Gráficos mostrando a grandeza aceleração com taxa de amostragem de 200 Hz	32
Figura 3.5 Tamanho de um acelerômetro utilizado em tablets e smartphones...	33
Figura 4.1 Gráfico dos sinais de vibração para o motor saudável, com falha no pistão 1 e com falha no pistão 1 e 4 simultaneamente	34
Figura 4.2 (a) Gráfico da FFT com as três configurações, (b) FFT para o motor saudável, (c) FFT para falha no pistão 1 e (d) FFT para falha nos pistões 1 e 4 simultaneamente	35
Figura 4.3 Detalhes e aproximação do sinal e seus respectivos espectros	38
Figura 4.4 Espectro de potência wavelet dos detalhes para o motor em funcionamento normal (caso 1), falha no pistão 1 (caso 2) e falhas no pistão 1 e 4 (caso 3)	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Função básica de cada parte constituinte de motores de combustão interna.....	14
Tabela 4.1 Frequência predominante dos detalhes	37
Tabela 4.2 Espectro de potência wavelet dos detalhes D2 e D3 para diferentes configurações.....	39

LISTA DE SÍMBOLOS

Δt – tempo de aquisição

$\omega [n]$ – equação de janelamento de Hamming

$A_m [n]$ – aproximação quando o sinal é submetido a um filtro passa-alta

AWB – Análise de Wavelet Multiresolução

$D_m [n]$ –detelhe quando o sinal é submetido a um filtro passa-baixa

E - espectro de potência de Wavelet

FFT – Transformada Rápida de Fourier

$F_{\text{máx}}$ - componente de frequência máxima do sinal

f_s – Frequência de amostragem

g – unidade de medida grama

g - filtro da família wavelet

h – filtro da família wavelet

Hz- Hertz

k – nível de decomposição do sinal

MCI – Motor de Combustão Interna

rad/s – unidade de medida radianos por Segundo

W_{jn} - coeficientes do detalhe j

$X[n]$ – Sinal Original Amostrado

$X [w_k]$ – Transformada discreta de Fourier

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

Esta dissertação descreve um modelo prático para diagnóstico de falhas baseado em análise de vibrações para motores de combustão interna. Para isto, o método de leitura e aquisição de dados será aferida pelo sensor acelerômetro de um smartphone.

Os ensaios foram realizados com os quatro pistões funcionando normalmente (caso 1), com a simulação de falha no primeiro pistão (caso 2) e a simulação simultânea de falha no primeiro e quarto pistões (caso 3).

Os métodos que visam a obtenção de um diagnóstico de falhas em equipamentos, mais comuns ultimamente, são ditos como probabilísticos, árvores de falhas e sistemas periciais. Qualquer uma dessas abordagens exige um certo conhecimento prévio, mais ou menos difícil de obter, proveniente de informação histórica, dados do fabricante, manuais de serviço, ou experiência acumulada pelos técnicos (MARQUES, 2001).

O recurso da teoria da probabilidade permitiu obter uma forma geral de tradução de observações e derivar um modelo destinado à apresentação de atributos numa perspectiva humana.

Atualmente é possível programar sistemas completos para simulação de características técnicas que são encontradas em sistemas reais (JESUS; CAVALCANTE, 2009).

Os meios de diagnóstico automático de falhas baseiam-se em probabilidades, árvores de falhas, ou sistemas periciais.

O presente trabalho pretende validar o método em estudo através da análise do sinal medido através do *MATLAB*, utilizando como ferramentas a Transformada Rápida de Fourier e a Transformada de Wavelet.

A dissertação está dividida em 5 capítulos, a saber: O primeiro capítulo é introdutório, ele apresenta o contexto em que o presente estudo está inserido, o objetivo específico da pesquisa e a motivação para a mesma e cita a metodologia empregada para obtenção dos resultados.

O segundo capítulo é uma revisão bibliográfica de todos os conceitos que foram utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

O capítulo três lista os materiais utilizados na aquisição dos dados de vibração do motor aplicado, bem como, o método aplicado para a obtenção dos resultados requeridos.

Já no capítulo 4 será analisado os resultados de acordo com as ferramentas escolhidas para tal.

E, por fim, no capítulo 5 trará a conclusão do estudo, que consiste em validar a possibilidade de se utilizar o acelerômetro do celular para identificação da ocorrência de falha em um dos pistões de um motor automotivo.

1.1 ESTADO DA TÉCNICA

O banco de patentes do INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial) serve como uma fonte para desenvolvimento de pesquisa e informação de inovações tecnológicas. Tendo em vista, o fato de que a tecnologia moderna baseia-se cada vez mais em ciência e na pesquisa científica aplicada.

A tecnologia é uma soma de conhecimentos sobre meios e métodos usados em processos produtivos e a sua organização. De posse desse conhecimento, neste ponto, podemos entender a importância de contextualizar outros métodos de diferentes falhas de motores de combustão interna utilizados por grandes empresas e de eficácia cientificamente comprovada. Para destacar a relevância do presente estudo.

Nesta seção é realizada uma revisão do estado da técnica que tratam de soluções para problemas similares ou correlatos.

Cada patente está acompanhada das especificidades do problema abordado, a metodologia empregada, resultados e limitações.

A Ford patenteou uma estratégia intitulada de *Método para Identificar Misfire de um Motor de Combustão Interna*. Consiste na instalação de um sensor de posição do virabrequim. Composto das seguintes etapas: ligar o motor de combustão interna com o objetivo de girar o virabrequim, realizar, através do sensor, a medição das quantidades rotacionais do virabrequim, correspondentes a eventos criados por cada cilindro em particular (ensaios com simulação de falhas). De posse dos valores rotacionais para o motor em pleno funcionamento, pode-se realizar *misfire* em algum cilindro. A correção da falha é realizada através do ajuste das grandezas rotacionais medidas. Para possibilitar esta correção é gerado um sinal de aceleração do virabrequim usando os sinais temporais corrigidos e o sinal medido. Uma rede neural iterativa com atraso de tempo utiliza o sinal de aceleração, juntamente com outros parâmetros do motor, na identificação de *misfire* especificando o cilindro com defeito (FORD, 1998).

À empresa *BOSCH*, registou um *Processo de Detecção de Vazamento Interno de Combustível de um Motor a Combustão*, esta invenção tem por etapas: a inserção de um sensor em um motor de combustão, a detecção de uma fase de operação na qual não seja exigido o valor do torque, seguido pelo aferimento dos valores obtidos pelo sensor e comparação com o valor teórico esperado, indicando a ocorrência de um vazamento de combustível. O sensor, basicamente, indica a concentração de oxigênio presente na mistura. Esta patente também refere-se ao desenvolvimento de unidade de controle do motor incluindo um programa para implementar o processo de detecção desse tipo de falha (BOSCH, 2017).

À empresa japonesa *Daifuku* financiou a pesquisa intitulada de *Sistema de Diagnóstico de Falha para Motor de automobilístico*, trata-se do desenvolvimento de uma unidade acionamento interligada ao eixo rotativo do motor. Neste método, utiliza-se a transformada de Wavelet no tratamento do sinal de som adquirido para que as características do motor sejam conhecidas. A detecção da falha é realizada através da comparação com os resultados obtidos para as características do motor. (DAIFUKU, 1999).

O invento patenteado pelas empresas Energética Suape II S.A. E pelo Instituto Gnarus com o título de *Sistema Preditivo para Diagnóstico de Falhas em Motores de Combustão Interna por Meio da Análise da Assinatura Elétrica dos Sinais de Saída do Gerador* é definido como um sistema capaz de detectar, de forma preditiva, falhas mecânicas no motor de combustão interna e falhas elétricas no sistema de excitação de conjuntos motogeradores. A detecção das falhas elétricas e mecânicas no conjunto motogerador está baseada em técnicas de Análise de Assinatura Elétrica do Motor, considerando a ocorrência de falha no motor de combustão interna e no sistema de excitação, conclui-se que esta afeta diretamente os sinais das correntes e tensões de saída do gerador. Uma vez ajustados os sinais elétricos de saída do gerador, identifica-se padrões de falha e pode se realizar o acompanhamento preditivo da condição da máquina (SUAPE; GNARUS, 2016).

O dispositivo patenteado pela empresa *Toyota* visando a detecção de falha para a válvula do termostato de motores de combustão interna, *Dispositivo de refrigeração para motor de combustão interna e diagnóstico de falha*, foi criado com o intuito de definir a vazão de algum vazamento do fluido na circulação do radiador com a válvula termostática. O dispositivo calcula uma temperatura aproximada da água de resfriamento de circulação do radiador com base no vazamento detectado e na temperatura de água detectada no motor. O sensor de temperatura da água do refrigerante permite realizar o diagnóstico de falha para a válvula do termostato com

base na diferença entre a temperatura estimada e a temperatura de água medida (TOYOTA, 2017).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é a implementação de uma técnica de processamento para detecção de falhas em pistões (*misfire*) de um motor automotivo, através da leitura da medição do sinal de vibração, realizada pelo sensor acelerômetro de um *smartphone*.

Os objetivos específicos consistem em: criar método de diagnóstico em motores em funcionamentos usando análise no domínio da frequência (Fourier) e no domínio do tempo (wavelet), além de planejar e executar experimentos com o intuito de validar as técnicas.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FUNCIONAMENTO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Motores são dispositivos com a função de converter energia de diversos tipos (térmica, elétrica, hidráulica, etc) em energia mecânica. No caso de motores de combustão interna, como o da Figura 1, ocorre transformação de energia térmica em energia mecânica através da queima de combustível, sendo esta diretamente utilizável. (MAHLE ORIGINAL, 2016).

Segundo (CÂMARA, 2003) define-se motores de combustão interna, como um sistema mecânico, que tem a finalidade de transformar a energia calorífica advinda da combustão da mistura ar combustível realizada através da sua compressão um cilindro dotado de um êmbolo, em energia mecânica capaz de realizar trabalho.

Motores de combustão interna são utilizados em inúmeras aplicações, das quais, são utilizadas, majoritariamente, como fonte de potência com a finalidade de locomoção de veículos, tais como, automóveis, motos, caminhões, navios e aviões e na produção de eletricidade. (LIMA, 2006, p.1)

Inicialmente ocorre a mistura combustível/ar que será comprimida na câmara de combustão, etapa em que ocorre uma rápida inflamação advinda de combinação do combustível com qualquer material inflamável (gasolina, álcool, diesel), de cada cilindro na etapa seguinte, então, posteriormente ocorre uma queima, que exerce uma compressão contra a parte superior do pistão, fazendo com que este se desloque em direção ao virabrequim (eixo de manivelas). (MAHLE ORIGINAL, 2016).

A biela é o elemento de ligação entre o pistão e o virabrequim, é responsável pela transmissão da força que faz com que o pistão se desloque, na etapa de expansão dos gases. Ela é responsável pela conversão do movimento retilíneo do pistão pelo rotativo do virabrequim. (MAHLE ORIGINAL, 2016).

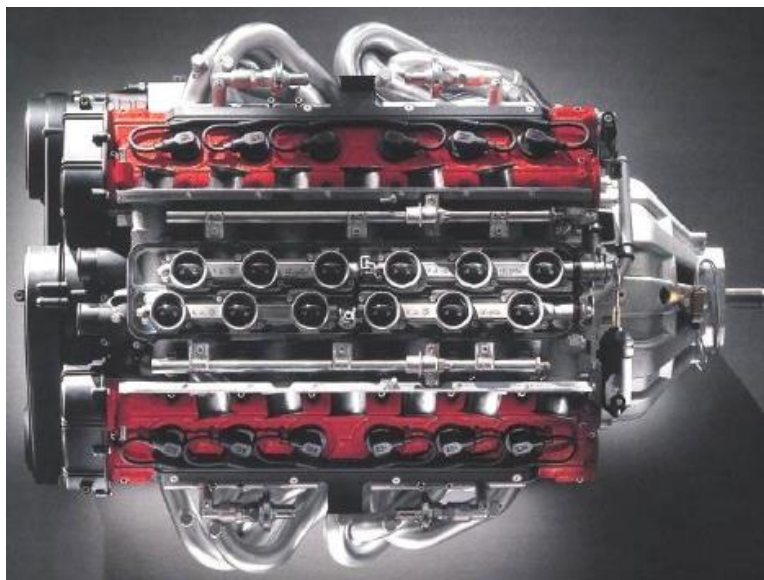


Figura 2.1 -. Motor de Combustão Interna. (Fonte: CÂMARA, 2003)

2.1.1. Motores de Ignição por Faísca ou Otto

Ignição é o processo que provoca o início da combustão. (BRUNETTE, 2012, p.36)

Classifica-se como motor de ignição por faísca ou otto, como o motor de combustão interna no qual, a mistura (gasolina ou álcool com ar), inflama-se por meio de uma centelha elétrica, ocasionando a queima da mistura e a expansão dos gases (MAHLE ORIGINAL, 2016). Nas Figuras 2.2 e 2.3 são indicados componentes desse tipo de motores.

