

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**KLAUS BÖESCH**

**PROJETO DE DIPLOMAÇÃO**

**DETECÇÃO DE FALHAS POR FUSÃO DE SENSORES EM  
ATUADORES ELÉTRICOS**

Porto Alegre

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**DETECÇÃO DE FALHAS POR FUSÃO DE SENSORES EM  
ATUADORES ELÉTRICOS**

**CORRELAÇÃO ENTRE SINAIS DE TORQUE E VIBRAÇÃO**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Renato Ventura Bayan Henriques

Porto Alegre

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

KLAUS BOESCH

**DETECÇÃO DE FALHAS POR FUSÃO DE SENSORES EM  
ATUADORES ELÉTRICOS  
CORRELAÇÃO ENTRE SINAIS DE TORQUE E VIBRAÇÃO**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, UFRGS  
Doutor pela Universidade de Stuttgart – Stuttgart, Alemanha

Prof. Dr. Luiz Fernando Gonçalves, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre, dezembro de 2011.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais e também aos meus irmãos que sempre me apoiaram durante todo o curso de engenharia elétrica da UFRGS, não sendo diferente nesta etapa do curso.

Não poderia deixar de agradecer ao professor Renato por me orientar durante esta importante etapa da minha formação acadêmica. Também agradeço ao Felipe Faccin pela grande ajuda na etapa de preparação e aquisição das medições, necessárias para a análise neste trabalho.

Gostaria de agradecer também ao pessoal da Coester, por ter cedido as engrenagens com desgaste e defeitos, as quais foram muito importantes para o andamento do trabalho.

Agradeço aos meus colegas e amigos, que de alguma forma me ajudaram e apoiaram, tanto durante o desenvolvimento deste trabalho, quanto no decorrer do curso.

Para finalizar, quero agradecer a equipe da empresa CIM-TEAM América Latina, da qual faço parte, pela compreensão durante o último semestre, em alguns momentos em que precisei me ausentar para poder me dedicar ao trabalho.

A todos, os meus mais sinceros agradecimentos.

## RESUMO

No cenário industrial estão presentes diversos tipos de máquinas e equipamentos, considerados vitais para os processos industriais. Estes equipamentos, durante sua utilização, estão sujeitos a desgaste ou outras avarias, podendo com isso, reduzir seu desempenho e por consequência afetar os lucros das empresas. Para evitar este quadro e reestabelecer o estado de operação normal destes equipamentos são utilizadas técnicas de manutenção, dentre as quais, as mais modernas são baseadas na análise da condição dos equipamentos, através da monitoração dos sinais por diferentes tipos de sensores e o processamento e análise destes sinais. O objetivo deste trabalho é analisar os sinais de vibração e torque de um atuador elétrico para válvulas tipo gaveta e globo, ao se injetarem falhas, como por exemplo, com a utilização de engrenagens com desgaste, a fim de se identificar as assinaturas presentes nessas falhas. Assim, neste trabalho foram feitas medidas de vibração e torque de um sistema atuador/válvula. Posteriormente, os sinais medidos foram analisados através da correlação entre eles, para analisar o comportamento do sistema, através das medidas dos sensores utilizados e consequentemente identificar as assinaturas características das falhas injetadas no sistema.

**Palavras-chaves: Detecção de Falhas. Correlação. Atuadores elétricos para válvulas. Vibração. Torque. Manutenção.**

## **ABSTRACT**

In the industry several kinds of machinery and equipments can be used for industrial processes. These equipments during their use are subject to wear or other kinds of damage, and this may reduce their performance and thus reduce the profits of the corporations too. To avoid this situation and restore the state of normal operation of these equipments, maintenance techniques are used among which the latest are based on the condition of the equipment, through its monitoring of different kinds of sensors, and the processing and the analysis of these signals . The objective of this work is to analyze the vibration an torque signals of an electric valve actuator, injecting faults in this actuator, such as the use of gears with wear in order to identify the signatures presented in these faults. Thus, in this work were measured vibration and torque of a system actuator / valve. Subsequently the measured signals were analyzed by the correlation between them, to identify the behavior of the system's point of view of the sensors used and therefore identify the characteristic signatures of the injected faults.

**Keywords: Fault detection. Correlation. Electric valve actuators. Vibration. Torque. Maintenance.**

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>13</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 DEFINIÇÃO DE FALHA.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.1 Manutenção Corretiva .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.2 Manutenção Preventiva .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.3 Manutenção Preditiva .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.4 Manutenção Proativa .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3 SINAIS UTILIZADOS PARA DETECÇÃO DE FALHAS .....</b>	<b>23</b>
<b>2.4 DETECÇÃO DE FALHAS PELA ANÁLISE DA VIBRAÇÃO.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.1 Fontes de Vibração em Caixas de Engrenagens .....</b>	<b>25</b>
<b>2.5 SISTEMA DE MANUTENÇÃO INTELIGENTE - ARQUITETURA OSA/CBM...30</b>	
<b>2.6 WATCHDOG AGENT™ .....</b>	<b>32</b>
<b>2.7 CORRELAÇÃO .....</b>	<b>34</b>
<b>3 TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE FALHA .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1 TÉCNICAS NO DOMÍNIO DO TEMPO.....</b>	<b>37</b>
<b>3.2 TÉCNICAS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....</b>	<b>38</b>
<b>3.3 TÉCNICAS NO DOMÍNIO DO TEMPO/FREQUÊNCIA.....</b>	<b>38</b>
<b>4 FUSÃO DE SENSORES .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1 ARQUITETURAS DE FUSÃO DE SENSORES .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1.1 Fusão Centralizada.....</b>	<b>42</b>
<b>4.1.2 Fusão Distribuída .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1.3 Fusão Híbrida .....</b>	<b>43</b>
<b>5 INSTRUMENTOS UTILIZADOS PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO .....</b>	<b>44</b>

<b>5.1 ACELERÔMETROS .....</b>	<b>44</b>
<b>5.1.1 Acelerômetros Piezoelétricos .....</b>	<b>45</b>
<b>5.1.2 Acelerômetros Utilizados .....</b>	<b>46</b>
<b>6 METODOLOGIA UTILIZADA .....</b>	<b>48</b>
<b>6.1 SISTEMA EM ANÁLISE .....</b>	<b>50</b>
<b>6.1.1 Atuador CSR6.....</b>	<b>51</b>
<b>6.1.2 Posicionamento dos sensores .....</b>	<b>54</b>
<b>6.2 INJEÇÃO DE FALHAS .....</b>	<b>57</b>
<b>6.3 MEDIDAS REALIZADAS .....</b>	<b>59</b>
<b>7 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>69</b>
<b>7.1 ANÁLISE DA FALHA 1.....</b>	<b>70</b>
<b>7.2 ANÁLISE DA FALHA 2.....</b>	<b>73</b>
<b>7.3 ANÁLISE DA FALHA 3.....</b>	<b>75</b>
<b>7.4 ANÁLISE DA FALHA 4.....</b>	<b>77</b>
<b>7.5 ANÁLISE DA FALHA 5.....</b>	<b>80</b>
<b>7.6 ASSINATURAS DE FALHA .....</b>	<b>82</b>
<b>8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>86</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICE I : CÓDIGO DO ALGORITMO UTILIZADO NO MATLAB .....</b>	<b>90</b>



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxo de dados de um sistema utilizando a arquitetura OSA-CBM (JOHNSON, 2006). ...	31
Figura 2 - (a), (b) Correlação positiva. (c) Correlação negativa. (d) Correlação zero (Adaptado de LATHI, 1998). .....	35
Figura 3 – Três arquiteturas de fusão: (a) processamento centralizado no centro de fusão, (b) processamento descentralizado em cada unidade de processamento e (c) processamento hierárquico (RAOL, 2010). .....	42
Figura 4 – Princípio básico de funcionamento de um acelerômetro (BALBINOT, BRUSAMARELLO, 2007). .....	44
Figura 5 - Modelo de um cristal piezoelétrico (BALBINOT, BRUSAMARELLO, 2007). .....	46
Figura 6 - Acelerômetro piezoelétrico PiezoStar® 8705A50M1 da KISTLER. ....	47
Figura 7 - Representação esquemática da metodologia utilizada no trabalho. ....	49
Figura 8 – Foto do conjunto atuador/válvula utilizado para estudos. ....	50
Figura 10 - Respresentação interna do atuador – parte 2 (COESTER AUTOMAÇÃO, 2009). ....	52
Figura 11 - Respresentação interna do atuador – parte 3 (COESTER AUTOMAÇÃO, 2009). ....	54
Figura 12 – Instalação do acelerômetro próximo ao acoplamento do eixo do motor e as engrenagens satélite. ....	55
Figura 13 - Instalação do acelerômetro próximo à extremidade do sem fim. ....	55
Figura 14 – Disposição dos acelerômetros em relação a estrutura do atuador ( Adaptado de COESTER AUTOMAÇÃO, 2009). .....	56
Figura 15 – Acelerômetro instalado no freio do sistema. ....	56
Figura 16 – Destaque das engrenagens satélite (Adaptado de COESTER AUTOMAÇÃO, 2009). ....	57
Figura 17 – Engrenagens satélite com pouco desgaste aparente. ....	58
Figura 18 – Engrenagem com 3 dentes quebrados. ....	58
Figura 19 – Engrenagem com os dentes severamente desgastados. ....	59
Figura 20 - Gráficos dos valores dos 4 sensores obtidos no ensaio Normal10A. ....	62
Figura 21 – (a) Correlação cruzada entre sinal de falha e sinal candidato a assinatura de falha. (b) Correlação cruzada entre sinal de operação normal e sinal candidato a assinatura de falha. ....	64
Figura 22 – Valores RMS das correlações cruzadas. ....	66
Figura 23 - (a) Sinal de amostra para comparação. (b) Intervalo do sinal de referência de falha com maior similaridade. (c) Intervalo do sinal de referência de operação normal com maior similaridade. ....	67
Figura 24 - (a) Assinatura de falha. (b) Intervalo do sinal de referência de falha com maior similaridade. (c) Intervalo do sinal de referência de operação normal com maior similaridade. ....	83
Figura 25 - (a) Espectro de frequência da assinatura de falha. (b) Espectro de frequência do intervalo do sinal de falha de referência com maior correlação. (c) Espectro de frequência do intervalo do sinal de operação normal de referência com maior correlação. ....	84
Figura 26 – (a) Diferença entre os valores RMS da correlação cruzada entre os candidatos a assinatura de falha e os sinais de referência. (b) Diferença entre o módulo do coeficiente de correlação dos candidatos a assinatura de falha e os sinais de referência com maior correlação. ....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modos de falhas críticas de segurança na transmissão de helicópteros (FORRESTER, 2006).....	30
Tabela 2 - Características do acelerômetro utilizado.....	46
Tabela 3 – Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha e operação normal para a Falha 1. ....	70
Tabela 4 – Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha (Falha 1) e de operação normal para os medidas de operação normal. ....	70
Tabela 5 - Classificação das diferenças dos valores de correlação entre as referências de falha e operação normal para a Falha 1. ....	72
Tabela 6 - Classificação das diferenças entre a correlação das referências de falha (Falha 1) e de operação normal para os medidas de operação normal. ....	72
Tabela 7 - Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha e de operação normal para a Falha 2.....	73
Tabela 8- Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha (Falha 2) e de operação normal para os medidas de operação normal. ....	73
Tabela 9 - Classificação das diferenças dos valores de correlação entre as referências de falha e operação normal para a Falha 2. ....	74
Tabela 10 - Classificação das diferenças entre a correlação das referências de falha (Falha 2) e de operação normal para os medidas de operação normal. ....	75
Tabela 11 - Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha e de operação normal para a Falha 3.....	75
Tabela 12 - Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha (Falha 3) e de operação normal para os medidas de operação normal. ....	76
Tabela 13 - Classificação das diferenças dos valores de correlação entre as referências de falha e operação normal para a Falha 3. ....	77
Tabela 14 - Classificação das diferenças entre a correlação das referências de falha (Falha 3) e de operação normal para os medidas de operação normal. ....	77
Tabela 15 - Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha e de operação normal para a Falha 4.....	78
Tabela 16 - Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha (Falha 4) e de operação normal para os medidas de operação normal. ....	78
Tabela 17 - Classificação das diferenças dos valores de correlação entre as referências de falha e operação normal para a Falha 4. ....	79
Tabela 18 - Classificação das diferenças entre a correlação das referências de falha (Falha 4) e de operação normal para os medidas de operação normal.....	79
Tabela 19 - Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha e de operação normal para a Falha 5.....	80

Tabela 20 - Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha (Falha 5) e de operação normal para os medidas de operação normal. ....	80
Tabela 21 - Classificação das diferenças dos valores de correlação entre as referências de falha e operação normal para a Falha 5. ....	81
Tabela 22 - Classificação das diferenças entre a correlação das referências de falha (Falha 5) e de operação normal para os medidas de operação normal. ....	82

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

AMD: Advanced Micro Devices

ARMA: Autoregressive Moving Average

ART: Adaptive Resonance Theory

CBM: Condition Based Maintenance

ECEF Earth-Centered, Earth-Fixed

EUA: Estados Unidos da América

IFAC: International Federation of Automatic Controls

IMS: Intelligent Maintenance System

LVQ: Learning Vector Quantization

OSA: Open System Architecture

RMS: Root Mean Square

TSA: Time Synchronous Averaging

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Parâmetros referentes à correlação

$x$	Variável aleatória $x$
$y$	Variável aleatória $y$
$\sigma_{xy}$	Covariância entre a variável aleatória $x$ e a variável aleatória $y$
$\bar{x}$	Média da variável aleatória $x$
$\bar{y}$	Média da variável aleatória $y$
$\sigma_x^2$	Variância da variável aleatória $x$
$z$	Variável aleatória $z$
$\bar{z}$	Média da variável aleatória $z$
$w$	Variável aleatória $w$
$\bar{w}$	Média da variável aleatória $w$
$\rho_{xy}$	Coefficiente de correlação de Pearson
$\sigma_x$	Desvio padrão da variável aleatória $x$
$\sigma_y$	Desvio padrão da variável aleatória $y$

### Parâmetros referentes à modelagem de acelerômetros

$F$	Força
$m$	Massa
$a$	Aceleração
$k$	Constante elástica do elemento mola

$x$	Deformação do elemento mola
$\Delta x$	Deslocamento da massa sísmica
$r$	Coefficiente de viscosidade do cristal
$s$	Coefficiente elástico do cristal

# 1 INTRODUÇÃO

Como peça fundamental dos processos produtivos utilizados nas indústrias, são encontrados equipamentos, máquinas ou dispositivos, que durante sua utilização estão suscetíveis a desgastes. Estes desgastes podem ser ocasionados por uma série de fatores, como por exemplo, atrito, vibrações, choques mecânicos, corrosões e etc (BOSA, 2009). Conforme estes desgastes evoluem no equipamento durante sua utilização, podem surgir outros desgastes ou mesmo a quebra de peças dos equipamentos, muitas vezes prejudicando os processos produtivos, causando prejuízo para as indústrias, tanto com a parada do processo produtivo, como com a diminuição da qualidade do produto, ou mesmo os custos envolvidos com a manutenção tardia do equipamento.

De forma a reestabelecer o estado de operação normal dos equipamentos, utilizam-se estratégias de manutenção, podendo estas serem corretivas, preventivas, preditivas ou proativas. Estas duas últimas são duas estratégias de manutenção, que utilizam o conceito de manutenção baseada em condição e estão inseridas no contexto de manutenção inteligente, e se utilizadas de forma apropriada podem diminuir consideravelmente o número de paradas dos processos produtivos e também reduzir os custos envolvidos com a manutenção (FEDELE, 2011), pois baseiam-se na detecção de falhas antes que evoluam para um quadro mais crítico.

Em um sistema típico de detecção de falhas, pode ser obtido um conjunto de sinais com informação sobre o estado atual da máquina, a partir de fenômenos como vibração, acústica, impurezas no sistema de lubrificação, entre outros. Cada um deles precisa ser tratado, descartando-se as informações não relevantes de cada sinal (CARVAJAR, 2011). Posteriormente estes sinais são analisados utilizando-se técnicas de processamento onde as falhas possam ser detectadas com maior facilidade. A partir dessas análises, pode-se

identificar se o equipamento está falhando, diagnosticando até mesmo o tipo de falha e indicar uma ação para corrigir o problema.

De forma a melhorar o desempenho das detecções de falhas podem ser utilizadas diversas técnicas de fusão de sensores, que utilizam os dados de diversos sensores, tendo em vista observar diferentes características das possíveis falhas do sistema, sendo pela utilização de diferentes tipos de sensores, ou mesmo sensores do mesmo tipo, instrumentados, por exemplo, em diferentes locais do equipamento. A fusão de sensores pode ser a nível de dados brutos, nível de característica e nível de decisão (DEMPSEY, HANDSCHUH, AFJEH, 2003) . Independente da utilização ou não de técnicas de fusão de sensores, ou de qual técnica utilizada, é necessário, para a detecção das falhas, ter um banco de dados com o histórico de operação do equipamento, contendo medições de um ou mais sensores. Porém, de nada servem estas medidas se elas não carregarem as informações características das possíveis falhas do sistema, ou seja, as assinaturas de falha, e também as características de operação normal do sistema, para que assim possam ser comparadas com os valores de medidas correntes do equipamento, possibilitando a detecção de falhas do sistema.

O objetivo deste trabalho é analisar os sinais de vibração e torque adquiridos através de sensores instalados em um conjunto atuador/válvula, onde o atuador é um atuador elétrico para válvulas tipo gaveta e globo, semelhante aos utilizados pelo setor petroquímico. Estas análises serão feitas pela análise da correlação entre os sinais de vibração e também entre os sinais de torque adquiridos do sistema, com a finalidade de identificar as assinaturas de falha do sistema ao se injetarem falhas, como por exemplo, a substituição de uma engrenagem em bom estado, por uma engrenagem com desgaste.

O desenvolvimento deste trabalho está dividido em uma revisão bibliográfica dos conceitos fundamentais para sua realização, a apresentação da metodologia utilizada neste



trabalho, uma descrição do sistema estudado, por fim, a apresentação e análise dos resultados obtidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordadas questões teóricas e definições relativas à falhas, manutenção, detecção de falhas, fusão de sensores, bem como outros tópicos importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

### 2.1 DEFINIÇÃO DE FALHA

Uma falha pode ser definida como uma situação que não permite que uma máquina ou um dispositivo continue funcionando em condições normais, forçando a interrupção de seu funcionamento tanto por critérios de segurança quanto pela impossibilidade de ser ligado novamente (CARVAJAR, 2011).

O comitê técnico da IFAC apresenta as seguintes definições para *fault* e *failure* (ALWI, EDWARDS, TAN, 2011), ambas as palavras podem ser traduzidas para o português como falha:

*Fault*: Um desvio temporário de pelo menos uma propriedade ou parâmetro característicos da condição aceitável/usual/padrão.

*Failure*: Uma interrupção permanente da habilidade de um sistema de desempenhar uma função requerida dentro de condições específicas de operação.

Neste trabalho será considerado como falha qualquer desvio do funcionamento aceitável /usual/ padrão de uma máquina, equipamento e/ou dispositivo.

### 2.2 ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO

O propósito da manutenção é estender o tempo de vida do equipamento ou pelo menos o tempo médio até a próxima falha em casos em que a reparação pode ter um alto custo ou demandar de muito tempo. Além disso, políticas efetivas de manutenção podem

reduzir a frequência de paradas e as consequências indesejadas de cada parada. A manutenção afeta a confiabilidade de componentes e sistemas: se é pouco realizada, pode resultar em um alto número de falhas e um baixo desempenho do sistema, baixando a confiabilidade. Se a manutenção é realizada com muita frequência, a confiabilidade do sistema é elevada, mas os custos com manutenção também aumentam (ENDRENYI et al., 2001). Abaixo pode-se ver algumas estratégias de manutenção frequentemente utilizadas.

### **2.2.1 Manutenção Corretiva**

Manutenção corretiva é definitivamente a mais antiga, espontânea e simples forma de intervenção (FEDELE, 2011), que consiste em reparar ou substituir um equipamento após ocorrer o defeito. É necessário recorrer a este tipo de manutenção quando se apresenta uma pane, por exemplo. Esta estratégia baseia-se na ideia de que na presença de sistemas não críticos, onde a substituição de uma peça é fácil e apresenta baixo custo, é conveniente aguardar a falha ocorrer antes de intervir.

É necessário identificar qual o componente apresentou defeito (uma tarefa que deve ser realizada imediatamente por um técnico de manutenção qualificado) e tomar todas as medidas necessárias para reestabelecer a integridade operacional do sistema.

Esta estratégia tem muitos aspectos que são assuntos de discussão, como:

- A parada da máquina ocorre de maneira casual e frequentemente no momento mais inoportuno;
- A falha grave e inesperada de um componente pode trazer consequências prejudiciais sobre outros elementos do sistema, comprometendo sua eficiência funcional e provocando por consequência aumento com nos custos de manutenção.

- Reparos não programados frequentemente requerem um tempo longo (aquisição de peças para reposição, designação do técnico correto, etc.), dificultando a produção e ocupando a mão de obra técnica de forma improdutivo.

Portanto sua utilização é indicada quando a diminuição de tempo de parada e aumento da disponibilidade do sistema utilizando-se uma estratégia mais sofisticada não são significativos e as possíveis falhas do sistema não são catastróficas, ou seja, não vão causar outras falhas de maiores proporções ou até mesmo acidentes.

### **2.2.2 Manutenção Preventiva**

Todas as intervenções realizadas baseadas na convicção de que o tempo de vida médio de alguns componentes podem ser determinados e que é possível antecipar a falha de um sistema complexo (máquinas ou linhas de produção), definindo antecipadamente o momento da intervenção, geralmente consistindo em uma substituição, caem na definição de manutenção preventiva. Esta estratégia teve um grande sucesso nas décadas de 60 e 70, pois preenchia a necessidade sentida pelo setor de manutenção, que era prover uma base científica e fazer as intervenções programáveis.

Nesta forma de manutenção o sistema ainda funciona, mas seu desempenho está degradado, a ponto de causar uma falha iminente. A manutenção é realizada em intervalos constantes (manutenção baseada no tempo), em datas determinadas (paradas de produção programadas para manutenção da planta), ou utilização (horas ou quilômetros de operação), para garantir que o sistema apresenta um nível suficiente de segurança, confiabilidade e desempenho. A manutenção preventiva é realizada sem levar em conta o estado da peça ou equipamento, assim, em muitos casos são substituídas peças que ainda poderiam ser utilizadas por mais tempo sem comprometer o desempenho do equipamento,

tanto paradas desnecessárias como substituição de peças de bom estado pode representar um grande prejuízo para as indústrias.

### **2.2.3 Manutenção Preditiva**

Uma visão mais moderna dos problemas relacionados a manutenção levou a utilização de técnicas não destrutivas para testar os equipamentos, a fim de identificar com uma considerável antecedência a presença de falhas e programar as revisões somente quando a condição da máquina determinar a necessidade. Esta abordagem é conhecida como manutenção preditiva e é baseada nas condições do equipamento, onde é possível programar em tempo real a manutenção do equipamento, baseando-se na condição do equipamento e em requisitos que devem ser respeitados. Assim pode-se evitar tempo de inatividade desnecessário do equipamento ou mesmo uma reação em cadeia catastrófica (uma falha causar uma falha maior), aumentando a confiabilidade global do sistema e reduzindo os custos. Parte-se do princípio em que falhas repentinas são muito raras, na maioria dos casos (especialmente sistemas mecânicos, pneumáticos e hidráulicos), a falha constitui um ponto de chegada de uma degradação progressiva. Este tipo de manutenção pode ser considerado como manutenção “reativa”, pois apenas informa pontualmente ao pessoal de manutenção a presença de problemas que requerem a programação de correção apropriada.

Esta prática de manutenção é baseada em inspeções visuais, medições, testes operacionais ou funcionais sem ter que desmontar o equipamento. Estas ações são realizadas em intervalos regulares definidos para cada característica, o que permite ao usuário detectar quando o desempenho de um componente começa a degradar, e com base nestas informações pode-se decidir o momento da intervenção para reparação ou substituição do componente antes que ocorra a falha.

Esta estratégia de manutenção não utiliza métodos probabilísticos para realizar prognósticos de falhas, mas sim utiliza a tendência dos parâmetros monitorados para prever avarias em potencial. Manutenção baseada na condição é um processo de diagnóstico que fornece indicações sobre o estado de saúde da máquina permitindo o planejamento da manutenção baseado na condição real dos componentes. Esta estratégia traz vantagens além de econômicas, operacionais, assim como o aumento da segurança da planta industrial e dos funcionários.

#### **2.2.4 Manutenção Proativa**

Assim como a manutenção preditiva, a manutenção proativa é baseada na condição onde o termo “proativa” se opõe ao termo “reativa” no sentido que isso se refere a ações realizadas antes da ocorrência de um evento crítico. Esta é uma atividade de “pré-alerta” que é realizada na expectativa de qualquer dano em relação ao material ou desempenho do sistema, ou seja, uma série de ações destinadas a corrigir as condições que podem levar a deterioração da máquina. A manutenção proativa propõe em vez de analisar a alteração do material ou desempenho para avaliar a condição de falha incipiente ou iminente, identificar e corrigir os valores anormais das principais causas de colapso, os quais poderiam levar a condições de instabilidade operacional.

Estas causas são as “raízes das falhas” e sinais do nível inicial de mau funcionamento. Por exemplo, as esferas de rolamentos de motores elétricos são frequentemente indicadas como a verdadeira causa de falhas, enquanto, a real causa é a dispersão de corrente no eixo de rotação, que através da geração de arcos elétricos acaba provocando o rompimento das guias de rolamento, neste caso, a causa primária de defeito são as correntes parasitas e não os rolamentos com defeito.

A manutenção proativa requer as seguintes ações:

- a) Monitoração de parâmetros chave indicadores da saúde da máquina;
- b) Definição de valores limiares, ou seja, valores limites dos parâmetros chave;
- c) Especificação de meios e métodos para aplicar a correção às causas primárias de falha e restaurar a estabilidade do sistema.

### **2.3 SINAIS UTILIZADOS PARA DETECÇÃO DE FALHAS**

De acordo com (CARVAJAR, 2011), os sinais e as formas de análise utilizadas para a identificação de falhas variam conforme o equipamento e a estratégia de manutenção utilizada e as formas mais utilizadas são as seguintes:

- Observação direta (ou visual) – onde o funcionamento do equipamento pode ser interrompido e é realizada uma inspeção visual, algumas vezes desmontando-se o equipamento, por exemplo, e verificando-se visualmente o estado de seus componentes. É simplesmente uma questão de observar o sistema, buscando qualquer rachadura, excesso de poeira, defeitos de soldagem, mau funcionamento de filtros, entre outros (FEDELE, 2011). Para o auxílio desta atividade podem ser utilizados instrumentos como: espelhos, comparadores, fibras óticas e circuitos fechados de televisão.
- Análise de resíduos no óleo – pequenas peças de metal desprendem-se da superfície de peças lubrificadas e acabam deixando impurezas no óleo, desta forma quando o nível dessas partículas no óleo alcança certo nível, pode vir a ocorrer uma falha. Cerca de 30% da ocorrência neste tipo de peças pode ser detectado através deste método. Ao estudar as características físico-químicas das partículas, sua concentração, distribuição dimensional e morfológica e desenhar uma correlação entre esses dados e os dados de medições anteriores, é possível de se formular hipóteses confiáveis sobre o estado de saúde da máquina (FEDELE, 2011).

- Análise da temperatura – através da medição e análise da temperatura é possível, por exemplo, detectar quando há falta de lubrificação ou problema no sistema de refrigeração, porém é difícil isolar o problema devido ao tipo de medida.

- Análise da corrente do sistema elétrico de acionamento – em motores elétricos pode-se relacionar a corrente de entrada com o torque produzido, podendo-se detectar falhas pela variação de corrente causada pela variação do torque.

- Emissão acústica – esta estratégia se baseia na análise do ruído gerado pelo equipamento, utilizando-se um microfone para captar estas ondas acústicas. A grande desvantagem deste método é que um ambiente industrial produz muito ruído dificultando a análise.

- Análise de vibração – a vibração é entendida como o movimento de oscilação do equipamento ou peça em torno da posição de repouso (FEDELE, 2011), em geral os sinais de vibração consistem em um somatório de sinais periódicos de diferentes frequências, não sendo possível a distinção clara entre elas no domínio do tempo, o que é possível no domínio frequência. O sinal de vibração das máquinas muda quando ocorre uma falha, assim, analisando-se a vibração pode-se detectar quando ocorre uma falha.

No decorrer deste trabalho será explicado em maior detalhe como a vibração pode ser utilizada para detectar falhas em equipamentos, em especial os principais efeitos encontrados em caixas de engrenagens.

- Identificação de sistemas – pode-se detectar falhas em um sistema pela comparação entre os valores esperados do comportamento do modelo, obtidos com o comportamento teórico aproximado do sistema, e os valores medidos durante o funcionamento real do sistema, assim as diferenças apresentadas nestes dois comportamentos podem indicar falhas.



E ainda, de acordo com (FEDELE, 2011) pode-se monitorar o desempenho do sistema. Parâmetros que são indicativos de uma certa deterioração no desempenho dão normalmente monitorados, tais como pressão de um fluido, fluxo, temperatura, velocidade de rotação, eficiência de troca térmica e etc. Assim, pode-se verificar o desempenho da máquina na aplicação de uma carga padrão, por exemplo, e comparar a resposta da máquina com as especificações padrões, possibilitando a identificação de possíveis falhas prevendo o início de um colapso em tempo hábil.

## **2.4 DETECÇÃO DE FALHAS PELA ANÁLISE DA VIBRAÇÃO**

As técnicas de análise de assinatura da vibração para a identificação de falhas em máquinas são as mais populares (JAYASWAL, WADHWANI, MULCHANDANI, 2008). A monitoração da vibração é baseada no princípio de que todos os sistemas produzem vibração. Quando uma máquina está operando normalmente, a vibração tende a ser pequena e constante, porém, quando uma falha se desenvolve e o comportamento dinâmico na máquina muda, surgem mudanças no espectro de vibração observado.

As principais causas de vibração mecânica são desbalanceamento, desalinhamento, folgas e distorção, rolamentos com defeito, imprecisão no acoplamento de engrenagens, várias formas de ressonância, desalinhamento entre rotor e estator, flexão do eixo do rotor, entre outros (JAYASWAL, WADHWANI, MULCHANDANI, 2008).

### **2.4.1 Fontes de Vibração em Caixas de Engrenagens**

As principais fontes de vibração dentro de uma caixa de engrenagens são os elementos rotativos, que são as engrenagens, os eixos e os rolamentos (FORRESTER, 2006).

A seguir são apresentados alguns processos envolvidos na geração da vibração desses elementos.

a) Engrenagens

Em um sistema de transmissão por engrenagens a principal fonte de vibração é geralmente a interação entre as engrenagens. Os tipos de vibração encontrados em engrenagens podem ser divididos em: sinal periódico da taxa de interação entre os dentes devido aos desvios a partir de um perfil de dentes ideal; efeitos de modulação de amplitude devidos à carga no dente; efeitos de modulação de frequência devido a flutuações na velocidade de rotação e/ou a não uniformidade no espaçamento dos dentes; e impulsos aditivos que são geralmente associados a falhas locais nos dentes.

I. Desvios no Perfil de Dentes

- Efeito de carga: Os dentes se deformam devido à carga causando componente adicional de forma “quadrada” na frequência de batimento dos dentes. Assim, temos componentes harmônicos em todo o espectro de frequência e a amplitude deste sinal é regulada pela carga colocada no eixo da caixa de engrenagens.

- Defeitos de fabricação: Este tipo de sinal acontece na frequência de interação entre as engrenagens e seus harmônicos, tendo amplitude variável para cada dente e, portanto, se repetindo cada vez que os mesmos dentes de cada engrenagem interatuam.

- Componente fantasma: O dispositivo de corte em que cada engrenagem é fabricada pode adicionar uma componente no sinal de vibração em cada ciclo de rotação. Esta componente produz uma vibração relacionada com a frequência de interação de dentes com uma engrenagem imaginária com frequência e seus harmônicos devido ao número de dentes da mesa rotacional onde a engrenagem foi fabricada.

- Desgaste uniforme: Desgaste sistemático é causado pelo deslizamento entre os dentes que estão presentes em ambos os lados do ‘círculo de passo’ mas não do círculo de passo em si. Assim, o desgaste não será uniforme sobre o perfil do dente e causa a distorção do perfil do dente. O desgaste que é uniforme para todos os dentes causa uma distorção da frequência de interação dos dentes que produz vibrações na frequência de interação e seus harmônicos.

- Batida de dentes: Cada vez que um dente toca um dente de outra engrenagem, é gerado um pequeno impulso, entretanto no caso da falta de um dente, o impacto nesta frequência é a maior componente do sinal, e também no caso de possíveis jogos e folgas, o mesmo terá um efeito não linear.

- Excentricidade da carga/engrenagem: Ocorre quando o centro de massa de algum dos elementos não está localizado no eixo de rotação, aparecendo assim, um pulso curto no sinal devido à interação dos dentes na frequência de rotação do eixo.

## II. Efeitos de Modulação de Amplitude

Efeitos de modulação de amplitude são causados por variações na carga no dente, se há oscilação na carga a amplitude da vibração varia de acordo com esta oscilação. Uma série de falhas pode dar origem à modulação de amplitude na vibração. Estas podem ser classificadas pela distribuição da falha no domínio do tempo. A excentricidade de uma engrenagem pode gerar uma modulação contínua, pela frequência de rotação correspondente a velocidade de rotação da engrenagem.

## III. Efeitos de Modulação de Frequência

Variações na velocidade de rotação das engrenagens ou variações no espaçamento entre os dentes podem gerar uma modulação de frequência no sinal de vibração. As mesmas oscilações na pressão do contato entre os dentes que dão origem a modulação de amplitude deve ao mesmo tempo, aplicar uma oscilação no torque das engrenagens, resultando em oscilações na velocidade angular com a mesma frequência.

#### IV. Impulsos Aditivos

A maioria das falhas locais, associadas com a interação entre os dentes causará um impulso aditivo em adição aos efeitos de modulação de amplitude e frequência mencionados acima. Considerando que os efeitos de modulação provocam alterações no sinal que são simétricas em zero no domínio do tempo, os impulsos aditivos causam uma mudança na posição média local do sinal, isto é, a parte afetada pelo impulso aditivo não é mais simétrica em relação à linha zero. Por causa da larga propagação de frequência de um sinal com um pulso de curta duração, é muito comum para impulsos periódicos de falhas locais de dente excitarem a ressonância, dando origem a uma parte aditiva que é um pico em torno da frequência de ressonância.

##### b) Eixos

Vibrações relacionadas com os eixos são geralmente periódicas com a rotação do eixo e aparecem como componentes na frequência do eixo de rotação e suas harmônicas.

I. Desbalanceamento: O desbalanceamento ocorre quando o “eixo de rotação” de um eixo e o centro de massa do conjunto eixo/engrenagem não coincidem. Isto gera um componente de vibração na frequência de rotação do eixo, a amplitude do qual irá variar com a velocidade do eixo. Embora a força transmitida pelo desequilíbrio de massa seja

proporcional ao quadrado da frequência angular do eixo, a amplitude da vibração será máxima quando a velocidade de rotação do eixo coincidir com os modos ressonantes do eixo (velocidades críticas).

II. Desalinhamento e eixo curvado: Desalinhamento no acoplamento entre dois eixos geralmente produz vibrações na frequência de rotação dos eixos e nos harmônicos, dependendo do tipo de acoplamento e da extensão do desalinhamento. Um eixo torto é outra forma de desalinhamento e também produz vibrações na frequência de rotação do eixo e seus harmônicos mais baixos.

III. Eixo com entranha: Uma entranha abre-se uma vez por revolução, gerando um sinal escada com frequência de giro do eixo e seus harmônicos.

#### c) Rolamentos

Tipicamente têm amplitudes menores que as vibrações devidas aos eixos ou as engrenagens. No caso de possuir uma falha, podem ocorrer alguns sinais de frequência devido às esferas e suas frequências de rotação dentro das guias dos rolamentos.

De acordo com (FORRESTER, 2006) falhas comumente encontradas em caixas de transmissão de helicópteros, seus modos, suas causas e os fatores que contribuem para elas podem ser resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Modos de falhas críticas de segurança na transmissão de helicópteros (FORRESTER, 2006).

Falha	Modo de Falha	Causa	Fator contribuinte	
Fratura no eixo	fadiga	desbalanceamento		
		desalinhamento	acoplamento falha no rolamento	
		eixo torto		
	sobrecarga	interferência	montagem incorreta falha no rolamento	
		operacional		
Fratura na engrenagem	fadiga	tempo de vida excedido		
		superfície danificada		
	ressonância	projeto		
Fratura no dente	fadiga por flexão	tempo de vida excedido		
		superfície danificada	processo relacionado	
		dente fino	desgaste excessivo marcação destrutiva	
	fratura aleatória	superfície danificada		processo relacionado corpo estranho corrosão/fragmentação
			interferência	montagem incorreta
			operacional	falha no rolamento
	Superaquecimento	lubrificação	óleo insuficiente	
perda de óleo			falha na linha de óleo falha no compartimento do filtro	
refrigeração insuficiente		falha na ventoinha		fratura no eixo/engrenagem

## 2.5 SISTEMA DE MANUTENÇÃO INTELIGENTE - ARQUITETURA OSA/CBM

Um modelo proposto de arquitetura para sistemas de manutenção baseada em condição é o modelo de camadas OSA/CBM que é um sistema de arquitetura aberta (CARVAJAR, 2011). O padrão OSA/CBM define uma arquitetura em camadas para componentes de software CBM distribuído (LI, DU, YANG, 2010). A arquitetura é composta de sete camadas que cobrem desde a aquisição de dados pelos sensores até a

camada de apresentação (YI-BO, SEN-YUE, YUN-HONG, 2007). Uma representação das 7 camadas desta arquitetura podem ser vistas na Figura 1.