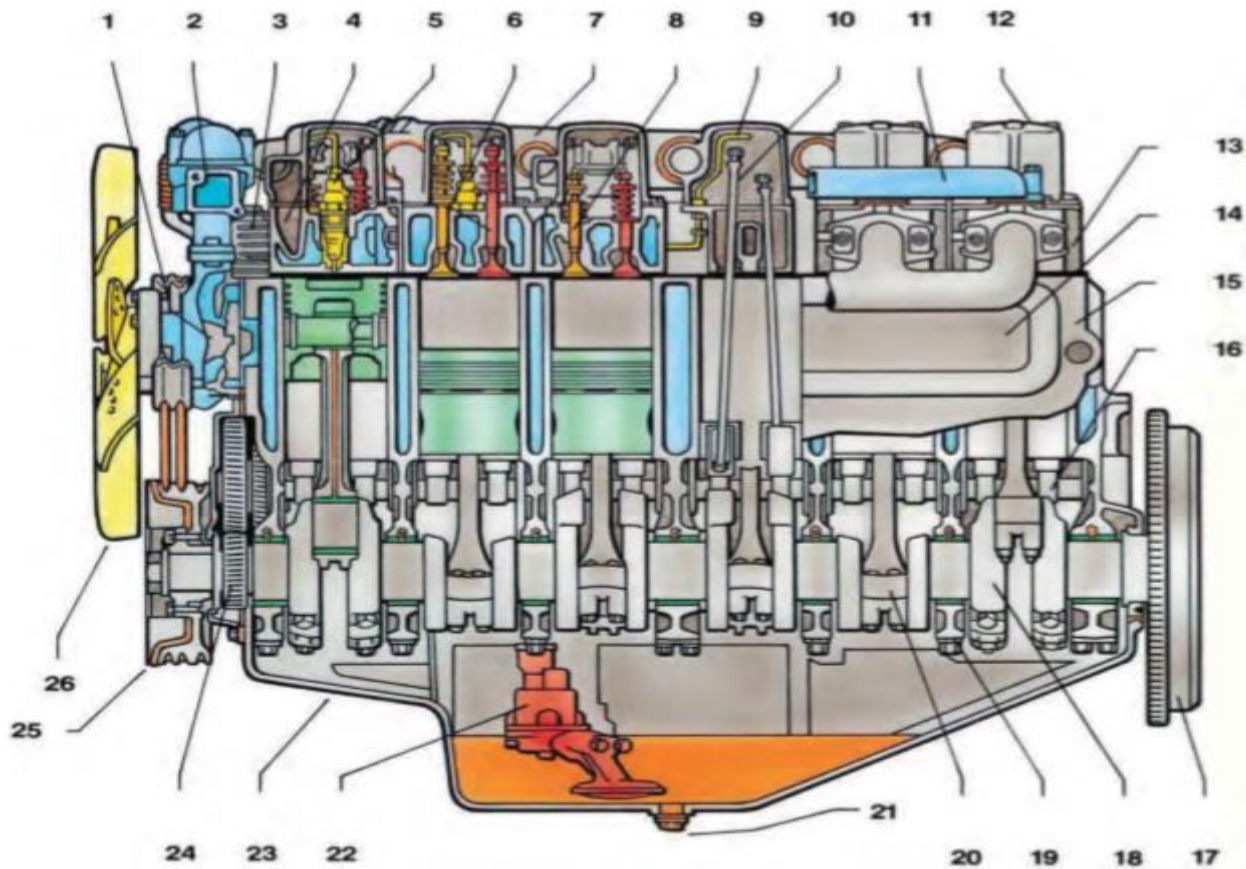


Figura 2.2 - Vista frontal da representação de um motor de combustão interna e suas partes constituintes enumeradas. (01) Bomba-d'água, (02) Termostato da água de refrigeração ou válvula termostática, (03) Compressor de ar, (04) Duto de admissão, (05) Bico injetor, (06) Válvula de escape, (07) Coletor de admissão, (08) Válvula de admissão, (09) Linha de injeção de combustível, (10) Vareta de válvula, (11) Duto de saída de água de refrigeração, (12) Tampa de válvula, (13) Cabeçote, (14) Tampa lateral do bloco, (15) Bloco do motor, (16) Eixo comando de válvulas, (17) Volante, (18) Eixo virabrequim, (19) Capa do mancal principal, (20) Biela, (21) Bujão de escoamento do óleo do cárter. (Fonte: BRUNETTE, 2012)

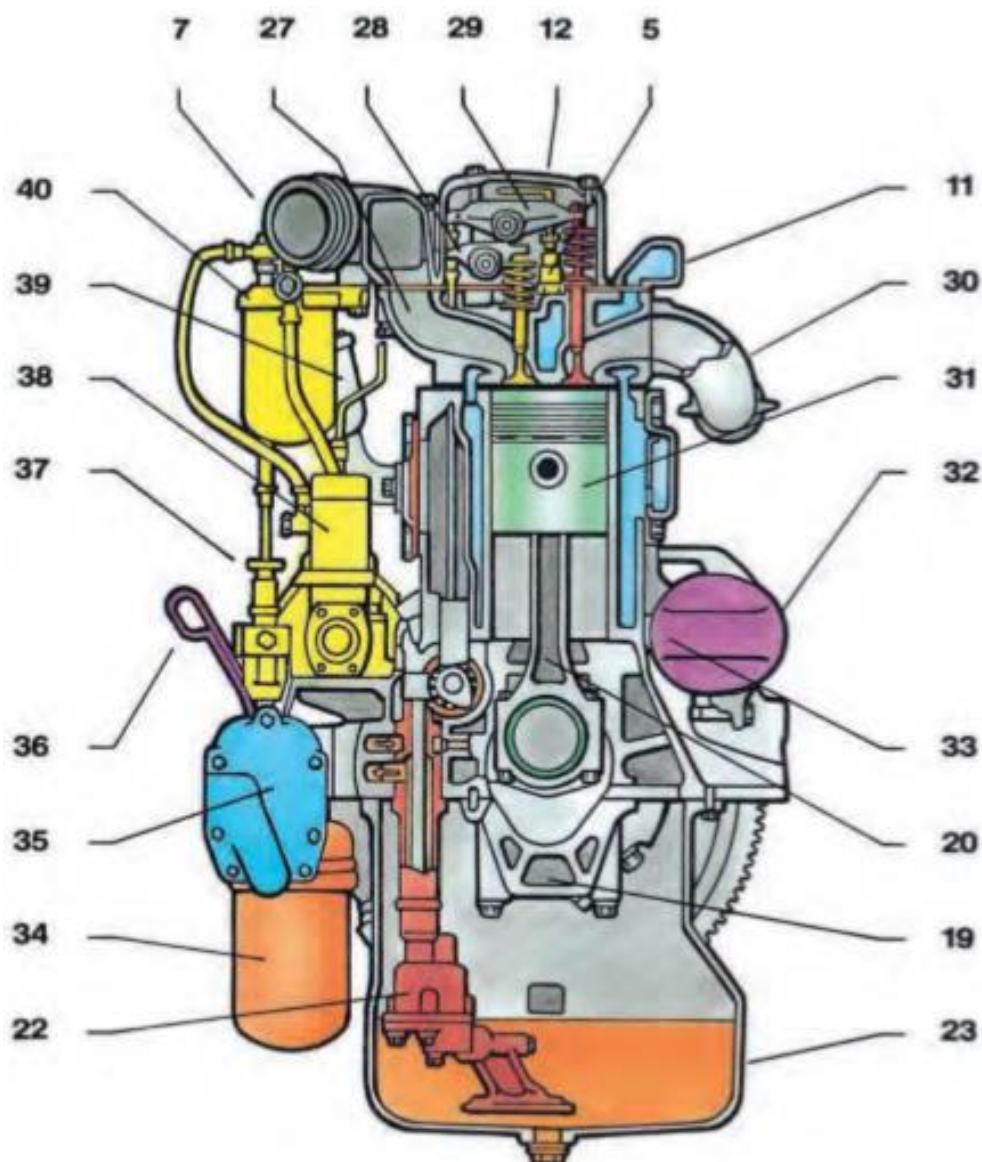


Figura 2.3 - Vista da representação de um motor de combustão interna e com suas partes constituintes enumeradas. (22) Bomba de óleo, (23) Cáster, (24) Engrenagem do eixo virabrequim, (25) Polia anti-vibradora, (26) Hélice, (27) Duto de admissão tangencial, (28) Balancim da válvula de admissão, (29) Balancim da válvula de escape, (30) Coletor de escape, (31) Pistão, (32) Motor de partida, (33) Dreno da água de refrigeração, (34) Filtro de óleo, (35) Radiador de óleo, (36) Vareta indicadora do nível de óleo, (37) Bomba manual de combustível, (38) Bomba injetora, (39) Respiro do cárter, (40) Filtro de combustível. (Fonte: BRUNETTE, 2012)

2.1.2 Ciclo de Operação: Motores Alternativos a Quatro Tempos

Ciclo de operação é a sequência de processos sofridos pelo fluido ativo (gasolina, álcool, diesel), estes processos se repetem periodicamente com a função de obtenção de trabalho mecânico. Define-se um tempo de motor por um curso do pistão. Neste caso, o pistão percorre quatro cursos, correspondendo a duas voltas do virabrequim do motor, para que seja completado um ciclo de trabalho. (BRUNETTE, 2012, p.36). O motor utilizado para o experimento é um motor a quatro tempos. Cada tempo será descrito nos itens que seguem.

1º Tempo – Admissão:

Compreende a fase em que o pistão desloca-se do ponto morto superior (PMS) ao ponto morto inferior (PMI), como na figura 2.4, ocorre a abertura da válvula de admissão e, assim, a mistura de ar e combustível vaporizado é aspirada ao interior do cilindro, o que corresponde ao movimento de meia volta do virabrequim (180°). (MAHLE ORIGINAL, 2016).

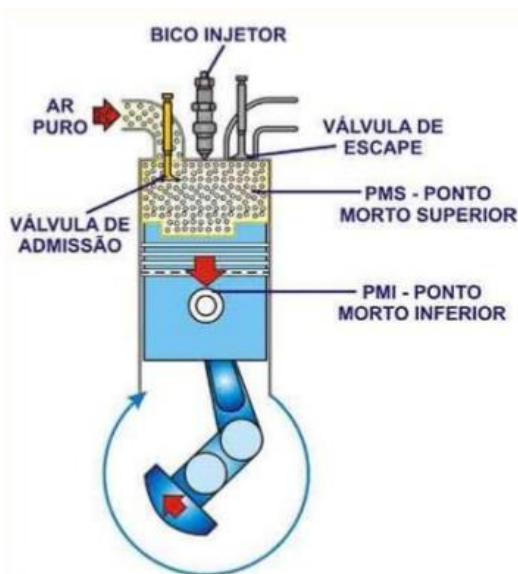


Figura 2.4 - Admissão: 1º Tempo do Ciclo Otto (gasolina). (Fonte: CÂMARA, 2003)

2º Tempo – Compressão:

Nesta etapa, a válvula de admissão fecha-se. O pistão desloca-se do ponto morto inferior (PMI) ao ponto morto superior (PMS), comprimindo a mistura ar-combustível no interior da câmara, ilustrado na figura 2.5. No retorno a posição inicial do PMS, o virabrequim gira meia volta, completando assim a primeira volta completa (360°) (MAHLE ORIGINAL, 2016).

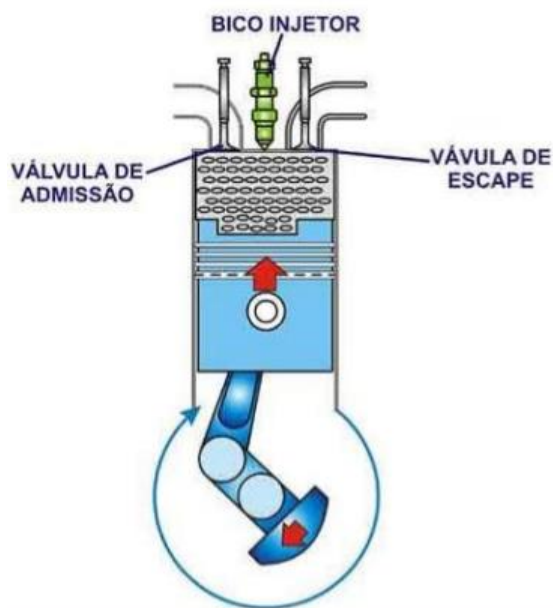


Figura 2.5 - Compressão: 2º Tempo do Ciclo Otto (gasolina). (Fonte: CÂMARA, 2003)

3º Tempo – Combustão:

Pouco antes de encerrar-se a fase de compressão e o pistão atingir o PMS, o sistema de ignição do motor é acionado fazendo com que uma corrente elétrica seja transmitida à vela, produzindo uma centelha entre os eletrodos da mesma. Dessa forma, os gases resultantes da mistura são inflamados e entram em expansão, resultantes da reação química da combustão. O virabrequim realiza, novamente, meia volta (o que corresponde, como vimos, ao máximo deslocamento que o pistão pode percorrer), o que somatiza após esse tempo 540° completos no ciclo. Em motores de quatro tempos, este tempo é o único em que ocorre a produção de energia mecânica (MAHLE ORIGINAL, 2016). Um desenho esquemático dessa etapa é mostrado na figura 2.6.