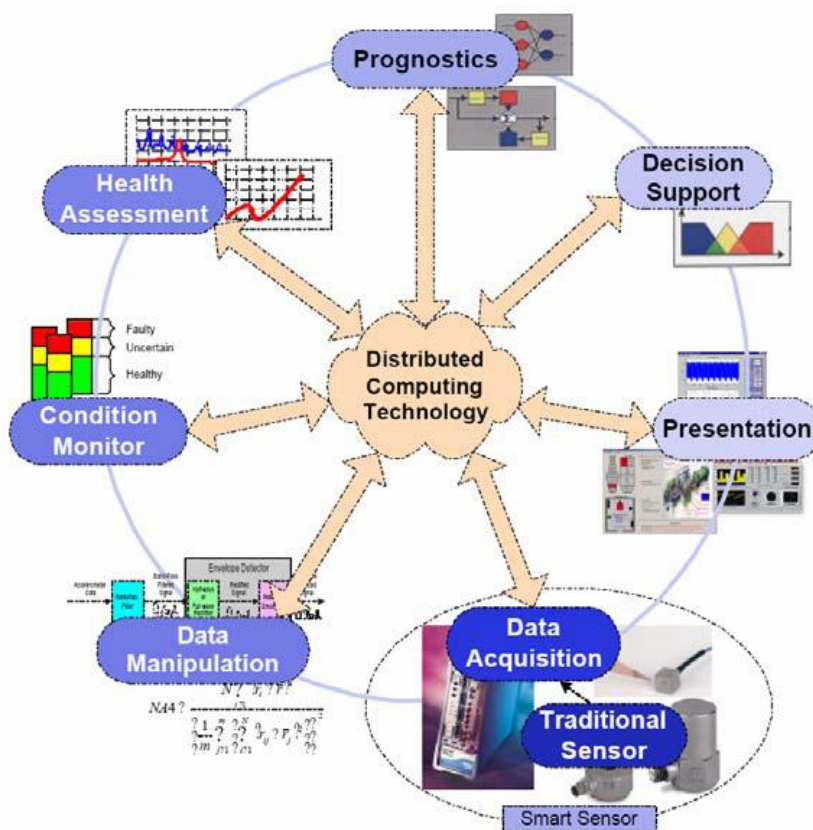


Figura 1 – Fluxo de dados de um sistema utilizando a arquitetura OSA-CBM (JOHNSON, 2006).

Cada uma das 7 camadas é descrita abaixo:

Camada 1 - Aquisição de Dados: Representa a camada física, reúne todos os sensores instrumentados no equipamento a ser monitorado.

Camada 2 - Manipulação dos dados: Realiza o processamento inicial dos sinais de entrada, aplicando algoritmos como, por exemplo, transformada de Fourier e Wavelets.

Camada 3 - Monitoração de condição: Calcula continuamente o estado atual ou indicadores de estado atual de cada sistema, subsistema ou componente, com base nos

dados já processados. Estes resultados são armazenados para utilização posterior. Pode ainda gerar alertas baseado em condições limite previamente estabelecidas.

Camada 4 - Avaliação da Saúde do Sistema: Recebe os indicadores gerados na camada anterior e realiza o diagnóstico indicando a gravidade da falha, levando em conta todo o histórico do equipamento.

Camada 5 - Prognóstico: Considera os dados vindos do módulo de diagnóstico, calendário de manutenção, e modelos que são capazes de para prever o comportamento futuro com certo erro pré-definido;

Camada 6 - Tomada de decisão: A principal função desta camada é fornecer recomendações de manutenção ou de ações de operação alternativas e as implicações de cada recomendação. Fornece um ranking das ações recomendadas de acordo com implicações das decisões.

Camada 7 - Apresentação: Esta camada é a interface com o usuário, onde são apresentados informações relativas às outras camadas.

As camadas do modelo OSA/CBM podem ser visualizadas na Figura 1, abaixo:

## **2.6 WATCHDOG AGENT™**

O Watchdog Agent™ é uma proposta para um Sistema de Manutenção Inteligente do grupo IMS Center (Center for Intelligent Maintenance Systems) que é localizado nos EUA e vinculado com as universidades Cincinnatti, Missouri-Rolla e Michigan e empresas colaboradoras como a Boeing, Toyota, Caterpillar, AMD, entre outras (BOSA, 2009).

O Watchdog Agent™ é uma ferramenta de análise de desempenho, monitoramento e prognóstico. Nele o índice de desempenho do sistema ou equipamento é obtido realizando-se a análise dos sinais oriundos de diversos sensores (JOHNSON, 2006).



Ele é composto por quatro módulos: Processamento de Sinais, Extração de Características, Avaliação de Desempenho e Fusão de Sensores e a fim de solucionar a necessidade de avaliar e prever o desempenho dos equipamentos em várias condições foi desenvolvido de forma compatível com o modelo OSA/CBM, facilitando a integração e a intercambialidade de novas ferramentas assim como a integração com outros dispositivos compatíveis com este modelo (JOHNSON, 2006).

As ferramentas disponíveis no Watchdog Agent<sup>TM</sup> estão listadas abaixo (IMS CENTER, 2007):

a) Para processamento de sinais e Extração de Característica: Transformada de Fourier, Análise Tempo-Frequência, Análise de Pacotes Wavelet e Ferramentas de Comparação de Processamento de Sinais.

b) Ferramentas de avaliação de desempenho: Regressão Logística, Reconhecimento de Padrões Estatísticos, Mapas Auto Organizáveis e Redes de Petri Temporais.

c) Ferramentas de predição de desempenho: Predição ARMA, Predição por Matriz Compatível, Rede Neural Recorrente de Elman, Predição por Lógica Fuzzy, Métodos de Grupos para Manipulação de Dados e Ferramentas de Predição por Comparação de Performance.

d) Ferramentas de diagnóstico de saúde: Modelo Oculto de Markov, Máquinas de Vetor de Suporte e Rede Bayesiana.

## 2.7 CORRELAÇÃO

Frequentemente é necessário determinar a natureza da dependência entre duas entidades, para isto pode ser utilizada a correlação, através do cálculo do coeficiente de correlação (LATHI, 1998).

Considerando um experimento aleatório, com duas variáveis de saída, x e y. Fazendo vários ensaios neste experimento e coletando as saídas x e y, é possível a partir destes dados coletados, determinar a natureza da dependência entre x e y. A covariância das variáveis x e y é uma medida que é simples de calcular e pode proporcionar informações úteis a respeito da dependência entre x e y.

A covariância entre x e y é definida como:

$$\sigma_{xy} = \overline{(x - \bar{x})(y - \bar{y})} \quad (1)$$

O conceito de covariância é uma extensão natural do conceito de variância, que é definido como:

$$\sigma_x^2 = \overline{(x - \bar{x})(x - \bar{x})} \quad (2)$$

Caso as variáveis x e y sejam dependentes e variem em harmonia, isto é, se x cresce y cresce e se x decresce y também decresce, como pode ser visto na Figura 2-a. A variável  $x - \bar{x}$  representa diferença entre o valor de x e a média dos valores de x, e  $y - \bar{y}$  representa a diferença entre o valor de y e a média dos valores de y. O gráfico de  $(x - \bar{x})x(y - \bar{y})$  pode ser visto na Figura 2-b. Neste caso, o produto  $(x - \bar{x}).(y - \bar{y})$  será positivo para a maioria dos valores, assim a covariância de x e y será positiva. Assim, diz-se que uma correlação positiva existe entre x e y.

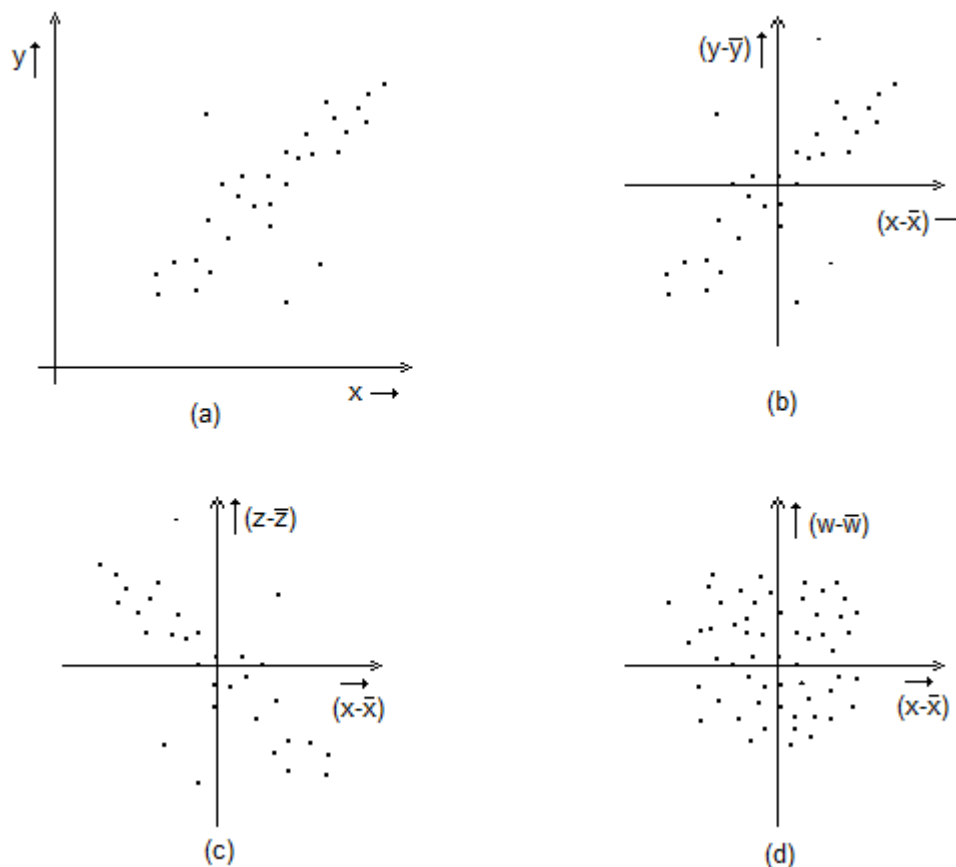


Figura 2 - (a), (b) Correlação positiva. (c) Correlação negativa. (d) Correlação zero (Adaptado de LATHI, 1998).

Se a variável  $x$  cresce e a variável  $y$  decresce, e vice e versa, como pode ser visto na Figura 2-c, onde  $y$  é representado por  $z$ . Como o produto  $(x - \bar{x})(z - \bar{z})$  será negativo para a maioria dos valores, a covariância de  $x$  e  $z$  será negativa. Então diz-se que há uma correlação negativa entre  $x$  e  $z$ .

Ainda, se não há uma relação linear entre os valores de  $x$  e  $y$ , como no caso da Figura 2-d, onde  $y$  é representado por  $w$ , se  $x - \bar{x}$  é positivo,  $w - \bar{w}$  poderá ser tanto positivo quanto negativo e o produto  $(x - \bar{x})(w - \bar{w})$  será igualmente positivo ou negativo. Assim o valor de  $\overline{(x - \bar{x})(w - \bar{w})}$  tenderá a zero. Neste caso diz-se que as variáveis  $x$  e  $w$  são descorrelacionadas.

Em resumo, se  $\sigma_{xy}$  é positivo (ou negativo) então é dito que x e y tem correlação positiva (ou negativa), e se  $\sigma_{xy} = 0$ , então as variáveis x e y são descorrelacionadas (LATHI, 1998).

A covariância pode ser expressa de outra forma:

$$\sigma_{xy} = \overline{xy} - \bar{x}\bar{y} \quad (3)$$

Segue que as variáveis x e y são descorrelacionadas ( $\sigma_{xy} = 0$ ) caso  $\overline{xy} = \bar{x}\bar{y}$ .

Para variáveis independentes  $\overline{xy} = \bar{x}\bar{y}$  e  $\sigma_{xy} = 0$ . Por isso, variáveis independentes são descorrelacionadas. Porém, variáveis descorrelacionadas não são necessariamente independentes.

O coeficiente de correlação de Pearson,  $\rho_{xy}$  é  $\sigma_{xy}$  normalizado por  $\sigma_x\sigma_y$ :

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x\sigma_y} \quad (4)$$

E seu valor varia entre -1 e 1.

### **3 TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE FALHA**

Para realizar a detecção de falhas a partir dos sinais obtidos através de sensores, é necessário utilizar algumas ferramentas de análises de sinais, tais ferramentas devem ter a capacidade de extrair as características desejadas relativas às possíveis falhas que podem se apresentar no sistema através da grandeza medida. Uma forma de minimizar erros de diagnósticos é utilizar técnicas de processamento de sinal que resultem em poucos parâmetros com alta capacidade de descrever de forma precisa o estado de um equipamento em particular (CARVAJAR, 2011), estas estratégias de análise podem ser divididas em técnicas do domínio do tempo, domínio da frequência e domínio do tempo/frequência.

#### **3.1 TÉCNICAS NO DOMÍNIO DO TEMPO**

A maior vantagem das técnicas baseadas no domínio do tempo é que se trabalha com o sinal completo, sem a perda de nenhum tipo de informação. O comportamento da distribuição de probabilidade dos sinais no domínio do tempo contém informações para realizar prognósticos de um equipamento em particular (CARVAJAR, 2011). Abaixo são citadas as principais técnicas utilizadas no domínio do tempo:

- Média sincrônica no tempo(TSA)
- Média do erro quadrático(RMS)
- Fator de pico
- Análise de Kurtosis

### **3.2 TÉCNICAS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA**

Máquinas rotativas produzem sinais de vibração periódicas, pois a posição dos elementos da máquina se repete em um período dependente da velocidade do eixo de entrada de potência, em consequência algumas informações a respeito de falhas ficam mais evidentes no domínio do tempo, as seguintes técnicas são comumente utilizadas para análises no domínio da frequência:

- Transformada de Fourier
- Série de Fourier com coeficientes variáveis
- Cepstrum

### **3.3 TÉCNICAS NO DOMÍNIO DO TEMPO/FREQUÊNCIA**

Os métodos apresentados anteriormente partem do princípio que a distribuição de probabilidade dos dados é aproximadamente estacionária ou cicloestacionária, assim não podem ser utilizadas diretamente quando o equipamento tem carga ou velocidade variável, assim como não permitem diferenciar duas falhas com sintomas similares. Com a finalidade de estudar transientes, são utilizados os seguintes métodos (CARVAJAR, 2011):

- Wavelets
- Wigner-Ville
- Decomposição empírica de modos

## 4 FUSÃO DE SENSORES

Medidas feitas usando apenas uma fonte são frequentemente incompletas devido a faixa de operação e as limitações características de cada sensor (SUN, 2002).

A fusão de múltiplas fontes de informação reduz a probabilidade de falsos alarmes enquanto aumenta a certeza na detecção. Fusão de dados no nível de sensor combina diferentes assinaturas de múltiplos sensores para diminuir o efeito de ruído aleatório e aumentar a visibilidade de assinaturas sutis de falha. Técnicas de fusão de características, por outro lado, combina múltiplos valores de características em um único indicador que maximiza a separação das classes de falha, aumentando a confiança na detecção de falhas e simplificando as métricas de limiares (LY, 2009).

Geralmente são utilizadas duas principais estruturas em sistemas de fusão de dados: fusão centralizada e fusão distribuída. Na estrutura de fusão centralizada, toda a informação original dos sensores é enviada para o mesmo centro de fusão para gerar um maior espaço de observação. Devido a toda informação ser processada no centro de fusão, há uma maior quantidade de dados sendo transmitidos nesta estrutura, o que requer uma maior velocidade de processamento. Na estrutura de fusão distribuída, cada sensor fornece sua própria decisão em vez da informação bruta, assim a transmissão de dados é reduzida (SUN, 2002).

Segundo (DEMPSEY, HANDSCHUH, AFJEH, 2003) fusão de dados de múltiplos sensores é um processo similar aos métodos usados por humanos para integrar dados de múltiplas fontes e tomar decisões. Neste processo, dados de múltiplos sensores são combinados para proporcionar inferências que não são possíveis com um único sensor. Dados de sensores podem se fundidos no nível de dados brutos (medida direta do sensor), no nível de característica (informação extraída do sinal do sensor utilizando alguma técnica de processamento) e adicionalmente no nível de decisão. Utilizando a fusão no nível de

decisão não se limita o processo de fusão a uma característica específica, assim podem ser adicionadas novas características ao sistema ou diferentes características podem ser utilizadas sem modificar toda a análise. Isto permite uma maior flexibilidade quando aplicado este processo a sistemas baseados em condição, uma vez que em muitos casos diferentes sensores e métodos pós-processamento são utilizados.

Existem diversos algoritmos que podem ser utilizadas para realizar a fusão de sensores e de acordo com (LUO, YIH, SU, 2002) podem ser classificados como apresentado abaixo:

- a) Métodos de Estimativa
  - I. Não-recursivos
    - Média ponderada
    - Mínimos quadrados
  - II. Recursivos
    - Filtro de Kalman
    - Filtro de Kalman extendido
  
- b) Métodos de Classificação
  - Modelos paramétricos
  - Análise de clusters
  - Aprendizagem de quantização vetorial (LVQ)
  - K-means clustering
  - Mapas de características de Kohonen
  - ART, ARTMAP, Rede Fuzzy-ART
  
- c) Métodos de inferência



- Inferência Bayesiana
  - Método de Dempster-Shafer
  - Processamento de evidência generalizado
- d) Métodos de inteligência artificial
- Expert System
  - Rede neural adaptativa
  - Lógica Fuzzy

#### **4.1 ARQUITETURAS DE FUSÃO DE SENSORES**

O processo de fusão de múltiplos sensores envolve integração de sensores, processamento de dados, estimativa, e um nível ainda maior de tomada de processamento e tomada de decisão. Isto exige um arranjo definido de sensores e sistemas de aquisição de dados de sensores e processamentos de aspectos de sinais, que são, por sua vez, ditados pela arquitetura de fusão (RAOL, 2010). Existem três tipos principais de arquitetura, que são apresentados abaixo e podem ser visualizados na Figura 3.

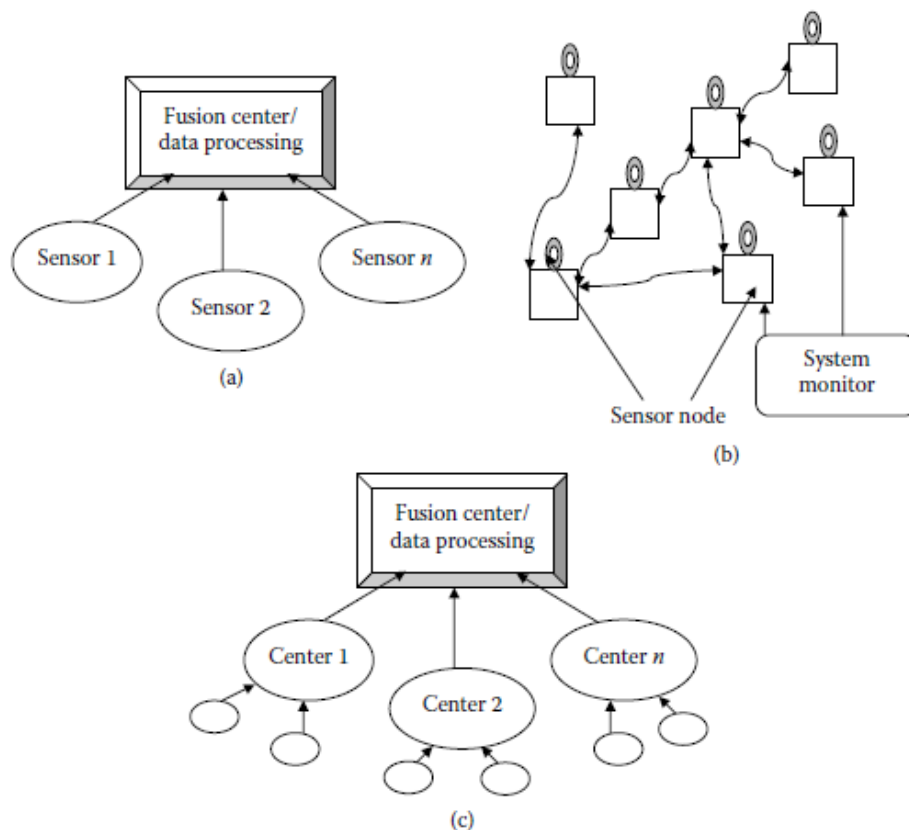


Figura 3 – Três arquiteturas de fusão: (a) processamento centralizado no centro de fusão, (b) processamento descentralizado em cada unidade de processamento e (c) processamento hierárquico (RAOL, 2010).