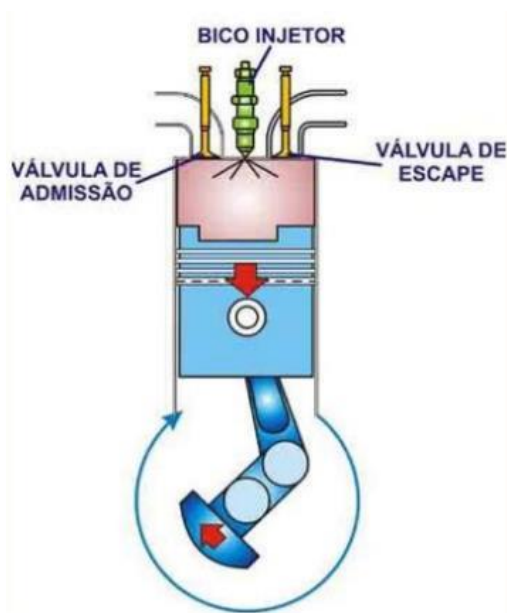


Figura 2.6 - Combustão: 3º Tempo do Ciclo Otto (gasolina). (Fonte: CÂMARA, 2003)

4º Tempo – Escape:

Depois de ocorrer a expansão dos gases (explosão). Os gases queimados são levados para fora do cilindro, a medida em que o pistão se movimenta do PMI ao PMS. Mais uma vez, o virabrequim executa o movimento de meia volta, completando a segunda volta do ciclo (720°). Este ciclo é denominado de ciclo de quatro tempos (MAHLE ORIGINAL, 2016). Ele é mostrado na Figura 2.7.

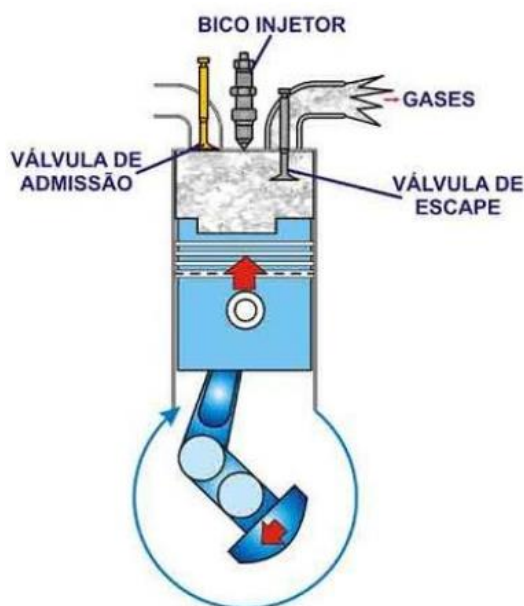


Figura 2.7 - Escape: 4º Tempo do Ciclo Otto (gasolina). (Fonte: CÂMARA, 2003)

2.1.3 Principais Irregularidades de Motores de Combustão Interna: Falhas Prematuras

Assim como todo equipamento, os motores apresentam desgaste ao longo do tempo, devido ao seu envelhecimento e uso, esses fatores chegam a ocasionar neles falhas. No caso dos motores classificados como a combustão interna, essas falhas também poderão ser advindas de manutenção e reparos inadequados (MAHLE ORIGINAL, 2016).

As causas mais comuns de ocorrerem essas falhas de funcionamento são: carburador, bomba injetora ou bico injetor com regulagem inadequada; contaminação do combustível; detonação; entrada falsa de ar no sistema de alimentação; falhas no sistema de ignição ou no sistema de injeção; motor superaquecido; perda de compressão através dos anéis ou das válvulas; velas sujas e inadequadas (MAHLE ORIGINAL, 2016).

No parágrafo anterior, vimos algumas falhas prematuras típicas que podem acontecer com os MCI (motores de combustão interna). Neste trabalho, faremos referência aos parâmetros de desempenho os quais validam as características de desempenho mecânico dos motores. Tais parâmetros são obtidos de forma indireta através da aquisição de dados por ensaios de desempenho desenvolvidos. Nesse ensaio foi utilizado o acelerômetro de um celular, na leitura direta, os registros dizem respeito ao sinal de vibração do motor em condições normais de funcionamento e aquisições de falhas realizadas através da simulação de falhas dos pistões nos MCI.

2.2 PARTES CONSTITUINTES DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

As principais partes constituintes de um motor alternativo de combustão interna serão listados e classificados em estacionários e móveis por fins didáticos, conforme apresentado em MAHLE ORIGINAL,2016:

- Componentes Estacionários: Bloco, cabeçote, cárter, coletor de admissão e coletor de escape;
- Componentes Móveis: Biela, Pistão/anel, virabrequim, eixo de comando de válvulas, Válvulas, Polia e anti-vibrador, Bomba de óleo e Bomba-d'água.

Nas Figuras 2.8 e 2.9 temos uma representação desses órgãos conforme esta classificação.

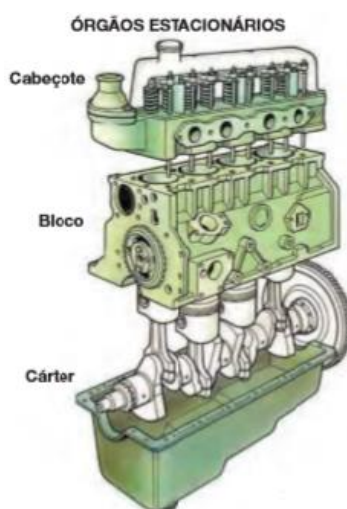


Figura 2.8 – Exemplos de Órgãos Estacionários dos Motores de Combustão Interna.

(Fonte: MAHLE ORIGINAL, 2016)

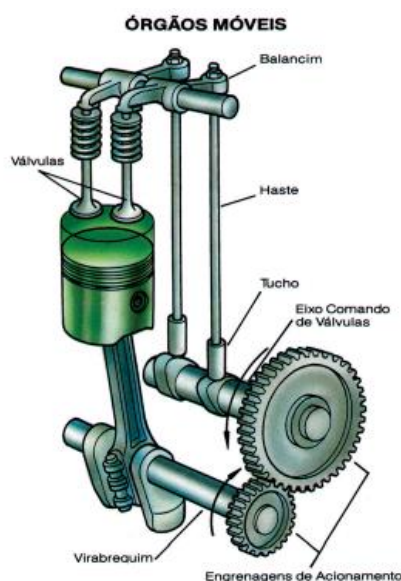


Figura 2.9 – Exemplos de Órgãos Móveis dos Motores de Combustão Interna.

(Fonte: MAHLE ORIGINAL, 2016)

Na Tabela 2.1 serão definidas brevemente a função básica de cada parte constituinte do tipo de motor em estudo conforme exposto em MAHLE ORIGINAL, 2016.

O pistão é a parede móvel da câmara de combustão. Ele é submetido à altas pressões e temperaturas quando o motor está operando. Além disso, a inclinação da biela e seu contato físico com o pistão exige boa resistência ao desgaste. Forças inerciais devido às massas (conjunto: pistão, anéis, pinos e parte da biela) em aceleração geram esforços mecânicos, assim também como, forças advindas do contato dos anéis (inércia e vibração) (MAHLE ORIGINAL, 2016).

Tabela 2.1 Função básica de cada parte constituinte de motores de combustão interna.

COMPONENTES ESTACIONÁRIOS	Bloco	<i>Trata-se do Motor propriamente dito.</i>
	Cabeçote	<i>Serve como tampa dos cilindros, local do PMS no qual o pistão comprime a mistura ar combustível.</i>
	Cárter	<i>Tampa inferior do bloco. Local onde está depositado óleo lubrificante.</i>
	Coletor de Admissão	<i>Armazena a mistura e distribui aos cilindros.</i>
	Coletor de Escape	<i>Armazena os gases queimados antes de lança-los à atmosfera através do tubo de escape.</i>
COMPONENTES MÓVEIS	Biela	<i>Elemento mecânico (braço) que faz a ligação entre o pistão e o virabrequim.</i>
	Pistão/ Anel	<i>Pistão: É a peça móvel da câmara de combustão. Recebe a força resultante da combustão dos gases, transmitindo-a a biela. Anéis: Compensam a folga entre o cilindro e o pistão.</i>
	Virabrequim	<i>É o eixo motor propriamente dito. Seu movimento é realizado através da força transmitida pela biela.</i>
	Eixo de Comando de Válvulas	<i>Acionado pelo virabrequim, por meio de engrenagem, corrente ou correia-dentada, possui a função de abrir as válvulas de admissão e escape.</i>
	Válvulas	<i>Válvula de Admissão: permite a entrada da mistura na câmara (interior do cilindro). Válvula de Escape: permite a evacuação dos gases queimados da combustão.</i>
	Conjunto de acionamento das válvulas	<i>Trata-se do tucho e uma haste, a qual o interliga ao balancim.</i>
	Polia e anti-vibrador	<i>Transmite, por meio de correia, o giro do virabrequim ao alternador e à bomba e absorve as vibrações.</i>
COMPONENTES MÓVEIS	Bomba de óleo	<i>Mecanismo que envia o óleo do cárter aos pontos do motor em que se faz necessária lubrificação.</i>
	Bomba d'água	<i>Responsável pelo arrefecimento do motor. Mecanismo destinado a circulação de água pelo motor e radiador.</i>
	Balancim	<i>Elemento que atua diretamente sobre a válvula</i>

2.2.1 Falhas Prematuras em Pistões

Considera-se como “normal” o desgaste de um pistão quando o funcionamento dos demais elementos mecânicos que compõem o motor não é afetado, apesar da sua ocorrência (MAHLE ORIGINAL, 2016).

Os sistemas de filtração de ar, de injeção de combustível, de lubrificação e de arrefecimento e a operação do equipamento, colaboram para que o desgaste dos pistões seja normal durante o tempo de vida útil do motor (MAHLE ORIGINAL, 2016).

- Falhas Prematuras em pistões por erros de montagem;
- Expulsão da argola de retenção do pino;
- Engripamento por deformação da camisa de cilindro;
- Insuficiência de folga de montagem;
- Falhas prematuras por mau funcionamento do motor;
- Engripamento do pistão, preferencialmente sobre o eixo do pino (cubo);
- Danificação por detonação;
- Danificação por pré-ignição;
- Trincas na cabeça e nos cubos do pistão;
- Falha por funcionamento em temperatura abaixo do normal;
- Excesso de combustível injetado;
- Danificação do topo por erosão;
- Interferência do pistão contra o cabeçote e/ou as válvulas;
- Fratura do pistão na região dos cubos;
- Trincas na borda da câmara;
- Trincas na saia do pistão;
- Deformação da parte superior da camisa;
- Usinagem do topo do pistão;
- Ruptura/quebra da parede entre canaleta.

2.3 DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM EQUIPAMENTOS

Os métodos que visam a obtenção de um diagnóstico de falhas em equipamentos, mais comuns ultimamente, são ditos como probabilísticos, árvores de falhas e sistemas periciais. Qualquer uma dessas abordagens exige um certo conhecimento prévio, mais ou menos difícil de obter, proveniente de informação histórica, dados do fabricante, manuais de serviço, ou experiência acumulada pelos técnicos (MARQUES, 2001).

A extração da informação, com vista à implementação de sistemas periciais baseados em regras, constitui uma fase demorada no processo, o que leva a uma alta demanda de estudos para aprimorar ou criar novas técnicas de diagnósticos de falhas.

O recurso da teoria da probabilidade permitiu obter uma forma geral de tradução de observações e derivar um modelo destinado à apresentação de atributos numa perspectiva humana. Deste modo o relato de ocorrência disponibiliza informação numa forma adequada ao ajuste da granularidade (subdivisões) das representações às necessidades reais das equipes técnicas. (MARQUES, 2001).