#### 4.1.1 Fusão Centralizada

A arquitetura de fusão centralizada, como mostra a Figura 3-a, usada principalmente para sensores similares, envolve sincronização do tempo e correção de polarização (bias) dos dados do sensor, transformação dos dados do sensor das unidades e coordenadas do sensor em coordenadas e unidades convenientes para o processamento central, por exemplo, polar para coordenadas ECEF (earth-centered, earth-fixed), aquisição e associação de múltiplos alvos em sistemas de detecção de alvos móveis, por exemplo, e fusão de medidas. As decisões são baseadas na máxima informação possível de adquirir do sistema de sensores, também chamado de fusão de medidas. Assim, fusão centralizada é um problema convencional de estimativa, com dados distribuídos.

### **4.1.2 Fusão Distribuída**

A fusão distribuída (Figura 3-b) é utilizada principalmente para sensores de tipos diferentes, por exemplo, infravermelho e radar, no entanto, pode ser utilizado para tipos de sensores similares. Nesta arquitetura, os dados de observação de cada sensor são processados por um filtro de Kalman, filtro de Kalman estendido, ou filtro de raiz quadrada individual em cada nó. A faixa local, consistindo no vetor de estimativa de estado e matriz de covariância de cada filtro, é usada com entrada no vetor de estado do processo de fusão e a saída é o vetor de estados fundidos e suas matrizes de covariâncias. A informação é processada localmente em cada nó, não havendo central de fusão. Esta arquitetura é útil para grandes estruturas flexíveis e inteligentes, monitoramento da saúde de aviões e espaçonaves, grandes plantas automatizadas, grandes redes de sensores e indústrias químicas. Esta arquitetura também é conhecida como fusão de estimativas.

### **4.1.3 Fusão Híbrida**

Fusão híbrida como mostrado na Figura 3-c, envolve tanto fusão centralizada quanto distribuída, baseado na disposição da configuração de sensores requerida. Durante as operações normais, a fusão distribuída é usada para reduzir a carga de trabalho computacional e exige comunicação, no entanto, em circunstâncias específicas, quando mais precisão é desejável ou o ambiente de monitoramento é denso, fusão centralizada pode ser usada. Alternativamente, baseado no sensor disponível, uma combinação de ambos os esquemas pode ser usada para obter o estado fundido de um particular alvo de interesse.

## 5 INSTRUMENTOS UTILIZADOS PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

O funcionamento de transdutores para medição de vibração podem ser baseados em propriedades eletromagnéticas, eletrodinâmicas, capacitivas ou piezo elétricas. Quase todos estes tipos transdutores são constituídos de uma sonda que transforma o sinal mecânico em um sinal elétrico (FEDELE, 2011). Neste trabalho para a medição da vibração serão utilizados acelerômetros, sendo estes do tipo piezoelétrico, portanto apenas este tipo de sensor será apresentado.

### 5.1 ACELERÔMETROS

Os acelerômetros são dispositivos que quantificam a intensidade da aceleração aplicada ao longo de um eixo sensível e podem ser usados para medir a taxa e a intensidade dos movimentos do corpo. Existem diversos tipos de acelerômetros usados para medir a aceleração: cristais piezoelétricos, capacitores diferenciais, sensores piezoresistivos, servos-acelerômetros, acelerômetros ressonantes a gás, entre outros (BALBINOT, BRUSAMARELLO, 2007). Apesar dessa diversidade, a maioria desses dispositivos opera sob o mesmo princípio básico de um sistema massa mola simplificados, que pode ser visto na Figura 4.

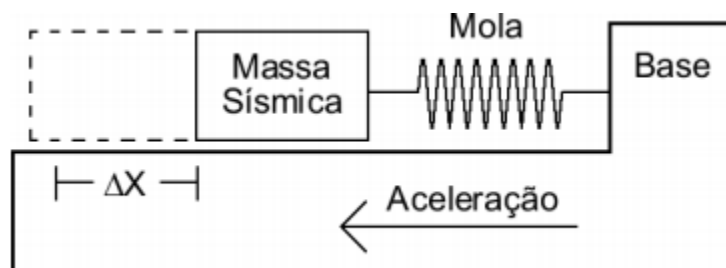


Figura 4 – Princípio básico de funcionamento de um acelerômetro (BALBINOT, BRUSAMARELLO, 2007).

O princípio de funcionamento deste sistema é baseado no deslocamento de uma massa inercial, chamada de massa sísmica, localizada no interior do acelerômetro. À medida que essa massa se desloca ela pressiona um conjunto de molas que são comprimidas ou estendidas. Esse deslocamento é medido (o procedimento de determinar este deslocamento depende da tecnologia do acelerômetro) e a partir dele pode ser calculada a aceleração.

Simplificadamente o funcionamento deste sistema massa mola pode ser entendido pela aplicação da Segunda Lei de Newton e da Lei de Hooke. A segunda lei de Newton estabelece que se uma massa ( $m$ ) está sofrendo uma aceleração ( $a$ ) é porque existe uma força ( $F$ ) atuando sobre ela:

$$F = m \cdot a \quad (5)$$

Pela Lei de Hooke, uma mola cuja constante de compressão é  $k$ , para ser comprimida ou expandida por uma distância  $x$ , deve estar sujeita a uma força  $F$ :

$$F = k \cdot x \quad (6)$$

Assim, pela aplicação das Equações (5) e (6), pode-se chegar à expressão da aceleração  $a$  a que o sistema está sujeito desde que se conheçam as constantes  $k$  e  $m$ , além do deslocamento realizado pela massa sísmica ( $\Delta x$ ).

$$a = \frac{k}{m} \Delta x \quad (7)$$

### 5.1.1 Acelerômetros Piezoelétricos

Acelerômetros piezoelétricos têm sido largamente utilizados para medição de vibração, os quais devem ser projetados para evitar o fenômeno de ressonância para uma ampla faixa de frequências (FEDELE, 2011).

Acelerômetros piezoelétricos convertem aceleração em carga elétrica. A carga derivada do acelerômetro é proporcional à força que atua no elemento piezoelétrico interno. Conseqüentemente a aceleração é derivada da força medida (KISTLER, 2006).

Um dispositivo baseado em um piezoelétrico, de forma geral respeita o modelo da Figura 5, que pode ser representado pela seguinte equação diferencial:

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + sx \quad (8)$$

Onde F representa a força aplicada no sensor piezoelétrico, m a massa do cristal, x a deformação produzida, r o coeficiente de viscosidade e s o coeficiente elástico.

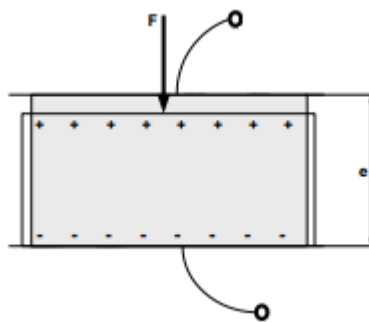


Figura 5 - Modelo de um cristal piezoelétrico (BALBINOT, BRUSAMARELLO, 2007).

### 5.1.2 Acelerômetros Utilizados

Neste trabalho são utilizados três acelerômetros piezoelétricos, do tipo 8705A50M1 da linha PiezoStar® da KISTLER, suas características são apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2 - Características do acelerômetro utilizado.

Fabricante	KISLER
Tipo	8705A50M1
Faixa de medida	±50g
Sensibilidade	101.5 mV/g
Sensibilidade transversal	0.3%
Frequência de ressonância	40 kHz
Temperatura de operação	-54 a 165°C

O acelerômetro PiezoStar® 8705A50M1 da KISTLER pode ser visto na Figura 6.



Figura 6 - Acelerômetro piezoelétrico PiezoStar® 8705A50M1 da KISTLER.

## 6 METODOLOGIA UTILIZADA

Para a realização deste trabalho foi utilizada uma bancada de testes, com um conjunto atuador/válvula. As falhas foram inseridas neste sistema através da substituição de engrenagens sem defeitos, por engrenagens desgastadas ou com defeitos, como por exemplo, dentes quebrados. Estas engrenagens com defeito modificam os sinais de vibração típicos do sistema em questão, como a modulação em amplitude do sinal de vibração do sistema e os demais efeitos descritos no Capítulo 2.4. Outra forma utilizada para inserir falhas no sistema foi através da utilização de um freio a disco instalado no sistema, este freio é acionado por uma válvula pneumática.

Os sinais de vibração, tanto de funcionamento normal, quanto de funcionamento com falhas foram adquiridos através de acelerômetros, instrumentados no sistema. O sinal de torque foi medido utilizando-se o próprio sensor interno presente no atuador.

Estas medidas foram coletadas utilizando-se o LabVIEW e módulos auxiliares para aquisição dos sinais, tanto de vibração quanto de torque.

Foram feitas medidas para abertura e fechamento de válvula onde os tempos para abertura e fechamento da válvula são aproximadamente 45 segundos para cada.

Após, foi feita a comparação entre os sinais, tanto de funcionamento normal, quanto de falha coletados, utilizando-se a correlação dos sinais no domínio do tempo no intuito de classificar e qualificar os sinais coletados para que posteriormente possam vir a ser utilizados como banco de dados de curvas de operação normal e falhas do sistema estudado. Para isso foi necessário o desenvolvimento de uma metodologia para a análise dos sinais, utilizando-se a comparação através da correlação entre estes sinais, possibilitando a identificação das assinaturas das falhas inseridas no sistema. A representação esquemática da metodologia utilizada neste trabalho pode ser vista na Figura

7.



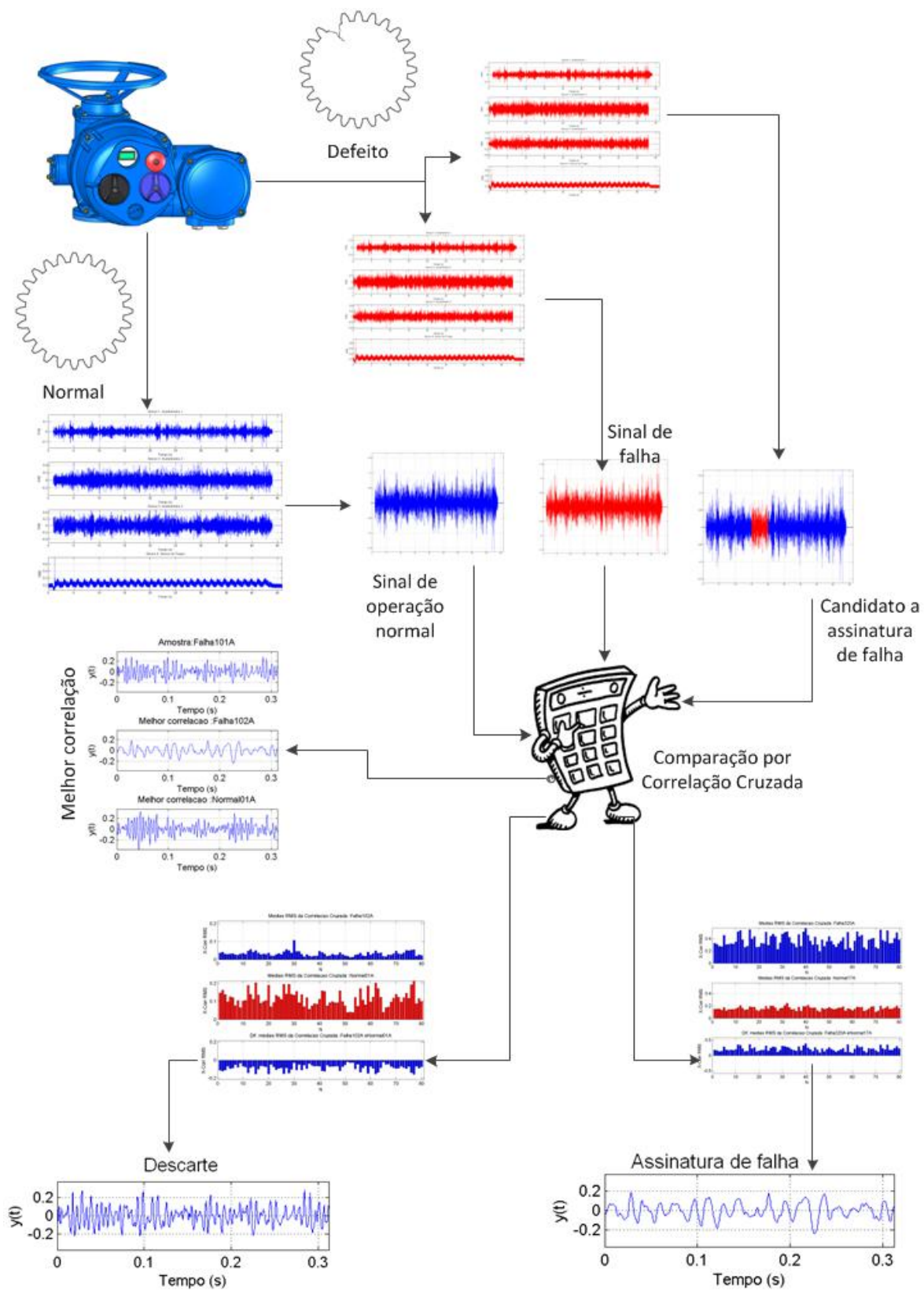


Figura 7 - Representação esquemática da metodologia utilizada no trabalho.

As análises foram realizadas com o auxílio do software MatLab. Os detalhes da metodologia utilizada, os recursos utilizados e passos seguidos, bem como algoritmos utilizados são detalhados a seguir.

## 6.1 SISTEMA EM ANÁLISE

O sistema utilizado para estudo neste trabalho é um conjunto atuador/válvula que pode ser visto na Figura 8, onde o atuador é uma atuador elétrico CSR6 da linha CSR, fabricado pela empresa Coester Automação Ltda.



Figura 8 – Foto do conjunto atuador/válvula utilizado para estudos.

Este atuador é utilizado para a automação de válvulas do tipo gaveta, globo e outros equipamentos similares. No lugar da válvula, foi acoplado no atuador um eixo, com um freio em sua parte inferior, o qual pode ser acionado com uma válvula pneumática.

### **6.1.1 Atuador CSR6**

Atuadores elétricos são equipamentos eletromecânicos que permitem motorização de válvulas, dampers, comportas e outros equipamentos similares. O atuador elétrico pode ser acoplado através de unidades de adaptação ou redutores, sua principal função é o controle do movimento da haste da válvula (COESTER AUTOMAÇÃO, 2011).

O atuador utilizado para estudo neste trabalho é o CSR6. Abaixo são apresentados alguns detalhes construtivos deste atuador.

- Acionamento Elétrico

Os componentes do acionamento elétrico são apresentados na Figura 9 e na Figura 10. O motor é responsável pelo movimento do equipamento e aciona o conjunto de engrenagens satélite, onde se processa a redução primária. A redução primária do atuador CSR6 é constante e tem relação de 1:9. O movimento é transmitido ao par sem-fim/coroa que acionam o acoplador deslizante, responsável pelo movimento da manga de saída, sendo este o mecanismo de redução secundária.

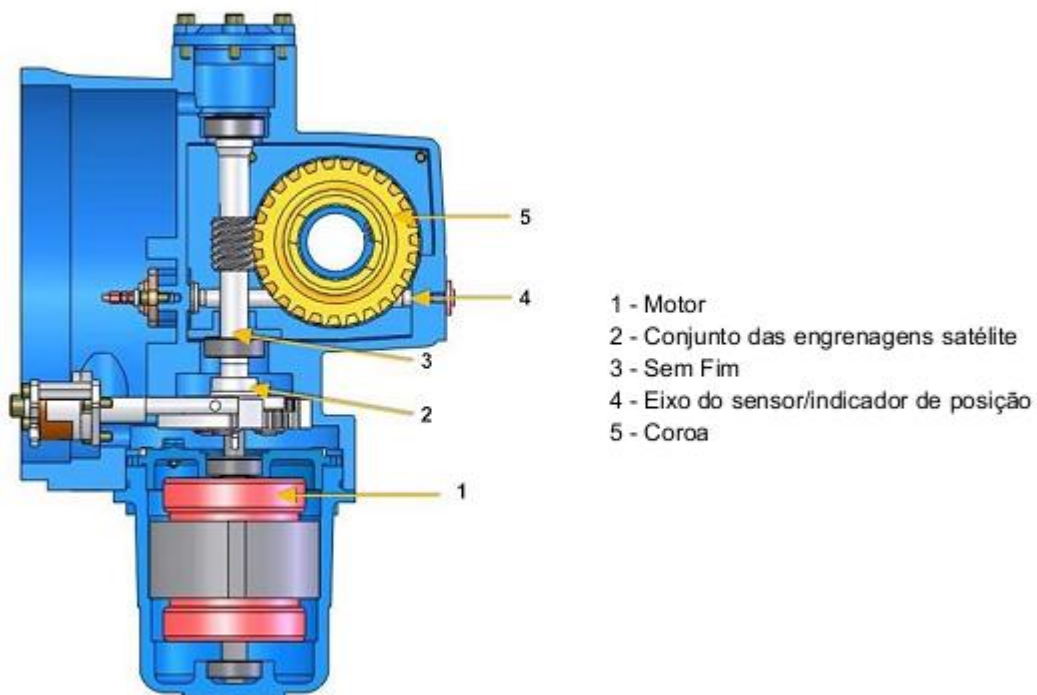


Figura 9 – Respresentação interna do atuador – parte 1 (COESTER AUTOMAÇÃO, 2009).

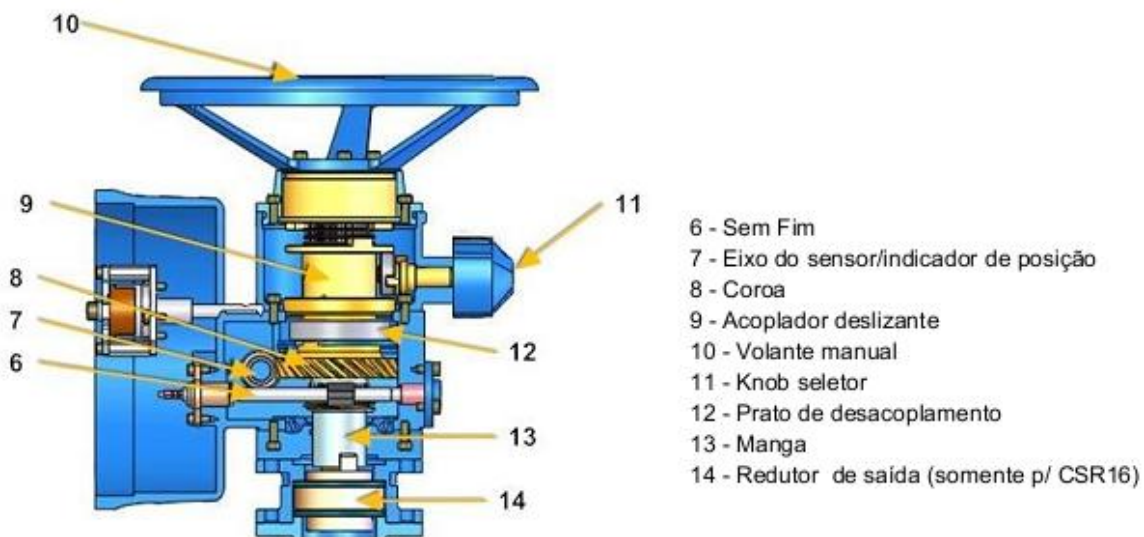


Figura 10 - Respresentação interna do atuador – parte 2 (COESTER AUTOMAÇÃO, 2009).

- Acionamento Manual

A Figura 10 apresenta os componentes do acionamento manual. O volante manual é responsável pelo movimento do equipamento e aciona o acoplador deslizante quando o *knob* seletor estiver na posição comando manual.

Se o comando elétrico é acionado, o comando manual é automaticamente desativado através do prato de desacoplamento.

- Sensor de Torque

O movimento da manga de saída, ligado a válvula acionada, percebe maior ou menor resistência a seu movimento, transferindo uma carga correspondente para o mecanismo, ao qual está associado o eixo de comando do sensor de torque (Figura 11), que trabalha sempre sob compressão, deformando os “strain gages” ligados a ele, informando para a placa controladora o valor da deformação, que é processado como valor correspondente do contra-torque do sistema.

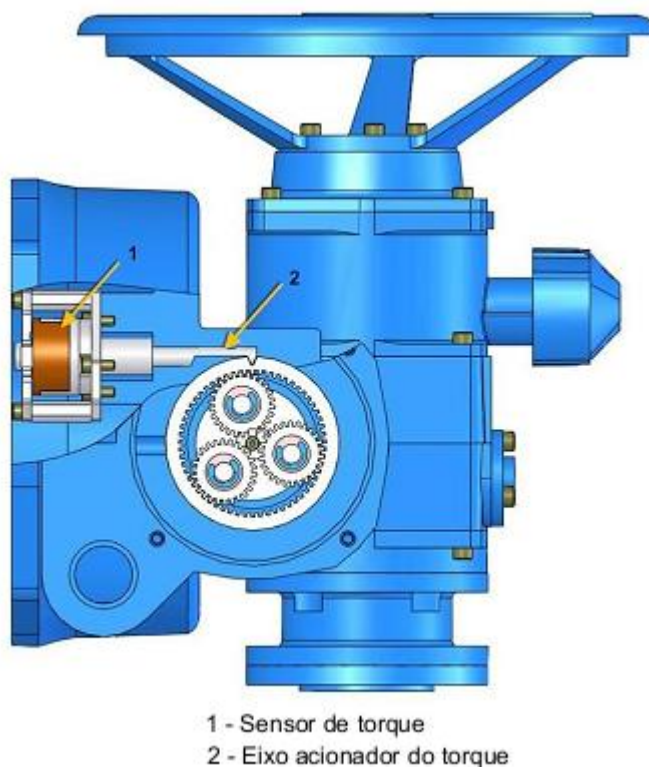


Figura 11 - Representação interna do atuador – parte 3 (COESTER AUTOMAÇÃO, 2009).

### 6.1.2 Posicionamento dos sensores

De modo a fazer a aquisição dos sinais de vibração do sistema estudado, foram instrumentados 3 acelerômetros piezoelétricos ao conjunto sensor/”válvula”, sendo que dois acelerômetros foram instalados no controlador e um acelerômetro foi instalado no freio do sistema.

O primeiro acelerômetro (Figura 12) foi instalado o mais próximo possível entre o acoplamento do eixo do motor e as engrenagens satélite, com a finalidade de medir as vibrações o mais próximo possível à região onde foram inseridas as engrenagens com defeito.

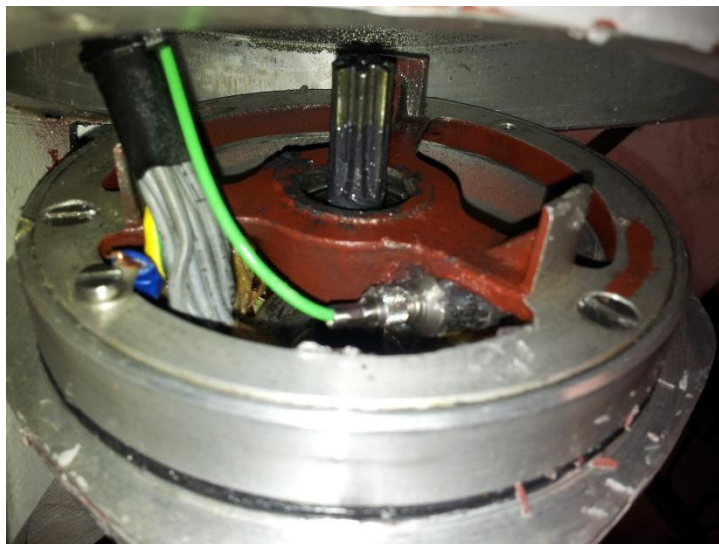


Figura 12 – Instalação do acelerômetro próximo ao acoplamento do eixo do motor e as engrenagens satélite.

O segundo acelerômetro (Figura 13) foi colocado, próximo à extremidade do sem fim, de modo a medir as vibrações transmitidas através dele.



Figura 13 - Instalação do acelerômetro próximo à extremidade do sem fim.

Na Figura 14, o posicionamento do acelerômetro 1 (denominado S3) e o acelerômetro 2 (denominado S2) pode ser visualizado em relação a estrutura do atuador.

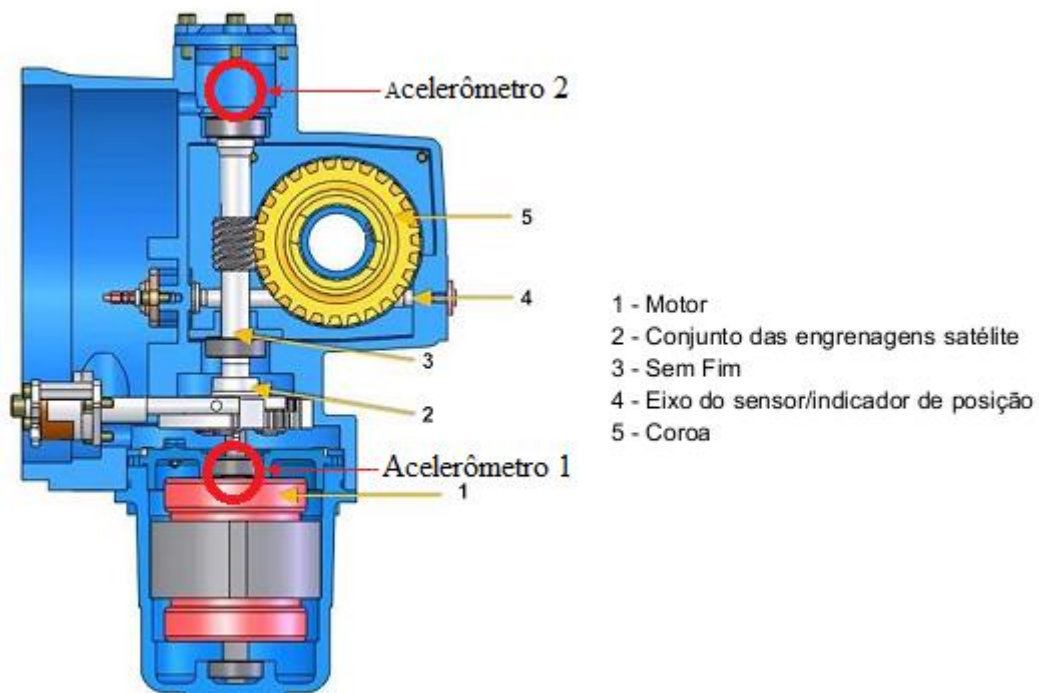


Figura 14 – Disposição dos acelerômetros em relação a estrutura do atuador ( Adaptado de COESTER AUTOMAÇÃO, 2009).

O acelerômetro 3 (denominado S1) foi instalado no freio do sistema de forma a medir as vibrações transmitidas até a parte inferior do eixo ou inseridas no sistema através da frenagem. Na Figura 15 pode ser visto o acelerômetro 3 instalado no freio do sistema.

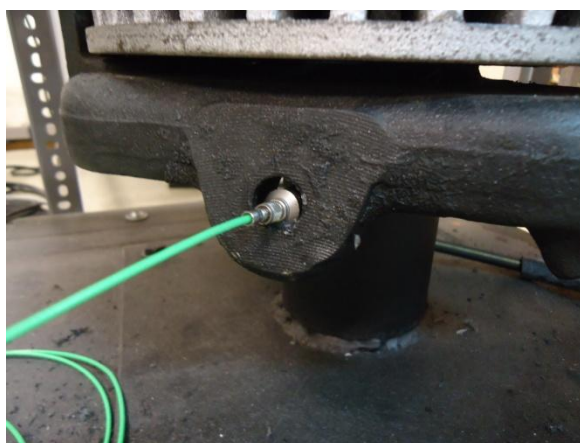


Figura 15 – Acelerômetro instalado no freio do sistema.



## 6.2 INJEÇÃO DE FALHAS

As falhas foram inseridas no sistema através da substituição das engrenagens do conjunto de engrenagens satélite, por engrenagens desgastadas ou quebradas. Na Figura 16 pode ser vista em destaque a localização das engrenagens satélite.

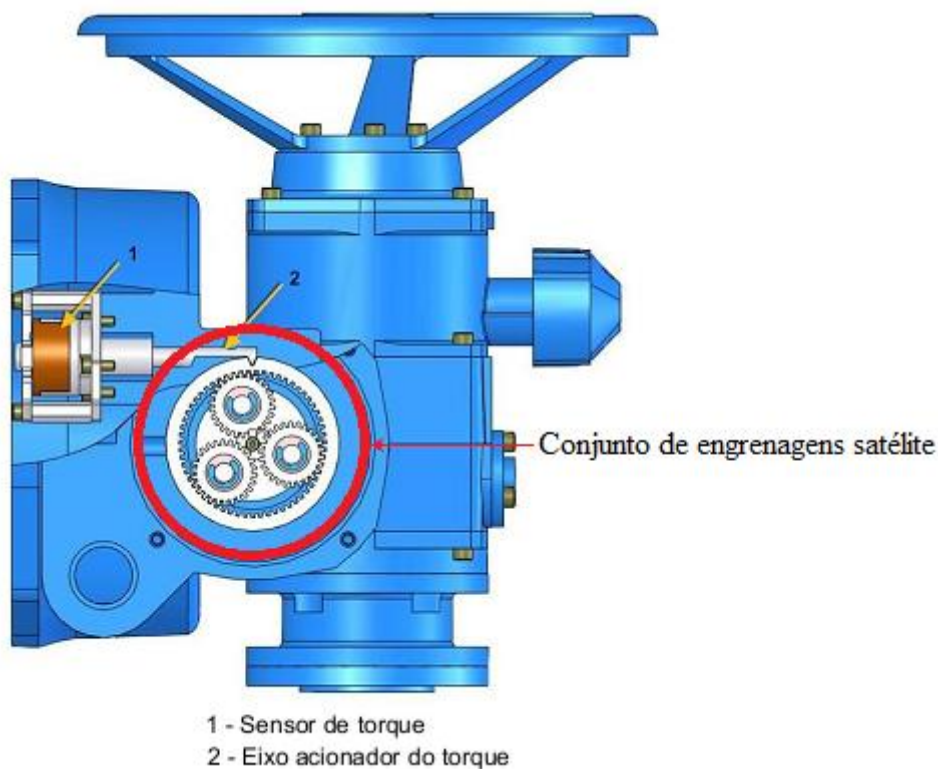


Figura 16 – Destaque das engrenagens satélite (Adaptado de COESTER AUTOMAÇÃO, 2009).

Na Figura 17 podem ser vistas engrenagens do conjunto de engrenagens satélite com muito pouco desgaste.



Figura 17 – Engrenagens satélite com pouco desgaste aparente.

De forma a injetar defeitos perceptíveis no sistema foi utilizada uma engrenagem com três dentes quebrados (Figura 18) e três engrenagens com grande desgaste do perfil dos dentes (Figura 19).



Figura 18 – Engrenagem com 3 dentes quebrados.



Figura 19 – Engrenagem com os dentes severamente desgastados.

Além da injeção de falhas através da substituição das engrenagens em estado normal, por engrenagens quebradas e desgastadas, foi utilizado um freio instalado no sistema, para simular o travamento do eixo, fazendo com que o torque necessário para movimentar o sistema seja elevado. Para a injeção de falhas o freio foi acionado através de uma válvula controlada, liberando a pressão responsável pela atuação do freio. Foram utilizadas pressões de 1 e 3 bar para atuar o freio.

### **6.3 MEDIDAS REALIZADAS**

As medidas foram realizadas com o auxílio do software LabVIEW e módulos de aquisição de dados. Para a medição do torque foi utilizado o módulo NI6008 da National Instruments, que possui 8 entradas analógicas, com conversor analógico para digital de 12 bits e capacidade de aquisição de 10kS/s. Para a aquisição dos sinais dos acelerômetros foi utilizado o módulo NI9233, que possui 4 entradas analógicas de 24 bits, condicionamento de sinal para acelerômetros e microfones e tem capacidade de aquisição de 50kS/s. O

módulo NI9233 foi utilizado em conjunto com o módulo NIcRIO-9004 para aquisição dos dados pelo LabVIEW.

Para a realização da aquisição das medidas foi utilizada uma taxa de aquisição de 2048 S/s, pois não se sabia até então as frequências de oscilação produzidas ao se injetarem os defeitos no sistema. De acordo com o catálogo do fabricante do atuador elétrico CSR6 (COESTER AUTOMAÇÃO, 2011), as condições ambientais de vibração para operação do sistema são de 0,5g, de 10 a 200Hz. Considerando-se que a frequência máxima de vibração em operação normal do sistema é de 200Hz, e que na presença de falhas, como por exemplo engrenagens quebradas, apareçam frequências de vibração maiores do que em operação normal. E também considerando o teorema de amostragem de Nyquist, em que a frequência de amostragem deve ser pelo menos o dobro da maior frequência medida, para que se possa reconstruir o sinal posteriormente, a taxa de aquisição foi estimada em 2048 S/s para medição de frequências de oscilação de até 1kHz.

Foram feitas 25 medidas dos ciclos de abertura e fechamento do sistema em operação normal e a vazio, ou seja, sem o acionamento do freio. As medidas foram salvas em tabelas, sendo que as informações de cada um dos 4 sensores foram salvas em colunas diferentes.

Os ensaios de operação normal foram classificados como “Normal” e divididos entre ensaios de abertura e fechamento, utilizando-se os sufixos “A” e “F”, respectivamente. Desta forma os arquivos contendo as medidas foram nomeados com o prefixo “Normal”, a sequência numérica de 01 a 25 e o sufixo indicando abertura ou fechamento. Por exemplo, as medidas do quinto ensaio de fechamento em operação normal foram salvos com o nome “Normal05F”, as demais medidas seguiram o mesmo padrão de identificação, porém classificadas como “Falha1” até “Falha5”.

Também foram feitas 25 medidas de ciclos de abertura e fechamento da válvula com carga, com o freio acionado com uma pressão de 1 bar (Falha1), e outras 25 medidas de abertura e fechamento com o freio acionado com uma pressão de 3 bar (Falha2).

Para as injeções de falhas pela substituição das engrenagens, foram feitas 25 medidas de abertura e fechamento utilizando 2 engrenagens do conjunto de engrenagens satélite em bom estado e uma com desgaste (Falha3), que pode ser vista na Figura 19. Para a quarta simulação de falha (Falha4) foram utilizadas 3 engrenagens semelhantes as da Figura 19. E para a última falha injetada no sistema (Falha5), foram utilizadas duas engrenagens em bom estado e uma engrenagem com 3 dentes quebrado, como pode ser visto na Figura 18.

Cada ciclo de abertura ou fechamento levou aproximadamente 45s para ser realizado, no total foram feitos 150 ciclos de abertura e fechamento.

Na Figura 20 pode ser visto o gráfico das medidas dos 4 sensores para o ensaio Normal10A.

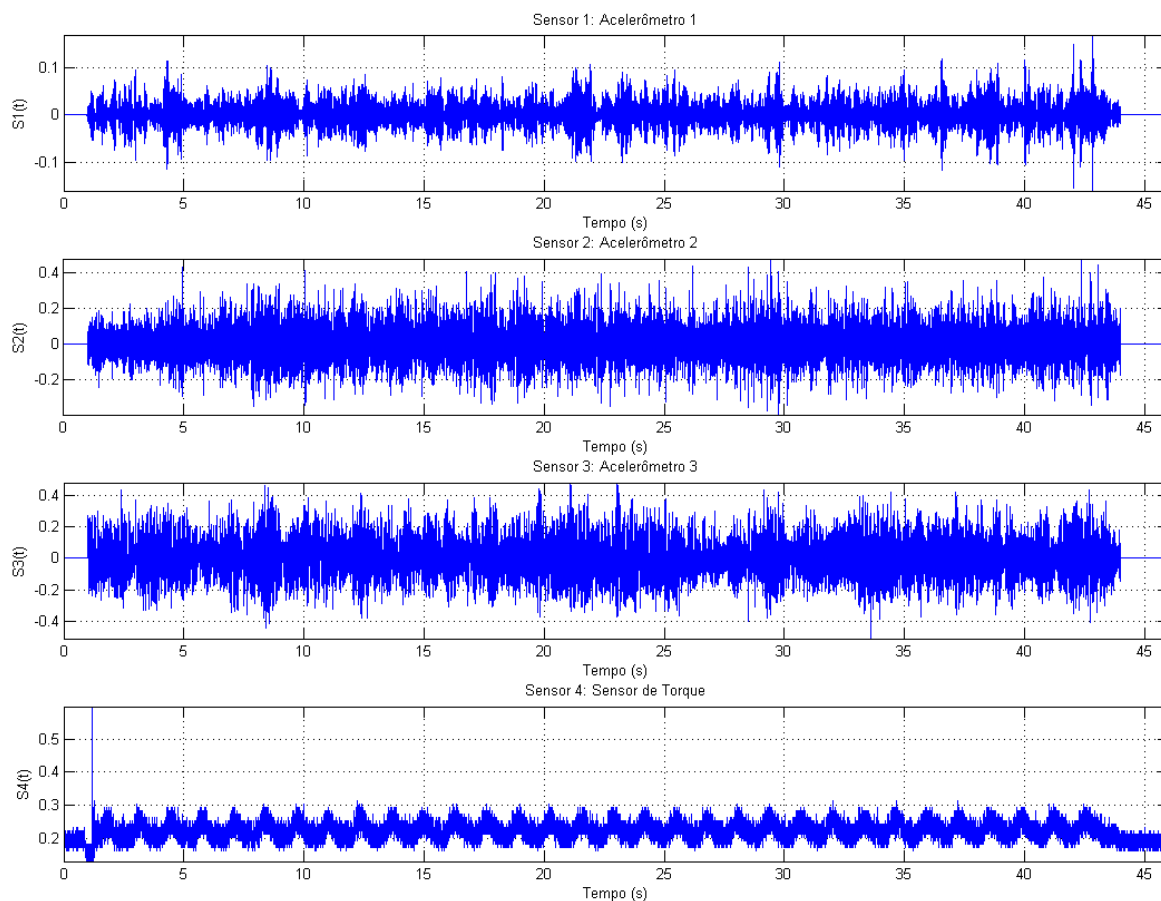


Figura 20 - Gráficos dos valores dos 4 sensores obtidos no ensaio Normal10A.

Observando-se o quarto gráfico da Figura 20, que é o gráfico referente aos valores de torque medidos, percebe-se que há uma grande quantidade de ruído inserido na medição, isto se deve principalmente a forma que as medidas foram feitas, que foi através da medição da tensão fornecida pelo sensor de torque do atuador, ao contrário do módulo utilizado para medir os sinais dos sensores de vibração, o que foi utilizado para a medição do torque não dispunha de um condicionamento interno.

## 6.4 ANÁLISES DAS MEDIDAS

Para identificar as assinaturas de falha, neste trabalho foi feita a correlação entre os sinais de falha e operação normal do sistema para cada sensor utilizado.

Calculando-se a correlação entre duas medidas quaisquer para o mesmo sensor, por exemplo, entre o ensaio “Normal01A” e o ensaio “Normal08A” o valor do coeficiente de correlação tende a zero. Isto ocorre porque os sinais não estão necessariamente sincronizados, assim como existem pequenas variações na frequência de oscilação do sistema assim tornando inviável a detecção de falhas ou assinaturas de falha no domínio tempo utilizando toda a informação contida nos sinais medidos, sem nenhum tipo de tratamento.