O estudo para diagnóstico de falhas em determinados equipamentos faz-se necessário acumular dados de várias formas, como citado em MARQUES, 2001:

Pelo levantamento de casos que possuam relevância, com relação a custos, durabilidade e de casos semelhantes em que os resultados obtidos sejam utilizados de maneira global;

Da classificação de casos levantados;

O cálculo de fatores de relevância com base tanto teórica como experimental, a partir da dispersão de observações por diagnósticos diferentes e respectivas frequências de ocorrência.

2.3.1 Diagnóstico Automático de Falhas em Equipamentos

Atualmente é possível programar sistemas completos para simulação de características técnicas que são encontradas em sistemas reais (JESUS; CAVALCANTE, 2009).

Os meios de diagnóstico automático de falhas baseiam-se em, árvores de falhas (2.3.1.1), sistemas periciais (2.3.1.2), ou probabilidades (2.3.1.3).

2.3.1.1. Árvore de Falhas

O diagnóstico de falhas realizado através do método de Árvore de Falhas é baseado em um conhecimento aprofundado sobre a estrutura analisada. Este tipo de abordagem exige aquisição de dados obtidos do equipamento em pleno funcionamento, informações históricas, dados do fabricante, manuais de serviço e da experiência acumulada pelos técnicos. Faz-se necessário um levantamento das falhas, provocadas por diversos componentes, erros humanos ou elementos externo. Uma árvore de falhas é um tipo de diagrama montado com base nos dados levantados, implicando em um diagnóstico da falha (MARQUES, 2001). Pelas razões apresentadas, um diagnóstico baseado em árvore de Falhas para esse estudo não é viável.

2.3.1.2 Sistemas Periciais

Os sistemas periciais são um produto da área da Inteligência Artificial (MARQUES, 2001). Dados históricos são arquivados e processados e usados como base para prever futuras falhas. O conhecimento é cumulativo e adaptável, automaticamente, à medida que as informações são atualizadas.

2.3.1.3 Métodos Probabilísticos

Os Métodos Probabilísticos para diagnóstico de falhas é baseada em dados estatísticos do equipamento. Este método é uma ferramenta para tomada de decisões no projeto e na gestão dos ativos, pois fornece alta confiabilidade do diagnóstico obtido.

2.4 DIAGNÓSTICO DE FALHAS VIA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS

A análise do comportamento dinâmico do motor, via análise dos modos de vibração, é uma importante ferramenta no monitoramento de máquinas e equipamentos. Dessa maneira, realiza-se o estudo das interações e das respostas dos estímulos internos dos componentes do sistema analisado. (JESUS; CAVALCANTE, 2011)

Vibração é conceituada segundo Rao (2009) como qualquer movimento que se repete após um determinado intervalo de tempo.

2.4.1 Aquisição do Sinal de Vibração com o acelerômetro de um smartphone

Com desenvolvimento e evolução da eletrônica e instrumentação o uso de sistemas experimentais para simulação e teste tornou-se muito mais simples e usual, tendo em vista que sistemas computacionais de aquisição de dados e microprocessadores passaram a ser utilizados de forma mais disseminada. (JESUS; CAVALCANTE,2011).

Atualmente a maioria dos *tablets* e *smartphones* tem um acelerômetro. Os *smartphones* constituem um tipo de telefone celular que possui uma alta capacidade de computação e comunicação (VIEIRA,2013). Portanto, os smartphones podem ser usados como ferramentas auxiliares em aplicações de engenharia.

Segundo, Vieira, 2013, hoje em dia a maior parte dos celulares no mercado são smartphones. Os smartphones hoje fabricados possuem diversos sensores integrados de fábrica, os quais são capazes de medir diversas grandezas físicas. Atualmente, grande parte dessa categoria de telefone celular possui os seguintes sensores:

- Acelerômetros;
- Magnetômetro;
- Câmera fotográfica e de vídeo;
- Microfone;
- Giroscópio;
- Luxímetro;
- GPS.

Nesse tipo de aparelho os textos e figuras gerados seguem a orientação de acordo com a direção da leitura conveniente ao usuário.

A realização de experimentos com esse tipo de aparelho traz as seguintes vantagens (VIEIRA, 2013):

- São equipamentos de fácil acesso;
- Possuem sensores integrados variados e de fácil acesso, capazes de medir inúmeras grandezas físicas (som, vibração);

- Fácil portabilidade;
- Eliminam, em uma grande variedade de casos, a necessidade de um espaço específico para a realização de testes experimentais;
- Rapidez com que os dados são coletados e apresentados.

Existem vários programas com a função de leitura de medidas do acelerômetro do celular, desenvolvidos para fins educacionais. O programa utilizado foi o *Sparkvue (Pasco)*. Disponibilizado gratuitamente na loja virtual da Samsung “*play store*”. Permite a construção de gráficos de aceleração em tempo real, em uma taxa de amostragem de até 1KHz e envio dos dados gravados email ou pelo aplicativo *Whastapp*. A Figura 2.10 mostra a tela inicial do programa utilizado, já a figura 2.11 sua tela de gráficos.



Figura 2.10 - Tela Inicial do programa SPARKvue.

(Fonte: Próprio Autor)

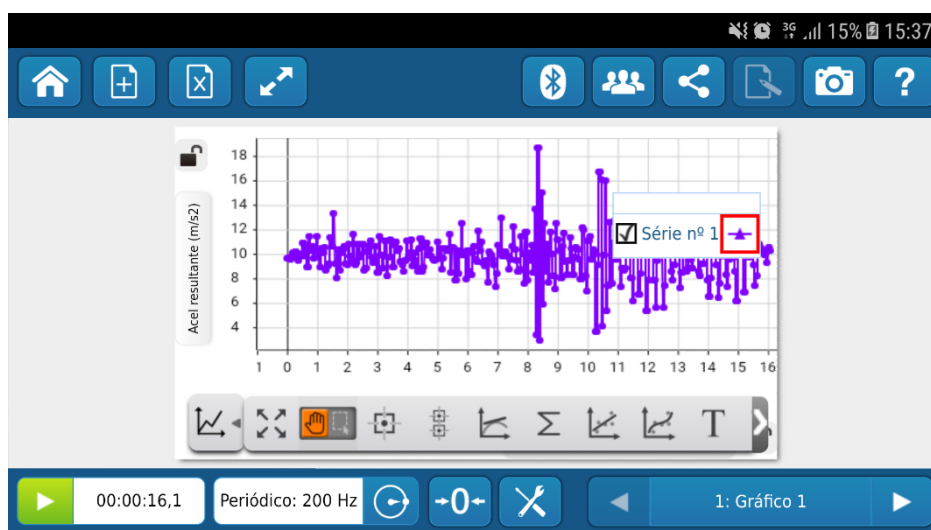


Figura 2.11 - Tela de Gráficos mostrando a grandeza aceleração com taxa de amostragem de 200 Hz. (Fonte: Próprio Autor)

2.5 ANÁLISE DE SINAIS

2.5.1 Amostragem de sinais

Para realização do processamento digital é necessário que o sinal passe por um processo de amostragem, que consiste em se adquirir valores do mesmo em certos instantes de tempo. Conversores analógico/digitais são responsáveis pela aquisição de sinais, transformando sinais contínuos em sinais digitais. Se a amostragem do sinal for feita em intervalos de tempos definidos diz-se que se trata de uma amostragem periódica com tempo de aquisição Δt (figura 2.12). Define-se como frequência de amostragem como $f_s = 1/\Delta t$. Através da amostragem do sinal ilustrado na figura 2.12, percebe-se que quanto menor o valor de Δt ou quanto maior a frequência de amostragem f_s , mais parecido o sinal amostrado ficará com o original, ou seja, melhor conservará seu contorno ou suas componentes de frequência.

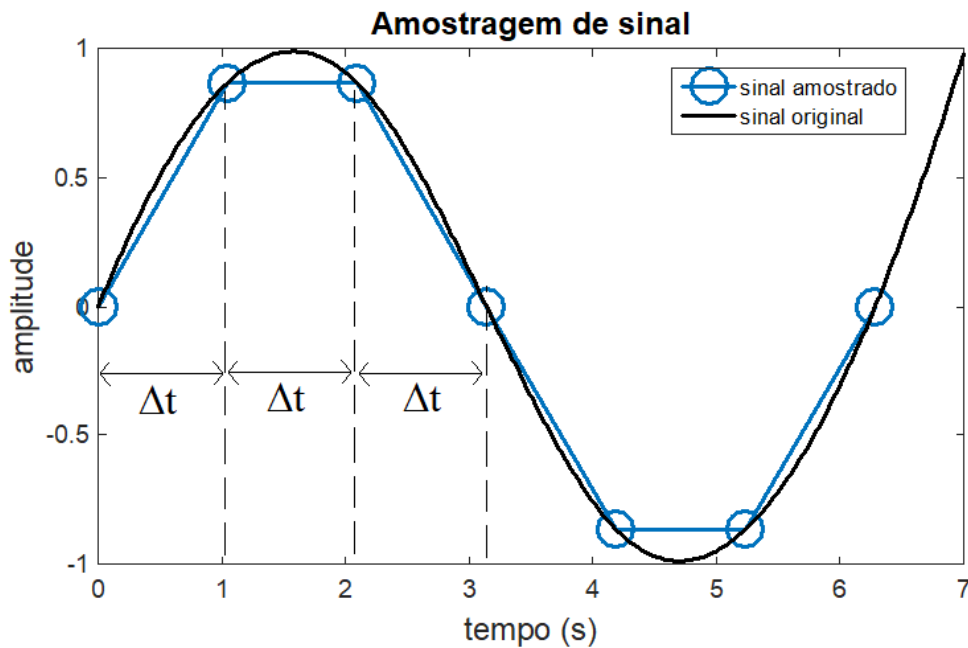


Figura 2.12 - Amostragem de uma senóide (Fonte: Próprio Autor)

O sinal da Figura 2.13 possui uma única componente de frequência, porém os sinais reais da natureza, como um sinal de vibração, possuem várias componentes de frequência que se somam para compor o sinal total. A componente de frequência máxima que se pode obter de um sinal digital de acordo com a equação de Nyquist (Equação 2.1) (Lathi, Green, 2014).

$$f_s > 2f_{m\acute{a}x} \quad (2.1)$$

Onde: $f_{m\acute{a}x}$ é a componente de frequência máxima do sinal.

Então, se o sinal for formado por uma única componente de frequência, como a senóide da Figura 2.13, a taxa de amostragem necessária para reproduzir o sinal deverá ser maior que o dobro da sua frequência de oscilação.

2.5.2 Transformada discreta de Fourier

Matematicamente, a transformada discreta de Fourier é obtida a partir do sinal amostrado conforme equação (2.2):

$$X[\omega_k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-2\pi nk/N} \quad , \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.2)$$

Onde:

$X[\omega_k]$ – transformada discreta de Fourier (sequência finita no domínio da frequência que possui N amostras)

$x[n]$ - Sinal amostrado

A norma dos pontos do sinal complexo $X[\omega_k]$ obtido pela transformada de Fourier fornece o espectro do sinal. A Figura 2.13 ilustra um sinal de som adquirido do motor de um automóvel em funcionamento e o seu espectro.

Fonte: Próprio Autor

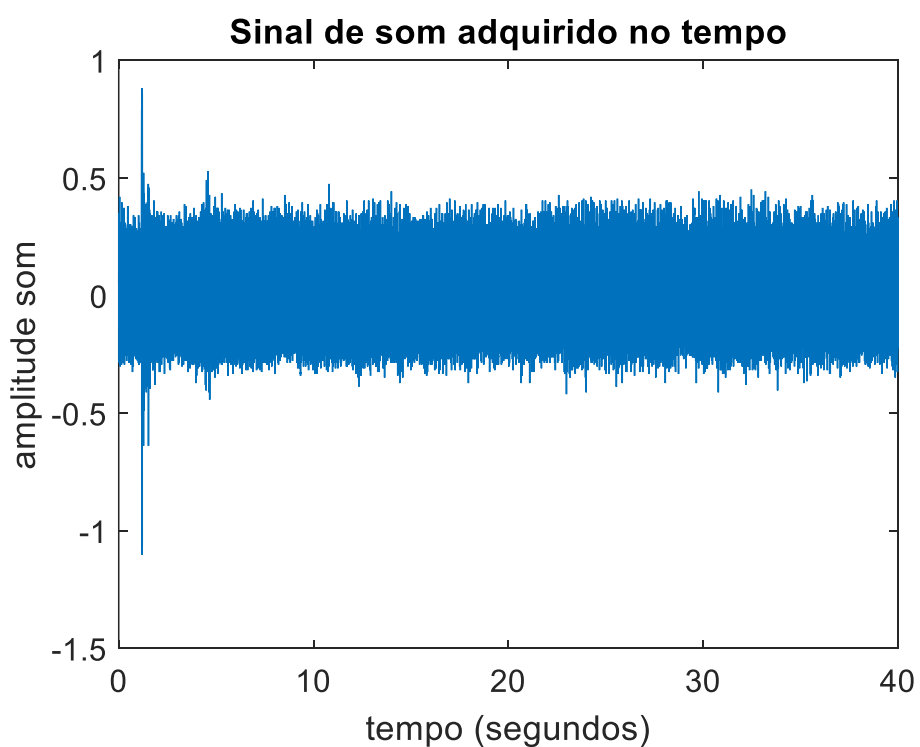


Figura 2.13 - Sinal no tempo de um som adquirido do motor de um automóvel em funcionamento. (Fonte: Próprio Autor)

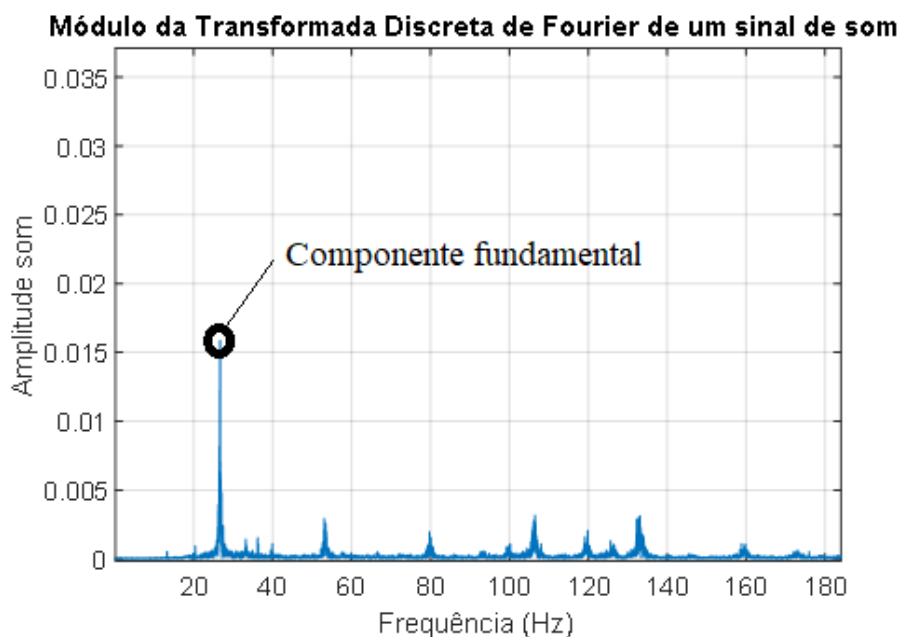


Figura 2.14 Gráfico da Transformada de Fourier do sinal. (Fonte: Próprio Autor)

Quanto maior o pico no domínio da frequência, maior a importância dessa componente na formação do sinal. O pico destacado na Figura 2.14 é a componente fundamental do sinal adquirido (frequência em torno de 25 Hz), o que quer dizer que essa frequência mais importante na reprodução desse sinal.

A análise de Fourier é de suma importância na área de processamento de sinais e vem sendo utilizada ao longo de vários anos em análises no domínio da frequência. Quando o sinal é estacionário, ou seja, suas propriedades não variam muito ao longo do tempo, é vantajosa a sua utilização. Porém, grande parte dos sinais contém características transitórias ou não estacionárias, para este caso, não é apropriada a utilização da transformada de Fourier (MENDES, 2008).

No entanto, há uma adaptação da transformada de Fourier que visa a análise individual de pequenos trechos do sinal por vez. A técnica é chamada de “janela deslizante sobre o sinal” ou “transformada de tempo-curto de Fourier” e trabalha o sinal numa função de duas dimensões, de variáveis tempo e frequência. Uma outra limitação, diz respeito ao fato de que a medida que se determina o tamanho da janela, esta deverá ser a mesma para todas as frequências, o que também limita a precisão desta técnica. (MENDES, 2008).

O sinal janelado é obtido multiplicando o sinal amostrado por um pulso na região de interesse. A Figura 2.15 ilustra um sinal submetido a uma janela retangular.

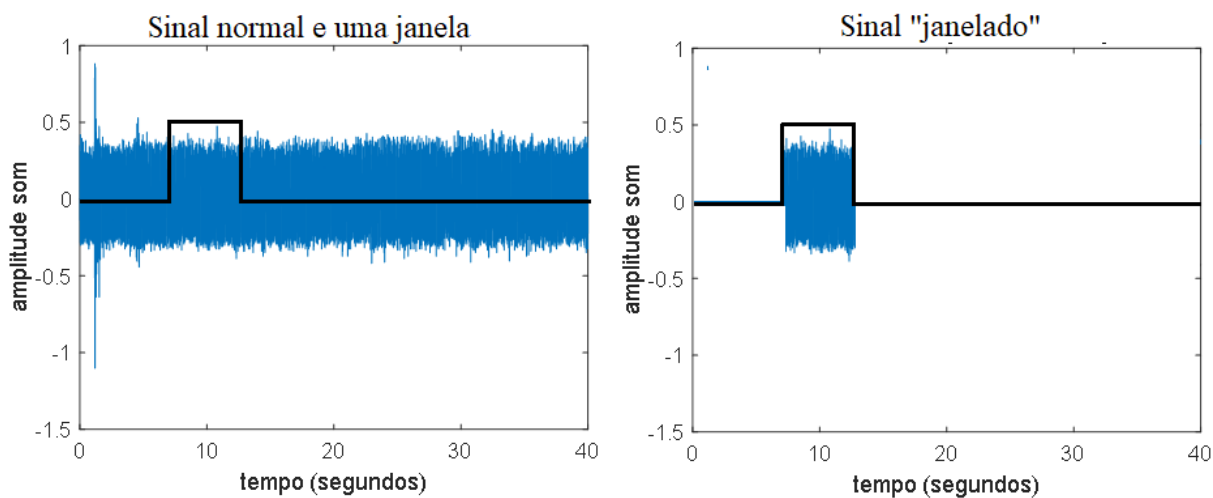


Figura 2.15 - Janelamento de um sinal digital. (Fonte: Próprio Autor)

A Figura 2.14 é puramente ilustrativa. Na realidade, em processamento de sinais costuma-se utilizar janelas com contornos mais suaves. Nesse trabalho utilizou-se uma janela de Hamming, dada de acordo com a Equação 2.3, plotada na Figura 2.16.

$$w(n) = 0,54 - 0,46 \cos(2\pi \frac{n}{N}), \quad 0 \leq n \leq N \quad (2.3)$$

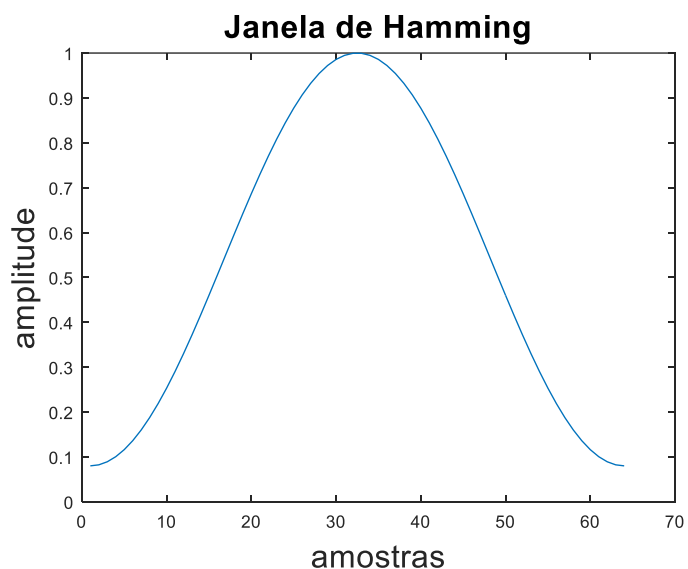


Figura 2.16 – Janela de Hamming (Fonte: Próprio Autor).

2.5.3 Transformada de Wavelet

A análise de sinais usando Wavelet representa a solução para casos onde se exige alta precisão, nesta técnica as janelas são deslizantes, com regiões de tamanhos variáveis. A análise de Wavelet é ideal para longos intervalos de tempo, para maior precisão na informação de baixa-frequência, e pequenas regiões, para altas-frequência (MENDES, 2008).

Define-se como uma Wavelet uma forma de onda com curta duração e um valor médio nulo. Fazendo a comparação de uma Wavelet com uma senóide, gerada através da análise por Fourier, os sinais são previsíveis e se estendem até o infinito, enquanto que as Wavelets são irregulares e assimétricas (MENDES, 2008).

Na análise wavelet multiresolução (AWM) o sinal é decomposto em níveis de resolução, fazendo com que seja possível se obter análises no tempo e na frequência. Neste trabalho a WMA utilizada é baseada no algoritmo de Mallat (Mallat, 2008). Obedecendo ao diagrama da Figura 2.17 (Cruz et al, 2017).

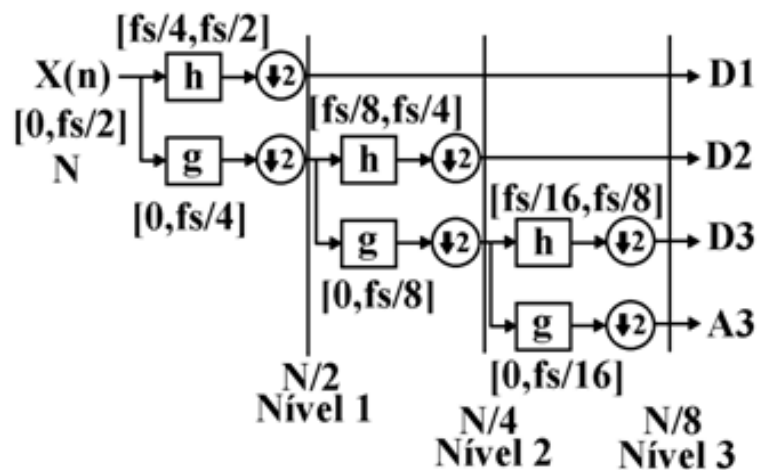


Figura 2.17 – Algoritmo de Mallat (Fonte: Mallat, 2008).

Na decomposição wavelet, o sinal original amostrado $x[n]$ é submetido a um filtro passa-baixa, que fornece a aproximação A_1 , e por um filtro passa-alta, originando o detalhe D_1 , conforme a Eq. (2.4) (Cruz et al, 2017):

$$\begin{aligned} A_1[k] &= \sum_k h[n - 2k] x[n] \\ D_1[k] &= \sum_k g[n - 2k] x[n] \end{aligned} \quad (2.4)$$

Onde k é o nível da decomposição e h e g são filtros da família de wavelets (nesse trabalho foi utilizada a família Daubechies), passa-baixa e passa-alta, respectivamente.

A partir do nível $k = 2$, os filtros passa-alta e passa-baixa são aplicados aos sinais de aproximações do nível anterior, conforme a Eq. (2.5), formado uma estrutura de decomposição em cascata de acordo com a Fig. (2.17).

$$\begin{aligned} A_m[n] &= \sum_k h[k - 2n] A_{m-1}[k] \\ D_m[n] &= \sum_k g[k - 2n] A_{m-1}[k] \end{aligned} \quad (2.5)$$

A faixa de frequências em que os sinais decompostos é definida pela estrutura de decomposição dos sinais realizada pelo processo de filtragem. A aplicação desses filtros resulta em uma subamostragem do sinal pela metade (*downsampling*), fazendo com que a largura de faixa de frequências seja reduzida pela metade a cada saída de filtro. Devido ao processo de decomposição, as aproximações e detalhes possuem componentes de frequência com banda passante que obedece à relação da Eq. (2.6).

$$A_k \Rightarrow \left[0, \frac{f_s}{2^{k+1}} \right] \quad (2.6)$$

$$D_k \Rightarrow \left[\frac{f_s}{2^{k+1}}, \frac{f_s}{2^k} \right]$$

Apesar dos sinais sofrerem um processo de *downsampling*, durante o processo de decomposição no MATLAB (Cruz et al, 2017), as aproximações e detalhes sofrem ainda uma interpolação para que facilitar o processamento de dados, fazendo com que o sinal permaneça

com o mesmo número de pontos do sinal amostrado, permitindo que seja calculado o espectro de potência wavelet de cada detalhe.

A decomposição é feita de forma que o sinal possa ser reconstruído a partir da soma do último nível da aproximação e a soma de todos os detalhes. Por exemplo, para a Figura 2.17, temos a equação 2.7.

$$x[n] = A3 + D1 + D2 + D3 \quad (2.7)$$

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. ACELERÔMETRO DO CELULAR

Neste trabalho foi utilizado um *smartphone* como instrumento de detecção de falhas, na aquisição de amostragens da aceleração, armazenamento e apresentação de dados.