Como o objetivo do trabalho é identificar as assinaturas de falha presentes nas medidas realizadas ao se injetar as falhas no sistema, e estas falhas injetadas tem comportamento periódico, desconsiderando-se a partida e o final do ciclo, onde o comportamento é transitório. Então foi utilizada a parte central das medidas, com tempo de 25 segundos, para as análises, desconsiderando-se os primeiros e os últimos 10 segundos das medidas. Para as comparações foram utilizadas três medidas por vez, duas de falha do mesmo tipo e uma de comportamento normal, sendo que a primeira medida de falha é particionada, após, cada partição do primeiro sinal de falha é comparado com o segundo sinal de falha, em sua extensão total de 25 segundos e também com a medidas de operação normal.

Esta comparação é feita através de correlação cruzada, onde é feita uma varredura, do sinal particionado, ou seja, o candidato à assinatura de falha, através do sinal de falha de referência e também através do sinal de operação normal de referência. Assim são geradas duas curvas de correlação cruzada. Estas curvas podem se vistas na Figura 21, onde a Figura 21-a representa a correlação cruzada entre o sinal de falha e uma partição do sinal

de falha o qual estão sendo extraídos os candidatos à assinatura de falha, e a Figura 21-b representa a correção cruzada com o sinal de operação normal.

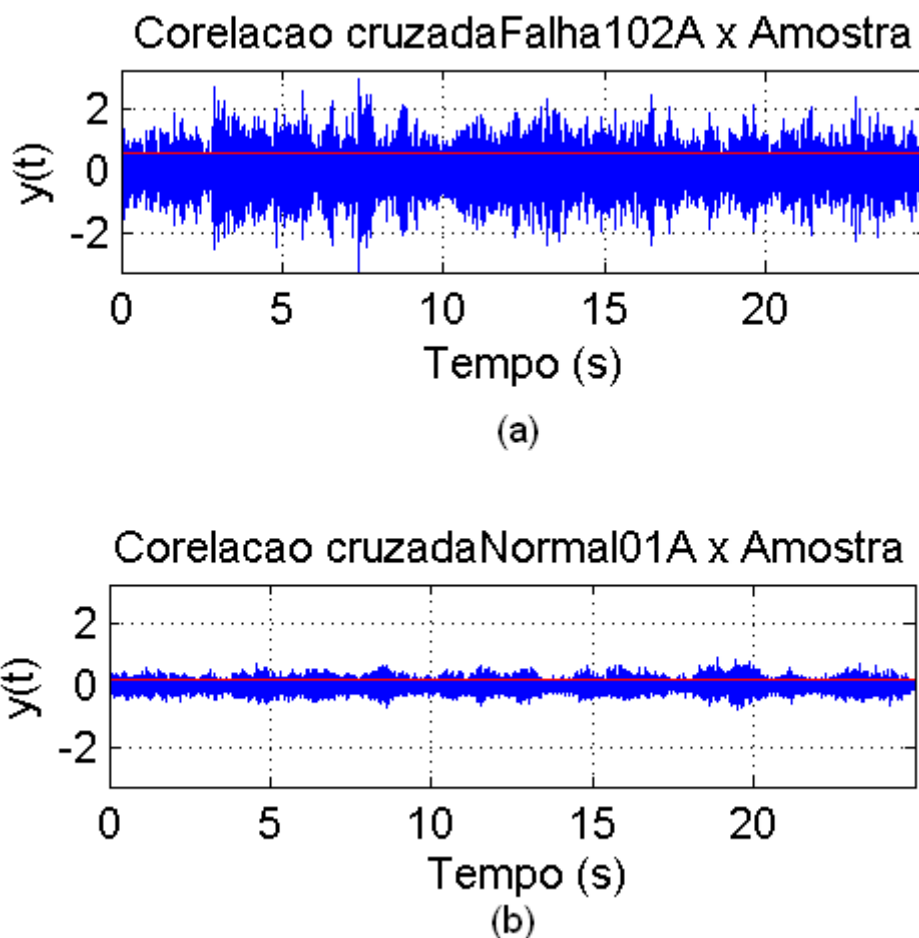


Figura 21 – (a) Correlação cruzada entre sinal de falha e sinal candidato a assinatura de falha. (b) Correlação cruzada entre sinal de operação normal e sinal candidato a assinatura de falha.

Como o objetivo é obter o sinal que carrega a assinatura de falha, ou seja, o sinal que tem maior similaridade com o sinal de falha comparado e menor similaridade com o sinal de operação normal também utilizado para a comparação, então faz-se necessário obter um valor médio da correlação cruzada dos sinais. Como os valores de correlação podem ser tanto negativos quanto positivos, a média aritmética deste sinal tende a zero.

Assim, como os sinais que apresentam maior correlação cruzada, apresentam também maiores picos de correlação, tanto negativos quanto positivos, foi utilizada a



média RMS, como métrica, para avaliar a similaridade do sinal de amostra, com o sinal de referência. É esperado que se os dois sinais de falha carregam as características da assinatura de falha, a correlação entre os dois seja maior do que a correlação entre a amostra e o sinal de operação normal.

Os valores RMS da correlação cruzada são computados para cada partição e ao final são comparados os valores RMS da correlação cruzada com os dos dois sinais de referência. Os valores RMS podem ser vistos nas figuras Figura 21-a e Figura 21-b, sendo eles as linhas vermelhas indicadas nos gráficos.

Para a realização das análises os sinais foram particionados em 80,40,20,10 e 5 partes, cada uma delas com a duração de  $25/n$  segundos, onde  $n$  é o número de partes.

Na Figura 22 podem ser vistos os valores RMS das correlações cruzadas entre o sinal que está sendo comparado com as referências de falha e operação normal. Onde na Figura 22-a estão representados os valores RMS das correlações cruzadas entre o sinal que está sendo comparado e a referência de falha, assim como na Figura 22-b estão representados os valores RMS das correlações entre os sinais de comparação e a referência de operação normal. E na Figura 22-c está representada a diferença entre os valores dos dois gráficos anteriores.

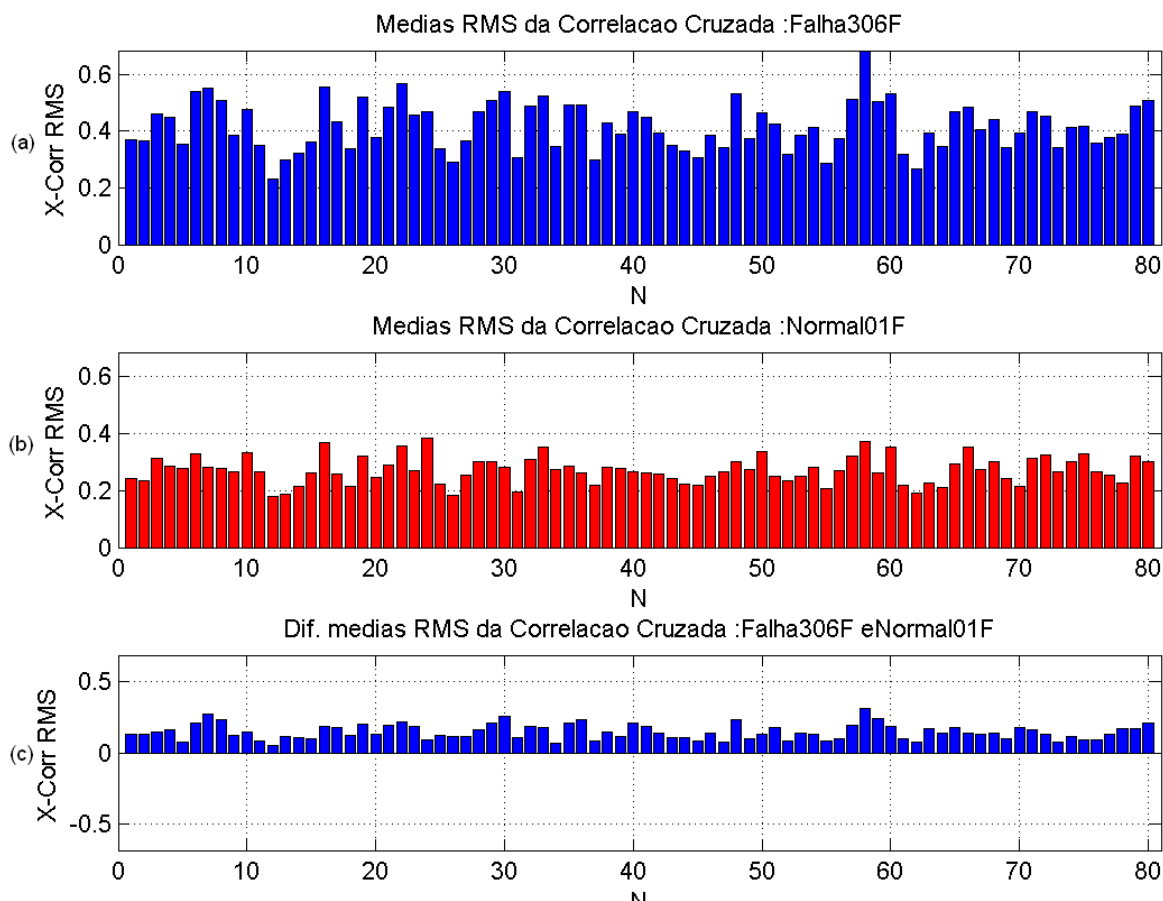


Figura 22 – Valores RMS das correlações cruzadas.

Outra métrica utilizada foi a correlação entre a o candidato a assinatura de falha e o intervalo que apresentou maior similaridade com ele, tanto do sinal de operação normal, quanto do sinal de falha comparados. Para isso é utilizado como referência o maior valor, em módulo, de correlação cruzada encontrado. Sabendo-se a posição deste valor no gráfico da correlação cruzada, pode-se encontrar o intervalo com maior similaridade em cada um dos sinais. Na Figura 23 pode-se ver um exemplo, onde uma partição do sinal do sensor S1 para o ensaio Falha104A é comparado com o sinal do sensor S1 para o ensaio Falha105A e também com o sinal do sensor S1 para o ensaio Normal04A. A Figura 23-a representa uma das partições do sinal do sensor S1 para o ensaio Falha104A, a Figura 23-b representa o intervalo com maior similaridade, ou seja, maior correlação entre o sinal de amostra e o sinal de falha comparado, e a Figura 23-c representa o sinal com maior correlação entre o

sinal de amostra e o sinal de comportamento normal comparado. Pode-se perceber que a correlação entre os sinais de falha será maior, pois as curvas são muito semelhantes, tanto em forma, quanto em amplitude. Da mesma maneira pode-se perceber que a correlação será menor entre os sinais de falha e o sinal de operação normal, pois são diferentes, tanto em forma, quanto em amplitude.

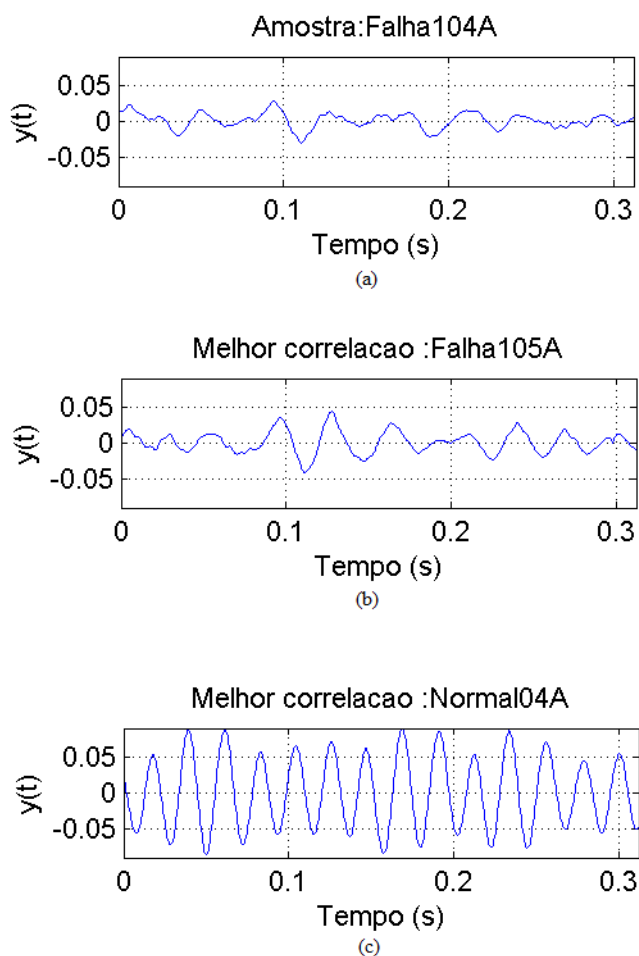


Figura 23 - (a) Sinal de amostra para comparação. (b) Intervalo do sinal de referência de falha com maior similaridade. (c) Intervalo do sinal de referência de operação normal com maior similaridade.

Assim, para cada partição do sinal analisado é feita a correlação cruzada com os sinais de referência, tanto de falha quanto de operação normal. Então são identificados os picos de correlação cruzada, e com isso, também é identificado o intervalo dos sinais de referência que tem maior similaridade com o sinal analisado. Assim é

calculada a correlação entre o sinal analisado e os intervalos encontrados nos sinais de referência, e uma comparação simples pode ser feita pela diferença dos valores de correlação, se a correlação entre os sinais de falha é maior, significa que o sinal analisado apresenta as características da falha em questão, e pode ser considerado uma assinatura de falha. Se ocorrer o contrário e o sinal analisado apresentar correlação maior com o intervalo do sinal de operação normal, significa que este sinal não apresenta as características da assinatura de falha, e sim características comuns entre os dois sinais, ou até mesmo ruído. Desta forma o sinal analisado é descartado e não é considerado como uma assinatura característica de falha.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas tabelas apresentadas a seguir, pode-se ver de um modo geral o comportamento de cada um dos 4 sensores utilizados, tanto para comportamento normal, quanto para falha, através do cálculo do valor RMS da correlação cruzada entre os sinais e também através do cálculo da correlação entre os intervalos que apresentam maior similaridade. Onde para a análise do sinal de falha, foram classificados como 1 os que tiveram a média das diferenças entre valor RMS de correlação cruzada positiva, ou seja, o valor RMS da correlação cruzada com a referência de falha é maior do que com a referência de operação normal. As médias das diferenças que resultaram em valor negativo foram classificadas com -1, e as médias das diferenças que resultaram em zero foram classificadas com zero.

Para as análises de sinais de operação normal foi utilizado o mesmo critério, porém, foram classificados como 1 os valores que apresentaram a média das diferenças entre o valor RMS da correlação cruzada e a referência de operação normal e o valor RMS da correlação cruzada com a referência de falha maior do que zero.

De forma semelhante é feita uma análise da correlação entre o sinal de amostra e os intervalos de maior correlação com este sinal, tanto da referência de falha, quanto da referência de operação normal. Assim são calculadas as diferenças dos valores de correlação, e as tabelas são preenchidas utilizando os mesmos critérios descritos acima.

Então a seguir é feita uma análise qualitativa das medidas dos sensores ao injetar-se as falhas no sistema.

## 7.1 ANÁLISE DA FALHA 1

A Tabela 3 e a

Tabela 4 apresentam de forma resumida, do ponto de vista da correlação cruzada, o comportamento dos 4 sensores na presença da Falha 1 injetada no sistema. Para o preenchimento destas tabelas foram utilizados os critérios descritos no início do Capítulo 7.

Tabela 3 – Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha e operação normal para a Falha 1.

Divisões			80				40				20				10				5			
Sensor			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Falha1	1	A	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
Falha1	2	A	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha1	3	A	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha1	4	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha1	5	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Falha1	6	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha1	7	A	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha1	8	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Falha1	9	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha1	10	A	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabela 4 – Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha (Falha 1) e de operação normal para os medidas de operação normal.

Divisões			80				40				20				10				5			
Sensor			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Normal	16	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Normal	17	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Normal	18	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Normal	19	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Normal	20	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Normal	21	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Normal	22	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Normal	23	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Normal	24	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Normal	25	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1

Observando os valores apresentados na Tabela 3 e na

Tabela 4, pode-se ver que com exceção da primeira linha da Tabela 3 que apresenta um comportamento diferente dos outros valores apresentados na mesma tabela, o comportamento da Falha 1 pode ser caracterizado pelo sensor 2, onde em todos os outros ensaios pode-se diferenciar o comportamento de falha do comportamento de operação normal. Os sensores S3 e S4 indicaram um comportamento de falha em todos os casos, mesmo que quando em operação normal. O sensor S1 apresenta para os testes com 20,10 e 5 divisões um comportamento semelhante ao sensor S2, porém uma pequena parte foi classificada como operação normal, quando deveria ter o comportamento de falha. Utilizando-se posteriormente apenas as assinaturas para a detecção de falhas, onde as assinaturas são as partes dos sinais que apresentam as características das falhas, o desempenho do sensor S1 para detecção de falhas deve melhorar, podendo ser utilizado em conjunto com o sensor S2, para um melhor desempenho de detecção de falhas utilizando-se inclusive alguma técnica de fusão de sensores.

Na Tabela 5 e na Tabela 6 são apresentados os valores de classificação referente às médias das diferenças da correlação entre o sinal candidato a assinatura de falha e os intervalos dos sinais de referência de falha e de operação normal com maior similaridade, em seguida são feitas as considerações a respeito do seu comportamento.

Tabela 5 - Classificação das diferenças dos valores de correlação entre as referências de falha e operação normal para a Falha 1.

Divisões			80				40				20				10				5			
Sensor			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Falha5	1	A	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1
Falha5	2	A	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1
Falha5	3	A	-1	1	0	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1
Falha5	4	A	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha5	5	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha5	6	A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha5	7	A	-1	1	1	0	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha5	8	A	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha5	9	A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha5	10	A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabela 6 - Classificação das diferenças entre a correlação das referências de falha (Falha 1) e de operação normal para os medidas de operação normal.

Divisões			80				40				20				10				5			
Sensor			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Normal	16	A	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1
Normal	17	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	18	A	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	19	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	20	A	-1	1	1	1	0	1	1	1	-1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
Normal	21	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	22	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	23	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1
Normal	24	A	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
Normal	25	A	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1

Para os testes com 10 e 5 divisões pode-se ver que para a grande maioria dos valores, é possível para os sensores S2, S3 e S4, diferenciar-se o comportamento de falha do comportamento de operação normal. Assim, pode-se utilizar uma combinação (fusão) das duas métricas apresentadas, e dos sensores que apresentaram melhor desempenho na diferenciação entre sinais de falha e operação normal. Permitindo a identificação de falhas com melhor desempenho que para apenas um sensor.



## 7.2 ANÁLISE DA FALHA 2

A Tabela 7 e a Tabela 8 apresentam o comportamento dos 4 sensores na presença da Falha 2 injetada no sistema, do ponto de vista da correlação cruzada.

Tabela 7 - Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha e de operação normal para a Falha 2.

Divisões		80				40				20				10				5			
Sensor		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Falha2	1 A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Falha2	2 A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Falha2	3 A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Falha2	4 A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Falha2	5 A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Falha2	6 A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Falha2	7 A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Falha2	8 A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Falha2	9 A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Falha2	10 A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1

Tabela 8- Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha (Falha 2) e de operação normal para os medidas de operação normal.

Divisões		80				40				20				10				5			
Sensor		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Normal	16 A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Normal	17 A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Normal	18 A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Normal	19 A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Normal	20 A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Normal	21 A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1
Normal	22 A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1
Normal	23 A	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1
Normal	24 A	1	1	-1	-1	1	1	0	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1
Normal	25 A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1

Analisando os valores apresentados na Tabela 7 e na Tabela 8 pode-se ver claramente que o único sensor que descreve as características tanto de falha, quanto de operação normal do sistema ao se injetar a Falhas 2 é o sensor 2, assim as assinaturas de falha que caracterizam a Falha 2 podem ser isolados a partir das medidas deste sensor.

Já a partir dos valores da Tabela 9 e da Tabela 10, que para os sensores S1, S2 e S3, de forma geral pode-se distinguir claramente o comportamento de operação normal do comportamento de falha, analisando-se a correlação entre o candidato a falha e os sinais com melhor correlação.

Tabela 9 - Classificação das diferenças dos valores de correlação entre as referências de falha e operação normal para a Falha 2.

Divisões		80				40				20				10				5			
Sensor		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Falha2	1 A	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Falha2	2 A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1
Falha2	3 A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha2	4 A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha2	5 A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha2	6 A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha2	7 A	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha2	8 A	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha2	9 A	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1
Falha2	10 A	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1

Tabela 10 - Classificação das diferenças entre a correlação das referências de falha (Falha 2) e de operação normal para os medidas de operação normal.

Divisões			80				40				20				10				5			
Sensor			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Normal	16	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1
Normal	17	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal	18	A	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1
Normal	19	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal	20	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1
Normal	21	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal	22	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal	23	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1
Normal	24	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1
Normal	25	A	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

### 7.3 ANÁLISE DA FALHA 3

A Tabela 11 e a Tabela 12 apresentam de forma resumida o comportamento dos 4 sensores na presença da Falha 3 injetada no sistema.

Tabela 11 - Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha e de operação normal para a Falha 3.

Divisões			80				40				20				10				5			
Sensor			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Falha3	1	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha3	2	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha3	3	A	1	1	0	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha3	4	A	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha3	5	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha3	6	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha3	7	A	1	1	-1	0	1	1	-1	-1	1	1	-1	0	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha3	8	A	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha3	9	A	1	1	-1	0	1	1	-1	0	1	1	-1	0	1	1	-1	-1	1	1	-1	0
Falha3	10	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1

Tabela 12 - Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha (Falha 3) e de operação normal para os medidas de operação normal.

Divisões	80				40				20				10				5			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Normal 16 A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal 17 A	-1	1	1	0	-1	1	1	0	-1	1	1	0	-1	1	1	0	-1	1	1	0
Normal 18 A	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
Normal 19 A	-1	1	1	0	-1	1	1	0	-1	1	1	0	-1	1	1	0	-1	1	1	0
Normal 20 A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal 21 A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal 22 A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal 23 A	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
Normal 24 A	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1
Normal 25 A	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1

Com exceção das últimas 3 linhas da Tabela 12 que apresentam comportamento diferente do restante das linhas da mesma tabela, da mesma forma que para a Falha 2, observando a Tabela 11 e a Tabela 12, pode-se constatar que o único sensor pelo qual pode-se distinguir o comportamento de falha, do comportamento de operação normal, para a Falha 3 é o sensor S2. Portanto as assinaturas de falha podem ser isoladas a partir das medidas deste sensor.

Verificando a Tabela 13 e a Tabela 14 pode ser visto que de forma geral, desconsiderando-se as 3 últimas linhas da Tabela 14, cujo comportamento diverge do comportamento das outras linhas, o comportamento da Falha 3 pode ser caracterizado pelos sensores S1 e S2.

Tabela 13 - Classificação das diferenças dos valores de correlação entre as referências de falha e operação normal para a Falha 3.

Divisões			80				40				20				10				5			
Sensor			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Falha3	1	A	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1
Falha3	2	A	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1
Falha3	3	A	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1
Falha3	4	A	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1
Falha3	5	A	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1
Falha3	6	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1
Falha3	7	A	1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1
Falha3	8	A	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1
Falha3	9	A	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	0	1	1	-1	1
Falha3	10	A	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1

Tabela 14 - Classificação das diferenças entre a correlação das referências de falha (Falha 3) e de operação normal para os medidas de operação normal.

Divisões			80				40				20				10				5			
Sensor			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Normal	16	A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal	17	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1
Normal	18	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1
Normal	19	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1
Normal	20	A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal	21	A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1
Normal	22	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1
Normal	23	A	1	0	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1
Normal	24	A	1	-1	1	1	1	-1	1	0	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1
Normal	25	A	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1

#### 7.4 ANÁLISE DA FALHA 4

A Tabela 15 e a Tabela 16 apresentam de forma resumida o comportamento dos 4 sensores na presença da Falha 4 injetada no sistema.

Tabela 15 - Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha e de operação normal para a Falha 4.

Divisões			80				40				20				10				5			
Sensor			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Falha4	1	A	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
Falha4	2	A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha4	3	A	1	1	0	-1	1	1	-1	-1	0	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha4	4	A	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	-1	0	1	1	-1	0
Falha4	5	A	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	-1	-1
Falha4	6	A	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	-1
Falha4	7	A	0	1	1	1	0	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Falha4	8	A	1	1	-1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	-1
Falha4	9	A	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	-1	1	1	0
Falha4	10	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabela 16 - Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha (Falha 4) e de operação normal para os medidas de operação normal.

Divisões			80				40				20				10				5			
Sensor			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Normal	16	A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	0	1	1	-1
Normal	17	A	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
Normal	18	A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1
Normal	19	A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1
Normal	20	A	-1	1	1	0	-1	1	1	0	-1	1	1	0	-1	1	1	0	-1	1	1	0
Normal	21	A	0	1	1	0	-1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0
Normal	22	A	-1	1	1	0	-1	1	1	0	-1	1	1	0	-1	1	1	0	-1	1	1	0
Normal	23	A	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal	24	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	25	A	-1	1	1	0	-1	1	1	-1	-1	1	1	0	-1	1	1	0	-1	1	1	0

Verificando-se os valores da Tabela 15 e da Tabela 16, pode-se ver que o único sensor o qual é possível distinguir as características tanto de operação normal, quanto de falha para a Falha 4 é o sensor 2. Mesmo verificando-se novamente os valores do sensor 3, para as medidas de falha, verifica-se que praticamente metade dos valores RMS da correlação cruzada entre os sinais de falha, e a referência de falha são maiores que os valores RMS da correlação entre os sinais de falha e a referência de operação normal e vice e versa. Portanto, as assinaturas de falha para a Falha 4 podem ser extraídas do sensor 2.

Observando a Tabela 17 e a

Tabela 18, verifica-se que de forma geral para os testes com 20 e 10 divisões pode diferenciar-se o comportamento de operação normal, do comportamento da Falha 4, pelos sensores S1,S2 e S3, do ponto de vista da correlação entre os candidatos a falhas e os sinais com melhor correlação, tanto de operação normal, quanto falha.

Tabela 17 - Classificação das diferenças dos valores de correlação entre as referências de falha e operação normal para a Falha 4.

Divisões			80				40				20				10				5			
Sensor			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Falha4	1	A	1	1	-1	-1	1	1	1	0	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1
Falha4	2	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1
Falha4	3	A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1
Falha4	4	A	1	1	1	-1	0	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1
Falha4	5	A	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha4	6	A	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1
Falha4	7	A	1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Falha4	8	A	1	1	1	1	0	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Falha4	9	A	-1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	0	1
Falha4	10	A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabela 18 - Classificação das diferenças entre a correlação das referências de falha (Falha 4) e de operação normal para os medidas de operação normal.

Divisões			80				40				20				10				5			
Sensor			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Normal	16	A	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal	17	A	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	18	A	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal	19	A	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal	20	A	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	21	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Normal	22	A	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal	23	A	0	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal	24	A	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal	25	A	-1	-1	1	-1	-1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1

## 7.5 ANÁLISE DA FALHA 5

A Tabela 19 e a Tabela 20 apresentam de forma resumida o comportamento dos 4 sensores na presença da Falha 5 injetada no sistema, do ponto de vista da correlação cruzada.

Tabela 19 - Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha e de operação normal para a Falha 5.

Divisões			80				40				20				10				5			
Sensor			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Falha5	1	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha5	2	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha5	3	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha5	4	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha5	5	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha5	6	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha5	7	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha5	8	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha5	9	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Falha5	10	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1

Tabela 20 - Classificação das diferenças dos valores RMS entre correlação cruzada para referência de falha (Falha 5) e de operação normal para os medidas de operação normal.

Divisões			80				40				20				10				5			
Sensor			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Normal	16	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	17	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	18	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	19	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	20	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	21	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	22	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	23	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	24	A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal	25	A	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1



Analisando-se os valores da Tabela 19 e da Tabela 20, verifica-se que apenas a partir do sensor 2 pode-se diferenciar o comportamento de falha, do comportamento de operação normal. Desta maneira, assim como para as falhas 2,3 e 4, as assinaturas de falha para a Falha 5, do ponto de vista da correlação cruzada podem ser isoladas a partir das medidas do sensor 2.

Analisado os valores da Tabela 21 e da Tabela 22, verificasse que através da correlação entre os candidatos a falha e os intervalos dos sinais de falha e operação normal com maior similaridade, pode-se diferenciar o comportamento de falha do comportamento de operação normal, para os testes com 10 e 5 divisões, em geral pelos 4 sensores.

Tabela 21 - Classificação das diferenças dos valores de correlação entre as referências de falha e operação normal para a Falha 5.

Divisões			80				40				20				10				5			
Sensor			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Falha5	1	A	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1
Falha5	2	A	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1
Falha5	3	A	-1	1	0	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1
Falha5	4	A	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha5	5	A	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha5	6	A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha5	7	A	-1	1	1	0	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha5	8	A	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha5	9	A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Falha5	10	A	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabela 22 - Classificação das diferenças entre a correlação das referências de falha (Falha 5) e de operação normal para os medidas de operação normal.

Divisões	80				40				20				10				5			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Normal 16 A	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal 17 A	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal 18 A	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal 19 A	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal 20 A	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1
Normal 21 A	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Normal 22 A	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal 23 A	0	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal 24 A	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normal 25 A	-1	-1	1	-1	-1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1

## 7.6 ASSINATURAS DE FALHA

Conhecendo o comportamento dos sensores é possível estabelecer critérios para definir quais candidatos são classificados ou não como assinatura de falha. Desta forma como critério geral para que o sinal seja classificado como assinatura de falha, o comportamento do respectivo sensor deve ser diferenciado com clareza, tanto para operação normal quanto para falha.

O segundo critério, é que os valores de correlação cruzada entre o candidato a falha e o sinal de referência de falha, seja maior do que o valor de correlação cruzada entre o candidato a falha e o sinal de operação normal ou que a correlação entre o candidato a falha e o intervalo do sinal de referência de falha que apresenta maior similaridade, seja maior do que o intervalo do sinal de referência de operação normal.

Atendendo os critérios acima, são selecionados como assinatura de falha, os candidatos que apresentarem os maiores valores de correlação ou de correlação cruzada, dentre as partições do sinal analisado.

Na Figura 24-a pode ser vista uma assinatura de falha detectada pela correlação entre os sinais do sensor S2 dos ensaios Falha403A (Figura 24-a), Falha404A (Figura 24-b) e Normal01A (Figura 24-c), ao comparar os sinais da Figura 24, percebe-se até mesmo visualmente que a similaridade entre gráficos da Falha403A e da Falha404A é maior do que a similaridade, e conseqüentemente o coeficiente de correlação entre os gráficos da Falha403A e Normal01A.

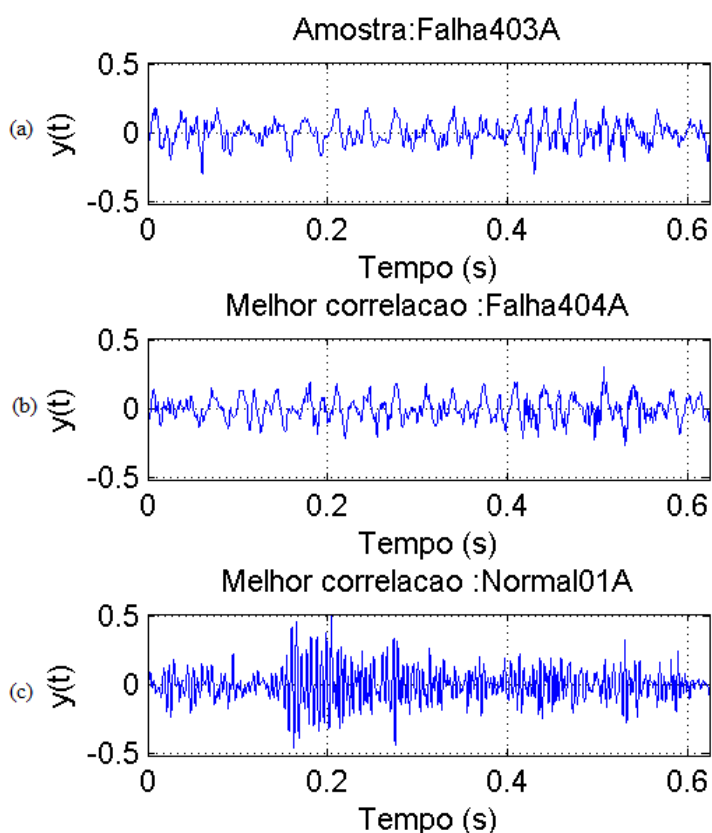


Figura 24 - (a) Assinatura de falha. (b) Intervalo do sinal de referência de falha com maior similaridade. (c) Intervalo do sinal de referência de operação normal com maior similaridade.

A Figura 25 apresenta os espectros de frequência da assinatura de falha e dos intervalos que apresentam maior correlação com o mesmo, extraídos das referências de operação normal e de falha. Pode se ver, ao verificar a figura que mesmo no domínio frequência o comportamento dos dois sinais de falha é semelhante.

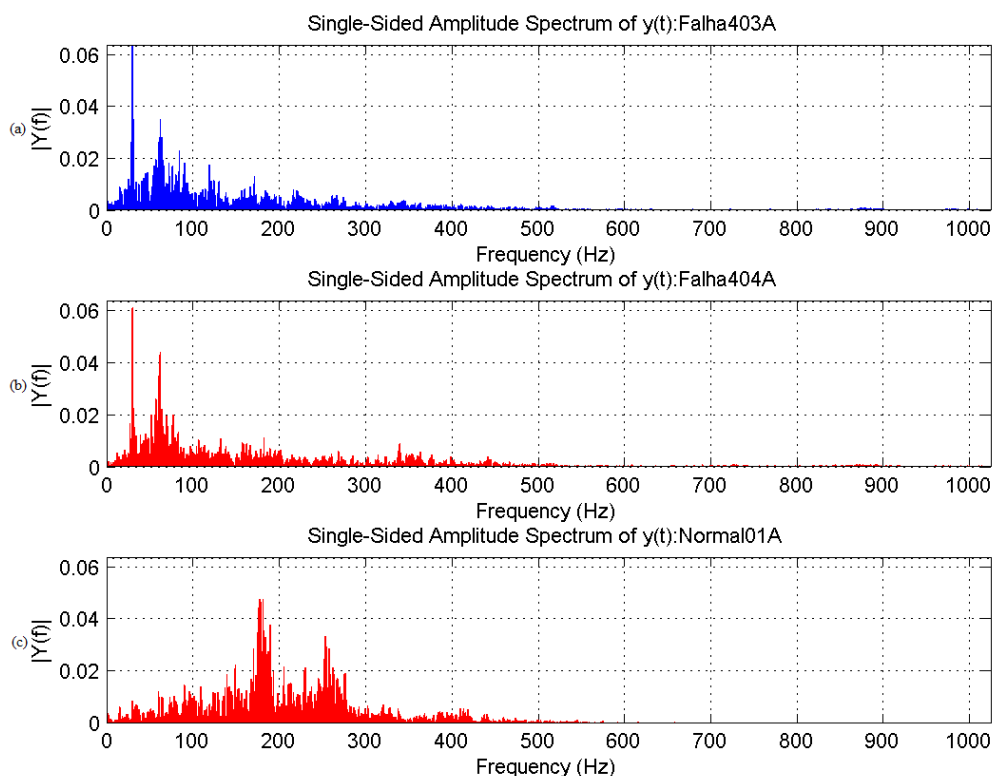


Figura 25 - (a) Espectro de frequência da assinatura de falha. (b) Espectro de frequência do intervalo do sinal de falha de referência com maior correlação. (c) Espectro de frequência do intervalo do sinal de operação normal de referência com maior correlação.

Na Figura 26-a podem ser vistas as diferenças entre os valores RMS da correlação cruzada entre os candidatos a assinatura de falha e os sinais de referência e na Figura 26-b a diferença entre o módulo do coeficiente de correlação dos candidatos a assinatura de falha e os sinais de referência com maior correlação. Estes valores são utilizados como critério para a classificação do sinal testado, como sendo uma assinatura de falha. A assinatura de falha da Figura 24 foi extraída com base nos valores mais altos de ambos os gráficos da Figura 26, onde a assinatura apresentada na Figura 24 é referente a décima partição do sinal de falha analisado. Seguindo-se o mesmo procedimento pode-se encontrar outras assinaturas de falhas.

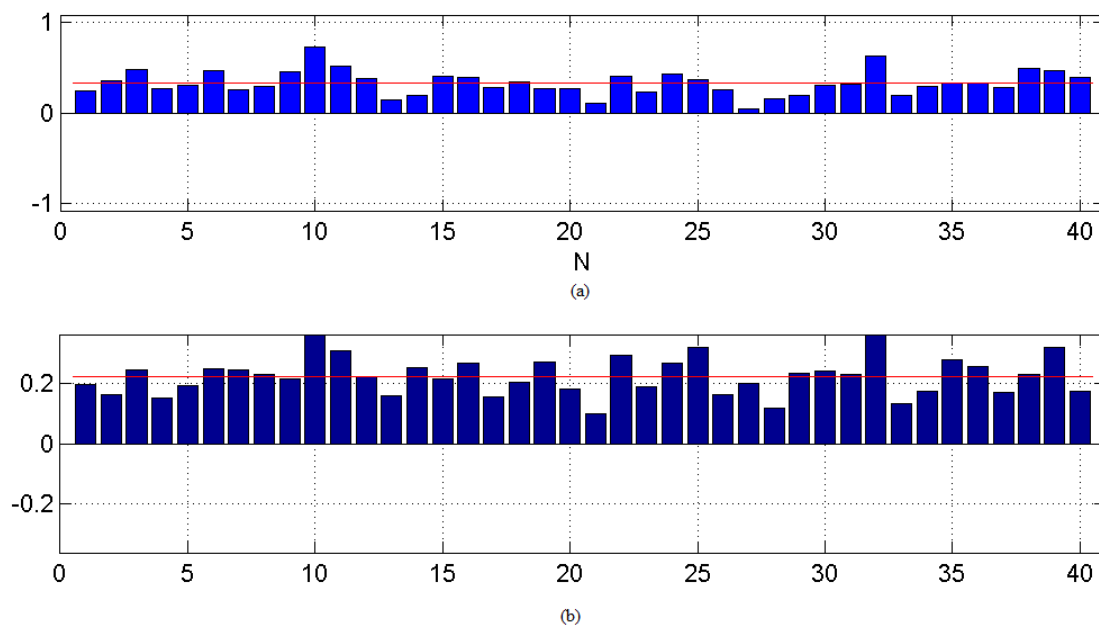


Figura 26 – (a) Diferença entre os valores RMS da correlação cruzada entre os candidatos a assinatura de falha e os sinais de referência. (b) Diferença entre o módulo do coeficiente de correlação dos candidatos a assinatura de falha e os sinais de referência com maior correlação.

O algoritmo utilizado, desenvolvido no MatLab® para a comparação dos sinais através da correlação, e criação dos gráficos apresentados neste trabalho encontra-se no APÊNDICE I.