O Smartphone Android utilizado no experimento foi o modelo Galaxy J7 Prime da fabricante Samsung. Mostrado na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Smartphone Galaxy J7 Prime da fabricante Samsung. (Fonte: Samsung, 2018)

O intervalo de leitura de um acelerômetro típico de um smartphone é de $\pm 2g$, sendo g a aceleração da gravidade), medidos com base em um referencial inercial. A resolução máxima é de $0,002g$, porém geralmente não é alcançada pela facilidade com que o sensor é capaz de medir as vibrações mecânicas do aparelho (VIEIRA, 2013).

O acelerômetro integrado a smartphones consiste em um sistema eletromecânico extremamente pequeno, são, basicamente, pequenos capacitores com placas que possuem uma certa elasticidade, sendo assim, a medida em que o dispositivo é submetido a uma determinada aceleração a distância entre eles varia, tendo em vista essa propriedade (VIEIRA, 2013). Na Figura 3.2 o tamanho do acelerômetro de um celular é comparado ao de uma moeda.



Figura 3.2 - Tamanho de um acelerômetro utilizado em tablets e smatphones (Fonte: MENDES,2013).

3.2 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

Para o devido trabalho foi utilizado um automóvel do modelo Fiesta fabricado pela Ford em 2005.

O motor dianteiro (ilustrado na Figura 3.3) com disposição transversal é dotado de quatro cilindros dispostos em linha com duas válvulas por cilindro, quatro tuchos hidráulicos e a frequência de rotação do motor de 800 Hz.



Figura 3.3. Parte Dianteira de um carro Ford Fiesta 2005.

3.3 MÉTODO APLICADO

No presente trabalho foi utilizado o sensor acelerômetro para a medição do sinal de vibração. Atualmente os aparelhos celulares smartphones são fabricados com esse sensor integrado, responsável pelo movimento de rotação de tela. Através do aplicativo *SPARKvue*, instalado no celular, foram gerados arquivos de dados da aceleração (*formato cvc*) dentro de uma frequência de 200 Hz, em ensaios com duração de 2 minutos.

De posse dos arquivos de dados, converteu-se o arquivo em formato *cvc* para *txt*, visando o processamento dos dados através de um programa desenvolvido no MATLAB. Foram obtidos dessa forma as curvas referentes ao funcionamento normal e a de falhas simuladas nos pistões, falha no pistão 1 e falha no pistão 1 e 4.

A análise dos sinais obtidos foi feito através tanto fazendo uso da ferramenta Transformada Rápida de Fourier, como, uma através da avaliação dos detalhes de wavelet obtidos.

A figura 3.4 ilustra o diagrama de blocos do algoritmo utilizado para identificação *misfire* (falha no pistão) do veículo estudado através da análise de Fourier. O sinal de vibração amostrado é submetido a uma janela de Hamming, em seguida é feito o cálculo da transformada rápida de Fourier (FFT) e então são detectados os picos no entorno da frequência de falha do pistão, caracterizando a falha *misfire*.

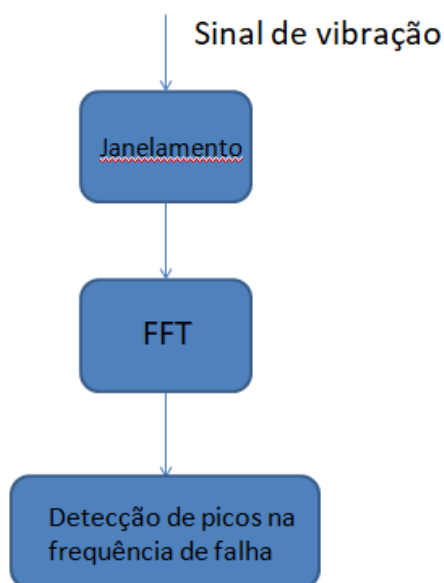


Figura 3.4 – Diagrama de blocos para análise no domínio da frequência (Fonte: Próprio Autor).

A figura 3.5 ilustra o fluxograma para identificação da falha em pistões a partir da AWM. O sinal adquirido é decomposto em 5 níveis e é calculado o espectro de potência wavelet de cada detalhe e da amostra A5, a partir da Eq. 3.1.

$$E = 2^{-j} \sum_n (W_{j,n})^2 \quad (3.1)$$

Onde j é o nível do detalhe e $W_{j,n}$ são os n coeficientes do detalhe j .

A partir do cálculo do espectro de potência wavelet de cada detalhe na composição do sinal, consegue-se identificar padrões que podem caracterizar um sistema saudável ou com falha.

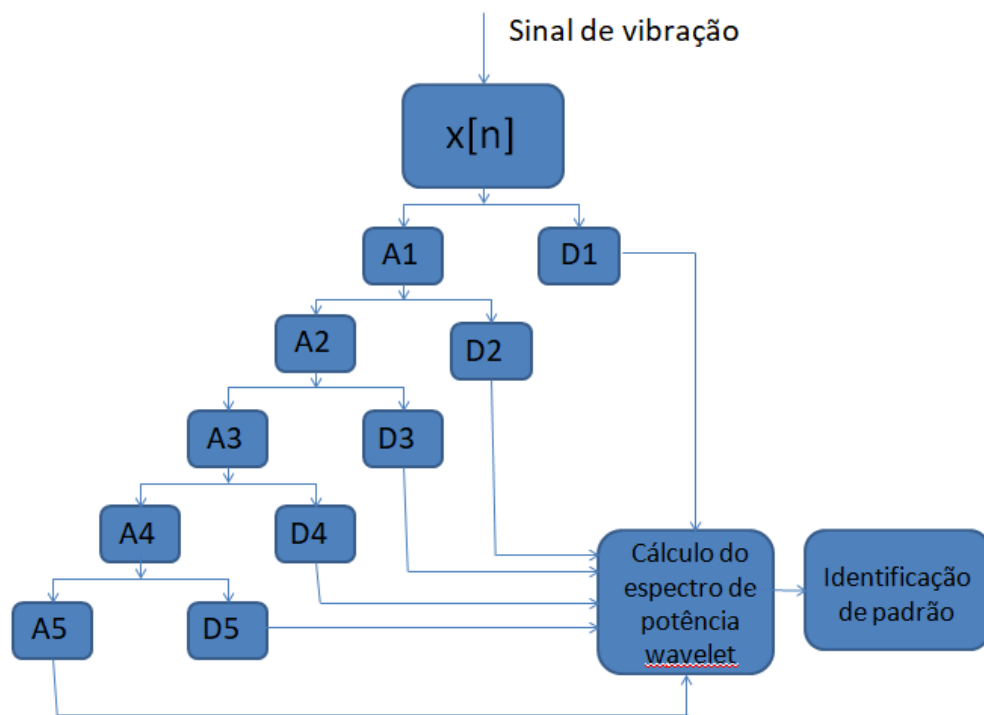


Figura 3.5 Diagrama de blocos para análise no domínio do tempo (Fonte: Próprio Autor).

O Anexo A contém toda a programação no MATLAB desenvolvida para os devidos Fins

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E CONCLUSÃO

4.1 ANÁLISE DE FOURIER

As aquisições foram realizadas com o celular posicionado sobre o motor do carro em ponto morto. Para a realização dos experimentos foram adquiridos sinais em 3 cenários distintos. No primeiro cenário foi adquirido o sinal do motor saudável, no segundo foi retirado o primeiro cabo de alimentação dos pistões (pistão 1) e no terceiro cenário foi retirado o primeiro e o quarto cabo (pistões 1 e 4). Na Figura 4.1 está ilustrado os sinais de vibração no domínio do tempo.

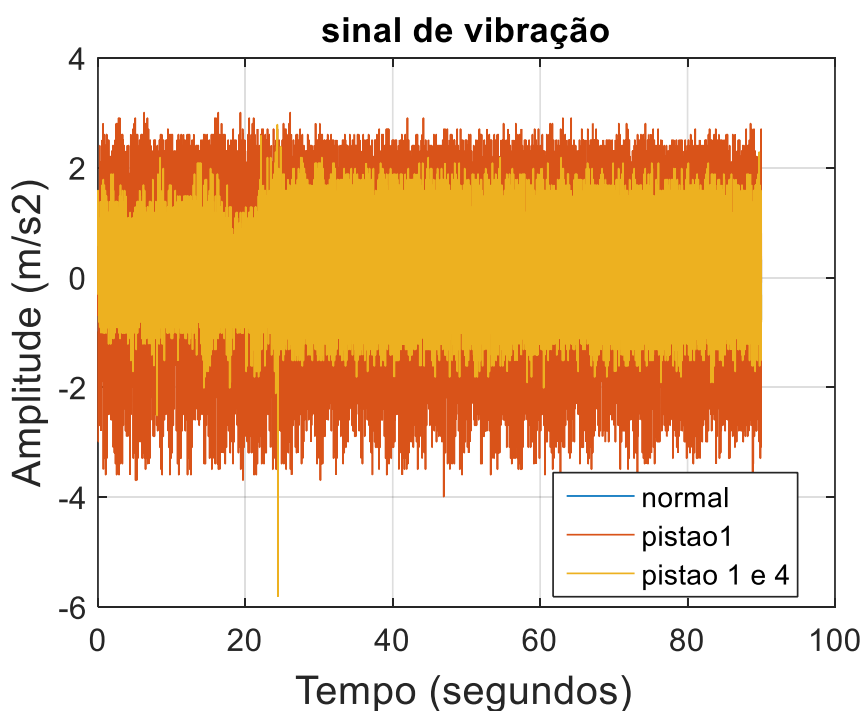


Figura 4.1. Gráfico dos sinais de vibração para o motor saudável, com falha no pistão 1 e com falha no pistão 1 e 4 simultaneamente (Fonte: Próprio Autor).

Na figura 4.2 está ilustrado os gráficos da transformada de Fourier para diferentes configurações de falhas.

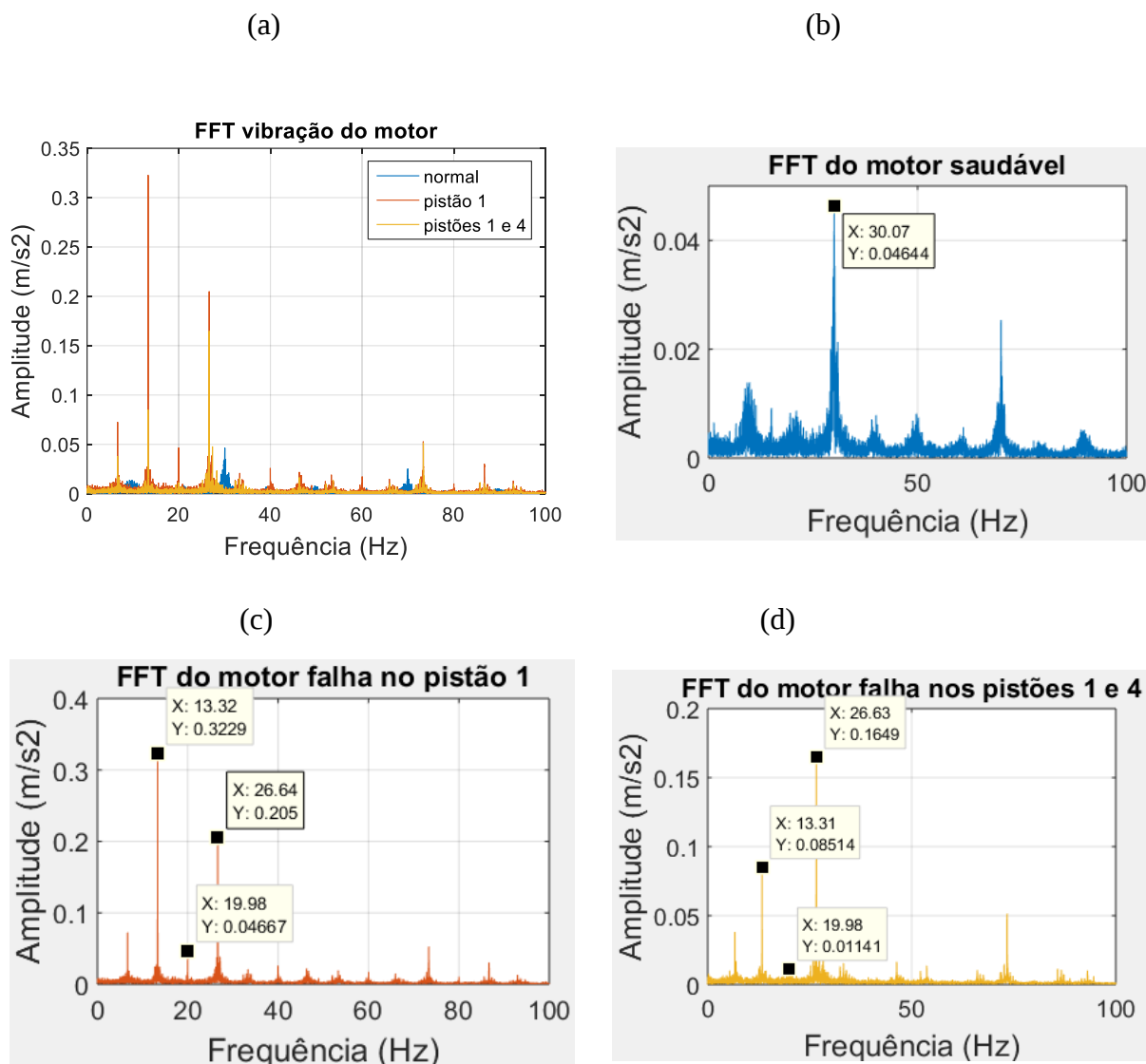


Figura 4.2. (a) Gráfico da FFT com as três configurações, (b) FFT para o motor saudável, (c) FFT para de falha no pistão 1 e (d) FFT para falha nos pistões 1 e 4 simultaneamente. Fonte: Próprio Autor.