## 8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste trabalho foi possível conhecer, diversos conceitos referentes a manutenção, tanto estratégias mais antigas, que ainda são largamente utilizadas, quanto estratégias mais modernas, ainda pouco utilizadas, como as baseadas em condição, que são a base para o desenvolvimento de sistemas de manutenção inteligente.

Também foi possível constatar, de forma prática, que para detecção de falhas através do monitoramento das condições de uma máquina ou equipamento é necessário conhecer seu funcionamento, além dos locais mais prováveis onde possam ocorrer as falhas, para possibilitar a instrumentação do tipo correto de sensores e melhor local para seu posicionamento. Os sensores instrumentados no sistema analisado foram colocados em locais onde julgou-se mais adequado para coletar os sinais de falhas, porém, sem um estudo mais aprofundado. Para um melhor desempenho, tanto na identificação das assinaturas de falha, quando na própria detecção de falhas, faz-se necessário um estudo do sistema em maior detalhe.

Tendo em vista identificar de forma simples, as assinaturas de falha, inseridas na vibração e no torque do sistema estudado neste trabalho, foi proposta uma metodologia, que utiliza a correlação dos próprios sinais de falha, em comparação com um sinal de referência de falha, sendo as duas falhas do mesmo tipo e também em comparação com um sinal de operação normal.

Os resultados obtidos neste trabalho foram satisfatórios, pois foi possível distinguir os sinais de falha dos sinais de operação normal do sistema ao se injetarem as falhas, mesmo que não tenha sido possível identificar as assinaturas de falhas para todos os sensores, com todos os tipos de falhas injetadas, o que já era esperado, pois nem todos os sensores fornecem sinais característicos de todas as falhas possíveis no sistema.

Assim os conceitos vistos e utilizados neste trabalho mesmo que de forma básica abrem caminho para o desenvolvimento, mesmo que de forma simples, de um sistema de detecção de falhas. Com um estudo mais aprofundado do sistema utilizado, considerando um posicionamento otimizado dos sensores, e um melhor condicionamento para a medição do torque, por exemplo, podem-se obter resultados ainda melhores que os que foram obtidos neste trabalho, também agregando alguma técnica de fusão de sensores.

Como sugestão para melhorias em trabalhos futuros pode-se apontar a utilização da metodologia criada neste trabalho para identificar os melhores locais para a instalação dos sensores de vibração, da mesma forma que foi identificado em todos os casos que para o sensor S2 pode-se diferenciar o comportamento de operação normal do comportamento de falha. Outra sugestão para melhorias futuras é avaliar a correlação entre os diferentes tipos de falha verificando se é possível distinguir, além do comportamento de falha do comportamento de operação normal, o comportamento dos diferentes tipos de falhas. E ainda, como possibilidade de melhoria, pode ser apontada a inclusão de uma rotina que classifique automaticamente as melhores assinaturas das falhas e alimente automaticamente um banco de dados de falhas do sistema em análise.

## REFERÊNCIAS

CARVAJAR, R. E. G. **Sobre Técnicas para Manutenção e Diagnóstico Inteligente de Dispositivos Mecatrônicos. Estudo de Caso utilizando Cálculo de Ordem Fracionária.** Comissão de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. 2011.

ALWI, H.; EDWARDS, C; TAN, C. P. **Fault Detection and Fault-Tolerant Control Using Sliding Modes.** Springer. P. 7. 2011.

ENDRENYI, J. et al. The Present Status of Maintenance Strategies and the Impact of Maintenance on Reliability. **IEEE Transactions on Power System**, v. 16, n. 4, p. 638-646, Nov. 2001.

FEDELE, L. **Methodologies and Techniques for Advanced Maintenance.** Cap. 4 e 5. Springer. 2011

LY, C. et al. Fault Diagnosis and Failure Prognosis for Engineering System: A Global Perspective. **5th Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering.** p. 108-115. Aug. 2009.

SUN, Q. Sensor Fusion for Vehicle Health Monitoring and Degradation Detection. **ISIF.** p. 1422-1427. 2002.

DEMPSEY, P. J.; HANDSCHUH, R. F.; AFJEH, A. A. Decision fusion Analysis Detects Spiral Bevel Gear Damage. **IEEE AES Systems Magazine.** p. 11-17. Set. 2003.

LUO, R. C.; YIH, C. C; SU, K. L. Multisensor Fusion and Integration: Approaches, Applications, and Future Research Directions. **IEEE Sensor Journal.** v.2, n.2, Abr. 2002.

LI, L.; DU, K.; YANG, Y. M. A Fast Development Framework for Condition-Based Maintenance Systems. **ICMEE,** p. 70-74. 2010.

YI-BO, L.; SEN-YUE, Z.; YUN-HONG, G. The Research Status of Complex System Integrated Health Management System (CSIHM) Architecture. **IEEE IEEM.** p. 1908-1914. 2007

JAYASWAL, P.; WADHWANI, A. K.; MULCHANDANI, K. B. Machine fault signature analysis. **Journal of Rotating Machinery.** 10 p. 2008.

FORRESTER, B. D.; **Advanced Vibration Analysis Techniques for Fault Detection and Diagnosis in Geared Transmission Systems.** 303 p. Tese de doutorado Swinburne University of Technology, Australia, 1996.

RAOL, J. R. **Multi-Sensor Data Fusion with Matlab®,** Cap. 2, CRC Press, 2010



BOSA, J. L. **Sistema Embarcado para a Manutenção Inteligente de Atuadores Elétricos**. 169 p., Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Computação, Instituto de Informática, UFRGS, 2009.

JOHNSON, K. L. **Watchdog Agent Toolbox – Project Report**. , IMS, 2006

IMS CENTER. **Watchdog Agent™ Toolbox Documentation**. 65 p. Mai. 2007.

LATHI, B., P; **Modern Digital and Analog Communication Systems**. Oxford University Press, USA, ed. 3, 800 p. Mar. 1998.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V., J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. V. 2, 672 p. ed. LTC. 2007.

KISTLER. **PiezoStar® Accelerometers – Instruction Manual**. 32 p. 2006.

COESTER AUTOMAÇÃO. **Manual CSR 6 – CSR 16**. 28 p. Jul.2009.

COESTER AUTOMAÇÃO. **Atuadores Elétricos Para Automação de Válvulas**. 22 p. 2011.

## APÊNDICE I : CÓDIGO DO ALGORITMO UTILIZADO NO MATLAB

```

clc;
close all;
clear all;
divisoes = 80;%80,40,20,10 ou 5.
for AbFech = 0:1 %0 = Abertura, 1 = Fechamento.
for sensor = 1:4 %S1 até S4.
for falha = 1:5 %
pastaFalha = strcat('Falha',int2str(falha));
normal =1;
for medida =1:10 %Número do ensaio, de 1 a té 25.
    if(AbFech==0)
        if(medida>9)
            nome1 = strcat('Falha',int2str(falha),int2str(medida),'A');
        else
            nome1 =
strcat('Falha',int2str(falha),'0',int2str(medida),'A');
        end
        if(medida+1>9)
            nome2 = strcat('Falha',int2str(falha),int2str(medida+1),'A');
        else
            nome2 =
strcat('Falha',int2str(falha),'0',int2str(medida+1),'A');
        end
        if(normal>9)
            nome3 = strcat('Normal',int2str(normal),'A');
        else
            nome3 = strcat('Normal0',int2str(normal),'A');
        end
        if(26-normal>9)
            %nome1 = strcat('Normal',int2str(26-normal),'A');%Normal
        else
            %nome1 = strcat('Normal0',int2str(26-normal),'A');%Normal
        end
    else
        if(medida>9)
            nome1 = strcat('Falha',int2str(falha),int2str(medida),'F');
        else
            nome1 =
strcat('Falha',int2str(falha),'0',int2str(medida),'F');
        end
        if(medida+1>9)
            nome2 = strcat('Falha',int2str(falha),int2str(medida+1),'F');
        else
            nome2 =
strcat('Falha',int2str(falha),'0',int2str(medida+1),'F');
        end
        if(normal>9)
            nome3 = strcat('Normal',int2str(normal),'F');
        else
            nome3 = strcat('Normal0',int2str(normal),'F');
        end
        if(26-normal>9)
            %nome1 = strcat('Normal',int2str(26-normal),'F');%Normal
        else
            %nome1 = strcat('Normal0',int2str(26-normal),'F');%Normal
        end
    end
end
end

```

```

%file1 = strcat('C:\MEDIDAS TCC\', 'Normal', '\', nome1, '.xlsx');%arquivo
para partição de amostras
file1 = strcat('C:\MEDIDAS TCC\', pastaFalha, '\', nome1, '.xlsx');%arquivo
para partição de amostras
file2 = strcat('C:\MEDIDAS TCC\', pastaFalha, '\', nome2, '.xlsx');%arquivo
para varredura
file3 = strcat('C:\MEDIDAS TCC\Normal\', nome3, '.xlsx');%arquivo para
varredura
close all;

Fs = 2048;%Taxa de amostragem das medidas
tamanho = 25*Fs;%Tamanho do sinal analisado.

[num1 text1 raw1] = xlsread(cast(file1, 'char'));
[num2 text2 raw2] = xlsread(cast(file2, 'char'));
[num3 text3 raw3] = xlsread(cast(file3, 'char'));

tamanhoDivisao = tamanho/divisoes;
inicio1 = (length(num1)-tamanho)/2;
inicio2 = (length(num2)-tamanho)/2;
fim2 = inicio2 + tamanho -1;
inicio3 = (length(num3)-tamanho)/2;
fim3 = inicio3 + tamanho -1;
if(inicio1<1 || inicio2<1 || inicio3<1)
continue
end
amostraComparacao12 = num2(inicio2:fim2, sensor);
amostraComparacao12Fim=num2(inicio2:length(num2), sensor);
amostraComparacao13 = num3(inicio3:fim3, sensor);
amostraComparacao13Fim=num3(inicio3:length(num3), sensor);
t2 = 0:1/Fs:(tamanho-1)/Fs;
nomeFig = strcat( nome1, 'x', nome2, 'x', nome3 );
fTif=fullfile('C:\Users\Klaus\Analises\tif', int2str(divisoes), '\', nomeFig
);
if (exist(fTif) == 0)%Se o caminho não existe ele é criado.
mkdir (fTif);
end
fFigure=fullfile('C:\Users\Klaus\Analises\figure', int2str(divisoes), '\', n
omeFig);
if (exist(fFigure) == 0)%Se o caminho não existe ele é criado.
mkdir (fFigure);
end
for k =1:divisoes
posicaoInicial1 = inicio1 + (k-1)*tamanhoDivisao;
posicaoFinal1 = posicaoInicial1 + tamanhoDivisao - 1;
amostra1 = num1(posicaoInicial1:posicaoFinal1, sensor);
t = 0:1/2048:(tamanhoDivisao-1)/2048;
Rxy2=xcorr(amostraComparacao12, amostra1);
Rxy3=xcorr(amostraComparacao13, amostra1);
RxyValido2 = (Rxy2(tamanho:2*tamanho-1));
RMS2=sqrt(sum(RxyValido2.*RxyValido2)/length(RxyValido2));
RMS2Matriz(k)=RMS2;
RxyValido3 = (Rxy3(tamanho:2*tamanho-1));
RMS3=sqrt(sum(RxyValido3.*RxyValido3)/length(RxyValido3));
RMS3Matriz(k)=RMS3;
mx2 = max(abs(RxyValido2));
[ra2, ca2] = find(abs(RxyValido2)==max(abs(RxyValido2(:)))));
mx3 = max(abs(RxyValido3));
[ra3, ca3] = find(abs(RxyValido3)==max(abs(RxyValido3(:)))));
posicaoRelativa1 = posicaoInicial1 - inicio1 +1;
x2Similar = amostraComparacao12Fim(ra2:ra2+tamanhoDivisao-1);

```

```

corrFinal2 = corr(x2Similar, amostral);
corrFinalMatriz2(k) = corrFinal2;
x3Similar = amostraComparacao13Fim(ra3:ra3+tamanhodivisao-1);
corrFinal3 = corr(x3Similar, amostral);
corrFinalMatriz3(k) = corrFinal3;
ymax3 = max([max(abs(RxyValido2)), max(abs(RxyValido3))]);
ymax2 =
max([max(abs(amostraComparacao12)), max(abs(amostraComparacao13))]);
ymax =
max([max(abs(amostral)), max(abs(x3Similar)), max(abs(x2Similar))]);
subplot(4,2,3); plot(t, x2Similar); axis([0 max(t) -ymax ymax]); grid on;
title(strcat('Melhor correlacao : ', nome2))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('y(t)')
subplot(4,2,5); plot(t, x3Similar); axis([0 max(t) -ymax ymax]); grid on;
title(strcat('Melhor correlacao : ', nome3))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('y(t)')
subplot(4,2,1); plot(t, amostral); axis([0 max(t) -ymax ymax]); grid on;
title(strcat('Amostra: ', nome1))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('y(t)')
subplot(4,2,2); plot(t2, amostraComparacao12); axis([0 max(t2) -ymax2
ymax2]); grid on;
title(nome2)
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('y(t)')
subplot(4,2,4); plot(t2, amostraComparacao13); axis([0 max(t2) -ymax2
ymax2]); grid on;
title(nome3)
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('y(t)')
subplot(4,2,6); plot(t2, RxyValido2, t2, ones(1, length(t2)).*RMS2, 'r');
axis([0 max(t2) -ymax3 ymax3]); grid on;
title(strcat('Corelacao cruzada ', nome2, ' x Amostra'))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('y(t)')
subplot(4,2,8); plot(t2, RxyValido3, t2, ones(1, length(t2)).*RMS3, 'r');
axis([0 max(t2) -ymax3 ymax3]); grid on;
title(strcat('Corelacao cruzada ', nome3, ' x Amostra'))
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('y(t)')

saveas(gca, strcat(fFigure, '\', 'S', int2str(sensor), nomeFig, int2str(k), '.fi
g'), 'fig');

saveas(gca, strcat(fTif, '\', 'S', int2str(sensor), nomeFig, int2str(k), '.tif')
, 'tif');
close
figure(1000+k);
set(gcf, 'Units', 'normalized', 'Position', [0.00 0.032 1.00 0.895])
fourier1 = GrafFourier(amostral, 2048, 'b', nome1, 3, 1, 1);
fourier2 = GrafFourier(x2Similar, 2048, 'r', nome2, 3, 1, 2);
fourier3 = GrafFourier(x3Similar, 2048, 'r', nome3, 3, 1, 3);
maxfourier = max([max(abs(fourier1(:,1))) max(abs(fourier2(:,1)))
max(abs(fourier3(:,1))))]);
subplot(3,1,1); axis([0 max(fourier1(:,2)) 0 maxfourier]);
subplot(3,1,2); axis([0 max(fourier2(:,2)) 0 maxfourier]);
subplot(3,1,3); axis([0 max(fourier3(:,2)) 0 maxfourier]);

```

```

saveas(gca, strcat(fFigure, '\', 'S', int2str(sensor), nomeFig, int2str(k), 'fourier.fig'), 'fig');

saveas(gca, strcat(fTif, '\', 'S', int2str(sensor), nomeFig, int2str(k), 'fourier.tif'), 'tif');
close
end
figure(2000);
set(gcf, 'Units', 'normalized', 'Position', [0.00 0.032 1.00 0.895]);
[ra4, ca4] = find(abs(corrFinalMatriz2)==max(abs(corrFinalMatriz2(:))));
[ra5, ca5] = find(abs(corrFinalMatriz3)==max(abs(corrFinalMatriz3(:))));
diferenca = abs(corrFinalMatriz2)-abs(corrFinalMatriz3);
ymax4 = max([max(abs(corrFinalMatriz2)), max(abs(corrFinalMatriz3))]);
subplot(3,1,1);bar(abs(corrFinalMatriz2));axis([0 length(corrFinalMatriz2)+1 -ymax4 ymax4]);grid on;
subplot(3,1,2);bar(abs(corrFinalMatriz3), 'r');axis([0 length(corrFinalMatriz3)+1 -ymax4 ymax4]);grid on;
ymax5 = max(abs(diferenca));
subplot(3,1,3);bar(diferenca);axis([0 length(diferenca)+1 -ymax5 ymax5]);grid on;
hold on;
plot(0.5:length(diferenca)+0.5, ones(1, length(diferenca)+1) .* mean(diferenca), 'r')
hold off;
saveas(gca, strcat(fFigure, '\', 'S', int2str(sensor), nomeFig, 'CorrAbsDif', '.fig'), 'fig');
saveas(gca, strcat(fTif, '\', 'S', int2str(sensor), nomeFig, 'CorrAbsDif', '.tif'), 'tif');
close;
figure(2002);
set(gcf, 'Units', 'normalized', 'Position', [0.00 0.032 1.00 0.895]);
subplot(2,1,1);bar(corrFinalMatriz2);axis([0 length(corrFinalMatriz2)+1 -ymax4 ymax4]);grid on;
subplot(2,1,2);bar(corrFinalMatriz3, 'r');axis([0 length(corrFinalMatriz3)+1 -ymax4 ymax4]);grid on;
saveas(gca, strcat(fFigure, '\', 'S', int2str(sensor), nomeFig, 'Corr', '.fig'), 'fig');
saveas(gca, strcat(fTif, '\', 'S', int2str(sensor), nomeFig, 'Corr', '.tif'), 'tif');
close;
figure(2001);
set(gcf, 'Units', 'normalized', 'Position', [0.00 0.032 1.00 0.895]);
subplot(3,1,1);bar(1:divisoos, RMS2Matriz, 'b');axis([0 divisoos+1 0 max([max(RMS2Matriz) max(RMS3Matriz)])]);grid on;
title(strcat('Medias RMS da Correlacao Cruzada : ', nome2));
xlabel('N');
ylabel('X-Corr RMS');
subplot(3,1,2);bar(1:divisoos, RMS3Matriz, 'r');axis([0 divisoos+1 0 max([max(RMS2Matriz) max(RMS3Matriz)])]);grid on;
title(strcat('Medias RMS da Correlacao Cruzada : ', nome3));
xlabel('N');
ylabel('X-Corr RMS');
dif23 = RMS2Matriz-RMS3Matriz;
max23 = max(abs(dif23));
subplot(3,1,3);bar(1:divisoos, dif23, 'b');axis([0 divisoos+1 -max([max(RMS2Matriz) max(RMS3Matriz)]) +max([max(RMS2Matriz) max(RMS3Matriz)])]);grid on;
hold on;
plot(0.5:divisoos+0.5, ones(1, divisoos+1) .* mean(dif23), 'r');
hold off;

```

```

title(strcat('Dif. medias RMS da Correlacao Cruzada : ',nome2,' e
',nome3));
xlabel('N');
ylabel('X-Corr RMS');
saveas(gca, strcat(fFigure, '\', 'S', int2str(sensor), nomeFig, 'xCorrRMS', '.fi
g'), 'fig');
saveas(gca, strcat(fTif, '\', 'S', int2str(sensor), nomeFig, 'xCorrRMS', '.tif')
, 'tif');
close;
normal = normal+1;
if(normal>25)
normal=1;
end
end
end
end
end
end

```

```

function [ output_args ] = GrafFourier(
sinal, Fs, cor, titulo, rows, columns, position)
L = length(sinal);
NFFT = 2^nextpow2(L);
fftY = fft(sinal, NFFT)/L;
f = Fs/2*linspace(0, 1, NFFT/2+1);
subplot(rows, columns, position); bar(f, 2*abs(fftY(1:NFFT/2+1)), cor);
grid on;
title(strcat('Single-Sided Amplitude Spectrum of y(t): ', titulo))
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('|Y(f)|')
output_args(:, 1) = 2*abs(fftY(1:NFFT/2+1));
output_args(:, 2) = f;
end

```