Quando o motor é posto em funcionamento, os pistões 1 e 4 se deslocam de forma simétrica, assim como os pistões 2 e 3. A cada volta completa que o eixo realiza ocorrem duas explosões, uma nos pistões 1 ou 4 e outra nos pistões 2 ou 3. Sendo assim, a frequência de explosão no motor é o dobro da frequência de rotação do motor, ambas essas frequências são importantes para entender os gráficos da figura 4.2.

Na Figura 4.2(b) percebe que a frequência fundamental do sinal ocorre em 30,0 Hz (frequência de explosão) para o motor funcionando normalmente. Nesse caso o motor está equilibrado e a frequência de explosão se torna mais evidente no espectro do sinal de vibração, do que a frequência de rotação do eixo do motor que é 15 Hz (900 rpm).

Quando é provocada a falha no pistão 1, o motor altera sua velocidade de rotação para 13,3 Hz (788 rpm) e a sua vibração aumenta (ver figura 4.1), tornando o pico dessa frequência mais evidente no espectro, conforme pode ser visto na Figura 4.2(c). É interessante observar na mesma figura, que para a falha no pistão 1 fica evidente, também, um pico na frequência em torno de 20 Hz. Quando o pistão 1 deixa de funcionar, a cada 2 rotações do motor ocorrem 3 explosões, fazendo com que a frequência $(3/2) * 13,3 \approx 20$ Hz se torne importante na composição do sinal.

Quando a falha ocorre nos pistões 1 e 4 na Figura 4.2(d), a frequência em torno de 20 Hz deixa de ser importante no sinal, já que agora ocorre apenas uma explosão por rotação, ficando em evidência a frequência de rotação do eixo de 13,3 Hz (798 rpm) e suas harmônicas.

4.2 ANÁLISE DE WAVELET

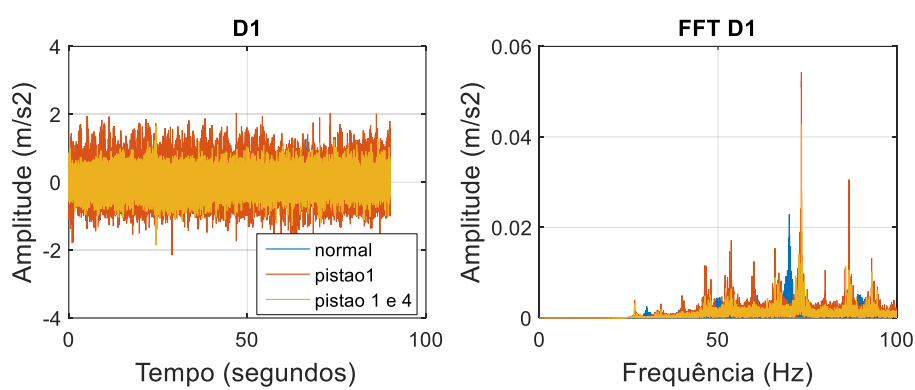
Os testes foram realizados em três diferentes dias sendo que para cada caso realizou-se a aquisição de dados três vezes para cada ensaio. Observou-se que o comportamento da curva referente a evolução dos detalhes com os quatro pistões em funcionamento no motor, eram bem próximos e é bem provável que não tenham sido mais semelhantes devida a baixa precisão do acelerômetro do celular. Construímos assim uma “assinatura”, ou seja, uma curva característica para o motor com todos os pistões em funcionamento. Concluindo que qualquer resultado que muito se diferencia da curva característica do motor, este apresenta algum tipo de falha nos pistões.

A análise wavelet multiresolução (AWR) fornece uma abordagem no tempo, permitindo separar componentes de frequência específicas do sinal. Nesse trabalho, o sinal de vibração foi decomposto em 4 níveis com uma aproximação A4 e detalhes D1, D2, D3, D4. Então, usando equação 2.5, podemos encontrar a banda passante (faixa de frequência predominante) de cada componente, conforme pode ser visto na Tabela 4.1. E nos gráficos da Figura 4.3.

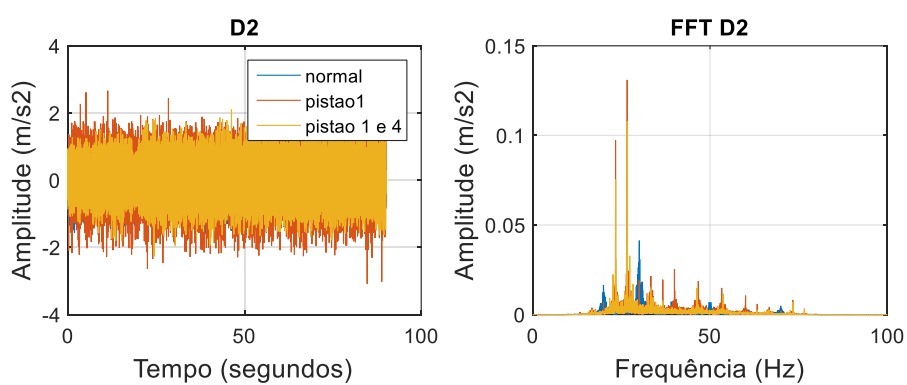
Tabela 4.1 – Frequência predominante dos detalhes

Detalhe	Banda do sinal (Hz)
D1	50 a 100
D2	25 a 50
D3	12,5 a 25
D4	6,25 a 12,5
A4	0 a 6,25

(a)



(b)



(c)

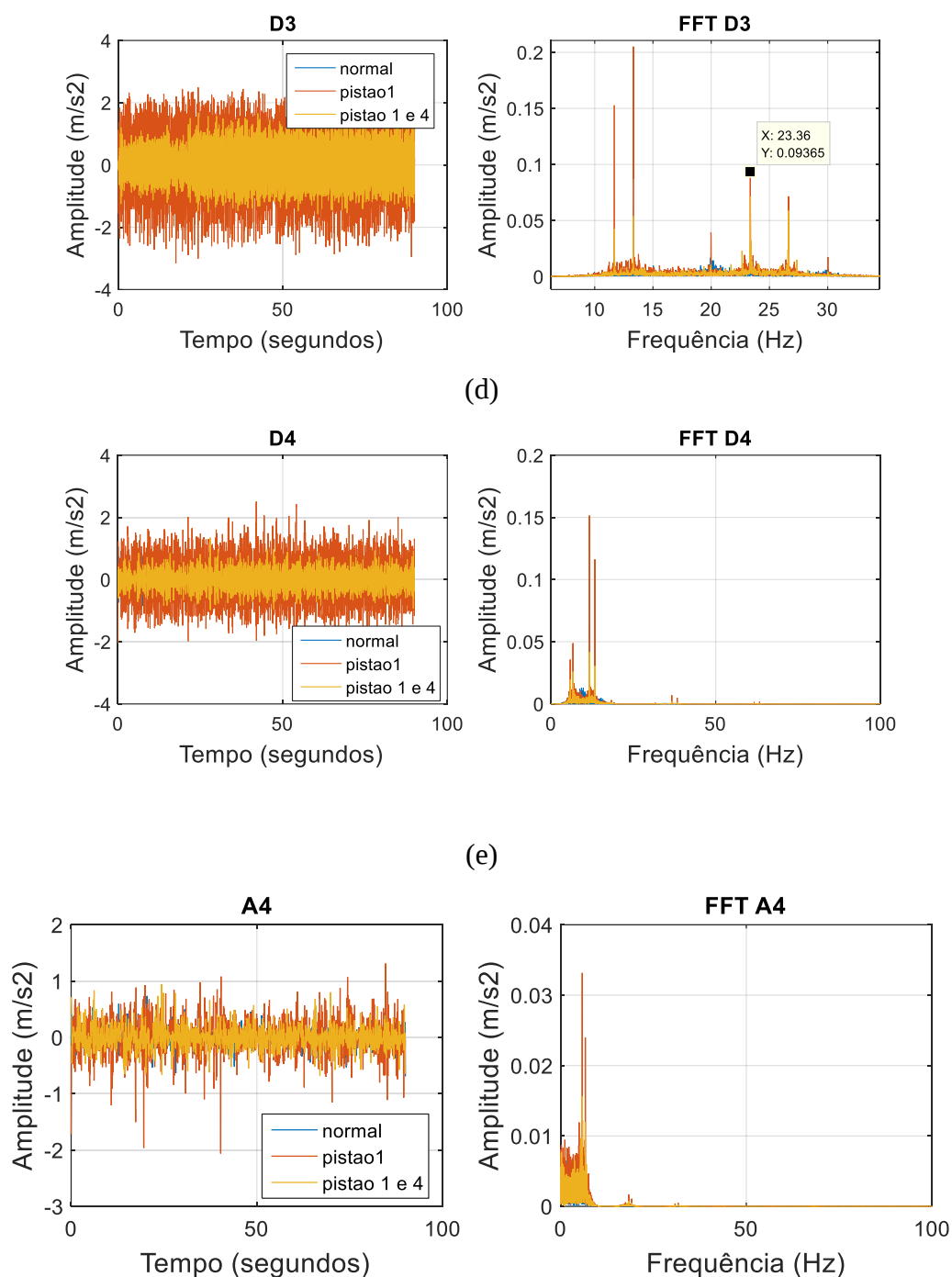


Figura 4.3 Detalhes e aproximação do sinal e seus respectivos espectros (Fonte: Próprio Autor).

Na Figura 4.4 está ilustrado um gráfico com o comportamento do espectro de potência wavelet de cada detalhe dos sinais para o motor normal, com falha no pistão 1 e com falha nos pistões 1 e 4 simultaneamente. Perceber como cada configuração do motor possui um comportamento diferente para a distribuição do espectro de potência wavelet de cada detalhe.

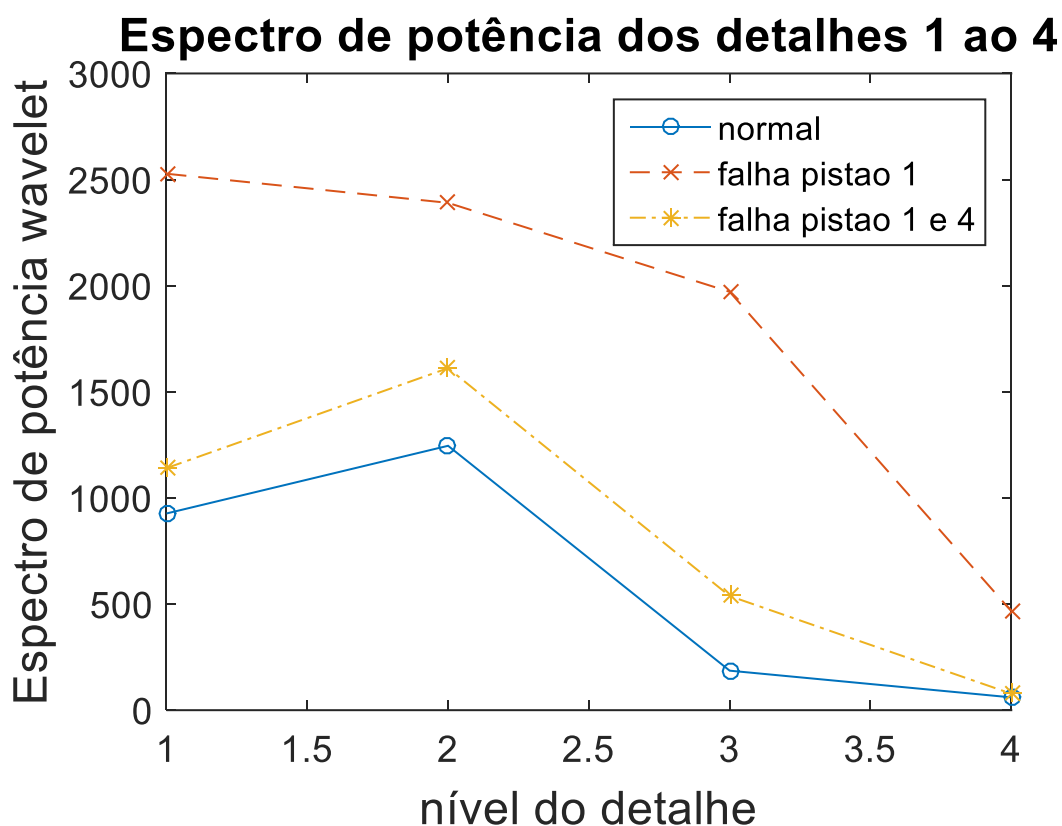


Figura 4.4. Espectro de potência wavelet de cada detalhe para o motor em funcionamento normal (caso 1), falha no pistão 1 (caso 2) e falhas no pistão 1 e 4 (caso 3) (Fonte: Próprio Autor).

Como o foi visto na seção anterior, quando o motor não apresenta falhas, a frequência de explosão (aproximadamente 30 Hz) é a componente de maior importância na composição do sinal, o que explica o alto valor do espectro de potência no detalhe D2 e o baixo no detalhe D3 (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Espectro de potência dos detalhes D2 e D3 para diferentes configurações

Falha	Espectro de potência wavelet do D2	Espectro de potência wavelet do D3
Normal	1246	186,1
Pistão 1	2390	1971
Pistão 1 e 4	1612	537,8

4.3 CONCLUSÃO

Concluiu-se que é possível realizar um diagnóstico de falhas do pistão utilizando o acelerômetro do celular. Devido a viabilidade analisada através de Fourier e da construção de uma curva característica da evolução dos detalhes de Wavelet do motor em funcionamento dito normal.

Para validar a ferramenta de aquisição de dados escolhida, o acelerômetro de um smartphone, na aquisição dos dados de vibração, houve, primeiramente a aferição de dados através da mesma em uma bancada de testes do laboratório do GPICEEMA (Grupo de Pesquisa em Instrumentação e Controle em Estudo de Energia e Meio Ambiente) da Universidade Federal da Paraíba. Onde a frequência de rotação do motor era conhecida. Os arquivos de dados foram gerados através das medições realizadas no aplicativo SPARKvue e exportado por email. De posse do arquivo de dados foi-se verificado através da Análise via Transformada Rápida de Fourier que a frequência de rotação do motor em pleno funcionamento realizada com um acelerômetro comum chegava sempre bem próximos dos resultados obtidos com medições utilizando o acelerômetro do celular. Preliminarmente, foi-se validada a viabilidade do acelerômetro do smartphone para testes no motor automotivo.

A resolução máxima do acelerômetro utilizado é de 0,002g, porém geralmente não é alcançada pela facilidade com que o sensor é capaz de medir as vibrações mecânicas do aparelho. O que diminui a precisão dos resultados obtidos em relação a outras ferramentas de medição dos sinais de vibração.

O deslocamento do celular durante os testes de vibração com o celular sob a carcaça do motor, para o motor em diferentes condições de funcionamento, também dificultou na obtenção de dados precisos. Alguns dos ensaios foram realizados com o celular sem nenhum tipo de fixação.

Ao tentar aferir as medidas com o celular preso por meio de dois tipos de fitas colantes, em diferentes ensaios o smartphone superaqueceu e algumas aquisições não foram possíveis de serem realizadas.

As análises mostradas na seção de resultado mostram que a determinação de falhas *missfire* é factível utilizando *smartphone* tanto pelo domínio da frequência (FFT) quanto no domínio do tempo (AWM), através da análise da espectro de potência wavelet dos detalhes D2 e D3 assim, como dos picos mais importantes do sinal da FFT.

As propostas para trabalhos futuros diz respeito a uma análise estatística dos resultados obtidos para cada aquisição. Ou seja, realizar-se um estudo acerca da precisão do método executado neste trabalho. Outros tipos de motores automotivos serão analisados e o software de detecção de falhas deverá ser embarcado no *smartphone*.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Carlos. e VIEIRA, Leonardo. *Experimentos com o Acelerômetro de Tablets e Smartphones*, Rio de Janeiro. 2013. (Dissertação submetida à Universidade Federal do Rio de Janeiro para à obtenção do grau de Mestre em Física) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- BRUNETTE, Franco. *Motores de Combustão Interna*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2012.
- CÂMARA, J. (2003). *Motores de Combustão Interna*. Notas de Aula – 1ª versão. SENAI CIMATEC. Salvador – BA.
- Cruz, A. G. A., Gomes, R. D., Belo, F. A. and Lima Filho, A. C., 2017, "A Hybrid System Based on Fuzzy Logic to Failure Diagnosis in Induction Motors," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 8, pp. 1480-1489, 2017.
- DAIFUKU CO., Ltd. Sadao Akishita, Ziyi Li and Toshihiko Kato. *Failure Diagnosis System for Automobile Engine*. 5,932,801. 1999.
- ENERGETICA SUAPE II S.A., INSTITUTO GNARUS. Fulano de Tal and Beltrano de Argolax. *Sistema Preditivo para Diagnóstico de falhas em motores de combustão Interna por Meio da Análise da assinatura Elétrica dos Sinais de Saída do Gerador*. BR 102016008791-0A.

FECHINE, J. (2010). *A transformada de Fourier e suas aplicações*. Ciclo de Seminários Técnicos. Univesidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB.

FORD GLOBAL TECHNOLOGIES, Inc. Gintaras Vicente Puskorius, Lee Albert Feldkamp, Kenneth Andrew Marko, John Victor James and Timothy Mark Feldkamp. *Uma patente Method for Identifying Misfire Events of na Internal Combustion Engine*. US005732382A. 1998.

JESUS, S. S.; CAVALCANTE, P.F. *Utilização de bancadas de ensaio para estudo do comportamento dinâmico de máquinas rotativas – Vibrações Mecânicas*. Revista Holos, Natal, v.3 (2011), p. 18-40, 2011.

Lathi, B.P. and Green, R., 2014, ” *Essentials of Digital Signal Processing*”, Cambridge University Press, p. 748.

LIMA, J. *Motores a combustão Interna*. 2. ed. Minas Gerais: Minho, 2006.

Liu, Y., X. San Liang, e R.H. Weisberg, 2007: Rectification of the Bias in the Wavelet Power Spectrum. J. Atmos. Oceanic Technol., vol. 24, pp. 2093–2102.

MAHLE. *Manual Técnico do Curso Mahle Leve – Motores de Combustão Interna*. São Paulo, 2016.

Mallat., S., *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Third Edition: The Sparse Way. Academic Press, third edition, 2008.

MARQUES, Viriato. *Diagnóstico de Falhas em Equipamentos Baseado em informação Difusa Oriunda dos Técnicos de Manutenção*, Cidade do Porto. 2001. (Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Doutor em Ciências da Engenharia) – Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto. Cidade do Porto, Distrito do Porto.

- Mendes, L. (2013). *Experimento de Física em Tablets e Smartphones*, Rio de Janeiro. 2013. (Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física- Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Mendes, S. *Transformada de Wavelet aplicada a protecções digitais*, Cidade do Porto. 2008. (Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Major Energia) - Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto. Cidade do Porto, Distrito do Porto.
- RAO, S. (2009). *Vibrações Mecânicas*, Pearson Prentice Hall, Quarta Edição, São Paulo.
- ROBERT BOSCH LTDA. Amend da Cruz Rafael Augusto and Tischer Frederico Paulo. *Process for Detecting Internal Fuel Leakage in a Combustion Engine, and engine Control Unit*. WO2012BR50254. 2017.
- SILVA, S. da (2009). *Vibrações Mecânicas*. Notas de aula - 2º Versão. Universidade do Oeste do Paraná. Foz do Iguaçu – PR.
- SOUZA, R. (2014). *Funcionamento do Motor*. Notas de Aula – 1ª versão. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Barreiros – PE.
- TOYOTA JISOSHA KABUSHIKI KAISHA. Hitoki Sugimoto, Toshitake Sasaki, Yoshihisa Oda and Kenji Kimura. *Cooling Device for Internal Combustion Engine and Failure Diagnosis Method for a Cooling device for Internal Combustion Engine*. US 9,695,736 B2. 2017.

Anexo A

```

clear all
close all

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
#####CALCULA TORQUE PELO SOM%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% sinal do torque medido
load
E:\Orientacoes\andamento\Nayara_mestrado\acquisicao_18_12_2017\vibra_normal.
txt
load
E:\Orientacoes\andamento\Nayara_mestrado\acquisicao_18_12_2017\vibra_pistao1
.txt
load
E:\Orientacoes\andamento\Nayara_mestrado\acquisicao_18_12_2017\vibra_pistao1
e4.txt

vibra1 = vibra_normal(:,4) - mean(vibra_normal(:,4));
vibra2 = vibra_pistao1(:,4) - mean(vibra_pistao1(:,4));
vibra3 = vibra_pistao1e4(:,4) - mean(vibra_pistao1e4(:,4));

fs1 = 200;
Ts1 = 1/fs1; % período de amostragem
n = length(vibra1); % tamanho do vetor
t = 0:Ts1:(n-1)*Ts1; % intervalo de amostragem
t = t'; % transpoe o vetor
tf = t(n)

janela = hamming(n);
sinal_janelado1 = janela.*vibra1;
sinal_janelado2 = janela.*vibra2;
sinal_janelado3 = janela.*vibra3;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%5 TRANSFORMADA DE FOURIER %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Y1 = abs(fft(sinal_janelado1))/n; % FFT sinal normal
Y2 = abs(fft(sinal_janelado2))/n;
Y3 = abs(fft(sinal_janelado3))/n;
w = linspace(0,fs1,n); % intervalo de frequência

%plota o sinal no domínio do tempo
figure(1)
plot(t, vibra1, t, vibra2, t, vibra3)
set(gca, 'FontSize', 14);
grid
title('Sinal som adquirido no tempo')
ylabel('amplitude som', 'FontSize', 18)
xlabel('tempo (segundos)', 'FontSize', 18)
legend('normal', 'pistao1', 'pistao 1 e 4')
%axis([1 10 -1 1])

% Plota a FFT centralizada

```

```

figure(2)
plot(w(1:n/2),Y1(1:n/2), w(1:n/2),Y2(1:n/2), w(1:n/2),Y3(1:n/2))
set(gca,'FontSize',14);
grid
xlabel('Frequência (Hz)','FontSize',18)
ylabel('Amplitude (m/s2)','FontSize',18)
title('FFT do motor saudável')
%legend('normal','pistao1', 'pistao 1 e 4')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ANÁLISE WAVELET %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

sinal(:,1) = vibra1;
sinal(:,2) = vibra2;
sinal(:,3) = vibra3;

%sinal(:,4) = desacoplado_100g(1:40000,1);

for i = 1:3
format long
clear C
clear L
clear D1
clear D2
clear D3
clear D4
clear D5
l_s = length(sinal(:,i));
[C,L] = wavedec(sinal(:,i),4,'db6'); %define o vetor com os coeficientes
wavelets

%Determinando a aproximação e os subníveis
A4 = wrcoef('a',C,L,'db6',4);
D1 = wrcoef('d',C,L,'db6',1);
D2 = wrcoef('d',C,L,'db6',2);
D3 = wrcoef('d',C,L,'db6',3);
D4 = wrcoef('d',C,L,'db6',4);

energia(1,i) = sum(sinal(:,i).^2);
energia(2,i) = sum(A4.^2)/(2^4);
energia(3,i) = sum(D1.^2)/(2^1);
energia(4,i) = sum(D2.^2)/(2^2);
energia(5,i) = sum(D3.^2)/(2^3);
energia(6,i) = sum(D4.^2)/(2^4);

end

i=4;
figure(3)
plot(1:i,energia(3:(i+2),1),'-o',1:i,energia(3:(i+2),2),'--
x',1:i,energia(3:(i+2),3),'-.*')
legend('normal', 'falha pistao 1', 'falha pistao 1 e 4')
set(gca,'FontSize',14)
title('Espectro de potência dos detalhes 1 ao 4','FontSize',18)
xlabel('nível do detalhe','FontSize',18)
ylabel('Espectro de potência wavelet', 'FontSize',18)

```